

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de **Génie Civil et d'Architecture**

Département de **Génie Civil**



# THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT LMD

Filière : **Génie civil**

Spécialité : **Matériaux en Génie civil**

Par

**EULDJI Meriem**

Thème :

---

***Elaboration et caractérisation d'un matériau de réparation des structures en béton***

---

Soutenue le 08/07/2025 , devant le jury composé de :

<b>LAMRI Belkacem</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université UHBC Chlef</b>	<b>Président</b>
<b>EZZIANE Karim</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université UHBC Chlef</b>	<b>Examineur</b>
<b>BOUKENDAKDJ Othmane</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université de Médéa</b>	<b>Examineur</b>
<b>KOUIDER DJELLOUL Omar</b>	<b>MCA</b>	<b>Université de Khemis Miliana</b>	<b>Examineur</b>
<b>GHRICI Mohamed</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université UHBC Chlef</b>	<b>Rapporteur.</b>

## **Dédicaces**

*Je dédie le fruit de ce travail ...*

*Spécialement à mes parents, à ma petite famille, à ma grande famille, à mes amis et aux gens qui m'ont encouragé.*

# **Remerciements**

Je remercie Allah le tout puissant de m'avoir accordé patience, courage et santé pour l'élaboration et la finalisation de cette thèse de doctorat.

Mes remerciements les plus sincères vont à mon directeur de thèse, Pr. GHRICI Mohamed, de l'Université de Chlef et Directeur du Laboratoire de Géomatériaux. Sa confiance, son expertise et sa disponibilité m'ont permis d'élargir mes connaissances et d'affiner ma réflexion. Son enthousiasme communicatif m'a révélé la passion du monde de la recherche. Ses relectures attentives et ses corrections judicieuses ont grandement contribué à la qualité de ce travail. Cette thèse lui doit beaucoup.

Je tiens à remercier chaleureusement Pr. LAMRI Belkacem de l'Université de Chlef, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Son dévouement et ses précieux conseils ont été d'une grande valeur.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance aux membres éminents du jury : Pr. EZZIANE Karim de l'Université de Chlef, Pr. BOUKENDAKDJI Othmane de l'Université de Médéa, ainsi que Dr. KOUIDER DJELLOUL Omar, Maître de conférences à l'Université de Khemis Miliana. Leur acceptation d'examiner ce travail, leur expertise pointue et leur regard critique ont considérablement enrichi cette thèse et m'ont permis d'affiner ma réflexion.

J'exprime ma profonde gratitude au Dr. IRKI Ilyes, Maître de conférences à l'Université de Tipaza et Dr CHOUCHA Said. Leurs conseils avisés et leur soutien constant ont été des atouts précieux tout au long de ce parcours doctoral.

Je tiens à saluer l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil, dont les enseignements et le soutien ont été essentiels à ma formation et à l'aboutissement de cette thèse.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à ma famille et mes amis pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leurs encouragements constants. Votre présence à mes côtés a été une source inestimable de motivation et de réconfort.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, je vous adresse mes sincères remerciements.

## ***Abstract***

Our study focuses on the exploitation of the supplementary cementitious materials such as silicate fume and its use in the formulation of fiber reinforced self-consolidating repair mortars (FR-SCRMS), which can be used in the repair of local concrete structures. For this purpose, four mortar mixtures containing 5%, 10%, 15% and 20% silica fume as cement replacements were prepared. The performance of these mortars is compared to control mortar (MAPF0) containing only Portland cement. All these mortar mixtures were prepared with a total binder content of 767 kg/m<sup>3</sup>, a water/binder ratio of 0.45 and a volume fraction of polypropylene fibers of 0.2%. The influence of silica fume on the performance of FRSCRMS has been studied experimentally in the fresh state (slump flow, flow time) and in the hardened state (compressive strength, flexural strength, Young dynamic modulus, shrinkage, water absorption and adhesion by flexural Bond Strength). The results reveal that structural repair mortars containing 10 % silica fume conform to the performance requirements of class R4 materials (European Standard EN 1504-3) and could be used in repair applications.

**Keywords:** Self-consolidating repair mortar (SCRM), Silica fume, Polypropylene fibers, Flowability, Mechanical properties, Bond flexural strength.

## *Résumé*

Notre travail de thèse se concentre sur l'utilisation de matériaux cimentaires supplémentaires, tels que la fumée de silice, et leur incorporation dans la formulation de mortiers de réparation auto-compactants renforcés par des fibres (MAPFs), destinés à la réparation de structures en béton local. À cette fin, quatre mélanges de mortier contenant respectivement 5%, 10%, 15% et 20% de fumée de silice en remplacement du ciment ont été élaborés. Les performances de ces mortiers ont été comparées à celles d'un mortier témoin (MAPF0) ne contenant que du ciment Portland. Tous ces mélanges de mortier ont été préparés avec un contenu total en liant de 767 kg/m<sup>3</sup>, un rapport eau/liant de 0,45 et une fraction volumique de fibres en polypropylène de 0,2%. L'influence de la fumée de silice sur les performances des MAPFs a été étudiée expérimentalement à l'état frais (étalement, temps d'écoulement) et à l'état durci (résistance à la compression, résistance à la flexion, module dynamique de Young, retrait, absorption d'eau et adhésion par la résistance à la flexion). Les résultats montrent que les mortiers de réparation structurale contenant 10% de fumée de silice répondent aux exigences de performance des matériaux de classe R4 (Norme européenne EN 1504-3) et pourraient être utilisés dans des applications de réparation.

**Mots Clés :** Mortier de réparation auto-plaçant fibré (MAPF), fumée de silice, fibres de polypropylène, ouvrabilité, performance mécanique, résistance à la flexion adhésive.

## ملخص

ترتكز هذه الدراسة على استغلال المواد الإسمنتية المضافة، وعلى وجه الخصوص أدخنة السيليكا، واستخدامها في تطوير ملاطّات إصلاح ذاتية الانسياب مدعّمة بالألياف (MAPFs) والمخصصة لأعمال ترميم المنشآت الخرسانية. ولتحقيق هذا الغرض، تم إعداد أربع خلطات من الملاط تحتوي على نسب متفاوتة من أدخنة السيليكا بلغت 5%، 15%، 15% و20% كبديل جزئي للإسمنت. تمت مقارنة خصائص هذه الخلطات بملاط مرجعي يحتوي على الإسمنت البورتلاندي فقط. جميع الخلطات أُجزت بمحتوى إجمالي من المواد الرابطة قدره 767 كغ/م<sup>3</sup>، ونسبة ماء إلى رابط تبلغ 0.45، مع نسبة حجمية من ألياف البولي بروبيلين قدرها 0.2%.

تمت دراسة تأثير إضافة أدخنة السيليكا على أداء هذه الملاطّات تجريبياً، سواء في الحالة الطرية من خلال قياس قابلية الانسياب وزمن الجريان، أو في الحالة المتصلّبة من خلال تقييم مقاومة الضغط، ومقاومة الانحناء، ومعامل المرونة الديناميكي، والانكماش، وامتصاص الماء، وقوة الالتصاق بالانحناء.

وقد أظهرت النتائج أن الملاطّات الإصلاحية الهيكلية المحتوية على 10% من أدخنة السيليكا تفي بمتطلبات الأداء الخاصة بمواد الفئة R4 وفقاً للمعيار الأوروبي EN 1504-3، مما يؤهلها للاستخدام في تطبيقات الإصلاح الإنشائي.

**كلمات مفتاحية :** ملاط إصلاح ذاتي الانسياب (MAPF)، أدخنة السيليكا، قابلية التشغيل، الخصائص الميكانيكية، مقاومة الالتصاق بالانحناء.

# **TABLE DES MATIERES**

Liste des Figures .....	VI
Liste des Tableaux .....	XI
Liste d'abréviations.....	XIII

## **Introduction Générale**

Généralités.....	2
But de travail .....	3
Plan des chapitres.....	4

## **Chapitre 1**

### **Pathologies des structures en béton**

1.1 Introduction .....	6
1.2 Les pathologies d'origine chimique.....	6
1.2.1 La carbonatation et la corrosion .....	7
1.2.2 Les réactions sulfatiques .....	9
1.2.3 L'alcali-réactio.....	10
1.2.3.1 Les réactions alcali-silice .....	10
1.2.3.2 Les réactions alcali-carbonate.....	11
1.3 Les pathologies d'origine physique .....	12
1.3.1 Le gel et dégel.....	12
1.3.2 Retrait.....	13
1.3.3 Le choc .....	14
1.3.4 Fatigue.....	15
1.3.5 L'incendie.....	16
1.4 Diagnostic de la dégradation du béton.....	17
1.4.1 Introduction .....	17
1.4.2 Méthodologie d'Intervention .....	18
1.4.3 Les principales étapes d'un diagnostic.....	19
1.4.4 Méthodes et techniques non destructives .....	20

1.5 Traitement du Béton .....	23
1.6 Conclusions .....	23

## Chapitre 2

### **Matériaux et méthodes de réparation des structures en béton**

2.1 Introduction .....	25
2.2 Procédure générale de réparation .....	25
2.2.1 Inspection et suivi .....	26
2.2.2 Choix du matériau de réparation.....	27
2.2.2.1 Composites renforcés de fibres (depuis les années 1980) .....	27
2.2.2.2 Composites polymères (FRP - Fiber Reinforced Polymers) .....	28
2.2.2.3 Composites à base de ciment.....	29
2.2.2.4 Composites hybrides .....	29
2.2.2.5 Autres matériaux innovants .....	29
2.2.3 Choix de la méthode de réparation .....	30
2.2.3.1 Facteurs influençant le choix de la méthode de réparation .....	30
2.2.4 Préparation de la Surface.....	31
2.2.4.1 Élimination du Béton Dégradé .....	31
2.2.4.2 Choix d'une Méthode de Reprofilage (si nécessaire).....	32
2.2.4.3 Polissage et Rugosité de la Surface.....	33
2.2.4.4 Nettoyage .....	34
2.2.5 Conception de la Réparation .....	34
2.2.6 Application du Matériau de Réparation .....	36
2.2.6.1 Choix d'une méthode de réparation .....	36
2.2.6.2 Méthodes d'application disponibles.....	37
2.3 Les mortiers de réparation selon la norme EN 1504 .....	39
2.4 Conclusions .....	41

## Chapitre 3

### Effets de la fume de silice sur les Propriétés des mortiers et Bétons

3.1 Introduction .....	44
3.2 Effet de la fume de silice sur les propriétés du béton à l'état frais .....	44
3.2.1 Ouvrabilité.....	44
3.2.2 Chaleur d'hydratation.....	47
3.3 Effet de la fume de silice sur les propriétés du béton à l'état durci .....	48
3.3.1 Résistances mécaniques .....	48
3.3.1.1 Résistance à la compression .....	48
3.3.1.2 Résistance à la Flexion .....	50
3.3.1.3 Module d'élasticité .....	51
3.3.2 Retrait et fluage.....	54
3.4 Effet de la fume de silice sur la durabilité du béton .....	56
3.4.1 La porosité et la perméabilité .....	56
3.4.2 Résistance aux sulfates .....	58
3.4.3 Carbonatation.....	60
3.4.4 Adhésion mécanique.....	62
3.4.5 Adhésion spécifique.....	63
3.4.6 Différents types de tests pour quantifier l'adhérence .....	63
3.5 Conclusion .....	69

## Chapitre 4

### Caractérisation des matériaux et méthodologies

4.1 Introduction .....	71
4.2 Programme expérimentale .....	71
4.3 Proportions des mélanges de mortiers et du béton de substrat.....	74
4.3.1 Mortier de réparation .....	74
4.3.2 Béton et mortier de substrat.....	76
4.3.3 Séquences de malaxage des mélanges de mortier .....	76
4.4 Méthodes d'essais pour le béton de substrat et les mortiers de réparation .....	77
4.4.1 Essai d'étalement des mortiers au mini cône .....	78
4.4.2 Temps d'écoulement des mortiers .....	78

4.4.3 Consistance du béton de substrat.....	79
4.4.4 Essai de compression et de traction par flexion des mortiers.....	80
4.4.5 Essai de compression et de traction par flexion du béton de substrat.....	81
4.4.6 Module d'élasticité dynamique ED des mortiers.....	82
4.4.7 Variations dimensionnelles des mortiers ( Retrait).....	83
4.5 Propriétés de durabilité .....	85
4.5.1 Absorption en eau .....	85
4.5.2 Compatibilité des mortiers de réparation .....	86
4.5.2.1 La résistance à la traction par flexion à l'adhésion des mortiers de réparation (MAPFs) .....	86
4.5.2.1 Effet Poutre réparée par une couche de mortier (essai de traction par flexion 4 points) .....	86
4.6 Récapitulation des essais faits a l'état frais.....	91
4.7 Récapitulation des essais faits a l'état durci.....	92

## Chapitre 5

### Présentation et discussions des résultats

5.1 Introduction.....	94
5.2 Comportement du béton et du mortier de substrat .....	94
5.3 Etude des propriétés rhéologiques et fraîches des MAPFs .....	95
5.3.1 Essai d'étalement au mini-cône (Mini-slump flow) .....	96
5.3.2 Temps d'écoulement (Mini V-funnel flow time) des MAPFs .....	97
5.4 Etude des propriétés des MAPFs à l'état durci .....	99
5.4.1 Resistances mécaniques .....	99
5.4.2 Module d'élasticité dynamique (ED) .....	103
5.4.3 Variations dimensionnelles .....	106
5.5 Propriétés de durabilité .....	108
5.5.1 Absorption d'eau par capillarité.....	108
5.5.2 Compatibilité des mortiers de réparation .....	109
5.5.2.1 Poutre réparée par une couche de mortier (essai de traction flexion 4 points) .....	109

5.5.2.2 La résistance à la traction par flexion influençant l'adhésion des mortiers de réparation auto-plaçants (MAPFs) .....	112
5.6 Conclusions .....	114

## **Conclusion Générale et Perspectives**

Conclusion Générale et Recommandations .....	118
--	-----

## **Références Bibliographiques**

Références Bibliographiques .....	120
-----------------------------------	-----

# Liste des Figures

<b>Figure 1.1</b>	Détérioration du béton armé-----	6
<b>Figure 1.2</b>	Mécanisme de corrosion de l'acier dans le béton -----	7
<b>Figure 1.3</b>	Processus de carbonatation de la portlandite -----	8
<b>Figure 1.4</b>	Structure en béton armé sérieusement altérée par les sulfates -----	9
<b>Figure 1.5</b>	Effet de l'alcali-silice sur une barrière en béton -----	11
<b>Figure 1.6</b>	Effet de l'alcali-carbonate sur un mur d'entrée d'un tunnel -----	11
<b>Figure 1.7</b>	Altération d'un ouvrage par des cycles de gel/dégel -----	12
<b>Figure 1.8</b>	Fissures de retrait dans les dalles de béton-----	13
<b>Figure 1.9</b>	Motif typique de fissures de retrait plastique dans une dalle de béton-----	14
<b>Figure 1.10</b>	Ouvrage en béton altéré sous l'effet des chocs -----	15
<b>Figure 1.11</b>	Ouvrage en béton altéré sous l'effet des chocs -----	16
<b>Figure 1.12</b>	Structure en béton armé dégradée par le feu -----	16
<b>Figure 1.13</b>	Différentes causes probables d'endommagement des structures en béton armé avant, pendant et après la réalisation-----	18
<b>Figure 1.14</b>	Stratégie d'intervention sur un ouvrage en béton armé-----	19
<b>Figure 1.15</b>	Schéma des étapes de diagnostic d'un ouvrage en béton-----	20
<b>Figure 1.16</b>	Classification générale des méthodes et techniques non destructives utiles dans le diagnostic des structures en béton armé-----	21

<b>Figure 1.17</b> Idée de la méthode sismique parallèle : a) Ensemble de mesure b) Procédure d'essai typique c) Schéma du test d) Temps de passage de l'onde acoustique enregistré-----	22
<b>Figure 2.1</b> Performance des matériaux de construction, des composants des structures dans le tems-----	25
<b>Figure 2.2</b> Schéma des composites renforcés de fibres -----	28
<b>Figure 2.3</b> Enlèvement du béton selon la norme EN1504-10 -----	32
<b>Figure 2.4</b> Tour de refroidissement hyperbolique nécessite un remplacement du Béton -----	32
<b>Figure 2.5</b> Préparation de surface (marteau pneumatique)-----	33
<b>Figure 2.6</b> Préparation de surface (hydro-démolition) -----	33
<b>Figure 2.7</b> Nettoyage des barres d'armature-----	34
<b>Figure 2.8</b> Nettoyage des barres d'armature-----	34
<b>Figure 3.1</b> Effet de FS sur l'ouvrabilité des bétons-----	45
<b>Figure 3.2</b> Effet de FS sur l'ouvrabilité des bétons-----	46
<b>Figure 3.3</b> Valeurs du slump en fonction de divers taux de substitution par la fumée de silice. -----	46
<b>Figure 3.4</b> Effet de FS sur la chaleur d'hydratation. -----	47
<b>Figure 3.5</b> Effet de FS sur la résistance à la compression du béton -----	49
<b>Figure 3.6</b> Effet de FS sur la résistance à la compression du béton -----	49
<b>Figure 3.7</b> Effet de FS sur la résistance à la compression du béton -----	50
<b>Figure 3.8</b> Effet de FS sur la résistance à la flexion -----	51

<b>Figure 3.9</b>	Effet de FS sur la résistance à la flexion -----	52
<b>Figure 3.10</b>	Effet du pourcentage de FS le module d'élasticité du béton-----	53
<b>Figure 3.11</b>	Influence du pourcentage de FS fillers sur le module d'élasticité du béton ultra-performant-----	53
<b>Figure 3.12</b>	Effet de FS sur le retrait de séchage-----	54
<b>Figure 3.13</b>	Effet de FS sur le retrait de séchage-----	55
<b>Figure 3.14</b>	Effet de FS sur le retrait de séchage -----	55
<b>Figure 3.15</b>	Effet du pourcentage de FS sur un coulis de ciment léger-----	57
<b>Figure 3.16</b>	Influence du pourcentage de FS sur la porosité du béton -----	57
<b>Figure 3.17</b>	Viscosité plastique et coefficient de perméabilité en fonction de la teneur en FS -----	58
<b>Figure 3.18</b>	La perte de résistance à la compression des mortiers -----	59
<b>Figure 3.19</b>	Perte de résistance à la compression dans des échantillons de béton-----	60
<b>Figure 3.20</b>	Effet de FS sur la carbonatation de béton-----	61
<b>Figure 3.21</b>	Profondeurs de carbonatation du béton avec des adjuvants minéraux ----	62
<b>Figure 3.22</b>	Mécanisme d'adhésion-----	63
<b>Figure 3.23</b>	Techniques variées employées pour évaluer l'adhérence des mortiers ----	64
<b>Figure 3.24</b>	Appareil de traction -----	65
<b>Figure 3.25</b>	Principe de l'essai de traction -----	65
<b>Figure 3.26</b>	Modes de défaillance potentiels du composite béton/mortier de réparation, par l'essai d'arrachement-----	65
<b>Figure 3.27</b>	Techniques variées employées pour évaluer l'adhérence des mortiers --	66
<b>Figure 3.28</b>	Essai d'adhérence par flexion 4 points -----	67

<b>Figure 3.29</b> – a) Résistance à l'adhérence par flexion et b) Résistance à l'adhérence par traction (mesurée en mm)-----	67
<b>Figure 3.30</b> Évaluation de la déformation de la poutre-----	68
<b>Figure 3.31</b> Évaluation de la compatibilité à l'aide d'un essai de chargement à quatre points-----	68
<b>Figure 4.1</b> Fumée de silice-----	71
<b>Figure 4.2</b> Granulométrie des granulats fins et grossiers -----	73
<b>Figure 4.3</b> Outil automatisé d'optimisation des formulations de mortiers auto-plaçants renforcés de fibres (MAPFs) -----	75
<b>Figure 4.4</b> Séquences de malaxage du mortier de réparation -----	77
<b>Figure 4.5</b> Évaluation de l'étalement des mortiers de réparation à l'aide du mini-cône-----	78
<b>Figure 4.6</b> Mesure du temps d'écoulement des mortiers de réparation à l'aide du mini V-funnel-----	79
<b>Figure 4.7</b> Mesure de l'affaissement du béton à l'aide du cône d'Abrams -----	79
<b>Figure 4.8</b> Tests mécaniques réalisés sur les MAPFs-----	81
<b>Figure 4.9</b> Echantillons du béton-----	81
<b>Figure 4.10</b> Essai de traction par flexion-----	81
<b>Figure 4.11</b> Essai du module d'élasticité dynamique $E_D$ des MAPFs-----	83
<b>Figure 4.12</b> Rétractomètre pour la mesure du retrait des MAPFs -----	84
<b>Figure 4.13</b> Les éprouvettes ont été réalisées afin de mesurer le phénomène de retrait -----	84

<b>Figure 4.14</b> Essai d'absorption en eau des MAPF : a) immersion des échantillons 24 heures dans l'eau b) mesure de la profondeur de pénétration de l'eau -----	86
<b>Figure 4.15</b> Préparation des composites MAPF-Substrat et essai d'adhésion-----	87
<b>Figure 4.16</b> Un échantillon prismatique avec évidement servant de substrat -----	88
<b>Figure 4.17</b> Les mortiers de réparation ont été appliqués pour remplir entièrement les évidements de 1 cm-----	90
<b>Figure 4.18</b> Composites (MAPF <sub>s</sub> -Béton de substrat) sous essai de flexion 4 points.---	90
<b>Figure 4.19</b> Organigramme des Essais à l'état frais. -----	91
<b>Figure 4.20</b> Organigramme des Essais à l'état durci (propriétés mécaniques) -----	92
<b>Figure 4.21</b> Organigramme des Essais à l'état durci (propriétés de durabilité ) -----	92
<b>Figure 5.1</b> La variation du dosage du superplastifiant (%) -----	96
<b>Figure 5.2</b> La corrélation entre l'étalement mini-slump et le test mini V-funnel pour les mortiers autoplaçants de réparation (MAPFs) -----	98
<b>Figure 5.3</b> Évolution de la résistance en compression des MAPFs avec le temps ----	100
<b>Figure 5.4</b> Évolution de la résistance à la traction par flexion des MAPFs avec le temps -----	101
<b>Figure 5.5</b> Corrélation à tous les âges (2, 7, 28 et 91 jours) entre la résistance en compression et la résistance à la tarction par flexion des mortiers étudiés -----	102
<b>Figure 5.6</b> Évolution du module de Young des MAPFs avec le temps-----	104
<b>Figure 5.7</b> Corrélation à tous les âges (2, 7, 28 et 91 jours) entre la résistance en compression et le module de Young dynamique des MAPFs, Décrit par l'équation (4) -----	105
<b>Figure 5.8</b> Evolution du retrait de séchage des MAPFs à l'âge de 90 jours -----	106
<b>Figure 5.9</b> Evolution de l'absorption en eau des mortiers, après 24 heures-----	108

**Figure 5.10** Evolution en contrainte de la traction par flexion des composites (épaisseur 1cm) en fonction du milieu de cure ----- 111

**Figure 5.11** Evolution de la résistance à la traction par flexion des composites----- 113

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 1.1</b>	État de la corrosion des armatures selon différents niveaux de pH	-----8
<b>Tableau 1.2</b>	Les principales réactions physico-chimiques dans le béton en fonction de la Température	----- 17
<b>Tableau 2.1</b>	Quelque exemple de La conception de la réparation	----- 35
<b>Tableau 2.2</b>	Caractéristiques de performance des produits de réparation (structuraux ou non structuraux)	----- 40
<b>Tableau 2.3</b>	Exigences relatives aux performances des produits de réparation, qu'ils soient structurels ou non structurels	----- 41
<b>Tableau 3.1</b>	Résultats de l'essai d'arrachement	----- 66
<b>Tableau 4.1</b>	Propriétés physiques et chimiques du ciment et de la FS	----- 72
<b>Tableau 4.2</b>	Propriétés physiques des granulats	----- 72
<b>Tableau 4.3</b>	Caractéristiques générales des fibres polypropylène	----- 73
<b>Tableau 4.4</b>	Proportions des mélanges des mortiers de 1 M <sup>3</sup>	----- 75
<b>Tableau 4.5</b>	Proportions des mélanges de substrat (kg/m <sup>3</sup> )	----- 75
<b>Tableau 4.6</b>	Valeurs de l'affaissement du béton recommandées pour divers types de construction	----- 79
<b>Tableau 5.1</b>	Principales caractéristiques du béton de substrat	----- 92
<b>Tableau 5.2</b>	Propriétés à l'état durci des mortiers de réparation auto-plaçants (MAPFs).	----- 97
<b>Tableau 5.3</b>	Résultats de compatibilité des poutres composites (épaisseur de a couche de réparation de 1cm)	----- 109
<b>Tableau 5.4</b>	Résultats de La résistance à la flexion de l'adhérence des mortiers composites renforcés (MAPFs)	----- 110

## Liste des abréviations

BAP (SCC)	Béton autoplaçant
BAPF (FR-SCC)	Béton autoplaçant fibré
MAP (SCM)	Mortier autoplaçant
MAPF (FR-SCM)	Mortier autoplaçant fibré
BFUP(UHPC)	Le béton fibré ultra-hautes performances
TND	terme test non destructif
ITZ	Zone de transition inter-faciale
OPC	ciment Portland ordinaire
FS	Fumée de silice
PPF	Fibre de polypropylène
C	Ciment
G	Gravier
E	Eau
E/L	Rapport massique eau/liant
SP	Superplastifiant
$E_D$	Module dynamique d'élasticité
$\rho$	Densité sèche des échantillons
$\omega$	Le coefficient d'absorption capillaire
BSUB	Beton de substrat
MSUB	Mortier de substrat
$\sigma_a$	Contrainte d'adhérence
F	Force de rupture

# Introduction Générale

---

### Généralités

Le béton est un matériau de construction couramment utilisé à travers le monde. Néanmoins, ses caractéristiques peuvent se dégrader avec le temps en raison des éléments constitutifs du mélange et des différentes conditions d'exposition (Park, 2007). La porosité est un élément crucial pour la longévité des matériaux à base de ciment. En effet, une forte capacité d'absorption d'eau par les granulats poreux facilite l'infiltration d'agents nuisibles, ce qui met en péril la solidité des structures en béton armé (Alexander et al., 2017 ; Phung et al., 2015).

D'autres facteurs impactent également la durabilité des structures en béton, tels que les contraintes mécaniques, l'exposition aux incendies, les conditions climatiques extrêmes, la pollution ambiante et un entretien insuffisant. Bien que l'emploi de matériaux de haute performance et le développement de techniques de restauration puissent renforcer leur longévité, la mise en œuvre de ces solutions reste complexe. Dans une perspective plus large, une expertise technique approfondie est essentielle pour évaluer la durée de vie des infrastructures et établir des stratégies appropriées afin d'assurer des performances optimales sur le long terme. En raison de sa facilité d'application, de sa résistance mécanique adéquate et de ses propriétés de durabilité améliorées, le mortier auto-compactant (MAP) représente une alternative prometteuse aux matériaux de réparation traditionnels.

Ce type de mortier constitue une avancée significative dans le secteur des matériaux cimentaires à haute performance, développés au cours des quarante dernières années. Sa caractéristique principale est sa capacité à s'étendre et à se positionner sous l'effet de son propre poids, ce qui élimine la nécessité d'une compaction vibratoire (Okamura et al., 2003). Cette propriété non seulement facilite son application, mais assure également une finition uniforme, même dans des coffrages complexes ou des zones fortement armées. En outre, son utilisation aide à remédier au manque de main-d'œuvre qualifiée pour la mise en œuvre des mortiers (Loukili, 2011). Pour produire un mortier auto-compactant, il est crucial de doser avec précision l'eau, le ciment et le superplastifiant, tout en réduisant la proportion de granulats grossiers tels que le sable et le gravier (Okamura, 1995 ; ACI 237R-04). L'incorporation de matériaux cimentaires additionnels comme la fumée de silice, d'adjuvants chimiques tels que les superplastifiants, ainsi que de fibres de renforcement, est également indispensable pour optimiser ses performances (Thakare et al., 2021). L'ajout de ces matériaux contribue à accroître la densité et l'homogénéité du mélange, tout en améliorant la maniabilité du mortier à l'état frais (Antoni et al., 2015).

Bien que l'ajout de fumée de silice améliore les caractéristiques du mortier, les recherches sur les proportions idéales et les interactions entre ce matériau et les fibres demeurent insuffisantes.

La fumée de silice (FS) est un sous-produit de la fabrication de silicium et de ferrosilicium. Elle se compose de particules sphériques ultrafines, dont la taille varie entre 0,1 et 0,2  $\mu\text{m}$ , ce qui les rend considérablement plus petites que celles du ciment conventionnel. Grâce à sa finesse exceptionnelle et à sa forte concentration en silice amorphe (85–90 %), la fumée de silice est un matériau pouzzolanique très actif. Cette réactivité favorise la conversion de l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en silicate de calcium hydraté supplémentaire, améliorant ainsi la microstructure du mortier et diminuant sa perméabilité. En outre, son intégration dans les formulations de ciment permet d'optimiser diverses propriétés mécaniques et durables des mortiers. Néanmoins, les études sur l'influence de différentes proportions de fumée de silice sur la durabilité à long terme et les performances structurelles des mortiers de réparation auto-palçant renforcés de fibres (MAPF) sont encore limitées.

L'incorporation de fibres, en particulier les fibres de polypropylène (FPP) ([Kang et al., 2016](#) ; [Yan et al., 2021](#)), renforce les caractéristiques mécaniques du béton en améliorant sa résistance à l'abrasion et en minimisant le retrait. Cela permet également d'augmenter sa ductilité ainsi que sa résistance à la flexion.

Notre travail de thèse analyse diverses propriétés des mortiers contenant de la fumée de silice et des fibres de polypropylène destinée aux travaux de réparation. A cet effet, cinq mélanges de MAPFs ont été formulés au laboratoire. Le premier type est un mortier de contrôle (MAPF0) contenant que du ciment Portland. Cependant, les mortiers restants (MAPF5, MAPF10, MAPF15 et MAPF20) sont à base de la fumée de silice où le ciment a été partiellement remplacé par cette poudre avec des taux de 5% ,10%, 15% et 20%, respectivement. Plusieurs points importants ont été traités pour les mortiers élaborés: la maniabilité, les performances intrinsèques en termes de tenue mécanique (résistance mécanique, module de Young, retrait, l'absorption et l'adhérence. Et la compatibilité entre ces mortiers et les substrats de béton.

Parallèlement, cette étude a pour but de classer les mortiers de réparation auto-compactants selon la norme [EN 1504-3](#), afin d'assurer leur compatibilité en tant que matériaux de réparation. L'optimisation du MAP pour des conditions environnementales extrêmes

contribuera ainsi à la mise en place de solutions de réparation durables et efficaces, adaptées aux climats rigoureux.

La thèse se divise en trois sections principales. La première section est consacrée à une revue de la littérature et englobe les chapitres 1 à 3.

Le premier chapitre offre un aperçu des principales pathologies susceptibles de compromettre la durabilité, la résistance et la stabilité des structures, pouvant ainsi conduire à leur défaillance. Il fournit également une analyse approfondie des étapes clés d'un diagnostic.

Le deuxième chapitre vise à présenter un examen détaillé des méthodes et techniques expérimentales pour la réparation du béton en conformité avec les normes de la norme [EN 1504](#).

Le troisième chapitre aborde les recherches récentes concernant la rhéologie, la durabilité et la compatibilité des bétons et mortiers fibrés à base de la fumée de silice.

Le quatrième chapitre est situé dans la seconde partie de la thèse. Il est dédié à la caractérisation des matériaux ainsi qu'aux méthodes d'essai employées pour la formulation de mortiers autoplaçants de réparation, utilisant de la fumée de silice. Dans l'état frais, nous avons suivi les spécifications et recommandations de [l'EFNARC](#) pour mesurer l'étalement (entre 240 et 280 mm) au mini cône et le temps d'écoulement (de 7 à 11 secondes) au mini V-funnel, en ajustant le dosage de superplastifiant en fonction de la quantité d'additifs. Par ailleurs, les propriétés des matériaux de réparation à l'état durci, telles que les performances mécaniques (résistance à la flexion et à la compression), le module d'élasticité, le retrait et la durabilité (absorption d'eau), ont été évaluées selon les exigences de performance des mortiers de réparation stipulées dans la norme EN 1504-3. De plus, la compatibilité de ces mortiers de réparation est également abordée dans ce chapitre, ayant été mesurée par le biais d'essais de flexion (à 4 points pour les poutres et à 3 points pour les mortiers), conformément à la norme [ASTM C78](#).

La section finale, qui inclut le cinquième chapitre, est entièrement dédiée à la présentation, à l'analyse et à la synthèse des résultats obtenus lors des travaux expérimentaux décrits dans le chapitre 4. Ce dernier chapitre se termine par une évaluation des coûts de production des mortiers de réparation formulés à partir de fumée de silice. Pour conclure, nous dresserons un bilan des enseignements tirés de cette recherche et proposerons quelques perspectives d'avenir.

# Chapitre 01

---

*Pathologies des structures en béton*

## 1.1 Introduction

Le béton armé (BA) est un matériau remarquable pour la construction. Il offre une résistance structurelle élevée et une durabilité à long terme, même dans des conditions d'exposition sévères. Son utilisation est appuyée par plus de 100 ans d'expérience pratique (Broomfield, 1999 ; Gjorv, 2009).

Les problèmes de durabilité se manifestent généralement au début par la détérioration des matériaux. Cependant, au fil des deux dernières décennies, on a noté une hausse alarmante des cas de durabilité déficiente des constructions en béton, notamment celles en béton armé. Bien que la durabilité du béton ait une histoire de recherche relativement courte par rapport à celle de la résistance, la durabilité a désormais remplacé la résistance en tant que principale préoccupation de la communauté d'ingénierie aujourd'hui.

Dans ce qui suit, nous visons à établir une synthèse des principales pathologies qui compromettent la durabilité, la résistance, voire la stabilité des structures, et qui peuvent, dans certains cas, conduire à leur dégradation.

## 1.2 Les pathologies d'origine chimique

La détérioration du béton en service peut résulter d'une variété de processus physiques et chimiques (Figure 1.1).

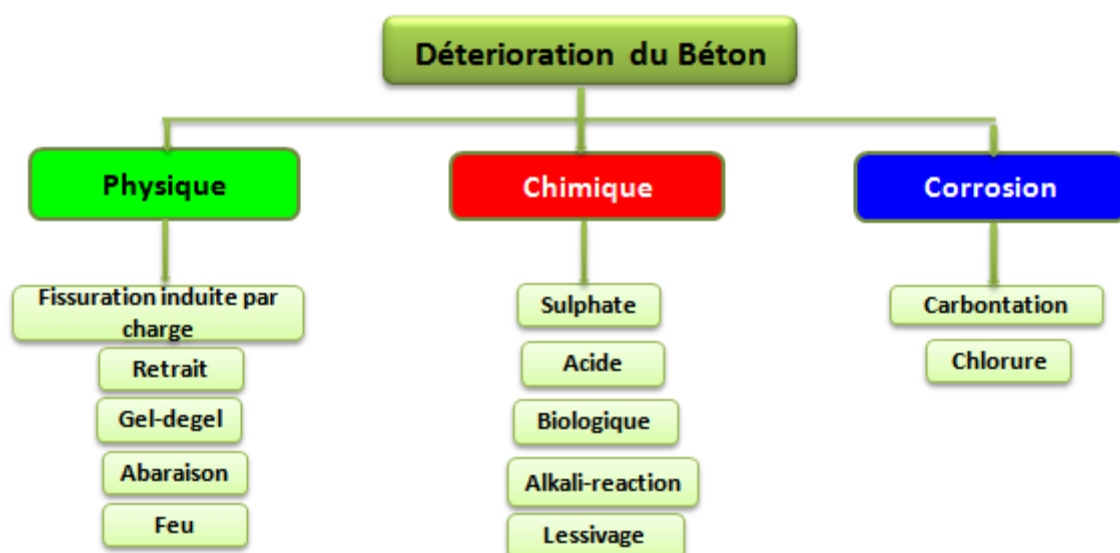
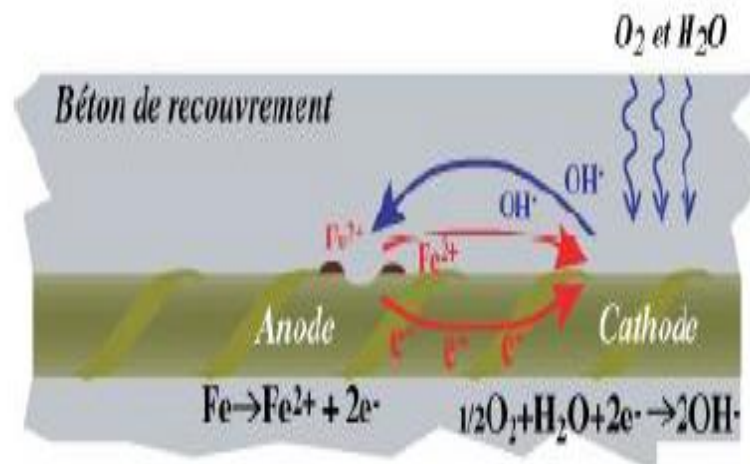


Figure. 1.1 – Détérioration du béton armé (Isgor, 2001).

### 1.2.1 La carbonatation et la corrosion

La dégradation du béton par la corrosion des aciers de renforcement est un problème courant qui compromet l'intégrité structurelle des installations en béton. Le béton offre naturellement une protection contre la corrosion grâce à sa forte alcalinité, le niveau de PH du fluide interstitiel du béton s'approche généralement de 13, offrant une défense robuste. Cet environnement alcalin est crucial car il crée un film passif autour des armatures en acier, les protégeant efficacement de la détérioration oxydative (Figure 1.2).

La dégradation des barres d'armature en acier dans le béton armé implique deux réactions électrochimiques distinctes, mais couplées, qui se produisent simultanément à deux endroits différents sur la surface de l'acier. Ces deux réactions chimiques sont appelées réactions anodiques et cathodiques.

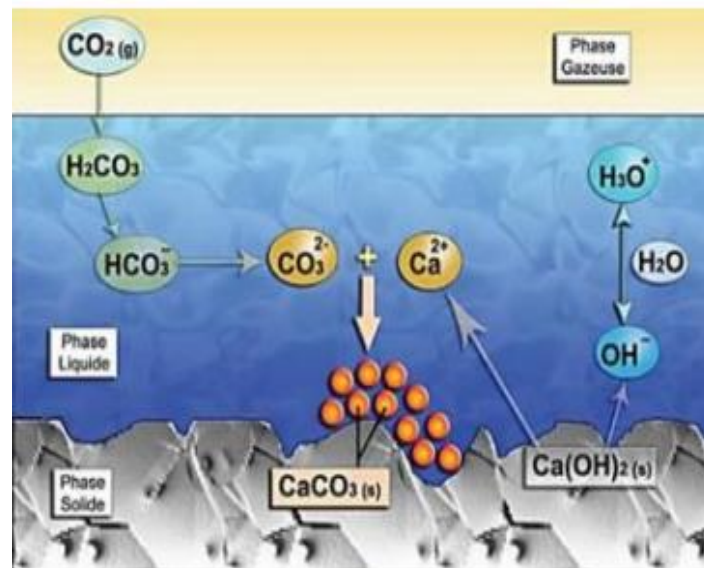


**Figure 1.2** – Mécanisme de corrosion de l'acier dans le béton (Mohamed, 2012).

Néanmoins, ce film passif est vulnérable à la destruction par des processus tels que la carbonatation et l'infiltration de chlorures (Bertolini et al., 2003 ; François et al., 2018). Le phénomène de carbonatation, illustré dans la Figure 1.3, se produit lorsque le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) de l'atmosphère pénètre dans la matrice poreuse du béton. Suivant l'équation.



Lorsque la carbonatation se produit, elle initie une série de réactions chimiques au sein de la structure du béton qui peuvent réduire de manière significative le pH de la solution interstitielle à des niveaux inférieurs à 9, comme indiqué dans le Tableau 1.1.



**Figure 1.3** – Processus de carbonatation de la portlandite (Thiery, 2006).

La réduction du PH compromet la couche passive protectrice autour des aciers, menant à la dépassivation des armatures et l'exposant à un risque accru de corrosion. Une fois que l'armature est dépassivée et que l'eau et l'oxygène sont présents, la corrosion se déclenche. D'une part, la corrosion induite par la carbonatation est généralement considérée comme une corrosion uniforme.

**Tableau 1.1** – État de la corrosion des armatures selon différents niveaux de pH (François et al., 2018).

PH	Etat de l'acier	Description
>12.5	Passivation	L'acier est protégé par une couche passive due à l'alcalinité élevée du béton.
10 - 12.5	Début de la dégradation de la passivation	La couche passive commence à se dégrader, augmentant le risque de corrosion.
<10	Corrosion active	La protection passive disparaît, entraînant une corrosion active significative.
<6	Corrosion sévère	Environnement acide provoquant une accélération rapide de la corrosion.

### 1.2.2 Les réactions sulfatiques

Le risque chimique majeur associé au béton en contact avec des environnements aqueux provient principalement des sulfates, incluant le sodium, le calcium, le potassium et le magnésium. On retrouve des sulfates dans les eaux souterraines, les sols et l'eau de mer. Proviennent naturellement, mais ils peuvent également provenir des engrais ou des déchets industriels et domestiques (Mehta, 2000 ; Neville, 2004). Le béton est impacté par les sulfates en résultant de leur réaction avec les produits provenant de l'hydratation. Au départ, la majorité des sulfates s'attaquent à l'hydroxyde de calcium et à l'aluminate de calcium, donnant ainsi développement au sulfate de calcium qui réagit ensuite avec l'hydrate d'aluminate de calcium pour produire du sulfoaluminate de calcium, plus connu sous le nom d'ettringite (Collepardi, 2003). L'attaque par les sulfates commence généralement aux arêtes et aux coins, suivie de fissures progressives et d'écaillage (Zhao et al., 2020).



**Figure 1.4** – Structure en béton armé sérieusement altérée par les sulfates.

Habituellement, l'attaque par les sulfates réduit la résistance structurelle du béton, due à la désintégration de l'ensemble des produits d'hydratation. Cette détérioration mène à une insuffisance de liaison adéquate entre la matrice cimentaire et les agrégats.

### 1.2.3 L'alcali-réaction

Bien que les premiers problèmes de durabilité causés par la réaction alcali-granulat (AAR) aient été observés sur plusieurs structures en béton californiennes et rapportés par Thomas Stanton dès 1940, Cette forme de dégradation se produit lorsque les alcalis libérés par le ciment en cours d'hydratation réagissent avec des granulats contenant des constituants réactifs. (Gilliot, 1975) a proposé que l'AAR soit subdivisée en trois groupes de réactions :

- Les réactions alcali-silice avec des granulats siliceux (opales et calcaires siliceux),
- Les réactions alcali-carbonate avec des granulats carbonatés (certaines dolomites argileuses),
- Les réactions alcali-silicate (similaires aux réactions alcali-silice, sauf que le constituant réactif dans le granulat est la silice présente sous forme de phyllosilicates).

#### 1.2.3.1 Les réactions alcali-silice

Dans le domaine de la technologie du béton, il est reconnu que l'utilisation de ciments riches en hydroxydes alcalins conjuguée à l'emploi de granulats incorporant des silices susceptibles de réactivité peut initier une cascade de réactions chimiques. Celles-ci mènent à la création d'un gel nommé gel alcali-silice (Foumier et al., 2000 ; Fernandes et al., 2004). Ce gel, en présence d'eau, se dilate et exerce des contraintes expansionnistes considérables sur la microstructure du béton. La faible capacité du béton à résister aux forces de traction fait que ces contraintes engendrent des fissurations (Rivard et al., 2005 ; Mo et al., 2007) comme la figure 1.5.

La réaction alcali-silice ne peut pas être évitée une fois que les conditions appropriées sont réunies. Trois facteurs cruciaux doivent coexister pour que l'ASR se manifeste et cause des dommages importants :

- Des concentrations élevées d'alcalins dans les produits d'hydratation, suffisantes pour initier les réactions chimiques,
- La présence de silice réactive dans les granulats,
- Une quantité suffisante d'humidité pour démarrer la réaction ASR et ensuite maintenir le gonflement du gel alcali-silice.



**Figure 1.5** – Effet de l’alcali-silice sur une barrière en béton.

### **1.2.3.2 Les réactions alcali-carbonate**

La réactivité des carbonates implique les roches carbonatées dans une série complexe de réactions dont la nature dépend des granulats locaux, du ciment et du microenvironnement. Comme dans la réaction précédente, les alcalis libérés par les pâtes de ciment ou d'autres sources réagissent avec les granulats carbonatés. La présence de minéraux argileux dans les granulats et la texture cristalline des roches influenceraient le taux de ces réactions (French, 1974 ; Ewenson, 1960).



**Figure 1.6** – Effet de l’alcali-carbonate sur un mur d’entrée d’un tunnel.

Plusieurs types distincts de réactions alcali-carbonate sont connus, mais toutes ne sont pas expansives. Toutefois, l'élimination du magnésium de la périphérie des particules dolomitiques par les alcalis, qui donne naissance aux carbonates de calcium-alcali et à l'hydroxyde de magnésium, est la réaction la plus fréquemment observée. L'accroissement du volume associé à la dé-dolomitisation serait attribué à l'augmentation de la porosité, facilitant l'infiltration de l'eau et le gonflement subséquent de l'argile intégrée au granulat (Ewenson, 1960).

## 1.3 Les pathologies d'origine physique

### 1.3.1 Le gel et dégel

Malgré les études approfondies sur la résilience du béton aux cycles de gel-dégel tout au long du siècle dernier, ce type de dégradation reste un défi de durabilité significatif dans plusieurs régions du monde (Figure 1.7). En physique des matériaux de construction, deux théories principales ont été développées pour expliquer la mécanique des processus de gel-dégel: l'approche thermodynamique et l'approche des pressions hydrauliques.

En général, dans la théorie thermodynamique, les pores capillaires sont considérés comme des systèmes fermés dans lesquels la glace et l'eau en vrac interagissent et un transfert de chaleur a lieu (Kanellopoulos, 2010). Dans de tels systèmes, si l'équilibre thermodynamique n'est pas maintenu, un gradient de potentiel chimique se forme. Ce gradient entraîne le transport de l'eau non gelée vers les bords de congélation. Ce mouvement cause des dommages en favorisant la croissance des cristaux de glace existants, créant des pressions cristallines à l'intérieur des pores.

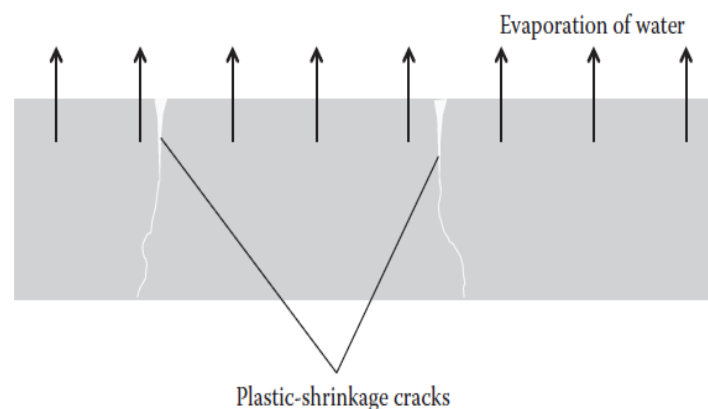


**Figure 1.7** – Altération d'un ouvrage par des cycles de gel/dégel.

Une théorie a été proposée pour expliquer la détérioration causée par le gel, basée sur les pressions hydrauliques générées par le mouvement de l'eau dans le béton lorsqu'elle migre loin du point de congélation pour accommoder l'expansion volumétrique (Power, 1975). La théorie de Power est largement utilisée dans le cas des bétons et l'ensemble du processus de variation des pressions peut être décrit par les lois de Kelvin et Laplace mentionnées précédemment.

### 1.3.2 Retrait

Le béton peut être considéré comme un matériau « vivant » en raison de son évolution interne et de ses interactions à long terme avec l'environnement. Ces deux causes (internes et externes) peuvent expliquer le développement d'effets de contraintes, dont l'intensité peut entraîner des dommages. Le retrait est l'un des mécanismes impliqués. Le séchage du béton provoque l'évaporation de l'excès d'eau dans les capillaires, et la pâte de ciment se contracte pour compenser le changement d'énergie de surface. En effet, le séchage se produit à travers les surfaces du béton, créant une répartition inégale de l'humidité depuis la surface et, par conséquent, un retrait différentiel au sein de l'élément en béton. Cela peut engendrer des contraintes de traction qui provoquent la formation de fissures illustré dans la figure 1.8, principalement perpendiculaires à la surface, dont la profondeur peut atteindre plusieurs décimètres dans des structures épaisses (Shaw et al., 1998).



**Figure 1.8** – Fissures de retrait dans les dalles de béton.

Typiquement, l'attaque par les sulfates diminue la résistance du béton en brisant les liens entre les produits d'hydratation, ce qui résulte en une liaison insuffisante entre la matrice cimentaire et les granulats (Figure 1.9). Chaque mécanisme affecte le béton de manière différente, influençant la taille et la profondeur des fissures ainsi que leur évolution dans le temps.



**Figure 1.9** – Motif typique de fissures de retrait plastique dans une dalle de béton.

### 1.3.3 Le choc

Les dommages induits par l'usage accidentel de structures représentent une cause prépondérante de détérioration du béton. Ces dommages découlent principalement d'actions mécaniques non prévues, caractérisées par des impacts significatifs (Anne et al., 1997). Les exemples courants d'impacts incluent les collisions de véhicules hors gabarit avec la partie inférieure des ponts, les impacts de bateaux ou de débris flottants contre les piliers de ponts situés en cours d'eau, ainsi que les accidents de véhicules avec les barrières de sécurité. Ces types d'impact peuvent causer des dommages conséquents tels que des éclatements de béton, de graves fissures et des ruptures des armatures en acier), compromettant gravement l'intégrité des structures telles que les supports fluviaux et les garde-corps.



**Figure 1.10** – Ouvrage en béton altéré sous l’effet des chocs.

### 1.3.4 Fatigue

La fatigue désigne l'affaiblissement progressif d'une structure due à des sollicitations répétées ou cycliques. Même si les éléments structuraux sont initialement dimensionnés pour supporter des charges déterminées, l'application récurrente de charges moins importantes peut progressivement les déstabiliser. La figure 1.11 indique le phénomène de la fatigue qui réduit la cohésion entre le béton et les armatures, entraînant l'apparition de fissures qui peuvent diminuer la longévité de la structure et mener à des déformations permanentes sous l'influence des charges opérationnelles. Finalement, ces effets cumulatifs peuvent provoquer une rupture complète lorsque la limite d'endurance de la structure est atteinte ([Chen et al., 2024](#)).

La dégradation résultante est influencée par plusieurs paramètres, notamment :

- L'ampleur des sollicitations, représentée par le nombre et l'intensité des cycles de charge ou de déformation que la structure doit endurer,
- La diversité des charges appliquées, qui peut varier en fonction des conditions d'utilisation,
- Le degré de fissuration, qui altère substantiellement les caractéristiques mécaniques et physiques du béton.



**Figure 1.11** – Ouvrage en béton altéré sous l'effet de la fatigue.

### 1.3.5 L'incendie

Le chauffage du béton, qu'il soit causé par un incendie ou par d'autres sources, entraîne diverses modifications structurelles, telles que la fissuration, l'éclatement, le décollement des granulats et des armatures, l'expansion, ainsi qu'une perte de résistance de l'acier de renforcement (Tableau 1.2). Des transformations minéralogiques et chimiques de la pâte de ciment durcie peuvent également se produire, notamment une décoloration, une déshydratation et une dissociation, selon la durée d'exposition au feu et la température maximale atteinte (Figure 1.12).



**Figure 1.12** – Structure en béton armé dégradée par le feu.

**Tableau 1.2** – Les principales réactions physico-chimiques dans le béton en fonction de la Température (Divet et al., 2005).

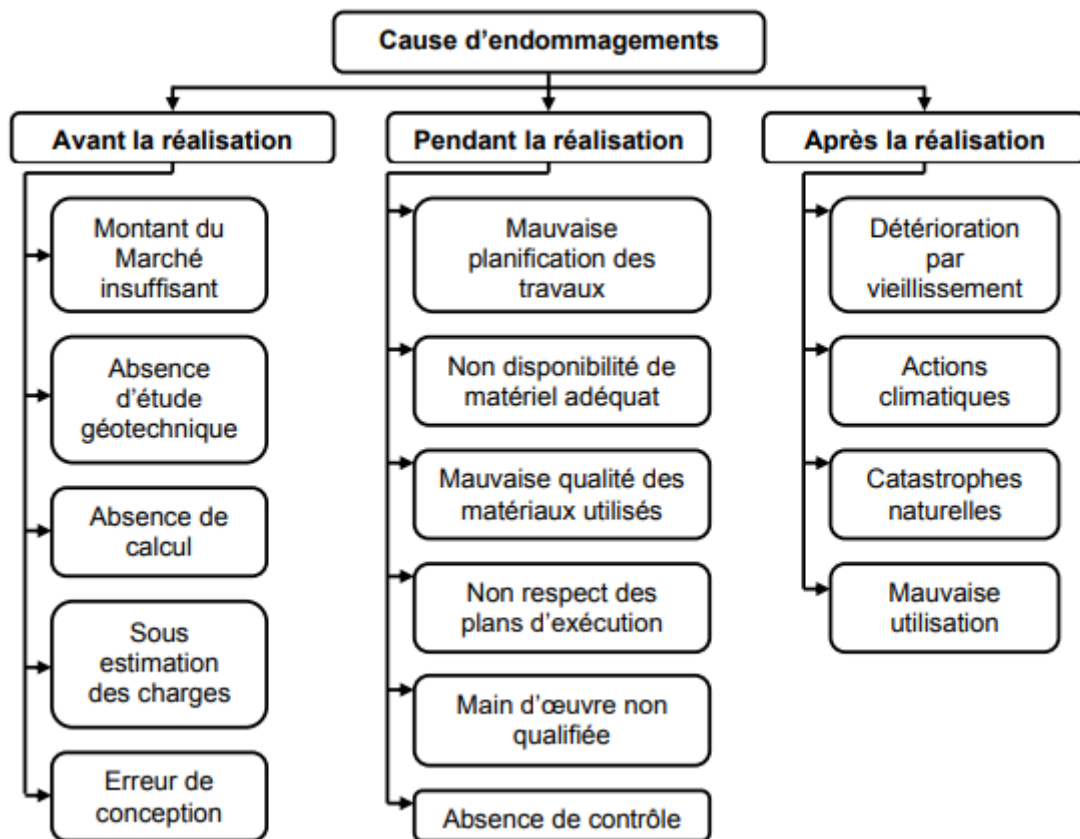
Température	Phénomène
Jusqu'à 80 °C	Départ de l'eau libre.
À partir de 80 °C	Une partie de l'eau adsorbée s'échappe du béton. Début de la perte de l'eau de constitution de certains hydrates (notamment l'ettringite). L'eau liée chimiquement commence donc à s'évaporer du béton.
Jusqu'à environ 300 °C	Première étape de déshydratation des silicates de calcium hydratés (C-S-H).
Entre 450 et 550 °C	Décomposition de la portlandite en chaux libre selon la réaction : $\text{Ca(OH)}_2 \Rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ .
573 °C	Transformation allotropique du quartz $\alpha$ en quartz $\beta$ accompagnée d'un phénomène de dilatation (fissuration des granulats siliceux).
600 - 700 °C	Décomposition des phases C-S-H et formation de $\beta$ -C <sub>2</sub> S. Il s'agit de la deuxième étape de déshydratation des C-S-H qui produit une nouvelle forme de silicates bicalciques (C <sub>2</sub> S).
700 - 900 °C	Le carbonate de calcium se décompose en libérant de la chaux : $\text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (décomposition des calcaires).
À partir de 1100 - 1200 °C	Formation de wollastonite $\beta$ (CaO.SiO <sub>2</sub> ). Début de la fusion de certains agrégats et de la pâte de ciment. Remplacement au cours de l'échauffement des liaisons hydrauliques par des liaisons céramiques (phénomène de frittage).

## 1.4 Diagnostic de la dégradation du béton

### 1.4.1 Introduction

En règle générale, des combinaisons des différents mécanismes, sous forme de processus de dégradation complexes causant des dommages à la structure et déterminant finalement sa durée de vie, se produisent en pratique. Les phénomènes principaux influençant la durabilité comprennent : les changements de géométrie de la structure (déformations et déplacements, variations des dimensions des composants, etc.), les modifications de la macro- et microstructure du matériau, les fluctuations des paramètres mécaniques du matériau, le développement de discontinuités du matériau (fissures, fractures, délaminages, etc.), les fluctuations de la résistance du matériau à la pénétration de l'eau et des gaz, ainsi que les changements dans la constitution chimique du matériau.

La nature et l'origine des défauts dans une structure en béton sont nombreuses (Figure 1.13). Des erreurs peuvent survenir pendant la phase de conception ou de construction de la structure. D'autres dommages peuvent apparaître au cours de la vie de la structure en raison de charges accidentelles, telles que les tremblements de terre (Lu et al., 2022 ; Usta et al., 2023).



**Figure 1.13** – Différentes causes probables d’endommagement des structures en béton armé avant, pendant et après la réalisation (Bouabdallah, 2024).

#### 1.4.2 Méthodologie d'Intervention

Cette étude propose une procédure pour diagnostiquer les dommages et gérer les interventions sur une structure en béton armé. La question posée est la suivante : qu'est-ce qui rend une intervention sur une structure en béton armé réussie ? L'adoption d'une approche systématique de réparation semble être un moyen intéressant et rentable d'atteindre le succès. Nous présentons ici un processus en six étapes à suivre pour réparer efficacement une structure en béton :

- Identifier les défauts et les causes des dommages,
- Évaluer la nécessité d'une intervention,
- Estimer le coût de l'intervention,
- Choisir les méthodes et les produits de réparation,
- Surveiller périodiquement la structure après l'intervention.

Cette méthodologie est en accord avec les pratiques recommandées pour le diagnostic et la réhabilitation des structures en béton armé.

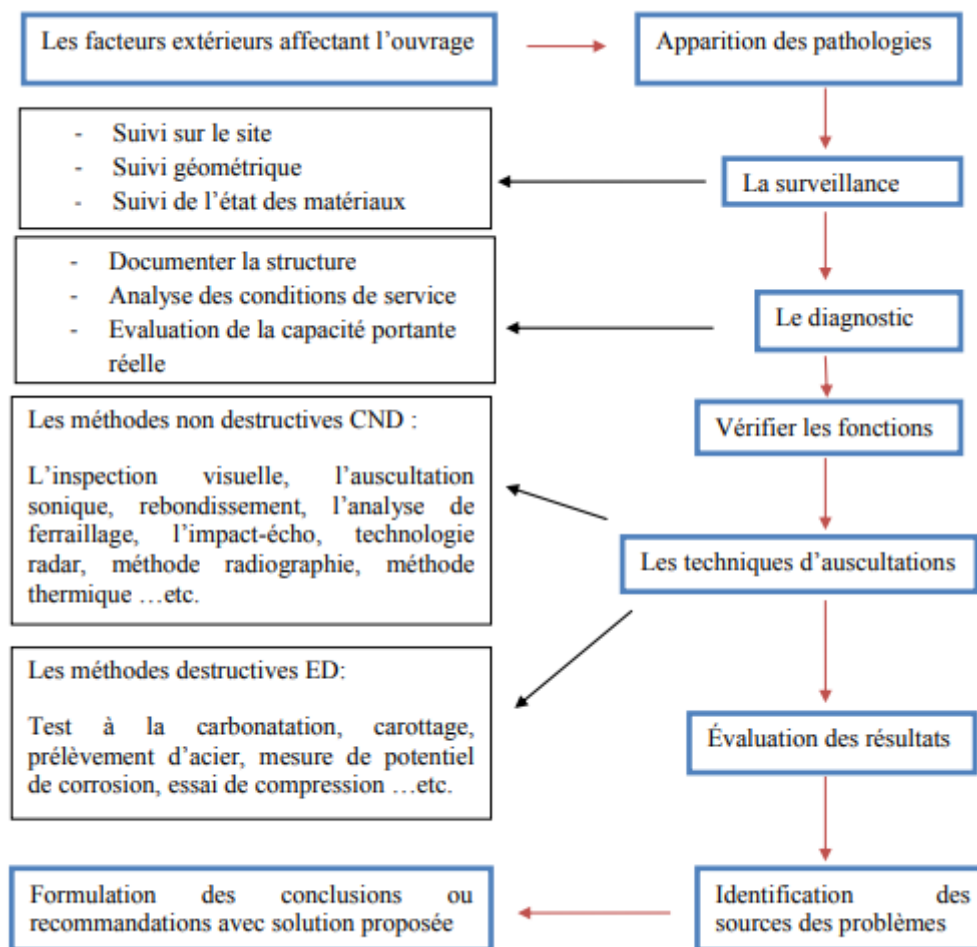


**Figure1.14** – Stratégie d'intervention sur un ouvrage en béton armé (Bouabdallah, 2024).

### 1.4.3 Les principales étapes d'un diagnostic

Le diagnostic est un ensemble de techniques élaborées dont l'objectif est d'évaluer l'état de matériau dans une structure donnée, tout en évaluant la stabilité globale et partielle de cette structure. Pour pouvoir analyser, déterminer les causes affectant cette conception, et envisager à la fin une intervention et réparation avec succès.

Le processus de diagnostic d'un ouvrage est montré dans la figure 1.15.



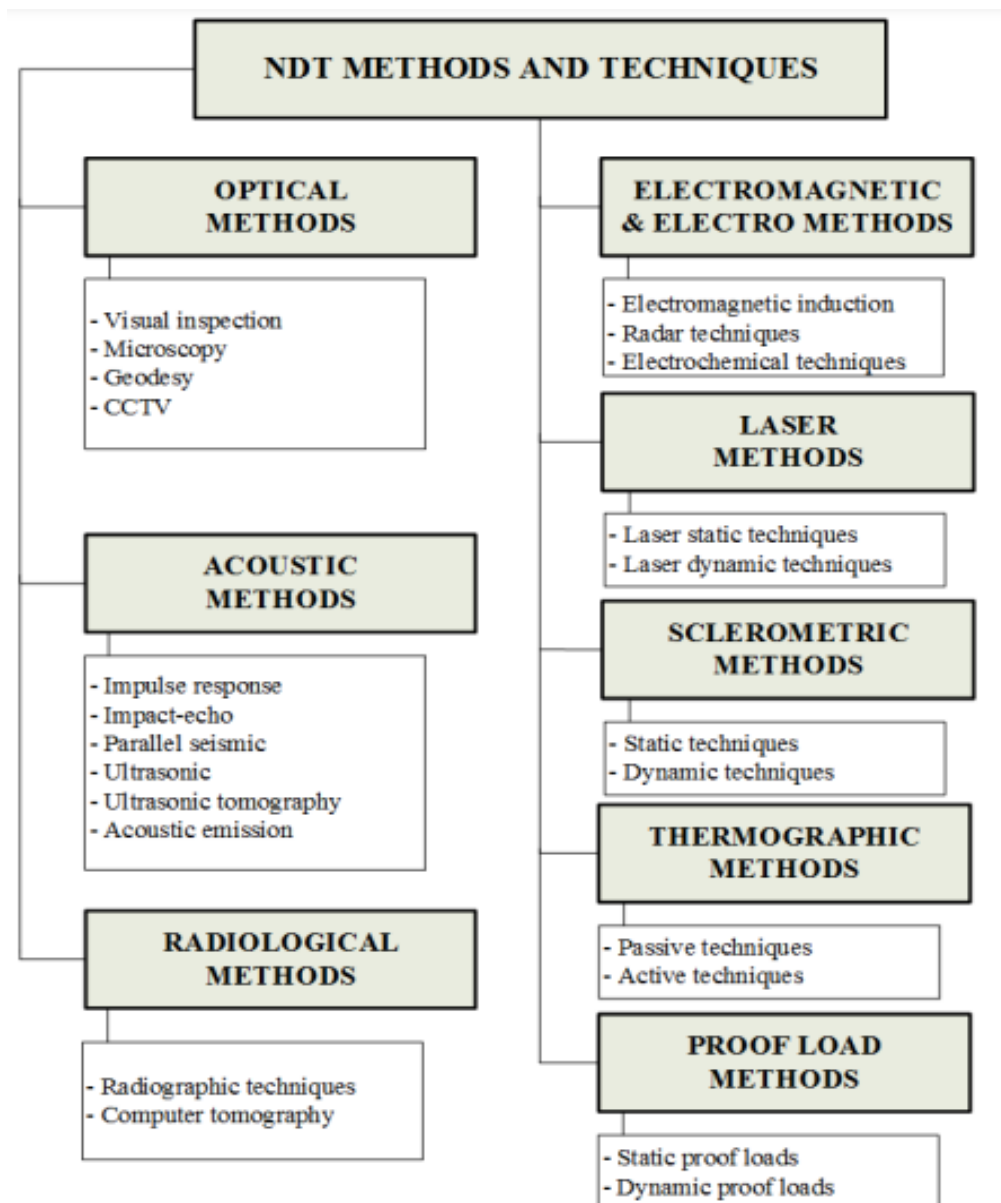
**Figure 1.15** – Schéma des étapes de diagnostic d'un ouvrage en béton armé  
(Chabbi et al., 2018).

Dans la suite de ce chapitre, une classification innovante et complète des méthodes et techniques d'investigation utilisées pour le diagnostic de la durabilité des structures en béton est proposée. Les méthodes d'essais non destructifs, qui ne compromettent en aucune manière l'intégrité de la structure testée, et les méthodes d'essais semi-destructifs, nécessitant l'extraction d'échantillons de matériau ou toute autre altération mineure de l'intégrité de la structure, ont été distinguées.

#### 1.4.4 Méthodes et techniques non destructives

Le terme test non destructif (TND) couvre un large groupe de techniques de mesure et d'analyse utilisées dans le processus d'évaluation de l'état actuel des matériaux ou éléments

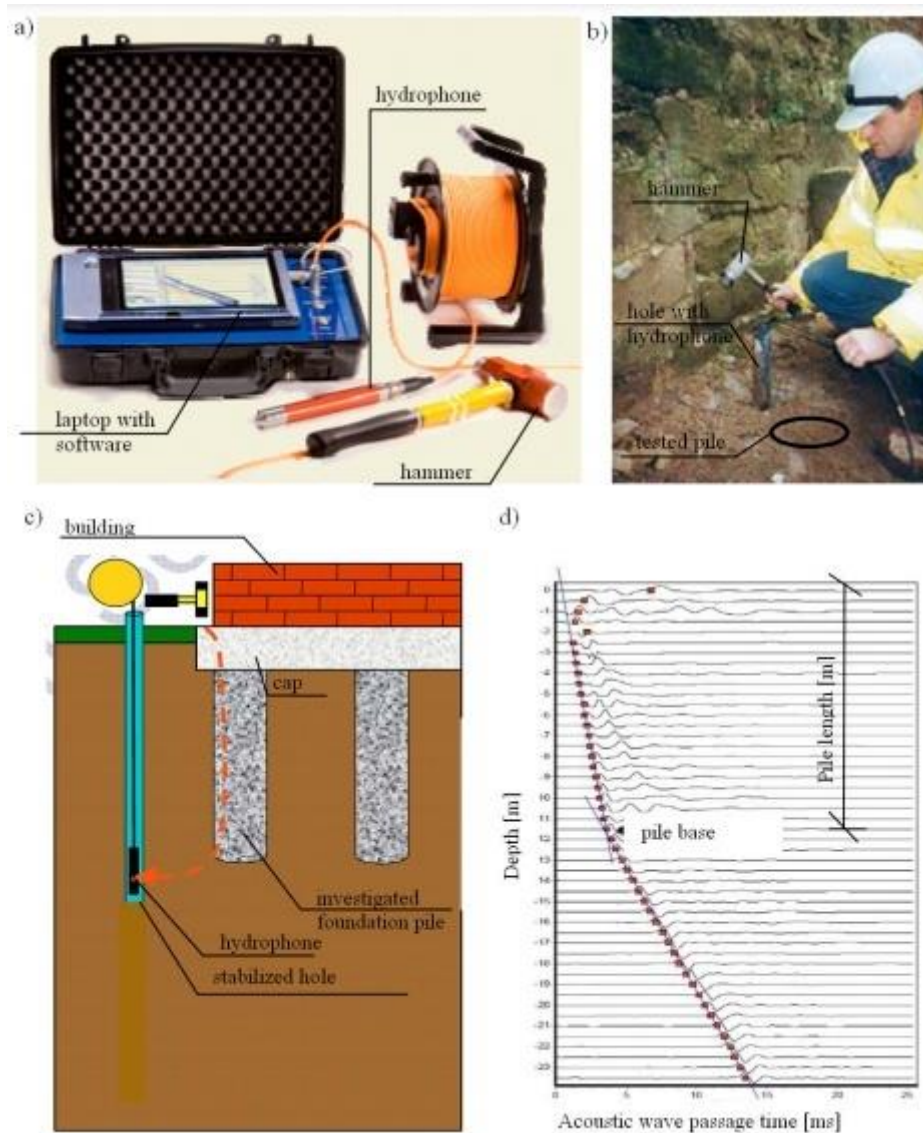
structuraux. Il s'agit d'une approche rapide et efficace, dont le principal avantage est la possibilité d'examiner le matériau de manière non invasive, sans endommager ni modifier la composition ou la forme de l'objet inspecté. Tableau 1.16 présente la division générale des méthodes non destructives utiles dans le diagnostic de la durabilité, de la sécurité et de la fiabilité des structures en béton armé.



**Figure 1.16** – Classification générale des méthodes et techniques non destructives utiles dans le diagnostic des structures en béton armé (HOLA et al., 2017).

### ❖ *Méthode sismique parallèle*

La méthode sismique parallèle appartient aux méthodes sismiques à faible énergie. Elle est utile pour tester le béton et le béton armé, ainsi que les pieux de fondation préfabriqués ou coulés en place, en ce qui concerne leur longueur et la continuité de leur section transversale sur toute leur longueur (Rybak et al., 2009). Elle est également utile pour déterminer la longueur des palplanches en acier et en béton armé, ainsi que des pieux jointifs.



**Figure 1.17** – Idée de la méthode sismique parallèle : a) Ensemble de mesure b) Procédure d'essai typique c) Schéma du test d) Temps de passage de l'onde acoustique enregistré (Drobiec, 2010).

## 1.5 Traitement du Béton

Le traitement ou la réhabilitation du béton est une pratique essentielle pour prévenir les dommages prématurés et la détérioration des structures. Les techniques de réhabilitation varient en fonction de la nature et de l'ampleur des dommages, des conditions spécifiques et du degré de délamination (Asmara, 2024). Voici quelques méthodes recommandées pour améliorer la qualité et la durabilité des structures en béton :

- Dépose et remplacement : Cette méthode consiste à retirer entièrement le béton délaminé et à le remplacer par du béton neuf. Elle permet de garantir une liaison fraîche et d'éliminer les parties affaiblies ou endommagées,
- Agents de liaison : Ces matériaux spécifiques améliorent l'adhérence entre les couches de béton existantes. Ils sont appliqués sur les zones délaminées avant l'ajout de nouveau béton, ce qui renforce la cohésion et la résistance de la liaison,
- Injection d'époxy : Cette technique consiste à injecter de la résine époxy dans les zones délaminées. La résine comble les vides et crée une liaison solide, restaurant ainsi l'intégrité du béton. Elle est particulièrement efficace pour traiter les délaminations de petite envergure,
- Revêtements de protection : L'application de revêtements protecteurs permet de limiter l'infiltration d'humidité et d'éviter d'éventuels dommages. Ces revêtements forment une barrière étanche qui protège la surface du béton contre la pénétration de l'eau et des agents chimiques, réduisant ainsi les risques de délamination.

## 1.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons exploré les diverses causes des pathologies susceptibles de diminuer la durée de vie utile d'une structure en béton armé. Nous avons également illustré la manière d'établir un diagnostic approprié en fonction de la gravité de la pathologie et de la dynamique de dégradation du béton, afin de sélectionner une méthode de réparation adéquate qui assurera la durabilité de la structure.

Dans le chapitre suivant, nous allons citer toutes les techniques de réparation du béton utilisant des mortiers ont été succinctement présentées en conformité avec les exigences de la norme [EN 1504](#).

## Chapitre 2

---

*Matériaux et méthodes de réparation des structures en béton*

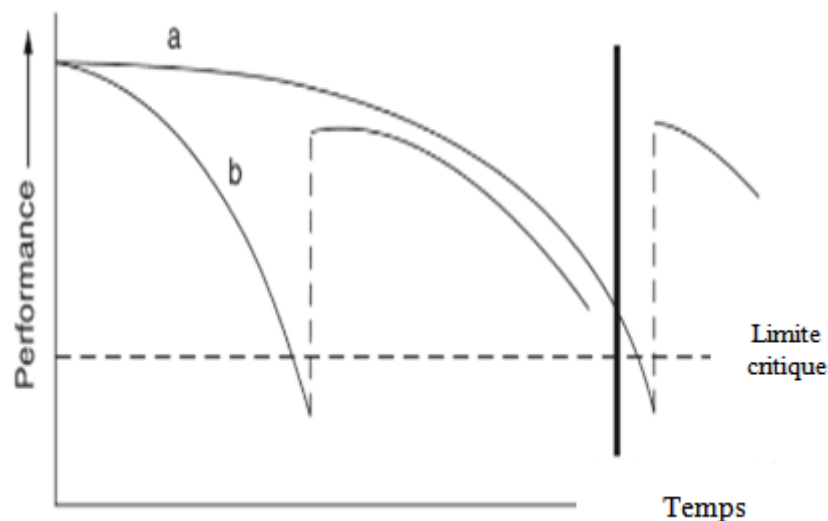
## 2.1 Introduction

Les structures en béton armé jouent un rôle essentiel dans notre vie quotidienne. Cependant, avec le temps, elles subissent des dégradations qui nécessitent des interventions de réparation. L'enjeu majeur réside dans l'amélioration de leur résistance, durabilité et étanchéité pour minimiser ces interventions. Cette problématique gagne en importance à l'échelle mondiale, avec des résultats prometteurs pour les structures existantes.

Ce chapitre souligne l'importance de la réhabilitation des structures en béton armé et décrit plusieurs méthodes de renforcement cruciales. Il est essentiel de noter que, malgré son statut de matériau universel largement employé dans le domaine de la construction, le béton requiert un entretien. Son utilisation dans les structures en béton armé continue d'augmenter, mais cela implique la nécessité d'effectuer des inspections et des opérations de maintenance régulières pour garantir la pérennité des ouvrages.

## 2.2 Procédure générale de réparation

La restauration des structures en béton armé s'effectue selon une approche systématique ayant pour objectif de rétablir leur intégrité, leur efficacité et leur longévité.



**Figure 2.1** – Performance des matériaux de construction, des composants des structures dans le temps : (a) Aucune maintenance corrective ou préventive requise, aucune détérioration (b) Une maintenance corrective a été nécessaire, présence de détérioration (Bijen, 2003).

Une procédure typique de réparation peut être résumée en six étapes principales :

1. Inspection et suivi,
2. Premier choix du matériau de réparation,
3. Deuxième choix de la méthode de réparation,
4. Préparation de la surface,
5. Conception de la réparation,
6. Application du matériau de réparation.

Un résumé des avancées et des pratiques actuelles pour chacune de ces étapes est présenté ci-dessous.

### 2.2.1 Inspection et suivi

L'inspection peut être réalisée de manière périodique, en fonction de l'utilisation de la structure, ou en réponse à des signalements de dommages ou de charges extrêmes (Abedin et al., 2019). L'objectif est d'évaluer la gravité des dommages, d'identifier leur cause et d'établir un diagnostic préliminaire.

Il est essentiel de déterminer la capacité portante actuelle de la structure et d'identifier toute déficience structurelle ainsi que ses causes. L'état du substrat en béton doit également être évalué.

Parmi les autres facteurs à considérer, il est important de prendre en compte les dimensions des éléments structurels, ainsi que la localisation, la taille et les origines des fissures et des éclats de béton. L'évaluation de l'emplacement et de l'étendue de toute corrosion des armatures est également cruciale, en tenant compte de la possibilité d'une corrosion active. Il convient d'examiner la qualité et la configuration des armatures existantes, ainsi que la résistance à la compression du béton sur site. Enfin, l'intégrité du béton, en particulier l'état de la couche de recouvrement dans toutes les zones où le matériau de renforcement sera appliqué, est un élément clé pour garantir l'efficacité et la durabilité de la réparation (Huston, 2016 ; Grae, 2012).

Ensuite, une décision est prise quant à l'action à entreprendre pour la structure. Les options possibles sont :

- Réparation,
- Démolition,
- Surveillance continue sans intervention immédiate.

Dans cette prise de décision, les autorités responsables tiendront compte du coût et de la durabilité de la réparation par rapport à une démolition ou un remplacement complet de la structure.

## **2.2.2 Choix du matériau de réparation**

Lorsqu'une réparation s'avère indispensable, la prochaine étape consiste à choisir un matériau de réparation approprié (Qeshta et al., 2016). Ce choix dépend de divers critères, tels que la disponibilité et la longévité du matériau, ainsi que sa facilité d'application sur le terrain. L'analyse du rapport coût-efficacité est également cruciale, tout comme la nature et l'état de l'élément structurel concerné. De plus, il est essentiel que la sélection du matériau prenne en considération les améliorations spécifiques visées en termes de performance structurelle, afin de garantir la durabilité et l'efficacité de la réparation.

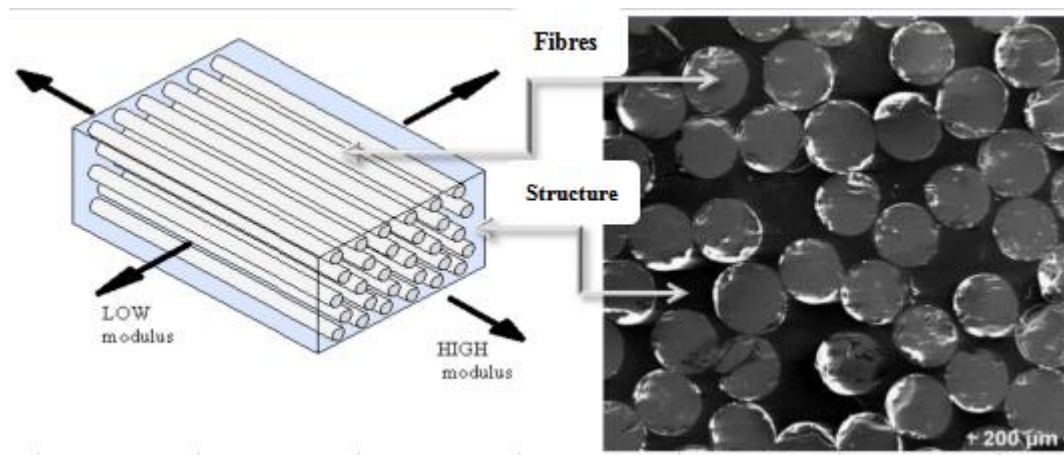
Les matériaux couramment utilisés pour la réparation des structures en béton armé sont les suivants.

### **2.2.2.1 Composites renforcés de fibres (depuis les années 1980)**

Les composites renforcés de fibres, illustrés à la Figure 2.2, sont une combinaison de deux matériaux distincts : les fibres de renforcement et la matrice. Le type de matrice et de fibre, leur orientation ainsi que le rapport entre la matrice et la teneur en fibres influencent les propriétés du composite final (Sobieck et al., 2015).

L'emploi de composites renforcés de fibres pour le renforcement des structures en béton, qui a été initialement conçu pour le secteur aérospatial, a connu un essor à partir du milieu des années 1980. Au cours des dernières années, leur utilisation a fortement augmenté, notamment dans le domaine de la réparation des ponts, en raison de leurs caractéristiques exceptionnelles. Ces matériaux se distinguent par un rapport élevé entre résistance et poids, une excellente résistance à la corrosion ainsi qu'une grande capacité de traction. En outre, ils sont protégés contre les attaques d'insectes et de champignons, présentent une faible conductivité thermique et leur flexibilité d'application facilite leur mise en œuvre, ce qui en fait une solution à la fois efficace et durable pour le renforcement des structures en béton.

Les composites renforcés de fibres sont environ 73 % à 85 % plus légers que l'acier, ce qui simplifie leur manipulation et réduit le besoin en équipements et en main-d'œuvre sur site. Bien que leur coût soit plus élevé que celui de l'acier, ils sont généralement privilégiés pour les projets de réparation à long terme en raison de leurs performances supérieures. En revanche, les matériaux en acier avec un traitement anticorrosion approprié peuvent être un meilleur choix pour des projets de renforcement à court terme (Jones, 2015).



**Figure 2.2** – Schéma des composites renforcés de fibres (Sobieck et al., 2015).

Les composites renforcés par fibres peuvent être classés en trois catégories en fonction du type de matrice utilisée : composites polymères, composites à base de ciment et composites hybrides.

### **2.2.2.2 Composites polymères (FRP - Fiber Reinforced Polymers)**

Les composites polymères, également appelés polymères renforcés de fibres (FRP), sont constitués de fibres incorporées dans une résine polymérique, comme le polyester insaturé, l'époxy, le vinylester, le phénolique ou le polyuréthane. L'époxy est le plus couramment utilisé pour la réparation des structures en raison de sa forte adhérence, de sa faible rétraction lors du durcissement et de sa résistance aux agressions extérieures (Pino et al., 2015).

Les fibres fréquemment employées pour renforcer les structures en béton comprennent l'acier, réputé pour sa robustesse et sa rigidité, ainsi que le basalte, qui est valorisé pour sa longévité et sa capacité à résister à des conditions environnementales difficiles. Le carbone, de son côté, se caractérise par une excellente résistance à la traction et un poids léger, tandis que le verre est reconnu pour son rapport coût-efficacité avantageux et sa résistance à la corrosion.

Chaque type de fibre possède des propriétés distinctes qui déterminent son utilisation en fonction des besoins spécifiques du projet de renforcement.

### **2.2.2.3 Composites à base de ciment**

L'utilisation d'une matrice cimentaire en remplacement des résines époxydes a été envisagée dès les années 1980, mais ce n'est qu'à la fin des années 1990 qu'elle a réellement suscité de l'intérêt. Comparés aux résines époxydes, ces composites offrent plusieurs atouts, notamment une résistance accrue au feu, une meilleure tenue aux rayons UV et une perméabilité réduite. De plus, leur capacité de réversibilité thermique et leur coût plus abordable en font une solution avantageuse pour le renforcement et la réhabilitation des structures en béton.

Les composites cimentaires englobent une variété de matériaux destinés à renforcer et à réparer les structures en béton. Parmi ces matériaux, on trouve le béton projeté, qui est appliqué sous pression afin d'assurer une adhérence optimale. De plus, le mortier textile armé et le béton textile armé incorporent des fibres pour accroître leur résistance mécanique. Les bétons fibrés et les mortiers fibrés renforcés, enrichis de fibres synthétiques ou métalliques, contribuent à améliorer la ductilité et la durabilité des constructions. Enfin, les composites minéraux représentent une solution novatrice, alliant robustesse et compatibilité avec les matériaux cimentaires classiques (Andrawes et al., 2018 ; Tetta et al., 2016).

### **2.2.2.4 Composites hybrides**

Les composites hybrides combinent différents types de fibres pour améliorer l'efficacité du renforcement. Ils permettent notamment de mieux gérer la ductilité et d'offrir une rupture progressive au lieu d'un comportement fragile.

### **2.2.2.5 Autres matériaux innovants**

En complément des techniques conventionnelles, de nouveaux matériaux sont actuellement étudiés pour la restauration des structures en béton armé, chacun offrant des bénéfices spécifiques en fonction des exigences du projet. Le béton fibré ultra-hautes performances (BFUP/UHPC) se distingue par sa résistance mécanique remarquable et sa durabilité accrue. Les alliages d'aluminium, de leur côté, constituent une option légère et résistante à la corrosion. Le ferro-ciment est souvent choisi pour les réparations nécessitant des couches fines et renforcées, tandis que le béton projeté (shotcrete) permet une application rapide et efficace. L'incorporation de matériaux recyclés dans les bétons innovants aide à diminuer

l'impact environnemental, et l'utilisation de revêtements protecteurs ou de scellants prolonge la longévité des structures restaurées. Le choix du matériau dépend donc de plusieurs critères, tels que les contraintes structurelles, les conditions environnementales et les considérations budgétaires (Radlinska et al., 2012).

### **2.2.3 Choix de la Méthode de Réparation**

Une fois le matériau de réparation sélectionné, il est essentiel de déterminer la méthode d'application la plus appropriée pour restaurer la poutre endommagée. Cette décision repose sur plusieurs critères clés (Harries et al., 2012 ; Belarbi et al., 2012).

#### ***2.2.3.1 Facteurs influençant le choix de la méthode de réparation***

Lors de la sélection d'une méthode de réparation pour les structures en béton armé, il est crucial de considérer plusieurs critères afin d'assurer une intervention à la fois efficace et durable. Il est primordial de s'assurer de la disponibilité commerciale de la solution choisie ainsi que du niveau de compétence des intervenants. La géométrie de la poutre est également un facteur déterminant, certaines techniques de renforcement, telles que l'enroulement complet, étant plus adaptées aux poutres rectangulaires qu'à celles en T. Il est nécessaire de définir l'état limite principal de la réparation en fonction des exigences de résistance ultime, de fatigue ou d'autres contraintes spécifiques. La gravité des dommages influe sur le choix des matériaux, car certains d'entre eux ne sont pas appropriés pour des réparations lourdes. Par ailleurs, la performance en fatigue des matériaux est essentielle pour les structures soumises à des cycles de charge répétés.

Il convient d'évaluer le niveau de renforcement nécessaire, surtout si l'objectif est d'accroître la capacité structurelle au-delà de son état d'origine. La compatibilité avec l'épissure de câbles précontraints est un autre aspect à prendre en compte, certaines méthodes pouvant être associées au strand splicing pour optimiser le renforcement. La rapidité et la simplicité de mise en œuvre sont également des critères influents, en particulier pour des interventions urgentes ou dans des environnements restreints. Certaines techniques requièrent une main-d'œuvre hautement spécialisée, tandis que d'autres nécessitent des outils spécifiques ou des équipements de levage, ce qui peut affecter la logistique et le coût global du projet.

L'impact sur la circulation sous le pont doit être anticipé, notamment en cas de fermetures temporaires. La durée des réparations doit être planifiée en tenant compte du calendrier global du projet et de la disponibilité des ressources. Enfin, l'impact environnemental est un critère de plus en plus prépondérant, nécessitant une attention particulière.

## **2.2.4 Préparation de la Surface**

La préparation de la surface, qui comprend le nettoyage des surfaces des composites, est une étape essentielle du processus de réparation, permettant d'améliorer la résistance du collage. Une préparation inadéquate peut entraîner un décollement ou un délaminage du matériau de réparation. Différentes techniques sont couramment utilisées à cet effet, notamment le sablage, le jet d'eau à haute pression, le meulage, le brossage, l'air comprimé, l'arrondi des angles, le lavage sous pression du béton, le ragréage de la surface et l'utilisation de la technique du "peel-ply" en nylon. Une mauvaise préparation de la surface peut compromettre l'adhérence du matériau de réparation et provoquer un délaminage du substrat en béton (Al-Saadi et al., 2017 ; Alkhrdaji, 2015).

### **2.2.4.1. Élimination du Béton Dégradé**

Il est préférable de retirer légèrement plus de béton que trop peu, sauf si cela risque d'affecter l'adhérence des câbles de précontrainte. Si un ragréage est prévu après l'élimination du béton détérioré, la zone à réparer doit avoir une profondeur minimale d'environ 2,5 cm et des bords aussi droits que possible, formant un angle droit avec la surface, afin d'assurer une bonne adhérence du matériau de réparation.

Si, lors du retrait du béton endommagé, des armatures corrodées sont mises à jour, il est impératif de les nettoyer par sablage ou brossage métallique afin d'éliminer la rouille et de restaurer leur capacité d'adhésion. En cas de perte importante de matière sur l'armature, un renforcement supplémentaire peut être nécessaire avant l'application du matériau de réparation.

Les Figures 2.3 et 2.4 illustrent différents types de structures nécessitant une intervention. Par exemple, à gauche, un balcon est affecté par une corrosion due aux chlorures, tandis qu'à droite, une tour de refroidissement hyperbolique nécessite un remplacement du béton.

L'utilisation d'un marteau piqueur est une méthode courante pour éliminer le béton détérioré. Toutefois, les ingénieurs doivent délimiter avec précision la zone d'intervention afin de minimiser les erreurs et d'optimiser le processus de réhabilitation des structures.



**Figure 2.3** – Enlèvement du béton selon la norme [EN 1504-10](#)



**Figure 2.4** – Tour de refroidissement hyperbolique nécessite un remplacement du béton

#### **2.2.4.2 Choix d'une Méthode de Reprofilage (si nécessaire)**

Si des fissures sont présentes sur la poutre, il est essentiel de les combler avec des matériaux adaptés, autrement dit, d'effectuer un reprofilage. Il existe plusieurs techniques de reprofilage, parmi lesquelles cinq méthodes courantes sont détaillées ci-dessous ([Harries et al., 2012](#) ; [Rteil et al., 2011](#)) :

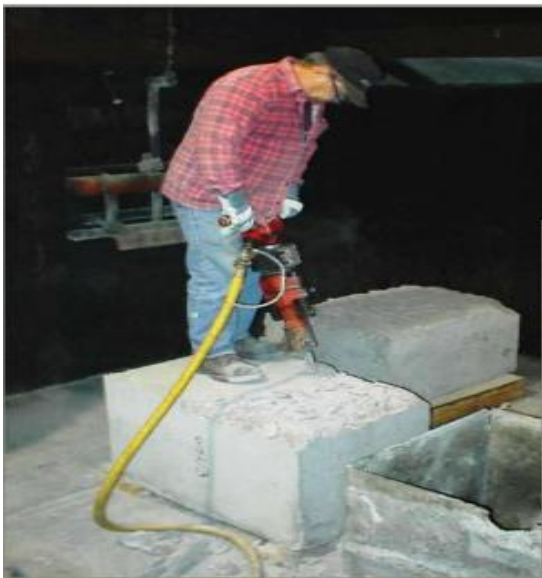
- ❖ *Méthode du compactage à sec* : Cette technique est adaptée pour des trous dont la profondeur est approximativement égale à la plus petite dimension de la section, comme les trous de carottage ou de fixation de boulons. Toutefois, elle ne convient pas aux surfaces peu profondes ni aux ouvertures traversant complètement la section.
- ❖ *Méthode du mortier de ragréage* : Elle est recommandée pour des éléments en béton présentant des défauts de surface peu profonds nécessitant l'application d'une fine couche de matériau, comme les zones de nids-d'abeilles, les cavités superficielles ou les endroits où le béton s'est détaché du coffrage.
- ❖ *Méthode de remplacement du béton* : Cette technique consiste à remplacer le béton dégradé par un béton préparé mécaniquement afin d'assurer une parfaite intégration avec le béton existant. Elle est privilégiée lorsque le défaut traverse entièrement la

section, lorsqu'il affecte la couche d'armature ou encore lorsque le volume du défaut est conséquent.

- ❖ *Reprofilage avec des matériaux synthétiques* : Cette méthode est particulièrement utile lorsque l'utilisation d'un mortier à base de ciment Portland est difficile ou inadaptée. C'est le cas, par exemple, lorsque les réparations doivent être effectuées à basse température ou sur des défauts de surface très superficiels. Pour ces situations, des produits à base d'époxy ou de latex peuvent être employés.

### 2.2.4.3 Polissage et Rugosité de la Surface

Dans le cadre de la préparation de surface, il est essentiel de polir le béton jusqu'à l'exposition des granulats fins (Dong et al., 2012). Cette technique permet d'améliorer l'adhérence entre le matériau de renforcement et la surface en béton. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour rugosifier la surface (Figure 2.5), notamment le sablage ou le grenailage abrasif (Yang et al., 2011). Une autre technique courante est le meulage au diamant (Williams et al., 2008) tandis que le jet d'eau à haute pression (Michels et al., 2016) comme la Figure 2.6 peut également être employé. Enfin, l'utilisation d'une meuleuse permet d'atteindre un degré de rugosité au niveau des granulats.



**Figure 2.5** – Préparation de surface (marteau pneumatique).



**Figure 2.6** – Préparation de surface (hydro-démolition).

#### 2.2.4.4 Nettoyage

Avant d'appliquer le matériau de réparation, la surface en béton doit être parfaitement propre. Plusieurs méthodes sont disponibles pour éliminer poussières et impuretés, telles que l'air comprimé, l'acétone, le lavage sous pression ou encore le jet d'eau haute pression (Figure 2.7) (Dong et al., 2012). Une brosse métallique peut également être utilisée pour parfaire le nettoyage. Il est impératif de s'assurer que la surface est sèche et exempte d'huile ou de toute substance grasse susceptible d'affecter l'adhérence du matériau de réparation (Qin et al., 2014). Le sablage peut également être employé pour nettoyer la zone de réparation comme illustre la Figure 2.8 (Yang et al., 2011), tandis que l'air comprimé reste une méthode largement utilisée pour éliminer poussières et débris.



**Figure 2.7** – Nettoyage des barres d'armature.








**Figure 2.8** – Processus de sablage.

#### 2.2.5 Conception de la Réparation

La conception de la réparation est une étape clé pour garantir que le matériau choisi soit appliqué dans une configuration offrant une résistance et une durabilité suffisantes. Différentes approches de conception peuvent être nécessaires en fonction du type et de l'ampleur des dégâts, des exigences de durabilité, ainsi que des ressources disponibles pour la mise en œuvre de la réparation. L'optimisation du design peut également être employée pour obtenir les meilleurs résultats possibles (Mahdavi et al., 2019).

**Tableau 2.1** – Quelques exemples de la conception de la réparation.

	<p style="text-align: center;"><b>Bordure de passerelle</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Corrosion induite par les chlorures.</li> <li>2. Retrait du béton endommagé.</li> <li>3. Mise en place des coffrages.</li> <li>4. Coulage du béton.</li> </ol>
	<p style="text-align: center;"><b>Mur de traitement des eaux</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Érosion de la pâte de ciment.</li> <li>2. Pulvérisation de matériaux cimentaires.</li> <li>3. Pulvérisation à basse pression.</li> </ol>
	<p style="text-align: center;"><b>Station de pompage des eaux usées</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Corrosion des armatures.</li> <li>2. Retrait du béton endommagé.</li> <li>3. Mise en place des coffrages.</li> <li>4. Coulage du béton.</li> </ol>
	<p style="text-align: center;"><b>Réparation de colonne</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Auscultation du béton.</li> <li>2. Coffrage.</li> <li>3. Béton auto-plaçant.</li> </ol>
	<p style="text-align: center;"><b>Encapsulation de colonne</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Auscultation du béton.</li> <li>2. Coffrage.</li> <li>3. Béton auto-plaçant.</li> </ol>

Par exemple le processus de réparation des éclats comprend le choix des matériaux à utiliser. Il existe différents types d'adjuvants tels que les polymères, la fumée de silice, les inhibiteurs de corrosion, les agents expansifs ou encore les fibres de carbone. Ces matériaux doivent être sélectionnés avec soin en fonction des caractéristiques spécifiques de la réparation.

Chaque projet présente des particularités qui doivent être prises en compte. Par exemple, les projets confrontés à une corrosion induite par les chlorures peuvent nécessiter l'utilisation d'anodes sacrificielles ou d'une protection cathodique. En revanche, si l'objectif est de renforcer une structure, l'emploi de fibres de carbone peut permettre d'augmenter la capacité portante des éléments en béton.

### **2.2.6 Application du Matériau de Réparation**

Après la préparation de la surface, l'étape suivante consiste à appliquer le matériau de réparation. Selon la méthode utilisée, qu'il s'agisse de la technique de collage externe (EB), de la méthode NSM ou du renforcement encastré, l'application du matériau diffère en termes de procédé et de configuration.

#### **2.2.6.1 Choix d'une méthode de réparation**

Une fois le matériau de réparation choisi, il est essentiel de sélectionner une méthode d'application appropriée pour la poutre endommagée (Harries et al., 2012 ; Belarbi et al., 2012). Ce choix doit être fondé sur plusieurs critères clés, tels que la disponibilité commerciale de la technique et sa compatibilité avec l'état limite qui nécessite la réparation. L'étendue des dommages pouvant être réparés avec le matériau sélectionné, ainsi que sa résistance à la fatigue, jouent également un rôle déterminant dans cette décision.

Il est important de considérer la nécessité éventuelle d'un renforcement qui dépasse la capacité initiale de la structure, ainsi que la possibilité de combiner cette méthode avec un épissurage des câbles de précontrainte. La rapidité d'exécution et la faisabilité sur le chantier sont des éléments cruciaux, surtout pour les projets nécessitant une intervention rapide. Certaines techniques requièrent une main-d'œuvre spécialisée et des outils spécifiques, tandis que d'autres peuvent nécessiter un équipement de levage, ce qui peut influencer la logistique et le coût de l'opération.

L'impact de la réparation sur la circulation sous l'ouvrage est un facteur déterminant, notamment lorsque des restrictions temporaires doivent être mises en place. Il est également

nécessaire d'évaluer le temps moyen nécessaire pour réaliser les travaux ainsi que l'impact environnemental de la méthode, en termes d'émissions et de gestion des déchets. La durabilité de la solution choisie est un critère fondamental pour assurer la longévité de la réparation.

De plus, la modification des dimensions de l'élément réparé peut affecter l'esthétique de la structure et entraîner des coûts supplémentaires liés à l'ajustement d'autres composants. Cet aspect est directement lié à l'épaisseur du matériau de renforcement utilisé et aux éventuelles perturbations dans l'exploitation de l'ouvrage. Enfin, le coût total de l'intervention et l'intégration visuelle de la réparation doivent également être pris en compte.

### **2.2.6.2 Méthodes d'application disponibles**

Il existe plusieurs techniques pour appliquer le matériau de réparation à une structure endommagée. Celles-ci seront détaillées en fonction des critères mentionnés ci-dessus afin d'assurer une réparation efficace, durable et économiquement viable.

#### *❖ Techniques de Renforcement par Collage Externe (EB – Externally Bonded)*

Le renforcement par collage externe est une technique couramment utilisée pour augmenter la capacité portante des éléments en béton armé. Cette méthode implique l'application d'un matériau de renforcement sur la surface extérieure de l'élément, à l'aide d'un adhésif spécialisé ou d'un système d'ancrage mécanique (Beneberu et al., 2019). Elle présente plusieurs avantages significatifs.

En premier lieu, sa simplicité d'application est un atout considérable. Contrairement à d'autres approches, elle ne requiert ni démolition de béton ni perçage, ce qui diminue le risque d'endommager l'armature existante. En outre, elle offre une protection efficace contre la corrosion, en limitant l'infiltration d'eau et de sels, ce qui aide à préserver l'intégrité des armatures et du béton réparé. Enfin, cette méthode contribue à minimiser les fissures qui peuvent survenir lors d'une réparation en béton seule, en atténuant les effets du retrait et des charges de service. Ces caractéristiques font du renforcement par collage externe une solution efficace et durable pour la réhabilitation des structures en béton armé (Pino et al., 2015).

❖ *Techniques de Renforcement par Insertion Proche de la Surface (NSM – Near-Surface Mounted)*

La technique NSM (Near-Surface Mounted), développée dans les années 1940, consiste à insérer des barres de matériaux composites FRP dans des rainures préalablement créées à la surface du béton. À l'origine, cette méthode utilisait des câbles en acier, mais ceux-ci ont été progressivement remplacés par des composites FRP en raison de leur résistance supérieure à la corrosion.

Cette approche présente plusieurs caractéristiques clés. Premièrement, les matériaux de renforcement peuvent se présenter sous forme de barres rectangulaires (bandes) ou circulaires, généralement produites par pultrusion, ce qui leur confère des propriétés mécaniques uniformes. De plus, un traitement de surface, tel que le sablage ou la déformation, peut être appliqué aux barres pour améliorer leur adhérence au béton. Les recherches indiquent que les barres déformées offrent une adhérence supérieure par rapport aux barres lisses.

En termes de performance, les bandes rectangulaires présentent un avantage considérable. Leur surface de contact élargie avec l'adhésif optimise l'adhérence, réduisant ainsi les risques de décollement. En outre, ces bandes atteignent généralement une rupture en traction et assurent une interaction plus efficace avec le béton, ce qui renforce la durabilité et l'efficacité du renforcement. Par conséquent, la technique NSM se révèle être une solution efficace et durable pour le renforcement des structures en béton armé, alliant résistance mécanique et protection contre la corrosion (Lee et al., 2019 ; Aslam et al., 2015).

Comparée au collage externe (EB), la méthode NSM est plus efficace pour éviter le décollement prématuré et présente une meilleure résistance au feu et aux impacts, ce qui la rend de plus en plus populaire dans le domaine du renforcement des structures en béton armé.

Bien que la méthode NSM (Near-Surface Mounted) améliore considérablement l'adhérence par rapport au collage externe (EB), elle peut néanmoins être sujette à un décollement prématuré.

❖ *Le principe du renforcement encastré (Deep Embedded Reinforcement)*

Face aux contraintes des techniques EB (Externally Bonded) et NSM (Near-Surface Mounted), une méthode alternative a été mise en place (Qapo et al., 2016) : le renforcement profondément encastré. Cette approche consiste à intégrer les matériaux de renforcement à

l'intérieur de l'élément, au-delà de la couche de surface ou des rainures, ce qui présente plusieurs bénéfices.

Premièrement, elle favorise un meilleur transfert des charges. Contrairement aux méthodes EB et NSM, qui dépendent principalement de l'adhérence de la couche de surface, cette technique utilise directement la masse du béton pour assurer une transmission plus efficace des efforts vers le renforcement. En outre, le confinement obtenu grâce à un ancrage plus profond assure une meilleure résistance mécanique, diminuant ainsi les risques de décollement prématuré.

Un autre avantage significatif est la protection renforcée du renforcement contre les agressions extérieures. L'encastrement profond réduit l'exposition aux incendies et aux actes de vandalisme, des menaces souvent liées aux méthodes conventionnelles.

Ainsi, bien que les solutions EB et NSM soient appropriées pour de nombreuses applications, le renforcement profondément encasté se distingue par sa capacité à améliorer la performance structurelle et la durabilité des réparations, en offrant un ancrage plus fiable et une protection accrue des matériaux de renforcement.

### **2.3 Les mortiers de réparation selon la norme EN 1504**

L'examen de la troisième partie de la norme [EN 1504-3](#) révèle l'existence de quatre catégories d'exigences pour les mortiers de réparation. Ces catégories sont déterminées par les résistances à la compression. On distingue ainsi deux classes pour les mortiers de réparation non structuraux (R1 et R2) et deux autres classes pour les mortiers de réparation structuraux (R3 et R4).

Les mortiers de première catégorie sont utilisés sur des surfaces en béton afin de restaurer l'aspect géométrique ou esthétique de la structure. En revanche, les mortiers de deuxième catégorie sont appliqués sur des structures en béton pour remplacer le béton endommagé, permettant ainsi de rétablir l'intégrité et la durabilité de la structure. Actuellement, le marché propose divers types de mortiers destinés à la réparation du béton, et le choix du matériau est principalement déterminé par l'épaisseur de la réparation envisagée.

Par ailleurs, la norme [EN 1504-3](#) impose une déclaration de conformité obligatoire pour les produits et systèmes utilisés dans la réparation des structures en béton, qu'elle soit structurelle ou non. À cet égard, le fabricant de mortiers de réparation doit soumettre son produit à des essais initiaux de performance, y compris ceux relatifs à la durabilité des matériaux,

conformément aux valeurs spécifiées dans les Tableaux 1.6 et 1.7, et s'assurer que son produit respecte les exigences établies.

**Tableau 2.2** – Caractéristiques de performance des produits de réparation (structuraux ou non structuraux) (Benyahia, 2017).

Caractéristiques de performances	Principe de réparation			
	3	3	4	7
	Méthode de réparation			
	3.1; 3.2	3.3	4.1	7.1; 7.2
Force de compression	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Taux d'ions chlorure	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Pégosité	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Expansion/retrait limité	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Durabilité résistance à la carbonatation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Durabilité compatibilité thermique cycles gel/dégel ; pluie d'orage ; cycles thermiques à sec	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Module d'élasticité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Résistance au glissement et au dérapage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Coefficient de dilatation thermique	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Absorption capillaire (perméabilité à l'eau)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Performances exigées  Performances optionnelles

Notes importantes :

- La résistance à la carbonatation n'est pas indispensable lorsque le système de réparation comprend un système éprouvé de protection des surfaces résistantes à la carbonatation.
- L'expansion/le retrait limité sont dispensables si des mesures de durabilité/cycle thermique sont prises.
- Choix de l'essai de cycle thermique sur la base des conditions d'exposition, par exemple exposition au gel et au dégel, au séchage et à l'humidité, au chaud et au froid, etc.

Dans le cadre de cette étude, seuls les mortiers à base de liants hydrauliques seront considérés pour la réparation du béton.

**Tableau 2.3** – Exigences relatives aux performances des produits de réparation, qu'ils soient structurels ou non structurels (Benyahia, 2017).

Caractéristiques de performances	Méthode d'essai	Exigences (Tableau 3 de la norme EN 1504 partie 3)			
		Structurale		Non structurale	
		Catégorie R4	Catégorie R3	Catégorie R2	Catégorie R1
Force de compression	EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
Taux d'ions chlorure	EN 1015-17	≤ 0,05%		≤ 0,05 %	
Pégosité	EN 1542	≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
Expansion/retrait limité	EN 12617-4	Résistance d'adhérence après essai			Aucune exigence
		≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
Durabilité résistance à la carbonatation	EN 13295	$d_k \leq$ béton de référence		Aucune exigence	
Durabilité - compatibilité thermique gel/dégel	EN 12617-4	Résistance d'adhérence après 50 cycles			Contrôle visuel
		≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
Durabilité - compatibilité thermique pluie d'orage	EN 12617-4	Résistance d'adhérence après 30 cycles			Contrôle visuel
		≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
Durabilité - compatibilité thermique cycles thermiques à sec	EN 12617-4	Résistance d'adhérence après 30 cycles			Contrôle visuel
		≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
Module d'élasticité	EN 13412	≥ 20 GPa	≥ 15 GPa	Aucune exigence	
Résistance au glissement et au dérapage	EN 13036-4	Catégorie I: ≥ 40 unités humides Catégorie II: ≥ 40 unités essayées à sec Catégorie III: > 55 unités essayées humides		Catégorie I: ≥ 40 unités essayées humides Catégorie II: ≥ 40 unités essayées à sec Catégorie III: > 55 unités essayées humides	
Absorption capillaire	EN 13057	≤ 0,5 kg/m <sup>2</sup> ·h <sup>0,5</sup>		≤ 0,5 kg/m <sup>2</sup> ·h <sup>0,5</sup>	Aucune exigence

## 2.4 Conclusion

Assurer la durabilité des structures en béton face aux contraintes du temps et des agressions extérieures reste un véritable défi. La réparation, la réhabilitation et le renforcement de ces ouvrages nécessitent une approche rigoureuse, alliant diagnostics précis et techniques modernes.

Un suivi régulier, associé à l'utilisation de matériaux innovants, permet non seulement de ralentir la détérioration, mais aussi d'optimiser la durée de vie des infrastructures. Avec le vieillissement progressif du parc bâti, il devient crucial d'adopter une stratégie proactive incluant des audits structurels et une maintenance préventive. En intégrant les avancées

technologiques et les bonnes pratiques, il est possible de garantir la sécurité et la pérennité des ouvrages, tout en réduisant les coûts de réparation à long terme.

## Chapitre 3

---

*Effets de la fumée de silice sur les propriétés des mortiers et bétons*

### 3.1 Introduction

Dans plusieurs régions, l'obtention restreinte de ressources telles que le laitier de haut fourneau, les cendres volantes et la fumée de silice (FS) génère une augmentation des coûts de production en raison de la nécessité de transporter ces matériaux sur des distances étendues, ce qui contribue également à une pollution environnementale accrue. La fumée de silice, avec sa granularité ultrafine et sa teneur élevée en silice, est reconnue comme un additif pozzolanique de haute performance qui améliore significativement les propriétés du béton.

FS un dérivé des opérations de fusion dans les industries du silicium et du ferrosilicium, connue également sous les noms de micro-silice, FS condensée, silice volatilisée ou poussière de silice, est disponible en versions blanche de qualité supérieure ou grise. Elle se compose de particules vitreuses ultrafines ayant une surface spécifique allant de 13 000 à 30 000 m<sup>2</sup>/kg, soit environ cent fois plus petites que les particules de ciment traditionnelles.

Les études montrent que l'incorporation de FS augmente la résistance à la compression, améliore la cohésion, optimise la résistance à l'abrasion et diminue la perméabilité du béton, ce qui renforce la protection contre la corrosion des armatures en acier tout en assurant une distribution homogène des granulats sans risque de ségrégation.

### 3.2 Effet de la fume de silice sur les propriétés du béton à l'état frais

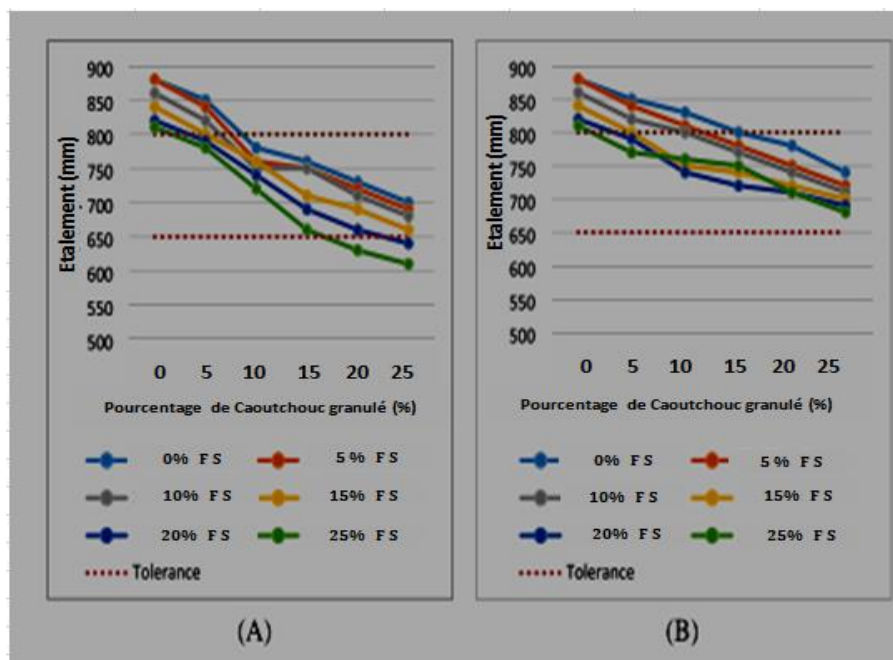
#### 3.2.1 Ouvrabilité

L'ouvrabilité est une propriété physique essentielle des matériaux cimentaires, garantissant une mise en place optimale du béton sans ségrégation des granulats. La maniabilité est une propriété physique fondamentale des matériaux à base de ciment, assurant une mise en place idéale du béton sans ségrégation des granulats.

La qualité optimale du béton est essentiellement influencée par les caractéristiques rhéologiques du mélange, affectant directement la durabilité, l'esthétique, ainsi que les coûts de la main-d'œuvre nécessaires pour les procédures de mise en place et de finition du béton. Toutefois, des recherches récentes, y compris celles menées par plusieurs chercheurs ([Amin et al., 2022](#) ; [Ali et al., 2021](#) ; [Habibi et al., 2021](#)) ont indiqué que l'augmentation de la proportion de FS dans le béton peut réduire sa maniabilité.

La finesse des particules de FS améliore la cohésion entre les composants de la pâte de ciment, tandis que la grande superficie spécifique de FS augmente le besoin en eau, diminuant

par conséquent la fluidité du béton. Selon ces études, un accroissement du contenu de FS est associé à une réduction de l'affaissement du béton, ce qui indique une perte de maniabilité. Par exemple, l'étude de [Fakhri et al., \(2021\)](#) a observé qu'une substitution progressive de FS en lieu et place du ciment (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % et 25 %) réduit l'affaissement du béton de 870 mm à 800 mm, comme démontré dans la Figure 3.1.



**Figure 3.1** – Effet de FS sur l'ouvrabilité des bétons ([Fakhri et al., 2021](#)).

De même, [Saba et al., \(2021\)](#) ont observé une réduction des valeurs d'affaissement avec l'augmentation de la teneur en FS dans le mélange (Figure 3.2). Ce phénomène s'explique par la haute réactivité de FS, liée à sa finesse et à ses propriétés pouzzolaniques, ce qui intensifie les frictions inter-particulaires et diminue ainsi l'ouvrabilité du béton.

[Amarkhail, \(2015\)](#) a observé que l'incorporation de fumée de silice (FS) dans le béton réduit sa maniabilité, mais jusqu'à 10 % de remplacement du ciment par de la FS n'affecte pas négativement cette propriété (Figure 3.3).

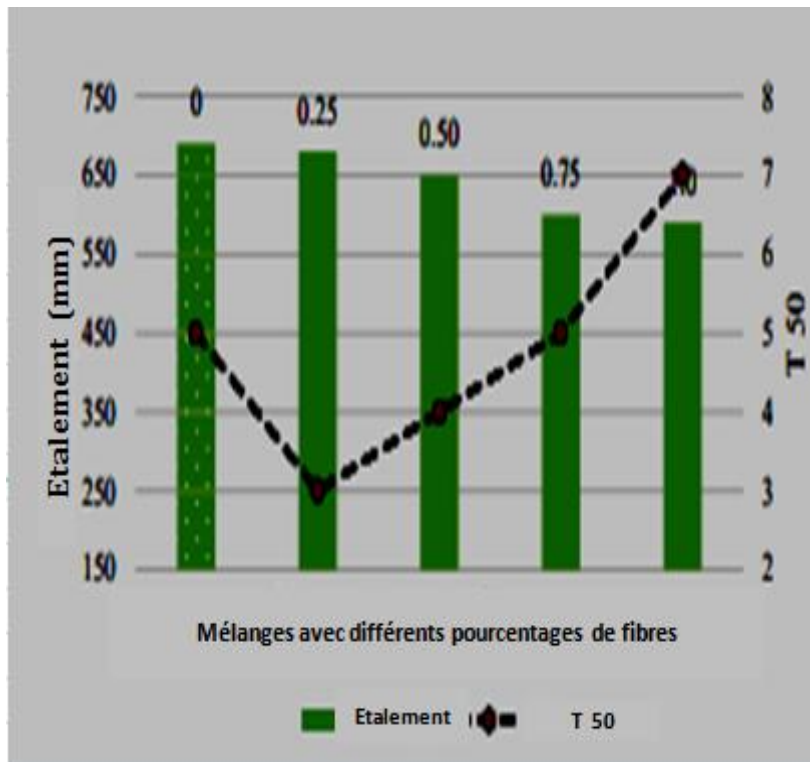


Figure 3.2 – Effet de FS sur l'ouvrabilité des bétons (Saba et al., 2021).

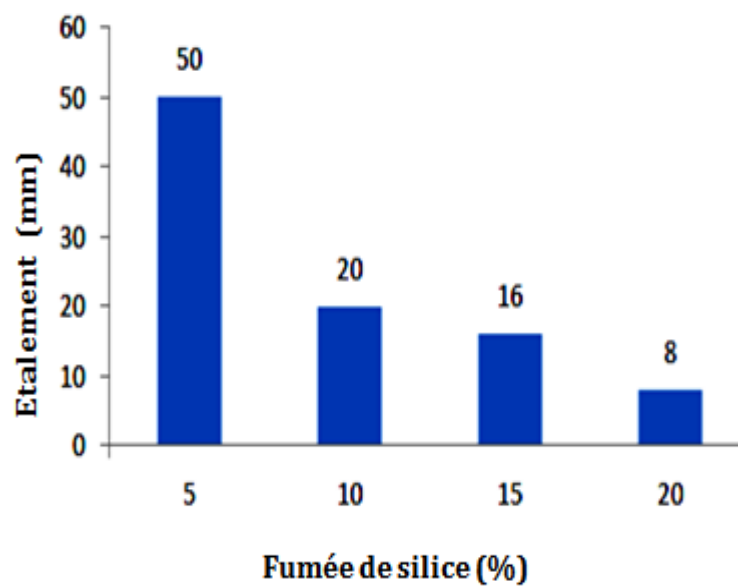


Figure 3.3 – Valeurs d'étalement en fonction de divers taux de substitution par la fumée de silice (Amarkhail, 2015).

### 3.2.2 Chaleur d'hydratation

La chaleur d'hydratation des pâtes cimentaires, dépendante de la température et du temps, est une propriété fondamentale pour comprendre les performances du béton. L'hydratation du ciment peut être représentée à l'aide de modèles cinétiques en tenant compte des effets des propriétés chimiques et physiques des pâtes cimentaires ainsi que des conditions de cure (Hasani et al., 2023).

Shi et al., (2015) ont rapporté que le taux de chaleur d'hydratation des mélanges de béton contenant 15 % de FS (N2) dépassait celui contenant uniquement du ciment Portland (OPC) (N1), comme illustré à la Figure 3.4. Le temps requis pour la chaleur d'hydratation est passé de 7,23 h à 4,77 h en augmentant la teneur en SF de 0 % à 15 %. En revanche, le taux de chaleur d'hydratation a diminué et l'hydratation accélérée a augmenté à 6,37 h lorsque la teneur en FS a été portée à 30 % (N5). L'utilisation de 30 % de FS a modifié le processus d'hydratation après son initiation.

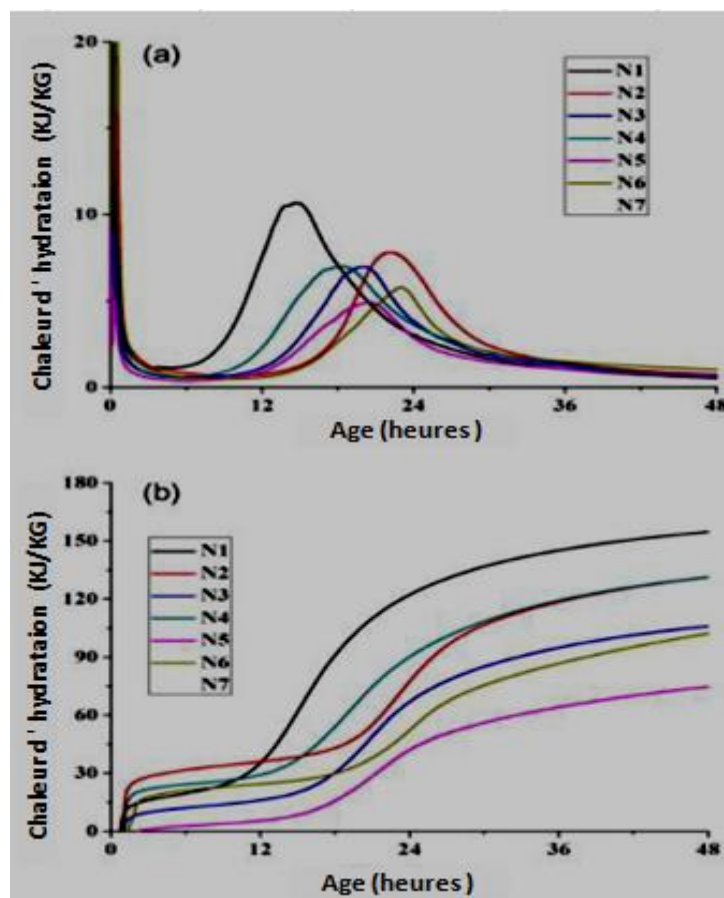


Figure 3.4 – Effet de FS sur la chaleur d'hydratation (Shi et al., 2015).

### 3.3 Effet de la fume de silice sur les propriétés du béton à l'état durci

#### 3.3.1 Résistances mécaniques

L'évaluation des performances mécaniques du béton est primordiale pour déterminer sa robustesse et sa durabilité une fois durci. Parmi ces propriétés, la résistance mécanique, en particulier la résistance à la compression, joue un rôle fondamental, car elle dépend étroitement de la microstructure de la pâte de ciment hydratée. En tant que paramètre déterminant, elle permet d'évaluer la qualité et la viabilité du béton structural dans diverses applications de génie civil.

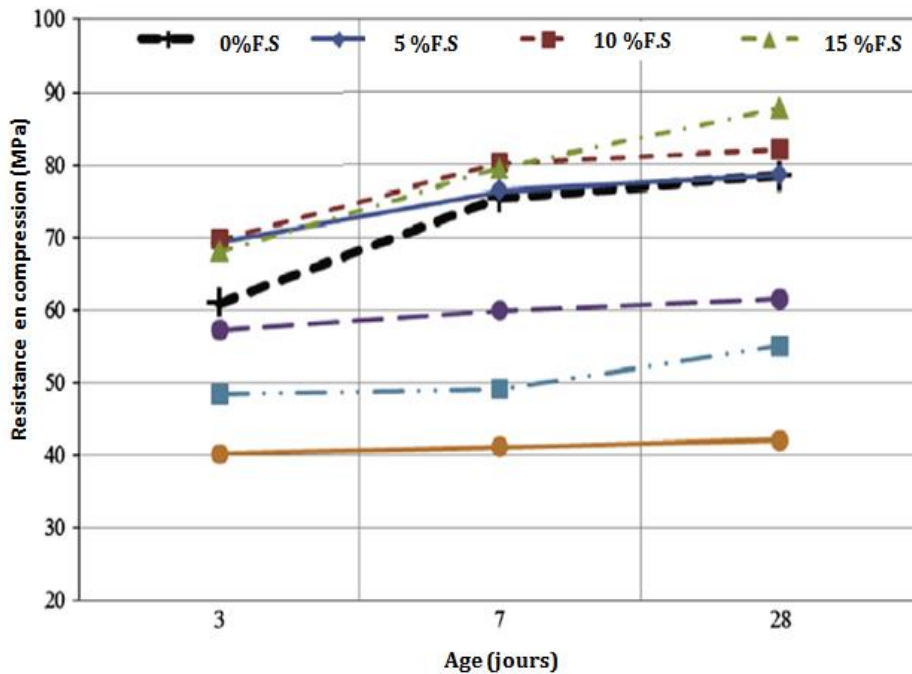
##### 3.3.1.1 Résistance à la compression

Divers paramètres influencent la résistance à la compression du béton, notamment la réactivité pozzolanique des ajouts minéraux, la nature et la composition chimique des constituants, le type et la quantité d'adjuvants, le pourcentage de substitution du ciment par des matériaux secondaires, ainsi que les conditions de la cure, la température d'hydratation et la nature même du ciment employé (Jiao et al., 2022).

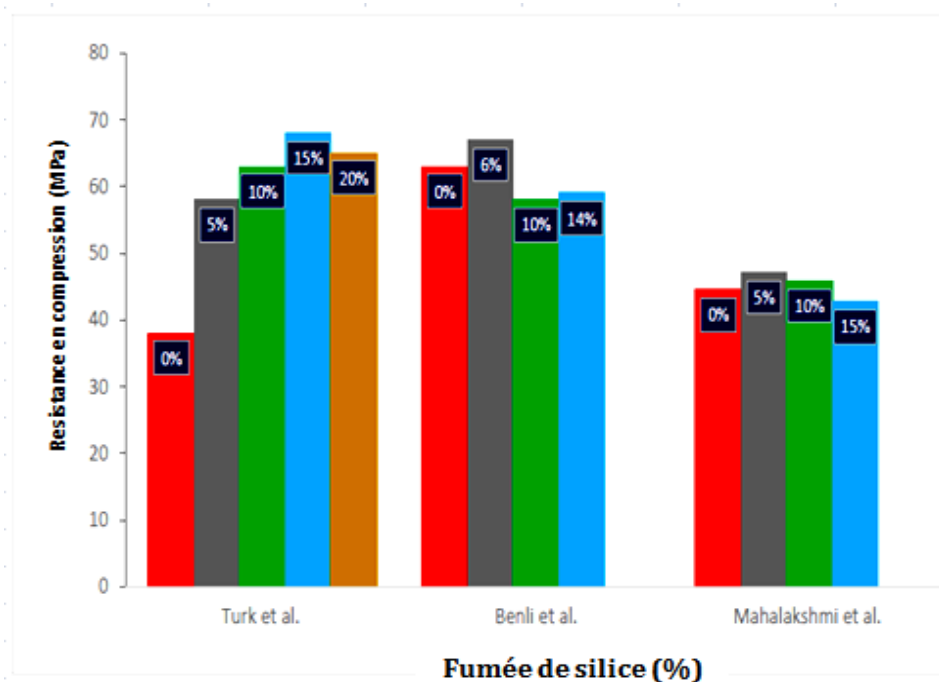
Des investigations expérimentales menées par Bingöl et al., (2013) ont mis en évidence une amélioration notable de la résistance à la compression du béton lorsque la fumée de silice est incorporée dans le mélange. Cet effet est particulièrement prononcé lorsque le taux de substitution du ciment par FS atteint 15 %, comme le montre la Figure 3.4. Cette amélioration est attribuée à la finesse extrême des particules de FS ainsi qu'à leur forte activité pozzolanique, qui favorisent non seulement une meilleure cohésion entre les composants du béton mais aussi la génération accrue de produits d'hydratation secondaires, renforçant ainsi la matrice cimentaire et réduisant les vides capillaires.

Par ailleurs, Turk et al., (2010) ont exploré l'incidence de divers taux de remplacement du ciment par FS, jusqu'à 20 %, sur l'évolution de la résistance mécanique du béton au fil du temps. Il a été constaté qu'après 130 jours de la cure, le béton autocompactant contenant 15 % de fumée de silice présentait les meilleures performances mécaniques, atteignant une résistance à la compression de 73,87 MPa. Cette augmentation est attribuée à la granulométrie ultrafine de la FS et à sa réactivité pozzolanique qui, en agissant comme un agent de comblement, réduit la porosité du béton et favorise la formation de phases hydratées supplémentaires.

Ce phénomène conduit à une structure interne plus dense et plus homogène, améliorant la résistance globale du matériau. FS, grâce à sa fine granulométrie et sa réactivité, contribue à combler les espaces vides dans la matrice du béton et à former des produits d'hydratation supplémentaires, ce qui renforce la structure globale du béton.

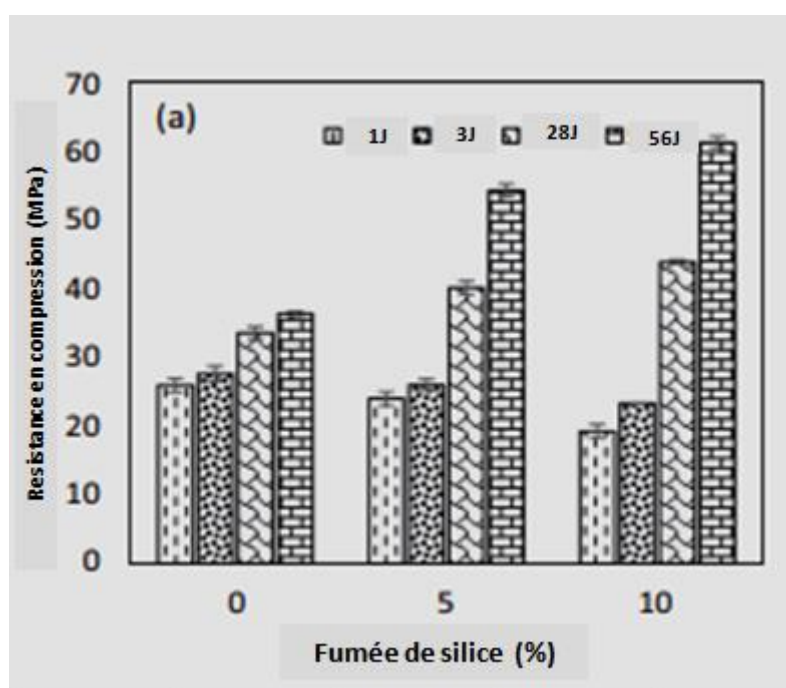


**Figure 3.5** – Effet de FS sur la résistance à la compression du béton (Bingöl et al., 2013).



**Figure 3.6** – Effet de FS sur la résistance à la compression du béton (Ahmed et al., 2022).

Dans une autre étude, [Ahmad et al., \(2018\)](#) ont examiné l'effet de l'incorporation de FS sur la résistance à la compression du mortier à base de ciment phosphate de magnésium. Les résultats, représentés dans la Figure 3.7, indiquent que l'ajout de 5 % et 10 % de FS a conduit à une amélioration progressive de la résistance à la compression dès les trois premiers jours, mettant en évidence un développement continu des phases d'hydratation aux âges plus avancés. Cette amélioration s'explique par la capacité de la FS à réduire la porosité du mortier en remplissant les micropores et microfissures présents dans la structure, grâce à la taille ultrafine de ses particules. Cette propriété confère ainsi au béton et au mortier une meilleure compacité et une plus grande résistance mécanique à long terme.



**Figure 3.7** – Effet de FS sur la résistance à la compression du béton ([Ahmad et al., 2018](#)).

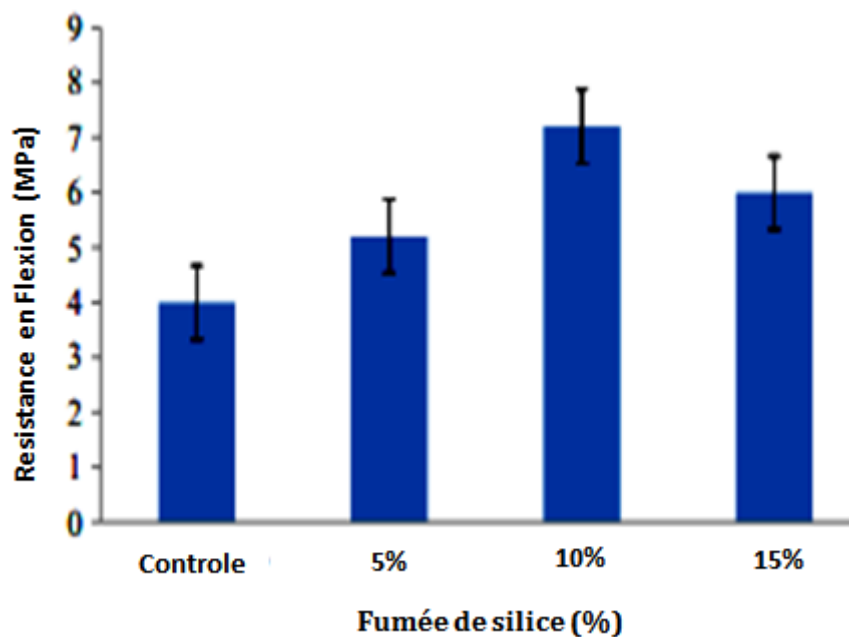
### 3.3.1.2 Résistance à la Flexion

La résistance à la flexion représente la capacité intrinsèque d'un matériau à supporter des charges appliquées perpendiculairement à son axe longitudinal. Cette propriété mécanique revêt une importance capitale dans l'évaluation des performances structurelles des éléments soumis aux sollicitations en flexion, tels que les poutres, dalles et autres structures en béton. Elle est influencée par divers paramètres, notamment la composition chimique et physique du

matériau, sa microstructure interne ainsi que les conditions spécifiques du chargement appliqué.

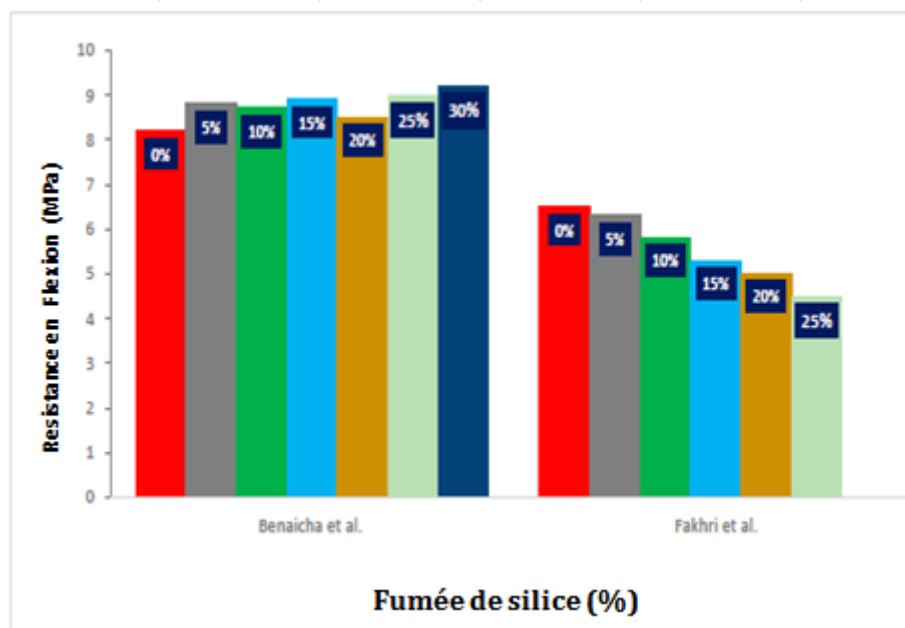
Les études portant sur la résistance à la flexion des bétons intégrant du FS ont mis en évidence un comportement mécanique analogue à celui observé en compression. La Figure 3.8 illustre l'impact de FS sur les caractéristiques mécaniques du béton, qu'il soit non armé ou renforcé par des fibres. Les travaux de [Karthikeyan et al., \(2018\)](#) ont démontré que l'incorporation de 10 % de FS, qui avait déjà permis une amélioration significative des résistances en compression et en traction, entraîne également une augmentation de la performance en flexion.

Cette amélioration est attribuée aux réactions pouzzolaniques induites par le FS, lesquelles favorisent la formation accrue de gel C-S-H, contribuant ainsi à une structure du béton plus dense, robuste et durable.



**Figure 3.8** – Effet de FS sur la résistance à la flexion ([Karthikeyan et al., 2018](#)).

De manière concordante, [Benaicha et al., \(2015\)](#) ont rapporté des résultats similaires en ce qui concerne la résistance à la flexion du béton. Plus précisément, un taux de substitution de 10 % en FS a permis d'atteindre des propriétés mécaniques quasi équivalentes en termes de résistance à la compression, de flexion ainsi que du module d'élasticité (Figure 3.9).



**Figure 3.9** – Effet de FS sur la résistance à la flexion (Ahmed et al., 2022).

### 3.3.1.3 Module d'élasticité

Le module d'élasticité constitue un paramètre mécanique fondamental pour l'analyse des performances structurales et le dimensionnement des structures en béton. Déterminé à travers les essais de flexion, il caractérise la rigidité intrinsèque du matériau et exprime la relation entre la contrainte appliquée et la déformation relative engendrée sur la surface sollicitée. D'un point de vue mécanique, il se situe entre le module de Young et le module de compressibilité, jouant ainsi un rôle clé dans la modélisation du comportement élastique des structures en béton (Yildirim et al., 2011).

D'après les recherches menées par Ouyang et al., (2020), une augmentation de la teneur en FS, passant de 100 à 350 kg/m<sup>3</sup>, améliore de manière notable le module d'élasticité du béton, cet effet étant particulièrement prononcé jusqu'à un taux de substitution de 10 % (Figure 3.10). Cette amélioration est due à l'effet pouzzolanique de la FS, qui favorise une microstructure plus compacte grâce à la formation accrue de gels C-S-H. Cette amélioration est attribuée aux effets de charge et aux réactions pouzzolaniques de la FS, qui favorisent la formation d'une microstructure plus dense grâce à la production accrue de gels C-S-H à mode basique PH12.

Karimipour et al., (2021) ont rapporté des tendances similaires (Figure 3.11), montrant que dans le béton ultra-performant, le module d'élasticité diminue légèrement jusqu'à un minimum à 10 % de FS, avant d'augmenter de façon notable pour des taux plus élevés.

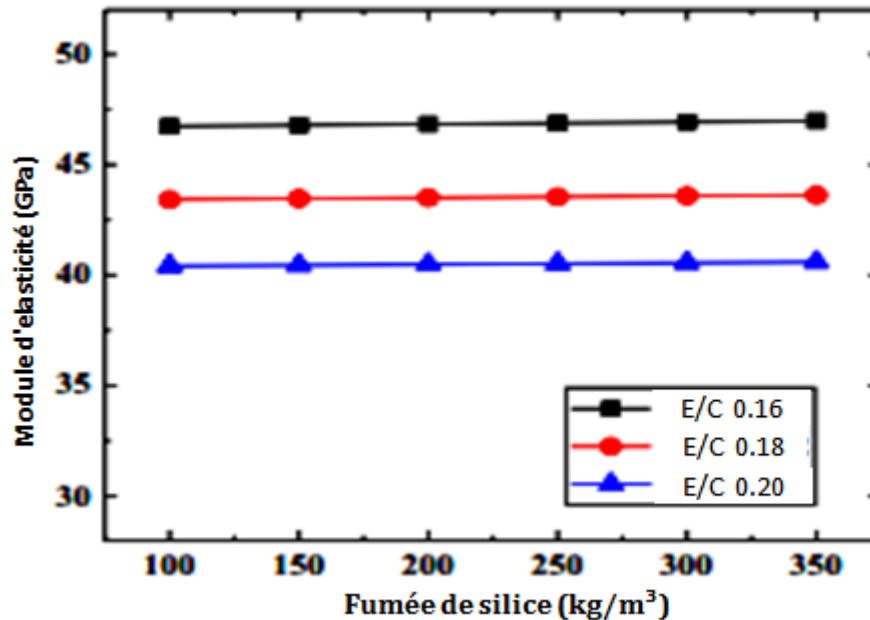


Figure 3.10 – Effet du pourcentage de FS sur le module d'élasticité du béton (Ouyang et al., 2020).

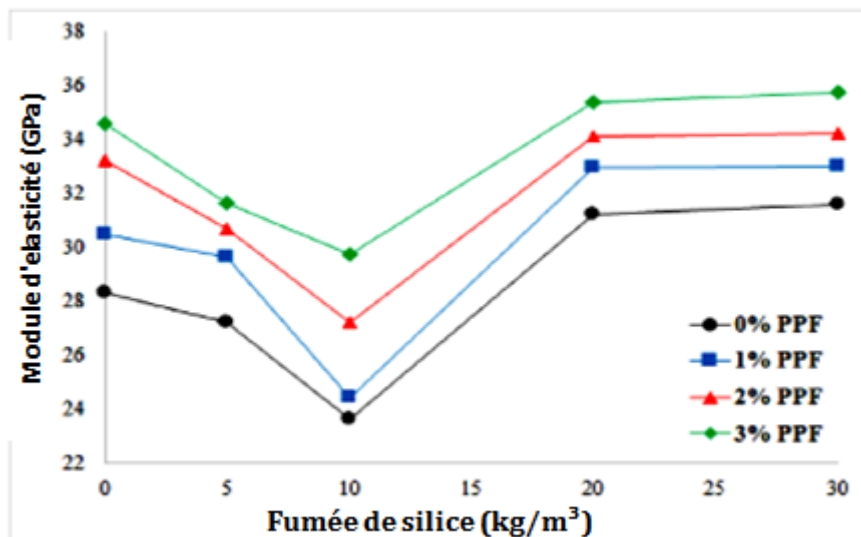


Figure 3.11 – Influence du pourcentage de FS fillers sur le module d'élasticité du béton ultra-performant (Karimipour et al., 2021).

### 3.3.2 Retrait et fluage

Si le béton est soumis à des charges continues, il continue à se déformer avec le temps. Ce phénomène est désormais communément appelé le fluage. Le béton présente également une déformation indépendante des contraintes qui, en plus des variations dues à la dilatation thermique, inclut le retrait. C'est-à-dire une déformation volumétrique due aux variations de la teneur en eau et aux processus chimiques de longue durée (Bazant, 1975).

Hassan et al., (2012) ont exploré l'effet de la variation des proportions de la fumée de silice (FS) sur l'évolution du retrait par dessiccation du béton auto-plaçant (Figure 3.12). Au terme de 400 jours, une réduction du retrait de 5 % à 28 % a été constatée lorsque le pourcentage de FS augmentait de 0 % à 11 %. En outre, le retrait autogène a présenté une courbe de décroissance non linéaire en fonction de l'augmentation de FS. Cette observation peut être attribuée principalement à deux phénomènes : la diminution du ratio eau/ciment, qui contraint le retrait par dessiccation, et la réduction de la masse de ciment hydraté par l'adjonction de FS, ce qui atténue le retrait total du béton.

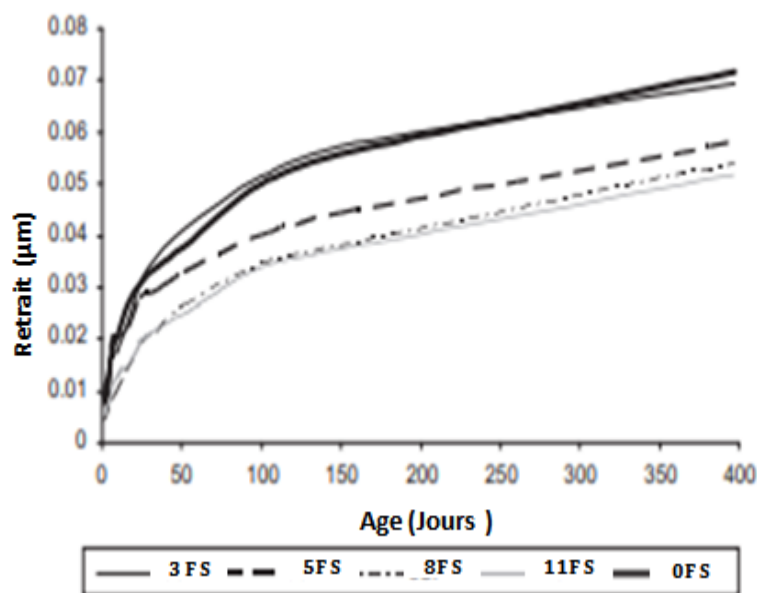


Figure 3.12 – Effet de FS sur le retrait de séchage (Hassan et al., 2012).

Mohan et al., (2018) se sont penchés sur les implications de l'utilisation de la FS en tant que substitut partiel du ciment dans le béton (Figure 3.13). Ils ont découvert que l'introduction de FS contribue à une réduction marquée du retrait de dessiccation, comparé à un béton de référence dépourvu de FS, offrant ainsi une perspective prometteuse pour l'amélioration de la performance du béton.

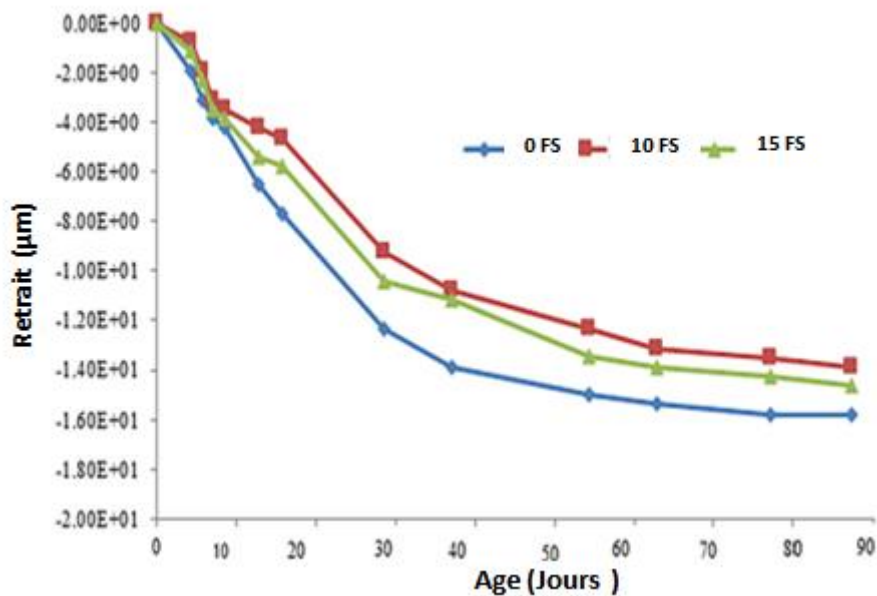


Figure 3.13 – Effet de FS sur le retrait de séchage (Mohan et al., 2018).

Shen et al., (2020) ont détecté une tendance à l'augmentation du retrait du béton avec l'accroissement des teneurs en FS, s'échelonnant de 0 % à 15 % (Figure 3.14). Cette dynamique est attribuable à la large surface spécifique de la FS, qui exacerbe les tensions capillaires à l'intérieur du matériau. En outre, la diminution de l'humidité relative interne, due au processus de séchage, renforce les interactions physiques entre les particules, culminant ainsi par un accroissement substantiel du retrait.

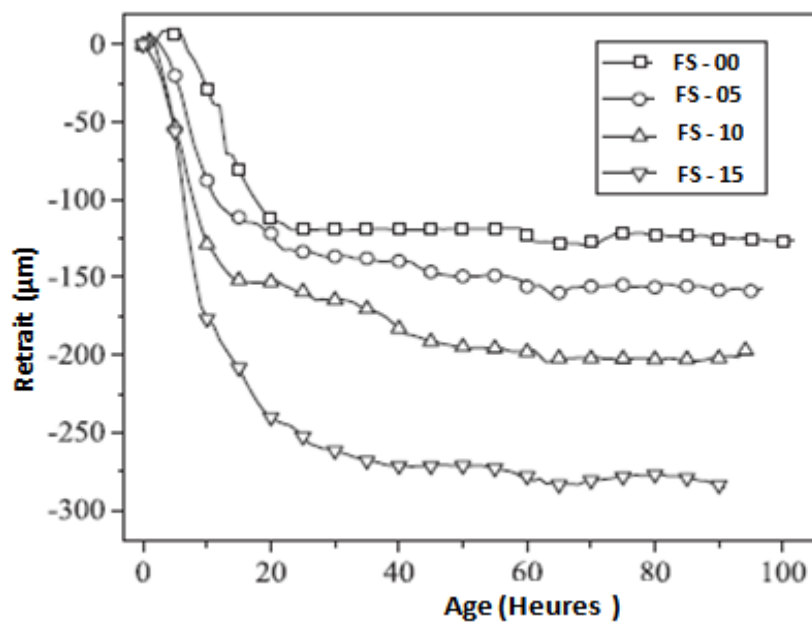


Figure 3.14 – Effet de FS sur le retrait de séchage (Shen et al., 2020).

### 3.4 Effet de la fume de silice sur la durabilité du béton

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction prédominant, composé d'un agglomérat de ciment, d'agrégats, d'additifs minéraux et chimiques, et d'eau nécessaire au mélange. Les caractéristiques intrinsèques du béton sont profondément influencées par les réactions chimiques entre le ciment et l'eau, ainsi que par les interactions complexes entre ses différents composants.

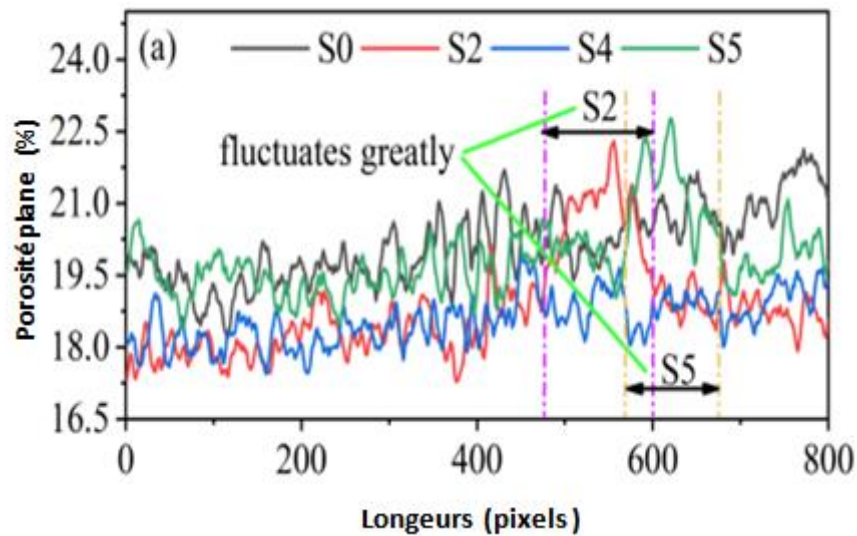
Les caractéristiques chimiques des produits résultant de l'hydratation, la structure des pores et les propriétés mécaniques du béton une fois durci sont fortement dépendantes des conditions environnementales rencontrées tout au long de son cycle de vie. Les facteurs environnementaux jouent un rôle critique dans la détermination de la durabilité et de la robustesse du béton, soulignant l'importance des choix de matériaux et des méthodes de construction dans la longévité des structures en béton (Gjørsv, 2011).

#### 3.4.1 La porosité et la perméabilité

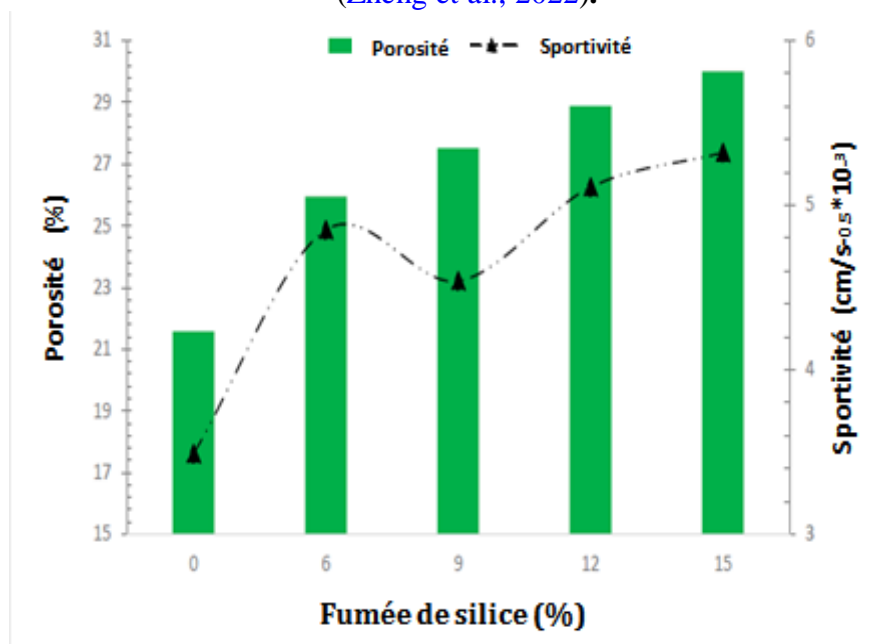
L'absorption d'eau est un test crucial pour évaluer la durabilité du béton, les matériaux présentant une absorption d'eau plus faible démontrent une meilleure durabilité que ceux avec des niveaux plus élevés (Zhang et al., 2014).

Zheng et al., (2022) ont examiné les effets de la fumée de silice (FS) sur les propriétés physiques et la microstructure d'un coulis de ciment allégé. Leurs analyses ont révélé que, tandis que l'échantillon de référence affichait une porosité de 20,16 %, celle des coulis contenant 20 % de FS était nettement inférieure. La porosité du béton modifié avec FS a été réduite de 0,31 %, 1,59 % et 1,37 % pour les mélanges contenant respectivement 10 %, 20 % et 30 % de FS (Figure 3.15). L'incorporation de FS favorise l'absorption d'eau en raison de sa grande surface spécifique et accélère le taux de réaction d'hydratation.

L'un des aspects physiques extrêmes souvent reconnus des matériaux de construction est la porosité, principalement en raison de son impact sur des caractéristiques essentielles telles que la résistance et la durabilité. La Figure 3.16 illustre la porosité et la sorptivité en fonction de divers ratios de remplacement de FS.



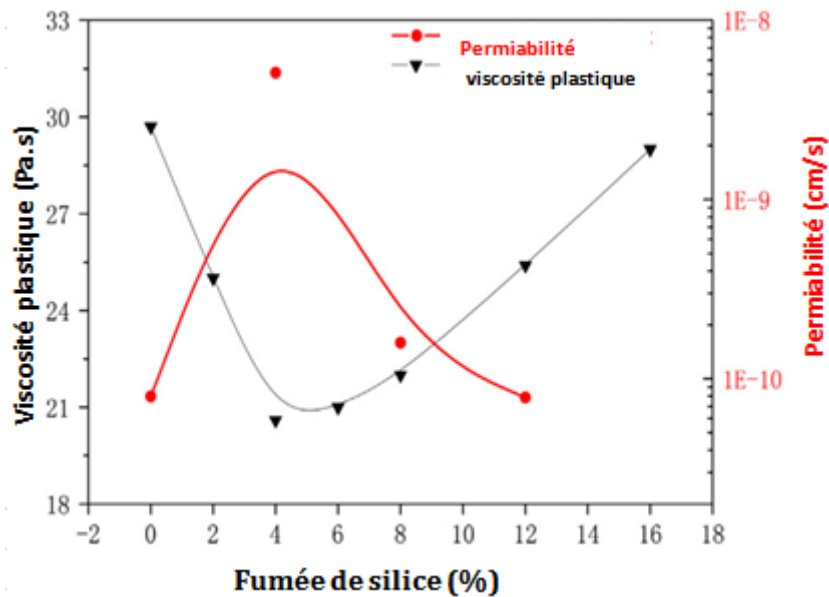
**Figure 3.15** – Effet du pourcentage de FS sur un coulis de ciment léger (Zheng et al., 2022).



**Figure 3.16** – Influence du pourcentage de FS sur la porosité du béton (Sharbatdar et al., 2020).

Sharbatdar et al., (2020) ont étudié la porosité connectée du béton avec différents pourcentages de FS (6, 9, 12 et 15%) à une résistance constante à 28 jours. Ils ont constaté que l'augmentation de la proportion de FS dans le mélange entraînait une hausse de la porosité et de la sportivité du béton. Ce phénomène est lié à un ratio eau-liant supérieur dans les mélanges binaires enrichis en FS, par rapport aux mélanges standards et aux échantillons témoins.

Les résultats obtenus par Lu et al., (2015) montrent clairement que l'influence des teneurs en FS sur le coefficient de perméabilité est en accord avec celle sur la viscosité plastique dans une certaine mesure. Ils ont observé que le coefficient de perméabilité diminue avec une faible proportion de FS, atteignant un minimum lorsque la concentration de FS est de 4 %. Parallèlement, la viscosité plastique présente une tendance inverse, comme illustré dans la Figure 3.17.



**Figure 3.17** – Viscosité plastique et coefficient de perméabilité en fonction de la teneur en FS (Lu et al., 2015).

### 3.4.2 Résistance aux sulfates

Le béton, matériau de construction prééminent, est caractérisé par une structure complexe comprenant du ciment, des agrégats, des adjuvants minéraux et chimiques, ainsi que de l'eau nécessaire au mélange. Les caractéristiques essentielles du béton sont déterminées par les réactions chimiques entre le ciment et l'eau et par les interactions entre ses différents constituants. Ces interactions et réactions sont cruciales pour comprendre la durabilité et la résistance du béton face aux agressions environnementales, telles que l'exposition aux sulfates. Ces réactions chimiques, la structure des pores, ainsi que les propriétés mécaniques du béton durci sont profondément affectées par les conditions environnementales auxquelles il est soumis durant sa vie.

L'attaque par les sulfates est un processus impliquant une série de réactions chimiques complexes entre les ions sulfates et les produits d'hydratation du ciment, qui à long terme, compromettent la stabilité structurelle du béton. Les ions sulfates peuvent diffuser dans le béton à partir de l'environnement extérieur. Ce type d'attaque par les sulfates est classé comme attaque par sulfates externe. Il est également possible que les sources de ces ions proviennent des matériaux de gâchage du béton, tels que le ciment, les agrégats et les adjuvants chimiques et minéraux. Dans ce cas, l'attaque serait définie comme une attaque par sulfates interne (Atahan et al., 2011).

Lee et al., (2005) ont examiné la capacité de la fumée de silice (FS) à atténuer les dégradations provoquées par les attaques de sulfates, en testant des mortiers avec des rapports eau/ciment (E/C) de 0,35, 0,45 et 0,55. Suite à une année d'exposition dans un milieu sulfaté, l'ajout de 10 % de FS au ciment Portland ordinaire n'a manifesté aucun signe de fissuration.

La détérioration de la résistance (Figure 3.18) s'est accentuée en fonction du rapport E/C, mais elle était significativement plus marquée dans les échantillons dépourvus de FS que dans ceux en contenant. Ce résultat souligne une résilience supérieure aux attaques sulfatiques grâce à l'amélioration de la densité des pores et à la réaction pouzzolanique de la FS avec les produits d'hydratation du ciment.

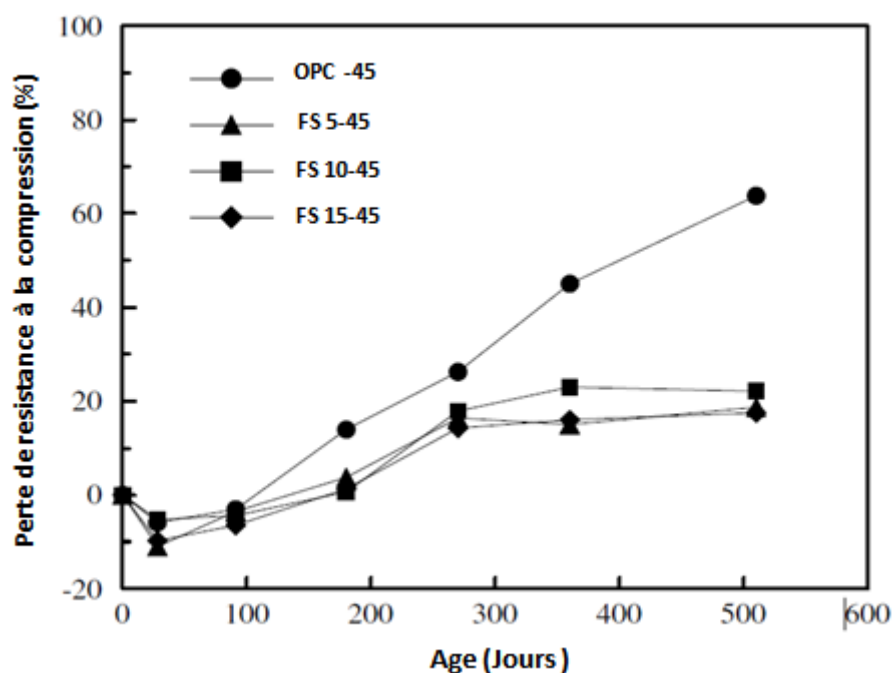
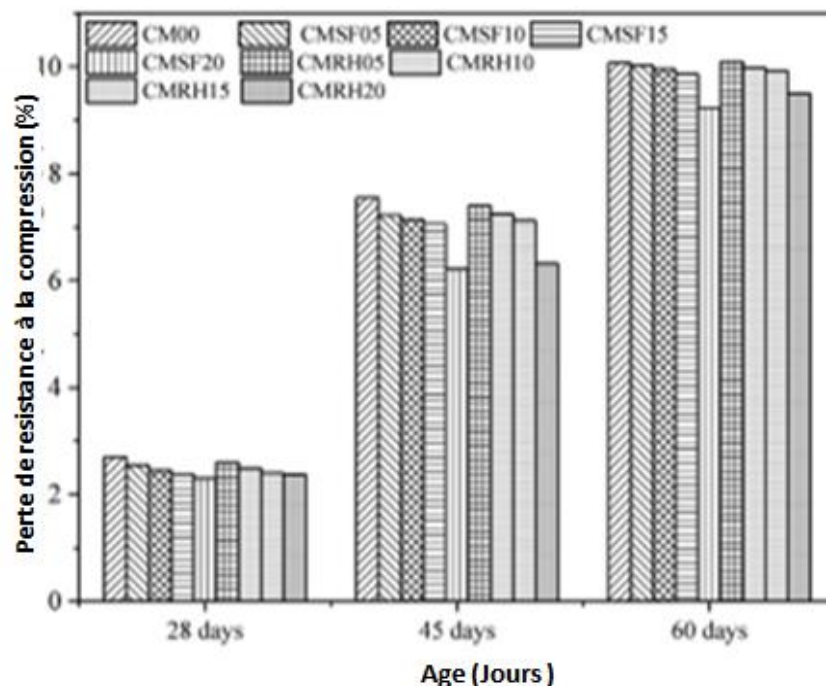


Figure 3.18 – La perte de résistance à la compression des mortiers (Lee et al., 2005).

Sahoo et al., (2021) ont exploré les effets de divers taux d'incorporation de fumée de silice (FS) 5%, 10%, 15% et 20 % sur la résistance du béton face aux attaques sulfatiques. Ils ont observé que la dégradation de la résistance décroissait à mesure que le pourcentage de FS augmentait, bien que cette perte s'intensifie avec le temps d'immersion. Cette évolution est expliquée par le colmatage des pores interconnectés par les particules fines de FS et de cendres de balle de riz (RHA), ainsi que par la diminution de l'hydroxyde de calcium, résultant de la réaction pouzzolanique de la FS. Néanmoins, un contact prolongé avec un environnement acide provoque une détérioration croissante de la résistance (Figure 3.19).



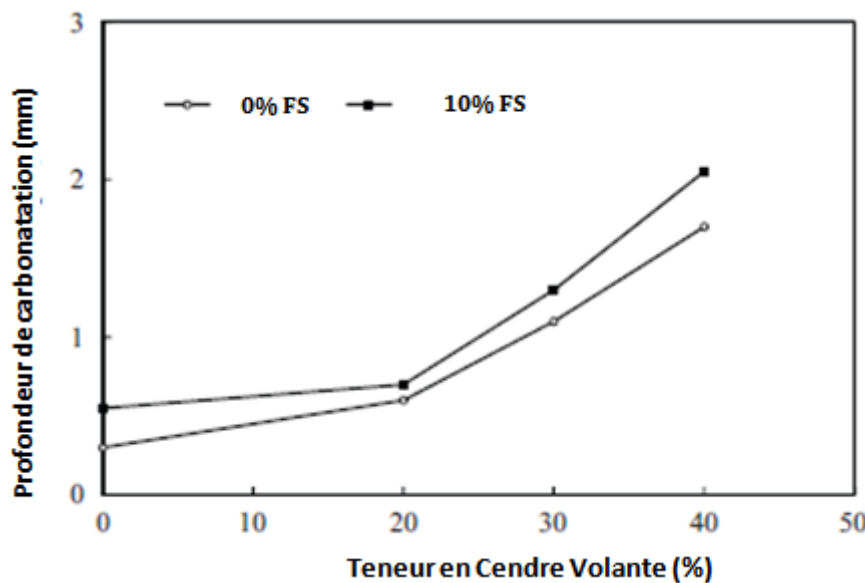
**Figure 3.19** – Perte de résistance à la compression dans des échantillons de béton (Sahoo et al., 2021).

### 3.4.3 Carbonatation

La carbonatation, un phénomène naturellement lent, est de plus en plus scrutée du fait du vieillissement des infrastructures et du risque accru de détérioration qu'elle engendre. Malgré une concentration relativement modeste de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) dans l'atmosphère (oscillant entre 0,03 % et 0,10 % en volume, selon les conditions ambiantes à Singapour), ce dernier réagit vivement avec les hydrates de ciment tels que l'hydroxyde de calcium l'hydrate de silicate de calcium, ainsi qu'avec les composants anhydres du ciment comme le silicate tricalcique et le silicate bicalcique (Sulapha, 2003).

Khan et al., (2002) ont analysé l'impact de la FS dans des mélanges cimentaires binaires et ternaires, comprenant du ciment Portland, des cendres volantes et de FS, mettant en lumière l'influence de ces combinaisons sur la capacité du béton à résister à la carbonatation.

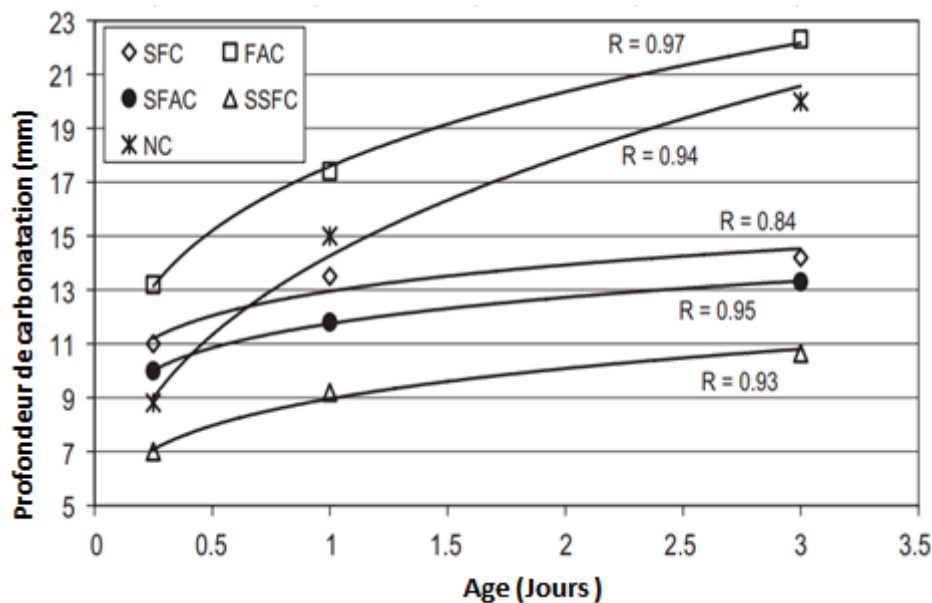
Des cendres volantes ont été utilisées jusqu'à 40 %, et de FS a été ajoutée à hauteur de 0 %, 5 %, 10 % et 15 % en remplacement partiel du ciment. Les résultats (Figure 3.20) ont indiqué que l'inclusion de FS n'a pas eu d'influence significative sur la carbonatation.



**Figure 3.20** – Effet de FS sur la carbonatation de béton (Khan et al., 2002).

Gonen et al., (2007) ont mené une étude détaillée sur l'effet des adjuvants minéraux, en particulier FS et les cendres volantes, sur la carbonatation du béton (Figure 3.21). Ils ont constaté que, lors du remplacement de 15 % du ciment par des cendres volantes et de 10 % par de la FS, il y avait une augmentation modeste de la profondeur de carbonatation dans les échantillons contenant uniquement des cendres volantes.

Cependant, lorsque la FS était utilisé conjointement avec des cendres volantes, la profondeur de carbonatation était nettement réduite. Cette diminution est principalement due à une réduction de la porosité bétonnière, ce qui est favorable à la limitation de la pénétration du dioxyde de carbone et, par conséquent, à la réduction de la carbonatation.



**Figure 3.21** – Profondeurs de carbonatation du béton avec des adjuvants minéraux (Gonen et al., 2007).

### 3.4.4 Adhésion mécanique

En analysant la surface du béton à réparer, nous observons la présence de diverses imperfections, telles que des cavités et des irrégularités de surface. L'adhésion mécanique, qui dépend étroitement de la rugosité macroscopique, est favorisée par l'ancrage mécanique du matériau de réparation, lequel s'infiltré dans ces imperfections avant le durcissement (Figure 3.22).

Dans ce contexte, la rugosité générée par les techniques de préparation de surface (comme le sablage ou l'hydro-démolition) constitue une étape cruciale pour assurer une adhésion mécanique efficace du mortier de réparation.

Néanmoins, une microstructure inégale et une porosité relativement élevée au niveau de la zone de transition interfaciale peuvent être responsables des propriétés mécaniques inférieures des systèmes de réparation (Garbacz et al., 2006).

Li et al., (2001) ; Mehta, (1986) ont observé une amélioration significative de la force d'adhésion entre le matériau de réparation enrichi en pouzzolane et le substrat en béton. Ils ont conclu que cette amélioration résulte de la rugosité de l'interface et de la formation de gel C-S-H due à la réaction pouzzolanique.

De nombreuses études soulignent l'importance des fibres pour réduire le décollement à l'interface et leur rôle dans l'intégration monolithique des deux couches de béton (Chausson, 1997 ; Farhat, 1999 ; Tran, 2006).

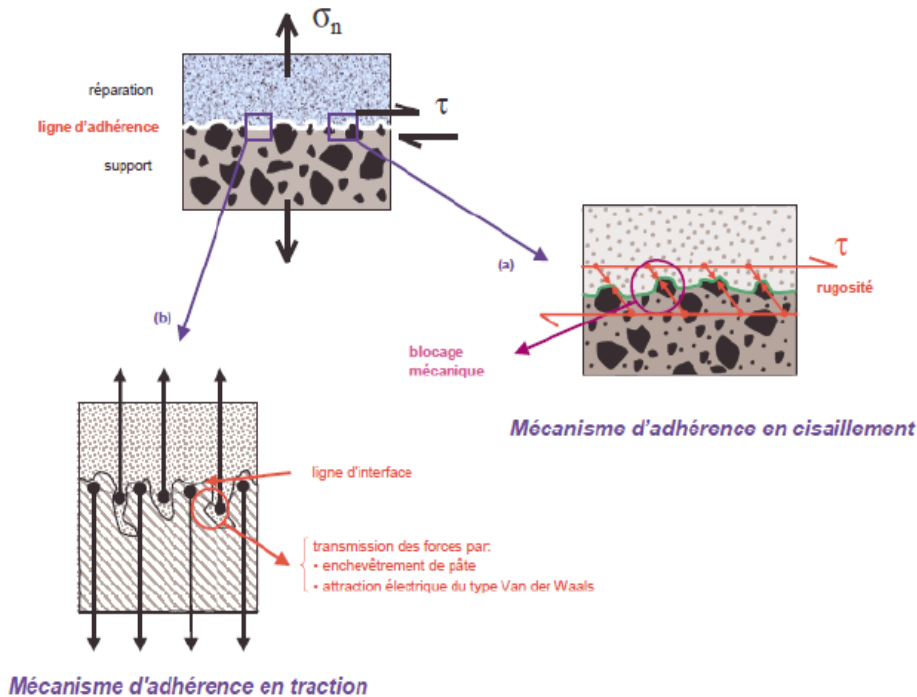


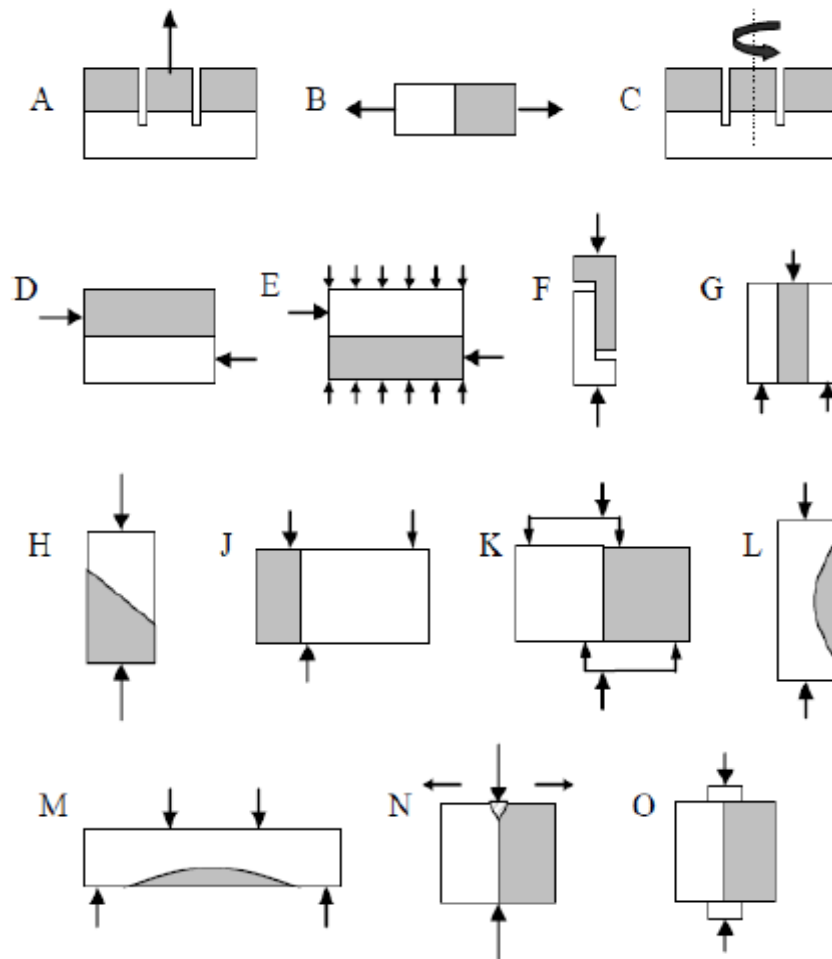
Figure 3.22 – Mécanisme d'adhésion (Emmons et al., 1993).

### 3.4.5 Adhésion spécifique

L'adhésion spécifique représente un phénomène complexe (Courrard, 1999). Elle se définit comme la capacité à générer des forces d'interaction (telles que les forces de Van der Waals, les liaisons hydrogènes et les liaisons chimiques) à l'interface entre le mortier de réparation et le substrat. En effet, la somme de ces forces, exprimée en termes d'énergie de liaison, aboutit à l'adhésion souhaitée. Cependant, certaines imperfections présentes sur la surface du support peuvent diminuer la résistance des forces d'adhésion et entraîner un décollement.

### 3.4.6 Différents types de tests pour quantifier l'adhérence

Divers tests ont été élaborés pour mesurer l'adhérence (essais de rupture entre deux matériaux) (Silfwerbrand, 2003) (Figure 3.23). Ces tests peuvent être réalisés par traction, flexion et/ou cisaillement, que ce soit de manière directe ou indirecte.



**Figure 3.23** – Techniques variées employées pour évaluer l'adhérence des mortiers  
(Momayez et al., 2005).

L'essai de traction (Figure 3.24) est relativement simple à mettre en œuvre, tant en laboratoire qu'en chantier. Une force de traction est appliquée à l'aide d'une pompe hydraulique pour évaluer la force requise pour provoquer la rupture de la réparation et en déterminer la localisation.

La rupture peut être cohésive dans le substrat ou dans le mortier, adhésive selon l'interface, ou encore mixte, combinant des ruptures cohésives et adhésives (Figures 3.25 et 3.26). Toutefois, cet appareil tend à fournir des valeurs d'adhérence inférieures par rapport à d'autres méthodes, notamment l'essai de cisaillement par compression.



Figure 3.24 – Appareil de traction.

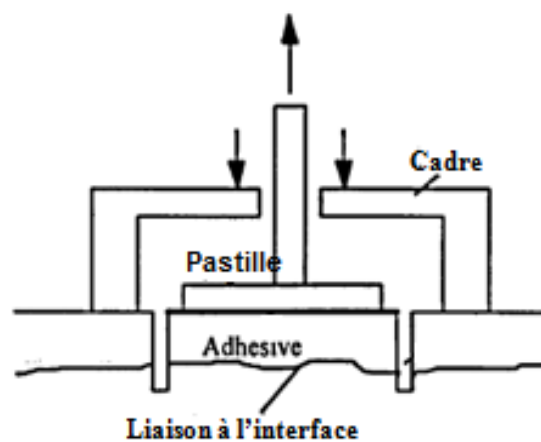


Figure 3.25 – Principe de l'essai de traction (Youguang Pan, 1995).

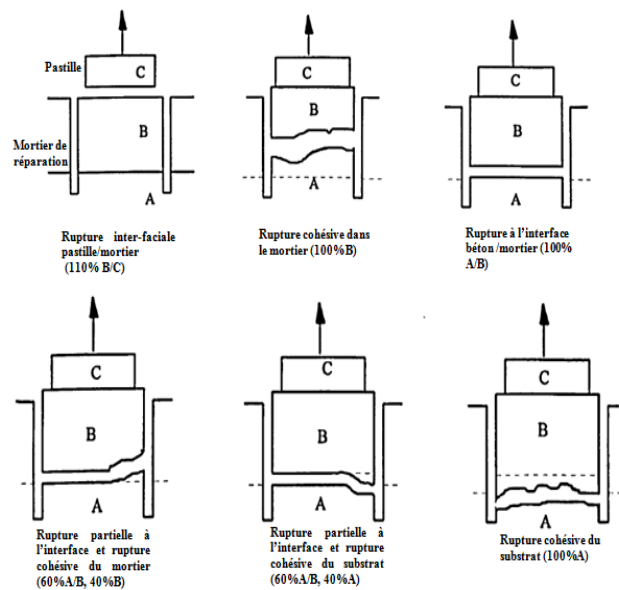


Figure 3.26 – Modes de défaillance potentiels du composite béton/mortier de réparation, par l'essai d'arrachement (Pan, 1995).

Julio et al., (2004) ont réalisé une étude expérimentale visant à quantifier l'adhérence des mortiers de réparation appliqués sur des substrats en béton ayant subi divers traitements de surface (Figures 3.27).

L'adhérence a été évaluée par deux types d'essais distincts à savoir l'essai d'arrachement et l'essai de cisaillement oblique (slant shear). Ces chercheurs ont constaté l'intérêt du traitement de surface sur l'adhérence.

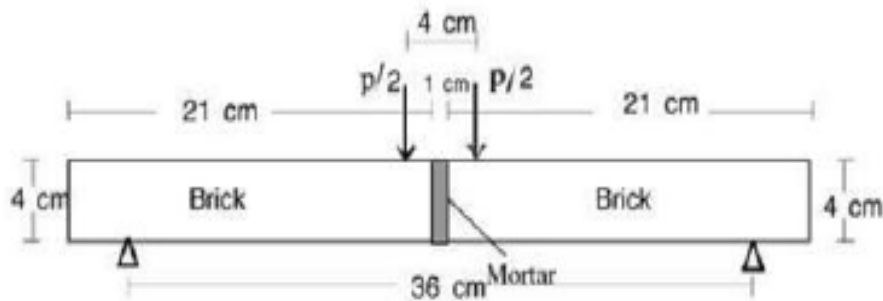


Figure 3.27 – Méthodes de traitement des surfaces employées (Julio et al., 2004).

Tableau 3.1 – Résultats de l'essai d'arrachement (Julio et al., 2004).

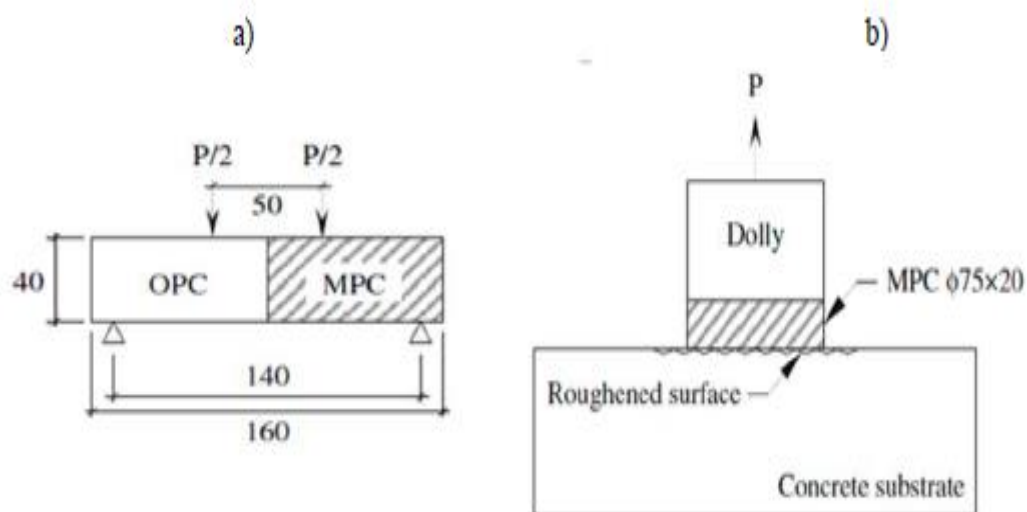
Situation envisagées	Traitement de substrat	L'adhérence (Mpa)
1	Sans traitement	--
2	Brossage métallique	1.92
3	Partiellement perforé	1.47
4	Partiellement perforé et pré-mouillé	1.02
5	Jet de sable	2.65

Pour mesurer la performance de l'adhérence, [Anagnostopoulos, \(2002\)](#) a réalisé un essai de flexion à quatre points sur un échantillon composite de brique et de mortier, comme illustré dans la Figure 3.28.



**Figure 3.28** – Essai d'adhérence par flexion 4 points ([Anagnostopoulos, 2002](#)).

D'autre part, [Qiao et al., \(2009\)](#) ont effectué deux types d'expérimentations : l'essai d'adhérence par traction (pull off) et l'essai par flexion, illustrés dans la Figure 3.29. L'essai d'adhérence par traction a été conçu pour évaluer la résistance d'adhérence sous une traction directe, tandis que l'essai de flexion représente une forme de traction indirecte.



**Figure 2.29** – a) Résistance à l'adhérence par flexion et b) Résistance à l'adhérence par traction (mesurée en mm) ([Qiao et al., 2009](#)).

[Czarneck et al., \(1999\)](#) ont conçu cinq poutres sans armature. Après une période de la cure de 28 jours, les chercheurs ont préparé les surfaces de chaque poutre par sablage. Les réparations des poutres ont été réalisées après une semaine. L'objectif était d'évaluer la compatibilité ou l'incompatibilité des matériaux de réparation avec le substrat. Les poutres ont été soumises à des charges appliquées par quatre points (Figure 3.30), conformément à la norme [ASTM C78](#).

Les modes de défaillance, qu'ils soient compatibles ou incompatibles, ont été classés comme indiqué à la Figure 3.31.

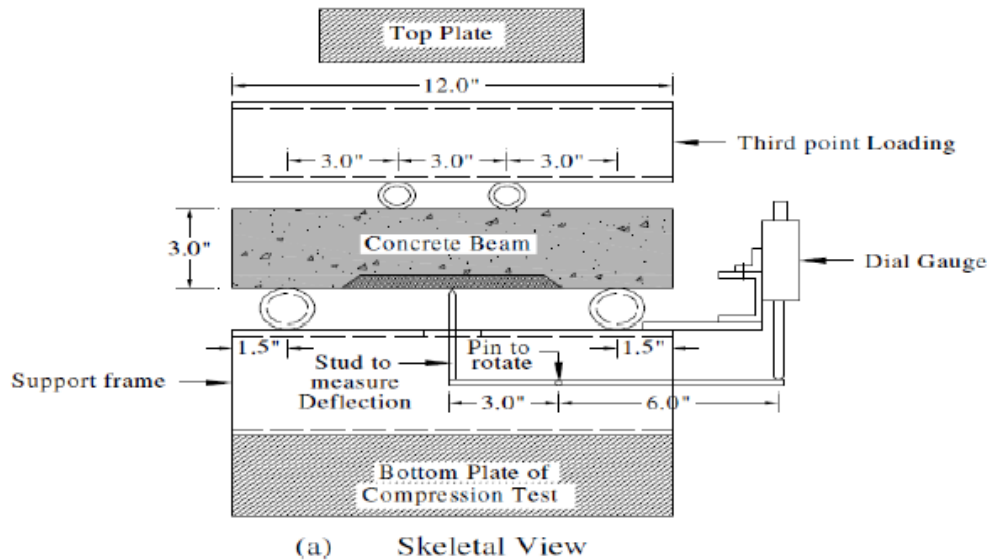


Figure 3.30 – Évaluation de la déformation de la poutre.

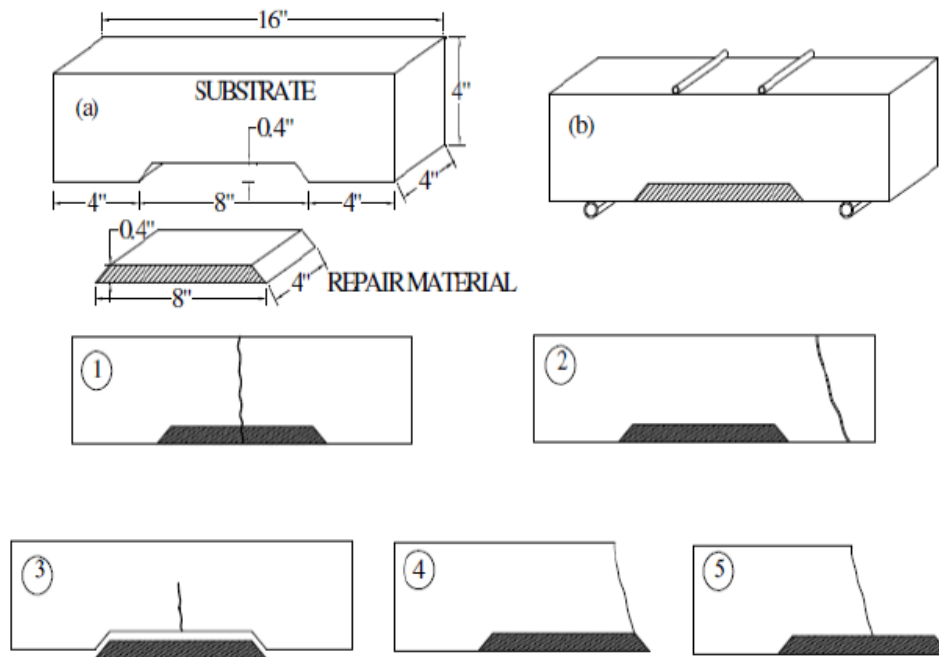


Figure 3.31 – Évaluation de la compatibilité à l'aide d'un essai de chargement à trois points (Czarneck et al., 1999) : 1,2 - compatible ; 3, 4,5 – incompatible.

De plus, Habel, (2004) a observé qu'un élément réparé, tel qu'une poutre en béton, soumis à une flexion, peut présenter trois modes de défaillance. Il peut s'agir d'une fissuration traversant l'intégralité de l'épaisseur de la réparation, d'une délamination à l'interface (ce qui entraîne une perte du comportement monolithique), ou d'une rupture du béton sous compression. Néanmoins, lorsque la réparation est soumise à un moment négatif et qu'elle se fissure, cela peut conduire à une rupture par flexion classique ou à une rupture par flexion due à la défaillance de l'interface.

### 3.5 Conclusion

L'étude présente met en lumière le rôle prépondérant de la fumée de silice (FS) dans l'amélioration des propriétés fondamentales du béton, que ce soit dans son état initial frais ou une fois durci. L'intégration de la FS dans la composition du béton conduit à une meilleure compacité et une cohésion accrue de la pâte cimentaire, réduisant ainsi significativement la chaleur d'hydratation et améliorant notablement l'ouvrabilité. De plus, la FS contribue à réduire le retrait et le fluage, tout en augmentant la résistance mécanique et le module d'élasticité du béton, des facteurs essentiels pour la longévité des constructions en béton.

Concernant la durabilité du béton, l'incorporation de la FS améliore sa résistance contre les agressions chimiques et environnementales. Bien que l'ajout de la FS renforce la compacité du béton et limite la carbonatation, l'inclusion de la FS peut parfois réduire sa résistance aux attaques de chlorures et de sulfates. Ainsi, il devient impératif d'optimiser les formulations du béton pour assurer une durabilité accrue des structures en béton face à ces défis environnementaux et chimiques.

## **Chapitre 4**

---

*Caractérisation des matériaux et méthodologies*

## 4.1 Introduction

Cette recherche vise à examiner expérimentalement l'influence de la fumée de silice sur les performances des mortiers auto-plaçants renforcés par des fibres (MAPFs), utilisés pour la réparation des structures en béton. À cet effet, quatre formulations de MAPFs ont été développées, incorporant respectivement 5 %, 10 %, 15 % et 20 % de fumée de silice en remplacement du ciment, puis comparées à un mortier témoin composé de ciment Portland.

L'étude porte sur les propriétés des MAPFs à l'état frais, notamment l'étalement et le temps d'écoulement, ainsi qu'à l'état durci, en analysant la résistance à la compression et à la flexion, le module d'élasticité dynamique, le retrait, l'absorption d'eau et l'adhérence via l'essai « slant-shear ». De plus, la compatibilité des mortiers a été évaluée par un test de flexion quatre points sur des poutres composites (mortier/béton de substrat) ainsi que par un test de flexion trois points (mortier/mortier substrat).

## 4.2 Programme expérimentale

Dans cette étude, Le liant adopté dans ce travail est un ciment Portland ordinaire (OPC) fabriqué par Lafarge (MSILA). Ce ciment possède une résistance à la compression d'au moins 42,5 MPa après 28 jours (CEMII/42.5A). Il est fréquemment utilisé dans la réalisation des ouvrages en maçonnerie ainsi que dans les structures en béton armé. Le qualificatif « ordinaire » indique qu'il s'agit d'un ciment Portland de type courant, obtenu par le broyage du clinker avec une faible proportion de gypse destinée à contrôler la durée de prise. Les propriétés physico-chimiques du ciment sont présentées dans le tableau 4.1 ([Annexe A](#)).

La fumée de silice (Figure 4.1) a été utilisée comme addition minéral, conformément aux spécifications de la norme [ASTM 618 \(2012\)](#).



**Figure 4.1** – Fumée de silice.

La fumée de silice (FS) est un sous-produit issu de la fabrication du silicium et du ferrosilicium. Ces matériaux sont produits par la réduction du quartz avec une source de carbone appropriée dans un four à arc, à une température d'environ 2 000 °C. Elle se compose de particules sphériques ultrafines, dont le diamètre varie entre 0,1 et 0,2 µm, bien plus petites que celles du ciment classique. Sa grande finesse, associée à une teneur élevée en silice amorphe (85 à 90 %), lui confère une forte réactivité pouzzolanique. Cette propriété permet la transformation de l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en silicate de calcium hydraté, améliorant ainsi la structure des pores et réduisant la perméabilité du matériau. Les propriétés physico-chimiques de ce matériau, sont illustrées dans le Tableau 4.1 (Annexe B).

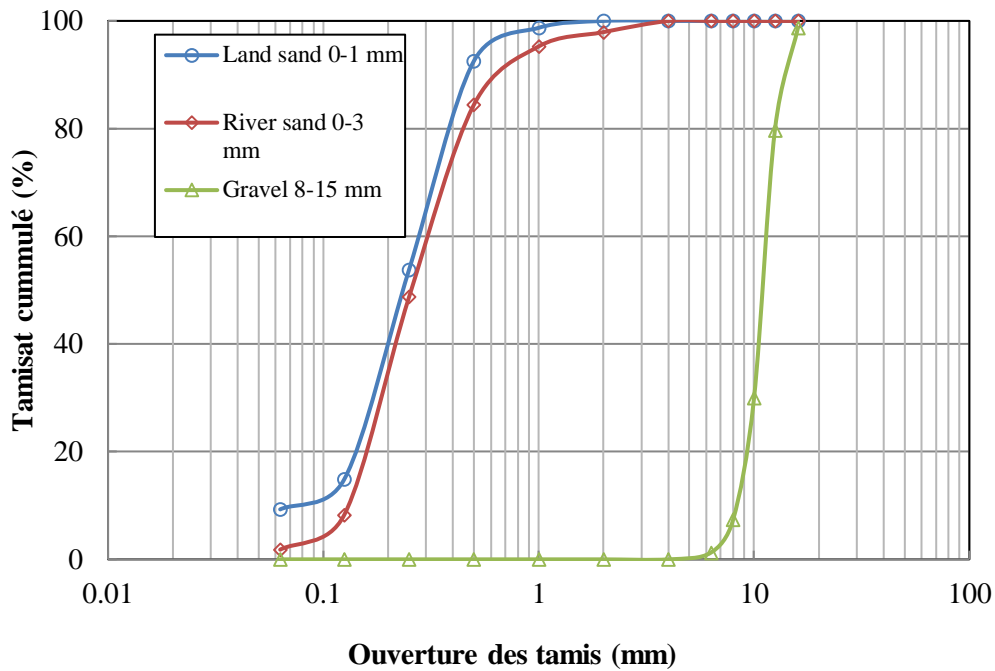
**Tableau 4.1** – Propriétés physiques et chimiques du ciment et de la fumée de silice.

Propriétés		Ciment	La Fumée de silice
Propriétés physiques	Densité	3.10	0.65
	Finesse de Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	3850	225000
	Resistance en compression à 28 jours (MPa)	42.5	--
Propriétés chimiques, Oxydes de base(%)	CaO	61.74	<0.1
	$\text{SiO}_2$	20.92	$\geq 85$
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	5.60	$\leq 1\%$
	$\text{SO}_3$	$2.5 \pm 0$	$\leq 2\%$
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3.43	$\leq 1\%$
	MgO	$1.7 \pm 0.5$	$\leq 1\%$
	$\text{Na}_2\text{O}$	0.1	$\leq 1.0$
	Cl-	0.02-0.05	$\leq 0.1$
LOI	$8 \pm 2$	$\leq 4.0$	

Le béton de substrat est fabriqué à partir de gravier d'une carrière locale, avec un diamètre maximal de 15 mm. Le sable utilisé dans les mortiers et le béton est un sable de rivière. Les propriétés de ces agrégats sont répertoriées dans le Tableau 4.2, et leur granulométrie est illustrée dans la Figure 4.2.

**Tableau 4.2** – Propriétés physiques des granulats.

Propriétés	Sable	Gravier
Densité	2.422	2.56
Module de finesse	2.82	--
Absorption	1.2	--




**Figure 4.2** – Granulométrie des granulats fins et grossiers.

Pour le malaxage et la cure des échantillons de mortiers auto-plaçants, de l'eau potable (pH 7) a été utilisée.

Le superplastifiant intégré aux mélanges est un éther polycarboxylate (MEDAFLOW 30), connu pour améliorer significativement les performances du béton. Il est conforme à la norme [EN 934-2 \(2009\)](#), avec une densité de  $1,07 \text{ g/cm}^3$  et une teneur en extrait sec de 30 % ([Annexe C](#)).

Les fibres adoptées dans cette étude sont des fibres courtes en polypropylène (GRANIFIBRES), fournies par GRANITEX - Algérie. Le Tableau 4.3 présente leurs principales caractéristiques.

**Tableau 4.3** – Caractéristiques générales des fibres polypropylène.

Photo	Longueur	Densité	Point de fusion	Module de Young	Allongement à la rupture	Section de la fibre
	12mm	0.9	150°C	3kN/mm <sup>2</sup>	50%	30 μm

## 4.3 Proportions des mélanges de mortiers et du béton de substrat

### 4.3.1 Mortier de réparation

La littérature recense un large éventail de démarches de formulation des bétons autoplaçants (BAP). Parmi elles, la méthode dite « japonaise », développée par Okamura et ses collaborateurs, se distingue par son caractère entièrement empirique, sa simplicité d'utilisation et les moyens limités qu'elle requiert.

Toutefois, lors de son application à la conception de BAP à partir de matériaux disponibles localement, il est apparu que l'adoption stricte de ses recommandations ne permettait pas d'atteindre les performances visées. Cette constatation a conduit à entreprendre plusieurs investigations en vue d'ajuster la méthode. Ces ajustements ont pour finalité d'obtenir des formulations présentant un niveau de fluidité satisfaisant, une stabilité améliorée et une capacité de remplissage conforme aux exigences associées aux BAP de bonne qualité.

La méthode de formulation du béton autoplaçant (BAP) proposée par Okamura repose sur une démarche rationnelle visant à déterminer les proportions optimales de la différente constituante eau, liant, granulats et adjuvants. Elle se caractérise par l'utilisation d'un rapport eau/liant (E/L) fixé à l'avance et par l'ajustement des quantités de ciment, de fillers et de superplastifiant. L'objectif est d'obtenir un mélange présentant une fluidité élevée, un bon pouvoir d'étalement ainsi qu'une stabilité suffisante pour éviter la ségrégation.

Dans cette recherche, une approche simplifiée a été adoptée (Figure 4.3) afin de faciliter l'élaboration de quatre formulations de mortiers de réparation conformes aux exigences de l'[EFNARC](#).

Le Tableau 4.4 présente la composition et la désignation des différents mélanges de mortiers auto-plaçants renforcés de fibres (MAPFs). Le chiffre à la fin de chaque nom indique le pourcentage de remplacement du ciment par la fumée de silice. Par exemple, MAPF0 correspond au mortier témoin, composé uniquement de ciment (0 % de fumée de silice), tandis que MAPF20 désigne un mélange où 20 % du ciment est substitué par de la fumée de silice.

Formulation Mortier autoplaçant							
Référence du mélange	Essai 1	CEM II 42,5 sans ajout	Date	01/01/2023			
volume de mortier (litres)	1000						
sable/mortier vol	0,45						
EIP par vol.	1,260	poudre vol (%) 24,34	Eau volume (%)	30,66			
composition Poudre(vol %)	type						
ciment portland	100						
Fumée de Silice	0						
superplast - MEDAFLOW145	0,7	% (Sp/P)					
humidité sable							
		humidité (%)	absorption (%)	correction (%)			
poids humide (gms)	200	0,0	1,2	-1,2			
poids sec (gms)	200						
Materiaux/Type	vol litres	densité kg/m <sup>3</sup>	kg	contenance d'eau %		poiid mélange kg	
ciment	243,363	3150				767	
Laitier	0,000	2857				0	
fumé de silice	0,000	850				0	
Eau	306,637	1000	306,637	total		309	W1 185
superplast - MEDAFLOW145		1085	5,366	70	3,756	5	W2 124
Sable	450,000	2622	1179,900	-1,2	-14,159	1166	
Total	1000,000					2247	

Figure 4.3 – Outil automatisé d’optimisation des formulations de mortiers auto-plaçants renforcés de fibres (MAPFs).

Tableau 4.4 – Proportions des mélanges des mortiers de 1M<sup>3</sup>.

MAPF	C (kg/m <sup>3</sup> )	FS (kg/m <sup>3</sup> )	E (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	E/L	SP (%)	FPP (%)
MAPF0	767	0	309	--	1166	0.40	0.7	0.2
MAPF05	728	39	310	--	1166		0.9	
MAPF10	690	77	310	--	1166		1.2	
MAPF15	652	115	311	--	1166		1.5	
MAPF20	613	154	311	--	1166		2.4	

Après plusieurs essais préliminaires, un rapport eau/poudre (E/L) de 0,40 a été retenu, avec une teneur totale en poudre de 767 kg/m<sup>3</sup>. Dans tous les mélanges de mortier, la proportion volumique des fibres de polypropylène (FPP) a été conservée à 0,2 %.

#### 4.3.2 Béton et mortier de substrat

Le béton et le mortier de substrat (C) étudiés ici sont similaires à ceux couramment employés par les entreprises de construction en Algérie. Les détails sur la composition des mélanges de substrat sont donnés dans le Tableau 4.5.

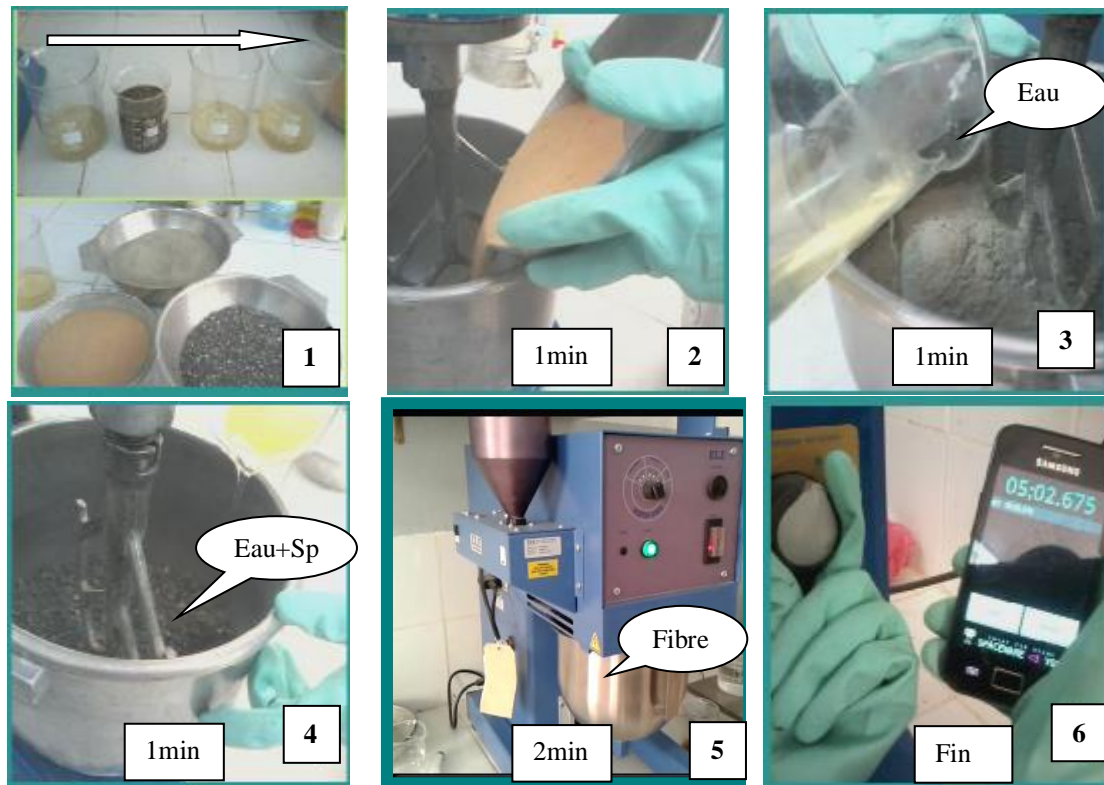
**Tableau 4.5** – Proportions des mélanges de substrat (kg/m<sup>3</sup>).

Constituants	Béton	Mortier	Remarque
Ciment	340	525	CEMI/ 42.5A
Gravier	1130	--	Max 15mm
Sable	720	2250	Max 3mm
Eau	170	340	Eau potable
SP(%)		1.2	Medaflow 30
Rapport E/C	0.50	0.64	--

#### 4.3.3 Séquences de malaxage des mélanges de mortier

Pour garantir une homogénéité optimale, tous les mélanges de mortiers ont été préparés selon le même protocole de malaxage (Figure 4.4), en utilisant un malaxeur standard de marque Controls d'une capacité de 5 litres.

Dans un premier temps, le sable, le ciment et les ajouts cimentaires ont été placés dans le récipient du malaxeur. Le malaxage a débuté et s'est poursuivi pendant 2 minutes, avec l'ajout progressif des  $\frac{2}{3}$  de l'eau. Par la suite, le superplastifiant (SP), préalablement dilué dans l'eau restante, a été incorporé, suivi d'un malaxage supplémentaire de 3 minutes. Enfin, les fibres de polypropylène (FPP) ont été ajoutées manuellement au mélange, conformément aux instructions du fabricant.



**Figure 4.4** – Séquences de malaxage du mortier de réparation.

## 4.4 Méthodes d'essais pour le béton de substrat et les mortiers de réparation

L'étude expérimentale se divise en deux parties. La première est consacrée à l'évaluation des mortiers de réparation (MAPFs) à l'état frais ainsi que du béton de substrat. La seconde partie examine d'autres propriétés essentielles afin d'approfondir l'analyse des performances globales des mortiers développés.

### 4.4.1 Essai d'étalement des mortiers au mini cône

L'évaluation de l'étalement des mortiers de réparation a été réalisée à l'aide d'un moule tronconique (Figure 4.5). Celui-ci est disposé au centre d'une plaque, rempli de mortier, puis nivelé. Une fois le moule retiré verticalement, le mortier s'étale naturellement sous l'effet de la gravité.

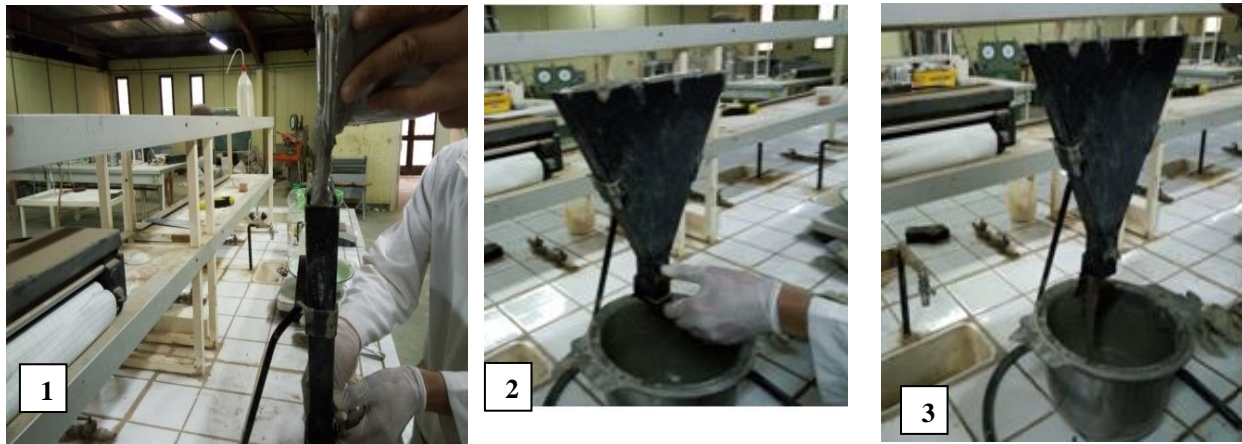
Après 30 secondes, le diamètre de l'étalement est mesuré dans deux directions perpendiculaires, et la moyenne des deux valeurs représente l'étalement final (Domone et al., 1999). D'après les recommandations de l'EFNARC (2005), un mortier est considéré comme auto-plaçant lorsque son diamètre d'écoulement se situe entre 240 et 260 mm.



**Figure 4.5** – Évaluation de l'étalement des mortiers de réparation à l'aide du mini-cône.

#### 4.4.2 Temps d'écoulement des mortiers

Dans cet essai, le mini-entonnoir est rempli de mortier jusqu'à sa capacité maximale. Une fois rempli, la trappe inférieure est ouverte, laissant le mortier s'écouler librement dans le récipient du malaxeur. Le temps d'écoulement correspond à la durée (en secondes) entre l'ouverture de la trappe et l'instant où une première lumière devient perceptible à travers l'entonnoir, lorsqu'on l'observe de haut en bas. Selon les recommandations de [l'EFNARC \(2005\)](#), un mortier auto-plaçant doit présenter un temps d'écoulement compris entre 7 et 11 secondes (Figure 4.6).

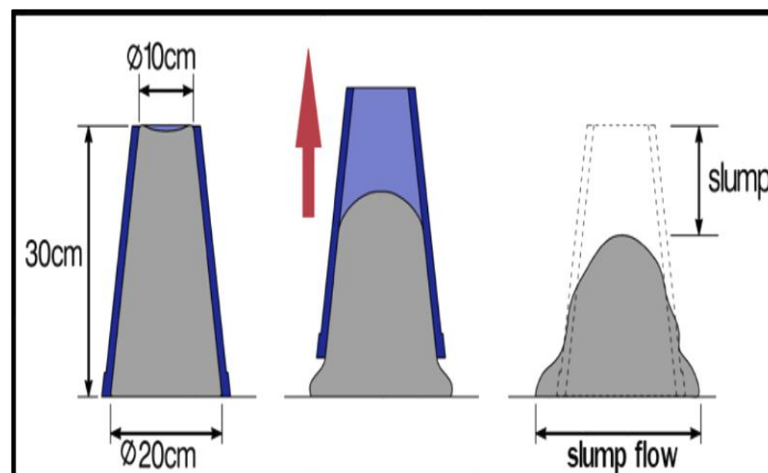


**Figure 4.6** – Mesure du temps d'écoulement des mortiers de réparation à l'aide du mini V- funnel.

#### 4.4.3 Consistance du béton de substrat

En fonction du type de béton et de sa consistance, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour l'évaluation, notamment :

- Le cône d'Abrams,
- L'étalement sur table à secousses,
- Le maniabilimètre L.C.P.C,
- Le test C.E.S.



**Figure 4.7** – Mesure de l'affaissement du béton à l'aide du cône d'Abrams (Erdoğan, 2005).

Pour sa simplicité d'utilisation sur le terrain et en chantier, notre étude a adopté la méthode classique pour évaluer l'affaissement du béton utilisé comme substrat. Le cône est rempli en trois couches égales, chacune étant compactée avec 25 coups à l'aide d'une tige normalisée

(ASTM C 143, 2003). Après le retrait vertical du moule, l'affaissement est mesuré, comme illustré dans la Figure 4.7. Les valeurs d'affaissement exigées pour chaque type de construction sont indiquées dans le Tableau 4.6.

**Tableau 4.6** – Valeurs de l'affaissement du béton recommandées pour divers types de construction.

Affaissement A (cm)	Consistance	Domaine d'utilisation
0-4	Ferme	Béton de masse
5-9	Plastique	Béton de structure
10-15	Très plastique	Béton de structure
> 16	Fluide	Béton autoplaçant

#### 4.4.5 Essai de compression et de traction par flexion des mortiers

La résistance à la compression et la résistance à la flexion sont des critères essentiels pour classer les mortiers de réparation conformément à la norme EN 1504-3 (2006). Dans cette étude, trois éprouvettes de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  ont été préparées pour chaque formulation de mortier.

Les essais ont été effectués aux âges de 1, 7, 28 et 90 jours en suivant la norme EN 12390-6 (1999). Les tests de compression et de flexion ont été réalisés à l'aide d'une presse Controls 65-L1132, avec une vitesse de chargement de 50 N/s (Figure 4.8).

La résistance à la compression a été calculée en faisant la moyenne des six valeurs obtenues lors des essais, tandis que la résistance à la flexion a été déterminée en prenant la moyenne de trois résultats pour chaque type de mortier de réparation.

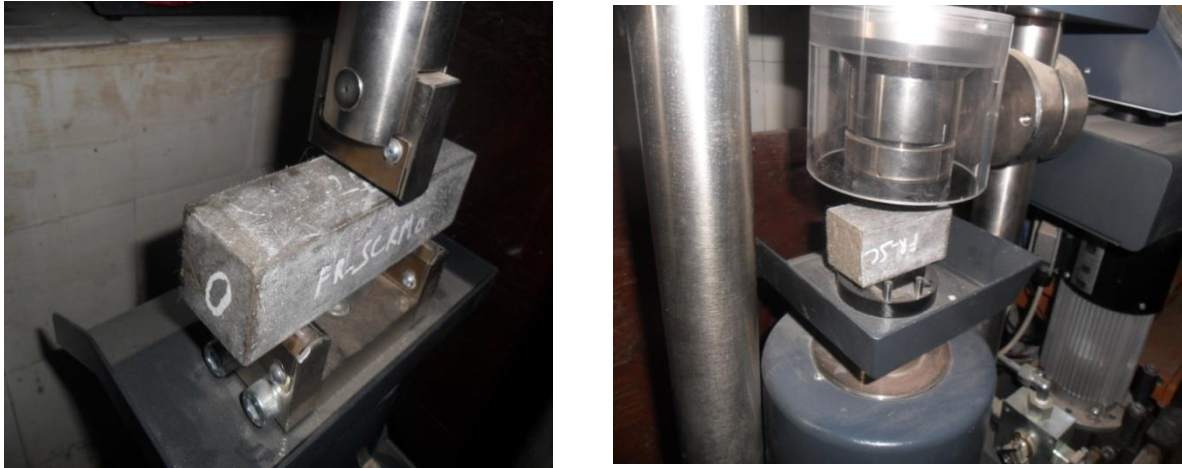


Figure 4.8 – Tests mécaniques réalisés sur les MAPFs.

#### 4.4.6 Essai de compression et de traction par flexion du béton de substrat

L'essai de compression du béton a été effectué à 28 jours, conformément à la norme [ASTM C39 \(1996\)](#), sur des éprouvettes cylindriques de 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur, préparées en laboratoire. Après démoulage, ces échantillons ont été conservés dans l'eau à une température de  $23 \pm 2$  °C.

Une fois cette période écoulée, un surfacage au soufre a été appliqué avant de procéder au test, avec un taux de chargement constant de  $0,25 \pm 0,05$  MPa/s. La force de rupture ainsi que la résistance en compression ont été directement affichées sur l'écran de l'appareil de mesure.



Figure 4.9 – Echantillons du béton

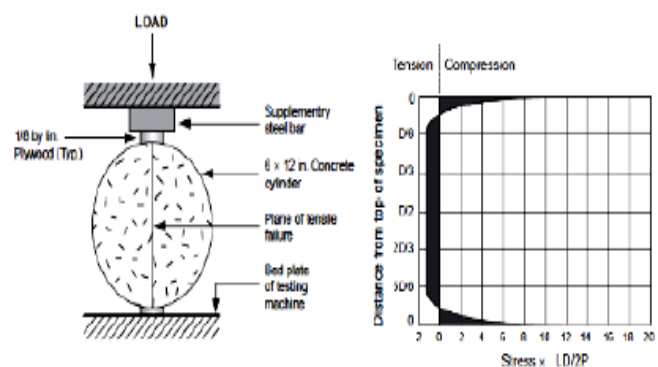


Figure 4.10 – Essai de traction par Flexion.

La résistance à la traction par flexion du béton a été évaluée à 28 jours selon la norme [ASTM C 496 \(2004\)](#). L'essai consiste à appliquer une charge compressive sur deux points opposés d'un cylindre en béton positionné horizontalement dans la presse.

La rupture survient le long du plan diamétral, et la résistance en traction est déterminée à l'aide de l'équation suivante (Eq 4.1) :

$$f'_{ct} = 2P/\pi \times L \times D \quad (4.1)$$

Avec :

- $f'_{ct}$ : résistance en traction (MPa)
- L : longueur du cylindre (cm)
- D : diamètre du cylindre (cm)

#### 4.4.7 Module d'élasticité dynamique ED des mortiers

Pour évaluer l'évolution du module de Young dynamique ED, des mesures de vitesse de propagation des ondes ultrasonores ont été effectuées sur des éprouvettes cylindriques de mortier ( $\varnothing$  40 mm, h 80 mm), en suivant la norme [EN 12504-4 \(2005\)](#).

L'expérimentation a été réalisée à l'aide d'un générateur d'ultrasons CONTROLS, relié à deux transducteurs (émetteur et récepteur). Ces capteurs ont été positionnés de manière alignée sur deux surfaces opposées, préalablement rectifiées avec une meuleuse pour assurer un contact optimal.

Avant les tests, les éprouvettes ont été placées dans une étuve à 80°C jusqu'à stabilisation de leur masse (variation inférieure à 0,2 % en 24 h). Une fine couche de vaseline a été appliquée entre les transducteurs et la surface du mortier pour améliorer la transmission des ondes.

Les mesures ont été effectuées aux âges de 7 et 28 jours. Chaque éprouvette a été testée deux fois, et la moyenne des résultats obtenus sur trois échantillons a été retenue. Le calcul du module de Young dynamique repose sur l'hypothèse que le matériau présente un comportement élastique, homogène et isotrope.

$$E_D = \rho \cdot v^2 \quad (4.2)$$

où;

- $E_D$ : Module dynamique d'élasticité (GPa)
- $\rho$ : Densité sèche des échantillons ( $\text{kg/m}^3$ )

- $v$ : Vitesse de propagation du son (m/s)



**Figure 4.11** – Essai du module d'élasticité dynamique  $E_D$  des MAPF<sub>s</sub>.

#### 4.4.8 Variations dimensionnelles des mortiers (Retrait)

Les variations dimensionnelles peuvent impacter l'adhérence entre les mortiers de réparation et le béton de substrat. Afin de les quantifier, un essai a été réalisé selon la norme [EN 12617-4 \(2002\)](#).

Pour chaque type de mortier de réparation, trois échantillons prismatiques de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  ont été confectionnés. Au bout de 24 heures, après démoulage, la longueur et la masse initiales des échantillons ont été relevés et considérées comme valeurs de référence ( $t_0$ ).

Ces mesures ont ensuite été effectuées de nouveau après 90 jours de séchage dans un environnement contrôlé à une température de  $(20 \pm 2) ^\circ \text{C}$  et une humidité relative de 65 %. Pendant toute la durée de stockage.



**Figure 4.12** – Rétractomètre pour la mesure du retrait des MAPFs.



**Figure 4.13** – Les éprouvettes ont été réalisées afin de mesurer le phénomène de retrait.

Le retrait est déterminé par la relation suivante :

$$\text{Retrait} = \frac{\Delta l}{l} \quad (4.3)$$

Où :

- $\mu m$
- Retrait : (  $m$  ),
- $\Delta l$ : Variation de longueur de l'éprouvette par rapport à la longueur origine (mm),
- $l$ : Longueur initiale de l'éprouvette prise égale à 160 mm.

## 4.5 Propriétés de durabilité

### 4.5.1 Absorption en eau

L'absorption d'eau par capillarité des mortiers de réparation a été évaluée selon la norme européenne EN 1015-18 (2003). Pour ce faire, trois prismes de mortier de dimensions  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  ont été préparés, démoulés après 24 heures, puis soumis à une cure de 27 jours avant d'être testés.

Avant l'essai, chaque échantillon a été scié afin d'éliminer la couche superficielle qui avait été en contact avec le moule, pouvant influencer les résultats. Pour garantir des mesures fiables, les prismes ont été placés dans une étuve à  $60 \text{ °C}$  jusqu'à stabilisation de leur masse, ce qui signifie qu'entre deux pesées espacées de 24 heures, la variation de poids devait être inférieure à 0,1 %.

Les demi-prismes obtenus ( $4 \times 4 \times 8 \text{ cm}^3$ ) ont ensuite été préparés en appliquant une résine imperméabilisante sur leurs faces latérales afin de limiter l'absorption d'eau à la seule surface étudiée. Une fois la résine bien sèche, les échantillons ont été pesés avec précision, puis disposés verticalement sur une grille pour éviter tout contact direct avec le fond du bac d'immersion. Enfin, ils ont été placés dans l'eau avec une hauteur d'immersion limitée à 5 mm, conformément aux exigences du protocole (Figure 4.14).

Pour éviter tout contact entre les faces des prismes, le niveau d'eau dans le bac a été soigneusement maintenu constant tout au long de l'essai. Cette précaution permet d'assurer une absorption uniforme et d'éliminer toute interférence entre les échantillons.

Le coefficient d'absorption capillaire souvent appelé sorptivité  $\omega$  des mortiers de réparation est déterminé en évaluant la masse d'eau absorbée après 24 heures, conformément à la relation suivante (Eq 4.4) :

$$\omega = (M_f - M_0) / A \cdot \sqrt{t} \quad (4.4)$$

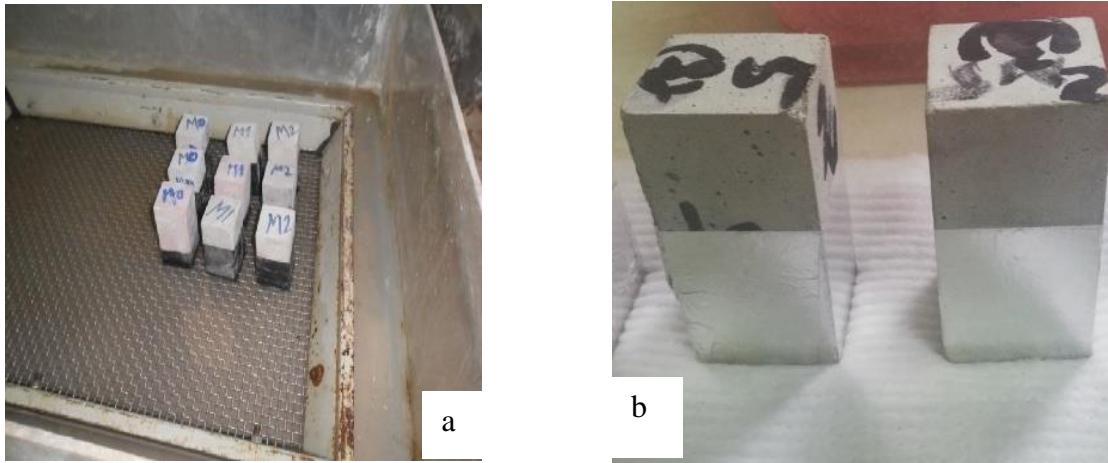
$\omega$  : Le coefficient d'absorption capillaire (sorptivité) en  $(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$ ,

A : Section de l'éprouvette ( $\text{m}^2$ ),

$M_0$ : masse initiale de l'échantillon sèche après passage à l'étuve (kg),

$M_f$ : masse finale de l'échantillon après 24 heures d'immersion (kg).

Par ailleurs, conformément aux exigences normatives, les demi-prismes sont sectionnés verticalement afin de déterminer la profondeur de pénétration de l'eau dans le matériau (Figure 4.14).



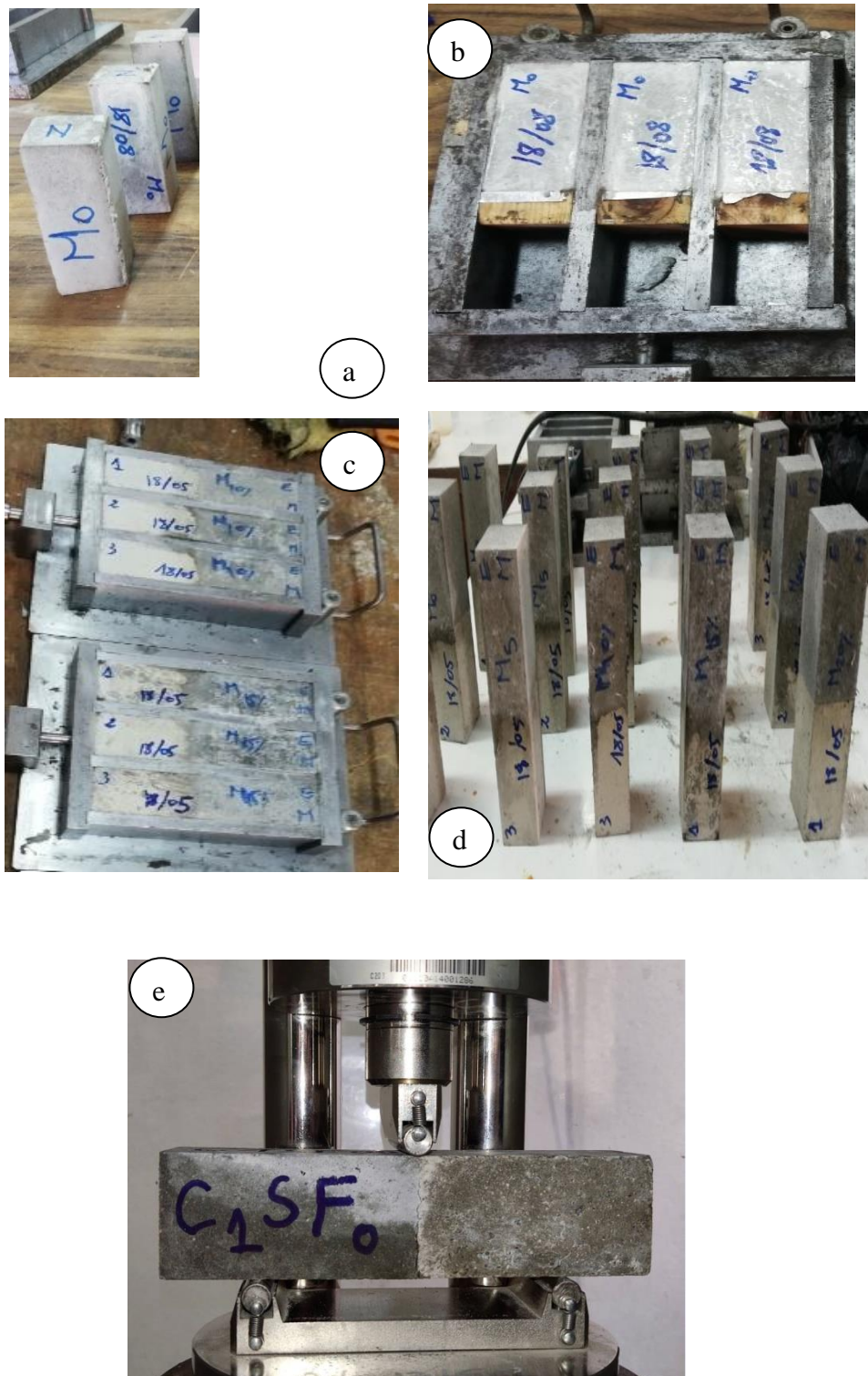
**Figure 4.14** – Essai d’absorption en eau des MAPF : a) immersion des échantillons 24 heures dans l’eau b) mesure de la profondeur de pénétration de l’eau.

#### 4.5.2 Compatibilité des mortiers de réparation

##### 5.5.2.1 La résistance à la flexion à l'adhésion des mortiers de réparation auto-plaçants (MAPFs)

La résistance d'adhérence entre les mortiers auto-plaçants de réparation (MAPFs) et le mortier de substrat (MSUB) a été évaluée à l'aide d'un essai de flexion en quatre points, conforme à la norme [ASTM C78](#).

Pour cette étude, des éprouvettes composites ont été fabriquées, constituées de deux moitiés prismatiques de dimensions  $40 \times 40 \times 80 \text{ mm}^3$ . Une moitié était constituée de MAPFs et l'autre de MSUB, les deux étant solidement assemblées, comme illustré en Figure 4.15 (a). La partie substrat a été moulée dans des cadres métalliques et a subi une cure de 28 jours en immersion dans l'eau, à une température stable de  $20 \pm 2 \text{ °C}$ . Afin d'optimiser l'adhérence du matériau de réparation, la surface du substrat ( $40 \times 40 \text{ mm}^2$ ) a été soigneusement traitée par brosse. Avant le coulage des MAPFs, l'interface entre le substrat et le mortier de réparation a été préalablement humidifiée par immersion pendant plus de six heures. Après 28 jours, les mortiers de réparation ont été appliqués sur la surface du substrat.



**Figure 4.15** – Préparation des composites MAPF-Substrat et essai d'adhésion (résistance à la flexion) : a) saturation des substrats ; b) introduction des substrats dans les moules; c) coulage des mortiers de réparation MAP ; d) décoffrage des composites; e) essai de traction par flexion.

Lors des essais, chaque éprouvette a été positionnée au centre de deux plaques du dispositif de test, puis une charge a été appliquée à un taux constant de 0,5 kN/s jusqu'à la rupture, comme montré en Figure 4.15 (f).

La compatibilité entre les MAPFs et le MSUB a été analysée à travers le mode de rupture observé. Une rupture au niveau de l'interface entre le mortier de réparation et le substrat a été classée comme une rupture adhésive, indiquant une faible compatibilité. En revanche, une rupture à l'intérieur même du matériau de réparation (rupture cohésive) a témoigné d'une bonne compatibilité avec le mortier de substrat.

Ainsi, la qualité de l'adhérence entre l'ancien et le nouveau matériau est un critère fondamental pour évaluer l'efficacité des matériaux de réparation.

#### **5.5.2.2 Poutre réparée par une couche de mortier (essai de flexion 4 points)**

Afin d'évaluer la compatibilité des mortiers de réparation mis au point, nous avons confectionné des échantillons prismatique en béton, mesurant  $10 \times 10 \times 40$  cm. Le type d'échantillon possède un évidement d'une épaisseur de 1 cm sur une surface de  $10 \times 20$  cm, créant ainsi une texture crantée (Figure 4.16).



**Figure 4.16** – Un échantillon prismatique avec évidement servant de substrat.

Après démoulage, soit 24 heures après leur fabrication, les échantillons ont été conservés dans l'eau à une température de  $(20 \pm 2)$  °C pendant 28 jours afin d'assurer leur maturation, puis stockés en laboratoire durant une année.

À l'issue de cette période, les évidements ont été préparés par broissage, identique à celle utilisée pour l'essai d'adhésion. Par la suite, les mortiers de réparation ont été coulés afin de combler parfaitement les évidements de 1 cm, comme illustré sur la Figure 4.17.

L'évaluation de la compatibilité des composites dans ces conditions a été réalisée à l'aide d'un essai de flexion à quatre points, conformément à la norme [ASTM C 78 \(2009\)](#). Pour cela, les zones remplies de mortier de réparation ont été placées dans la partie soumise à la traction. En supposant un comportement linéairement élastique du composite, la contrainte de traction pure (correspondant ici à la contrainte d'adhérence) a été calculée en divisant la charge de rupture par la surface sollicitée, avec un facteur de correction de 0,60.

$$\sigma_a = \frac{1.8F}{a^2} \quad (4.5)$$

où :

$\sigma_a$  : Contrainte d'adhérence (kN/cm<sup>2</sup>),

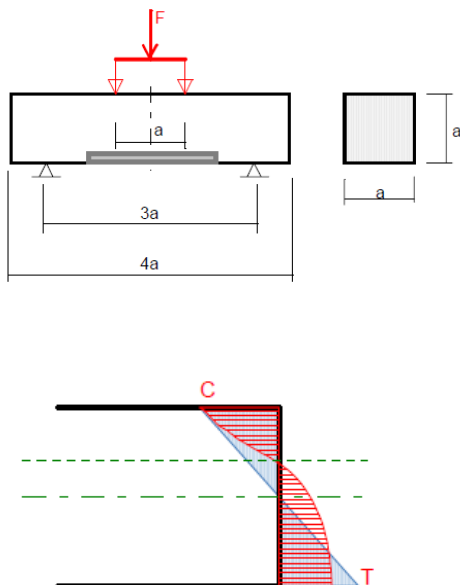
F : Force de rupture (kN),

a : Coté de la poutre (cm).

La compatibilité des matériaux de réparation MAPFs avec le béton du substrat a été déterminée en fonction de leur mode de rupture. Une défaillance traversant le matériau de réparation et affectant le tiers médian du substrat indique une bonne compatibilité. À l'inverse, si la rupture se manifeste autrement, le matériau est considéré comme incompatible avec le substrat en béton ([Czarneck et al., 1999](#)).



**Figure 4.17** – Les mortiers de réparation ont été appliqués pour remplir entièrement les évidements de 1 cm.



**Figure 4.18** – Composites (MAPF<sub>5</sub>-Béton de substrat) sous essai de flexion 4 points.

#### 4.6. Récapitulation des essais faits à l'état frais

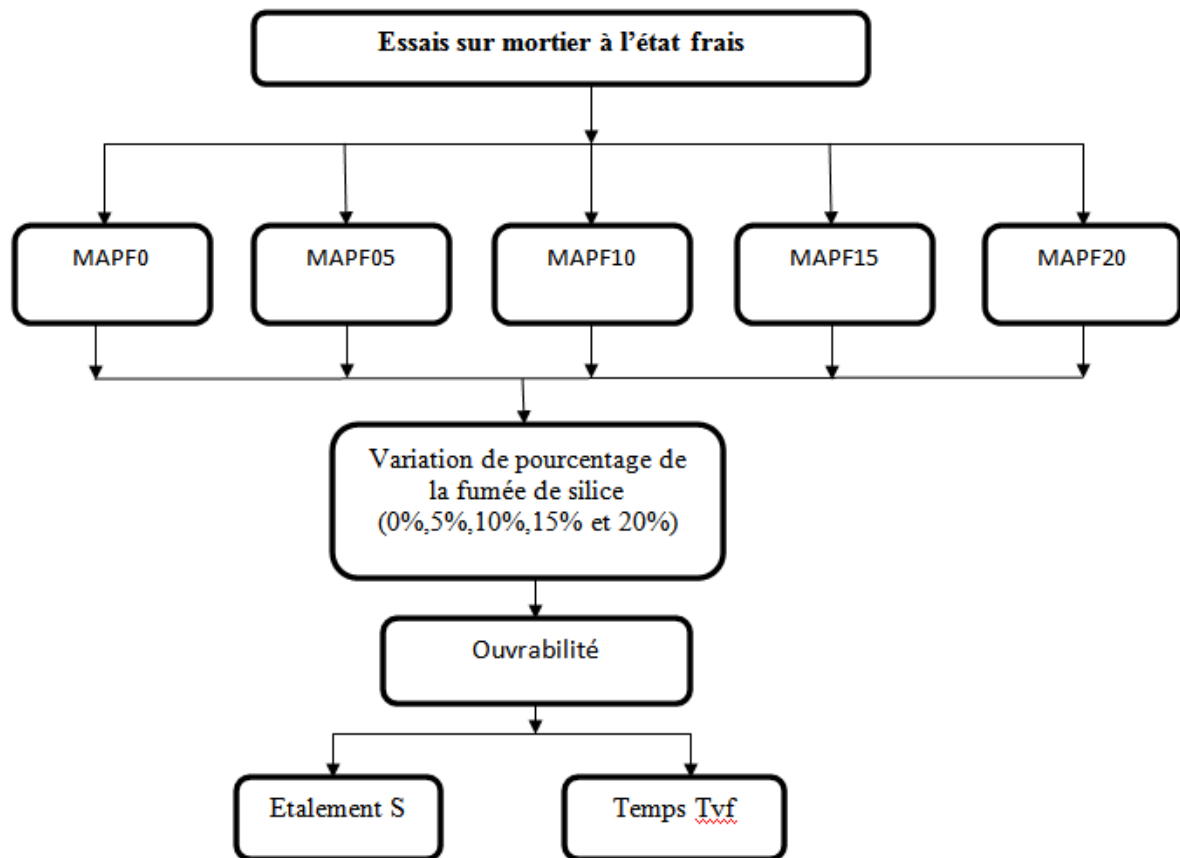


Figure 4.19 – Organigramme des Essais à l'état frais.

### 4.7 Récapitulations des essais faits à l'état durci

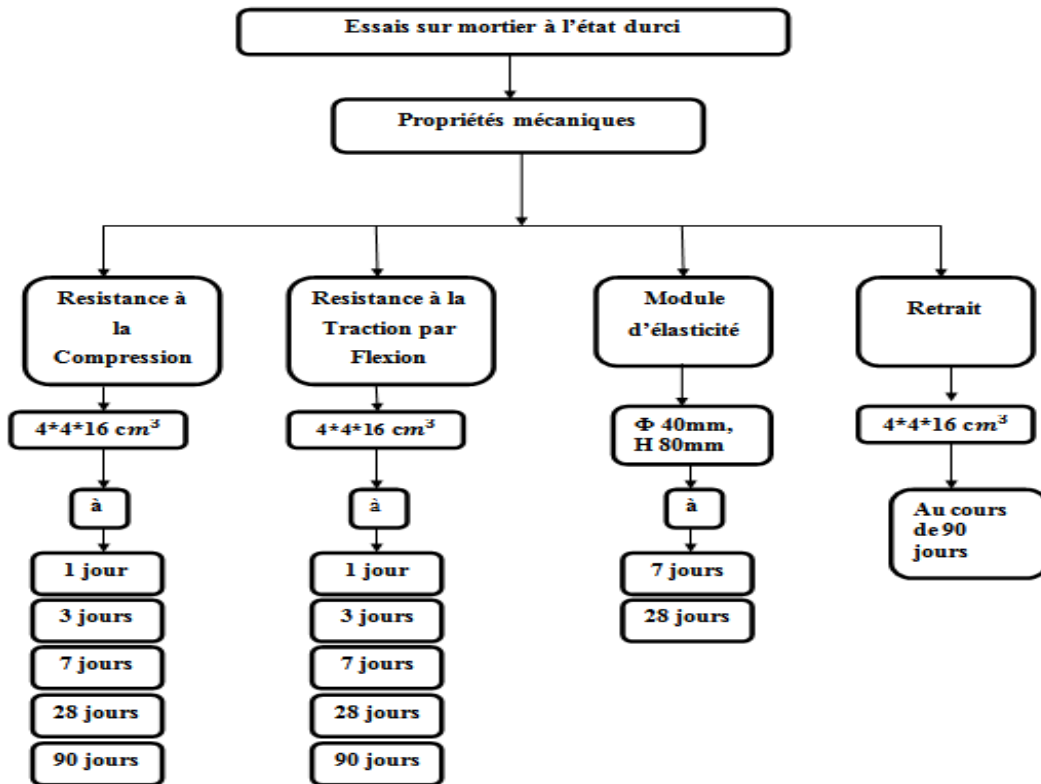


Figure 4.20 – Organigramme des Essais à l'état durci (propriétés mécaniques).

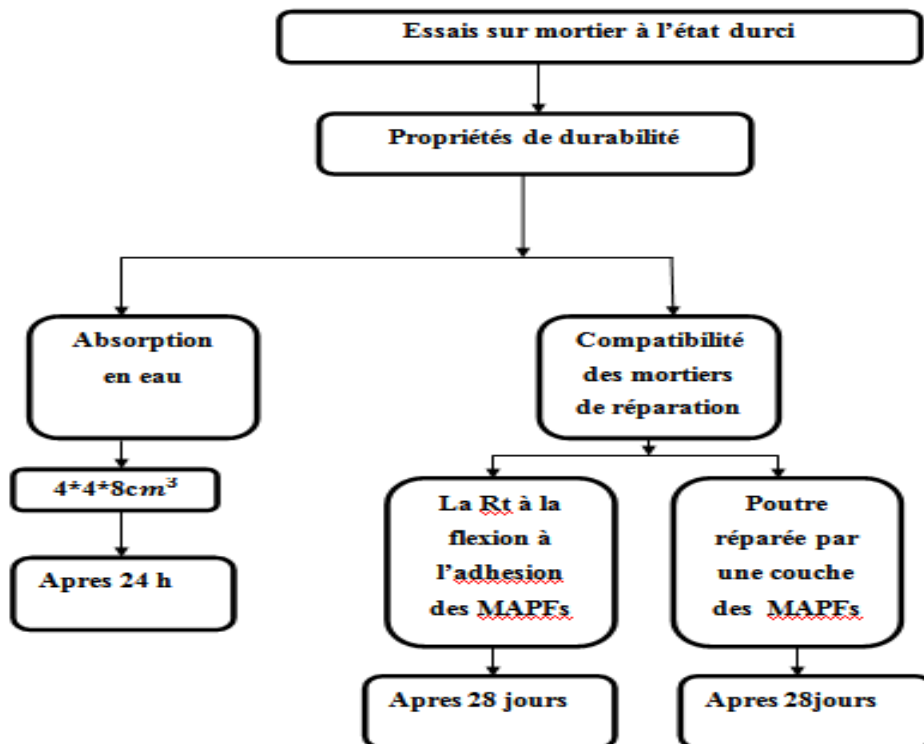


Figure 4.19 – Organigramme des Essais à l'état durci (propriétés de durabilité).

## **Chapitre 05**

---

*Présentation et discussions des résultats*

## 5.1 Introduction

Ce chapitre explore en détail les résultats des essais menés sur les mortiers de réparation et le béton de substrat, en analysant leurs comportements à l'état frais et durci. L'étude vise notamment à décrypter :

- Les propriétés rhéologiques (fluidité, viscosité) et l'ouvrabilité des mortiers intégrant de la fumée de silice,
- Leur performance mécanique et durabilité, évaluées selon les critères stricts de la norme [EN 1504-3](#),
- Leur adhérence au substrat et leur adaptation aux contraintes environnementales spécifiques au projet.

## 5.2 Comportement du béton et du mortier de substrat

Les propriétés clés du béton et du mortier de substrat, comme la consistance, les résistances mécaniques (traction, compression) et le retrait, sont résumées dans le Tableau 5.1. Ces résultats viennent d'une série d'essais de caractérisation menés en laboratoire.






Tableau 5.1 – Principales caractéristiques du béton de substrat.

Essai de caractérisation	Mortier	Béton
Affaissement (cm)	13	12
Resistance en compression (MPa)	29	30
Resistance en traction (MPa)	4.1	3.8
Retrait ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	-	1150

Les résultats indiquent que le béton préparé avec un rapport E/C de 0,55 présente une consistance plastique, typique d'un béton de structure. De plus, sa résistance en compression, en traction ainsi que son retrait à 28 jours sont comparables aux valeurs couramment observées sur nos chantiers. Il s'avère donc adapté pour être utilisé comme béton de substrat dans cette étude, en vue d'une future réparation à l'aide des mortiers autoplaçants développés.

### 5.3 Etude des propriétés rhéologiques et fraîches des MAPF<sub>s</sub>

Tableau 5.2 – Propriétés des MAPFs à l'état frais.

Nombre de mélange	Photos	Etalment (cm)	Ressuage (Vsuel)	Ségrégation (Visuelle)	Temps d'écoulement (s)	Couleur du mortier
MAPF0		245	*ND	*ND	5.33	Gris
MAPF5		240	*ND	*ND	5.32	Gris foncé
MAPF10		270	*ND	*ND	4.26	Gris foncé
MAPF15		255	*ND	*ND	5.23	Gris foncé
MAPF20		277	*ND	*ND	4.34	Gris foncé

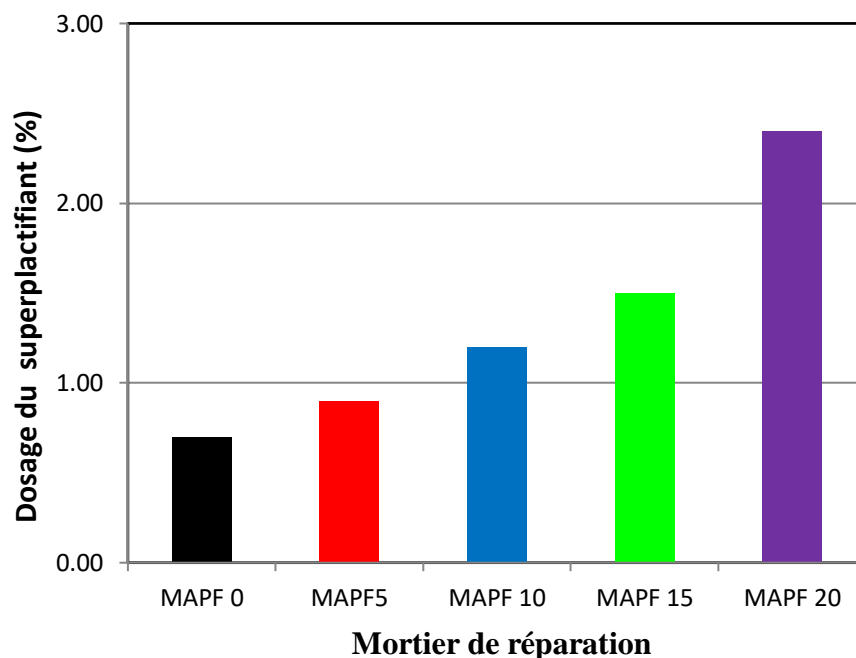
\*ND : Non détecté

Il est important de noter que l'inspection visuelle des quatre mélanges de mortier testés n'a révélé aucun signe de ressuage ni de ségrégation (Tableau 5.2). Par ailleurs, les autres propriétés rhéologiques et à l'état frais, telles que l'étalement, le temps d'écoulement des MAPFs testés, seront détaillées dans les sections suivantes.

### 5.3.1 Essai d'étalement au mini-cône (Mini-slump flow)

Les résultats des essais d'étalement des mortiers de réparation sont illustrés dans le tableau 5.1. Le diamètre cible de  $240 \pm 10$  mm, défini par l'EFNARC (2005) a été atteint en ajustant le dosage de superplastifiant. Les diamètres mesurés variaient entre 240 et 280 mm.

Le dosage optimal, souvent appelé dosage de saturation du superplastifiant, correspond à la quantité au-delà de laquelle aucune augmentation ou modification supplémentaire de l'étalement du mélange n'est observée. L'analyse de la Figure 5.1 montre que la quantité de superplastifiant nécessaire pour obtenir l'étalement souhaité a légèrement augmenté avec l'incorporation de la fumée de silice.



**Figure 5.1** – La variation du dosage du superplastifiant (%).

Comme l'indique le tableau 4.4, un dosage de 0.7% est suffisant pour atteindre l'étalement cible dans le cas du mortier de référence MAPF0. En revanche, pour les mortiers à base de la fumée de silice, un dosage accru de superplastifiant s'est révélé indispensable afin de maintenir une ouvrabilité optimale: 0.9% pour le MAPF5, 1.2% pour le MAPF10, 1.5% pour le MAPF15 et 2.4% pour MAPF 20.

Il convient de noter que l'ajout de fumée de silice dans le mortier entraîne une diminution des performances par rapport au mélange témoin (MAPF0) en ce qui concerne les propriétés à l'état frais. En raison de sa surface spécifique élevée et de la finesse extrême de ses particules, la fumée de silice accroît significativement la demande en eau du mélange, compromettant son ouvrabilité. Pour garantir une fluidité constante des mortiers de réparation étudiés, il a été nécessaire d'augmenter la quantité de superplastifiant.

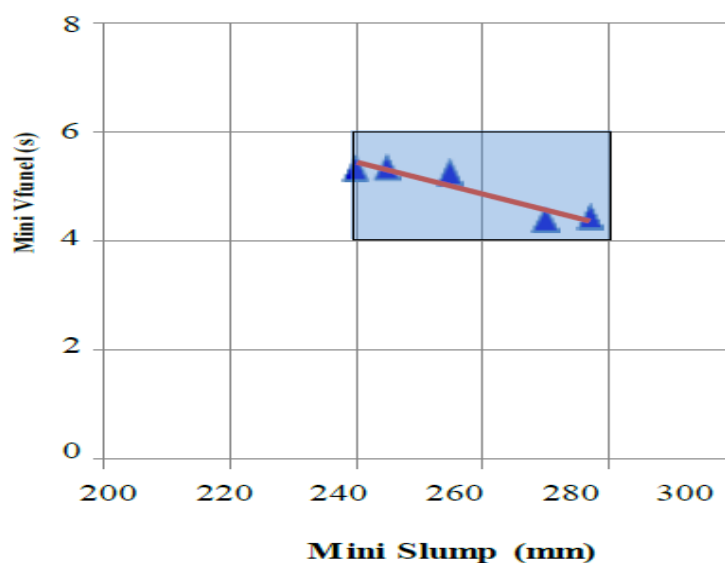
Le tableau 5.2 montre que les diamètres d'étalement des mélanges varient entre 240 et 270 mm. Selon les recommandations d'EFNARC, une plage comprise entre 240 et 260 mm est considérée comme satisfaisante. (Yaseri et al., 2018) suggèrent un intervalle optimal de 220 à 280 mm pour le mini-slump, et dans cette étude, la fourchette retenue était de 240 à 270 mm. Ainsi, pour améliorer l'ouvrabilité, l'ajout de superplastifiant a été nécessaire. Une augmentation de son dosage a permis d'obtenir un taux de conformité de 80 % du mini-slump par rapport à la valeur cible. Cependant, des études récentes, notamment celles de Habibi et al., (2021) ; Ali et al., (2021) ; Amin et al., (2022), ont mis en évidence qu'une augmentation de la teneur en FS dans le mortier peut entraîner une diminution de sa maniabilité.

### 5.3.2 Temps d'écoulement (Mini V-funnel flow time) des MAPFs

D'après les données du tableau 5.2, le temps d'écoulement des différents mortiers autoplaçants de réparation (MAPFs) varie entre 4,26 et 5,32 secondes. L'ajout de fumée de la silice (FS) a réduit l'ouvrabilité du mortier frais, ce qui a nécessité une augmentation du dosage en superplastifiant pour compenser cette perte de fluidité.

L'incorporation de fumée de silice (FS) a induit une réduction marquée de la fluidité des mortiers MAPFs. Cette altération rhéologique découle directement de la microstructure ultra-fine et de la surface réactive élevée de la FS, qui intensifie les interactions physico-chimiques au sein de la

matrice. Avec un effet plus marqué pour un dosage de 20 %. Cette observation rejoint les conclusions d'Erdogdu et al., (2011). De plus, la présence de la FS a accentué le besoin en superplastifiant (Park et al., 2012). Car sa surface spécifique élevée favorise une adsorption plus importante de ce dernier, limitant ainsi sa disponibilité autour des particules de ciment et affectant la fluidité du mélange (Sabet et al., 2013). Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans d'autres études (Teimortashlu et al., 2018 ; Salehi et al., 2019).



**Figure 5.2** – La corrélation entre l'étalement mini-slump et le test mini V-funnel pour les mortiers autoplaçants de réparation (MAPFs).

Par ailleurs, une relation linéaire claire a été observée entre l'étalement au mini V-funnel et au mini-slump, comme illustré à la Figure 5.2. Plus précisément, lorsque l'étalement mini-slump était compris entre 240 et 280 mm, le temps d'écoulement au mini V-funnel se situait entre 4 et 6 secondes.

En pratique, l'ouvrabilité des pâtes cimentaires fraîches peut être estimée à partir des résultats des essais d'écoulement mini-slump et mini V-funnel. Ainsi, Les essais de remplissage se révèlent un indicateur clé de l'ouvrabilité des mortiers MAPFs. Ils établissent une corrélation directe entre la capacité de remplissage (densité de compacité) et la fluidité, confirmant que l'aptitude du mortier à s'auto-niveler dépend étroitement de sa mobilité à l'état frais.

## 5.4 Etude des propriétés des MAPF<sub>s</sub> à l'état durci

### 5.4.1 Résistances mécaniques

Les données relatives aux résistances à la traction par flexion et à la compression sont présentées dans le tableau 5.2 Les Figures 5.3 et 5.4 révèlent une croissance exponentielle des résistances en compression des MAPFs avec l'âge, en fonction des teneurs en FS.

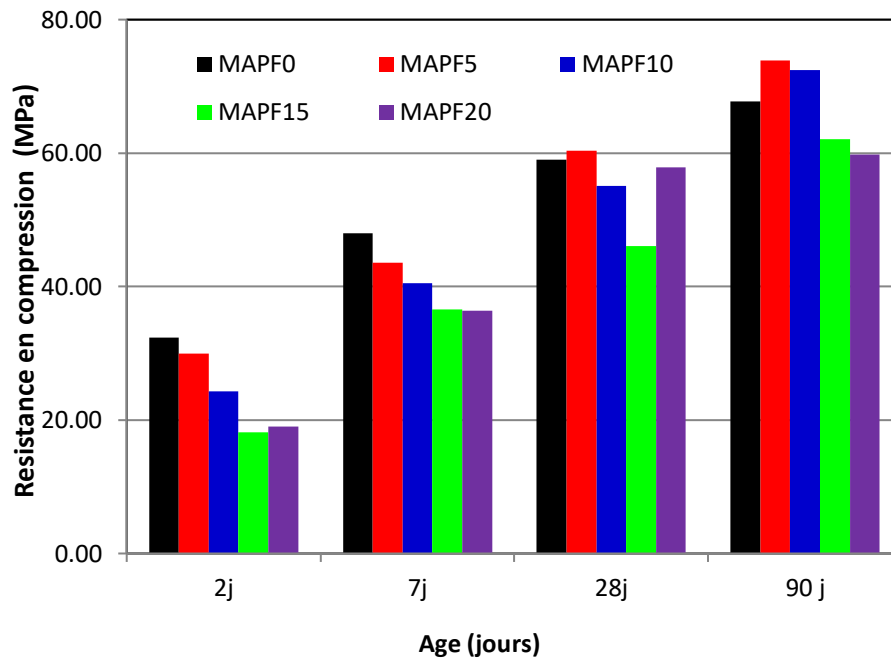
**Tableau 5.2** – Propriétés à l'état durci des mortiers de réparation auto-plaçants (MAPFs).

MAPFs	Résistance à la compression				Résistance à la traction par flexion				Module d'élasticité			
	2j	7 j	28 j	90 j	2j	7 j	28 j	90 j	2j	7 j	28 j	90 j
MAPF0	32.5	48.0	59.1	67.8	6.44	8.59	9.06	9.36	21.30	25.40	27.30	33.76
MAPF5	29.9	43.0	60.4	73.9	5.77	7.41	8.23	10.37	19.03	24.27	27.43	32.73
MAPF10	24.3	40.5	55.1	72.4	5.23	6.71	8.11	9.28	16.33	23.79	26.31	29.22
MAPF15	18.1	36.6	46.1	62.1	4.21	6.32	6.94	8.50	14.76	21.21	24.39	29.87
MAPF20	19.0	36.4	57.9	59.8	4.84	5.54	7.72	8.27	15.83	24.94	28.07	28.01

La Figure 5.3 met en évidence la résistance en compression des mortiers de réparation (MAPFs) en fonction des teneurs en FS et des périodes de test (2, 7, 28 et 90 jours).

La résistance en compression maximale a été enregistrée pour le mortier de référence (MAPF0), suivi du MAPF5, puis du MAPF10, ensuite du MAPF 15 et enfin du MAPF20, une tendance également observée par [Ahmad et al., \(2018\)](#).

Aux premiers âges (2 jours), Contrairement aux attentes, les mortiers MAPF contenant de la fumée de silice présentent une réduction de la résistance en compression par rapport au témoin MAPF0. Avec des réductions de 8 %, 25 %, 45% et 42% pour les MAPF5, MAPF10, MAPF 15 et MAPF20, respectivement. À 7 jours, ces baisses ont été de 10 %, 16 %, 24% et 24 %.



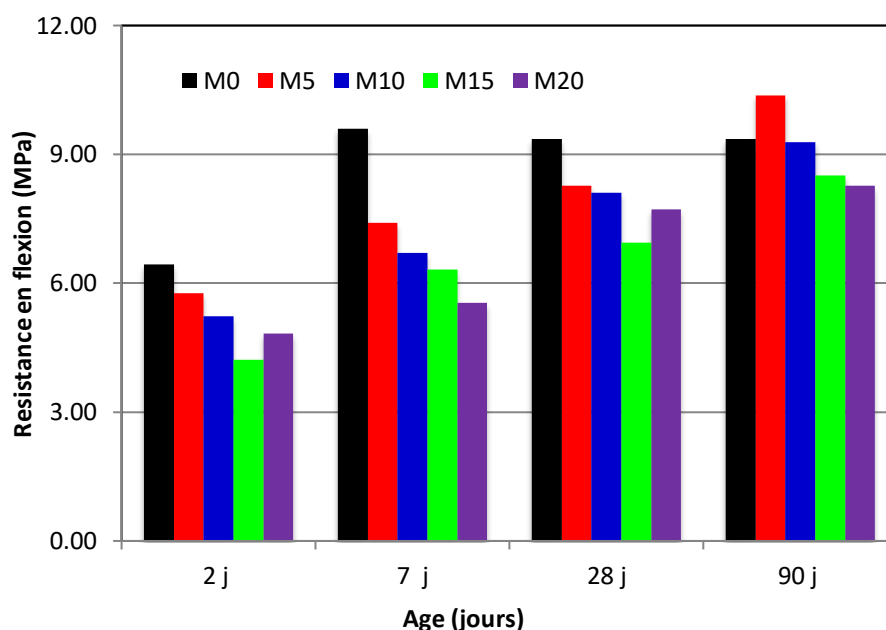
**Figure 5.3** – Évolution de la résistance en compression des MAPFs avec le temps.

À 90 jours, le mélange MAPF5 a atteint la résistance en compression la plus élevée, suivi de MAPF10, puis de MAPF0. Les résistances en compression des MAPF5 et MAPF10 étaient très proches, respectivement de 73,9 MPa et 72,4 MPa. Cette tendance s'explique principalement par la réaction pouzzolanique, qui favorise une microstructure plus dense et améliore ainsi la résistance en compression sur le long terme.

Ces résultats confirment que l'augmentation du dosage en FS stimule l'activité pouzzolanique, entraînant une hydratation plus efficace et un gain de résistance en compression à long terme.

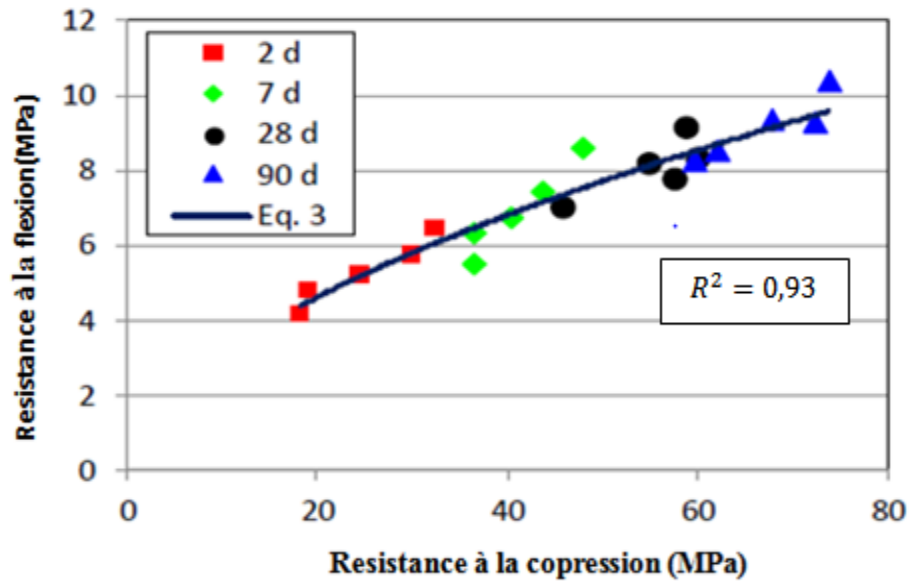
Il convient de noter que la proportion idéale de superplastifiant et de fumée de silice (FS) pour obtenir un mélange auto-plaçant est généralement d'environ 1 % et 10 % du poids du liant, respectivement. Cette combinaison permet de réduire la porosité tout en améliorant la résistance. De plus, l'ajout de FS et de superplastifiant favorise la réaction pouzzolanique à 28 jours. Le développement d'une microstructure plus dense, avec une porosité réduite, contribue ainsi à une meilleure résistance et durabilité du mortier.

Le développement de la résistance à jeune âge dans les systèmes cimentaires est généralement peu influencé par la fumée de silice. En tant que matériau pouzzolanique, la FS agit principalement sur la résistance à long terme et peut même entraîner une diminution de la résistance en flexion à court terme. Il est important de noter qu'aux premiers stades de développement des résistances, les mortiers renforcés de fibres présentent généralement des résistances à la compression et à la traction par flexion inférieures à celles du mortier ordinaire.



**Figure 5.4** – Évolution de la résistance à la traction par flexion des MAPFs avec le temps.

La Figure 5.4 montre que l'évolution de la résistance à la traction par Flexion suit une tendance similaire à celle de la résistance en compression. Aux premiers âges (2 jours de cure), la présence de la FS a un impact négatif sur la résistance en Flexion des MAPFs, avec des valeurs inférieures à celles du mélange témoin (MAPF0). Par exemple, à 7 jours, les résistances en flexion ont diminué de 13.7 %, 21.8%, 26.4% et 35.5 % pour MAPF5, MAPF10, MAPF15 et MAPF20, respectivement, par rapport à MAPF0. Cette baisse est principalement due à l'effet de dilution induit par la FS.



**Figure 5.5** – Corrélation à tous les âges (2, 7, 28 et 91 jours) entre la résistance en compression et la résistance à la traction par flexion des mortiers étudiés.

De nombreuses études ont montré que l'effet de la fumée de silice sur le développement des résistances devient plus significatif après les 7 premiers jours (Sabet et al., 2013 ; Ma et al., 2022). Dans un premier temps, une augmentation de la teneur en FS jusqu'à un certain seuil améliore la résistance en compression du mortier. Cependant, au-delà de ce seuil, une augmentation supplémentaire de la FS entraîne une diminution des résistances (Rao, 2001). D'autres recherches ont révélé que la fumée de silice, lorsqu'elle est ajoutée à l'eau, ne participe pas directement aux réactions d'hydratation du ciment. Elle réagit plutôt avec le  $\text{Ca(OH)}_2$  libéré lors de l'hydratation pour former du gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H), améliorant ainsi la microstructure de la matrice cimentaire durcie. Cette transformation favorise un matériau plus dense et compact, ce qui contribue au gain de résistance précoce et à une meilleure durabilité du mortier au fil du temps (Safhi et al., 2019 ; Benli et al., 2017).

Une résistance optimale à 28 jours est obtenue avec une concentration en superplastifiant comprise entre 1,0 et 1,2 % et une teneur en SF de 10 à 15 % du poids du liant. Par ailleurs, l'incorporation de 15 % de FS en substitution du ciment améliore la durabilité et la résistance du

béton. Cet effet positif est principalement dû à la forte activité pouzzolanique de la FS, liée à sa teneur élevée en SiO<sub>2</sub> amorphe.

Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par d'autres chercheurs (Benli et al., 2017 ; Zarnaghi et al., 2018).

Enfin, il est essentiel de souligner que tous les mortiers de réparation étudiés présentent une résistance en compression à 28 jours supérieure à 45 MPa, répondant ainsi aux exigences des mortiers de classe R4 définies par la norme EN 1504-3 (2006).

La corrélation entre la résistance en compression et la résistance à la traction par flexion, telle que mise en avant par plusieurs chercheurs, peut être exprimée sous une forme différente dans l'équation (1) :

$$f_t = k f_c^\alpha \quad (1)$$

Où :  $f_c$  désigne la résistance en compression (MPa) et  $f_t$  la résistance à la traction par flexion (MPa).

Dans cette étude, la relation entre ces deux propriétés a été modélisée à l'aide de l'équation (1), qui permet d'établir un lien entre la résistance en compression et la résistance en flexion des mortiers de réparation auto-plaçants (MAPFs).

Les coefficients  $k$  et  $\alpha$  ont été déterminés par une analyse de régression non linéaire, en se basant sur les résultats expérimentaux considérés comme variables principales. Les valeurs obtenues pour  $k$  et  $\alpha$  sont respectivement de 0,872 et 0,55. La forte corrélation obtenue, avec un coefficient de détermination  $R^2 = 0,930$ , peut être exprimée comme suit :

$$f_t = 0,872 f_c^{0,55} \quad (2)$$

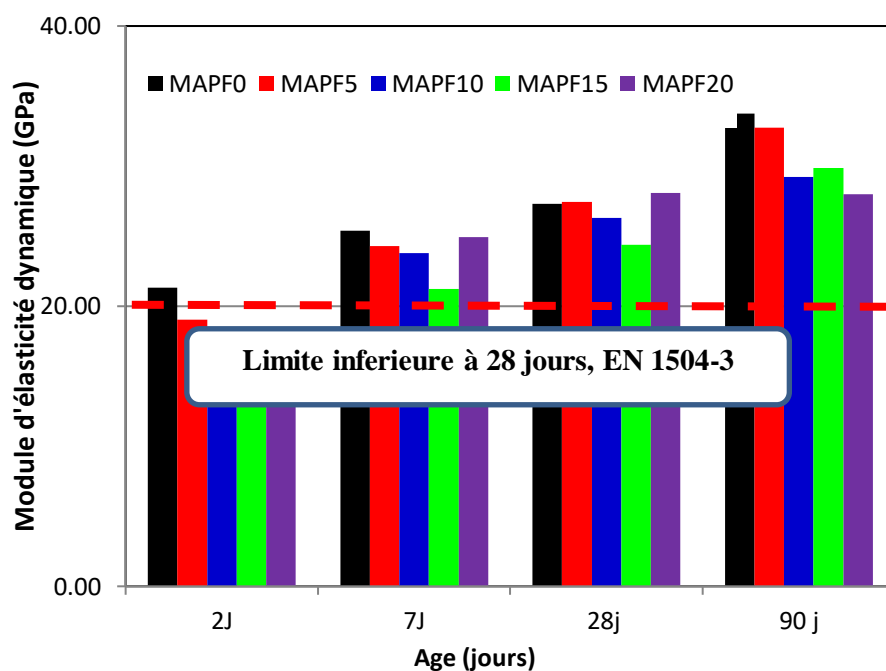
L'équation (3), illustrée par la Figure 5.5, permet d'estimer et de prédire avec une grande fiabilité la résistance de traction par flexion à partir de la résistance en compression correspondante.

### 5.4.2 Module d'élasticité dynamique (ED)

Le module d'élasticité dynamique (ED) des cinq types de mortiers de réparation (MAPFs) a été mesuré aux âges de 2, 7, 28 et 91 jours, à l'aide d'éprouvettes cylindriques et les résultats sont illustrés dans la Figure 5.6.

L'évolution de ce paramètre suit une tendance similaire à celle de la résistance à la compression le remplacement partiel du ciment par 5 %, 10 %, 15% et 20 % de la fumée de silice.

Le module d'élasticité dynamique des mortiers autoplaçants de réparation (MAPFs), qui reflète la rigidité du matériau, constitue un paramètre clé dans la conception et le développement des matériaux en ingénierie.



**Figure 5.6** – Évolution du module de Young des MAPFs avec le temps.

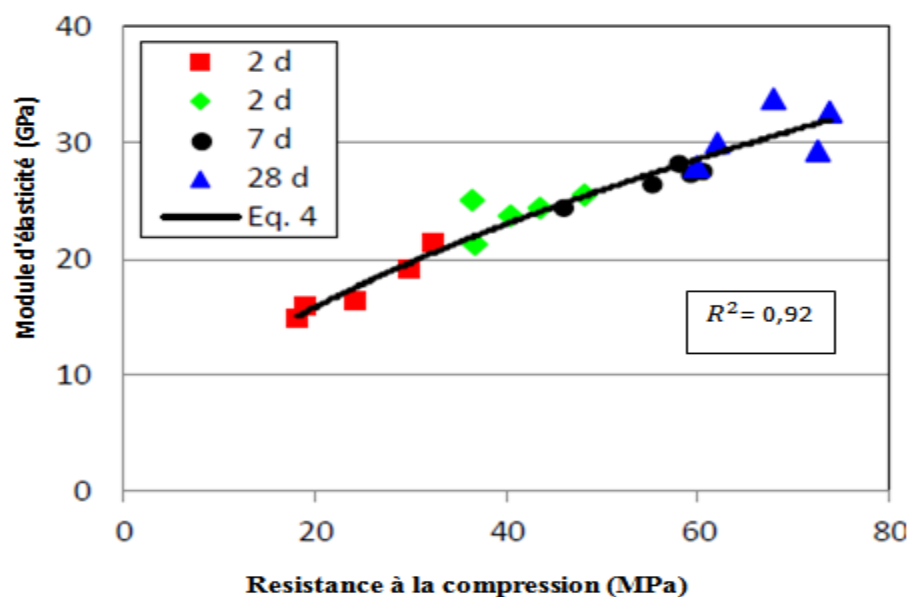
Les mesures effectuées ont révélé une diminution du module d'élasticité dynamique des mortiers testés à 2 jours, le mortier témoin (MAPF0) présente un module ED de 21,3 GPa, tandis que celui du MAPF20 atteint seulement 15.83 GPa, soit une baisse d'environ 25.6 %.

À 90 jours, cet écart se réduit à 17 % en raison des effets positifs de la réaction pouzzolanique sur la structure du mortier.

Par ailleurs, le mortier contenant 10 % de la fumée de silice affiche un module d'élasticité dynamique de 29,2 GPa, une valeur comparable à celle du mortier témoin (33.76 GPa).

Il est évident que l'incorporation d'une quantité élevée de la fumée de silice (FS) a conduit à une réduction du module d'élasticité dynamique, comparativement au mortier témoin (MAPF0), qui présente la valeur la plus élevée.

Cependant, l'ensemble des mortiers de réparation étudiés montre une augmentation progressive du module d'élasticité au fil du temps, particulièrement marquée après 90 jours de cure. À titre d'exemple, entre 28 et 90 jours, le module d'élasticité du MAPF0 et du MAPF15 a augmenté respectivement de 24 % et 22 %. Ces résultats sont globalement cohérents avec les tendances rapportées dans la littérature (Alshahrani et al., 2023 ; Mazloom et al., 2004).



**Figure 5.7** – Corrélation à tous les âges (2, 7, 28 et 91 jours) entre la résistance en compression et le module de Young dynamique des MAPFs, Décrit par l'équation (4).

Différents modèles et corrélations ont été proposés dans la littérature pour estimer le module d'élasticité du béton, la plupart étant basés sur sa résistance à la compression.

Dans cette étude, une corrélation empirique a été établie entre le module d'élasticité ( $E_a$ ) et la résistance à la compression ( $f_a$ ), s'exprimant comme suit :

$$E_c = 3,162 f_c^{0,537} \quad (4)$$

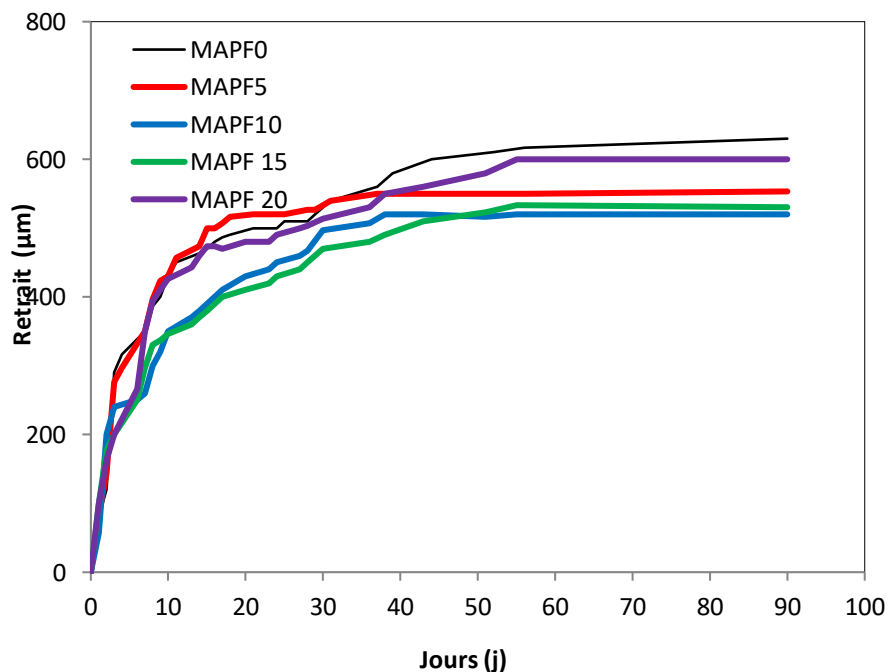
Où :

$F_c$  représente la résistance à la compression en MPa et  $E_c$  le module d'élasticité en GPa.

L'équation (4) met en évidence une forte corrélation entre ces deux paramètres, avec un coefficient de détermination ( $R^2$ ) supérieur à 0,92. La Figure 5.7 illustre également cette corrélation remarquable entre la résistance à la compression et le module d'élasticité.

### 5.4.3 Variations dimensionnelles

La Figure 5.8 illustre l'évolution du retrait au séchage des différents mélanges de mortier auto-compactant de réparation (MAPFs) sur une période de 90 jours.



**Figure 5.8** – Evolution du retrait de séchage des MAPFs au cours de 90 jours.

On observe que l'augmentation du taux de fumée de silice (FS) jusqu'à 10 % entraîne une diminution du retrait au séchage à 90 jours. Par exemple, le mélange MAPF10 présente une réduction de 33 % du retrait au séchage par rapport à MAPO. Toutefois, il convient de noter qu'un dosage de SF supérieur à 10 % pourrait induire une expansion des éprouvettes. En effet, la fumée de silice joue un rôle de réservoir en absorbant l'eau à l'état frais. Au cours du durcissement, cette eau est progressivement relâchée, contribuant ainsi à compenser en partie l'eau consommée lors de l'hydratation du ciment ou perdue par évaporation durant le séchage.

Les recherches antérieures ont systématiquement mis en évidence que l'ajout de la FS tend à réduire le retrait au séchage des mortiers de réparation. Plusieurs facteurs expliquent ce phénomène. Tout d'abord, l'incorporation de matériaux pouzzolaniques permet de diminuer la quantité de ciment utilisée, ce qui réduit la chaleur d'hydratation et, par conséquent, le retrait des mélanges de mortier.

Ensuite, après une période de cure suffisante, les mortiers contenant de la FS présentent généralement un retrait plus faible en raison de la réaction pouzzolanique. Cette dernière favorise la formation supplémentaire de gels C-S-H, rendant ainsi la matrice plus dense et limitant la perte d'eau. Enfin, l'utilisation de la FS contribue à la réduction du retrait en diminuant le diamètre et la connectivité des pores, un effet partiellement lié aux propriétés de renforcement de la fumée de silice.

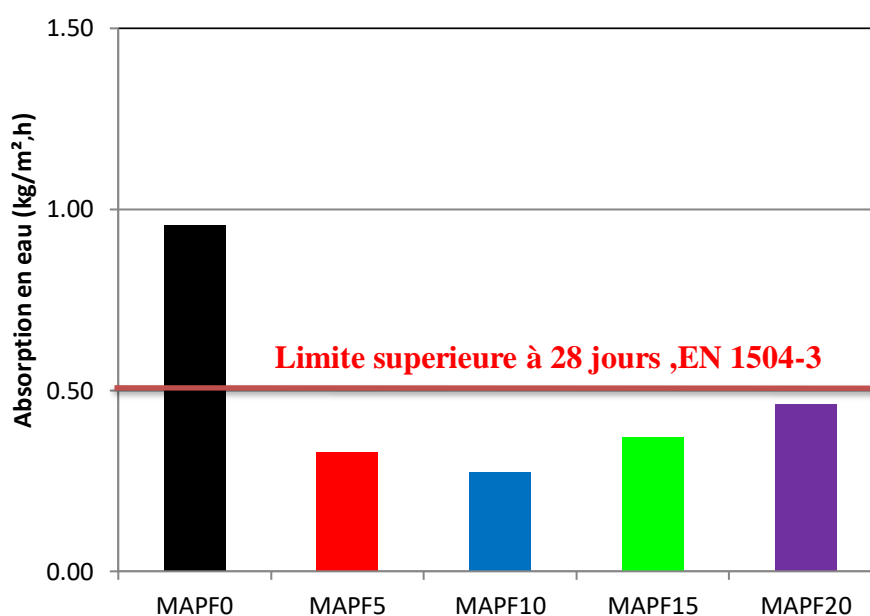
En résumé, ces résultats indiquent que les mortiers intégrant des matériaux pouzzolaniques présentent un retrait au séchage plus faible que les mélanges de référence, lorsqu'ils sont soumis à des conditions de séchage à l'air.

Ce résultat est en accord avec les conclusions de plusieurs chercheurs (Guo et al., 2020 ; Al-Khaja et al., 1994 ; Shen et al., 2020 ; Mohan et al., 2018 et Hassan et al., 2012), qui s'accordent à dire que l'intégration de matériaux poreux dans la matrice cimentaire contribue efficacement à la réduction du retrait.

## 5.5 Propriétés de durabilité

### 5.5.1 Absorption d'eau par capillarité

La Figure 5.9 illustre les coefficients d'absorption capillaire pour différentes concentrations de la fumée de silice (FS) après 28 jours. Cette analyse repose sur la sorptivité, un paramètre évaluant la capacité d'un matériau poreux à absorber et transporter l'eau par action capillaire, ce qui permet d'apprécier ses caractéristiques de durabilité.



**Figure 5.9** – Evolution de l'absorption en eau des mortiers, après 24 heures.

Le graphique présenté dans la Figure 5.9 met en évidence une diminution du coefficient d'absorption capillaire avec l'augmentation du taux de SF jusqu'à 10 %. Par exemple, ce coefficient pour le MAPF5 est inférieur de 60 % par rapport à celui du MAPF 0. En revanche, au-delà de 10 % de la FS, une augmentation notable du coefficient est observée, atteignant 20 %. Ces résultats suggèrent que l'incorporation de la FS réduit la présence de pores et d'imperfections dans le mortier par rapport au mortier de réparation standard (MAPF0). Ainsi, une teneur en FS allant jusqu'à 20 % tend à réduire la porosité du mortier MAPF. À une concentration de 10 % en FS, le coefficient d'absorption capillaire diminue jusqu'à  $0,27 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ , soit une réduction de

71 % par rapport au MAPF0. Cela démontre que l'ajout de la FS permet de limiter efficacement l'absorption d'eau dans le mortier de réparation. Cette observation est en accord avec les conclusions de [Sabet et al., \(2013\)](#).

En effet, les coefficients d'absorption capillaire mesurés pour l'ensemble des mortiers de réparation MAPFs varient entre 0,27 et 0,46  $\text{kg/m}^{-2}\text{h}^{0.5}$ , respectant ainsi les exigences ( $< 0,5 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}^{0.5}$ ) pour les matériaux destinés à l'application structurelles de classe R4.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces résultats. Tout d'abord, l'activité pouzzolanique élevée de la fumée de silice (FS) favorise la densification de la microstructure des mortiers de réparation autocompactants (MAPFs), réduisant ainsi leur porosité grâce à la formation de silicates de calcium hydratés (C-S-H). Ensuite, la surface spécifique plus importante de la FS par rapport au ciment contribue également à limiter l'absorption d'eau en densifiant davantage la matrice du mortier. Concrètement, l'ajout de particules de la FS comble les espaces entre les particules de ciment hydraté, ce qui améliore la résistance à la compression tout en diminuant l'absorption d'eau.

Il est important de noter que le mélange témoin MAPF0 présente le coefficient d'absorption capillaire le plus élevé. En revanche, tous les mortiers contenant de la FS affichent des coefficients nettement inférieurs à celui du MAPF0. Ces observations sont cohérentes avec les résultats rapportés dans plusieurs autres études.

Ces tendances sont cohérentes avec les résultats obtenus par [Haque et al., \(2022\)](#) ; [Chen et al., \(2022\)](#) ; [Sharbatdar et al., \(2020\)](#) ; [Lu et al., \(2015\)](#).

## 5.5.2 Compatibilité des mortiers de réparation

### 5.5.2.1 Poutre réparée par une couche de mortier (essai de traction par flexion 4 points)

La figure 5.10 ainsi que le tableau 5.3 présente les résultats des essais de compatibilité réalisés par essai de traction par flexion à quatre points sur les poutres réparées (composites MAPF0/BSUB, MAPF5/BSUB, MAPF10/BSUB, MAPF15/BSUB et MAPF20/BSUB). Ces poutres ont été conservées dans l'eau à  $20\pm 2^\circ\text{C}$  à 28 jours. En effet, toutes les fractures se sont

produites près de la mi-portée des poutres et aucun décollement du mortier de réparation n'a été observé. Par conséquent, les mortiers élaborés sont considérés comme compatibles ( [Czarnecki et al., 1999](#) ; [Pattnaik et al., 2007](#)).

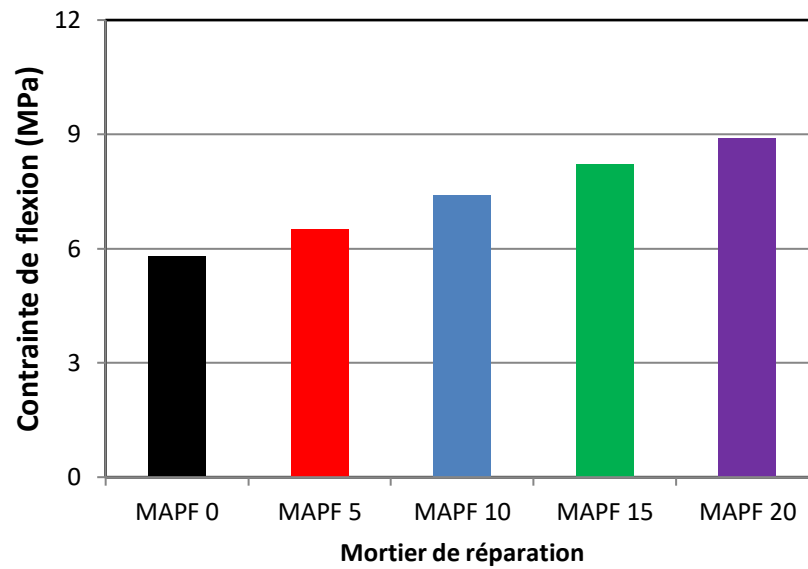
Ce comportement peut être expliqué par la densification continue de la microstructure de la zone de transition interfaciale (ITZ), en raison des réactions pouzzolaniques à long terme ([Scrivener et al., 1996](#) ; [Lee et al., 2006](#)).

L'analyse de l'interface entre les fibres de polypropylène et la matrice révèle des caractéristiques spécifiques influençant les propriétés mécaniques du mortier. Les fibres présentent une surface plane et irrégulière avec des marques de friction, résultant de leur participation aux efforts de traction. Avant la solidification du mortier, les fibres sont généralement réparties uniformément, formant un réseau qui soutient les granulats et réduit les fissures de surface. Après durcissement, elles agissent comme des barrières contre le retrait autogène, diminuant la formation et la propagation des microfissures en dissipant l'énergie aux extrémités de ces dernières, améliorant ainsi la structure interne du mortier.

De plus, l'incorporation de fibres de polypropylène peut optimiser la microstructure poreuse interne du béton, améliorant ainsi ses propriétés mécaniques globales ([Wei et al., 2023](#)).

Néanmoins, des dosages élevés en fibres peuvent entraîner une diminution de la résistance et de la perméabilité du béton, ainsi qu'une réduction significative du retrait plastique et de la largeur des fissures. Ainsi, il est crucial de déterminer une teneur optimale en fibres pour équilibrer les améliorations mécaniques et la maniabilité du béton, tout en évitant les effets négatifs liés à une incorporation excessive de fibres ([Bhagwat et al., 2023](#)).

L'analyse de la figure 5.10 révèle que les composites incluant la fumée de silice (composites MAPF0/BSUB, MAPF5/BSUB, MAPF10/BSUB, MAPF15/BSUB et MAPF20/BSUB). Conservés pendant 28 jours à l'eau ( $20\pm 2^\circ\text{C}$ ), ont montré des augmentations de la contrainte de traction par flexion de 12%, 27,5 %, 41.37 % et 53.44% respectivement, par rapport au composite de contrôle MAPF0/BSUB. Selon nos résultats, nous observons que le remplacement du ciment par la fumée de silice a un effet positif sur le développement des contraintes de traction par flexion.



**Figure 5.10** – Evolution en contrainte de la traction par flexion des composites (épaisseur 1cm) en fonction de la FS.

**Tableau 5.3** – Résultats de compatibilité des poutres composites (épaisseur de la couche de réparation de 1cm).

Mortier de réparation	Essai de traction par flexion à quatre points	Mode de rupture
MAPF0	5.8	Incompatible
MAPF5	6.5	Compatible
MAPF10	7.4	Compatible
MAPF15	8.2	Compatible

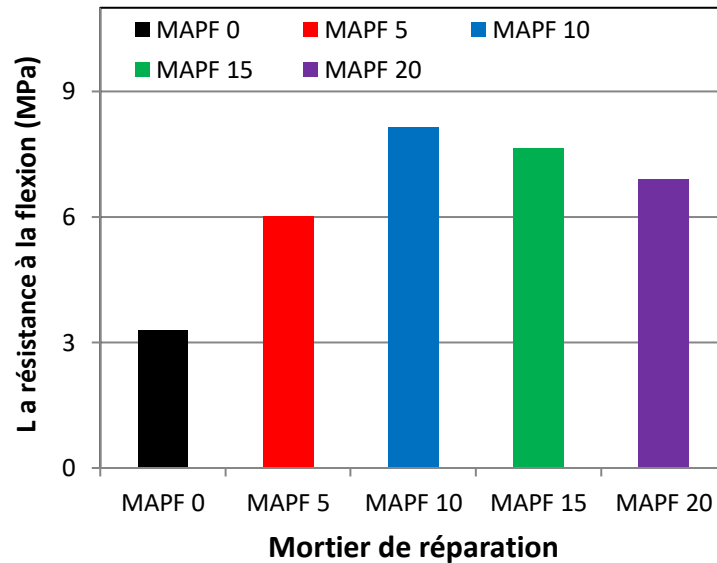
MAPF20	8.9	Compatible	
--------	-----	------------	--

### 5.5.2.2 La résistance à la traction par flexion influençant l'adhésion des mortiers de réparation auto-plaçants (MAPFs)

Le Tableau 5.4 ainsi que la Figure 5.11 présente les résultats des essais de compatibilité réalisés par essai de traction par flexion à trois points sur les composites MAPF0/MSUB, MAPF5/MSUB, MAPF10/MSUB, MAPF15/MSUB et MAPF20/MSUB. Ces prismes ont été conservés dans l'eau à  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  à 28 jours.

**Tableau 5.4** – Résultats de la résistance à la traction par flexion de l'adhérence des mortiers composites renforcés (MAPFs).

Mortier de réparation	Essai de traction par flexion à trois points		Mode de rupture
MAPF0	3.27	Incompatible	
MAPF5	6.01	Incompatible	
MAPF10	8.14	Compatible	
MAPF15	7.63	Compatible	
MAPF20	6.90	Compatible	



**Figure 5.11** – Evolution de la résistance à la traction par flexion des composites.

Les défaillances observées se sont produites au niveau du support dans les composites MAPF10/MSUB, SCRM15/MSUB et SCRM20/MSUB, ce qui témoigne d'une bonne adhérence entre le mortier de réparation auto-plaçant (MAPF) et le mortier de support (MSUB). En revanche, pour les formulations contenant 0 % et 5 % de fumée de silice (FS), des fissures sont apparues à l'interface, entraînant un détachement complet du mortier de réparation du support, caractéristique d'une rupture cohésive. L'amélioration de la zone de transition interfaciale, qui constitue la frontière entre l'ancien mortier et le matériau de réparation, peut être favorisée par l'incorporation de fibres de polypropylène (PPF) (Jiang et al., 2016). Il est également essentiel de noter que, dans le cadre de la réparation des structures en béton, la résistance à l'adhésion en traction des matériaux de réparation devrait idéalement dépasser 2,1 MPa (Sprinkel, 1993).

Par ailleurs, les principaux constituants du ciment sont l'alite (C<sub>3</sub>S), la belite (C<sub>2</sub>S) et la ferrite (C<sub>4</sub>AF), dont l'hydratation joue un rôle clé dans l'amélioration des propriétés mécaniques. Lors

de ce processus, les alcalis libres, principalement sous forme d'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), réagissent avec la silice contenue dans la fumée de silice (FS) en présence d'eau. Cette réaction favorise la formation de silicate de calcium hydraté (C-S-H), ce qui diminue la porosité capillaire tout en réduisant la teneur en hydroxyde de calcium dans la matrice (Medeiros et al., 2009). Grâce à sa surface spécifique élevée, la fumée de silice améliore sa réactivité et comble efficacement les vides, tant au sein de la matrice que dans la zone de transition interfaciale, ce qui conduit à une structure plus dense et homogène. De plus, la forte adhérence entre les mortiers de réparation auto-plaçants (MAPFs) et les mortiers supports (MSUB) contribue à limiter la propagation des fissures dans cette zone critique (Mallat et al., 2011).

Il est important de souligner que plusieurs facteurs influencent l'adhésion à l'interface, notamment la nature de l'agent de liaison, la propreté et l'humidité de la surface du support, ainsi que la rugosité de l'interface (Momayez et al., 2005). Conformément à ces observations, l'ajout de la fumée de silice (FS) dans le mortier ne se contente pas d'améliorer les propriétés mécaniques de la zone de transition interfaciale, mais renforce également le lien entre le mortier de réparation et son support, garantissant ainsi une meilleure adhérence (Mallat et al., 2011).

Enfin, l'incorporation de FS contribue à affiner la structure des pores internes et à accroître la compacité du mortier, ce qui améliore considérablement sa durabilité. Cette résistance accrue aux conditions environnementales agressives joue un rôle essentiel dans la réduction de la dégradation du mortier et prolonge ainsi sa durée de vie en service (Xu et al., 2018).

Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés dans d'autres études (Mizan et al., 2022 ; Mizan et al., 2023).

## 5.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude expérimentale sur les propriétés des mortiers autoplaçants renforcés de fibres, destinés à la réparation du béton, à l'état frais et durci. Pour cela, quatre formulations de mortiers ont été préparées (un mortier de référence et quatre autres mélanges dans lesquels 5%, 10 %, 15 % et 20 % du ciment ont été remplacés par de la fumée de silice). Le rapport eau/liant ( $E/L = 0,45$ ) ainsi que la fraction volumique des fibres de polypropylène (0,2 %) ont été maintenus constants pour toutes les formulations.

L'analyse des résultats expérimentaux a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Tous les mortiers testés ont été formulés pour atteindre un diamètre moyen d'étalement de  $270 \pm 10$  mm (EFNARC 2005), avec un ajustement du dosage en superplastifiant. L'ajout de la fumée de silice a nécessité une légère augmentation de la quantité de superplastifiant pour garantir une ouvrabilité similaire. Le temps d'écoulement mesuré pour le mortier témoin est de 5.33 secondes, tandis que pour la formulation contenant 20 % de la fumée de silice (MAPF20), il a atteint 4.34 secondes. De plus, les mortiers enrichis en fumée de silice ont montré une fluidité supérieure à celle du mortier témoin pour une même teneur en eau.
- L'incorporation de la fumée de silice a induit une réduction des résistances en compression ainsi qu'à la traction par flexion, avec un effet plus marqué pour les teneurs les plus élevées. Toutefois, à 90 jours, toutes les formulations étudiées dépassent la résistance minimale exigée pour les mortiers de réparation structurale de classe R4 (EN 1504-3). De plus, à 90 jours, la résistance à la compression du mortier MAPF10 est comparable à celle du mortier témoin.
- Un modèle prédictif a été élaboré avec succès pour établir un lien entre la résistance en compression et la résistance à la traction par flexion des MAPFs, affichant un coefficient de corrélation élevé ( $R^2 = 0,930$ ). Ce modèle constitue un outil fiable pour estimer la résistance à la traction par flexion à partir de la résistance en compression, apportant ainsi des informations précieuses pour l'utilisation pratique des MAPFs.
- Le module de Young a suivi la même tendance que la résistance mécanique, diminuant avec l'augmentation de la fumée de silice. Malgré cela, à 28 jours, toutes les formulations respectent la valeur minimale exigée par la norme EN 1504-3 pour les mortiers de classe R4 ( $\geq 20$  GPa). À 90 jours, le module de Young du mortier MAPF10 (29,22 GPa) est comparable à celui du mortier témoin (33.76 GPa).
- Par ailleurs, un modèle empirique a été proposé pour corréler le module d'élasticité à la résistance en compression. Le coefficient de détermination élevé ( $R^2 > 0,92$ ) confirme la fiabilité de cette approche, qui peut être utilisée pour estimer le module d'élasticité en fonction de la résistance en compression dans les applications de réparation en béton.

- L'ajout de la fumée de silice a également contribué à réduire le retrait des mortiers, notamment pour la formulation MAPF10. Cette réduction s'explique par la structure poreuse de la fumée de silice, qui permet un stockage temporaire de l'eau et une libération progressive lors du durcissement.
- Les valeurs d'absorption d'eau des différents mortiers (comprises entre 0,27 et 0,46  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ ) restent conformes aux exigences de la classe R4 ( $< 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ ). De plus, l'absorption du mortier MAPF10 ( $0,27 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ ) est faible de celle du mortier témoin ( $0,96 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ ).
- la résistance à la traction par la flexion à l'adhésion des MAPFs est un facteur clé dans la réhabilitation des structures en béton. L'ajout de fumée de silice améliore cette propriété en renforçant à la fois la performance mécanique et la durabilité du mortier de réparation. Le choix des matériaux et des formulations adaptés est donc essentiel pour garantir une adhésion optimale et prolonger la durée de vie des structures réparées.
- l'ajout de la fumée de silice et de fibres de polypropylène améliore à la fois l'adhésion et la résistance de traction par flexion des MAPFs. La fumée de silice renforce l'adhérence en réduisant la porosité et en favorisant la formation des hydrates de silicate de calcium (C-S-H), qui améliorent la zone de transition interfaciale. Quant aux fibres de polypropylène, elles augmentent la résistance aux fissurations et la ténacité du mortier.
- L'essai de traction par flexion en trois points a mis en évidence une amélioration de l'adhérence du mélange MAPF au substrat lorsque 10 % de fumée de silice y était incorporé, cet effet se renforçant avec l'augmentation du temps de cure. Cette amélioration est attribuée à la réaction pouzzolanique, qui favorise une meilleure cohésion à l'interface. Ces observations suggèrent que le MAPF pourrait être un matériau adapté à la réparation des structures en béton détériorées.
- D'après les conclusions de cette étude, le MAPF semble être un matériau de réparation prometteur, répondant aux exigences de la norme [EN 1504-3](#), grâce à ses performances mécaniques satisfaisantes et à sa bonne compatibilité avec le substrat en béton.

***Conclusions Générales  
et Recommandations***

## Conclusions Générales

Cette étude, fruit de plusieurs années de recherche sur les matériaux destinés à la réparation du béton, a permis d'approfondir notre compréhension des caractéristiques et des performances des mortiers de réparation. Elle se concentre particulièrement sur les mortiers auto-plaçants, renforcés par des fibres et enrichis en matériaux cimentaires additionnels. Les résultats obtenus démontrent que l'optimisation des formulations peut considérablement améliorer la durabilité, l'adhérence et les performances mécaniques des réparations, assurant ainsi une meilleure compatibilité avec les structures déjà en place.

L'incorporation de la fumée de silice et des fibres de polypropylène a prouvé son efficacité en diminuant la porosité, en renforçant la résistance aux agressions extérieures et en augmentant la durabilité des réparations. Néanmoins, certaines limites demeurent, notamment en ce qui concerne la performance à long terme sous diverses conditions climatiques et la variabilité des interactions entre les matériaux de réparation et les substrats en béton altéré.

Cette étude souligne également l'importance d'adopter des approches plus globales, incluant des recherches en conditions réelles, ainsi qu'une analyse des impacts économiques et environnementaux. L'optimisation des matériaux de réparation nécessite non seulement une amélioration de leur composition, mais également le développement de nouvelles stratégies de mise en œuvre et de maintenance préventive.

Ainsi, ces recherches participent à l'avancement des solutions de réparation du béton en proposant des alternatives plus efficaces et adaptées aux défis des infrastructures contemporaines. Les futures perspectives de recherche devraient se focaliser sur l'amélioration des formulations, l'analyse de leur comportement à long terme et l'évaluation de leur impact écologique, afin de garantir des réparations durables et économiquement viables dans un cadre de développement durable.

Dans le premier chapitre, nous avons examiné les diverses pathologies susceptibles de diminuer la durée de vie utile des structures en béton armé. Nous avons également illustré comment établir un diagnostic approprié en fonction de l'ampleur des pathologies observées sur le terrain et de la dynamique de dégradation du béton.

Le deuxième chapitre aborde les différentes techniques et méthodes de réparation appropriées, assurant la durabilité de la structure restaurée. Ce chapitre se concentre spécifiquement sur les techniques de réhabilitation du béton à l'aide de mortiers, ainsi que sur les classes d'exigences associées, conformément à la norme [EN 1504](#).

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté un état de l'art concernant l'impact de la fumée de silice sur la durabilité et la compatibilité des bétons et des mortiers. En effet, la majorité des structures réparées subissent des dégradations après un certain temps en raison d'un choix inapproprié des matériaux de réparation. À cet égard, les experts recommandent d'utiliser des matériaux compatibles avec ceux d'origine pour garantir une réparation durable, permettant ainsi un comportement monolithique avec le reste de l'élément existant. La compatibilité est définie comme un équilibre entre les propriétés physiques et déformationnelles du composite (matériau de réparation/substrat).

À la lumière des résultats obtenus lors des essais sur cinq mélanges de mortiers autoplaçants renforcés par des fibres, il a été observé que l'incorporation de fumée de silice dans les mortiers de réparation a entraîné une légère augmentation du dosage de superplastifiant par rapport au mélange de contrôle. Cela a été nécessaire pour atteindre les propriétés à l'état frais, avec un temps d'écoulement variant de 7 à 11 secondes et un étalement compris entre 240 et 280 mm.

En ce qui concerne les propriétés à l'état durci, une concentration élevée de la fumée de silice peut engendrer une diminution des performances mécaniques, telles que la résistance à la compression, à la traction par flexion et le module d'élasticité, indépendamment de l'âge du matériau. Néanmoins, grâce à la réaction pouzzolanique, toutes les formulations de mortiers autoplaçants renforcés de fibres (MAPFs) étudiées montrent, après 90 jours, une amélioration significative des résistances à la compression et à la flexion. À ce stade, les formulations MAPF5 et MAPF10 atteignent des valeurs de résistance mécanique conformes aux critères de la classe R4 établis par la norme [EN 1504-3](#).

Il a également été noté qu'une augmentation du remplacement du ciment par de la fumée de silice entraîne une réduction du retrait. Cependant, la durabilité, mesurée par l'absorption d'eau, de ces mélanges de mortiers est compromise lorsque le remplacement du ciment dépasse 10 % de fumée de silice, ce qui réduit l'absorption d'environ 71 %, améliorant ainsi la durabilité en limitant la porosité. Il convient de souligner que tous les mortiers analysés

présentent des valeurs d'absorption inférieures aux exigences normatives pour les mortiers de classe R4.

Les résultats de l'analyse de compatibilité ont révélé que les essais de traction par flexion, tant en trois points qu'en quatre points, ont démontré que les mortiers contenant 10 % de fumée de silice développent une adhérence adéquate avec le substrat au fil du temps, en raison de l'effet pouzzolanique qui renforce la liaison. Ces observations suggèrent que ces mortiers pourraient représenter des matériaux prometteurs pour la réparation de structures en béton endommagées. Néanmoins, l'incorporation de la fumée de silice à hauteur de 10 % entraîne une rupture persistante à l'interface. Les conclusions de cette recherche indiquent que les MAPFs se présentent comme des matériaux de réparation efficaces, conformes aux exigences de la norme [EN 1504-3](#), grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques et leur compatibilité avec les structures existantes.

### Recommandations

Pour approfondir le sujet, il serait judicieux de :

- ❖ considérer la durabilité à long terme des MAPFs dans différents environnements et d'évaluer l'efficacité de la fumée de silice par rapport à d'autres matériaux cimentaires complémentaires.
- ❖ Nous avons porté notre attention sur la formulation et la caractérisation des mortiers autoplacants utilisant un seul type de ciment. Il serait souhaitable de reformuler ces mélanges en intégrant d'autres ciments disponibles en Algérie et de les caractériser dans un climat chaud.

## ***Références Bibliographiques***

## Références Bibliographiques

- Alexander M., Bentur A., Mindess S., (2017) *Durability of Concrete: Design and Construction*, CRC Press: Boca Raton, Florida, United States. 2527-2533. 35, no. 4, pp. 748-757.
- Abedin M., Farhangdoust S., Mehrabi A., (2019) Fracture detection in steel girder bridges using self-powered wireless sensors, In *Proceedings of the In Risk-Based Bridge Engineering: Proceedings of the 10th New York City Bridge Conference*, New York City, NY, USA, p. 216.
- ACI, Committee 237, *Self-Consolidating Concrete (ACI 237R-04)*.
- ASTM C39, (2003) Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete Specimens, American society for testing and materials.
- ASTM C78, (2009) Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading).
- ASTM C, (1996) 39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete Specimens, Annual book of ASTM standards 4.
- ASTM C, (2003) 143: Standard Test Method for Slump of hydraulic cement concrete, American society for testing and materials, Annual Book of ASTM Standards 4.
- ASTM C, (2004) 496, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, United States: ASTM International.
- Ahmad J., Abid S.R., Arbili M.M., Majdi A. , Hakamy A., Deifalla A.F., (2022) A Review on Sustainable Concrete with the Partially Substitutions of Silica Fume as a Cementitious Material, 14, 12075.
- Ahmad M.R., Chen B., (2018) Effect of silica fume and basalt fiber on the mechanical properties and microstructure of magnesium phosphate cement (MPC) mortar, *Construction and Building Materials*, 466–478.
- Al-Hasani L.E., Perez G., Herndon H.N., Park J., Poole J.L. , Tien I., Washburn N.R. , Cho Y. K., Gentry T.R., Kurtis K.E., (2023) Prediction of heat of hydration of cementitious systems using Gaussian process regression enables mass concrete thermal modeling, *Materials and Structures*, 56:45.

- Ali K., Qureshi M.I., Saleem S., Khan S.U., (2021) Effect of waste electronic plastic and silica fume on mechanical properties and thermal performance of concrete, *Construct Build Mater.*, 285:122952.
- Al-Khaja W.A., (1994) Strength and time-dependent deformations of silica fume concrete for use in Bahrain, *Constr. Build. Mater.*, vol. 8, no. 3, pp. 169-172, 1994.
- Alkhrdaji T., (2015) Strengthening of Concrete Structures Using FRP Composites, *Struct. Mag.* 2015, 12, 18–20.
- Al-Saadi N.T.K., Mohammed A., Al-Mahaidi R., (2017) Fatigue performance of near-surface mounted CFRP strips embedded in concrete girders using cementitious adhesive made with graphene oxide, *Constr. Build. Mater.*, 148, 632–647.
- Alshahrani A., Kulasegaram S., Kundu A., (2023) Elastic modulus of self-compacting fibre reinforced concrete: Experimental approach and multi-scale simulation, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, p. e01723.
- Amin M., Zeyad A.M., Tayeh B.A., Agwa I.S., (2022) Effect of ferrosilicon and silica fume on mechanical, durability, and microstructure characteristics of ultra high-performance concrete, *Construct Build Mater.*, 320:126233.
- Anagnostopoulos C.A., (2007) Cement–clay grouts modified with acrylic resin or methyl methacrylate ester: Physical and mechanical properties, *Construction and building materials* 21(2): 252-257.
- Andrawes B., Shaw I., Zhao H., (2018) Repair & Strengthening of Distressed/Damaged Ends of Prestressed Beams with FRP Composites, Illinois Center for Transportation/Illinois Department of Transportation, Champaign County, IL, USA.
- Antoni L., Chandra L., Hardjito D., (2015) The impact of using fly ash, silica fume and calcium carbonate on the workability and compressive strength of mortar, *Procedia Eng.*, vol. 125, pp. 773-779.
- Aslam M., Shafiq P., Jumaat M.Z., Shah S., (2015) Strengthening of RC beams using prestressed fiber reinforced polymers—A review. *Constr. Build. Mater.*, 82, 235–256.
- Asmara Y.P., (2024) Concrete Reinforcement Degradation and Rehabilitation: Damages, Corrosion and Prevention, Springer Nature Singapore, Engineering Materials.

- Atahan H.N., Dikme D., (2011) Use of mineral admixtures for enhanced resistance against sulfate attack, *Construction and Building Materials* Volume 25, Issue 8, Pages 3450-3457.
- Bazant Z.P., (1975) Theory of creep and shrinkage in concrete structures: A précis of recent developments, *Mechanics today*.
- Belarbi A., Bae S.W., Brancaccio A., (2012) Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally onded FRP sheets, *Constr. Build. Mater.*, 32, 27–40.
- Benaicha M., Roguiez X., Jalbaud O., Burtschell Y., Alaoui A.H. , (2015) Influence of Silica Fume and Viscosity Modifying Agent on the Mechanical and Rheological Behavior of Self Compacting Concrete, *Constr. Build. Mater.*, 84, 103–110.
- Beneberu E., Yazdani N., (2019) Residual strength of CFRP strengthened prestressed concrete bridge girders after hydrocarbon fire exposure, *Eng. Struct.*, 184, 1–14.
- Benli A., Karataş M., Bakir Y., (2017) An experimental study of different curing regimes on the mechanical properties and sorptivity of self-compacting mortars with fly ash and silica fume, *Constr. Build. Mater.*, vol. 144, pp. 552-562.
- Benyahia A., (2017) Mise au point d'un mortier auto-compactant à base de poudre de perlite naturelle pour la réparation des structures en béton armé, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.
- Bernard G.Y. A., Calgaro J.A., (1997) Conception des ponts, *Techniques de l'ingénieur Génie civil*, Vol CE1, Num C4500, pp C4115.1-C4115.19 ; ref : 9 ref.
- Bertolini L., Elsener B., Pedeferri P., Redaelli E., Polder R.B., (2013) Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair: John Wiley & Sons.
- Bhagwat Y., Nayak G., Pandit P., Lakshmi A., (2023) Effect of polypropylene fibres on strength and durability performance of M-sand self compacting concrete, 2233783.
- Bijen J., (2003) Durability of engineering structures: Design, repair and maintenance.
- Bingöl A.F., Tohumcu I., (2013) Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume, *Mater. Des.*, vol. 51, pp. 12-18.
- BOUABDALLAH M. A., (2024) Intervention Methodology for the Rehabilitation of Damaged Reinforced Concrete Structures, *J. Build. Mater. Struct.* (2024) 11: 20-26.

- Broomfield J.P., (1999) *Corrosion of Steel in Concrete*, E. and FN. Spon., London.
- Chabbi R., Ferhoune N., Bouabdallah F., (2018) *Pathologies, diagnostic à l'aide de CND et techniques de réparation et protection des ouvrages en béton armé : état de l'art*, Faculté des sciences et sciences appliquées, Université Larbi Ben Mhidi.
- Chausson H., (1997) *La durabilité des rechargements minces adhérents en béton renforcé de concrete*, *Cement and Concrete Research*, 32(1):123–31.
- Chen H., Chen Q., Xu Y., Lawi A.S., (2022) *Effects of silica fume and Fly ash on properties of mortar reinforced with recycled polypropylene*, *Constr. Build. Mater.*, vol. 316, p. 125887.
- Colleparidi M., (2003) *A state of the art review on delayed ettringite attack on concrete*, *Cem. Concr. Compos.*, 25 401-407.
- Courard L., (1999) *Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation*, Université de Liege, Faculte des sciences appliquées.
- Czarnecki L.A., Lukowski G.P., Clifton J., (1999) *Polymer composites for repairing of portland cement concrete: compatibility project*, United States Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- Divet L., Arnaud S., Dérobert X., (2005) *Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie*, *Techniques et méthodes des Laboratoires des ponts et chaussées*.
- Domone P., Jin J., (1999) *Properties of mortar for self-compacting concrete*, *Proceedings of the 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete*: 109– 120.
- Dong J., Wang Q., Guan Z., (2010) *Structural behaviour of RC beams externally strengthened with FRP sheets under fatigue and monotonic loading*. *Eng. Struct.*41, 24–33.
- EFNARC, (2005) *The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use*, European federation for specialist construction chemicals and concrete systems.
- Emmons P.H., (1993) *Concrete repair and maintenance illustrated*, Kingston, MA 02364- 0800 (USA): R. S. Means company, inc.

- EN 1015-18, (2003) Methods of test for mortar for masonry, Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar.
- EN 1015-6, (1999) Methods of test for mortar for masonry-Determination of bulk density of fresh mortar.
- EN 12190, (1999) Products and systems for the protection and repair of concrete structures- Test methods- Determination of compressive strength of repair mortar.
- EN 12504-4, (2005) Testing concrete-part 4 : determination of ultrasonic pulse velocity.
- EN 12617-4, (2002) Roducts and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods, Determination of shrinkage and expansion.
- EN 1504, (2008) Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton.
- EN 1504-10, (2004) Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 10: Application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux.
- EN 1504-3, (2006) Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, exigences, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 3: réparation structurale et réparation non structurale.
- EN 1504-9, (2008) Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Définitions, exigences et maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 9 : principes généraux d'utilisation des produits et systèmes.
- EN 197-1, (2000) Cement, Composition, specifications and conformity criteria for common Cements.
- EN 206-1, (2004) Béton - Partie 1: spécification, performances, production et conformité.
- EN 934-2, (2009) Admixtures for concrete, mortar and grout-Part 2: Concrete admixtures- Definitions, requirements, conformity, marking and labeling.
- Erdoğan S.T., Sağlık A.U., (2013) Early-age activation of cement pastes and mortars containing ground perlite as a pozzolan, *Cement and Concrete Composites* 38: 29-39.
- Erdoğan Ş., Arslantürk C., Kurbetçi Ş., (2011) Influence of fly ash and silica fume on the consistency retention and compressive strength of concrete subjected to prolonged agitating, *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 3, pp. 1277-1281.

- Ewenson E.G., Gillot, J.E., (1960) Characteristics of Kingston Carbonate Rock Reaction, Highway Res. Board Bui. Washington D.C., 23.
- Fakhri M., Yousefian F., Amoosoltani E., Aliha M.R., Berto F., (2021) Combined effects of recycled crumb rubber and silica fume on mechanical properties and mode I fracture toughness of self-compacting concrete, Welding and Joining Research Center, Narmak, 16846-13114 Tehran, Iran.
- Farhat H., (1999) Durabilité des réparations en béton de fibres: effets du retrait et de la fatigue.
- Fernandes I., Noronha F., Teles M., (2004) Microscopic analysis of alkali-aggregate reaction products in a 50-year old concrete, Mater. Charact. 53, 295-306.
- Foumier B., Berube M., (2000) Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implication, Can. J. Civ. Eng. 27, 167-191.
- François S., Laurens A., Deby F., (2018) Corrosion and its consequences for reinforced concrete structures, Elsevier.
- French W.J., Poole A.B., (1974) Deleterious reactions between dolomites from Bahrain and cement pastes. Cement Cone. Res.
- Garbacz A., Courard L., Kostana K., (2006) Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems, Materials characterization 56 (4):281-289.
- Gillott J.E., (1975) Practical implications of the mechanisms of alkali-aggregate reactions, Proceedings, Third International conference on Alkali-Aggregate Reaction, Reykjavik.
- Gjørsv O.E., (2011) Durability of Concrete Structures; Arab J Sci Eng , 36:151–172.
- Gjørsv O.E., (2009) Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments, Taylor & Francis, London.
- Gonen T., Yazicioglu S., (2007) Influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete, Building and Environment, 42: 3080–5.
- Grae M.K., (2012) The repair of laterally damaged concrete bridge girders using carbon fiber reinforcing polymers (CFRP), Master's Thesis, University of North Florida, College of Computing, Engineering, & Construction, Jacksonville, FL, USA.
- Guillon E., Moranville M., (2004) Physical and chemical modeling of Portland cement pastes under seawater attack, Advances in Concrete through Science and Engineering.

- Guo S.Y., Zhang X., Chen J.Z., Mou B., Shang H.S., Wang P., Zhang L., Ren J., (2020) Mechanical and interface bonding properties of epoxy resin reinforced Portland cement repairing mortar, *Constr. Build. Mater.*, vol. 264, p. 120715, 2020.
- Habel K., Charron J.P., Denarié E., Brühwiler E., (2006) Autogenous deformations and viscoelasticity of UHPFRC in structures. Part I: experimental results, *Magazine of Concrete Research* 58(3): 135-145.
- Habibi A., Ramezani-pour A.M., Mahdikhani M., Bamshad O., (2021) RSM-based evaluation of mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete containing GGBFS and silica fume, *Construct Build Mater*;270:121431.
- Haque M.A., Chen B., Li S., (2022) Water-resisting performances and mechanisms of magnesium phosphate cement mortars comprising with fly-ash and silica fume, *Prod.*, vol. 369, p. 133347, 2022.
- Harries K.A., Kasan J., Brinkman R., (2012) Guide To Recommended Practice For The Repair of Impact-Damaged Prestressed Concrete Bridge Girders, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of The National Academies, University of Pittsburgh, Pittsburgh PA and University of Cincinnati: Cincinnati, OH, USA.
- Hassan A.A.A., Lachemi M., Hossain K.M. A., (2012) Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete, *Cement and Concrete Composites*, Pages 801-807.
- Hola J., Bien J., Sadowski L., Schabowicz K., (2017) Non-destructive and semi-destructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical sciences*, Vol. 63, No. 1.
- Huston D.R., (2016) Cost effective and Rapid Concrete Repair Techniques, Final report: Vermont Agency of Transportation, Materials and Research Section, school of Engineering, The University of Vermont: Burlington, VT, USA.
- Isgor O.B., (2001) A durability model for chloride and carbonation induced steel corrosion in reinforced concrete members, Ph.D. Thesis, Carleton University.
- Jiang C., Zhou X., Huang S., Chen D., (2016) Influence of polyacrylic ester and silica fume on the mechanical properties of mortar for repair application, *Adv. Mech. Eng.*, vol. 9, no.1, pp. 1-10.

- Jiao C., Ta J., Niu Y., Meng S., Chen X.F., He S., (2022) Analysis of the flexural properties of ultra-high-performance concrete consisting of hybrid straight steel fibers, *Case Stud. Constr. Mater.*
- Jones M., (2015) Repair of impact damaged prestressed bridge girders with Strand Splices and fabric reinforced cementitious Matrix Systems. Master's Thesis, Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA.
- Kanellopoulos A., (2010) Concrete deterioration, physical and chemical mechanisms, school of civil and environmental engineering university of Cyprus.
- Kang S.T., Choi J.I., Koh K.T., Lee K.S., Lee B.Y., (2016) Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete, *Compos. Struct.*, vol. 145, pp. 37-42.
- Karimipour A., Brito J., (2021) Influence of polypropylene fibres and silica fume on the mechanical and fracture properties of ultra-high-performance geopolymer concrete, *Construction and Building Materials* 283; 122753.
- Karthikeyan B., Hinakaran G., (2018) Influence of ultrafine TiO<sub>2</sub> and silica fume on performance of unreinforced and fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials* 161, 570-576.
- Khan M.I., Lynsdale C.J., (2002) Strength, permeability, carbonation of high-performance of concrete, *Cement and Concrete Research* Volume 32, Issue 1, Pages 123-131.
- Lee H., Jung W.T., Chung W., (2019) Post-tension near-surface mounted strengthening system for reinforced concrete beams with changes in concrete condition, *Compos. Part B Eng.* 161, 514–529.
- Lee S.T., Moon H.Y., Swamy R.N., (2005) Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss, *Cement and Concrete Composites.*
- Li G., Xie H., Xiong G., (2001) Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders, *Cement and concrete composites* 23(4): 381-387.
- Loukili A., (2011) *Self Compacting Concrete*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc: United States.

- Lu C., Yang H., Mei G., (2015) Relationship between slump flow and rheological properties of self compacting concrete with silica fume and its permeability, *Construction and Building Materials* 75, 157–162.
- Ma X., He T., Xu Y., Yang R., Sun Y., (2022) Hydration reaction and compressive strength of small amount of silica fume on cement-fly ash matrix, *Construction Materials*, vol. 16, p. e00989.
- Mahdavi G., Nasrollahzadeh K., Hariri-Ardebili M., (2019) Optimal FRP jacket placement in RC frame structures towards a resilient seismic design, *Sustainability*, 11, 6985.
- Mallat A., Alliche A., (2011) Mechanical investigation of two fiberreinforced repair mortars and the repaired system, *Constr.Build.Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 1587-1595.
- Mazloom M., Ramezaniapour A.A., Brooks J.J., (2004) Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, *Cement Concr.Compos.*, vol. 26, no. 4, pp. 347-357.
- Medeiros M.H.F., Helene P., Selmo S., (2009) Influence of EVA and acrylate polymers on some mechanical properties of cementitious repair mortars, *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 7, pp.
- Mehta P.K., (1986) *Concrete Structure, properties and materials*, USA: Prentice-hall: 36–41.
- Mehta P.K., (1993) Sulfate attack on concrete a critical review, in *Materials Science of Concrete III*, American Ceramic Society 105-130.
- Michels J., Staśkiewicz M., Czaderski C., Kotynia R., Harmanci Y.E., Motavalli M., (2016) Prestressed CFRP strips for concrete bridge girder retrofitting: Application and static loading test, *J. Bridge Eng.*, 21, 04016003.
- Mo X., Fournier B., (2007) Investigation of structural properties associated with alkali-silica reaction by means of macro- and micro-structural analysis, *Mater. Charact.* 58, 179-189.
- Mohamed N., Boulfiza M., Evitts R., (2012) Corrosion of Carbon Steel and Corrosion-Resistant Rebars in Concrete Structures Under Chloride Ion Attack, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(3), 787–795.
- Mohan A., Mini K., (2018) Strength and durability studies of SCC incorporating silica fume and ultra fine GGBS, *Construct Build Mater*;171:919e28 .

- Momayez A., Ehsani M., Ramezaniapour A., Rajaie H., (2005) Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials, *Cement and concrete research* 35(4): 748-757.
- Momayez A., Ehsani M.R., Ramezaniapour A.A., Rajaie H., (2005) Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials, *Cement Concr. Res.*, vol.
- Neville A., (2004) The confused world of sulfate attack on concrete, *Cem. Concr. Res.* 34 1275-1296.
- Okamura H., Ouchi M., (2003) Self-Compacting Concrete, *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 5-15.
- Okamura H., Ozawa K., (1995) Mix design for self-compacting concrete, *Concrete Library of JSCE*, no. 25, pp. 107-120.
- Ouyang X., Shi C., Wu Z., Li K., Shan B., Shi J., (2020) Experimental investigation and prediction of elastic modulus of ultrahigh performance concrete (UHPC) based on its composition, *Cement Concr. Res.*; 138:106241.
- Park D., Park S., Seo Y., Noguchi T., (2012) Water absorption and constraint stress analysis of polymer-modified cement mortar used as a patch repair material, *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 819-830.
- Park J.S., (2007) Necessity of rehabilitation and current state of domestic sewage pipe network, *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 55, pp. 135-143.
- Phung Q.T., (2015) Effects of carbonation and calcium leaching on microstructure and transport properties of cement pastes., P.h.D. thesis, Ghent University, Belgium.
- Pino V., Nanni A., (2015) Research on Concrete Applications for Sustainable Transportation, *Research on Concrete Applications for Sustainable Transportation*, University of Miami: Miami-Dade County, FL, USA, 2015.
- Qapo M., Dirar S., Jemaa Y., (2016) Finite element parametric study of reinforced concrete beams shear-strengthened with embedded FRP bars. *Compos. Struct.* 149, 93–105.
- Qeshta I. M. , Shafigh P., Jumaat M. Z., (2016) Research progress on the flexural behaviour of externally bonded RC beams, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 16, 982–1003.

- Qiao F., Chau C., Li Z., (2009) Setting and strength development of magnesium phosphate cement paste, *Advances in cement research* 21(4): 175-180.
- Qin S., Dirar S., Yang J., Chan A.H., Elshafie M., (2014) CFRP shear strengthening of reinforced-concrete T-beams with corroded shear links, *J. Compos. Constr.*, 19, 04014081.
- Radlinska A., Yost J., Carthy L., Matzke J., Nagel F., (2012) *Coatings and Treatments for Beam Ends*; Pennsylvania Department of Transportation: Villanova, PA, USA.
- Rao G.A., (2001) Development of strength with age of mortars containing silica fume, *Cement Concr. Res.*, vol. 31, no. 8, pp.1141-1146, 2001.
- Rteil A., Soudki K., (2011) CFRP repair of corroded Girder, Four Years of Service. *Spec. Publ.*, 277, 176–191.
- Rybak J., Sadowski L., Schabowicz K., (2009) Non-destructive impulse Response S'Mash method for concrete pile testing, *E-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*, Vol. 14, No. 3.
- Saba A.M., Khan A.H., Mohammad N.A., Nadeem A.K., Koloor S.S.R., Michal P., Neyara R., (2021) Strength and flexural behavior of steel fiber and silica fume incorporated self-compacting concrete, *Journal of Building Engineering* Volume 34, 101667.
- Sabet F.A., Libre N.A., Shekarchi M., (2013) Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash, *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 175-184.
- Sabet F.A., Libre N.A., Shekarchi M., (2013) Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash, *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 175-184.
- Safhi A.M., Benzerzour M., Rivard P., Abriak N.E., Ennahal I., (2019) Development of self-compacting mortars based on treated marine sediments, *J. Build. Eng.*, vol. 22, pp. 252-261.
- Sahoo S., Parhi P.K., Panda B.C., (2021) Durability properties of concrete with silica fume and rice husk ash, *Cleaner Engineering and Technology* Volume 2, 100067.
- Salehi H., Mazloom M., (2019) Opposite effects of ground granulated blast-furnace slag and silica fume on the fracture behavior of self-compacting lightweight concrete, *Constr. Build. Mater.*, vol. 222, pp. 622-632.

- Sharbatdar M.K., Abbasi M., Fakharian P., (2020) Improving the Properties of Self-Compacted Concrete with Using Combined Silica Fume and Metakaolin, *Period. Polytech. Civ. Eng.*, 64, 535–544.
- Shaw P., Xu A., (1998) Assessment of the deterioration of concrete in nuclear power plants – causes, effects and investigative methods, *NDT net*, 3(2).
- Shen D., Kang J., Jiao Y., Li M., Li C., (2020) Effects of different silica fume dosages on early-age behavior and cracking resistance of high strength concrete under restrained condition. *Construct Build. Mater.*, 263:120218 .
- Shi C., Wang D., Wu L., Wu Z., (2015) The hydration and microstructure of ultra high-strength concrete with cement silica fume slag binder, *Cement Concr. Compos.*,61:44e52
- Silfwerbrand J., Paulsson J., (1998) Better bonding of bridge deck overlays, *Concrete International* 20(10): 56-61.
- Sobieck T., Atadero R., Mahmoud A., (2015) Predicting Fatigue Service Life Extension of RC Bridges with Externally Bonded CFRP Repairs, Mountain Plains Consortium, Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University: Fort Collins, CO, USA.
- Sprinkel M.M., (1993) Twenty-year performance of latex-modified concrete overlays. *Polymer-Modified Hydraulic-Cement Mixtures.*, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 1993.
- Sulapha P., Wong S.F., Wee T.H., Swaddiwudhipong S., (2003) Carbonation of Concrete Containing Mineral Admixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Teimortashlu E., Dehestani M., Jalal M., (2018) Application of Taguchi method for compressive strength optimization of tertiary blended self-compacting mortar, *Constr. Build. Mater.*,vol. 190, pp. 1182-1191.
- Tetta Z.C., Koutas L.N, Bournas D.A., (2016) Shear strengthening of full-scale RC T-beams using textile-reinforced mortar and textile-based anchors. *Compos. Part B Eng*, 95, 225–239.
- Thakare A.A., Singh A., Gupta V., Siddique S., Chaudhary S., (2021) Sustainable development of self-compacting cementitious mixes using waste originated fibers, A review, *Resour. Conserv. Recycling*, vol. 168, p. 105250. 41.

- Thierry M., (2006) Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques, Etudes et Recherches des Laboratoires des ponts et chaussées-série ouvrages d'art.
- Tran Q.T., (2006) Interface ancien-nouveau béton : caractérisation du comportement adoucissant de l'interface au cours de décollement et son évolution dans le cas de sollicitation de fatigue, Toulouse 3.
- Turk K., Turgut P., Karatas M., Benli A., (2010) Mechanical Properties of Self compacting Concrete with Silica Fume/Fly Ash. In Proceedings of the 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, Ghent, Belgium, pp. 27–30.
- Wei F., Li L., Zhu Y., (2023) Experimental Study on Mechanical Performance and Microstructure of Polypropylene Fiber Recycled Concrete. *KSCE J Civ Eng* 27, 3060–3073
- Williams G., Higgins C., (2008) Fatigue of diagonally cracked RC girders repaired with CFRP. *J. Bridge Eng*, 13, 24–33.
- Xu S., Ma Q., Wang J., (2018) Combined effect of isobutyltriethoxysilane and silica fume on the performance of natural hydraulic lime-based mortars, *Constr. Build. Mater.*, vol. 162, pp. 181-191.
- Yan P., Chen B., Afgan S., Haque M. A., Wu M., Han J., (2021) Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre, *Constr. Build. Mater.*, vol. 279, p. 122489.
- Yang D., Merrill B., Bradberry T., (2011) Texas use of CFRP to repair concrete bridges. *Spec. Publ.*, 277, 39–57.
- Yaseri S., Mahdikhani M., Jafarinoor A., Verki V.M., Esfandyari M., Ghiasian S.M., (2018) The development of new empirical apparatuses for evaluation fresh properties of self consolidating mortar, Theoretical and experimental study, *Constr. Build. Mater.*, vol. 167, pp. 631-648,.
- Yildirim H., Sengul O., (2011) Modulus of elasticity of substandard and normal concretes, *Construction and Building Materials* 25; 1645–1652.
- Zarnaghi V.N., Fouroghi-Asl A., Nourani V., (2018) On the pore structures of lightweight self-compacting concrete containing silica fume, *Constr. Build. Mater.*, vol. 193, pp. 557-564.

Zhang S., Zong L., (2014) Evaluation of relationship between water absorption and durability of concrete materials. *Adv Mater Sci Eng.*

Zhao G., Shi M., Guo M., Fan H., (2020) Degradation mechanism of concrete subjected to external sulfate attack: Comparison of different curing conditions, *Materials*, 13(14), 3179.

Zheng S., Liu T., Qu B., Fang C., Li L., Feng Y., (2022) Experimental investigation on the effect of nano silica fume on physical properties and microstructural characteristics of lightweight cement slurry. *Construct Build Mater.*

# ***Annexes***



**ماتين**  
**MATINE**

ALGÉRIE



### *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.

# Annexe A

## APPLICATIONS RECOMMANDÉES

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



## FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 	Eau (litres) 
<b>Dosage pour béton c25/30</b>	<b>X 1</b> 	<b>X 7</b> 	<b>X 5</b> 	<b>25 L</b>

Remarque: un bidon = 10 Litres

## CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

### • Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10,0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2,5±0,5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 5%
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	< 0,1

### • Temps de prise à 20° (NA 230)

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

### • Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	8±2

### • Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5

### • Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	26,5±2,0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm²/g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3,0

## CONSIGNES DE SÉCURITÉ

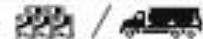
1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

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

MEMBRE DE  
**HOLCIM**



Conditionnement:



### LAFARGE ALGÈRE

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  
dt.satisfaction=clients@lafargeholcim.com  
Tél: 021 98 55 55

**LAFARGE**  
لافارج

## NOTICE PRODUIT

# Condensil S-95 DP

FUMÉE DE SILICE DENSIFIÉE POUR BÉTONS HAUTES PERFORMANCES ET HAUTE DURABILITÉ

### INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Condensil S-95 DP est une fumée de silice ultra fine densifiée pneumatiquement issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou de ses alliages.

### DOMAINES D'APPLICATION

La fumée de silice Condensil S-95 DP permet de fabriquer des :

- BHP, BTHP, BUHP et BFUP
- Bétons résistants aux milieux agressifs : domaines agricoles (ensilage, stockage d'engrais, aires de stabulation), milieu industriel (chimiques et agro-alimentaires, sucreries, conserveries, laiteries, bacs de retentions, stations services, stations d'épuration, égouts), milieu marin (digue, aménagement portuaire, ...), zone de montagne (présence d'eau pure ou de sels de déverglaçage),
- Bétons pompables
- Bétons projetés

### CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Ultrafine et dotée d'un fort pouvoir pouzzolanique, la fumée de silice Condensil S-95 DP confère aux bétons les propriétés suivantes : améliore les performances mécaniques à longs termes :

- résistances en compression, flexion et traction, module d'élasticité, le fluage, la résistance à l'abrasion et à l'érosion, ...
- améliore la durabilité en milieux agressifs en diminuant la porosité et la perméabilité aux gaz et aux liquides: carbonatation, sulfate, chlorure, acides, eaux pures, ...
- diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes de réaction sulfatique interne et d'alcali-réaction,
- réduit les risques de ségrégation et de ressuage, facilite le pompage des bétons y compris ceux qui sont peu dosés en ciment.

### AGRÉMENTS / NORMES

Marquage CE selon la norme NF EN 13263-1 & 2.

Caractéristiques	Exigences normatives	Valeurs observées
Densité apparente	~ 0,65 (0,55 à 0,75)	0,64 ± 0,03
Densité réelle	2,24	F
Surface spécifique BET (m <sup>2</sup> /g)	Entre 15 et 35	22,5 ± 2
Teneur en SiO <sub>2</sub>	≥ 85 %	95 % ± 2
Teneur en Si élémentaire	≤ 0,4 %	0,14 % ± 0,05
Teneur en Na <sub>2</sub> O eq.	≤ 1,0 %	0,50 % ± 0,1
Teneur en SO <sub>3</sub>	≤ 2,0 %	0,27 % ± 0,50
Teneur en Cl-	≤ 0,1 %	0,01 % ± 0,01
Indice d'activité à 28j	≥ 100 %	≥ 101 %
Perte au feu	≤ 4,0 %	2 % ± 0,5
Teneur CaO	≤ 1,0 %	< 0,1 %

## DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	Vrac Big-Bag de 1000 kg et 1250 kg
Durée de Conservation	En respectant les conditions de stockage, le produit se conserve 3 ans.
Conditions de Stockage	En silo (spécialement équipé, nous contacter) ou dans son emballage intact dans un local à l'abri de l'humidité.
Aspect / Couleur	Poudre grise

## RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

### VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

### ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

### INSTRUCTIONS POUR L'APPLICATION

La fumée de silice Condensil S-95 DP doit être introduite avec le ciment.  
Afin de tirer toutes les performances de la fumée de silice Condensil S-95 DP, il est indispensable de déflocculer complètement les micro-particules de silice.  
Pour cela, la fumée de silice Condensil S-95 DP doit être systématiquement associée avec un superplastifiant /haut réducteur d'eau de type Sika® ViscoCrete®

### RESTRICTIONS LOCALES

Veuillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

### INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

Sika El Djazair SPA  
08 route de Larbaa  
56111 Les Eucalyptus  
ALGERIE  
Tél: 0 20 88 89 92 09  
Fax: 0 20 88 89 92 08  
dja.sika.com



Notice produit  
Condensil S-95 DP  
Juillet 2024, Version 01.02  
025404021000000012

CondensilS-95DP-B-02-007-2024-1-2.pdf



## MEDAFLOW 30

Conforme à la norme NA 774 , NA 5102 et NA 5075

### Super plastifiant-haut réducteur d'eau

#### Description

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de Polycarboxylates d'Ether qui améliore considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet sans modifier la consistance, de réduire fortement la teneur en eau du béton.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet de retard de prise.

#### Domaines D'application

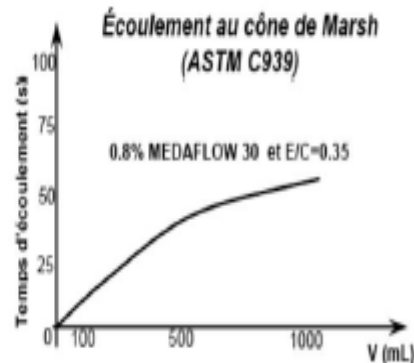
- Les bétons de préfabrication.
- Les bétons prêts à l'emploi.
- Les bétons lourds et légers.
- Les bétons d'ouvrages d'art.
- Les bétons de dallages industriels.
- Les bétons de bâtiment.
- Les bétons précontraints.
- Les bétons pompés.
- Les bétons pour fondations profondes.
- Les bétons pour ouvrages fortement ferrailés.
- Les bétons soumis à des milieux agressifs.
- Les BHP, BTHP, BUHP et BFUP
- Les bétons autonivelants - bétons autoplaçants.
- Les bétons architectoniques.

#### Propriétés

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton



#### Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

#### Caractéristique

- Aspect .....Liquide
- Couleur ..... Brun clair
- pH ..... 8 – 8,5
- Densité ..... 1, 07 ± 0,01
- Teneur en chlore ..... < 0,1 g/l
- Extrait sec ..... 30%

# Effect of Silica Fume on the Performances of Self-compacting Repair Mortar



Meriem Euldji<sup>1</sup>, Mohamed Ghrici<sup>1,\*</sup>, Said Choucha<sup>1</sup> and Jamal Khatib<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Civil Engineering Department, Hassiba Benbouali University of Chlef, P.O. Box c 78: Chlef, 02180, Algeria

<sup>2</sup>Faculty of Engineering, Beirut Arab University, Beirut, Lebanon

## Abstract:

**Background:** Concrete is a widely utilized material in construction worldwide. However, concrete performance could be damaged under aggressive environments, therefore, many concrete structures may require repair and frequent maintenance.

**Objective:** The aim of this study is to develop reinforced Self-Consolidating Repair Mortars (SCRMs) incorporating silica fume and polypropylene fibers.

**Methods:** This research aimed to study the effect of silica fume as an alternative supplementary cementitious material (SCM) on the performance of fiber reinforced self-consolidating repair mortars (SCRMs). For this purpose, five SCRMs mixes incorporating 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% of silica fume as partial cement replacement were prepared. Testing included slump flow, flow time, and unit weight, air-dry unit weight, compressive and flexural strengths, dynamic modulus of elasticity and water absorption.

**Results:** The results indicated that the substitution of cement by 15% of silica fume improves the flexural strength and slightly reduce the compressive strength of the fiber-reinforced repair mortar. The lowest values of total shrinkage, water capillary absorption, and sorptivity were observed for repair mortars containing 10% silica fume. In addition, bonding results between repair mortars containing silica fume and old concrete substrate investigated by the bond flexural strength test showed good interlocking, justifying the effectiveness of these produced mortars.

**Conclusion:** The results reveal that structural repair mortars containing 10 and 15% silica fume conform with the performance requirements of class R4 materials (European Standard EN 1504-3) and could be used in repair applications.

**Keywords:** Self-consolidating repair mortar (SCRM), Silica fume, Polypropylene fibers, Flowability, Mechanical properties, Bond flexural strength.

© 2024 The Author(s). Published by Bentham Open.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International Public License (CC-BY 4.0), a copy of which is available at: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>. This license permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

\*Address correspondence to this author at the Civil Engineering Department, Hassiba Benbouali University of Chlef, P.O. Box c 78: Chlef, 02180, Algeria; E-mail: [m\\_ghrici@yahoo.fr](mailto:m_ghrici@yahoo.fr)

Cite as: Euldji M, Ghrici M, Choucha S, Khatib J. Effect of Silica Fume on the Performances of Self-compacting Repair Mortar. Open Civ Eng J, 2024; 18: e18741495316659. <http://dx.doi.org/10.2174/0118741495316659240930054319>



Received: August 13, 2024

Revised: August 31, 2024

Accepted: September 10, 2024

Published: December 27, 2024



Send Orders for Reprints to [reprints@benthamscience.net](mailto:reprints@benthamscience.net)

## 1. INTRODUCTION

Concrete is a widely utilized material in construction worldwide. Unfortunately, the performance of concrete structures may show some degradation during their service life due to the materials used in the concrete mix

and the various exposure conditions [1]. Porosity is one of the properties affecting the durability of cementitious material. The higher water absorption of porous aggregates leads to a higher penetration of aggressive agents, which significantly worsens the durability of

reinforced concrete structures [2, 3].

Other factors influencing the durability of concrete structures include mechanical loading, exposure to fire, extreme conditions, environmental pollution, and poor maintenance [4-6].

Finding appropriate materials with good performance and creating restoration technologies can lead to better durability but can be more challenging [7-9]. In a broader context, it is essential to possess technical expertise for evaluating the lifespan of a structure, as this facilitates the implementation of appropriate measures to ensure its optimal performance throughout its operational life. The speed of placement with adequate strength and improved durability characteristics suggest that self-compaction mortar (SCM) could be utilized as an alternative to conventional repair materials [10, 11].

Self-compacting mortar represents a significant advancement in high-performance mortars developed over the past forty years. One of its primary characteristics is its ability to spread and settle under its own gravity, thereby removing the need for vibratory compaction during application [12, 13]. This property not only simplifies the application process but also guarantees a uniform and high-quality finish, even in intricate formwork and areas with dense reinforcement. Additionally, this technique has the benefit of overcoming the shortage in the number of skilled workers for handling and applying mortar [14]. It has been suggested that appropriate volumes of water, cement, super-plasticizer, and just a small amount of coarse materials such as sand and gravel should be used to achieve self-compatibility [15, 16]. In order to attain self-compacting mortar, additional cementitious materials such as silica fume, chemical admixtures like superplasticizers, and reinforcing fibers need to be incorporated [17]. The density and homogeneity of the mortar, as well as the workability of the fresh mixture, can be enhanced by incorporating supplementary cementitious materials (SCMs) [18]. Although SCMs like silica fume enhance mortar properties, research is limited on the optimal use of these materials in varying proportions and their interaction with fibers.

Silica Fume (SF) is a secondary product generated from the manufacturing processes of silicon and ferrosilicon, known for its ultrafine spherical particles measuring between 0.1 to 0.2  $\mu\text{m}$  in diameter. These particles are substantially smaller than typical cement particles. Owing to its high degree of fineness and substantial silica content, coupled with a large proportion of amorphous  $\text{SiO}_2$  (85-90%), silica fume is recognized as an exceptionally reactive pozzolanic substance. This reactivity is further exhibited through pozzolanic reactions that transform calcium oxide  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  lime into additional calcium silicate hydrate, thus leading to a finer pore structure and less permeability [19]. In addition, the use of

silica fume in cementitious systems leads to a significant improvement in several properties of mortars [20-27]. Furthermore, there is a lack of comprehensive studies on how different silica fume contents affect the long-term durability and structural performance of fiber-reinforced Self-Consolidating Repair Mortars (SCRM). Additionally, the effectiveness of incorporating locally available materials in hot climate conditions has not been extensively explored.

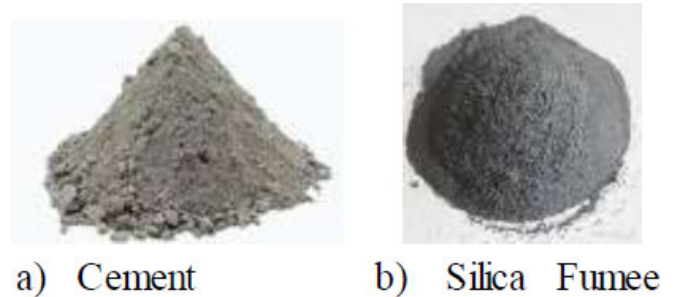
Concrete reinforced with fibers such as polypropylene fiber (PPF) [28, 29], is widely acknowledged for its superior deformation characteristics, such as better abrasion resistance and ductility, minimal shrinkage, and enhanced flexural strength.

This paper examines various properties of mortar incorporating silica fume and polypropylene fibers. The properties of mortar include slump flow, V-funnel test, compressive and flexural strength, elastic modulus, water absorption, shrinkage, and bond strength. This study aims to develop a self-compacting concrete (SCC) mix specifically tailored for hot climate conditions using locally available materials.

Additionally, it seeks to classify the resulting self-consolidating repair mortars according to the EN 1504-3 standard [30] to ensure its suitability as a repair material. The research is intended to enhance the optimization of SCC for practical use in regions with challenging environmental conditions, thereby contributing to the advancement of durable and effective repair solutions in extreme climates

## 2. MATERIALS AND METHODS

Matrix constituents comprised several components, namely Ordinary Portland cement (OPC), silica fume (Fig. 1), fine aggregates, water, super-plasticizer, and polypropylene fiber. OPC, which adheres to the EN 197-1 standard [31], was utilized for mixture preparation. The material exhibited a Blaine fineness measure of 3850  $\text{cm}^2/\text{g}$  and showed an average compressive strength of 42.5 MPa at 28 days. The Silica Fume (SF) used in this research adhered to the standards specified in EN 13263-1 [32] and EN 13263-2 [33] and had an average particle size between 0.1 to 0.3  $\mu\text{m}$ . Table 1 shows the chemical compositions of both (OPC) and (SF).




**Fig. (1).** Raw materials used.

**Table 1. Chemical and physical properties of OPC and silica fume.**

Chemical Composition %	OPC	Silica Fume
CaO	61.74	< 0,1
SiO <sub>2</sub>	20.92	≥ 85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.43	≤ 1%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.60	≤ 1%
MgO	1.7±0.5	≤ 1%
SO <sub>3</sub>	2.5±0	≤ 2,0
Cl-	0.02-0.05	≤ 0,1
Na <sub>2</sub> O	0.1	≤ 1,0
Loss on ignition	8±2	≤ 4,0

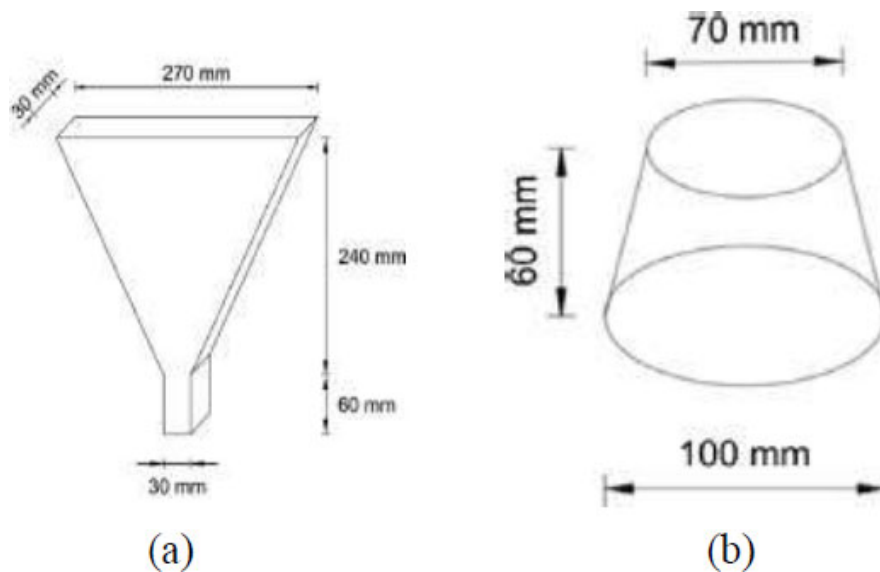
**Table 2. Characteristics of PP fibers.**

Photo	Length (mm)	Diameter (µm)	ElasticModulus (GPa)	Elongation (%)	Tensile strength (GPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
	12	30	3	50	0.5	0.9

For creating Self-Consolidating Repair Mortars (SCRMs) mixtures in this study, natural river sand was utilized, characterized by a fineness modulus of 2.82 and a bulk specific gravity of 2.70. The mixing water came from local tap water sources, and to enhance the mixtures' dispersion, a high-range water-reducing superplasticizer (MEDAFLOW 30) with a density of 1.07 kg/m<sup>3</sup> was incorporated. Additionally, polypropylene fiber (PPF) measuring 12 mm in length was employed. The principal

attributes of the PPF are comprehensively listed in Table 2.

In this study, a total of five different mortar mixtures were formulated. Specific mix proportions for both the repair mortars and the substrate mortar (SUBM) are shown in Table 3. Additionally, to modify the properties of these mixtures, different percentages of silica fume (SF) were incorporated based on the weight of the cement, ranging from 0% to 20%.



**Fig. (2).** Deformability test for fresh mortar: (a) V-funnel flow test (b) The mini-slump flow test.

**Table 3. Mix proportions for mortar with varying replacement levels per 1 m<sup>3</sup>.**

Name of the Repair Mortars	Cement (OPC) (kg)	Silica Fume (kg)	Water (kg)	Sand (kg)	Water-to-powder Ratio (W/P)	Super Plasticizer (%)	PPF Fiber (%)
SCRM0	767	000	317	1166	0,45	0,7	0,2
SCRM5	728	038	319	1166	0,45	0,9	0,2
SCRM10	690	077	314	1166	0,45	1,2	0,2
SCRM15	652	115	313	1166	0,45	1,5	0,2
SCRM20	613	153	309	1166	0,45	2,4	0,2
SUBM	525	000	340	2250	0,64	1,2	0,0

The methodology for preparing these mortar mixtures involved the following steps: First, (SF) and sand were blended together for a period of 30 seconds. Then, 70% of the predetermined water quantity was incorporated and mixed for one minute. After that, the remaining water, which contained the superplasticizer, was added, and the mixture was stirred for an additional minute. In the third step, in accordance with the technical guidelines provided by the manufacturer, the Polypropylene Fibers (PPF) were manually dispersed into the mixture and mixed for a duration of 5 minutes. Finally, after a curing period of 24 hours from the casting process, all molds were removed and then transferred to a curing room. It is worth noting that all specimens, except for the shrinkage specimens, were continuously immersed in water throughout the testing period.

### 3. EXPERIMENTAL

#### 3.1. Deformability Test for Fresh Mortar

In this experimental investigation, we evaluated the workability of Self-Consolidating Repair Mortar (SCRM) using two specific tests: the v-funnel flow test (depicted in Fig. 2a) and the mini slump flow test (Fig. 2b). The tests were performed following the guidelines set by EFNARC [34].

The mini-slump flow test apparatus featured specific dimensions, including a bottom diameter of 100 mm, a top diameter of 70 mm, and a height of 60 mm. For the test, fresh mortar was filled into this cone, which was positioned at the center of a marked glass plate. When the cone was lifted vertically, the spread diameter of the mortar was measured and calculated as the average of two perpendicular dimensions.

In the V-funnel flow test, the procedure began by pouring the mortar completely into the funnel. Once filled, the bottom outlet was opened to let the mortar flow out. The time taken from the start of the flow to when the mortar began to exit from the bottom outlet was recorded and denoted as “t,” representing the V-funnel flow time. It is worth noting that in accordance with EFNARC acceptance criteria, the workability values for SCMs were expected to fall within the range of 240-260 mm for slump-flow diameter and 7-11 seconds for V-funnel flow time.

#### 3.2. Compressive and Flexural Strengths

Moreover, to evaluate the flexural and compressive strengths, prism specimens of dimensions 40×40×160

mm<sup>3</sup> were prepared for each mortar mixture, adhering to the procedures specified in EN 12190-5 [35]. These assessments were performed at four different time intervals: 2, 7, 28, and 90 days. For accuracy, the flexural strength results were derived by averaging values obtained from three flexural samples, and the compressive strength results were calculated from six compression samples (Fig. 3).



**Fig. (3).** Flexural and compressive strength test.

#### 3.3. Elastic Modulus

In addition to strength evaluations, the elastic modulus was also determined in accordance with the EN-12504-4 [36]. This involved the preparation of cylindrical specimens, each having dimensions of 40 mm in diameter and 80 mm in length, were created. Following a period of 24 hours from the initial casting, all the molds have been unmolded. The specimens were then immersed in water until they reached their designated testing ages, which were 2, 7, 28, and 90 days. After this period, to precisely measure their density, the specimens were subjected to a 24-hour oven-drying process at a temperature of 105°C. The propagation velocity of ultrasonic waves through these specimens, which is influenced by their density, was determined using an ultrasonic testing method.

The disposition of the transducers within the specimen using the direct transmission method is illustrated in Fig. (4). Additionally, to ensure precise ultrasonic results, a flat surface was achieved by employing a smooth diamond saw to create a bonded plane.



**Fig. (4).** The process of measuring the propagation velocity of ultrasonic waves through the specimen.

The dynamic elastic modulus (ED) can be calculated using Eq. (1) as follows:

$$ED = \rho V^2 \tag{1}$$

Here:

- $E_d$  represents the elastic modulus in GPa.
- $\rho$  denotes the density of the dry specimens in  $kg/m^3$ .

- $V$  stands for the sound speed in km/s.

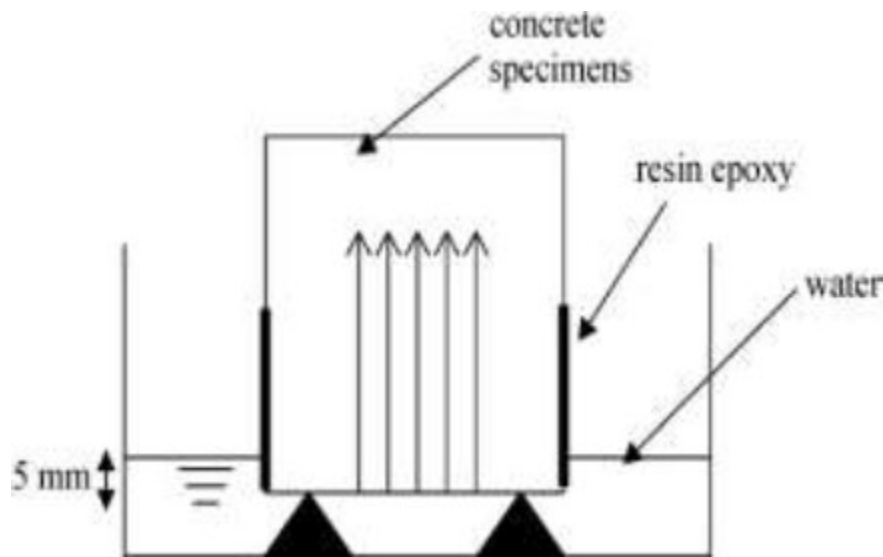
### 3.4. Absorption

The absorption test was used in this investigation in accordance with EN 1015-18 [37]. Half-prism specimens measuring  $40 \times 40 \times 80 \text{ mm}^3$  were prepared to access the capillary absorption coefficient after 28 days. Following a 28-day curing period, the specimens were subjected to a 24-hour oven-drying process at a temperature of  $105^\circ\text{C}$  to ascertain their dry mass ( $W$ ). Afterward, all surfaces of the specimens, excluding their top and bottom sides, were coated with epoxy resin. This sealing was done in a manner that allowed water penetration in only one direction, as visually demonstrated in Fig. (5).

### 3.5. Shrinkage

Furthermore, to assess drying shrinkage, we utilized three prism specimens, each containing embedded copper heads at their two longer ends in accordance with EN 12617-4 [38]. Initially, these specimens were placed in molds and wrapped with plastic paper for one day during the curing process. Following this initial curing period, the samples were carefully extracted and sealed with adhesive bands at both ends to minimize water evaporation. Subsequently, these specimens were stored in our laboratory under controlled conditions, maintaining a temperature of  $23^\circ\text{C}$  and a relative humidity (RH) of 55%.

For precise shrinkage measurements, we employed a shrinkage measurement frame equipped with a micrometer precision comparator. It is worth noting that autogenous shrinkage, caused by the cement hydration process, results in reduced relative humidity within the pores of the specimens. When curing is conducted in an open environment, the movement of water through these pores to the surface, combined with water loss from the surface due to evaporation, leads to additional shrinkage.



**Fig. (5).** Schematic diagram of water absorption test.

Positioning of the specimen within the measuring frame is visually depicted in Fig. (6). Shrinkage strain measurements were carried out for all mixtures up to a duration of 90 days.



Fig. (6). Frame to measure shrinkage deformation.

### 3.6. Flexural Bond Strength

The bond strength between the repair materials (Self-Compacting Repair Mortars, SCRMs) and the substrate mortar (SUBM) was assessed using a three-point bending test. This test was conducted in accordance with the ASTM C78 [39] guidelines. In this test, composite specimens, consisting of SCRMs and SUBM, were

prepared. Each specimen was composed of two prism halves, each measuring  $40 \times 40 \times 80 \text{ mm}^3$ . One half was constructed using SCRMs and was securely bonded to the other half using SUBM, as visually depicted in Fig. (7a).

The substrate portion of the specimen was cast within metallic molds and subjected to a 28-day curing process in water, maintained at a controlled temperature of  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . In addition, to ensure a robust adhesion of the repair material, the surface of the substrate mortar ( $40 \times 40 \text{ mm}^2$ ) was carefully prepared by brushing.

Before casting the SCRMs, the interfaces between the substrate and repair materials were immersed in water for a period exceeding 6 hours. Upon reaching 28 days of age, the repair mortars were cast onto the peak of the substrate. During the testing procedure, each composite specimen was positioned centrally between two plates of the testing apparatus, and a load was applied at a constant rate of  $0.5 \text{ kN/s}$  until the point of failure, as illustrated in Fig. (7b).

Additionally, the compatibility between the SCRMs and the SUBM was evaluated based on the failure mode exhibited by the composite samples. If the fracture occurred along the interface between the repair material and the substrate, it was classified as an incompatible failure (adhesive failure). Conversely, if the failure occurred within the repair material itself (cohesive failure), it indicated that the repair material was compatible with the substrate mortar. The bonding strength between the existing and new materials plays a pivotal role in determining the quality of the repair material.

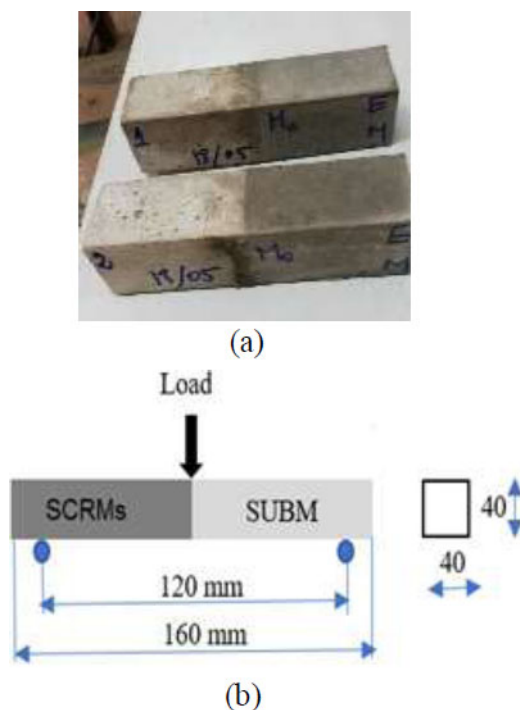


Fig. (7). (a) Preparation of composite sample, (b) Third-point's loading composite prism.

**Table 4.** Fresh property of SCRM.

Repair Mortar	Mini Slump (mm)	EFNARC Specifications	Mini V-funnel (sec)	EFNARC Specifications	Dosage of superplasticizer (%)
SCRM 0	245	Between 240 to 280 mm	5,33	Less than 11s	0,7
SCRM 5	240		5,32		0,9
SCRM 10	270		4,26		1,20
SCRM 15	255		5,23		1,50
SCRM 20	277		4,43		2,40

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

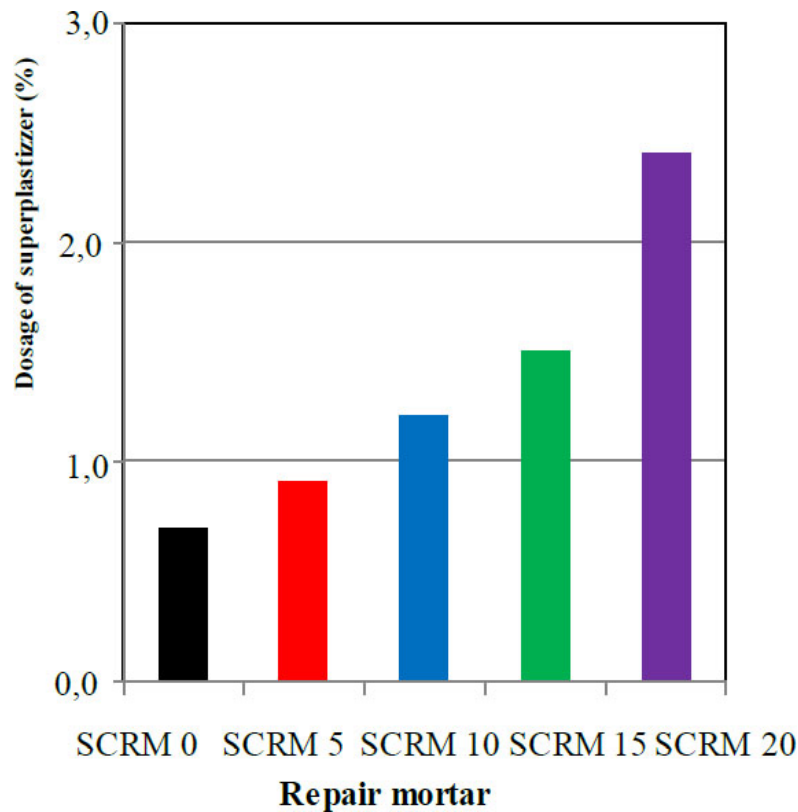
### 4.1. Deformability Test for Fresh Mortar

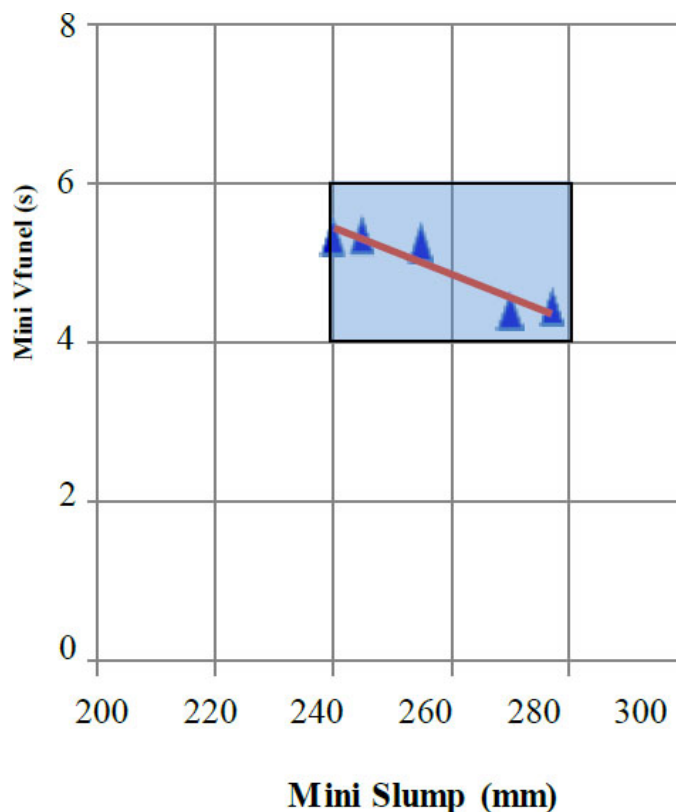
Table 4 presents the Mini-slump and mini-funnel values corresponding to the various SCRM mixtures.

The optimum dosage, commonly known as the saturation dosage of superplasticizer, is the dosage at which there is no further increase or alteration in the spread of the slump flow of the mixtures. Fig. (8) provides a visual representation of the varying superplasticizer dosage levels.

It should be noted that the addition of SF to the mortar results in lower performance compared to the control mixture SCRM0 in terms of fresh characteristics. The greater surface area and reduced particle size of Silica

Fume (SF) resulted in an increased demand for water in the mortar mix, resulting in reduced workability of the fresh mortar. Additionally, to maintain a consistent slump flow for all repair mortars (SRMs), it was necessary to increase the dosage of superplasticizer. Table 4 displays the slump flow diameters for all mixtures, falling within the range of 240 to 270 mm. According to EFNARC guidelines, a diameter between 240 and 260 mm is considered acceptable [34]. Yaseri *et al.* [40] recommended a mini-slump range of 220-280 mm, and for this study, the acceptable mini-slump flow was determined to be within the range of 240-270 mm. Consequently, a superplasticizer had to be added to enhance workability. Increasing the superplasticizer dosage resulted in an 80% convergence of the mini-slump flow toward the specified threshold.

**Fig. (8).** Variation of dosage of superplasticizer (%).



**Fig. (9).** Correlation between mini-slump flow and mini V-funnel tests for SCRMs.

As indicated in Table 4, the flow time values for all SCRMs mixtures ranged from 4.26s to 5.32s. The incorporation of SF content resulted in diminished workability of the fresh repair mortar, thereby requiring the addition of a superplasticizer to enhance its workability. The results revealed that Fiber-Reinforced Mortars (FS) decreased the fluidity of SCRM mixtures, with the most significant impact observed at a dosage of 20%. This finding aligns with the conclusions drawn by Erdogdu *et al.* [41]. Additionally, the presence of SF increased the superplasticizer requirement in mortars [42]. The expansive surface area of SF particles led to heightened adsorption of the superplasticizer. This phenomenon reduced the superplasticizer's presence in the solution surrounding cement particles, subsequently impacting the fluidity of the cementitious mixtures [43]. This aligns with the results documented in previous studies [44, 45]. Furthermore, a pronounced linear relationship was observed between the mini V-funnel spread and the mini-slump spread, as depicted in Fig. (9). Notably, when the mini-slump spread ranged from 240-280 mm, the corresponding mini V-funnel time was observed to be between 4 to 6 seconds.

In theory, the workability of fresh cementitious pastes can be characterized by the values derived from both the slump flow and mini V-funnel test results. As a result, it can be noted or concluded that the filling results can be

used to predict the workability of SCRM and that there is a connection between the filling capacity and the workability of SCRM.

#### 4.2. Compressive and Flexural Strengths

Data on the flexural and compressive strengths are presented in Table 5. Figs. (10 and 11) showcase the flexural and compressive strengths of Self-Consolidating Repair Mortar (SCRM) mixtures, incorporating varying Ferrosilicon (FS) content levels of 5%, 10%, 15%, and 20%, measured at intervals of 2, 7, 28, and 90 days.

Fig. (10) displays the flexural strength of repair mortars (SCRMs) mixtures with different FS contents of 5%, 10%, 15%, and 20% at testing intervals of 2, 7, 28, and 90 days.

Conversely, at the 90-day interval, SCRM5 demonstrated the highest compressive strength, followed by SCRM10, and then SCRM0. The compressive strengths of SCRM5 and SCRM10 were closely matched (73.9 MPa for SCRM5 and 72.4 MPa for SCRM10). This trend is primarily attributed to the pozzolanic reaction, which contributes to a denser microstructure within the mix, thus enhancing the compressive strength over a longer period.

This demonstrates that the SF dosage increased pozzolanic activity, resulting in enhanced hydration and compressive strength at late ages.

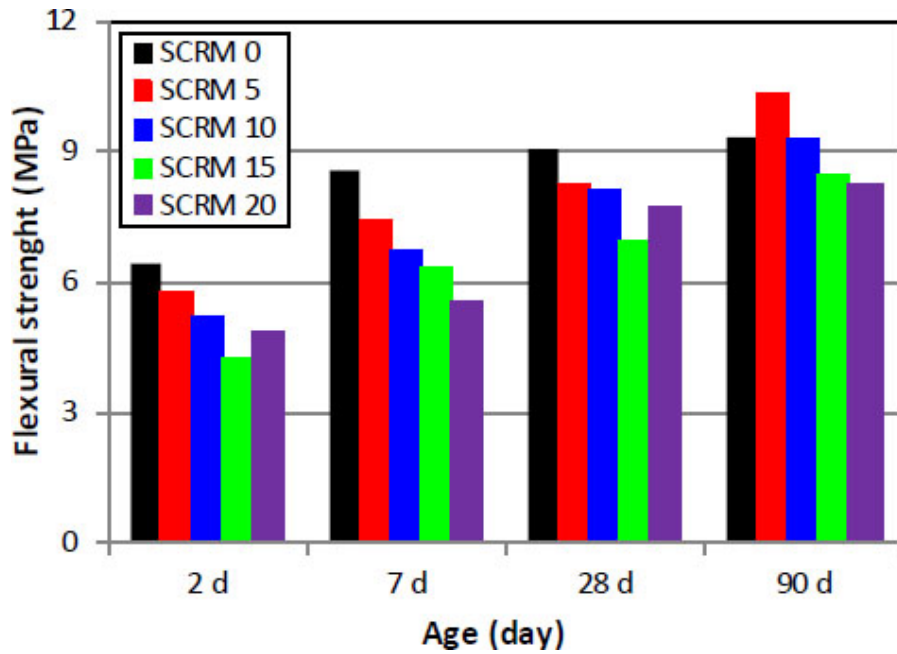


Fig. (10). Influence of SF content on flexural strengths of repair mortars (SCRMs) over various curing periods.

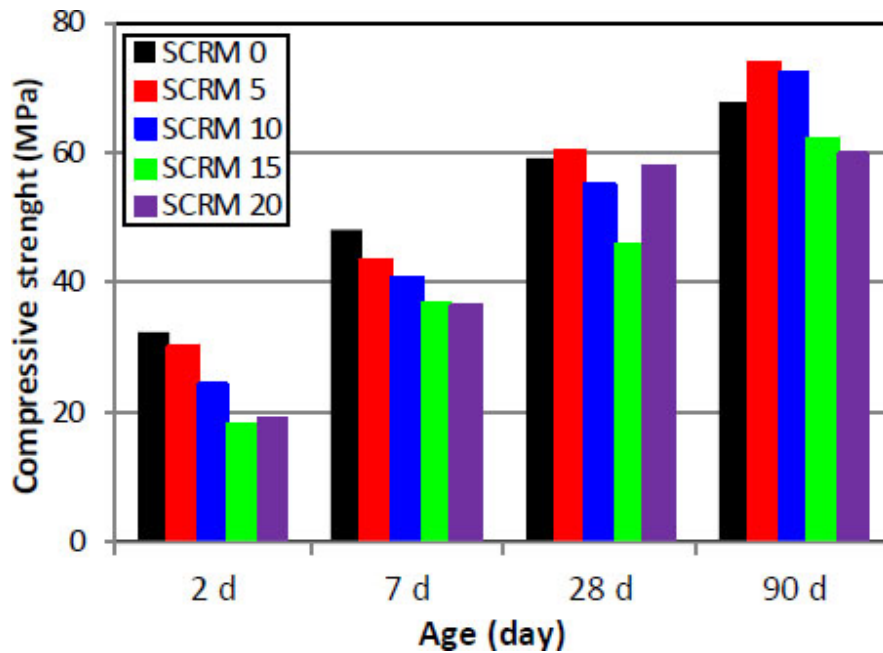


Fig. (11). Illustrates the impact of SF content on the compressive strengths of SCRMs.

At 28 days, all SCRMs displayed compressive strengths comparable to that of SCRM0, except for the SCRM15 mixture.

The information depicted in Fig. (10) indicates an increase in the flexural strength of Self-Consolidating Repair Mortars (SCRMs) over time. However, there was a

notable decrease in flexural strength with higher Silica Fume (SF) content. Specifically, the control mixture (SCRM0) demonstrated greater flexural strength at 28 days compared to other SCRM mixtures. Furthermore, between 28 to 90 days of curing, SCRM5 and SCRM10 showed an increase in flexural strength by 25.5% and 14.4%, respectively.

**Table 5. Hardened properties of SCRMs.**

Repair Mortar	Flexural Strength (MPa)				Compressive Strength (MPa)				Elastic modulus (GPa)			
	2 d	7 d	28 d	90 d	2 d	7 d	28 d	90 d	2 d	7 d	28 d	90 d
<b>SCRM 0</b>	6,44	8,59	9,06	9,36	32, 3	48,0	59,1	67,8	21,30	25,40	27,30	33,76
<b>SCRM 5</b>	5,77	7,41	8,26	10,37	29, 9	43,6	60,4	73,9	19,03	24,27	27,43	32,73
<b>SCRM 10</b>	5,23	6,71	8,11	9,28	24,3	40,5	55,1	72,4	16,33	23,79	26,31	29,22
<b>SCRM 15</b>	4,21	6,32	6,94	8,50	18,1	36,6	46,1	62,1	14,76	21,21	24,39	29,87
<b>SCRM 20</b>	4,84	5,54	7,72	8,27	19,0	36,4	57,9	59,8	15,83	24,94	28,07	28,01

It should be noted that the ideal proportion of superplasticizer to SF for achieving self-compacting mixes is typically around 1% of the binder weight and 10% of the weight of the binder, respectively. This combination serves to reduce porosity while enhancing strength. Furthermore, the incorporation of SF and superplasticizer enhances the pozzolanic reaction at 28 days. Additionally, the development of a denser microstructure in the mortar, with reduced porosity, can lead to increased strength and enhanced durability.

Early strength development in cementitious systems is generally less affected by SF. SF, being a pozzolanic substance, primarily contributes to long-term strength characteristics while potentially reducing flexural strength at an early age. Importantly, in the initial stages of strength development, fiber-reinforced concrete typically exhibits lower compressive and flexural strengths relative to standard concrete.

As for Fig. (11), it shows that the development of compressive strengths follows a similar pattern to that of flexural strengths. At early ages (2 days of curing), (SF) was found to adversely affect the compressive strength of SCRMs, with all SCRMs showing reduced compressive strength compared to SCRM0. For instance, at the 7-day mark, there were observed decreases in compressive strength by 9.2%, 15.6%, 23.8%, and 24.2% for SCRMs5, SCRM10, SCRM15, and SCRM20, respectively, relative to SCRM0. This reduction is largely due to the dilution effect caused by SF.

Numerous studies have noted that the impact of silica fume (SF) on strength development in mortar is more pronounced after the first 7 days [45-48]. Initially, an increase in SF content up to a certain threshold tends to enhance the compressive strength of the mortar. However, exceeding this threshold leads to a decline in strength as the SF content increases further [49]. It has been discovered in other research that the addition of silica fume to water does not directly participate in the hydration reactions of cement. Rather, it interacts with the  $\text{Ca(OH)}_2$  produced during the hydration process, forming hydrated calcium silicates (C-S-H gel). This process effectively improves the microstructure of the cementitious matrix once it has hardened, resulting in a more compact and dense structure, which is beneficial for early strength development and contributes to the improved strength and durability of the mortar over time [50].

Optimal concrete strength at 28 days is achieved with a superplasticizer (SP) concentration between 1.0-1.2% and an SF content of 10-15% by binder weight. Furthermore, the use of 15% SF as a replacement enhances the concrete's durability and strength, as demonstrated in Fig. (9). This enhancement is likely due to SF's high pozzolanic activity, stemming from its significant amorphous  $\text{SiO}_2$  content.

These findings align with those reported by other researchers [51, 52].

However, compressive and flexural strength development increases even more after 28 days for SCRMs mixes with 5-10% SF replacement and continues at a later time due to the pozzolanic reaction.

The correlation between compressive and flexural strengths, as outlined by various researchers, can be summarized in a different way:

$$f_t = k f_c^\alpha \quad (2)$$

Where  $f_c$  represents compressive strength in MPa and  $f_t$  is flexural strength in MPa. The correlation between compressive and flexural strength findings proposed in this study, represented by Eq. (3), was used to model the correlation among compressive and flexural strength for SCRMs mixtures.

Coefficients  $k$  and  $\alpha$  were obtained through nonlinear regression analysis using the test results, which were considered as the main variables. The values obtained were  $k$  and  $\alpha$  by nonlinear regression analysis are 0.872 and 0.55, respectively. The corresponding strong correlation coefficient  $R^2 = 0,930$  can be expressed as follows:

$$f_t = 0,872 \cdot f_c^{0,55} \quad (3)$$

Eq. (3), shown in Fig. (12), can be used to estimate and predict the bending strength from the corresponding compressive strength value, with high reliability.

### 4.3. Elastic Modulus

Elasticity modulus for repair mortar was assessed at intervals of 2, 7, 28, and 90 days, utilizing cylindrical specimens, as demonstrated in Fig. (13).

The dynamic elastic modulus of SCRMs mixtures, which characterizes the material's stiffness, is an essential material characteristic and plays a pivotal role in engineering design and the development of materials.

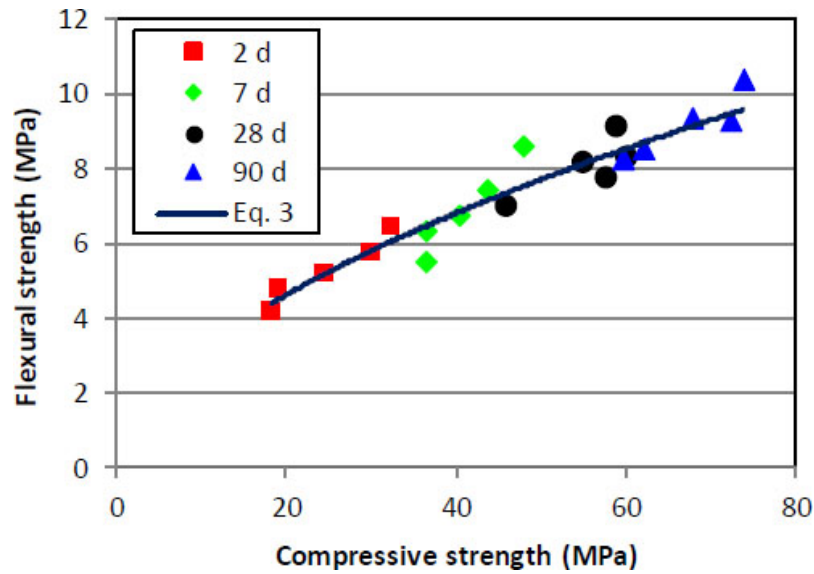


Fig. (12). Relation among flexural strength and compressive strengths of SCRMs.

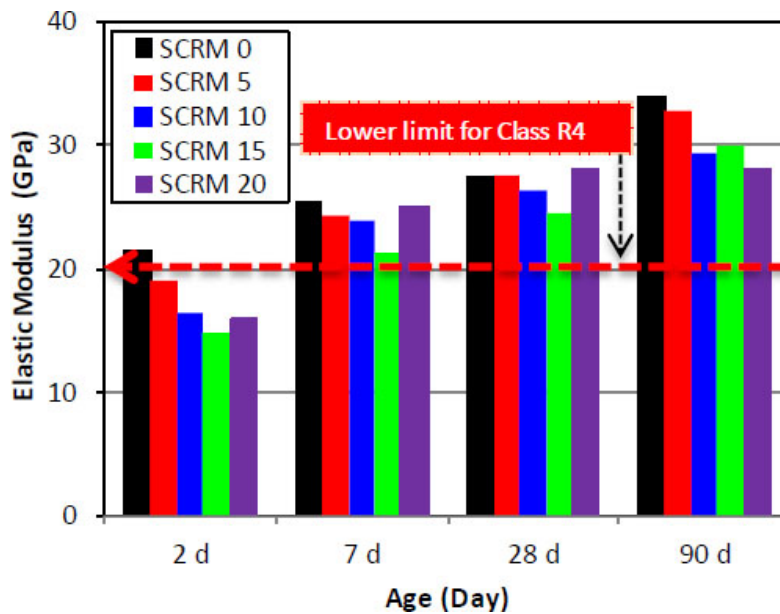


Fig. (13). Influence of SF content on elastic modulus of SCRMs.

Measurements showed that the elastic modulus varied from 28.01 to 33.76 GPa at 90 days. Clearly, employing high-volume Silica Fume (SF) led to a decrease in the dynamic modulus of elasticity compared to SCRM0, which showed the highest modulus. On the other hand, the elastic modulus of all Self-Consolidating Repair Mortar (SCRM) mixtures exhibited an increase over time, particularly noticeable after 90 days of curing. For example, during the extension of the curing period from 28 to 90 days, the elastic modulus of SCRM0 and SCRM15 increased by 24% and 22%, respectively. These findings

generally align with those reported in prior studies [53, 54]

Various models and correlations have been suggested in the literature to estimate the modulus of elasticity of concrete, predominantly based on the concrete's compressive strength.

This study has formulated an empirical correlation between the modulus of elasticity and compressive strength, which can be expressed as follows:

$$E_c = 3,162f_c^{0.537} \tag{4}$$

Here,  $f_c$  is the compressive strength in MPa and  $E_c$  is the elastic modulus in GPa.

Eq. (4) demonstrates a strong correlation between elastic modulus and compressive strength, as evidenced by a coefficient of determination ( $R^2$ ) exceeding 0.92. Fig. (14) further shows a remarkable correlation between the compressive strength and the modulus of elasticity.

**4.4. Water Absorption**

Fig. (15) presents the capillary absorption coefficients

for different Silica Fume (SF) concentrations at 28 days, examining sorptivity, which evaluates a porous material's capacity for water absorption and transmission through capillary action, to gauge the durability characteristics.

The graph in Fig. (15) indicates a reduction in the capillary absorption coefficient with an increase in SF content up to 10%. For instance, the coefficient for SCRM5 was 60% lower than that of SCRM0. Conversely, this coefficient substantially rose when SF levels exceeded 10%, reaching 20%.

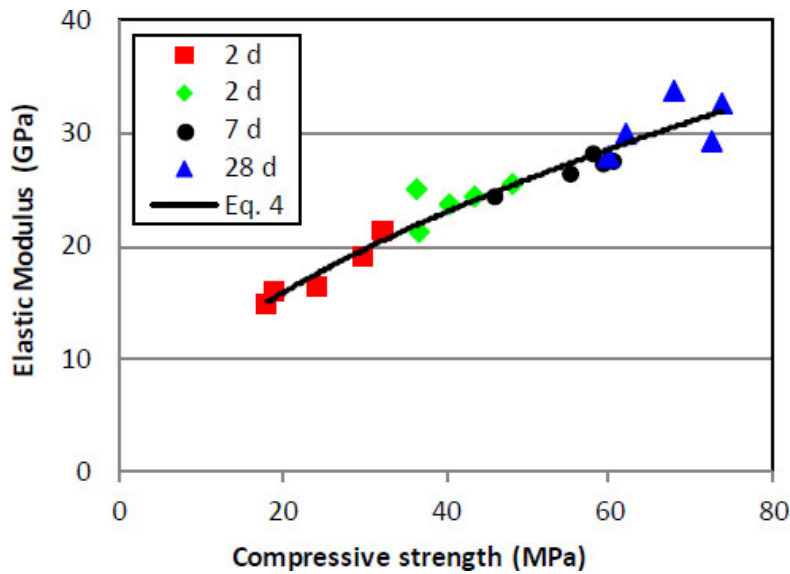


Fig. (14). Relationship between the elastic modulus and compressive strengths of SCRMs, described by Eq. (4).

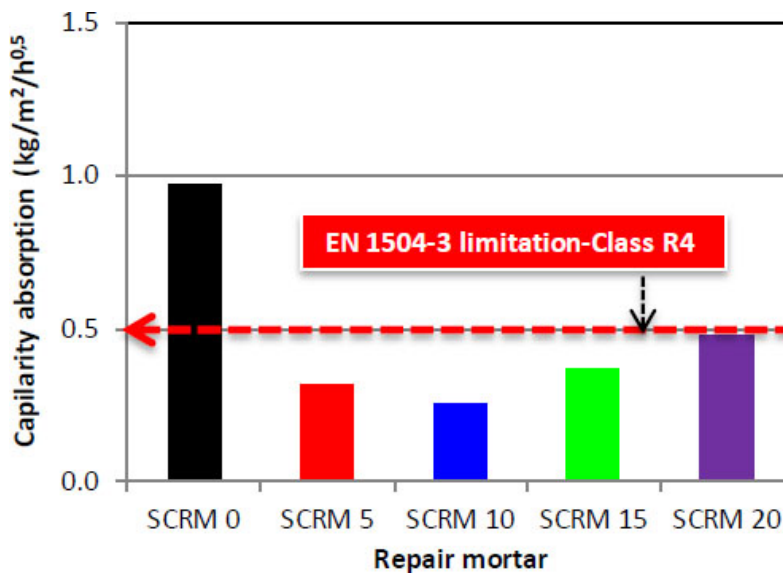
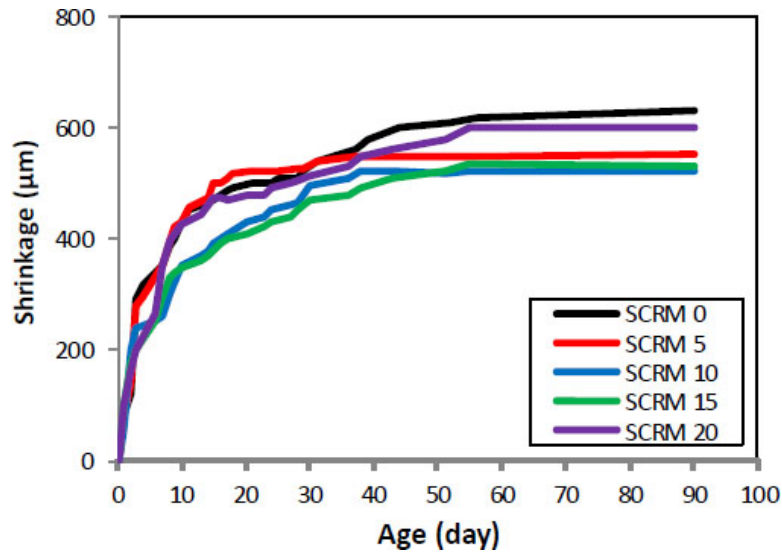


Fig. (15). Influence of SF content on the capillary absorption coefficient of SCRMs after 24 hours.



**Fig. (16).** Displays the impact of SF content on drying shrinkage of SCRMs.

These findings suggest that SF integration diminishes surface pores and imperfections in the mortar relative to the standard repair mortar (SCRM0), implying that a rise in SF content up to 20% diminishes SCRMs mortar's porosity. At 10% SF concentration, the capillary absorption coefficient dropped to  $0.27 \text{ (kg/m}^2\cdot\text{h}^{0.5}\text{)}$ , marking a 71% decrease from SCRM0. Thus, SF addition effectively lowers water absorption in the repair mortar.

Indeed, the capillary absorption coefficient for all repair mortars SCRMs that range between  $0.27$  and  $0.46 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0.5}$  satisfy the requirements (less than  $0.5 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}^{0.5}$ ) for building materials designed for use in Class R4 structural applications. The following reasons can explain these results. Firstly, the potent pozzolanic activity of Silica Fume (SF) is instrumental in compacting the microstructure of Self-Consolidating Repair Mortars (SCRMs), thereby lessening their porosity *via* the generation of calcium-silicate-hydrates (C-S-H). Secondly, the comparatively larger specific surface area of SF, in relation to cement, contributes to a decrease in water absorption by further compacting the mortar matrix.

Practically, this suggests that the addition of SF particles primarily serves to occupy the spaces among the hydrated cement particles, leading to enhanced compressive strength and a reduction in water absorption. Notably, the control mix SCRM0 demonstrated the highest capillary absorption coefficient. In contrast, all SF-inclusive SCRMs showed markedly lower capillary absorption coefficients compared to SCRM0. These observations are in line with findings from various other studies [43, 55, 56].

#### 4.5. Drying Shrinkage

Fig. (16) displays the drying shrinkage data for all Self-Consolidating Repair Mortar (SCRM) mixtures over a period of 90 days. The figure reveals that increasing Silica Fume (SF) content to 10% leads to a reduction in the drying shrinkage of SCRMs at 90 days. For instance, SCRM10

showed a 33% decrease in 90-day drying shrinkage compared to SCRM0. However, it is important to recognize that using more than 10% SF in the mix might cause the specimens to expand.

Previous studies have consistently found that SF usage tends to diminish the drying shrinkage of repair mortars. This effect can be attributed to several factors. Firstly, the addition of pozzolanic materials lowers the amount of cement needed, which in turn reduces the heat of hydration and, consequently, the shrinkage of the mortar mixes [57, 58].

Secondly, after sufficient curing, the shrinkage of SCRMs containing SF generally decreases due to the pozzolanic reaction, which generates extra C-S-H gels, thereby making the matrix denser and slowing the rate of water loss. Thirdly, the use of SF contributes to shrinking reduction by decreasing the diameter and connectivity of pores, a process partly influenced by SF's reinforcing properties.

In summary, these findings suggest that mortars containing pozzolanic materials exhibit lower drying shrinkage than control mixes under air-cured conditions.

#### 4.6. Flexural Bond Strength

Table 6 provides insights into how SF influences the adhesion of composite samples (SCRM/SUBM) under normal water curing conditions. Raising SF content positively influences the bonding interaction between mortar substrates and the repair mortar. Compared to the control mix, substituting cement with 10%, 15%, and 20% Ferrosilicon (FS) resulted in a notable enhancement in the flexural bond strength of (SCRM) specimens. Specifically, this substitution led to improvements in bond strength by 149%, 133%, and 111% for 10%, 15%, and 20% FS replacements, respectively. The highest value, 8.14 MPa, was achieved by SCRM10. Additionally, the results of the 28-day bonding process indicated that composite samples can be generally categorized into two failure types.

**Table 6. The bond flexural strength of SCRMs.**

Repair Mortars (SCRMs)	Bond Flexural Strength (MPa)	Failure Mode
SCRM 0	3,27	
SCRM 5	6,01	
SCRM10	8,14	
SCRM 15	7,63	
SCRM 20	6,90	

In specific terms, the failures occurred in the substrate of the composites SCRM10/SUBM, SCRM15/SUBM, and SCRM20/SUBM, which indicates a strong bond between SCRM mortar and SUBM. In contrast, at 0% and 5% FS content, the interface cracked, and the repair mortar completely separated from the support (resulting in cohesive failure). The interfacial transition zone, which is the boundary between the old mortar and new repair materials, can be enhanced by the inclusion of Polypropylene Fiber (PPF) [59]. It is also important to mention that in the restoration of concrete structures, the tensile bond strength of the repair materials should ideally surpass 2.1 MPa [60].

On the other hand, A-lite ( $C_3S$ ), B-lite ( $C_2S$ ), and ferrite ( $C_4AF$ ) are the three primary components of cement, and their hydration accelerates these positive effects. Following the cement hydration process, the free alkali, primarily in the form of calcium hydroxide ( $Ca(OH)_2$ ), reacts with the silica component in Silica Fume (SF), a process that is facilitated by the presence of water. This reaction results in the formation of calcium silicate hydrate (C-S-H), contributing to a decrease in capillary porosity while simultaneously reducing the calcium hydroxide content within the matrix [61]. Silica Fume's larger surface area, which enhances its reactivity, effectively fills voids in both interfacial and interfacial transition zones, leading to a denser and more uniform structure. Furthermore, the robust bond between Self-Consolidating Repair Mortars (SCRMs) and substrate mortars (SUBMs) helps to prevent crack propagation in the transition zone [62].

It is important to recognize that variables such as the nature of the bonding agent, the cleanliness and moisture level of the substrate surface, and the roughness of the interface can significantly affect adhesion at the interface [63]. In line with these findings, adding Silica Fume (SF) to the mortar not only improves the mechanical characteristics of the interfacial transition zones but also strengthens the bond between the repair mortar and the substrate, leading to a more robust bond [62].

The addition of SF enhances the internal pore structure

and compactness of the mortar, which in turn significantly boosts its durability. This increased durability plays a crucial role in reducing mortar degradation in harsh environments, thereby extending their service life [64].

## CONCLUSION

The findings of the experimental study investigating the effects of SF and PPF fiber on self-compacting repair mortar behavior lead to the following conclusions:

- The inclusion of silica fumes notably influences the workability of self-consolidating repair mortars (SCRMs), with workability decreasing as the SF content
- Hardened properties of SCRMs are decreased when high-volume silica fume is used, regardless of age. Moreover, due to the pozzolanic reaction, after 90 days, all SCRM mixtures demonstrate significantly higher flexural and compressive strengths.
- At 90 days, SCRM5 and SCRM10 have compressive strength values of 73.9 and 72.9 MPa, accordingly, which can satisfy class R4 requirements according to EN 1504-3 [30]. In addition, all the SCRM mixes produced in this study showed strengths in excess of 40 MPa at 90 days, making them suitable for a large number of different applications.
- A predictive model has developed successfully for the relationship between compressive and flexural strengths of SCRMs, with a high correlation coefficient  $R^2=0.930$ . This model provides a reliable method for estimating flexural strength from compressive strength, offering valuable insights for practical applications of SCRMs.
- Lower elastic modulus readings observed in the SCRM mixtures are advantageous for mortar restoration and help mitigate the internal stresses induced by shrinkage, which is beneficial for the restoration process.
- The study presents a refined empirical model for correlating the modulus of elasticity with compressive strength. The high determination coefficient ( $R^2>0.92$ ) confirms the model's strong predictive capability, providing a valuable tool for estimating elastic modulus from compressive strength in concrete applications.
- Incorporating Silica Fume (SF) significantly influences

the capillary absorption coefficients of repair mortars. Up to a 10% SF concentration reduces capillary absorption by up to 71%, enhancing durability by decreasing porosity. However, SF levels exceeding 10% increase the absorption coefficient. Mortars with SF concentrations between 0.27 and 0.46 kg/m<sup>2</sup>·h<sup>0.5</sup> meet the Class R4 standards for building materials, thanks to SF's pozzolanic activity and high specific surface area, which improve the material's microstructure and reduce water absorption.

- Increasing Silica Fume (SF) content up to 10% effectively reduces drying shrinkage in Self-Consolidating Repair Mortars (SCRMs), with a notable 33% decrease observed at 90 days for SCRMI0 compared to SCRMO. This reduction is attributed to SF's pozzolanic activity, which decreases the amount of cement needed, mitigates the heat of hydration, and promotes the formation of additional C-S-H gels, enhancing the density of the mortar matrix and reducing pore connectivity. However, higher SF contents beyond 10% may lead to increased expansion. Overall, incorporating SF results in lower drying shrinkage compared to control mixes, demonstrating its effectiveness in improving the dimensional stability of repair mortars.
- According to the three-point bending test, the SCRMI mixture using 10% silica fume showed a satisfactory binding strength with substrate, as the cure time increased. This enhancement in bonding power is a result of the pozzolanic reaction. The results imply that SCM is potentially a useful material for repairing damaged concrete structures. Failure continued to occur along the interface when 10% natural pozzolana was incorporated into the cement mix.
- According to the findings of this work, SCRMI is possibly a good repair material that complies with EN 1504-3 [30] due to its adequate mechanical capabilities and durability characteristics with the concrete substrate.
- Future research should explore the long-term durability of the SCRMs under diverse environmental conditions and compare the performance of silica fume with other supplementary cementing materials. Additionally, field studies and assessments of economic and environmental impacts will be valuable for validating and enhancing the practical application of these materials.

#### AUTHOR'S CONTRIBUTION

M.E.: Methodology, Experimental study, Investigation, Writing-original draft; M.G.: Writing - review & editing, Supervision, Conceptualization; S.C. and J.K.: Data Analysis and Interpretation.

All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript

#### CONSENT FOR PUBLICATION

Not applicable.

#### AVAILABILITY OF DATA AND MATERIALS

The data and supportive information are available within the article.

#### FUNDING

This research was sponsored by the General Directorate for Scientific Research and Technological Development (DGRSDT) of the Algerian Minister of Higher Education and Scientific Research.

#### CONFLICT OF INTEREST

Mohamed Ghrici is the Editorial Advisory Board member of the journal TOCIEJ.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

Declared none.

#### REFERENCES

- [1] J.S. Park, "Necessity of rehabilitation and current state of domestic sewage pipe network", *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 55, pp. 135-143, 2007.
- [2] M. Alexander, A. Bentur, and S. Mindess, *Durability of Concrete: Design and Construction.*, CRC Press: Boca Raton, Florida, United States, 2017.  
[<http://dx.doi.org/10.1201/9781315118413>]
- [3] Q.T. Phung, Effects of carbonation and calcium leaching on microstructure and transport properties of cement pastes., P.h.D. thesis, Ghent University, Belgium., 2015.
- [4] P. Zhang, F.H. Wittmann, M. Vogel, H.S. Müller, and T. Zhao, "Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete", *Cement Concr. Res.*, vol. 100, pp. 60-67, 2017.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.018>]
- [5] J. Bao, S. Xue, P. Zhang, Z. Dai, and Y. Cui, "Coupled effects of sustained compressive loading and freeze-thaw cycles on water penetration into concrete", *Struct. Concr.*, vol. 22, no. S1, pp. 944-954, 2020.
- [6] J. Bao, S. Li, P. Zhang, S. Xue, Y. Cui, and T. Zhao, "Influence of exposure environments and moisture content on water repellency of surface impregnation of cement-based materials", *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 6, pp. 12115-12125, 2020.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.046>]
- [7] P. Maravelaki-Kalaitzaki, Z. Agioutantis, E. Lionakis, M. Stavroulaki, and V. Perdikatsis, "Physico-chemical and mechanical characterization of hydraulic mortars containing nano-titania for restoration applications", *Cement Concr. Compos.*, vol. 36, pp. 33-41, 2013.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.002>]
- [8] G. Matias, P. Faria, and I. Torres, "Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review", *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 125-136, 2014.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.028>]
- [9] M. Vyšvařil, M. Pavlíková, M. Záleská, A. Pivák, T. Žižlavský, P. Rovnaníková, P. Bayer, and Z. Pavlík, "Non-hydrophobized perlite renders for repair and thermal insulation purposes: Influence of different binders on their properties and durability", *Constr. Build. Mater.*, vol. 263, p. 120617, 2020.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120617>]
- [10] J. Bijen, *Durability of Engineering Structures Design, Repair and Maintenance.*, CRC Press: Boca Raton, Florida, United States, 2003.
- [11] P. Niewiadomski, J. Hoła, and A. Ćwirzeń, "Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles", *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 18, no. 3, pp. 877-886, 2018.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2018.01.006>]
- [12] H. Okamura, and M. Ouchi, "Self-Compacting Concrete", *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 5-15, 2003.  
[<http://dx.doi.org/10.3151/jact.1.5>]
- [13] B. Benabed, E.H. Kadri, L. Azzouz, and S. Kenai, "Properties of self-compacting mortar made with various types of sand", *Cement Concr. Compos.*, vol. 34, no. 10, pp. 1167-1173, 2012.

- [14] A. Loukili, *Self-Compacting Concrete*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc: United States, 2011.  
[<http://dx.doi.org/10.1002/9781118602164>]
- [15] ACI, "Committee 237, Self-Consolidating Concrete (ACI 237R-04)",
- [16] H. Okamura, and K. Ozawa, "Mix design for self-compacting concrete", *Concrete Library of JSCE*, no. 25, pp. 107-120, 1995.
- [17] A.A. Thakare, A. Singh, V. Gupta, S. Siddique, and S. Chaudhary, "Sustainable development of self-compacting cementitious mixes using waste originated fibers: A review", *Resour. Conserv. Recycling*, vol. 168, p. 105250, 2021.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105250>]
- [18] L. Antoni, L. Chandra, and D. Hardjito, "The impact of using fly ash, silica fume and calcium carbonate on the workability and compressive strength of mortar", *Procedia Eng.*, vol. 125, pp. 773-779, 2015.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.132>]
- [19] H. F. W Taylor, *Cement Chemistry*, Academic Press: London, 1990, p. 475.
- [20] X. Liu, X. Lv, J. Fu, P. Peng, and G. Gai, "Application of silica fume in China", *Adv. Mat. Res.*, vol. 58, pp. 21-26, 2009.
- [21] R. Siddique, "Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties", *Resour. Conserv. Recycling*, vol. 55, no. 11, pp. 923-932, 2011.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>]
- [22] A. Bentur, A. Goldman, and M.D. Cohen, "The contribution of the transition zone to the strength of high quality silica fume concretes", *MRS Online Proc. Lib.*, vol. 114, p. 97, 1987.
- [23] W.L. Zhong, B. Qiu, Y.H. Zhang, X. Zhao, and L.F. Fan, "Mesoscopic damage characteristics of hydrophobicity-modified geopolymer composites under freezing-thawing cycles based on CT scanning", *Compos. Struct.*, vol. 326, p. 117637, 2023.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117637>]
- [24] W.L. Zhong, L.F. Fan, and Y.H. Zhang, "Experimental research on the dynamic compressive properties of lightweight slag based geopolymer", *Ceram. Int.*, vol. 48, no. 14, pp. 20426-20437, 2022.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.328>]
- [25] W.L. Zhong, Y.H. Zhang, and L.F. Fan, "High-ductile engineered geopolymer composites (EGC) prepared by calcined natural clay", *J. Build. Eng.*, vol. 63, p. 105456, 2023.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobee.2022.105456>]
- [26] W.L. Zhong, Y.H. Zhang, L.F. Fan, and P.F. Li, "Effect of PDMS content on waterproofing and mechanical properties of geopolymer composites", *Ceram. Int.*, vol. 48, no. 18, pp. 26248-26257, 2022.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.306>]
- [27] W.L. Zhong, Y.H. Sun, X. Zhao, and L.F. Fan, "Study on synthesis and water stability of geopolymer pavement base material using waste sludge", *J. Clean. Prod.*, vol. 445, p. 141331, 2024.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141331>]
- [28] S.T. Kang, J.I. Choi, K.T. Koh, K.S. Lee, and B.Y. Lee, "Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete", *Compos. Struct.*, vol. 145, pp. 37-42, 2016.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.075>]
- [29] P. Yan, B. Chen, S. Afgan, M. Aminul Haque, M. Wu, and J. Han, "Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre", *Constr. Build. Mater.*, vol. 279, p. 122489, 2021.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122489>]
- [30] iTeh Standards, "EN 1504-3, "Products and systems for the protection and repair of concrete structures- Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity-Part 3: Structural and non-structural repair", Available From: [https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/62c5607f-c564-4802-9b11-a872dc3c4b3c/en-1504-3-2005?srsId=AfmBOoorDs8hCwQrI\\_dkIIhkC7u1obgysMgD8Gjbsd0\\_ygJ0kMNIQexN](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/62c5607f-c564-4802-9b11-a872dc3c4b3c/en-1504-3-2005?srsId=AfmBOoorDs8hCwQrI_dkIIhkC7u1obgysMgD8Gjbsd0_ygJ0kMNIQexN)
- [31] ANSI Webstor, "BS EN 197-1:2000, Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements (British Standard)", Available From: [https://webstore.ansi.org/standards/bsi/bsen1972000?srsId=AfmB00oxb9QvFpHWMrZrStL2hh\\_sU99re5t56W9EnCCU7cdzi2T2Ltn7](https://webstore.ansi.org/standards/bsi/bsen1972000?srsId=AfmB00oxb9QvFpHWMrZrStL2hh_sU99re5t56W9EnCCU7cdzi2T2Ltn7)
- [32] iTeh Standards, "EN 13263-1 "Silica fume for concrete - Part 1: Definitions, requirements and conformity criteria", Available From: [https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/503d9622-7c15-4d83-95c7-c6bbdbdfc941a/en-13263-1-2005a1-2009?srsId=AfmBOoqxgCBKBwq-0TEdBLZEc13M3mPAZ-9CwkO\\_yQwbo0CS4CyrTcG3](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/503d9622-7c15-4d83-95c7-c6bbdbdfc941a/en-13263-1-2005a1-2009?srsId=AfmBOoqxgCBKBwq-0TEdBLZEc13M3mPAZ-9CwkO_yQwbo0CS4CyrTcG3)
- [33] iTeh Standards, "EN 13263-2 "Silica fume for concrete - Part 2: Conformity evaluation", Available From: [https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/acecd2b0-7b30-44ed-9ce1-434a4a96a06f/en-13263-2-2005?srsId=AfmBOor9WQuTddRQOA\\_9\\_xxbpDwjgkjAPM4GHARqgKiBtR\\_F4uaFFCiR](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/acecd2b0-7b30-44ed-9ce1-434a4a96a06f/en-13263-2-2005?srsId=AfmBOor9WQuTddRQOA_9_xxbpDwjgkjAPM4GHARqgKiBtR_F4uaFFCiR)
- [34] EFNARC, *Guidelines for self-compacting concrete*, EFNARC: UK, 2002, pp. 1-32.
- [35] iTeh Standards, "EN 12390-5, "Testing hardened concrete-Part 5: Flexural strength of test specimens", British Standards Institution-BSI and CEN European Committee for Standardization", Available From: [https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/275df2f9-c466-4bb1-b41c-b8dfa9fc6d89/en-12390-5-2009?srsId=AfmBOor-JlOIHa\\_tbSu44EE7-e2mqgnrquJu6je1RAHp2xvud8BlHoHr](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/275df2f9-c466-4bb1-b41c-b8dfa9fc6d89/en-12390-5-2009?srsId=AfmBOor-JlOIHa_tbSu44EE7-e2mqgnrquJu6je1RAHp2xvud8BlHoHr)
- [36] European Standards, "EN-12504-4 Testing concrete in structures Determination of ultrasonic pulse velocity", Available From: [https://www.en-standard.eu/bs-en-12504-4-2021-testing-concrete-in-structures-determination-of-ultrasonic-pulse-velocity/?srsId=AfmBOop9fUaMV-yJtThT6IxRRpb\\_0ij63MkrDlPC1-JBqNLh1G8Hwx](https://www.en-standard.eu/bs-en-12504-4-2021-testing-concrete-in-structures-determination-of-ultrasonic-pulse-velocity/?srsId=AfmBOop9fUaMV-yJtThT6IxRRpb_0ij63MkrDlPC1-JBqNLh1G8Hwx)
- [37] iTeh Standards, "EN 1015-18, "Methods of test for mortar for masonry, Part 18, Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar", Available From: [https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/d9e520b3-5f88-4368-ae91-e568d18aef5a/en-1015-18-2002?srsId=AfmBOopHim1LDfagYHrlEazqLwBjRgGUYa0-ODfBxYzd\\_JhG5AKkaDJa](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/d9e520b3-5f88-4368-ae91-e568d18aef5a/en-1015-18-2002?srsId=AfmBOopHim1LDfagYHrlEazqLwBjRgGUYa0-ODfBxYzd_JhG5AKkaDJa)
- [38] iTeh Standards, "12617-4 Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods Determination of shrinkage and expansion", Available From: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/dc994f7b-b2ff-496d-9a3d-b8beede52589/en-12617-4-2002?srsId=AfmBOooIqfmYyVRMNlbrulhbUje4Q05tbGTJ2aK31-wm-ImYN-OVYH0g>
- [39] ASTM, "ASTM C78, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete" (Using Simple Beam with ThirdPoint Loading)", Available From: [https://www.astm.org/c0078\\_c0078m-22.html](https://www.astm.org/c0078_c0078m-22.html)
- [40] S. Yaseri, M. Mahdikhani, A. Jafarinoor, V. Masoomi Verki, M. Esfandiyari, and S.M. Ghiasian, "The development of new empirical apparatuses for evaluation fresh properties of self-consolidating mortar: Theoretical and experimental study", *Constr. Build. Mater.*, vol. 167, pp. 631-648, 2018.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.021>]
- [41] Ş. Erdoğan, C. Arslantürk, and Ş. Kurbetci, "Influence of fly ash and silica fume on the consistency retention and compressive strength of concrete subjected to prolonged agitating", *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 3, pp. 1277-1281, 2011.  
[<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.024>]
- [42] D. Park, S. Park, Y. Seo, and T. Noguchi, "Water absorption and constraint stress analysis of polymer-modified cement mortar used as a patch repair material", *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 819-830, 2012.

- [43] F.A. Sabet, N.A. Libre, and M. Shekarchi, "Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash", *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 175-184, 2013. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.069>]
- [44] E. Teimortashlu, M. Dehestani, and M. Jalal, "Application of Taguchi method for compressive strength optimization of tertiary blended self-compacting mortar", *Constr. Build. Mater.*, vol. 190, pp. 1182-1191, 2018. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.165>]
- [45] H. Salehi, and M. Mazloom, "Opposite effects of ground granulated blast-furnace slag and silica fume on the fracture behavior of self-compacting lightweight concrete", *Constr. Build. Mater.*, vol. 222, pp. 622-632, 2019. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.183>]
- [46] A.F. Bingöl, and İ. Tohumcu, "Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume", *Mater. Des.*, vol. 51, pp. 12-18, 2013. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.106>]
- [47] W. Wu, R. Wang, C. Zhu, and Q. Meng, "The effect of fly ash and silica fume on mechanical properties and durability of coral aggregate concrete", *Constr. Build. Mater.*, vol. 185, pp. 69-78, 2018. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.097>]
- [48] X. Ma, T. He, Y. Xu, R. Yang, and Y. Sun, "Hydration reaction and compressive strength of small amount of silica fume on cement-fly ash matrix", *Construction Materials*, vol. 16, p. e00989, 2022.
- [49] G.A. Rao, "Development of strength with age of mortars containing silica fume", *Cement Concr. Res.*, vol. 31, no. 8, pp. 1141-1146, 2001. [[http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00540-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00540-3)]
- [50] A.M. Safhi, M. Benzerzour, P. Rivard, N-E. Abriak, and I. Ennahal, "Development of self-compacting mortars based on treated marine sediments", *J. Build. Eng.*, vol. 22, pp. 252-261, 2019. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2018.12.024>]
- [51] A. Benli, M. Karataş, and Y. Bakir, "An experimental study of different curing regimes on the mechanical properties and sorptivity of self-compacting mortars with fly ash and silica fume", *Constr. Build. Mater.*, vol. 144, pp. 552-562, 2017. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.228>]
- [52] V.N. Zarnaghi, A. Fouroghi-Asl, V. Nourani, and H. Ma, "On the pore structures of lightweight self-compacting concrete containing silica fume", *Constr. Build. Mater.*, vol. 193, pp. 557-564, 2018. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.080>]
- [53] A. Alshahrani, S. Kulasegaram, and A. Kundu, "Elastic modulus of self-compacting fibre reinforced concrete: Experimental approach and multi-scale simulation", *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, p. e01723, 2023. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01723>]
- [54] M. Mazloom, A.A. Ramezani-pour, and J.J. Brooks, "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete", *Cement Concr. Compos.*, vol. 26, no. 4, pp. 347-357, 2004. [[http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00017-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00017-9)]
- [55] M.A. Haque, B. Chen, and S. Li, "Water-resisting performances and mechanisms of magnesium phosphate cement mortars comprising with fly-ash and silica fume", *J. Clean. Prod.*, vol. 369, p. 133347, 2022. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133347>]
- [56] H. Chen, Q. Chen, Y. Xu, and A.S. Lawi, "Effects of silica fume and Fly ash on properties of mortar reinforced with recycled-polypropylene", *Constr. Build. Mater.*, vol. 316, p. 125887, 2022. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125887>]
- [57] S.Y. Guo, X. Zhang, J.Z. Chen, B. Mou, H.S. Shang, P. Wang, L. Zhang, and J. Ren, "Mechanical and interface bonding properties of epoxy resin reinforced Portland cement repairing mortar", *Constr. Build. Mater.*, vol. 264, p. 120715, 2020. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120715>]
- [58] W.A. Al-Khaja, "Strength and time-dependent deformations of silica fume concrete for use in Bahrain", *Constr. Build. Mater.*, vol. 8, no. 3, pp. 169-172, 1994. [[http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(09\)90030-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(09)90030-7)]
- [59] C. Jiang, X. Zhou, S. Huang, and D. Chen, "Influence of polyacrylic ester and silica fume on the mechanical properties of mortar for repair application", *Adv. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 1-10, 2016.
- [60] M.M. Sprinkel, *Twenty-year performance of latex-modified concrete overlays. Polymer-Modified Hydraulic-Cement Mixtures.*, ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 1993. [<http://dx.doi.org/10.1520/STP25552S>]
- [61] M.H.F. Medeiros, P. Helene, and S. Selmo, "Influence of EVA and acrylate polymers on some mechanical properties of cementitious repair mortars", *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 7, pp. 2527-2533, 2009. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.021>]
- [62] A. Mallat, and A. Alliche, "Mechanical investigation of two fiber-reinforced repair mortars and the repaired system", *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 1587-1595, 2011. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.017>]
- [63] A. Momayez, M.R. Ehsani, A.A. Ramezani-pour, and H. Rajaie, "Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials", *Cement Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 748-757, 2005. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.027>]
- [64] S. Xu, Q. Ma, and J. Wang, "Combined effect of isobutyltriethoxysilane and silica fume on the performance of natural hydraulic lime-based mortars", *Constr. Build. Mater.*, vol. 162, pp. 181-191, 2018. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.150>]

**DISCLAIMER:** The above article has been published, as is, ahead-of-print, to provide early visibility but is not the final version. Major publication processes like copyediting, proofing, typesetting and further review are still to be done and may lead to changes in the final published version, if it is eventually published. All legal disclaimers that apply to the final published article also apply to this ahead-of-print version.