



Department: Civil Engineering

N° of order: .... / 2024

Defense authorization N° ...../2024

## DOCTORAL THESIS

3<sup>rd</sup> Cycle Doctoral (D-LMD)

Presented by

**CHETBANI YAZID**

With a view to obtaining the doctoral diploma in 3<sup>rd</sup> Cycle Doctoral (D-LMD)

Branch: Civil Engineering

Specialty: Materials in civil engineering

**Topic**

**Contribution to the modeling of the physico-mechanical behavior of  
high-performance concretes reinforced with various types of fibers**

Supported, on 11 /01/2024, before the jury composed of:

Last and first name	Grade	Institution of affiliation	Designation
Mr Taha-Hocine Douara	MCA	University of Djelfa	President
Mr Rebih Zaitri	MCA	University of Djelfa	Supervisor
Mr Fodil Dif	MCA	University of Djelfa	Co-Supervisor
Mr Madani Bederina	Professor	University of Laghouat	Examiner
Mr Salim Guettala	Professor	University of Djelfa	Examiner

**Djelfa University, FST - 2024**



Département : Génie Civil

N° d'Ordre : .... / 2024

Autorisation de Soutenance N°...../2024

## THESE DE DOCTORAT

Doctorat 3<sup>ème</sup> Cycle (D-LMD)

Présentée par

**CHETBANI YAZID**

En vue de l'obtention du diplôme de Docteur en 3<sup>ème</sup> Cycle D-LMD

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Thème

**Contribution à la modélisation du comportement physico-mécanique des bétons à haute performances renforcés par divers types de fibres**

Soutenue publiquement, le 11 /01/2024, devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement de rattachement	Désignation
Mr Taha-Hocine Douara	MCA	Université de Djelfa	Président
Mr Rebih Zaitri	MCA	Université de Djelfa	Directeur de thèse
Mr Fodil Dif	MCA	Université de Djelfa	Co Directeur de thèse
Mr Madani Bederina	Professeur	Université de Laghouat	Examineur
Mr Salim Guettala	Professeur	Université de Djelfa	Examineur

# Remerciements

Chers amis, famille, collègues, membres du jury et mes précieux promoteurs. Aujourd'hui, Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance envers chacun d'entre vous pour votre soutien constant à travers toutes les étapes de mon chemin de recherche, qui a abouti à la réalisation de ma thèse de doctorat. Votre contribution a été essentielle, et je tiens à reconnaître spécifiquement les personnes ayant joué un rôle important dans cette aventure académique.

Tout d'abord, je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mon promoteur, Dr. Rebih Zaitri, dont la patience, la sagesse, et l'engagement infatigable ont été inestimables. Votre expertise et vos conseils ont été la clé de ma réussite, et je suis honoré d'avoir eu la chance de travailler à vos côtés. Un grand merci également au Dr. Fodil Dif, mon co-promoteur, dont les conseils éclairés et le soutien constant ont été d'une valeur inestimable tout au long de mon travail de recherche.

J'aimerais également exprimer ma reconnaissance envers le président du jury, le Dr Taha-Hocine Douara, ainsi qu'aux membres du jury, le Professeur Madani Bederina et le Professeur Salim Guettala, dont les critiques constructives et les éclairages ont contribué à améliorer mon travail de manière significative.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers les personnes de mon entourage qui ont offert leur soutien tout au long de cette expérience, notamment mon père, Chetbani Ahmed, ma mère, Habiba Debbiche, mes sœurs, Zineb et Asma, ainsi que mon oncle, Alouani Benaichouche.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers les enseignants et les chercheurs qui ont contribué à mon développement académique et professionnel, notamment Pr. Bassam A Tayeh, Dr. Yasmina Kellouche, Dr. Mohamed Saharaoui, Pr. Madani Bederina, Dr. Elhadj Raouache, Dr. Wafa Hamla, Dr. Abdelkrim Benarroudj, Pr. Ibrahim Messaoudene, Pr. Abdelhalim Zoukel, Dr. Abla Ahmed Kadi, Pr. Angeles Blanco Suárez, Dr. Kamel Zitouni, Dr. Aissa Laouissi, Dr. Billal Belfegas, Pr. Pedro Serna Ros, Pr. Ammar Yahia, Dr. v.v.zhitkovsky, Dr. Balázs Nagy, Dr. Tahar Tayebi, Pr. Elsabe Kearsley.

À mes chers collègues de classe, merci pour les moments de camaraderie et de partage. Vos encouragements et votre amitié ont été une source d'inspiration pour moi. Avec toute ma gratitude,

*CHETBANI YAZID*

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو تميم ونمذجة إحصائية لسلك الخرسانة عالية الأداء المقواة بألياف معدنية معاد تدويرها من أصول مختلفة، مستخرجة من نفايات الكابلات الملتوية من (19 خيطا \* 7 أسلاك)، في حالة هشّة. هذه الألياف لها معامل مرونة أقل من 200 جيقا باسكال. تحقيقا لهذه الغاية، تم تقييم خصائص ريولوجية وميكانيكية وحرارية مختلفة، بما في قابلية الجريان، وامتصاص الماء، والقوة الميكانيكية المتمثلة في الضغط والشد والانحناء، باستخدام عينات خرسانية وفقا لمنهجية سطح الاستجابة.

في هذه الدراسة، تم استخدام المستوى المركزي المركب (CCD)، استنادا إلى RSM، لتقييم تأثير نسب الماء إلى الرابط التي تتراوح من 0.27 إلى 0.31، ونسبة الطول / القطر للألياف ( $L/d = 46$  إلى 80)، ومحتوى الألياف في حدود 19 إلى 29 كغ / متر مكعب على خصائص الخرسانة المدروسة. تم تحليل دقة وصحة النماذج التي تم إنشاؤها من خلال تحليل التباين (ANOVA)، متبوعا بتحسين المتغيرات المختارة.

أظهرت النتائج التجريبية أن نسبة ( $L/d$ ) تقدر بحوالي 63، ونسبة الماء إلى الرابط بحوالي 0.28، وتركيز الألياف بحوالي 22 كغ/م<sup>3</sup> أدى إلى تحسين يصل إلى حوالي 45% في قابلية الجريان. علاوة على ذلك، لوحظت زيادة واضحة في مقاومة الانضغاط (بنسبة تقدر بحوالي 25%) عند استخدام نسبة ( $L/d$ ) بحوالي 70، ونسبة الماء إلى الرابط بحوالي 0.28، وتركيز أقصى للألياف يبلغ 29 كغ/م<sup>3</sup>.

من خلال فحص الصور المجهرية الإلكترونية الماسحة، استنتج أن منطقة واجهة الألياف بنسبة عرض إلى ارتفاع تبلغ 63 تشارك في زيادة الالتصاق بالمصفوفة الخرسانية. كما أظهرت النتائج الحرارية أن زيادة نسبة ( $L/d$ ) للألياف المعدنية المعاد تدويرها تؤدي إلى زيادة التوصيل الحراري للخرسانة عالية الأداء المدروسة.

**الكلمات المفتاحية:** الألياف المعدنية المعاد تدويرها، الخرسانة عالية الأداء، طريقة سطح الاستجابة، قابلية الجريان، الخواص الفيزيائية والميكانيكية، تدفق الحرارة.

## Résumé

L'objectif de ce travail est la valorisation et la modélisation statistique du comportement des bétons à hautes performances (BHP) renforcés par des fibres métalliques recyclées de diverses origines, extraites à partir des déchets de câbles torsadés de (19 torons \* 7 fils), à l'état fragile. Ces fibres présentent un module d'élasticité inférieur à 200 GPa. Pour ce faire, différentes propriétés, à l'état frais, physico-mécaniques et thermiques, ont été évaluées, notamment l'affaissement, l'absorption d'eau (Abs), la résistance mécanique (Compression (Rc), flexion (Rf), traction par fendage (Rt.f)), au moyen d'éprouvettes de béton selon la méthodologie de surface de réponse (RSM).

Dans cette étude, le plan central composite (CCD), basé sur la RSM, a été utilisé pour évaluer l'influence des rapports eau/liant (E/L) variant de 0.27 à 0.31, du rapport d'aspect longueur/diamètre des fibres ( $L/d = 46$  à  $80$ ), et de la teneur en fibres dans la plage de  $19$  à  $29 \text{ kg/m}^3$  sur les propriétés du béton étudié. La précision et la validité des modèles générés ont été analysées par une analyse de variance (ANOVA), suivie de l'optimisation des variables sélectionnées.

Les résultats expérimentaux ont révélé qu'un rapport ( $L/d$ ) de  $63$ , un rapport (E/L) d'environ  $0.28$ , et une teneur en fibres d'environ  $22 \text{ kg/m}^3$  conduisaient à une amélioration d'environ  $45\%$  de l'ouvrabilité, exprimée en termes d'affaissement. Par ailleurs, une nette augmentation de la résistance à la compression (d'environ  $25\%$ ) a été observée avec un rapport ( $L/d$ ) d'environ  $70$ , un rapport (E/L) d'environ  $0.28$ , et une teneur maximale en fibres de  $29 \text{ kg/m}^3$ .

En examinant les images microscopiques électroniques à balayage (MEB), il a été conclu que la zone d'interface de la fibre avec un rapport d'aspect de  $63$  participe à l'augmentation de l'adhérence avec la matrice du béton. Le flux de chaleur montre également qu'une augmentation du rapport ( $L/d$ ) des fibres métalliques recyclées entraîne une augmentation de la conductivité thermique du béton à haute performance étudié.

---

**Mots-clés :** Fibres métalliques recyclées, béton à haute performance, méthode de surface de réponse, maniabilité, propriétés physico-mécaniques, flux de chaleur

## Abstract

The aim of this work is to evaluate and statistically model the behavior of high-performance concrete (HPC) reinforced with recycled metal fibers of various origins, extracted from waste twisted cables of (19 strands \* 7 wires), in the brittle state. These fibers have a modulus of elasticity of less than 200 GPa. For this purpose, various fresh-state, physico-mechanical and thermal properties were evaluated, including slump, water absorption (WA), mechanical strength (Compression (CS), flexural strength (FS), splitting tensile strength (STS)), using concrete specimens based on response surface methodology (RSM).

In this study, the central composite design (CCD), based on RSM, was used to evaluate the influence of water/binder ratios (W/B) ranging from 0.27 to 0.31, fiber length/diameter aspect ratio ( $L/d = 46$  to  $80$ ), and fiber content in the range  $19$  to  $29 \text{ kg/m}^3$  on the properties of the concrete studied. The accuracy and validity of the models generated were analyzed by analysis of variance (ANOVA), followed by optimization of the selected variables.

The experimental results revealed that a ratio ( $L/d$ ) of approximately  $63$ , a ratio ( $E/L$ ) of about  $0.28$ , and a fiber content of around  $22 \text{ kg/m}^3$  led to an improvement of approximately  $45\%$  in workability, expressed in terms of slump. Furthermore, a significant increase in compressive strength (of about  $25\%$ ) was observed with a ratio ( $L/d$ ) of approximately  $70$ , a ratio ( $E/L$ ) of about  $0.28$ , and a maximum fiber content of  $29 \text{ kg/m}^3$ .

By examining scanning electron microscopic (SEM) images, it was concluded that the fiber interface zone with an aspect ratio of  $63$  participates in the increase in adhesion with the concrete matrix. heat flux also shows that an increase in the ratio ( $L/d$ ) of recycled metal fibers leads to an increase in the thermal conductivity of the high-performance concrete studied.

---

**Key words:** Recycled metal fibers, high-performance concrete, response surface method, workability, physical-mechanical properties, heat flux.

## Table des matières

Remerciements.....	II
ملخص.....	III
Résumé .....	IV
Abstract .....	V
Liste des tableaux .....	VIII
Liste des figures .....	IX
Introduction Générale.....	1

### Chapitre I : Synthèse bibliographique

1.1 Introduction.....	4
1.2 Historique.....	4
1.3 C'est quoi un BHP.....	6
1.3.1 Définition .....	6
1.3.2 Composantes du BHP.....	7
1.3.3 Les BHP Spéciaux .....	23
1.4 Formulation du BHP .....	25
1.5 Influence des fibres sur les propriétés du Béton à l'état frais .....	31
1.6 Influence des fibres sur le comportement du Béton à l'état durci .....	34
1.7 Influence des fibres sur la microstructure du béton.....	53
1.8 Conclusion .....	56

### Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes d'essais

2.1 Introduction.....	57
2.2 Matériaux utilisés .....	57
2.2.1 Le ciment .....	57
2.2.2 Fumé de silice .....	57
2.2.3 Sable.....	60
2.2.4 Gravier .....	62
2.2.5 Superplastifiant.....	63
2.2.6 Fibres métalliques recyclées .....	64
2.3 Méthode des plans d'expériences .....	68
2.3.1 Plans de surfaces de réponse .....	68

2.4	Procédure expérimentale.....	70
2.5	Préparation des essais thermiques .....	81
2.6	Conclusion .....	83
<b>Chapitre III : Analyse des résultats et des interprétations</b>		
3.1	Introduction.....	84
3.2	Résultats et discussion .....	84
3.2.1	Propriétés physico-mécaniques du BHP fibré.....	84
3.2.2	Modélisation et analyse de variance (ANOVA).....	85
3.2.3	Diagramme de perturbation .....	91
3.2.4	Contour (2D) et courbe (3D) de surface pour toutes les réponses .....	93
3.2.5	Optimisation et validation expérimentale.....	102
3.2.6	Microstructure des BHPFM.....	104
3.2.7	Propriétés thermiques.....	108
3.3	Conclusion .....	112
	Conclusion générale .....	114
	Recommandations et Perspectives .....	115
	Références bibliographiques .....	116
	Annexe .....	130
	Annexe A : Fiches techniques des matériaux utilisés .....	130
	Annexe B : Logiciel de modélisation statistique Design-Expert .....	133
	Annexe C : Analyses MEB-DRX.....	137
C.1	Microscope électronique à balayage MEB.....	137
C.2	Diffractomètre « Empyrean MalvernPanalytical » .....	139
	Annexe D : La méthode de formulation .....	141

## Liste des tableaux

### *Chapitre I : Synthèse bibliographique*

<i>Tableau 1.1 Les différentes classes de BHP [23].</i>	7
<i>Tableau 1.2 Composition chimique de certaines fumées de silice [45]</i>	15
<i>Tableau 1.3 Affaissement et poids unitaire des mélanges de béton [8].</i>	34

### *Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes d'essais*

<i>Tableau 2. 1 Caractéristiques physico-mécanique du ciment (%)</i>	58
<i>Tableau 2. 2 Composition chimique et minéralogique du ciment (%)</i>	58
<i>Tableau 2. 3 Caractéristiques chimiques de la fumée de silice (%)</i>	59
<i>Tableau 2. 4 Caractéristiques chimiques sable Alluvionnaire (%)</i>	60
<i>Tableau 2. 5 Caractéristiques physiques du gravier (3/8) et (8/16)</i>	62
<i>Tableau 2. 6 Caractéristiques du MEDAFLOW RE 25.</i>	63
<i>Tableau 2. 7 Rapports d'aspect (L/d) des fibres recyclées.</i>	65
<i>Tableau 2. 8 Paramètres variables indépendante du plan central composite.</i>	72
<i>Tableau 2. 9 Proportions des mélanges du béton fibré à haute performance.</i>	75

### *Chapitre III : Analyse des résultats et des interprétations*

<i>Tableau 3.1 Résultats expérimentaux</i>	85
<i>Tableau 3. 2 Analyse de variance (ANOVA) des propriétés du BHP fibré à l'état frais.</i>	88
<i>Tableau 3. 3 Analyse de variance (ANOVA) des propriétés du BHP fibré à l'état durci.</i>	89
<i>Tableau 3. 4 Validation expérimentale des modèles étudiés.</i>	103

## Liste des figures

### *Chapitre I : Synthèse bibliographique*

<i>Figure 1.1 Les tours petronas de kuala lumpur - le plus haut édifice au monde en 1996 [22]</i> .....	5
<i>Figure 1.2 Le béton à haute résistance se profile à l'horizon des</i> .....	5
<i>Figure 1.3 Le Water Tower Place -Chicago 1970 [22]</i> .....	6
<i>Figure 1.4 Détail du diagramme de phase <math>\text{SiO}_2</math> - <math>\text{CaO}</math> - <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math> dans le secteur <math>\text{C}_3\text{S}</math> - <math>\text{C}_2\text{S}</math> - <math>\text{C}_3\text{A}</math> montrant les températures de fusion [35]</i> .....	9
<i>Figure 1.5 Microstructure de la pâte de ciment [36]</i> .....	11
<i>Figure 1.6 Transfert des efforts des granulats dans un BHP et un béton ordinaire (BO) [43]</i> .....	13
<i>Figure 1.7 Représentation schématique de deux pâtes de ciment frais ayant un rapport E/C de ciment de 0,65 et 0,25 [45]</i> .....	14
<i>Figure 1.8 Produits d'hydratation de type interne observé au microscope électronique à balayage [45]</i> .....	14
<i>Figure 1.9 Principe de fabrication du silicium ou du Ferrosilicium [22]</i> .....	15
<i>Figure 1.10 Fumée de silice vue au microscope électronique, (a) particules agglomérées naturellement, (b) particules individuelles dispersées [22]</i> .....	16
<i>Figure 1.11 Action du superplastifiant (défloculation et dispersion des grains de ciment)</i> .....	19
<i>Figure 1.12 Catégories et caractéristique des fibres</i> .....	20
<i>Figure 1.13 Influence de la dimension des granulats sur la répartition des fibres [63]</i> .....	21
<i>Figure 1.14 Exemple de l'amélioration apportée par l'ajout de fibres pour le renforcement [68]</i> .....	22
<i>Figure 1.15 Organigramme de la méthode de formulation des bétons ACI 211-1 [22]</i> .....	26
<i>Figure 1.16 Organigramme de la méthode de Sherbrooke [22]</i> .....	27
<i>Figure 1.17 Relation proposée entre le rapport E/L et la résistance à la compression [22]</i> .....	28
<i>Figure 1.18 Détermination du dosage en eau [22]</i> .....	29
<i>Figure 1.19 Dosage en gros granulat [22]</i> .....	29
<i>Figure 1.20 Etapes de formulation des BHP selon la norme ACI 363</i> .....	30
<i>Figure 1.21 Contours et tracés 3D de l'étalement (Slump) [83]</i> .....	33
<i>Figure 1.22 Effet de la teneur en fibres d'acier sur la résistance à la compression [84]</i> .....	35
<i>Figure 1.23 Capacité de charge du CFST, du noyau de béton non confiné, du tube d'acier seul et de la contribution de l'action composite [86]</i> .....	36
<i>Figure 1.24 Évolution de la résistance à la compression du béton en fonction des fibres [87]</i> .....	37

<i>Figure 1.25 Contours et tracés 3D de la résistance à la compression [83].....</i>	39
<i>Figure 1.26 Effet des combinaisons cendres volantes et Fibre d'acier de pneu usagé sur la résistance à la compression [89] .....</i>	40
<i>Figure 1.27 Relation entre cendres volantes, Fibre d'acier de pneu usagé et les valeurs relatives de La résistance à la compression de BHP : (a) 28 jours et (b) 120 jours [89].....</i>	41
<i>Figure 1.28 Résistance à la traction par fendage en fonction de la fraction volumique des fibres avec différents rapports d'aspect [6].....</i>	42
<i>Figure 1.29 Contours et tracés 3D pour la résistance à la traction fractionnée [83] .....</i>	43
<i>Figure 1.30 Résistance à la traction par fendage de différents bétons renforcés par des fibres, (a) éprouvettes renforcées par des fibres de polypropylène, (b) éprouvettes renforcées par des fibres d'acier, (c) éprouvettes hybrides renforcées par des fibres de polypropylène [85].....</i>	44
<i>Figure 1.31 Résistance à la flexion du béton fibré en fonction de la teneur en fibres d'acier [87] .....</i>	45
<i>Figure 1.32 Résistance à la flexion en fonction de la fraction volumique des fibres avec différents rapports d'aspect (En NC, <math>f_{flex} = 6.1</math> MPa) [6].....</i>	46
<i>Figure 1.33 Effet de la teneur en fibres d'acier sur la résistance à la flexion [84] .....</i>	47
<i>Figure 1.34 Dosage des fibres et rapport d'aspect requis pour améliorer la résistance résiduelle à la flexion [93].....</i>	48
<i>Figure 1.35 Contours et tracés 3D pour la résistance à la flexion [83].....</i>	49
<i>Figure 1.36 Absorption d'eau précoce et ultime de différents bétons renforcés de fibres, (a) fibres de polypropylène, (b) fibres d'acier, (c) fibres hybrides [85] .....</i>	50
<i>Figure 1.37 Contours et tracés 3D de l'absorption d'eau [83].....</i>	51
<i>Figure 1.38 Conductivité thermique mesurée du BAP (SCC) et des BAP renforcé par des fibres (FRSCC) en fonction de la température [14] .....</i>	52
<i>Figure 1.39 Propriétés mécaniques des BAP et BAP fibrés en fonction de la température ; (a) Résistance à la compression (b) Résistance à la traction, (c) Module élastique relatif [14] .....</i>	53
<i>Figure 1.40 Images MEB [97] .....</i>	54
<i>Figure 1.41 Observation MEB, (a) l'interface fibre-matrice de ciment, (b) Empreinte de la fibre métallique [61]. .....</i>	55
<i>Figure 1.42 L'interface fibre-pâte dans le ciment renforcé de fibres d'acier [98]. .</i>	56

## **Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes d'essais**

<i>Figure 2. 1 Courbe granulométrique du ciment (CPA CEM I 42.5 R).....</i>	58
<i>Figure 2. 2 Analyse par DRX du ciment utilisé (CEM I CPA 42.5 R) .....</i>	59
<i>Figure 2. 3 Courbe granulométrique de la fumée de silice.....</i>	59
<i>Figure 2. 4 Analyse par DRX du fumé de silice.....</i>	60
<i>Figure 2. 5 Courbe granulométrique du sable Alluvionnaire .....</i>	61

<i>Figure 2. 6 Vue microscopique électronique à balayage de sable Alluvionnaire - G=12000.....</i>	61
<i>Figure 2. 7 Analyse par DRX du sable Alluvionnaire.....</i>	62
<i>Figure 2. 8 Courbe granulométrique des graviers G (3/8) et G (8/16) .....</i>	63
<i>Figure 2. 9 Préparation et traitement NaOH des câbles recyclés.....</i>	64
<i>Figure 2. 10 Rapports d'aspect (L/d) des fibres utilisées.....</i>	65
<i>Figure 2. 11 Machine de traction MTS Criterion (Modèle 45).....</i>	66
<i>Figure 2. 12 Vue MEB-EDS des fibres : (a) L/d = 46 et L/d = 80, (b) L/d = 53, (c) L/d = 63, (d) L/d = 73. ....</i>	67
<i>Figure 2. 13 plan central composite conçu pour analyser deux facteurs. Les points factoriels sont représentés en noir, les points en étoile sont en gris clair, et les points centraux sont en blanc [101]. ....</i>	70
<i>Figure 2. 14 Conception composite central sous la méthodologie de surface de réponse [102]......</i>	71
<i>Figure 2. 15 Diagramme de flux illustrant la méthodologie globale.....</i>	74
<i>Figure 2. 16 Essai d’Affaissement.....</i>	76
<i>Figure 2. 17 La résistance à la compression mesurée sur des échantillons écrasés à 28 jours .....</i>	77
<i>Figure 2. 18 La résistance à la flexion mesurée sur des échantillons écrasés à 28 jours .....</i>	78
<i>Figure 2. 19 La résistance à la traction par fendage mesurée .....</i>	79
<i>Figure 2. 20 Image Microscopie électronique à balayage « Quattro ESEM » .....</i>	80
<i>Figure 2. 21 Empyrean Malvern Panalytical.....</i>	81

### **Chapitre III : Analyse des résultats et des interprétations**

<i>Figure 3. 1 Diagramme de distribution de probabilité pour : (a) l'affaissement, (b) la résistance à la compression à 28 jours, (c) la résistance à la flexion à 28 jours, (d) la résistance à la traction fendue à 28 jours, (e) l'absorption d'eau.....</i>	90
<i>Figure 3. 2 Diagramme de perturbation pour : (a) l'affaissement, (b) la résistance à la compression à 28 jours, (c) la résistance à la flexion à 28 jours, (d) la résistance à la traction fendue à 28 jours, (e) l'absorption d'eau. ....</i>	91
<i>Figure 3. 3 Diagrammes de surface de réponse pour l'affaissement.....</i>	94
<i>Figure 3. 4 Diagrammes de surface de réponse pour la résistance à la compression à 28 jours .....</i>	96
<i>Figure 3. 5 Diagrammes de surface de réponse pour la résistance à la flexion à 28 jours .....</i>	98
<i>Figure 3. 6 Diagrammes de surface de réponse pour la résistance à la traction fendue à 28 jours .....</i>	100
<i>Figure 3. 7 Diagrammes de surface de réponse pour l'absorption d'eau .....</i>	101
<i>Figure 3. 8 Diagramme de la vue en rampe pour l'optimisation. ....</i>	104

<i>Figure 3. 9 Image Microscope électronique à balayage (MEB) de BHPFM à un agrandissement de 5000, 1000 et 50</i> .....	106
<i>Figure 3. 10 Analyse par diffraction des rayons X (DRX) du BHPFM étudié</i> .....	108
<i>Figure 3. 11 Température imposée (<math>T = 50^{\circ}\text{C}</math>) en fonction du temps (minutes) en orientation horizontale</i> .....	110
<i>Figure 3. 12 Température imposée (<math>T = 50^{\circ}\text{C}</math>) en fonction du temps (minutes) en orientation verticale</i> .....	110
<i>Figure 3. 13 Température horizontale imposée (<math>T= 50^{\circ}\text{C}</math>) en fonction de la longueur (mm)</i> . ....	111
<i>Figure 3. 14 Température verticale imposée (<math>T= 50^{\circ}\text{C}</math>) en fonction de la longueur (mm)</i> .....	111

---

# Introduction Générale

---

## Introduction Générale

Le béton haute performance (BHP), reconnu pour sa résistance exceptionnelle, sa durabilité et sa facilité de mise en œuvre, est privilégié dans la construction de gratte-ciels, de ponts, dans la réhabilitation des infrastructures, et dans de nombreuses applications architecturales. Ce type de béton nécessite une formulation spéciale, intégrant des additions minérales y compris la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier, ainsi que des renforts en fibres comme les fibres d'acier ou les fibres de polypropylène, pour améliorer ses propriétés mécaniques, sa durabilité et ses performances globales.

En outre, l'utilisation de fibres d'acier peut permettre de prévenir la congestion des armatures, de diminuer les coûts d'exécution, et de favoriser l'utilisation durable des ressources [1].

Récemment, le secteur de la construction explore de plus en plus les possibilités d'incorporer des fibres issus des pneus en fin de vie dans les matériaux cimentaires, en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation de fibres d'acier recyclées comme renfort [2,3].

L'utilisation de fibres recyclées offre une précieuse opportunité de réduire l'impact environnemental et de limiter l'élimination des déchets dans les décharges. De nombreuses études ont montré la faisabilité et la viabilité économique de l'incorporation de différents types de fibres récupérées à partir de sources de déchets dans la production de béton armé [4,5].

Plusieurs études [6–8] ont indiqué que les performances du béton renforcé de fibres d'acier sont influencées par divers paramètres. Ces paramètres comprennent le rapport d'aspect (rapport longueur-diamètre,  $L/d$ ) des fibres, la fraction volumique des fibres et la distribution des fibres. Il a été observé que ces facteurs améliorent significativement les propriétés mécaniques du béton.

L'un des principaux avantages du renforcement des matériaux à base de ciment avec des fibres réparties de manière aléatoire réside dans l'amélioration de la résistance thermique. Certaines études indiquent qu'augmenter l'ajout de fibres d'acier dans le béton entraîne toujours une conductivité thermique plus élevée [9]. Selon d'autres études de recherche [10,11], le béton à haute densité et le béton renforcé de fibres présentent une conductivité thermique comprise entre 2,0 et 3,2 W/m. K.

L'impact des températures élevées, ainsi que des cycles de chauffage et de refroidissement associés, est largement reconnu pour provoquer d'importantes

transformations physiques et chimiques dans le béton, conduisant à une détérioration de ses performances globales [12,13].

De plus, l'ajout de fibres d'acier augmente la conductivité thermique du béton renforcé de fibres d'acier [14–16], ce qui entraîne un gradient de température relativement faible et des contraintes thermiques réduites pendant le chauffage. Pour ces raisons, le béton renforcé de fibres d'acier a une meilleure performance en termes de conduction thermique que les matériaux cimentaires ordinaires.

Cependant, il semble qu'il y ait toujours un manque de recherche systématique et quantitative sur l'évolution de l'effet de la température dans les directions horizontale et verticale, ainsi que sur le rapport d'aspect ( $L/d$ ) des fibres sur la matrice composite des bétons renforcés de fibres à haute performance.

À cette fin, cette recherche est consacrée à l'évaluation de l'isolation thermique et met également en évidence le transfert de chaleur, la conductivité thermique et l'isolation dans différents échantillons de béton renforcé de fibres à haute performance.

La méthodologie de surface de réponse (RSM) sert d'outil statistique efficace pour la conception expérimentale, la modélisation, l'évaluation des effets des facteurs et l'optimisation des conditions [17,18]. Cette méthodologie identifie à la fois les interactions linéaires et les contributions quadratiques des variables indépendantes aux propriétés du béton, permettant ainsi l'optimisation des résultats souhaités.

L'analyse de la variance (ANOVA) est une méthode statistique employée pour évaluer les relations entre les variables et pour déterminer si des différences significatives existent entre les groupes. Elle permet d'estimer les paramètres statistiques et de comprendre dans quelle mesure chaque source de variation influe sur la variabilité observée globale.

Notre thèse actuelle est structurée en trois chapitres distincts.

Le premier chapitre commence par une revue bibliographique sur les bétons fibrés à haute performance (BHP). Ensuite, on s'intéressera au rôle des fibres dans la matière cimentaire en citant les travaux récents dans ce domaine. Une grande partie de ce chapitre sera consacrée aux différentes méthodes de formulation des BHP et les études menées sur le comportement mécanique des BHP fibrés.

Le deuxième chapitre met l'accent sur les caractéristiques des matériaux, les procédures d'essai requises, ainsi que les méthodologies employées pour

mettre en place le programme expérimental. Il détaille également la sélection et la préparation du plan d'expérience que l'on a choisi d'utiliser.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de nos résultats expérimentaux, suivis d'analyses et d'interprétations approfondies de ces résultats.

Enfin, notre thèse se conclut par une conclusion générale qui récapitule les principales découvertes de notre étude et formule des recommandations pour orienter de futures recherches dans ce domaine.

---

# Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

---

## 1.1 Introduction

Les travaux présentés dans Ce chapitre a pour objectif de présenter une revue bibliographique sur les bétons fibrés à haute performance (BHP). Dans un premier temps nous allons essayer de donner un aperçu général sur les BHP notamment leurs compositions et le rôle de leurs principaux constituants. À l'échelle plus approfondie, on s'intéresse aux rôles des fibres dans la matière cimentaire en citant les travaux récents dans ce domaine. En plus une grande partie de ce chapitre est dédiée aux diverses approches de formulation des BHP. Et enfin, on terminera par une synthèse sur les études menées sur le comportement mécanique des BHP fibré.

## 1.2 Historique

Le BHP est un matériau employé dans la construction de structures à la fois plus résistantes et esthétiquement plus attrayantes. Cependant, il ne devrait pas être considéré comme un "super béton" sans défauts et inconvénients. Au fur et à mesure que nous approfondissons notre compréhension de ce matériau grâce à une utilisation croissante, à la recherche, à des découvertes ainsi qu'à des expériences réussies et même à des échecs, nous apprenons à l'exploiter de manière de plus en plus efficace, au profit de tous [19–21]. L'acceptation des BHP et leur utilisation s'accroît lentement, à l'heure actuelle, ils ne représentent qu'une faible part du marché du béton [22]. Cependant, plusieurs pays ont lancé des projets de recherche spécifiques sur les BHP vers la fin des années 1980. Parmi ceux-ci, on retrouve les États-Unis, la Norvège, la France, la Suisse, l'Australie, l'Allemagne, le Japon, la Corée, la Chine et Taiwan. De nos jours, la création d'un BHP n'est plus un défi dont on peut se vanter en raison de la profusion d'informations disponibles grâce à de nombreux séminaires, colloques, cours intensifs et articles publiés dans diverses revues. Cependant, le véritable défi consiste à changer les habitudes de certains concepteurs et agences gouvernementales afin qu'ils adoptent ces types de bétons [22]. Le BHP permet aux concepteurs de construire des structures immenses comme les gratte-ciels ayant des dalles moins épaisses et des colonnes plus élancées, cela permet de concevoir un édifice beaucoup plus esthétique (Figure 1.1).



Figure 1.1 Les tours petronas de kuala lumpur - le plus haut édifice au monde en 1996 [22]

Les BHP ont une résistance et une durabilité comparables à celles des roches naturelles. Parce qu'ils restent suffisamment fluides pendant une période suffisante, ils peuvent être fabriqués dans des coffrages complexes. De plus, ils peuvent être facilement renforcés à l'aide d'armatures en acier ou de matériaux composites, et à l'aide de câbles en acier ou de fibres, ils peuvent être soumis à une précontrainte ou à une post contrainte. L'utilisation de bétons à haute résistance dans la construction d'édifices aux États-Unis est illustrée à la figure 1.2.

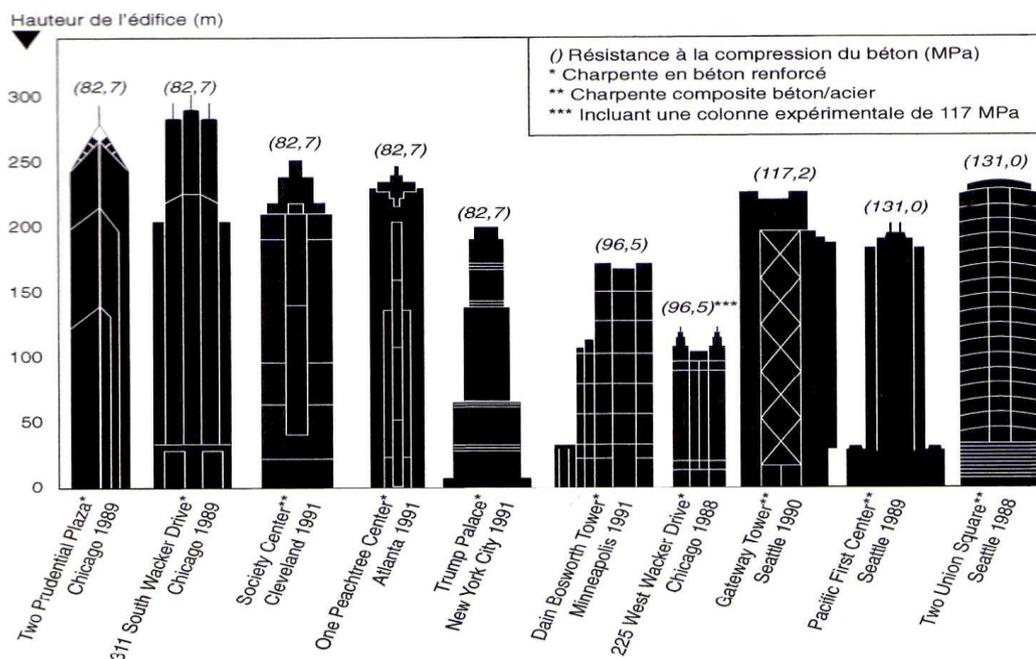
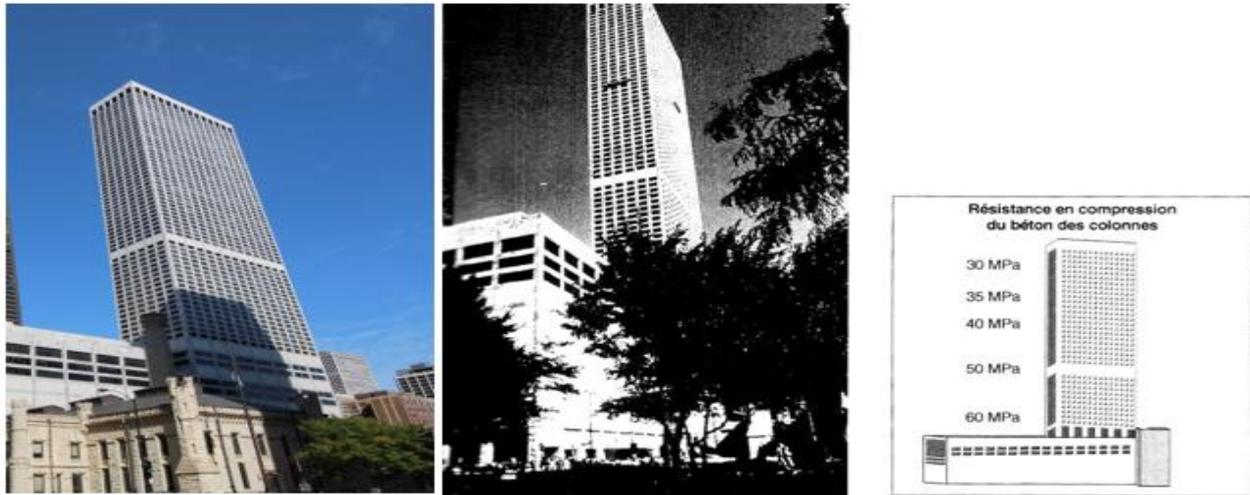


Figure 1.2 Le béton à haute résistance se profile à l'horizon des États-Unis [22]

Parmi les applications des BHP les plus célèbres dans le monde on peut citer : Le Water Tower Place (à Chicago en 1975) (figure 1.3), La Grande Arche de la Défense (à Paris en 1989), Les Tours Patronnas (à Kuala Lumpur 1998), Le viaduc de Millau (en France 2004), La Burdj Khalifa (à Dubaï 2008).



*Figure 1.3 Le Water Tower Place - Chicago 1970 [22]*

## 1.3 C'est quoi un BHP

### 1.3.1 Définition

Un béton à haute performance se forme en combinant des granulats, du ciment, de l'eau et des additifs. À un stade précoce de durcissement, il présente des propriétés mécaniques plus robustes que les bétons conventionnels, ce qui en fait un matériau adapté à la construction de structures capables de supporter des charges plus importantes ou d'adopter des designs plus élancés [23].

Le béton à haute performance se définit par une résistance caractéristique à la compression à 28 jours ( $f_{c28}$ ) dépassant les 60 MPa, et un rapport pondéral E/C inférieur à 0.40. Sa résistance à la compression peut même aller de 100 MPa à 150 MPa, en fonction de facteurs tels que la nature du granulats et la quantité de ciment utilisé. Les bétons à haute performance (BHP) peuvent être catégorisés en cinq classes distinctes, déterminées par des résistances à la compression qui représentent actuellement des seuils technologiques dans le domaine des BHP [23]. Chaque classe a une plage de résistance de 25 MPa, mais il est important de noter qu'elles ne doivent pas être considérées comme des limites immuables et strictes. En revanche, elles représentent des valeurs typiques qui peuvent différer selon les endroits. Les cinq principales catégories de BHP sont répertoriées dans le tableau 1.1.

*Tableau 1.1 Les différentes classes de BHP [23].*

Résistance à la compression (MPa)	50 à 75	75 à 100	100 à 125	125 à 150	> 150
Classe de BHP	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V

Les bétons à haute performance se distinguent des bétons conventionnels par leur caractère fluide lors de leur mise en place, leur résistance mécanique élevée dès les premiers stades de durcissement, un module d'élasticité supérieur, ainsi qu'une déformation sous charge plus faible. En conséquence, la perméabilité réduite de ces types de béton les rend particulièrement efficaces pour résister à l'infiltration d'agents externes agressifs.

Certains entrepreneurs préfèrent opter pour l'utilisation de BHP, car cela leur permet de retirer les coffrages plus tôt. En parallèle, leur capacité à minimiser le fluage et à réduire le retrait s'avère avantageuse dans la construction de gratte-ciels, car cela contribue à accroître la rigidité de la structure. Chaque fois qu'une colonne est construite à l'aide d'un BHP, la rigidité latérale de l'édifice est augmentée, réduisant les oscillations causées par les charges de vent et augmentant le confort des occupants des étages supérieurs.

### **1.3.2 Composantes du BHP**

Le béton de haute performance est fabriqué à partir de granulats, d'eau, de ciment, de superplastifiant et parfois des fumées de silice. Dans certains cas, un retardateur de prise peut également être ajouté pour prolonger la période de mise en œuvre. Il est essentiel que le retardateur et le superplastifiant soient compatibles entre eux, ainsi que le type de ciment utilisé. La résistance du béton dépend naturellement de la résistance du ciment, donc on utilise généralement du ciment de classe 52,5N pour les bétons à haute résistance, voire du 52,5R si l'on recherche une résistance initiale très élevée.

L'accroissement de la résistance à la compression du béton s'accompagne généralement d'améliorations dans d'autres caractéristiques telles que la résistance aux efforts de traction, la rigidité, la résistance à l'usure et la durabilité. Pour certaines applications, ces caractéristiques peuvent même revêtir une plus grande importance que le niveau de résistance. Dans de telles situations, il est crucial de garder à l'esprit que la sélection des composants et de la composition ne doit pas se restreindre à la simple quête de la résistance maximale, mais plutôt à l'atteinte de la performance la plus efficace des propriétés souhaitées.

### 1.3.2.1 Ciment Portland

Il est possible de produire des BHP en n'utilisant que du ciment Portland. Cependant, il peut être avantageux, à la fois du point de vue économique et du point de vue des propriétés rhéologiques, voire parfois de la résistance, de remplacer partiellement une quantité de ciment par des matériaux cimentaires supplémentaires lorsque ces derniers sont accessibles à des tarifs concurrentiels [24–26].

La caractéristique commune de la plupart des matériaux cimentaires supplémentaires est qu'ils contiennent une variété réactive de silice vitreuse qui, en présence d'eau, peut réagir à la chaleur générée par l'hydratation du  $C_2S$  et du  $C_3S$  en présence de chaux, formant ainsi un silicate de calcium hydraté similaire à celui produit lors de l'hydratation du ciment Portland [27]. Selon la norme ciments NF EN 197-1 [28], les ciments de types CEM I, CEM II ou CEM III, classes de résistance 42,5 ou 52,5 sont conseillées dans la composition des BHP.

Le clinker constitue l'un des deux ingrédients de base du ciment Portland, et il est produit par le chauffage d'un mélange soigneusement dosé de matières premières qui renferment les quatre principaux oxydes nécessaires à sa formation :  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  et  $Fe_2O_3$ . Le deuxième ingrédient est le sulfate de calcium que l'on retrouve dans le ciment sous forme de gypse ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), d'hémihydrate ( $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$ ), d'anhydrite ( $CaSO_4$ ) ou de sulfate de calcium ( $CaSO_4$ ) ou un mélange de deux ou trois de ces formes [29–31].

La composition chimique des composants de base que l'on utilise pour fabriquer du ciment Portland doit être ajustée de façon que la composition finale du mélange se retrouve dans la zone de composition limitée par le  $C_3S$ , le  $C_2S$  et le  $C_3A$  dans le diagramme de phase ternaire  $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Al_2O_3$  (Figure 1.4) parce que ces trois phases peuvent coexister seulement dans ce domaine. Pour simplifier les choses, dans un premier temps, on peut supposer que le rôle de l'oxyde de fer,  $Fe_2O_3$ , et de l'alumine,  $Al_2O_3$ , est assez semblable du point de vue structural et thermodynamique. Cependant, si les ciments Portland ne contenaient que les trois oxydes  $SiO_2$ ,  $CaO$  et  $Al_2O_3$ , pour obtenir les températures nécessaires, il serait requis de chauffer les matières premières à des niveaux nettement plus élevés. La présence d'oxyde de fer dans le clinker vise principalement à abaisser la température à laquelle la phase interstitielle fond lors de la production du ciment [32–34].

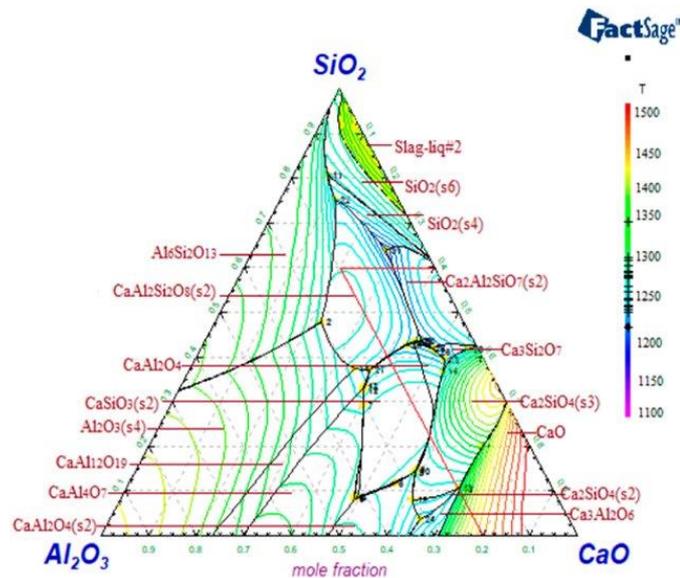
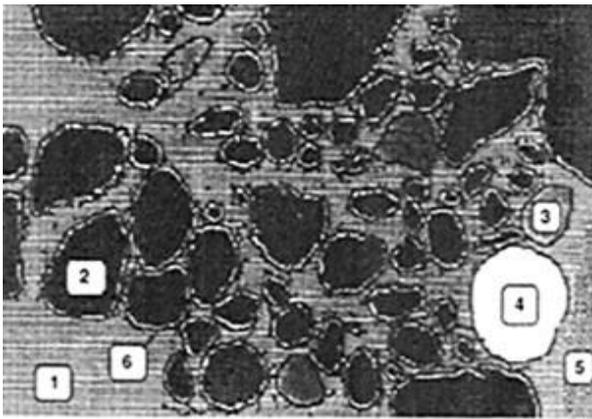


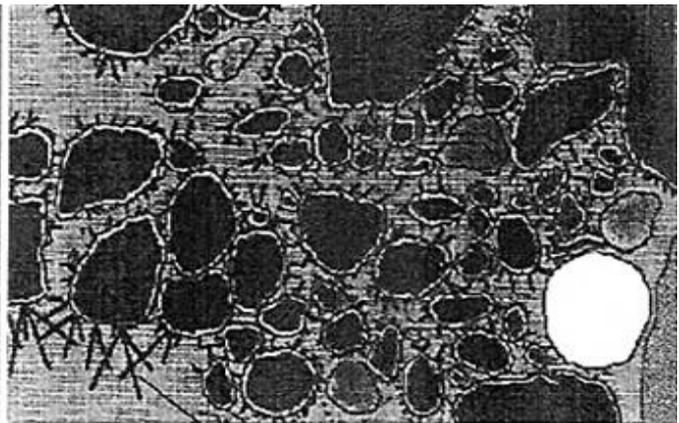
Figure 1.4 Détail du diagramme de phase  $\text{SiO}_2$  -  $\text{CaO}$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans le secteur  $\text{C}_3\text{S}$  -  $\text{C}_2\text{S}$  -  $\text{C}_3\text{A}$  montrant les températures de fusion [35]

En règle générale, les calcaires apportent la quantité de  $\text{CaO}$  nécessaire dans le cru et une argile ou un schiste apportent les quantités nécessaires de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Si tel n'est pas le cas, le cimentier compense l'insuffisance de ses matières premières par des apports de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Quelques calcaires siliceux naturels contiennent des proportions de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  très voisines de celles que l'on retrouve dans un clinker de ciment Portland si bien qu'ils peuvent être utilisés pratiquement tels quels. Dans de tels cas, on peut avoir à rajouter un peu de sable, de bauxite ou d'oxyde de fer comme source de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pour corriger la composition chimique des matières premières.

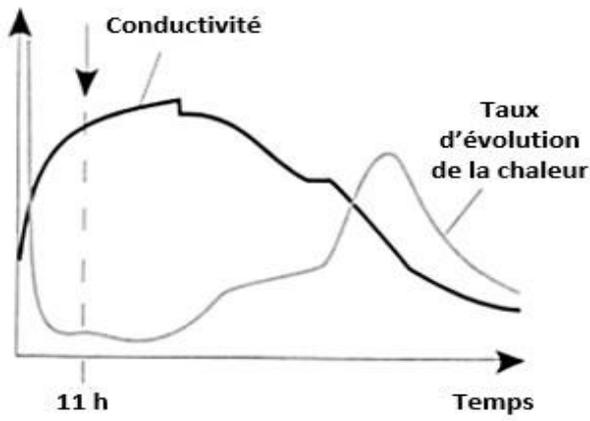
Une fois que l'ajustement optimal des proportions de ces quatre principaux oxydes est réalisé, les fabricants de ciment Portland doivent également prendre en compte les impuretés contenues dans les matières premières. Au cours du processus de cuisson, ces impuretés peuvent entraîner la formation de phases plus ou moins souhaitables, qui peuvent interférer ou non avec le processus d'hydratation habituel d'un mélange de phases pures  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$ . La figure 1.5, illustre les cinq étapes d'hydratation du ciment Portland.



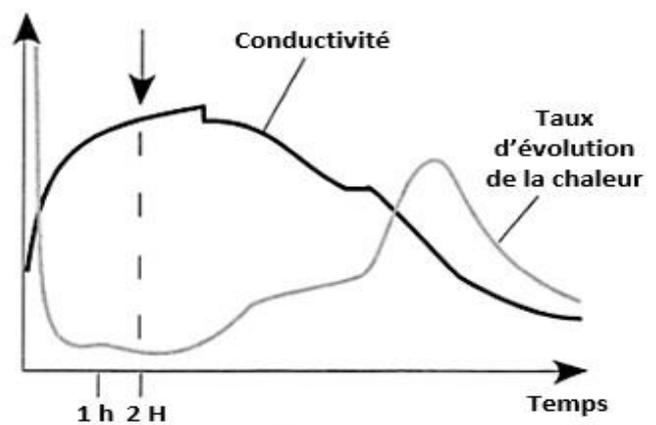
5 micromètres 1 Eau 3 Gypse 5 Granulats  
2 Clinker 4 Bulle d'air 6 Hydrates



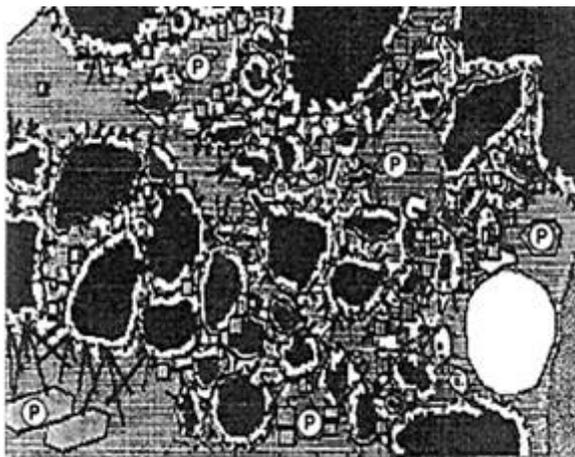
Les grands aiguilles représentent  
Les cristaux d'ettringite



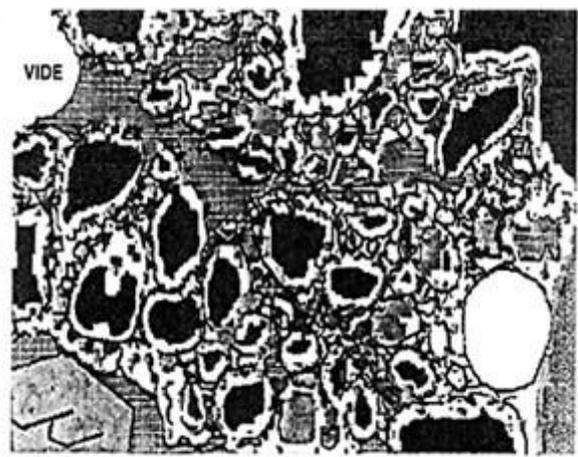
T=1h



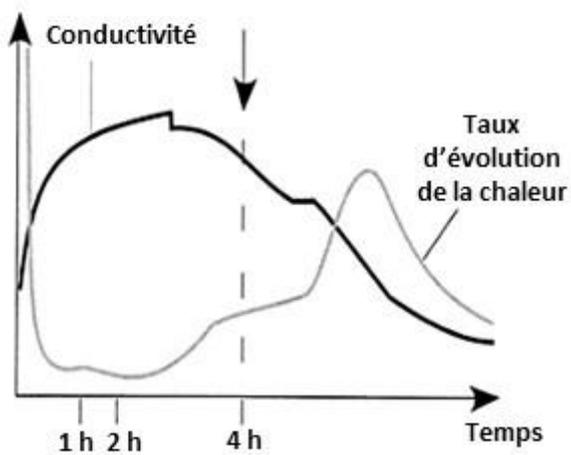
T=2h



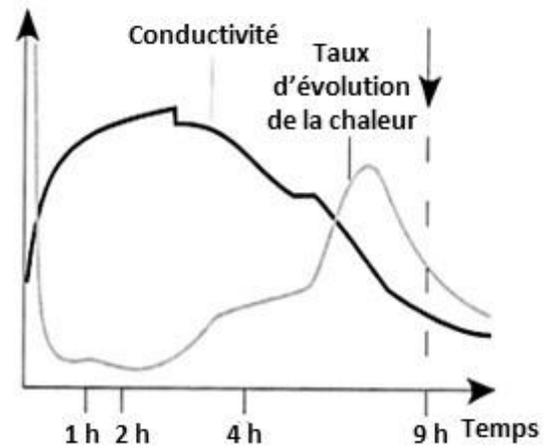
P : portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  5 micromètres



Quand il n'y a plus de sulfate de calcium  
Les cristaux d'ettringite se développent  
et le monosulfoaluminate de calcium  
est précipité 5 micromètres



T=4h



T=9h

Figure 1.5 Microstructure de la pâte de ciment [36].

### 1.3.2.2 Granulats

Les granulats utilisés pour fabriquer des BHP peuvent être des sables naturels, des graviers ou des granulats concassés. La composition de la roche-mère qui a été concassée ou réduite à sa taille par divers processus naturels ou mécaniques détermine la résistance des granulats naturels [37,38]. Il est clair que la résistance des granulats naturels ne peut pas être améliorée de manière significative ; il est préférable de les utiliser dans leur état d'origine. Il est recommandé d'éviter l'utilisation de roches contenant des plans de clivage faibles ou de roches altérées lors de la fabrication de BHP. Des études géologiques et pétrographiques sont utiles pour identifier des granulats robustes et résistants [22].

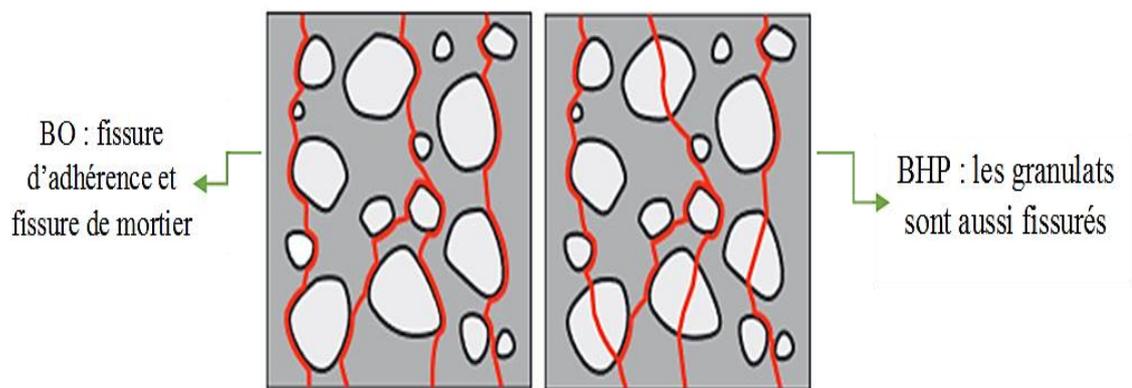
Les BHP se distinguent principalement par un rapport eau/liant inférieur à celui des bétons traditionnels. Afin d'améliorer la résistance de la pâte de ciment hydratée, en particulier dans la zone de transition, ils intègrent fréquemment des particules ultrafines comme la fumée de silice. Ils sont fabriqués avec des granulats résistants. Puisque les particules du liant sont rapprochées les unes des autres, elles peuvent développer des bs très forts durant leur hydratation, mais cette proximité des grains de ciment peut aussi créer des problèmes rhéologiques dans le béton frais [39,40].

De nombreuses études ont été menées pour maximiser la distribution granulométrique des squelettes granulaires ou des poudres. L'objectif principal était généralement d'augmenter la densité du squelette granulaire final plutôt que d'améliorer la facilité de manipulation du béton. La plupart des méthodes actuellement utilisées préviennent des travaux de Fuller et Thompson (1907) et de Powers (1968) en Amérique du nord et de Bolomey (1935), Caquot (1937) et Faury (1947) en France. Par exemple, il est communément admis que les bétons avec des particules plates et allongées ne sont pas plus maniables, tandis que les bétons avec des particules cubiques ou sphériques sont généralement plus faciles à manipuler. Des normes ont été créées et ont fait leurs preuves dans l'industrie. De plus, un modèle a été mis au point au LCPC, appelé modèle d'empilement compressible (MEC) [41]. Cet outil mathématique permet d'optimiser la répartition granulaire d'un béton en se basant sur des informations concernant la granularité des différentes coupures et la forme des grains, évaluée à travers un test de compacité à sec réalisé sur chaque classe granulaire. Cela permet d'adopter une approche scientifique dans la formulation du matériau, éliminant ainsi la nécessité de se fier uniquement aux courbes granulaires des composants.

Selon Nichols (1982), pour chaque type de résistance du béton et pour chaque rapport E/C donné, des dimensions maximales optimales pour les granulats existent « généralement inférieur à 20 mm pour les BHP ». Les

granulats concassés ont généralement de meilleures performances mécaniques que les granulats roulés en termes de géométrie [42].

Le béton à haute performance se distingue par une meilleure liaison entre les granulats et la matrice de ciment. De plus, la résistance des granulats est presque égale à celle de la matrice. Les fissures ont généralement tendance à se propager à travers les granulats lorsque le matériau approche de la rupture. Cependant, les fissures d'adhérence entre la matrice de mortier et les granulats se propagent généralement autour des granulats dans le béton conventionnel (voir figure 1.6) [43]. En revanche, le béton conventionnel cède en raison d'un réseau de fissures présentes dans le mortier, tandis que les granulats restent intacts.

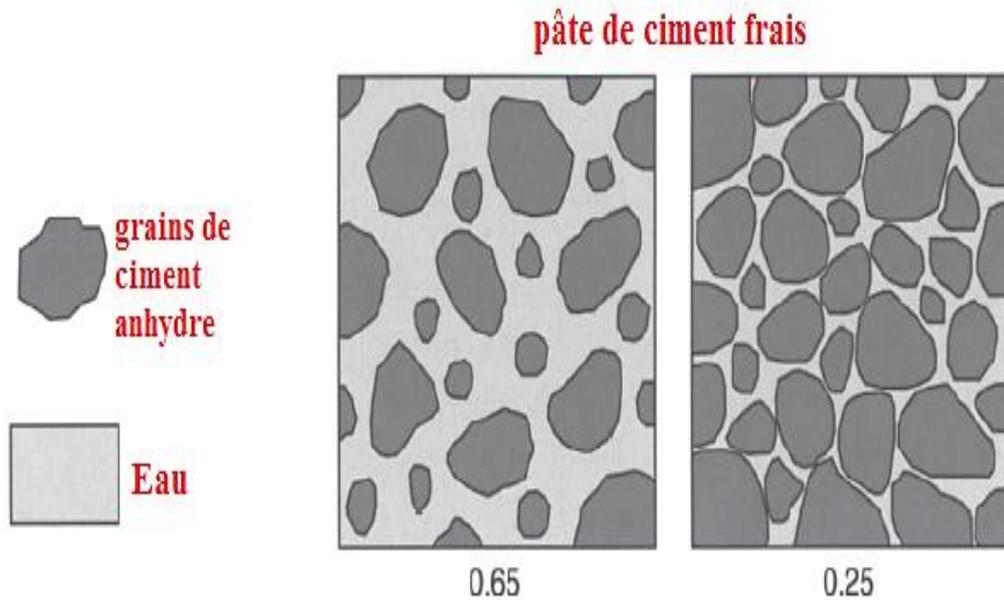


*Figure 1.6 Transfert des efforts des granulats dans un BHP et un béton ordinaire (BO) [43]*

### 1.3.2.3 Eau

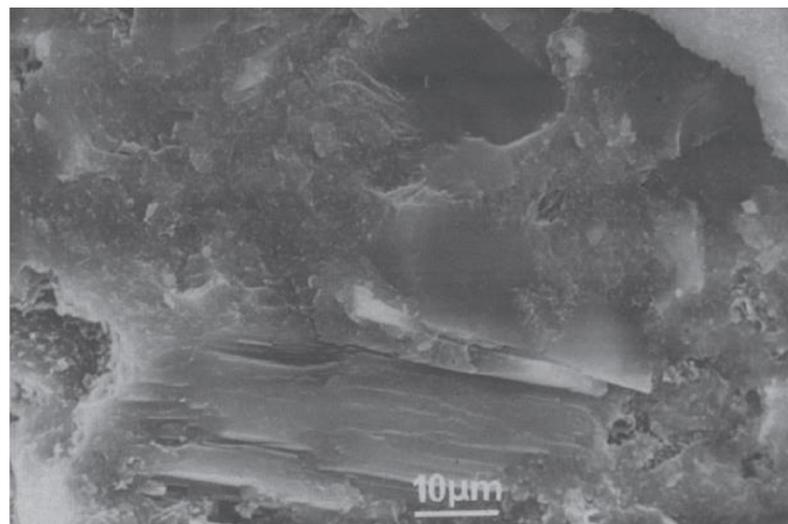
Le béton a besoin de l'eau pour accomplir deux fonctions essentielles : d'une part, elle joue un rôle physique pour donner au béton les qualités rhéologiques nécessaires, et d'autre part, elle remplit une fonction chimique pour faciliter la réaction d'hydratation. L'idéal serait un béton qui contient juste la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la résistance maximale du ciment tout en donnant au béton frais les caractéristiques rhéologiques nécessaires pour sa mise en place [44].

Comme le montre la figure 1.7, lorsque le rapport eau/ciment de la pâte de ciment hydratée est réduit, les particules se rapprochent de la pâte de ciment fraîchement mélangée. En conséquence, il y a moins de porosité capillaire et moins d'espace libre pour le développement des produits extérieurs [45].



*Figure 1.7 Représentation schématique de deux pâtes de ciment frais ayant un rapport E/C de ciment de 0,65 et 0,25 [45].*

Cependant La formation de produits internes caractérisés par une texture fine est favorisée par une diminution du rapport eau/liant. La pâte de ciment hydratée à un rapport eau/liant très faible ne contient pas de grands empilements de plaquettes hexagonales de chaux, de longues aiguilles d'ettringite ou de longs filaments poilus de C-S-H caractéristiques des pâtes à haut rapport eau/liant (Aïtcin 1998).



*Figure 1.8 Produits d'hydratation de type interne observé au microscope électronique à balayage [45]*

### 1.3.2.4 Ajouts

En remplaçant une partie du ciment par des matériaux cimentaires qui ne contiennent pas de  $C_3S$ , de  $C_3A$  ou de  $C_4AF$ , il devient généralement plus facile de contrôler la rhéologie de n'importe quel béton, à condition évidemment que la distribution et la forme des particules de ces ajouts cimentaires restent à peu près les mêmes que celles des particules de ciment qu'ils remplacent. Ce type de substitution a plusieurs avantages. En premier lieu, sur le plan financier, les ajouts de ciment sont généralement moins coûteux que le ciment (sauf la fumée de silice souvent). De plus, cette méthode permet d'économiser considérablement la quantité de superplastifiant nécessaire pour obtenir la maniabilité souhaitée. Cependant, le dosage idéal des ajouts de ciment doit également être pris en compte en fonction de la résistance nécessaire à un stade précoce du durcissement [46].

#### ➤ Fumée de silice

La fumée de silice est un coproduit de la fabrication du silicium, d'autres alliages de silicium ou de zircon ou d'autres alliages. En présence de charbon (et de fer pour la production de fer silicium), le quartz est réduit dans des fours à arc électrique, où le silicium et les alliages de silicium sont produits (voir figure 1.9).

Comme indiqué dans le tableau 1.2, la silice est la principale composante chimique de la fumée de silice. La quantité de  $SiO_2$  dans la fumée de silice varie selon le type d'alliage utilisé. La teneur en silicium de l'alliage est généralement en corrélation avec la teneur en  $SiO_2$  de la fumée de silice. En général, les fumées de silice produites lors de la fabrication de silicium métal contiennent généralement plus de 90 % de  $SiO_2$ , tandis que les fumées de silice produites lors de la fabrication d'un alliage Fe-Si à 75 % contiennent généralement plus de 85 % de  $SiO_2$  [47].

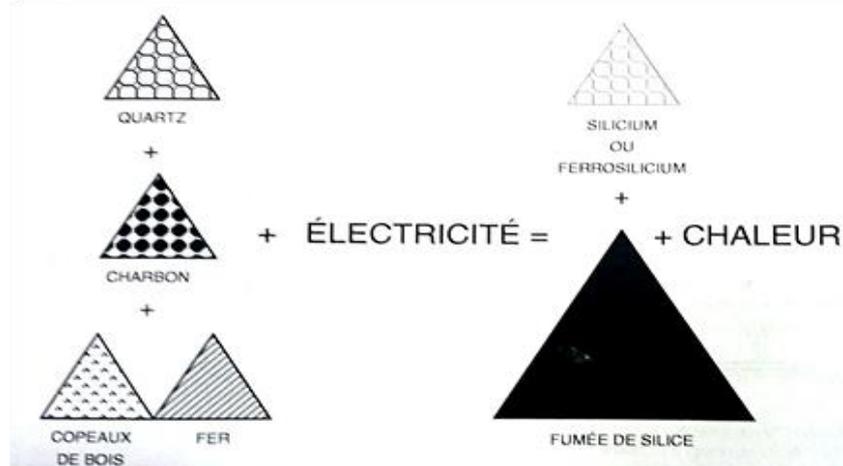


Figure 1.9 Principe de fabrication du silicium ou du Ferrosilicium [22]

Tableau 1.2 Composition chimique de certaines fumées de silice [45]

	Silicium (grise)	Ferrosilicium (grise)	Blanche
<b>SiO<sub>2</sub></b>	93,7	87,3	90,0
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,6	1,0	1,0
<b>CaO</b>	0,2	0,4	0,1
<b>Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub></b>	0,3	4,4	2,9
<b>MgO</b>	0,2	0,3	0,2
<b>Na<sub>2</sub> O</b>	0,2	0,2	0,9
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,5	0,6	1,3
<i>Perte au feu</i>	2,9	0,6	1,2

Les sphères de fumée de silice ont une dimension moyenne 100 fois inférieure à celle d'une particule de ciment typique car elles sont des sphères avec des diamètres allant de 0.1  $\mu\text{m}$  à 1 ou 2  $\mu\text{m}$ . Ainsi, pour photographier les particules de fumée de silice, il est nécessaire d'utiliser un microscope électronique à balayage ou par transmission (voir figure 1.10).

La densité de la fumée de silice est de l'ordre de 2,2, une densité typique de la silice vitreuse. À cause de sa finesse exceptionnelle, la surface spécifique de la fumée de silice doit être déterminée par adsorption d'azote, ce qui rend impossible sa mesure de la même manière que celle du ciment Portland. Les valeurs typiques que l'on retrouve dans la documentation sont comprises entre 15 000 et 25 000  $\text{m}^2/\text{kg}$ , En utilisant la même technique de mesure, la surface spécifique du ciment Portland ordinaire est d'environ 1 500  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

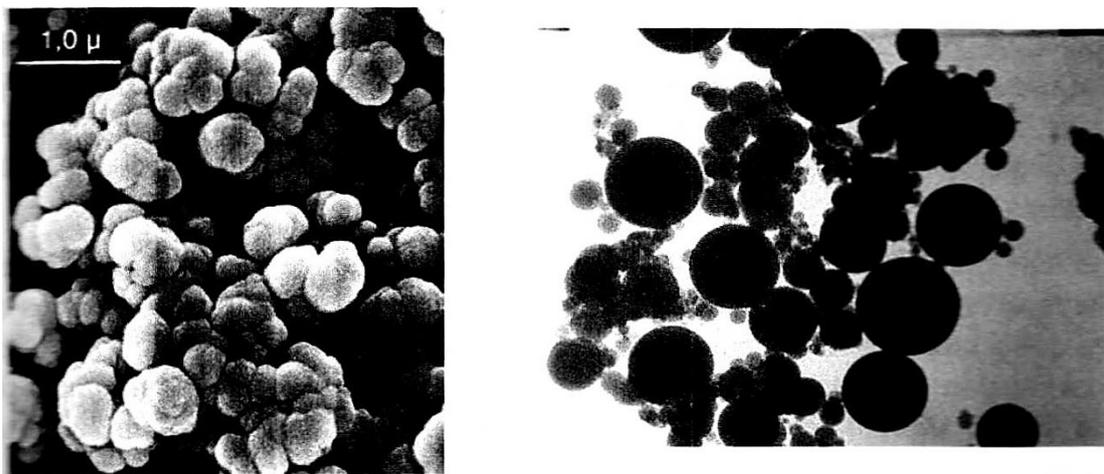


Figure 1.10 Fumée de silice vue au microscope électronique, (a) particules agglomérées naturellement, (b) particules individuelles dispersées [22]

Pour obtenir des résistances élevées, l'ajout idéal de fumée de silice serait d'environ 10 % du poids du ciment [48]. Il est important de noter que

l'application de la fumée de silice nécessite l'ajout d'un super plastifiant, qui a pour but de déployer les grains de ciment et de la fumée de silice. L'ajout de fumée de silice au béton sans superplastifiant augmente la demande en eau.

La fumée de silice a un pouvoir liant de 3 à 4 fois supérieur au ciment et joue un rôle important dans le développement des résistances à la compression à court terme [49]. Cependant, le niveau de performances atteint par l'ajout de fumée de silice et leur prix excessif (5 à 10 fois plus cher que le ciment) [22], de ce fait, l'utilisation simultanée de superplastifiants réserve généralement ce matériau de haute performance à des applications très spécifiques, comme la construction d'ouvrages d'art, de gratte-ciels, de plates-formes pétrolières, et autres projets de cette envergure.

### ➤ **Laitier de haut fourneau**

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit généré lors du processus de fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Toutes les impuretés présentes dans le minerai de fer et dans le coke, utilisés pour réduire l'oxyde de fer, se retrouvent finalement dans le laitier de haut fourneau [22]. Étant donné que la fumée de silice est un produit secondaire industriel, sa composition peut varier considérablement en fonction de la composition de base du minerai utilisé. [50].

La surface des grains de laitiers permet un meilleur glissement inter granulaire dans la pâte, ce qui influe positivement sur l'amélioration de l'ouvrabilité par rapport à un béton ordinaire [49]. Les temps de prise des bétons à base de laitier sont un peu plus longs que les bétons ordinaires, en particulier lorsqu'ils sont bétonnés par temps froid. Au bout de 7 jours, le laitier commence à avoir une résistance à la compression plus élevée que le béton typique [51].

Le laitier de haut fourneau a un impact positif sur la résistance aux sulfates, en particulier lorsque les taux de remplacement sont élevés. Cela s'explique par sa capacité à réduire la perméabilité du béton et à diminuer la teneur en aluminates libres de la chaux, ce qui contribue à renforcer la résistance du matériau [52].

Une autre recherche menée par Lakhal et al. (2009) [53] avait pour objectif de découvrir des applications potentielles et bénéfiques du laitier granulé de haut fourneau dans la production de bétons à haute performance. Le but de cette étude est de formuler des bétons à haute performance en remplaçant entièrement les fines de la fumée de silice par celles du laitier granulé provenant de l'usine d'EL HADJAR en Algérie.

Ils ont découvert que les bétons à haute performance à base de fillers de laitier présentaient des résistances un peu faibles à l'âge jeune, mais qu'ils avaient des résistances significativement augmentées au cours de leurs cycles de durcissement, en particulier après 14 jours.

### ➤ **Cendres volantes**

Les cendres volantes sont des particules fines recueillies par les dispositifs de dépoussiérage des centrales thermiques. Leur structure cristalline et leur composition chimique peuvent varier en fonction des impuretés présentes dans le charbon brûlé dans la centrale thermique. Les caractéristiques des cendres volantes provenant du même type de charbon utilisé dans une centrale thermique sont généralement très similaires.

Shi et al (2009) [54] ont travaillé sur l'influence de la cendre volante et du laitier à haut fourneau sur la résistance à la compression, la perméabilité du gaz, et à la carbonatation des bétons à hautes performances. Ils ont découvert que le laitier granulé de haut fourneau a une résistance à la compression plus élevée que le BHP avec de la cendre volante avec des rapports E/L de 0,3. La réaction pouzzolanique élevée du laitier granulé de haut fourneau et sa grande finesse lui confèrent une excellente capacité de remplissage. D'autre côté, les bétons à haute performance contenant 30 % de cendres volantes ont montré une amélioration notable à long terme de la porosité, la résistance à la compression, ainsi que les propriétés de transport selon Patel et al. (2004) [55]. Cependant, il convient de noter que leur impact sur la résistance en compression des bétons de haute qualité semble être fortement influencé par le rapport eau/liant utilisé [54].

### ➤ **Pouzzolane Naturelle**

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux qui proviennent généralement de sources volcaniques ou de roches sédimentaires, et qui possèdent des propriétés pouzzolaniques. Elles sont principalement composées de silice réactive, d'alumine et d'oxyde de fer [56].

Une étude faite par Chaid et al (2009) [57] concerne l'élaboration d'un BHP en incorporant de la pouzzolane naturelle locale de Béni-Saf (Algérie). Les résultats montrent que la substitution de la pouzzolane à une partie du ciment améliore les caractéristiques physico-mécaniques et microstructurales.

### **1.3.2.5 Superplastifiant**

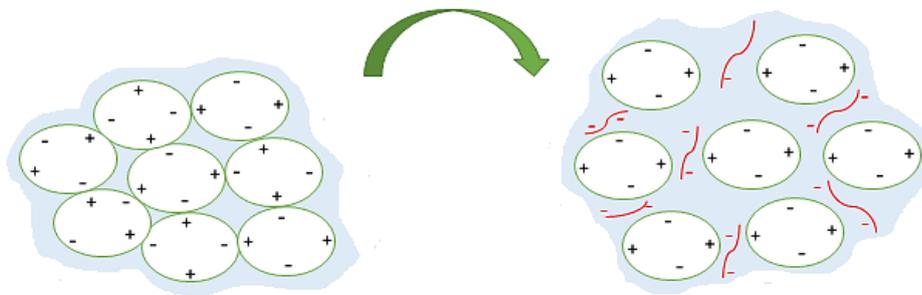
L'avènement des plastifiants, en particulier des superplastifiants très efficaces dans les années 1970. Il existe quatre principales catégories de superplastifiants commerciaux [58]:

- Les sels sulfonés du polycondensat de naphthalène et de formaldéhyde, généralement désignés sous le nom de superplastifiants à base de naphthalène.
- Les sels sulfonés du polycondensat de mélamine et de formaldéhyde, souvent désignés sous le nom de superplastifiants à base de mélamine.
- Les lignosulfonates à très faible teneur en sucre et en agents de surface.
- Les polyacrylates.

Actuellement, les deux premières catégories sont les bases les plus fréquemment employées dans la production de superplastifiants. Bien qu'ils appartiennent principalement aux deux premières catégories, ces superplastifiants commerciaux peuvent parfois contenir une certaine quantité de réducteurs d'eau classiques, comme les lignosulfonates et les gluconates, dans leurs formulations. Selon les exigences particulières du projet, les superplastifiants commerciaux peuvent également être utilisés en conjonction avec d'autres adjuvants tels que des réducteurs d'eau, des retardateurs de prise, voire des accélérateurs [45].

L'utilisation de superplastifiants réduit la quantité d'eau nécessaire pour le mélange à des niveaux sans précédent tout en produisant un mélange très fluide et facile à travailler. Grâce à l'efficacité de ces molécules synthétiques pour disperser les particules de ciment, il est possible de produire un béton fluide avec un rapport eau/liant inférieur à 0.30 [45].

Sur chaque grain de ciment, il y a des charges électriques libres. Les tirs des deux côtés s'attirent. Quand les particules sont en contact avec l'eau, ils s'agglomèrent en floculats. Cependant, l'eau en décomposition entre ces floculats sera retenue (figure 1.11). À partir de ce moment-là, elle ne jouera plus un rôle dans la fluidité de la pâte de ciment. Un surplus d'eau de gâchage sera requis pour atteindre la consistance souhaitée.



*Figure 1.11 Action du superplastifiant (défloculation et dispersion des grains de ciment).*

### 1.3.2.6 Les Fibres

Les fibres sont incorporées dans les matériaux cimentaires pour améliorer leurs performances une fois qu'ils ont durci. Ces fibres peuvent être classées en quatre catégories distinctes en fonction de leurs propriétés chimiques, physiques et mécaniques, comme illustré dans la figure 1.12 [59].



Figure 1.12 Catégories et caractéristique des fibres.

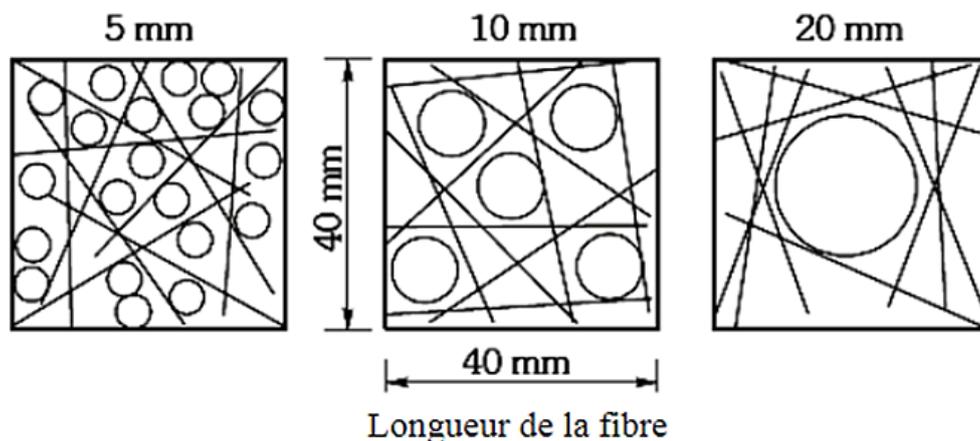
Les fibres métalliques et les fibres naturelles sont les deux types les plus courants dans le génie civil. Les fibres métalliques sont utilisées pour renforcer le béton et ont une longueur de 6 à 80 mm, une surface de section transversale de 0.1 à 1.5 mm<sup>2</sup> et un rapport (l/d) d'acier de 20 à 100. D'après Patel et al. (2004) [75] Une amélioration significative à long terme a été observée en ce qui concerne la porosité, la résistance à la compression et les propriétés de transport (perméabilité et diffusion) des BHP contenant 30 % de cendres volantes. Cependant, il convient de noter que leur effet sur la résistance en compression des bétons à haute performance semble dépendre largement du rapport eau/liant utilisé [60]. Leur résistance à la traction est normalement comprise entre 300 et 2400 MPa [61].

Les méthodes de formulation des bétons renforcés par des fibres métalliques élaborées par plusieurs chercheurs, reposent principalement sur de nombreuses études expérimentales. Les catégories proposées ne sont pas universellement applicables à toutes les applications du béton renforcé de fibres

et ne permettent pas de maximiser le potentiel de ce matériau composite. La formulation du béton renforcé de fibres métalliques doit être spécifique à chaque cas en fonction de l'application industrielle envisagée, afin d'obtenir un composite optimisé pour les objectifs particuliers visés pour cette application [62]. Selon Johnston (2004) [63] pour que les fibres atteignent leur efficacité à l'état durci, il est recommandé de choisir des fibres dont la longueur est supérieure à celle du plus gros granulat (voir Figure 1.13).

Les bétons à hautes performances renforcés par des fibres métalliques offrent des performances exceptionnelles, notamment une réduction des risques de microfissuration liés au retrait, une grande ductilité, une résistance mécanique très élevée à la compression et une grande durabilité en raison de la microstructure extrêmement compacte.

Ils sont de plus en plus employés dans le domaine du bâtiment (tels que les dalles industrielles sans joints et les poutres en T inversé précontraintes... etc.) ainsi que dans les travaux publics (tels que les revêtements définitifs de tunnels en BFM projeté, les haussées et pistes aéroportuaires sans joints, les dalles de ponts mixtes...). Il est possible de faire la distinction entre deux principaux domaines d'utilisation : la préfabrication et le coulage in-situ sur la structure.



*Figure 1.13 Influence de la dimension des granulats sur la répartition des fibres [63]*

Les fibres naturelles (les fibres végétales) sont utilisées pour améliorer les performances mécaniques du béton en termes de traction et de déformation tout en réduisant sa fragilité. Ils sont généralement des déchets provenant des processus de transformation industriels ou agricoles [64]. Les récents progrès dans l'utilisation de fibres naturelles dans les formulations ont été examinés par plusieurs auteurs [65–67].

- **Rôle des fibres**

La fonction des fibres peut être considérée selon deux aspects : tout d'abord, elles contribuent au contrôle de la propagation des fissures dans le matériau en service en réduisant leur ouverture (voir Figure 1.14a). Ensuite, elles transforment le comportement du matériau, passant d'un état fragile à un comportement ductile, ce qui renforce la sécurité lors des charges ultimes (voir Figure 1.14b).

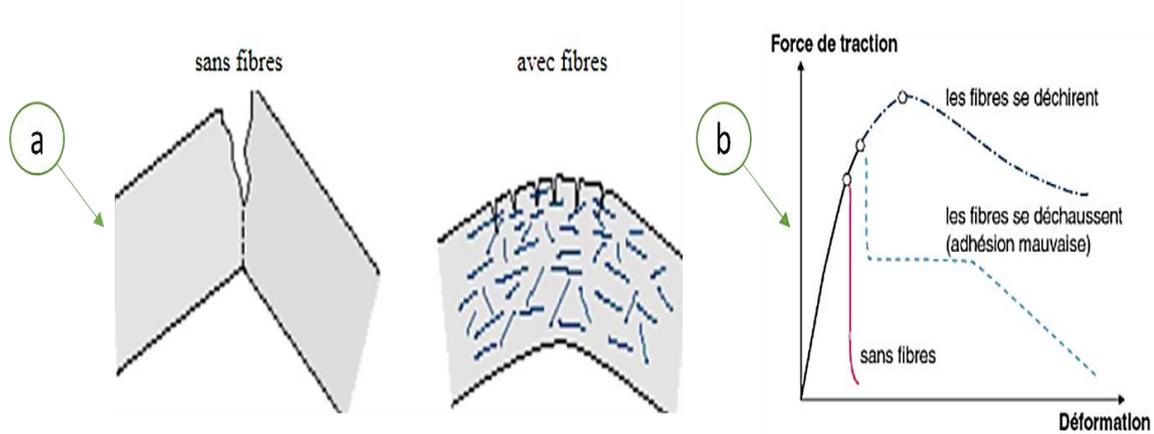


Figure 1.14 Exemple de l'amélioration apportée par l'ajout de fibres pour le renforcement [68]

Selon le type, la quantité et les composants du béton dans lesquels elles sont intégrées, les fibres offrent plusieurs avantages, parmi lesquels :

1. Amélioration de l'adhérence du béton frais.
2. Augmentation de la ductilité et du comportement après l'apparition de fissures.
3. Réduction de la microfissuration, en particulier aux premiers stades de durcissement.
4. Diminution de la fissuration provoquée par des charges mécaniques externes.
5. Accroissement de la résistance à la traction en flexion.
6. Renforcement de la résistance au feu, aux chocs, à la fatigue, à l'abrasion et à l'usure.

Les principaux facteurs influant sur les propriétés mécaniques d'un béton renforcé par des fibres sont [59]:

1. La distribution des fibres et leur orientation.
2. La forme de la section, qui détermine la surface d'adhérence.
3. La nature des fibres (métalliques, synthétiques, etc.).
4. La forme de la fibre (ondulée, droite, plate, etc.).

5. La longueur de la fibre ( $L_f$ ) et son élancement ( $L_f/D_f$ , où  $D_f$  est le diamètre de la fibre).
6. La fraction volumique des fibres dans la matrice.

### 1.3.3 Les BHP Spéciaux

- **BHP légers**

Ils sont déjà arrivés à fabriquer des BHP légers ayant une résistance à la compression supérieure à 50 et 60 Mpa. Les BHP légers n'ont pas obligatoirement une masse volumique comprise entre 1 850 et 2000 kg/ m<sup>3</sup>. Berra and Ferrerra (1990) ont fabriqué un BHP léger ayant une résistance à la compression de 60 MPa ayant une masse volumique de 1700 kg/ m<sup>3</sup>. Une résistance à la compression légèrement supérieure à 100 MPa (mesurée sur des cubes de 100 mm de côté) a été mesurée sur un BHP léger qui avait une masse volumique de 1865 kg/ m<sup>3</sup>. En outre, Nilsen and Aïtcin (1992) ont fabriqué un BHP léger ayant une résistance de 97,7 MPa à 91 jours (mesurée sur des cylindres de 100 x 200 mm) dont la masse volumique à l'état frais était de 2085 kg/m<sup>3</sup> [69].

- **BHP lourds**

Les BHP lourds peuvent être fabriqués sans problème. Par exemple, en utilisant de l'ilménite comme gros granulat et granulat fin, Nilsen and Aïtcin (1992) ont fabriqué deux BHP lourds ayant des rapports E/L de 0,30 et 0,31 [45]. Le premier a été fabriqué à partir de sable naturel comme granulat fin, avec une masse volumique de 3 340 kg/m<sup>3</sup>; le second a été fabriqué à partir d'ilménite finement broyée, avec une masse volumique de 3805 kg/m<sup>3</sup>. La résistance à la compression de ces deux bétons à 28 jours était d'environ 80 MPa. Cependant, le béton qui n'avait utilisé que du sable naturel comme granulat fin avait systématiquement une résistance à la compression légèrement plus faible que le béton qui n'avait utilisé que de l'ilménite.

- **BHP renforcés de fibres**

Divers types de fibres sont employés pour renforcer la ductilité et la résistance aux chocs des bétons conventionnels. Par conséquent, il n'est pas étonnant que plusieurs variétés de fibres aient également été intégrées à des bétons à haute performance (BHP) dans le but de réaliser des objectifs similaires [70–72]. Les caractéristiques physiques de certaines fibres qui sont actuellement commercialisées ne sont pas toujours idéales pour leur utilisation dans les BHP. Parmi celles-ci, les fibres de plastique n'ont aucun intérêt à améliorer les propriétés mécaniques du BHP en raison de leurs propriétés intrinsèques, à moins qu'elles ne soient utilisées pour améliorer la résistance au feu ou, dans certains cas, la résistance à l'impact du BHP. Lorsque la

fragilité du béton limite son utilisation, des fibres d'acier ou de carbone peuvent être ajoutées aux BHP.

Il existe deux méthodes pour ajouter une certaine force à un BHP renforcé de fibres. La première est d'utiliser des fibres ayant les mêmes caractéristiques géométriques mais d'augmenter la résistance ultime de l'acier afin que ces fibres ne se brisent plus lorsqu'elles sont incluses dans un BHP et qu'elles puissent glisser dans leur empreinte après leur décollement. La deuxième méthode consiste à fabriquer des fibres plus courtes avec un diamètre plus fin pour réduire les forces de liaison entre la fibre et la matrice jusqu'à ce que la contrainte créée dans la fibre par ces forces d'adhérence soit inférieure à la résistance ultime de l'acier.

Tout comme dans le cas des bétons conventionnels, augmenter la quantité de fibres réduit la maniabilité du béton à haute performance (BHP). Par conséquent, l'utilisation de fibres plus courtes pourrait rendre plus aisée l'augmentation du dosage en fibres. Une autre contrainte liée à l'utilisation de fibres concerne leur coût : l'incorporation de 40 à 80 kg/ m<sup>3</sup> de fibres augmente le coût de production d'un BHP de 50 à 100 %. L'investissement consenti doit donc être compensé par l'amélioration des propriétés visées.

- **BHP confinés**

L'idée de confiner du béton dans une enveloppe d'acier n'est pas nouvelle en soit puisque des articles relatifs au béton confiné datent du début du 20<sup>ème</sup> siècle. Ce type de confinement se différencie du confinement obtenu par des spirales ou des étriers, ils ont trouvé que le confinement d'un béton dans des tubes d'acier augmentait de façon significative la résistance du matériau composite quand on la comparait à la résistance individuelle de chacune des deux composantes [73–75]. Certains chercheurs étudié l'utilisation de BHP confinés dans des tubes d'acier et ce concept a d'ailleurs été exploité par le concepteur du gratte-ciel Two Union Square à Seattle, à Melbourne en Australie et dans le cas de la passerelle de Sherbrooke [45,76].

Les études récentes sur le confinement du BHP dans des tubes d'acier ont révélé que l'utilisation d'un tube d'acier fin pour confiner un BHP de 85 MPa peut multiplier la charge maximale que peut supporter une colonne soumise à un effort excentrique par un facteur compris entre 1,6 et 2,2. Pour plusieurs raisons, il semble que le confinement du béton dans un tube d'acier soit plus efficace dans les BHP que l'utilisation de spirales ou d'étriers.

- **BHP compacté au rouleau**

Au Québec, on a assisté à un développement intéressant dans le domaine du béton compacté au rouleau. Cette technique se distingue de celle des bétons

compactés au rouleau utilisée dans la construction des barrages [77,78] dans le sens qu'elle consiste à placer un BHP plutôt sec avec les équipements utilisés par les producteurs de béton bitumineux pour construire des dalles industrielles de très grandes dimensions. Par exemple, une usine de pâtes et papiers a réussi à construire une dalle industrielle de 87 000 mètres carrés en moins d'un mois et demi. Cette vaste dalle a été érigée en deux couches de 150 mm d'épaisseur à l'aide d'un béton à haute performance (BHP) affichant une résistance moyenne de 60 MPa à 28 jours. Cette dalle a été construite sans l'utilisation de renforts en acier ou de fibres en acier, et elle n'a pas de joints. Le BHP compacté à l'aide d'un rouleau compresseur s'est révélé résistant aux cycles de gel-dégel et a démontré une excellente résistance à l'abrasion, ce qui était essentiel pour faciliter les opérations des équipements lourds chargés du déchargement et du transport des grumes de bois vers l'usine.

### 1.4 Formulation du BHP

La finalité de toutes les méthodes de composition des bétons est de déterminer la formulation idéale de matériaux à utiliser pour produire un béton qui possède les propriétés recherchées, tout en étant le plus économique possible.

Il a toujours été extrêmement difficile de trouver une méthode théorique universelle pour fabriquer du béton avec n'importe quelle combinaison de ciment Portland, d'ajout de ciment, de granulats et d'adjuvant. Même si tous ces matériaux fondamentaux doivent répondre à des normes d'acceptation plus ou moins rigoureuses, il est possible d'obtenir un béton avec les caractéristiques souhaitées à l'état frais et à l'état durci de différentes manières en utilisant les mêmes matériaux.

En général, une méthode de formulation permet également de déterminer un mélange initial qui peut être ajusté pour obtenir les propriétés souhaitées en se basant sur quelques essais. Même si les méthodes de formulation des bétons à haute performance (BHP) ont souvent un aspect plus artistique que scientifique, il est indéniable qu'elles sont également fondées sur des principes scientifiques qui sous-tendent toutes les formulations de béton [22].

La méthode de formulation des BHP mise en œuvre à l'Université de Sherbrooke sera abordée dans cette section. Pour commencer, nous présenterons brièvement la méthode ACI 211-1, qui permet de formuler des bétons ordinaires de densité normale, des bétons lourds ou des bétons de masse, et qui a servi de base à la méthode de formulation Sherbrooke.

### 1.4.1 La méthode de formulation ACI 211

La norme ACI-211 a l'avantage d'offrir une procédure facile à mettre en œuvre pour formuler des bétons ayant une résistance maximale de 40 MPa et un affaissement maximal de 180 mm. Les bétons ainsi formulés n'incluent pas d'ajout cimentaire ou d'adjuvant sauf un agent entraîneur d'air.

Cette procédure s'applique à des granulats dont la nature minéralogique et la granulométrie peuvent varier. Elle suppose que la résistance à la compression n'est affectée que par le rapport eau/ciment et la quantité d'air entraîné, et que l'affaissement du béton n'est affecté que par la taille maximale du gros granulat, la quantité d'eau de gâchage et la présence ou non d'air entraîné. La méthode des volumes absolus est utilisée pour formuler le béton lorsque les valeurs du rapport eau/ciment et de la quantité d'eau de gâchage sont déterminées. Cette méthode de formulation peut être divisée en plusieurs étapes.

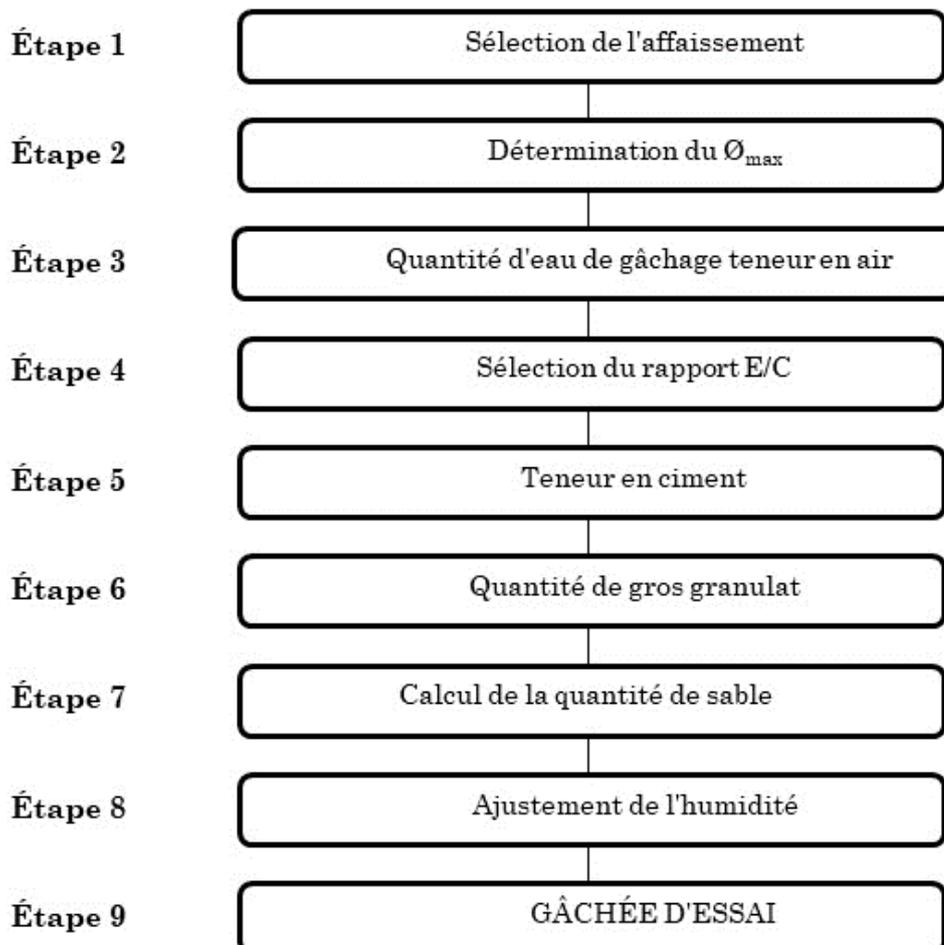


Figure 1. 15 Organigramme de la méthode de formulation des bétons ACI 211-1 [22]

### 1.4.2 La méthode de formulation Sherbrooke

La méthode de formulation élaborée à l'Université de Sherbrooke permet la formulation d'un béton à haute performance (BHP) sans entraînement d'air, et elle peut également être adaptée pour élaborer un BHP avec entraînement d'air en tient compte de la diminution de la résistance à la compression causée par la présence de bulles d'air. Cette méthode de formulation, qui est plutôt simple, suit une méthode semblable à celle de la norme ACI 211-1. Elle intègre des calculs basés sur la méthode des volumes absolus aux résultats empiriques. Le volume d'eau contenu dans le superplastifiant est considéré comme faisant partie du volume total d'eau de gâchage. La figure 1.16 présente un organigramme de cette méthode.

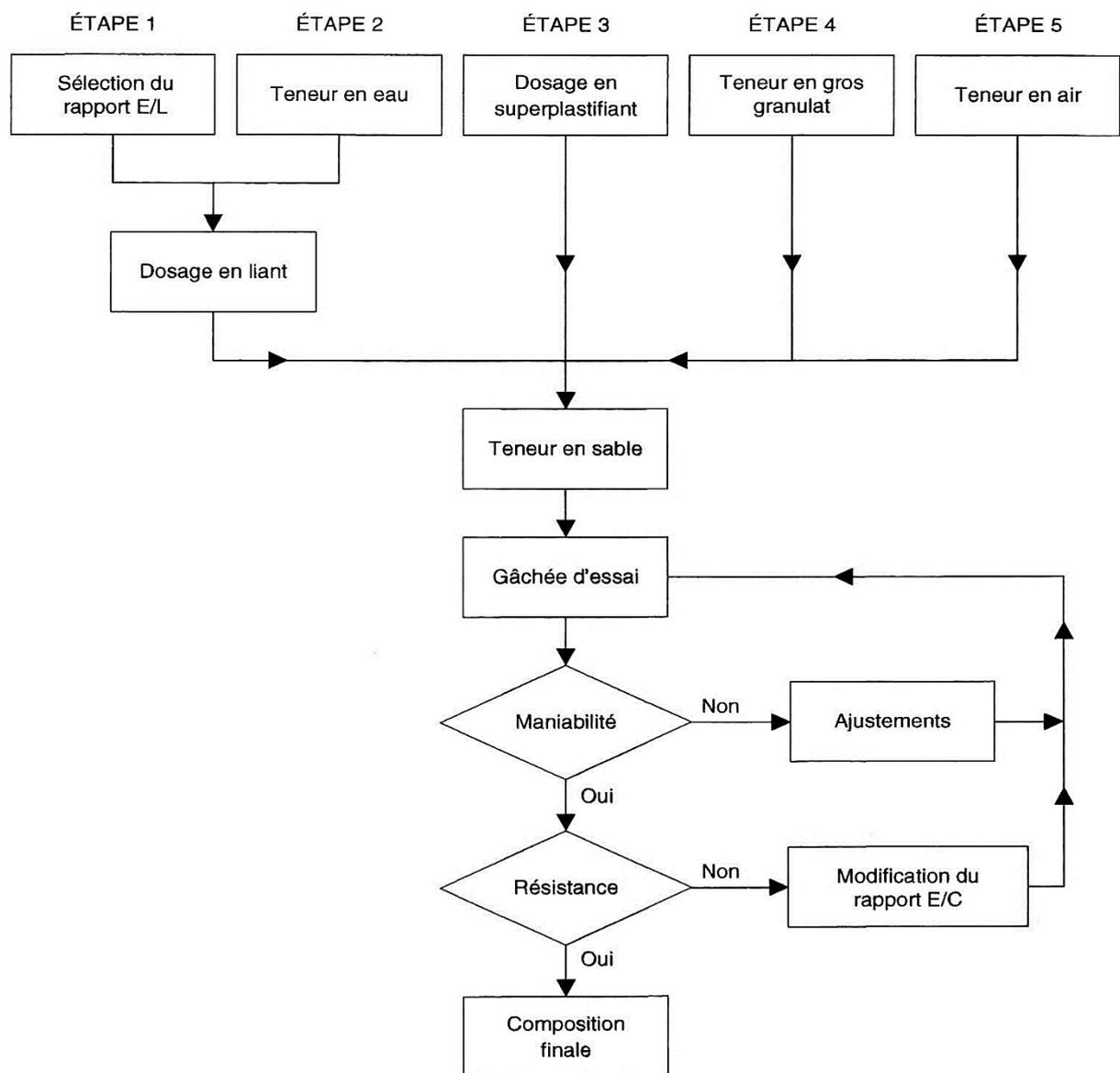


Figure 1.16 Organigramme de la méthode de Sherbrooke [22]

La procédure de formulation débute par la sélection de cinq caractéristiques spécifiques du BHP ou des matériaux employés :

- **Le rapport eau/liant**

La résistance des bétons augmente inversement au rapport E/C. Pour une résistance à la compression donnée de 28 jours, le rapport eau/liant peut être trouvé en utilisant la figure 1.17. La résistance à la compression est mesurée sur des cylindres de 100 x 200 mm. Une gamme relativement large de rapports E/C pour une résistance spécifique est fournie par le fuseau de la figure 1.17. Si l'on ne connaît pas l'efficacité du liant utilisé, il est possible de commencer par calculer la valeur moyenne donnée par ce fuseau.

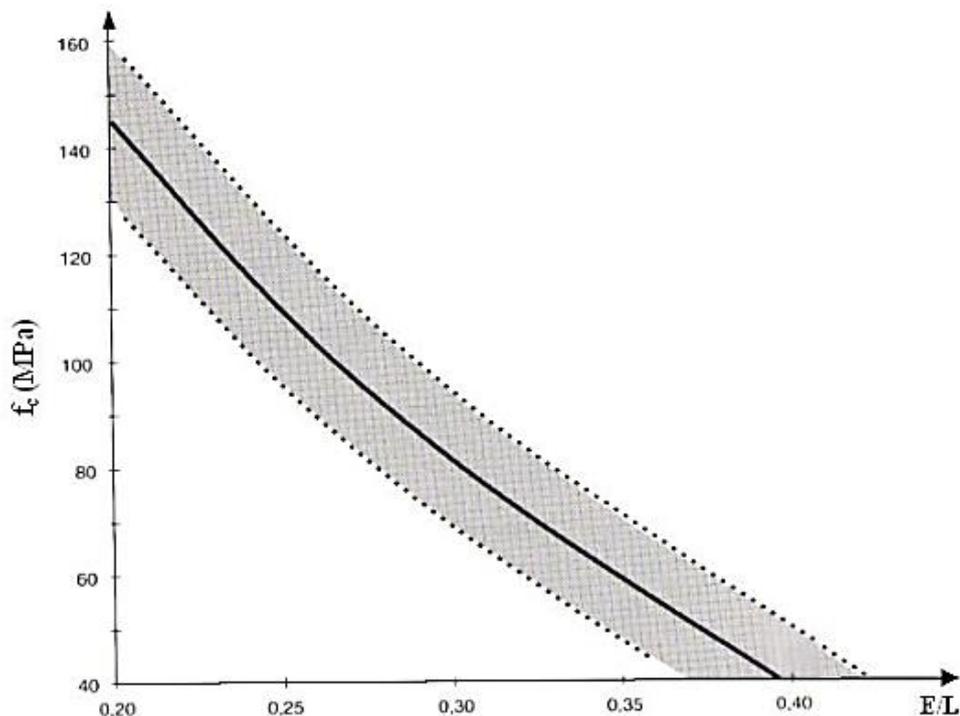


Figure 1.17 Relation proposée entre le rapport E/L et la résistance à la compression [22]

- **Le dosage en eau**

Une méthode simplifiée basée sur le concept du point de saturation est illustrée à la figure 1.18. La dose de saturation représente la quantité de superplastifiant ajoutée au mélange, au-delà de laquelle aucun effet fluidifiant supplémentaire ne se produira. La méthode des coulis avec le cône de Marsh est généralement utilisée pour déterminer cette dose. Toutes les valeurs indiquées à la figure 1.18 peuvent être augmentées de 5 l/m<sup>3</sup>. En cas d'incertitude concernant le point de saturation du superplastifiant, il est conseillé de débiter avec une quantité d'eau de gâchage de 145 l/m<sup>3</sup>.

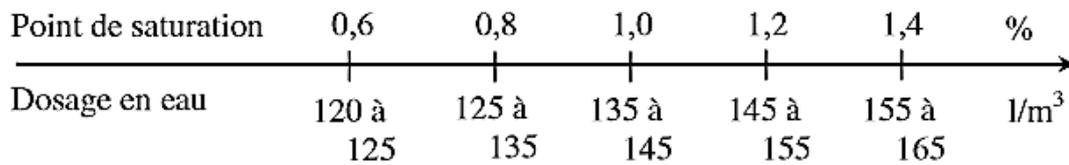


Figure 1.18 Détermination du dosage en eau [22]

- **Le dosage en superplastifiant**

Pour un rapport eau/ciment (E/C) inférieur à 0,4, qui correspond au domaine des bétons à haute performance (BHP), il est possible d'atteindre une résistance prévue dépassant les 50 MPa. Cependant, dans la pratique, la réalisation du mélange devient plus complexe car il y a moins d'eau disponible pour maintenir la fluidité du béton. La solution consiste à utiliser des superplastifiants pour défloculer le ciment. Le dosage au point de saturation sert de base pour déterminer la quantité de superplastifiant. En l'absence d'information sur le point de saturation, il est possible de débuter avec un dosage de superplastifiant équivalent à 1 %.

- **Le dosage en gros granulat**

La figure 1.19 permet de calculer le dosage des gros granulats en fonction de leur forme. Si vous avez des doutes sur la forme des granulats ou si vous ne le savez pas, vous pouvez commencer avec une quantité de granulats gros de 1000 kg/m<sup>3</sup>.

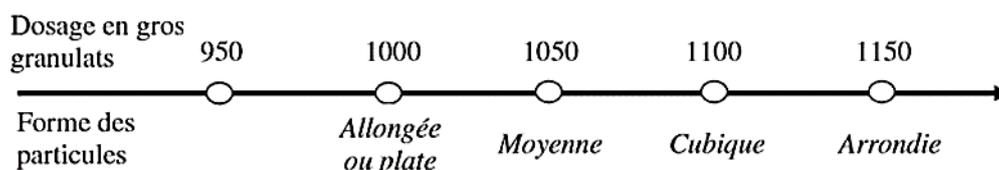


Figure 19 Dosage en gros granulat [22]

- **La teneur en air**

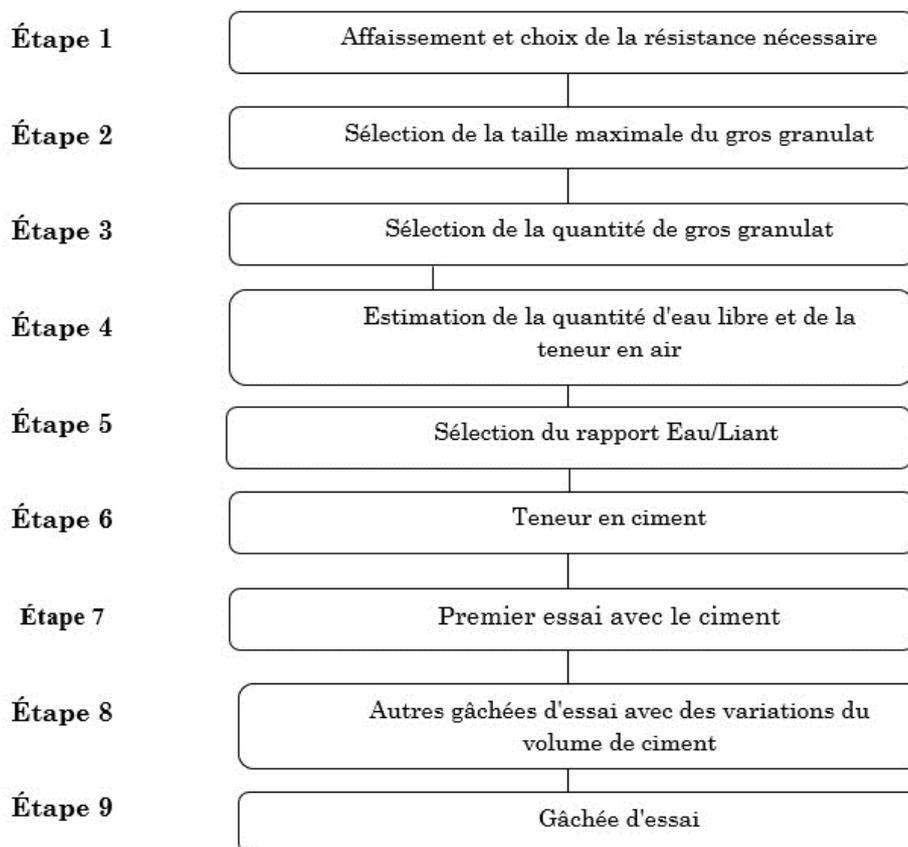
Les BHP ne contiennent que le volume d'air piégé. Cependant, une très faible quantité d'air entraînée dans les BHP doit être ajoutée systématiquement pour améliorer la manipulation et la mise en place des BHP. Ainsi, la valeur initiale de la quantité d'air piégée est de 1,5 %, puis les résultats sont ajustés selon les résultats obtenus lors des essais de mélange.

### 1.4.3 Autres méthodes de formulation

Même si les méthodes de formulation des BHP relèvent davantage de l'art que de la science, il est indéniable qu'elles reposent également sur des principes scientifiques fondamentaux qui sous-tendent toutes les formulations de béton. [22]. Par conséquent, il est pertinent de présenter quelques méthodes de formulation.

- **Méthode suggérée par le comité ACI 363**

La méthode suggérée par le comité ACI 363 sur les bétons à hautes performances comporte neuf étapes [22]. L'organigramme de cette méthode est présenté à la figure 1.20.



*Figure 1.20 Etapes de formulation des BHP selon la norme ACI 363*

- **Méthode des coulis du LCPC**

La méthode des coulis de De Larrard et Puch (1989) est utilisée pour optimiser la quantité de superplastifiant dans le mélange. Le principe de cette méthode repose sur la mesure de la vitesse d'écoulement d'un coulis sous l'effet de sa propre gravité à travers un ajutage. Plus l'écoulement est rapide, plus le coulis est considéré comme fluide. L'idée principale de cette méthode est d'effectuer plusieurs essais sur des coulis afin d'étudier leur rhéologie et sur des

mortiers pour étudier leurs propriétés mécaniques. Cette stratégie utilise deux outils qui sont semi-empiriques. Une formule est utilisée pour prédire la résistance à la compression du BHP, qui est en fait une extension de la formule originale de Féret. Cette formule utilise plusieurs paramètres, y compris la maniabilité du béton, qui est liée à la viscosité du mélange, qui est calculée à l'aide du modèle de Farris [79].

- **Méthode de MEHTA et AÎTCIN**

Mehta et Aitcin [80] ont élaboré une version simplifiée de la procédure de formulation destinée à être utilisée dans le cas de bétons à haute performance (BHP). Cette méthode est conçue pour des bétons de masse volumique normale, avec des résistances à la compression comprises entre 60 et 120 MPa, et des granulats dont la taille maximale se situe entre 10 et 15 mm, avec des valeurs d'affaissement entre 200 et 250 mm. Elle présume que le béton ne contient pas d'air entraîné, et que le volume d'air emprisonné est de 2 % (ce chiffre peut être augmenté à 5 ou 6 % lorsque le béton est conçu avec de l'air entraîné). De plus, cette méthode se base sur un volume optimal de gros granulats représentant 65 % du volume total du BHP en tant que référence.

## **1.5 Influence des fibres sur les propriétés du Béton à l'état frais**

Iqbal et al. (2015) ont noté que le débit d'affaissement du béton autoplaçant léger renforcé de fibres d'acier à haute résistance diminue au fur et à mesure que la teneur en fibres augmente, en particulier après avoir atteint une teneur de plus de 0,75 % de fibre d'acier. Le mélange de béton ayant un pourcentage de fibres de 1,25 avait un écoulement d'affaissement inférieur au minimum autorisé de 600 millimètres. En outre, l'augmentation de la proportion de fibre d'acier entraîne une diminution de la maniabilité tout en conduisant simultanément à une augmentation du pourcentage d'air.

Il est possible d'affirmer que l'ajout de 0,50 % de fibres d'acier a entraîné une diminution des valeurs d'affaissement de 40 % et 70 % respectivement. La dispersion de la fibre d'acier dans le béton fraîchement mélangé entraîne la formation d'un réseau matriciel fibre-ciment. Ce réseau aura une connexion interfaciale fibre-matrice parce que le mortier de ciment s'enroulera autour de la fibre. La capacité d'écoulement du nouveau béton est entravée par la structure du réseau [81,82] ont observé une grande réduction de l'affaissement sous l'effet synergique de la forme et de la rugosité de surface de la fibre. Malgré cela, il n'y a pas eu de corrélation entre le rapport d'aspect de la fibre d'acier et la réduction de l'affaissement dans les mélanges.

Li et al. (2021) [66] ont conclu que les capacités de passage et de remplissage diminuaient avec l'augmentation du pourcentage de fibres d'acier dans le matériau. Lorsque des fibres sont ajoutées au béton, la rigidité élevée des fibres d'acier entraîne une augmentation de la friction entre les agrégats et les fibres. Il en résulte une diminution de l'affaissement et un allongement de la période d'affaissement et d'écoulement, ces deux phénomènes étant réalisés en consommant l'énergie du mélange. En outre, les fibres positionnées de manière aléatoire ont limité l'écoulement horizontal des particules grossières. D'autre part, l'inclusion de fibres d'acier pourrait augmenter la résistance à la ségrégation. En effet, il fallait plus de pâte pour couvrir la surface des fibres car leur surface spécifique était supérieure à celle des granulats grossiers, ce qui augmentait la viscosité de la combinaison.

L'évaluation de la relation interactive entre les paramètres de conception du mélange et les propriétés du béton frais renforcé de fibres d'acier a été réalisée à l'aide des contours et des tracés 3D de RSM par Awolusi et al. (2019) [83], une réduction de l'affaissement a été observée pour toutes les interactions lorsque les facteurs (E/C) et (Ciment) sont réduits et que le facteur (Rapport d'aspect) est augmenté, comme le montre la figure 1.21.

Awolusi et al. (2019) [83], ont observé que les fibres de grande longueur obtenues avec un rapport d'aspect plus élevé réduisent les propriétés d'absorption d'eau, d'affaissement et de résistance à la compression du béton renforcé de fibres d'acier, ce qui implique que les fibres de grande longueur ont un effet de remplissage positif qui augmente la compacité du béton et réduit donc la porosité. Pour les bétons contenant des fibres, l'ouvrabilité mesurée en termes d'affaissement n'a pas été réellement affectée par la présence de fibres, ce qui peut être attribué au fait que les fibres ont généralement une faible surface et sont imperméables à l'absorption d'eau.

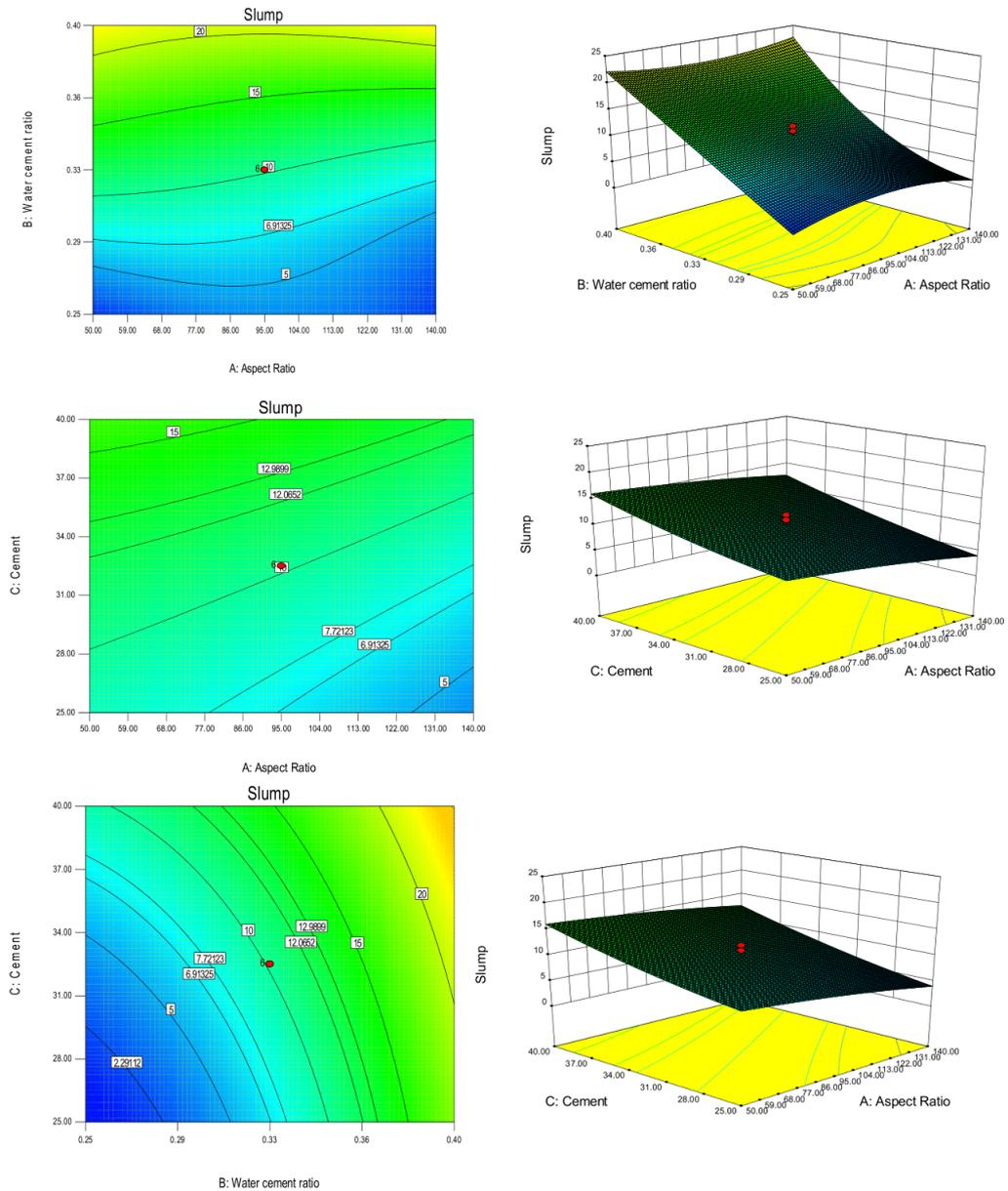


Figure 1.21 Contours et tracés 3D de l'étalement (Slump) [83]

A partir du tableau 1.3, les valeurs d'affaissement des bétons varient entre 125 et 230 mm. Les résultats des tests ont montré que l'affaissement du béton diminuait à mesure que le rapport L/d et Vf augmentait. Pour un volume de fibres de 1,5 %, l'ouvrabilité du béton est considérablement réduite. Il n'est pas surprenant que les fibres d'acier augmentent le poids unitaire de tous les bétons testés [8].

*Tableau 1.3 Affaissement et poids unitaire des mélanges de béton [8]*

Code du mélange	Affaissement (mm)	Poids unitaire (kg/m <sup>3</sup> )
CC (sans fibre)	230	2200
SFRC 1	220	2243
SFRC 2	205	3802
SFRC 3	200	2398
SFRC 4	210	2033
SFRC 5	195	2305
SFRC 6	125	2367
SFRC 7	200	2313
SFRC 8	150	2367
SFRC 9	145	2353

**SFRC** : Steel Fiber Reinforced Concrete (Béton armé de fibres d'acier).

**CC** : Concrete (Béton témoin sans fibre).

## 1.6 Influence des fibres sur le comportement du Béton à l'état durci

Les propriétés durcies du béton sont déterminées par un certain nombre de facteurs, dont les caractéristiques chimiques et physiques du béton et des matières premières, la quantité de liant et de matières premières, le type et la quantité de granulats grossiers, la quantité et la qualité des granulats fins, la proportion totale de granulats par rapport au mélange du béton, le niveau de mélange du béton, la teneur en solution alcaline par rapport au liant, le durcissement du béton et les paramètres d'essai. D'autres facteurs déterminent les propriétés durcies du béton [81]. Le présent chapitre présente une revue complète des résultats les plus importants liés aux propriétés durcies et analyse l'effet de l'ajout ou du remplacement des fibres d'acier dans divers bétons spécialement les bétons à haute performance et haute résistance.

### 1.6.1 Résistance mécanique à la compression des Bétons fibrés

Zhang et al. (2014) [84] ont étudié l'effet de la fibre d'acier sur la propriété de rupture du béton à haute performance (HPC) contenant des cendres volantes et du nano- SiO<sub>2</sub>. La figure 1.22 illustre la variation de la résistance à la compression du béton à haute performance renforcé de fibres d'acier contenant 5 % de nano- SiO<sub>2</sub> et 15 % de cendres volantes, la teneur en fibres d'acier passant de 0,5 % à 2,5 %. D'après cette figure, on peut voir que la teneur en fibres d'acier a un effet majeur sur la résistance du béton contenant des

nanoparticules et des cendres volantes. La résistance à la compression augmente progressivement avec l'augmentation de la teneur en fibres d'acier de 0,5 % à 2 %, alors qu'elles commencent à diminuer lorsque la teneur en fibres d'acier dépasse 2 %. La propriété adhésive de l'interface entre la matrice de béton et la fibre d'acier a été renforcée par l'ajout de nanoparticules. La charge peut être transmise aux fibres d'acier à travers la matrice de béton et la matrice peut supporter la charge avec les fibres d'acier. En conséquence, la résistance à la compression s'est améliorée avec la teneur en fibres d'acier appropriée.

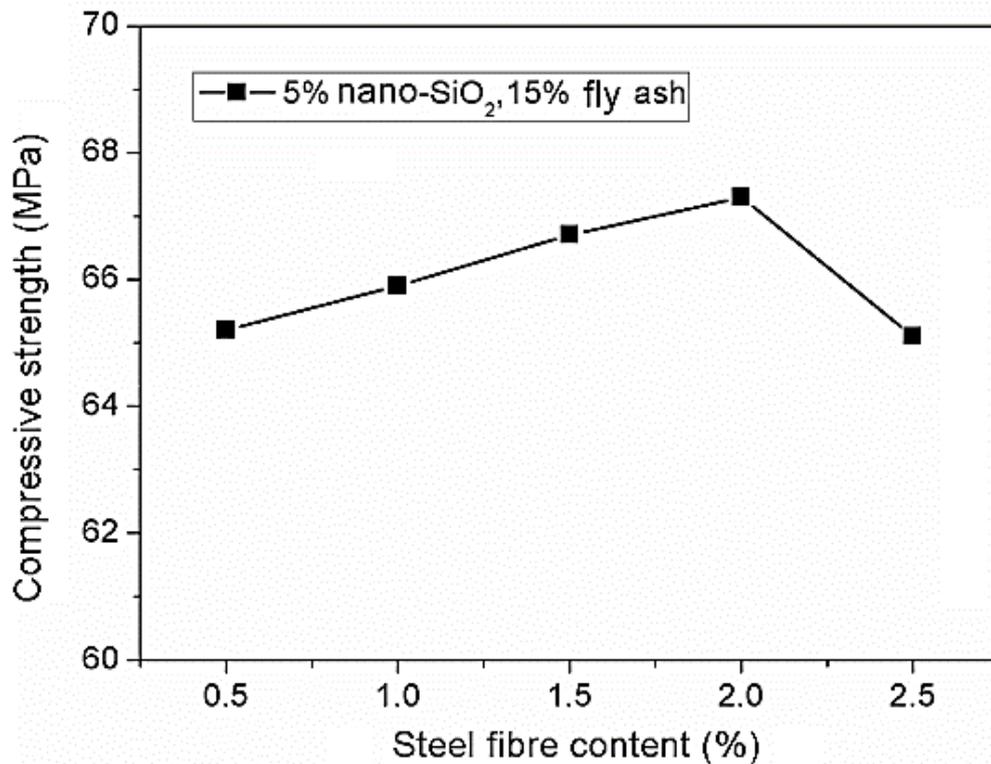


Figure 1.22 Effet de la teneur en fibres d'acier sur la résistance à la compression [84]

Afroughsabet et Ozbakkaloglu (2015) [85] présente une étude sur l'effet de l'ajout de fibres d'acier sur les propriétés mécaniques du béton à haute résistance. Des fibres d'acier à bouts crochus d'une longueur de 60 mm ont été utilisées à quatre fractions volumiques de fibres différentes de 0,25 %, 0,50 %, 0,75 % et 1,0 %. Les résultats indiquent également que l'incorporation de fibres d'acier améliorent les propriétés mécaniques des bétons à haute résistance. De plus, il a été observé que l'ajout de 1 % de fibre d'acier améliorerait considérablement la résistance à la traction par flexion et fendage du béton.

Karimi et Nematzadeh (2020) [86] ont examiné la performance post-chauffage des colonnes de tubes d'acier remplis de béton (CFST) soumises à plusieurs traitements thermiques, en fonction de la quantité de granulats de

caoutchouc de pneus usagés (0, 5 et 10 %) et de fibres d'acier en volume (0, 1 et 10 %). Pour améliorer la résistance à la compression et la ductilité de la CFST, l'ajout de fibres d'acier à un dosage de 1 % dans le mélange de béton s'est avéré plus efficace que l'ajout de 1,5 %. La figure 1.23 montre la capacité de charge des sections composites, du tube d'acier seul et de l'âme en béton.

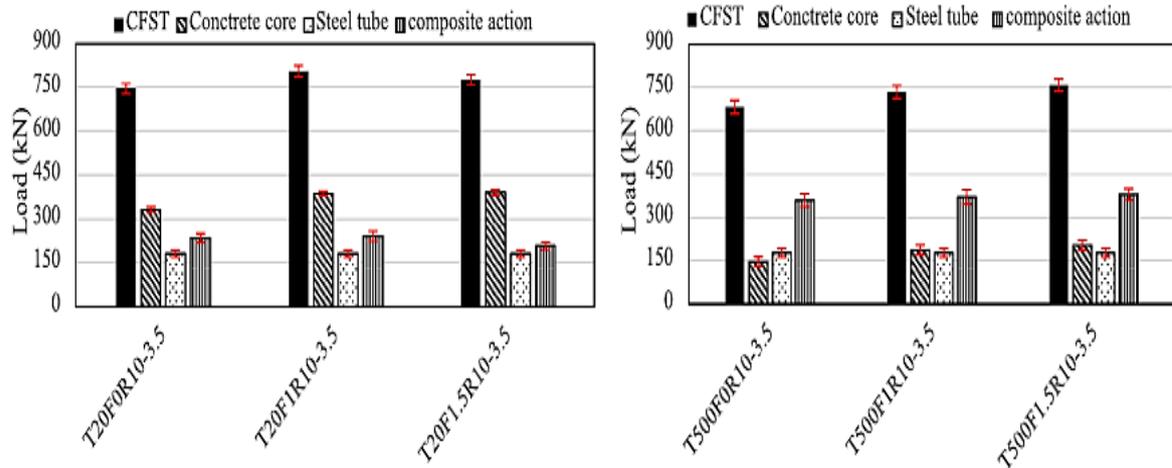


Figure 1.23 Capacité de charge du CFST, du noyau de béton non confiné, du tube d'acier seul et de la contribution de l'action composite [86]

Iqbal et al (2015) [87] ont mentionné qu'à mesure que le pourcentage de fibres d'acier dans le béton augmente, il y a une baisse marginale de la résistance à la compression du matériau. Cette relation peut être observée dans la résistance à la compression du béton à la fois à l'âge de 7 jours et à 28 jours (voir figure 1.24). La résistance à la compression du béton contenant 0,5 % de SF est de 64,03 MPa, alors que celle du béton contenant 1,25 % de SF est de 59,74 MPa. Par conséquent, une diminution de la résistance à la compression d'environ 7 % se produit si l'on augmente de 0,75 % la quantité de fibres d'acier.

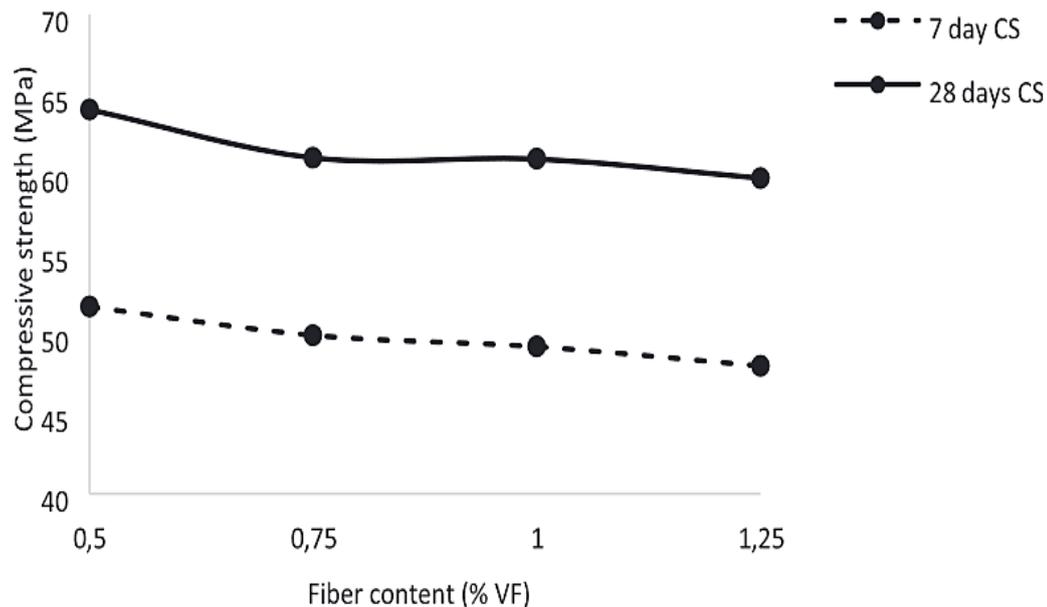


Figure 1.24 Évolution de la résistance à la compression du béton en fonction des fibres [87]

Selon Shafigh et al. (2011) [88] une augmentation du pourcentage volumique de fibres d'acier a conduit à une augmentation de la résistance à la compression du béton à tous les âges. Le taux de fibres d'acier est passé de 0 % à 0,25 %, 0,5 %, 0,75 % et 1 %, ce qui a entraîné une augmentation de la résistance à la compression d'environ 1,7 %, 2,5 %, 7,8 % et 3 % après trois jours, de 6,1 %, 4 %, 9,1 % et 10 % après sept jours, de 6,2 %, 6,9 %, 14 % et 14,3 % après 28 jours, et de 5,3 %, 8,9 %, 16 % et 18,8 % après 56 jours, respectivement.

Yazıcı et al. (2007) [8], ont étudié les effets du rapport d'aspect longueur / diamètre ( $L/d$ ) et de la fraction volumique ( $V_f$ ) des fibres d'acier sur la résistance à la compression. Pour ce faire, des fibres d'acier en faisceau crochu avec trois rapports ( $L/d$ ) différents de 45, 65 et 80 ont été utilisées. Trois volumes différents de fibres ont été ajoutés aux mélanges de béton à 0,5 %, 1,0 % et 1,5 % par volume de béton et dix mélanges de béton différents ont été préparés. La résistance à la compression du béton témoin était de 49,1 MPa. Pour des rapports  $L/d$  de 45, 65 et 80, les valeurs minimales et maximales de résistance à la compression sont respectivement de 50,8, 53,5 et 52,1 MPa et de 57,7, 58,3 et 58,3 MPa.

Au fur et à mesure que la résistance du béton augmente, il peut spontanément exploser au moment de la fissuration, ce qui présente un risque important pour la sécurité. Les chercheurs cherchent à arrêter les fissures dans le béton et à créer un béton plus résistant qui se rompt plus facilement. Dans ce cadre, Ojha et al. (2022) [8] ont étudié le comportement à la rupture du béton à haute résistance renforcé par des fibres d'acier à haute résistance. Six mélanges de béton différents ont été préparés avec des rapports  $E/L$  de 0,47,

0,36 et 0,20 résultant en une résistance à la compression moyenne de 36, 52 et 92 MPa. Chaque mélange se compose de deux variantes, la première sans fibre et la seconde avec 1 % de fibre d'acier en volume. Il a été constaté que l'ajout de fibres d'acier améliore considérablement les propriétés de rupture du béton de différentes résistances à la compression. En ajoutant 1 % de fibre d'acier dans le béton à haute résistance, l'énergie de rupture moyenne a augmenté de 850 %, 770 % et 450 % respectivement pour le béton avec une résistance à la compression de 36, 52 et 92 MPa. D'autres paramètres montrent également une amélioration très significative suggérant que le renforcement des fibres est un choix approprié pour prévenir la rupture fragile et augmenter les performances de rupture du béton à haute résistance.

Awolusi et al. (2019) [83] offrent une étude met en évidence les capacités de prédiction et d'optimisation de la méthodologie de la surface de réponse en ce qui concerne les propriétés à l'état frais et durci du béton renforcé de fibres d'acier de pneus usagés contenant de la poudre de calcaire. L'étude identifie le rapport d'aspect (50-140), le rapport E/C (0.2-0.4) et la teneur en ciment (25%-40%) comme variables indépendantes tandis que la poudre de calcaire a été maintenue constante à 5% du poids du béton. D'après les courbes de niveau et les graphiques 3D de la résistance à la compression présentés dans la figure 1.25, une relation claire a été observée pour l'interaction entre (Rapport d'aspect) et (E/C), puisque l'augmentation de (Rapport d'aspect) et la réduction de (E/C) augmentent la résistance à la compression. Pour l'interaction entre (Rapport d'aspect) et (Ciment), l'augmentation de ces facteurs augmente la résistance à la compression. Pour l'interaction entre (E/C) et (Ciment), il a été observé que la résistance à la compression augmentait avec l'augmentation de (Ciment) et la réduction de la valeur de (E/C). Cela implique qu'une augmentation du facteur (Ciment) et une réduction du facteur (E/C) augmentent la résistance à la compression.

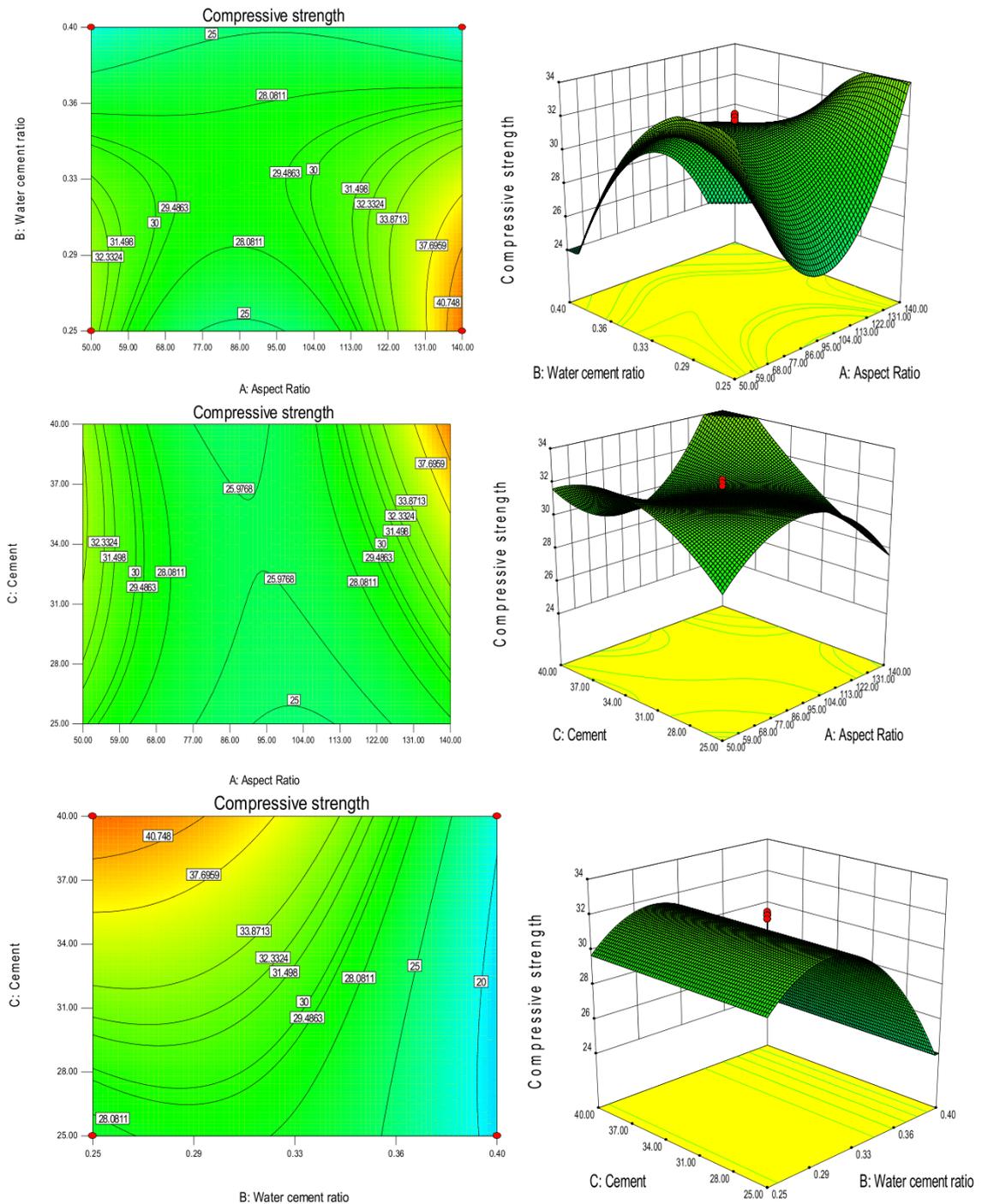


Figure 1.25 Contours et tracés 3D de la résistance à la compression [83]

Une étude menée par Ali et al. (2021) [89] a évalué les performances des bétons à haute performance confectionnés avec différentes quantités de fibres d'acier de pneu usagé (WSF) et de cendres volantes (FA).

Les fibres (WSF) ont été utilisées à deux doses, à savoir 0,5 % et 1 %, en volume du béton haute performance, avec des volumes faibles à moyens de cendres volantes (FA), à savoir 10 %-35 %. La résistance à la compression des

quinze mélanges à 28 et 120 jours est illustré dans les figures 1.26 et 1.27 respectivement. L'ajout de cendres volantes et de Fibre d'acier de pneu usagé a montré des effets mixtes sur la résistance à la compression en fonction de leur pourcentage dans un mélange le béton haute performance. La résistance à la compression à 28 jours de béton haute performance a été augmenté de 6 % avec 10 % par l'ajout de cendres volantes. De plus 0,5 % de Fibre d'acier de pneu usagé a amélioré la résistance à la compression d'environ 6,5 % et 10 % à 28 et 120 jours respectivement.

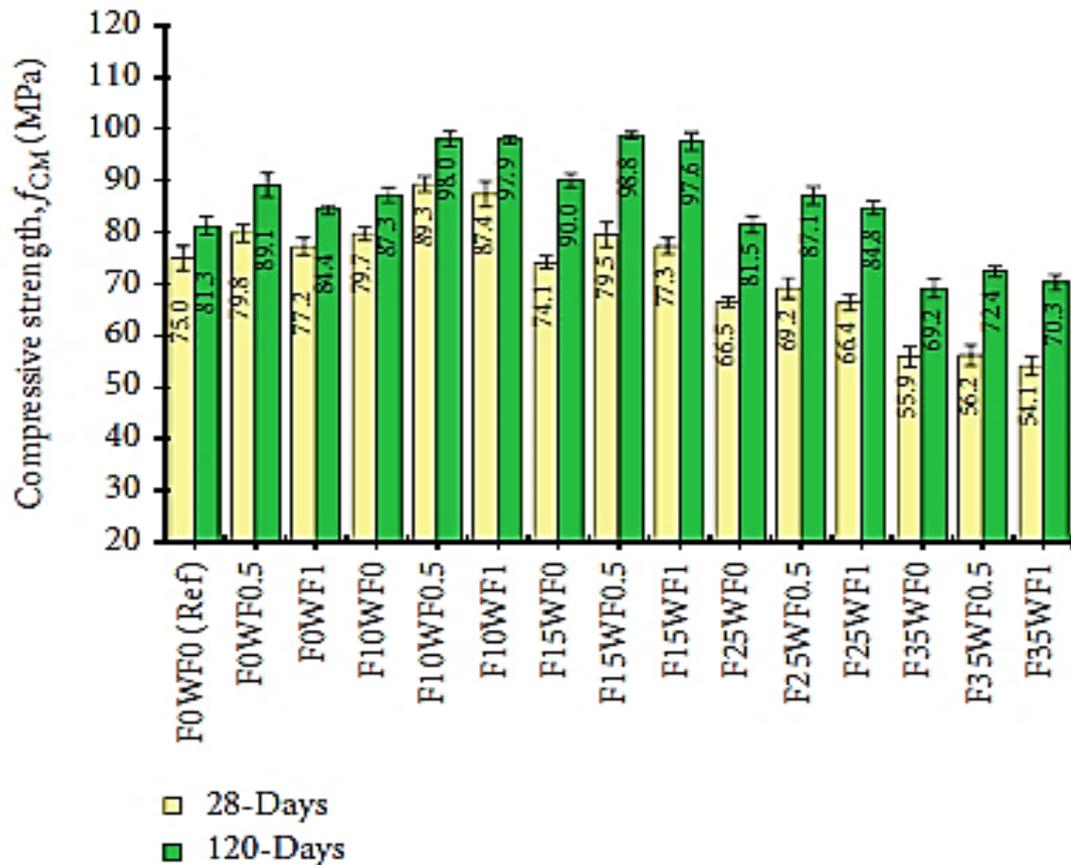


Figure 1.26 Effet des combinaisons cendres volantes et Fibre d'acier de pneu usagé sur la résistance à la compression [89]

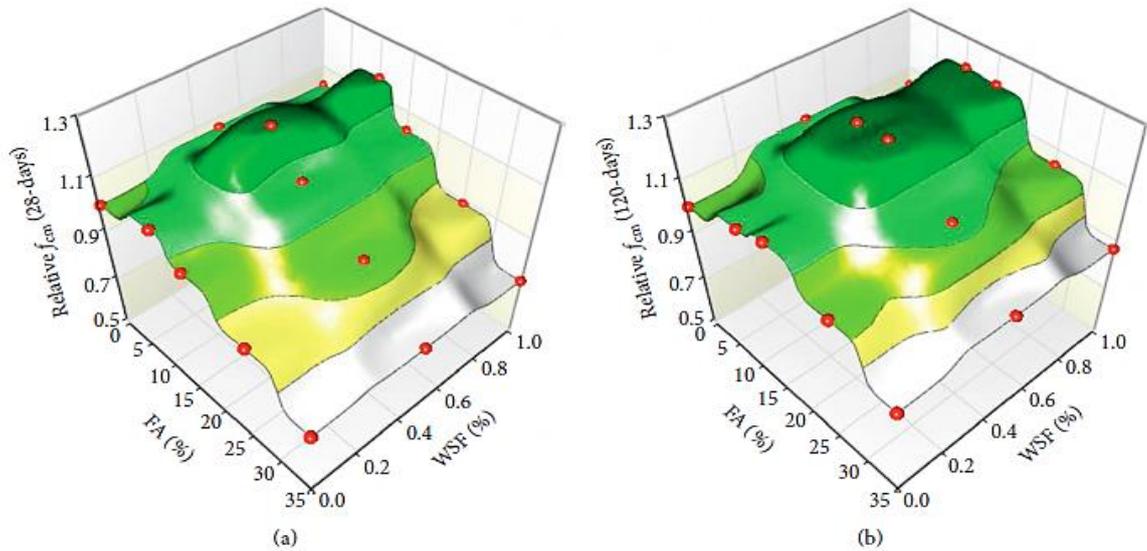


Figure 1.27 Relation entre cendres volantes, Fibre d'acier de pneu usagé et les valeurs relatives de La résistance à la compression de BHP : (a) 28 jours et (b) 120 jours [89]

### 1.6.2 Résistance mécanique à la traction des bétons fibrés

YAZICI et al. (2007) [89] ont constaté que l'inclusion de fibres d'acier affecte de manière significative la résistance à la traction et à la flexion du béton en fonction du rapport (L/d). Pour des rapports (L/d) de 45 (SFRC1-3), 65 (SFRC4-6) et 80 (SFRC7-9), les valeurs minimales et maximales de la résistance à la traction par fendage sont respectivement de 4,50, 4,51 et 4,58 MPa et de 5,69, 6,26 et 5,90 MPa. En particulier, l'utilisation d'un volume de fibres de 1,5 % est plus efficace sur la résistance à la traction fractionnée. De même, la résistance à la traction fractionnée augmente avec l'augmentation du volume de fibres.

Les valeurs de résistance à la traction évaluées à partir d'essais de fendage sur des échantillons de disques sont représentées sur la figure 1.28. Bayramov et al. (2004) [6] ont constaté que la résistance à la traction par fendage augmente avec l'accroissement de la fraction volumique des fibres d'acier, pour le rapport d'aspect des fibres de 55, une augmentation de la fraction volumique des fibres de 0% (c.-à-d. béton normal) à 0,64 % a entraîné une augmentation de 23 % de la résistance à la traction par fendage correspondante. Pour les rapports d'aspect de 65 et 80, cette augmentation est respectivement de 42 % et 24 %.

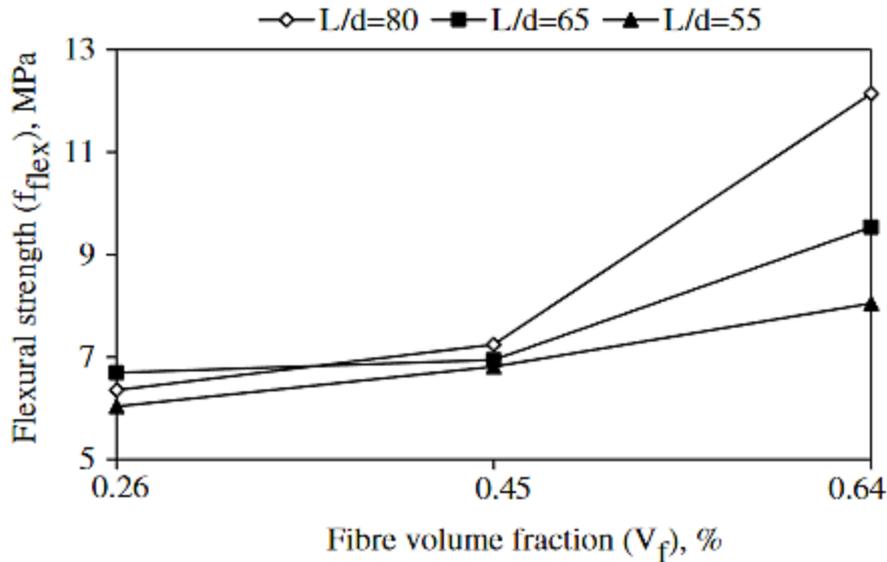


Figure 1.28 Résistance à la traction par fendage en fonction de la fraction volumique des fibres avec différents rapports d'aspect [6]

Les courbes de niveau et les tracés 3D présentés à la figure 1.29 montrent qu'une augmentation de (Rapport d'aspect) et une réduction de (E/C) augmentent la résistance à la rupture. Pour l'interaction entre (Rapport d'aspect) et (Ciment), il a été observé qu'une augmentation de (Ciment) et une augmentation raisonnable de (Rapport d'aspect) augmentent la résistance à la rupture. L'interaction entre (E/C) et (Ciment) a permis d'observer que pour un (E/C) de 0,33 avec une augmentation raisonnable de (Ciment), la résistance à la rupture peut être améliorée [83].

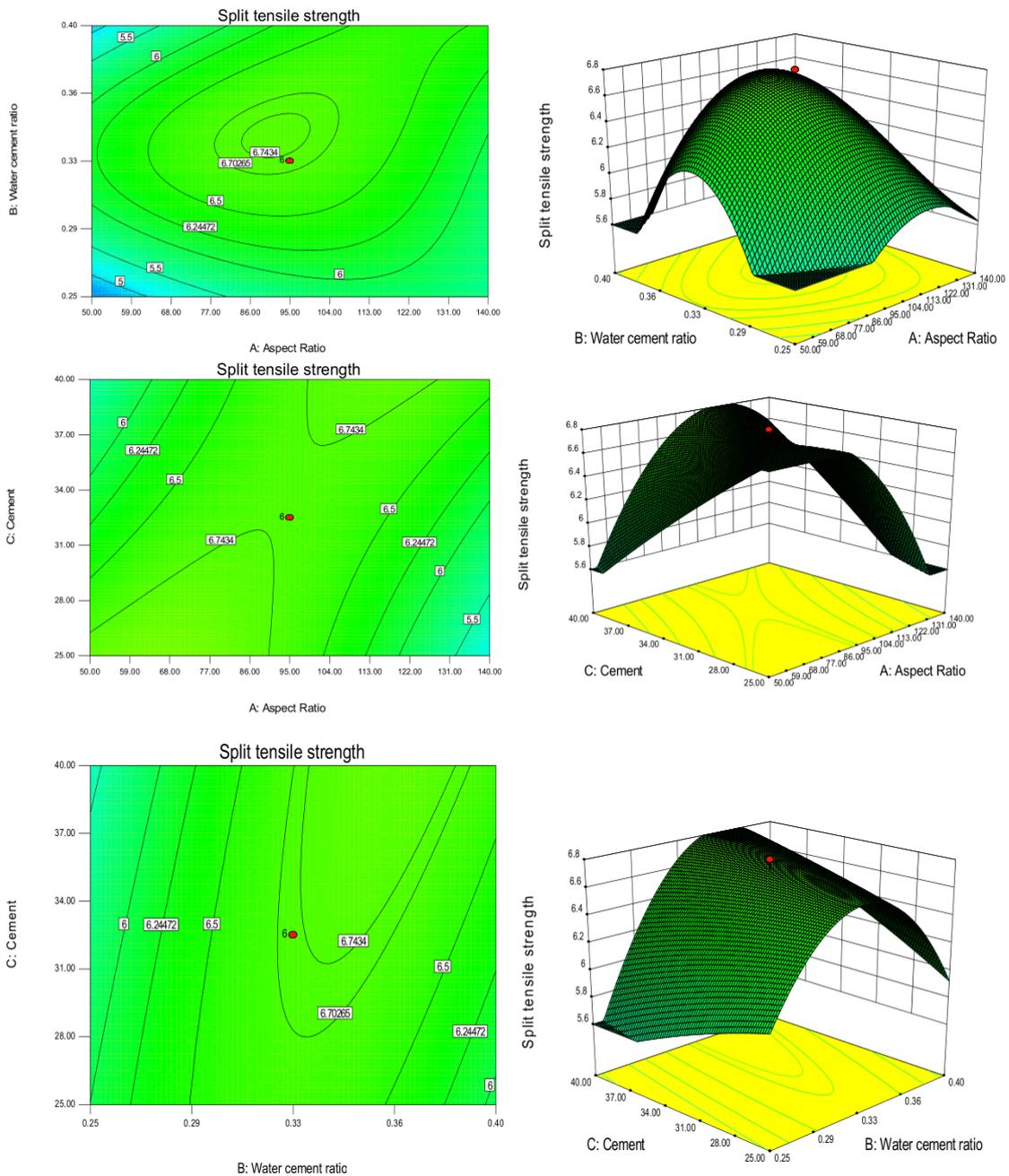


Figure 1.29 Contours et tracés 3D pour la résistance à la traction fractionnée [83]

La figure 1.30 illustre la variation des résistances à la traction par fendage de différents bétons renforcés de fibres à l'âge de 7, 28 et 91 jours. Les résultats des bétons renforcés de fibres montrent que l'ajout de fibres d'acier a un impact significatif sur la résistance à la traction du béton par fendage. Comme prévu, une augmentation de la fraction volumique de fibres a entraîné une augmentation des résistances à la rupture [85].

Les résultats indiquent également qu'une augmentation de la résistance à la traction par fendage de 13% à 58% en fonction de la teneur en fibres et de l'âge du béton a été obtenue grâce à l'ajout de fibres d'acier au mélange.

Cependant, les résultats des bétons hybrides fibrés montrent que les fibres d'acier sont plus efficaces que les fibres polypropylène (PP) pour renforcer la résistance du béton. Cependant, l'échantillon contenant n'importe quelle combinaison d'additifs à fibres a été plus efficace que l'échantillon sans fibres. L'amélioration de la résistance à la traction par fendage des bétons hybrides a augmenté de 23% à 52%, en fonction du pourcentage de remplacement des fibres d'acier par des fibres de PP et de l'âge du béton.

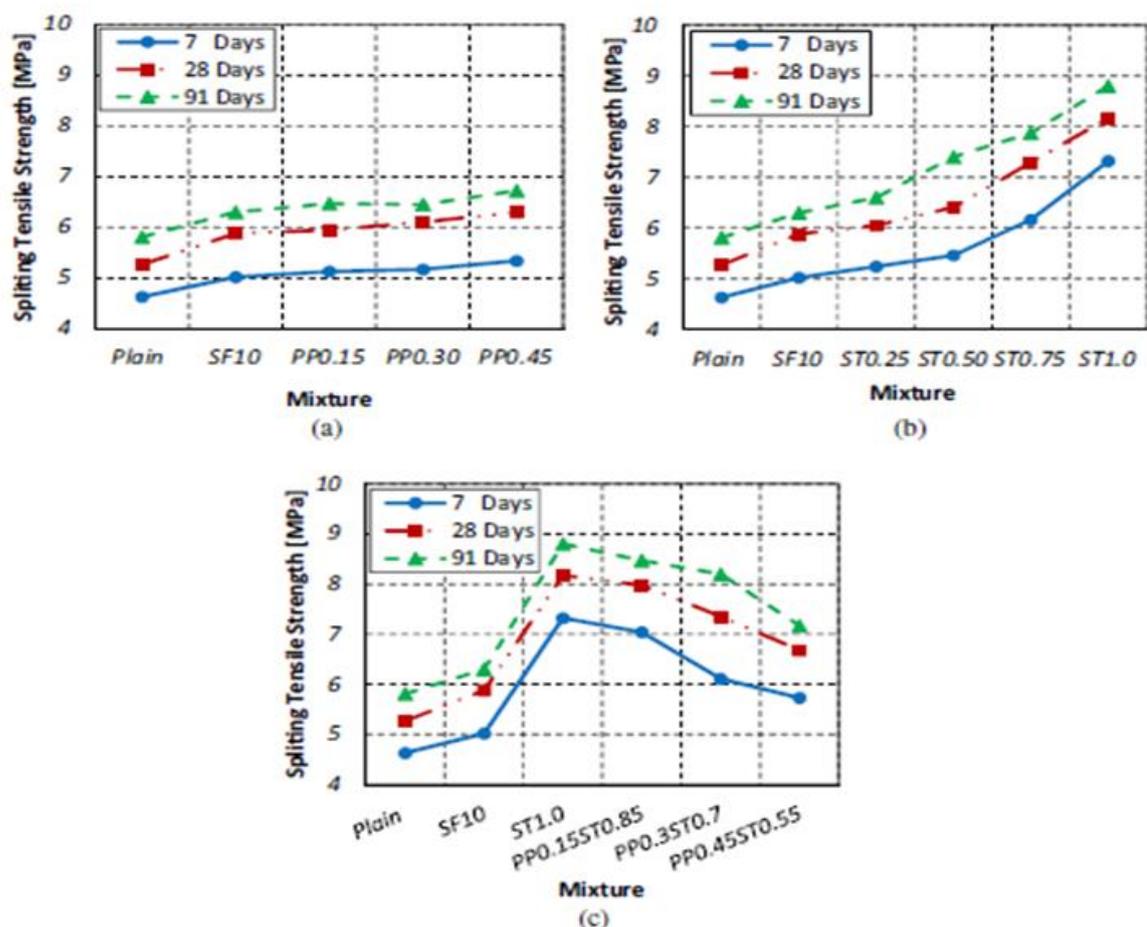


Figure 1.30 Résistance à la traction par fendage de différents bétons renforcés par des fibres, (a) éprouvettes renforcées par des fibres de polypropylène, (b) éprouvettes renforcées par des fibres d'acier, (c) éprouvettes hybrides renforcées par des fibres de polypropylène [85]

### 1.6.3 Résistance mécanique à la flexion des bétons fibrés

Iqbal et al. (2015) [87] ont soutenu que l'augmentation de la quantité de fibres d'acier conduit à une élévation de la résistance à la flexion. (voir figure 1.31). Selon Zhao et al. (2018) [90], La résistance à la flexion du béton léger de schiste expansé renforcé de fibres d'acier a été calculée en utilisant la charge maximale de la poutre d'essai sur la courbe de charge-déflexion. L'ajout de fibres d'acier a généralement augmenté la résistance à la flexion. Lorsque les fibres d'acier ont été ajoutés à une fraction volumique de 0,4 %, la résistance à la flexion a augmenté de 5,9 % en moyenne et de 11,2 % par point de pourcentage. Cela s'explique par le fait que l'effet de pontage des (SF) avant la fissuration a réduit la rupture du granulats léger grossier. Ceci peut être clarifié par le fait que la fibre d'acier est capable de supporter l'expansion et l'élongation des fissures même après l'apparition d'une fissure de flexion puisqu'elle est faite d'acier [91].

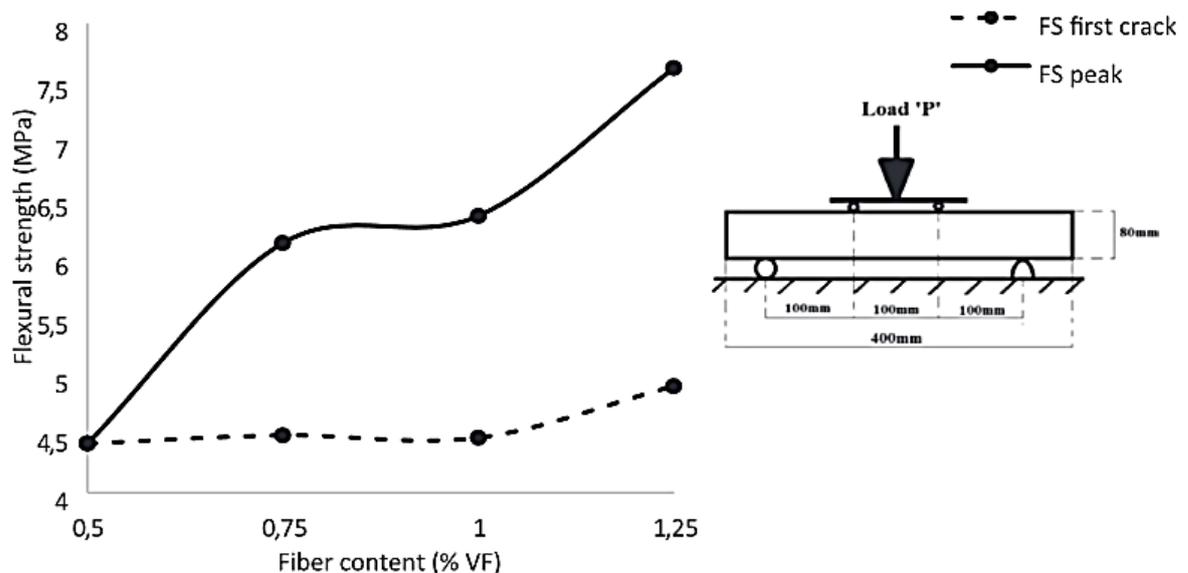


Figure 1.31 Résistance à la flexion du béton fibré en fonction de la teneur en fibres d'acier [87]

De plus Yew et al. (2016) [92] ont démontré qu'une infime quantité de fibre améliore la ductilité sans avoir d'effet sur la résistance à la flexion du béton léger à coque de palmier à huile à haute résistance.

Les fibres d'acier améliorent significativement la résistance à la flexion du béton avec l'augmentation du rapport  $l/d$  et du volume des fibres. Yazıcı et al. (2007) [8] ont approuvé que la résistance à la flexion du béton armé de fibres d'acier est augmentée de 3 à 81 % par rapport à celle du béton témoin préparé sans fibre.

Les effets du rapport d'aspect et de la fraction de volume des fibres d'acier sur la résistance à la flexion d'une poutre entaillée soumise à un essai de flexion trois points sont représentés sur la figure 1.32. Pour le rapport d'aspect des fibres de 55, une augmentation de la fraction volumique des fibres de 0 % (c'est-à-dire du béton normal) à 0,64 % a entraîné une augmentation de 33,5 %. Pour les rapports d'aspect des fibres de 65 et 80, les augmentations étaient respectivement de 56,5 % et 100 %.

Les fibres supportent la charge soumise au béton jusqu'à ce que la liaison interfaciale entre les fibres et la matrice soit fissurée, ce qui augmente la résistance à la flexion.

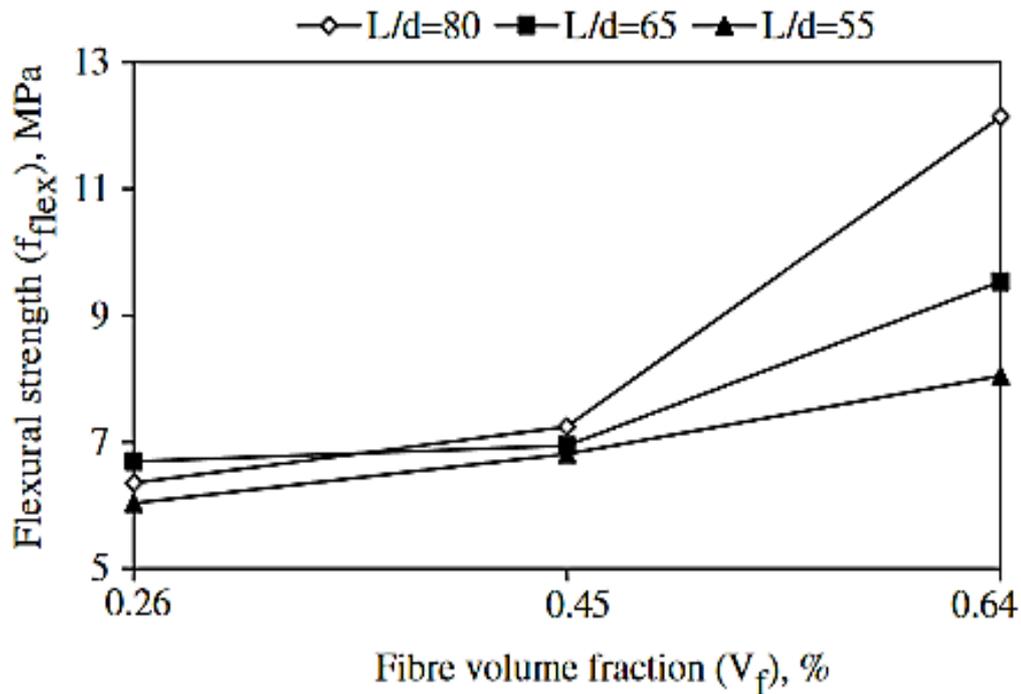


Figure 1.32 Résistance à la flexion en fonction de la fraction volumique des fibres avec différents rapports d'aspect (En NC,  $f_{flex} = 6.1$  MPa) [6]

L'ajout d'une teneur appropriée en fibre d'acier contribue à améliorer la résistance à la flexion du béton à haute performance contenant du nano-  $SiO_2$  et des cendres volantes. Selon la figure 1.33. La résistance à la flexion augmente de manière graduelle à mesure que la quantité de fibres d'acier augmente de 0,5 % à 2 % [84].

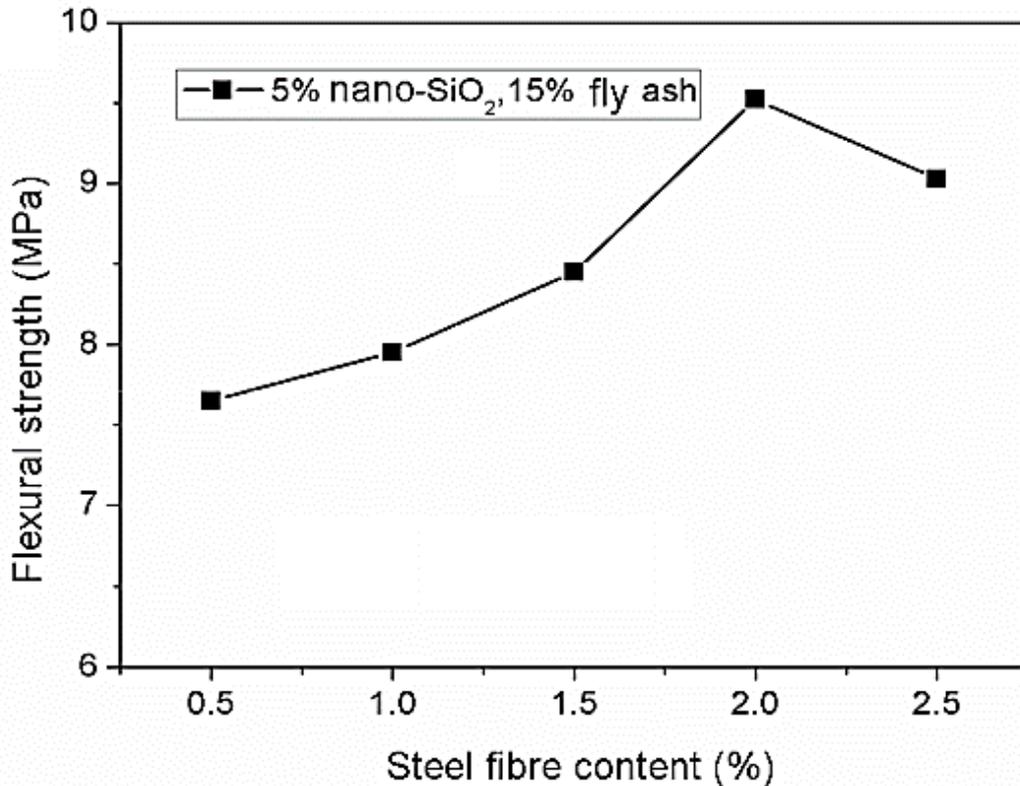


Figure 1.33 Effet de la teneur en fibres d'acier sur la résistance à la flexion [84]

Les tracés de surface de la figure 1.34 montrent que l'amélioration de la résistance résiduelle à la flexion n'est pas nécessairement liée à la seule augmentation de la teneur en fibres [93]. En projetant les croisements entre chacune de ces surfaces et leurs plans médians sur les axes du rapport d'aspect et de la fraction volumique, deux courbes utiles peuvent être créées. Ces courbes indiquent la fraction volumique minimale nécessaire pour obtenir des performances supérieures à la moyenne pour tout rapport d'aspect des fibres. Si l'on considère des fibres ayant un rapport d'aspect de 60, le dosage de fibres requis est de 0,69 %, et de 0,56 % si le rapport d'aspect est de 80. En d'autres termes, une résistance résiduelle à la flexion supérieure à la moyenne peut être obtenue avec des teneurs en fibres bien inférieures à 1 %. Il s'agit d'une découverte intéressante, surtout si l'on tient compte du fait que les tendances actuelles en matière de production de béton renforcé de fibres d'acier indiquent une préférence pour les mélanges dont les fractions volumiques ne dépassent pas 0,5 %.

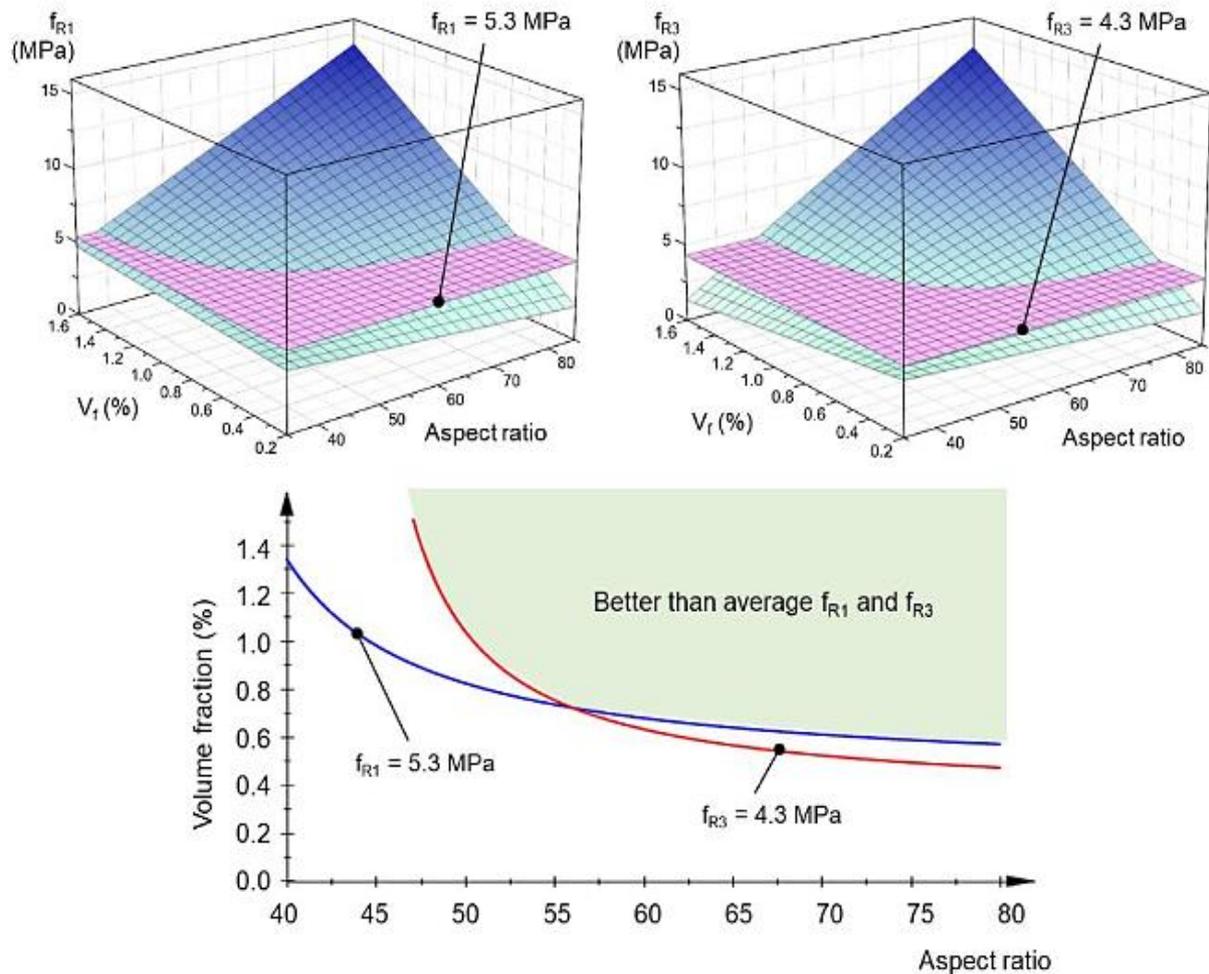


Figure 1.34 Dosage des fibres et rapport d'aspect requis pour améliorer la résistance résiduelle à la flexion [93]

Les courbes de niveau de la résistance à la flexion présentées à la figure 1.35 montrent des contours déformés, ce qui est le cas lorsque les interactions entre les variables indépendantes sont peu nombreuses. Les courbes de niveau de l'interaction entre les facteurs (Rapport d'aspect) et  $(E/C)$ , avec  $C$  maintenu constant, n'ont pas permis d'observer une tendance claire, mais le graphique 3D a montré qu'une augmentation de la résistance à la flexion peut être obtenue avec une augmentation de (Rapport d'aspect) et une réduction de  $(E/C)$ . L'interaction entre (Rapport d'aspect) et  $C$  a permis d'observer pour les deux graphiques que les changements de (Rapport d'aspect) et de  $C$  ont peu d'effet sur la résistance à la flexion. D'après les courbes de niveau et les tracés 3D pour l'interaction entre  $(E/C)$  et  $C$ , l'augmentation des deux facteurs améliorera la résistance à la flexion [83].

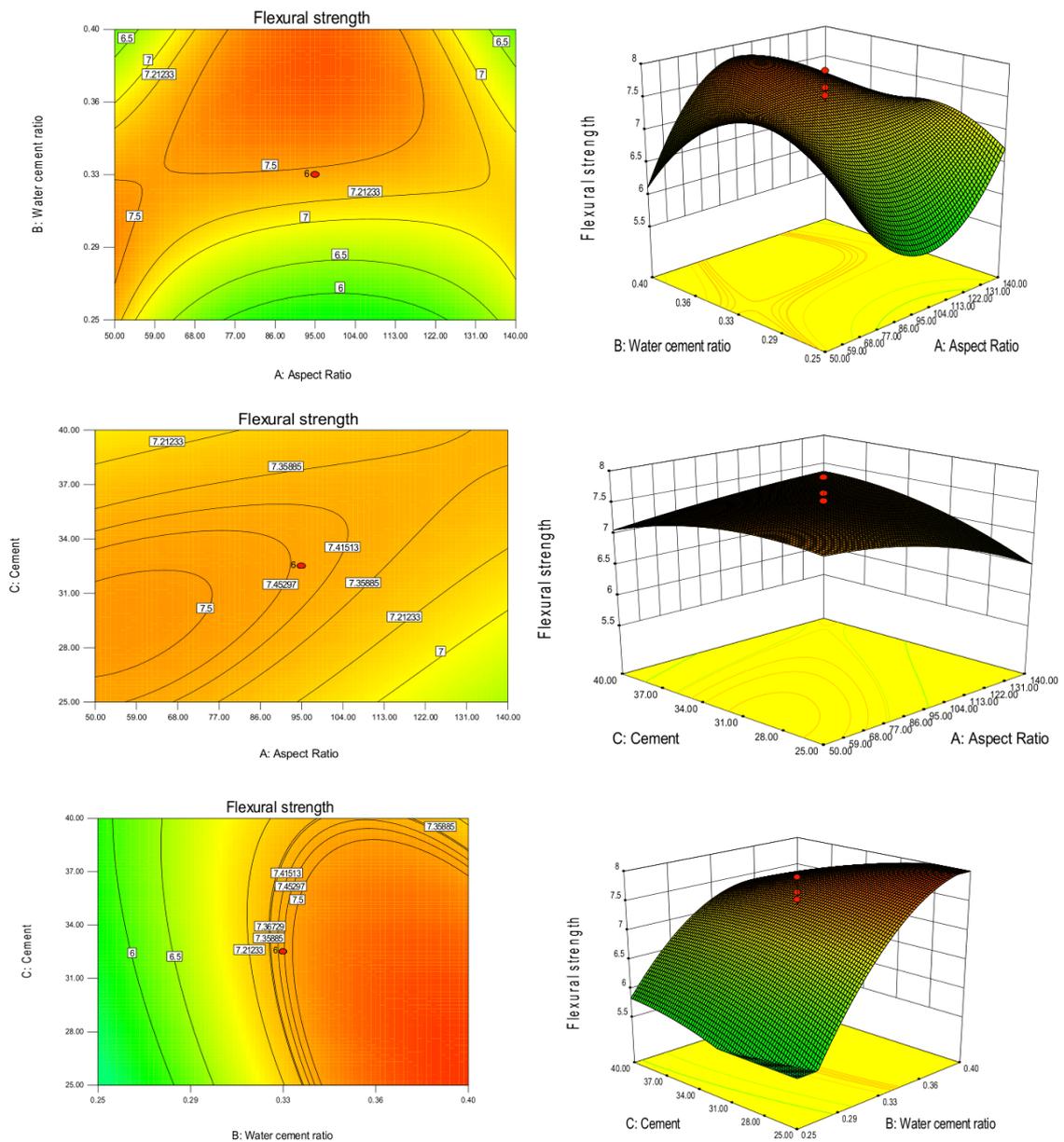


Figure 1.35 Contours et tracés 3D pour la résistance à la flexion [83]

### 1.6.4 Absorption d'eau des Bétons fibrés

D'après Afroughsabet et Ozbakkaloglu (2015) [85], l'utilisation combinée de fumée de silice et de fibres d'acier ou de polypropylène (PP) dans le béton entraîne une diminution significative de l'absorption d'eau du béton par rapport à ceux observés dans les mélanges contenant uniquement de la fumée de silice (voir figure 1.36). Parmi tous les bétons renforcés par des fibres, le mélange contenant 0,3 % de PP et 0,7 % de fibres d'acier présente l'absorption d'eau la plus faible.

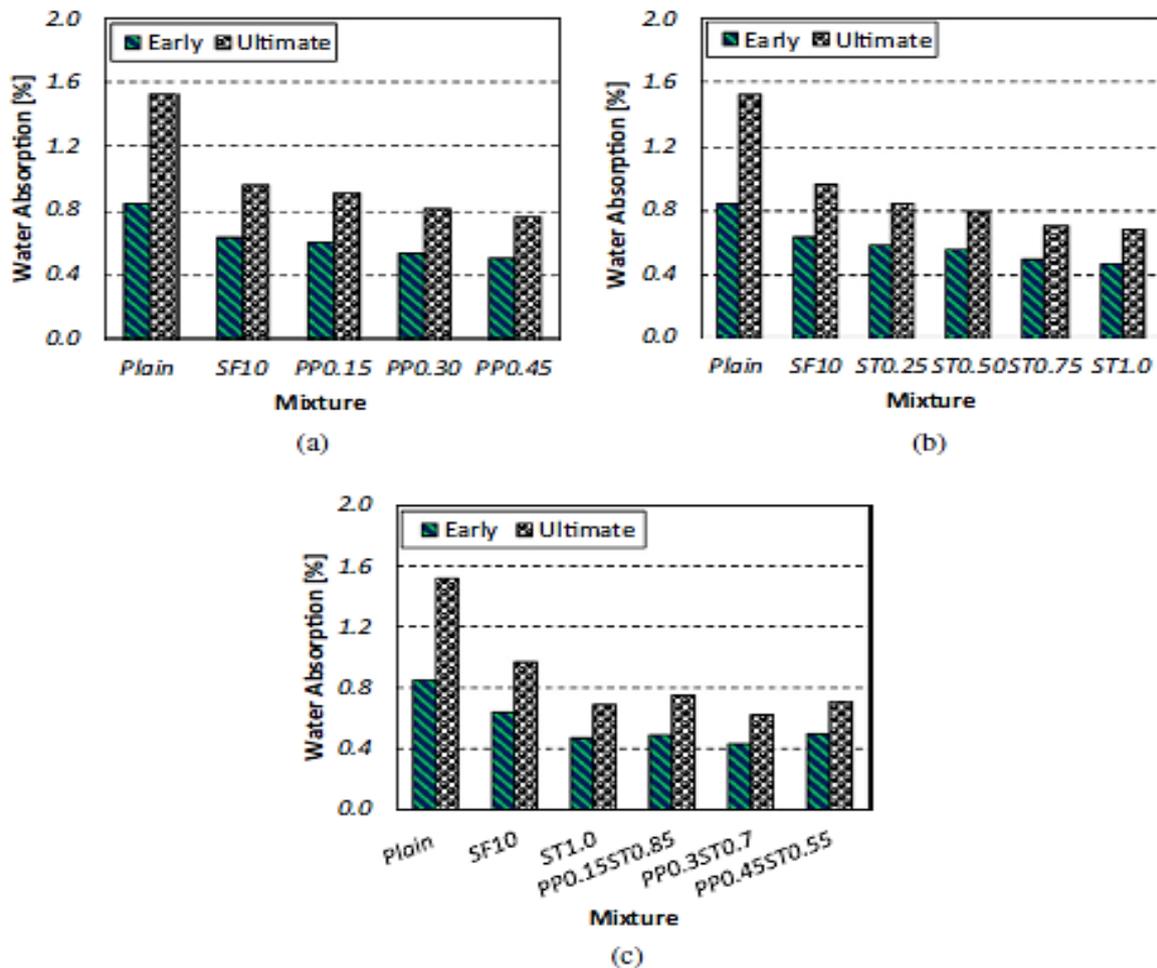


Figure 1.36 Absorption d'eau précoce et ultime de différents bétons renforcés de fibres, (a) fibres de polypropylène, (b) fibres d'acier, (c) fibres hybrides [85]

Les courbes de niveau et les tracés 3D de la consommation d'eau présentés à la figure 1.37 montrent qu'il n'y a pas d'interaction claire entre les facteurs (Rapport d'aspect) et (E/C), le (Ciment) étant maintenu constant. Une réduction de la consommation d'eau a été observée avec la diminution de (E/C), tandis que le (Rapport d'aspect) a entraîné une réduction de la consommation d'eau pour les valeurs faibles et élevées de (Rapport d'aspect). Les courbes de niveau et des tracés 3D indiquent que la consommation d'eau diminue avec l'augmentation du facteur (Rapport d'aspect) et la réduction du facteur (Ciment). Pour l'interaction entre (Ciment) et (E/C), la réduction du facteur (Ciment) et l'augmentation du facteur (E/C) tend également à réduire la consommation d'eau [83].

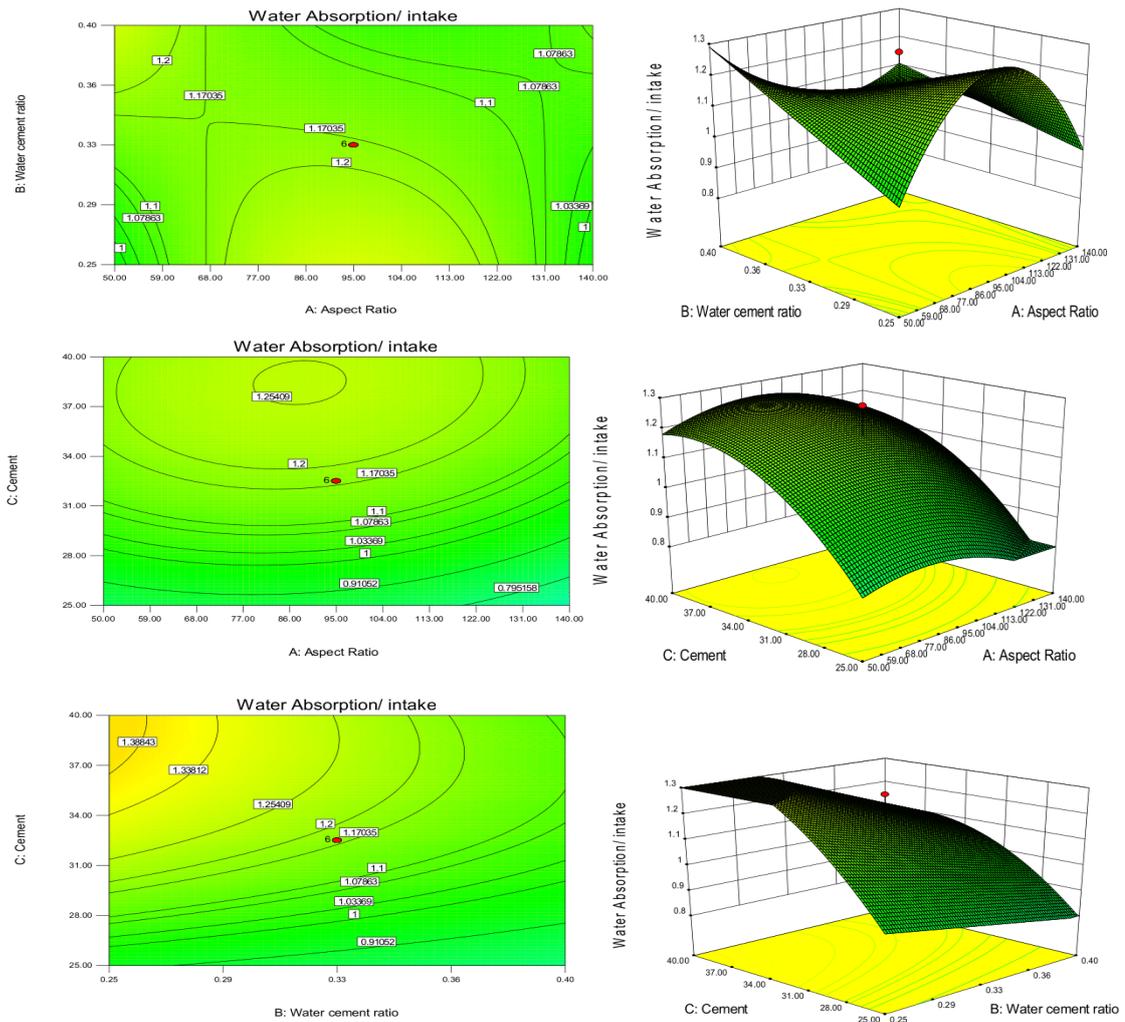


Figure 1.37 Contours et tracés 3D de l'absorption d'eau [83]

### 1.6.5 Comportement thermique des Bétons fibrés

Le béton contient de l'humidité sous différentes formes et, à haute température, cette humidité s'évapore à des vitesses différentes. Cela entraîne des changements physiques et chimiques dans la microstructure et influe donc sur la variation de la conductivité thermique en relation avec l'évolution de la température. La conductivité thermique est généralement mesurée au moyen de méthodes d'essai "en régime permanent" ou "en régime transitoire". Pour mesurer la conductivité thermique du béton humide, on préfère les méthodes transitoires aux méthodes en régime permanent, car les changements physico-chimiques du béton à des températures plus élevées provoquent un flux de chaleur instable [94]. La conductivité thermique des bétons conventionnels, à température ambiante, est comprise entre 2,3 et 2,8 W/m°C. Mais la littérature contient peu d'informations sur la conductivité thermique des BAP et des BAP renforcés par des fibres.

La chaleur spécifique du béton est fortement influencée par la teneur en eau, le type de granulats et la densité du béton [95,96]. En général, pour les bétons à haute teneur en eau, la chaleur spécifique reste constante jusqu'à 400 °C, mais elle augmente au-delà de 400 °C, car une plus grande quantité de chaleur est nécessaire pour libérer l'humidité liée chimiquement au béton [14]. Les variations de la chaleur spécifique à des températures élevées sont principalement influencées par la teneur en eau, le type de granulat, les conditions d'essai et les méthodes de mesure employées lors des expériences. [94]. Aucune étude antérieure n'a été rapportée sur la chaleur spécifique du BAP et des BAP renforcé par des fibres.

Dans ce cadre [14] ont présenté un travail qui étudie l'effet de la température sur les propriétés thermiques et mécaniques du béton autoplaçant (BAP) et du BAP renforcé par des fibres (BFR) où toutes les propriétés mécaniques ont été mesurés dans la plage de température de 20 à 800 °C.

Selon [14], l'ajout de fibres d'acier au BAP ne modifie pas de manière significative la conductivité thermique dans la plage de température 20 à 800 °C (voir la figure 1.38 ).

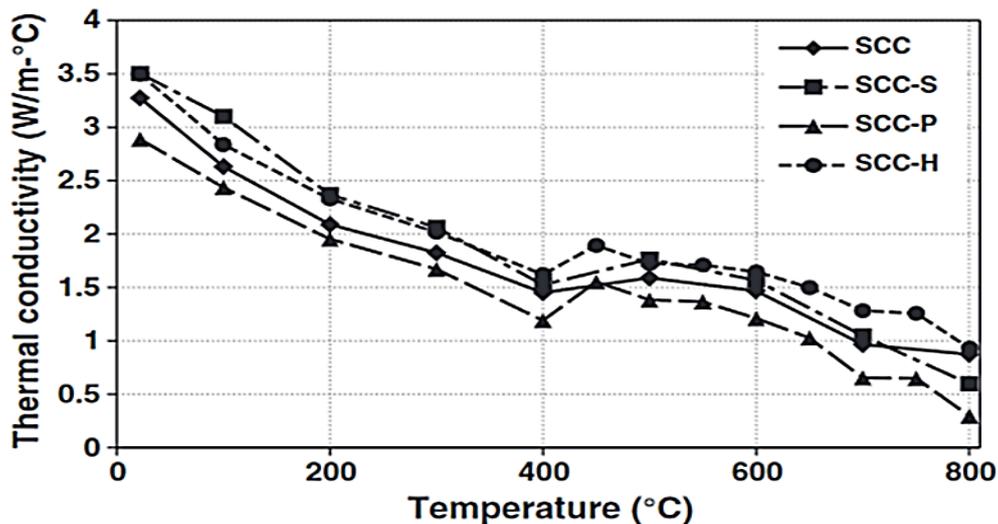


Figure 1.38 Conductivité thermique mesurée du BAP (SCC) et des BAP renforcé par des fibres (FRSCC) en fonction de la température [14]

Tandis que l'ajout de fibres d'acier n'a pas beaucoup d'effet sur la résistance à la compression à haute température du BAP, il améliore la résistance à la traction jusqu'à 400 °C, ce qui peut être bénéfique pour minimiser l'écaillage induit par le feu. De plus les fibres d'acier améliorent de manière significative le module élastique de béton autoplaçant (voir figure 1.39).

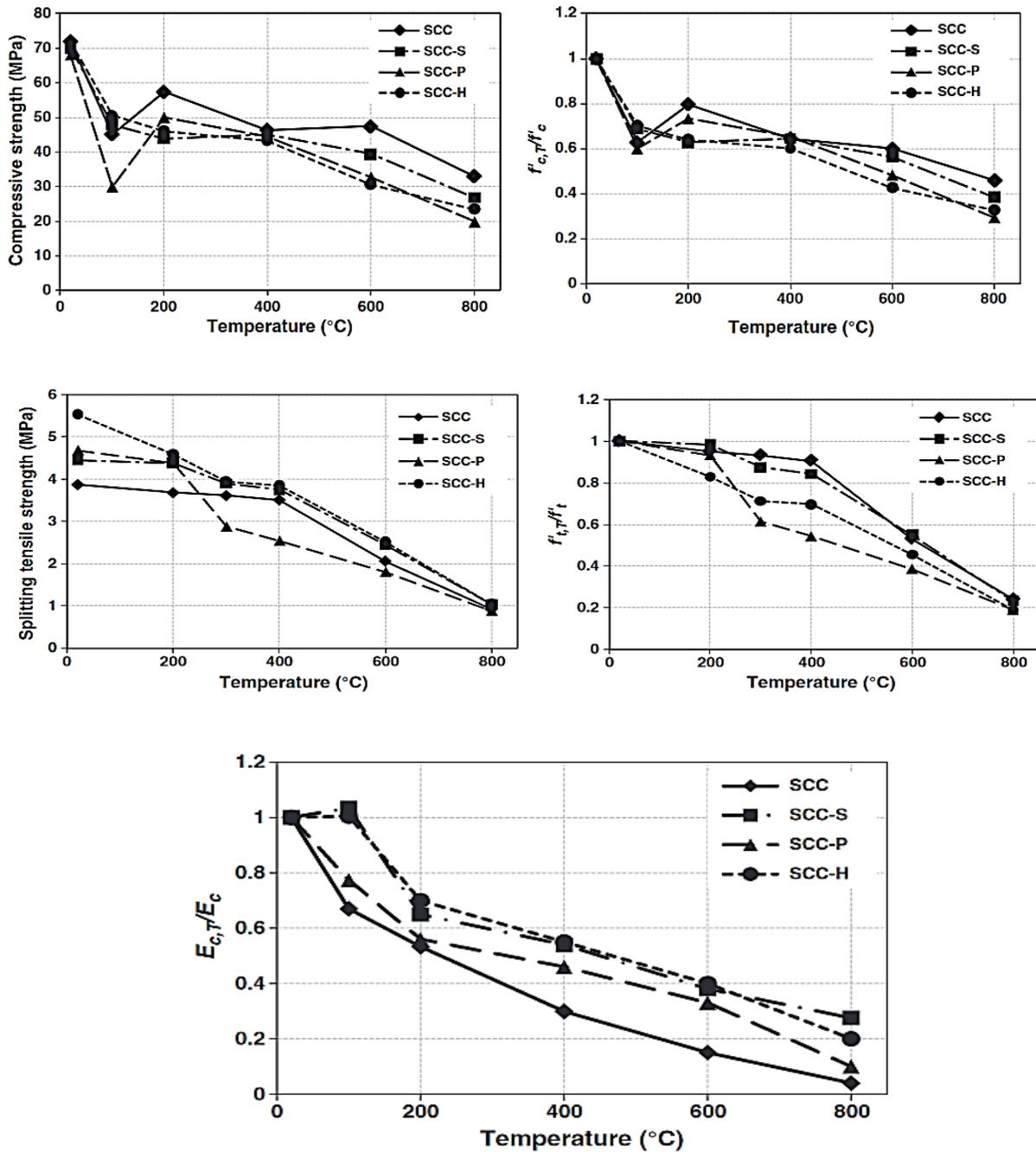


Figure 1.39 Propriétés mécaniques des BAP et BAP fibrés en fonction de la température ; (a) Résistance à la compression (b) Résistance à la traction, (c) Module élastique relatif [14]

## 1.7 Influence des fibres sur la microstructure du béton

La figure 1.40 présente les principaux résultats observés de l'analyse au microscope électronique à balayage (agrandis de 500 fois) effectuée sur des échantillons du béton renforcé par des fibres produit à partir de fibres de déchets de tour.

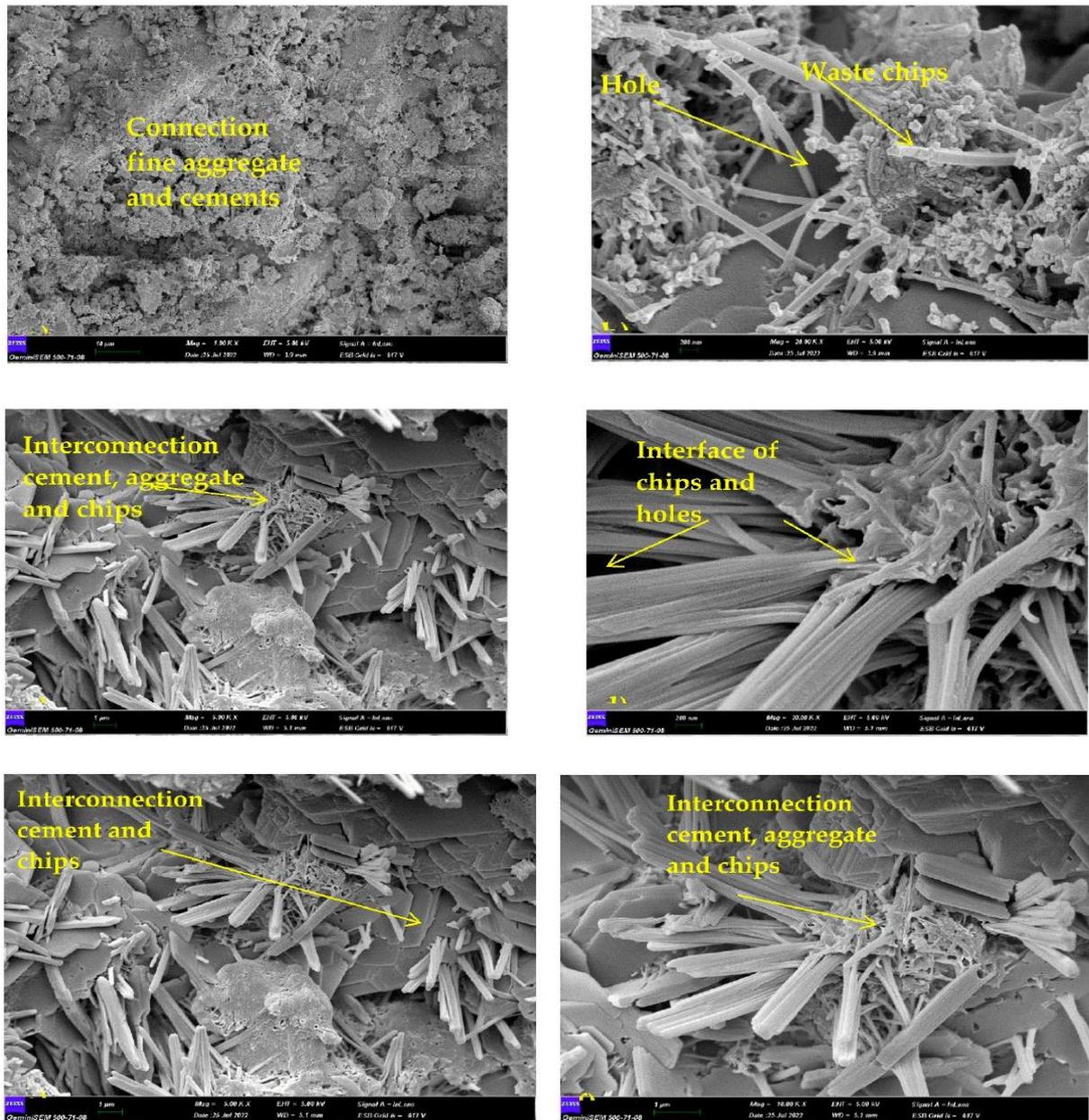


Figure 1.40 Images MEB [97]

Comme montré dans la figure I.40 a et b, une bonne liaison se produit avec l'ajout de copeaux de déchets de tour dans la structure microporeuse du béton. De plus, la résistance élastique, la ductilité et la ténacité du béton sont améliorées grâce à cette liaison entre le béton et les fibres. La nature ondulée des copeaux de déchets de tour est une caractéristique importante qui entraîne une bonne adhérence. La figure I.40 c et d montre que les puces de tour se lient bien avec le ciment et l'agrégat, et la figure I.40 e et f montre l'interface et les états de l'interface des copeaux de déchets de tour [97].

La forme ondulée des fibres métalliques donne une meilleure qualité d'adhérence et d'ancrage qui influe directement sur le comportement en flexion des béton à haute performance [61].

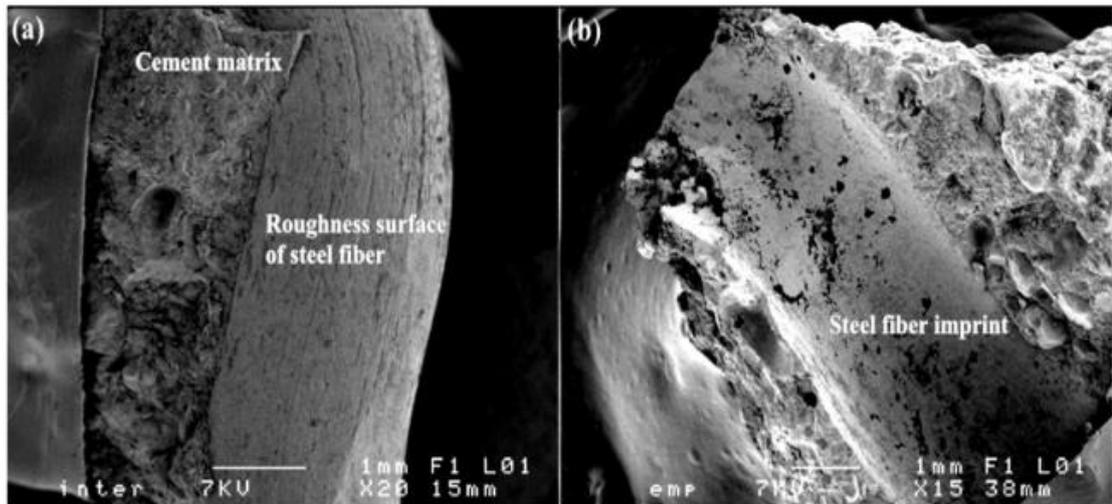


Figure 1.41 Observation MEB, (a) l'interface fibre-matrice de ciment, (b) Empreinte de la fibre métallique [61].

D'autre part, la figure 1.42 représente la microstructure de l'interface fibre-pâte. Les fissures dans l'interface fibre-pâte sont plus larges que les fissures dans l'interface granulat-pâte pour le béton d'agrégats légers renforcés en fibres d'acier. L'augmentation du dosage des fibres d'acier a augmenté la porosité entre les fibres et la pâte, ce qui affecte la résistance et la durabilité du béton. La meilleure teneur en fibre d'acier est choisie pour cette raison. [98].



*Figure 1.42 L'interface fibre-pâte dans le ciment renforcé de fibres d'acier [98].*

## 1.8 Conclusion

En concluant ce chapitre, il apparaît clairement que la compréhension approfondie des bétons fibrés à haute performance (BHP) repose sur une analyse minutieuse de leur composition et de leurs principaux constituants. Nous avons démontré que les fibres, en particulier, jouent un rôle central en augmentant la résistance mécanique de la matière cimentaire, soulignant ainsi leur importance stratégique dans la formulation des BHP.

L'examen des différentes méthodes de formulation a mis en évidence la souplesse des BHP pour s'adapter aux exigences spécifiques des projets de construction. Cette flexibilité offre une palette d'options pour concevoir des mélanges de béton répondant de manière optimale aux diverses contraintes et besoins rencontrés sur le terrain.

Les études portant sur le comportement mécanique ont renforcé notre compréhension de l'efficacité des BHP fibrés dans divers contextes structurels. Ces résultats concrets confirment l'applicabilité et la performance remarquable de ces matériaux innovants dans des applications aussi variées que les fondations, les structures de ponts, ou les éléments préfabriqués.

Au-delà de son rôle informatif, cette revue bibliographique se profile comme une ressource clé, offrant une base solide pour approfondir les connaissances existantes. Elle constitue également un guide stratégique pour orienter les futures recherches dans le domaine dynamique et prometteur des bétons fibrés à haute performance.

En soulignant l'importance croissante de ces matériaux novateurs dans l'industrie de la construction, cette synthèse sert de moteur pour stimuler des avancées continues et orienter les développements futurs. Les BHP fibrés se positionnent ainsi comme des éléments cruciaux pour répondre aux défis contemporains de la construction, ouvrant la voie à des progrès significatifs et durables.

Cette conclusion met en avant la pertinence et l'impact potentiel des BHP fibrés, non seulement en tant que matériau de construction, mais aussi en tant que catalyseur pour des innovations constructives plus durables.

---

## Chapitre 2 : Matériaux utilisés et méthodes d'essais

---

## 2.1 Introduction

Les matériaux étudiés sont des bétons à hautes performances renforcés par les fibres métalliques recyclées du câble en aciers torsadés. Ils sont conçus pour être employés en tant que matériaux de construction qui renforcent le béton à haute performance. Sa résistance mécanique est assurée par la répartition homogène et les différents rapports d'aspect longueur-diamètre ( $L/d$ ) des fibres dans la matrice cimentaire du béton à hautes performances. Dans ce deuxième chapitre, avant de se plonger dans la caractérisation physico-mécanique de ces matériaux, objectif du présent travail, nous allons d'abord procéder à une description globale des matières premières employées. Ensuite, nous aborderons le processus d'élaboration des bétons étudiés. Enfin, nous ferons une brève présentation des principales techniques expérimentales employées dans cette étude.

## 2.2 Matériaux utilisés

### 2.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment de Biskra de type CEM I (CPA 42,5 R) provenant de la cimenterie de BISKRIA (Biskra), conforme à la norme Algérienne (NA 442-2013), pour les BHP et a une résistance rapide à court terme. Les caractéristiques physico-mécaniques de ce ciment sont données dans le tableau 2.1, et sa composition minéralogique et chimique est présentée dans le tableau 2.2. Le diffractogramme des rayons X (DRX) et l'analyse granulométrique du ciment sont présentés dans les figures 2.1 et 2.2, respectivement.

### 2.2.2 Fumé de silice

L'ajout utilisé dans cette étude est une fumée de silice appelée MEDAPLAST HP délivrée par l'usine Granitex Oued Smar (Algérie) de couleur grise. Elle a une densité de 2.24 et une SSB de 10000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . L'analyse granulométrique du ciment est illustrée dans la figure 2.3. Le tableau 2.3 présente sa composition chimique et montre que cet ajout se compose en général de silice de l'ordre de 86% ce qui est confirmé par l'analyse DRX (figure 2.4).

Tableau 2. 1 Caractéristiques physico-mécanique du ciment (%).

Caractéristiques	Ciment 42.5 R
Masse volumique Absolue ( $\rho_s$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	3140
Masse volumique Apparente ( $\rho_a$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	1160
Surface spécifique Blaine (SSB) (cm <sup>2</sup> /g)	3600
Consistance normale (%)	25.8-26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25-1.0
Début de prise (min)	150-190
Fin de prise (min)	220-250
Résistance à la compression 2 jours (MPa)	20-29
Résistance à la compression 28 jours (MPa)	42.5-52.5

Tableau 2. 2 Composition chimique et minéralogique du ciment (%).

Analyse chimique		Analyse minéralogique	
CaO	63.46	C <sub>3</sub> S	62.15
SiO <sub>2</sub>	21.42	C <sub>2</sub> S	14.85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.22	C <sub>3</sub> A	5.30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.48	C <sub>4</sub> AF	10.57
SO <sub>3</sub>	3.63	PAF	1.30
MgO	2.53		
K <sub>2</sub> O	0.83		
Na <sub>2</sub> O	0.41		
Cl	0.02		

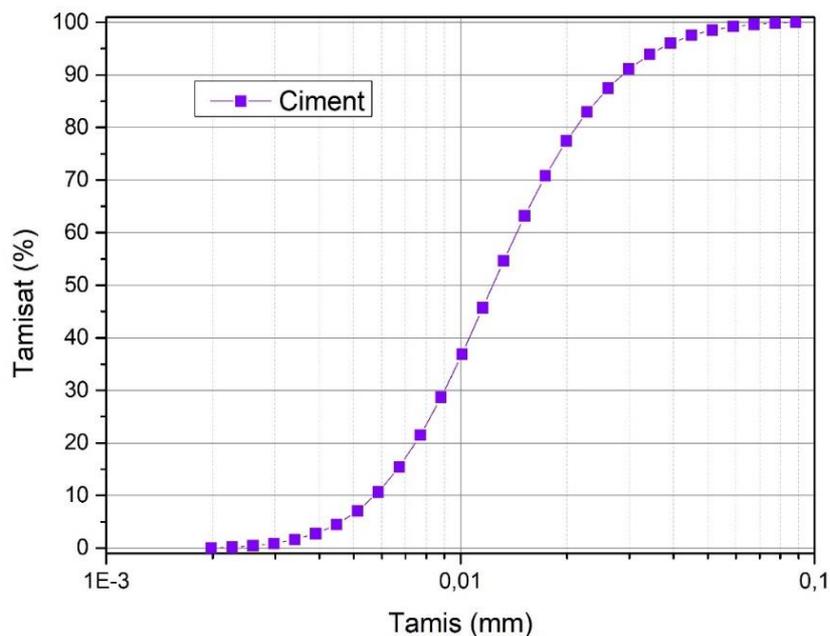


Figure 2. 1 Courbe granulométrique du ciment (CPA CEM I 42.5 R)

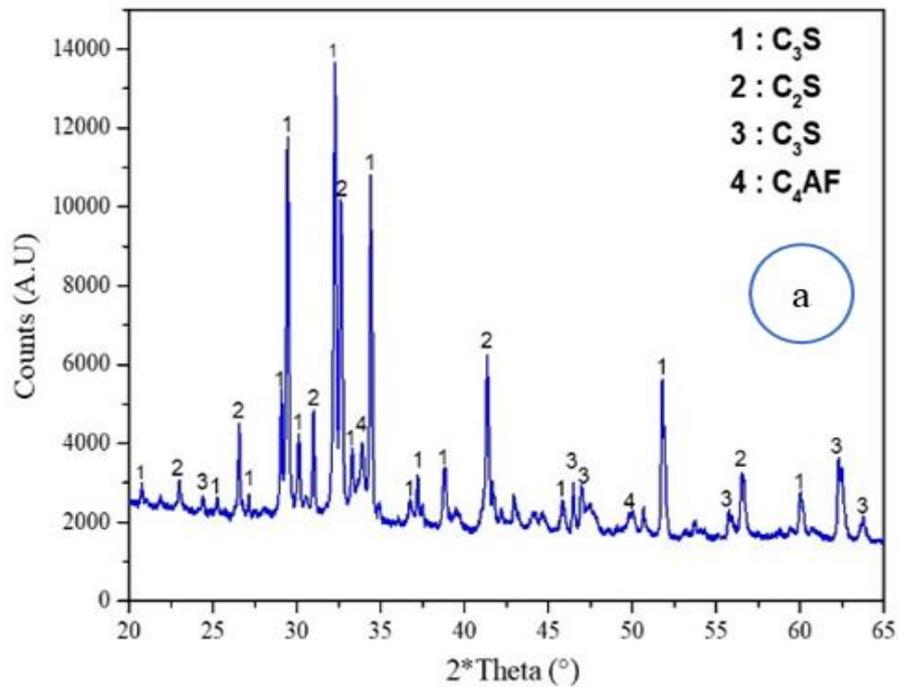


Figure 2. 2 Analyse par DRX du ciment utilisé (CEM I CPA 42.5 R)

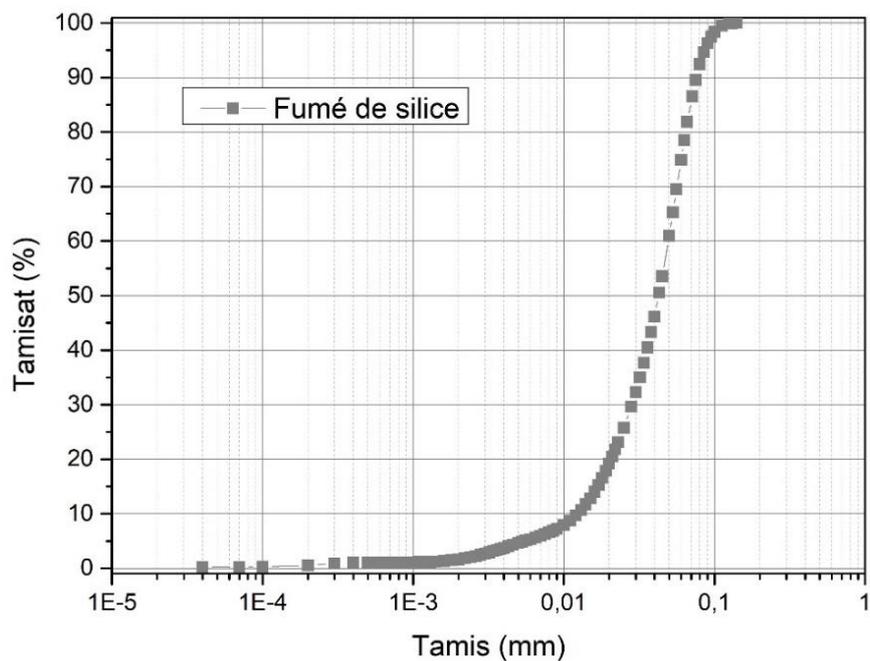


Figure 2. 3 Courbe granulométrique de la fumée de silice.

Tableau 2. 3 Caractéristiques chimiques de la fumée de silice (%).

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl	PAF
85,75	2,43	0,99	2,25	3,61	1,58	2,47	0,91	0.01	5.03

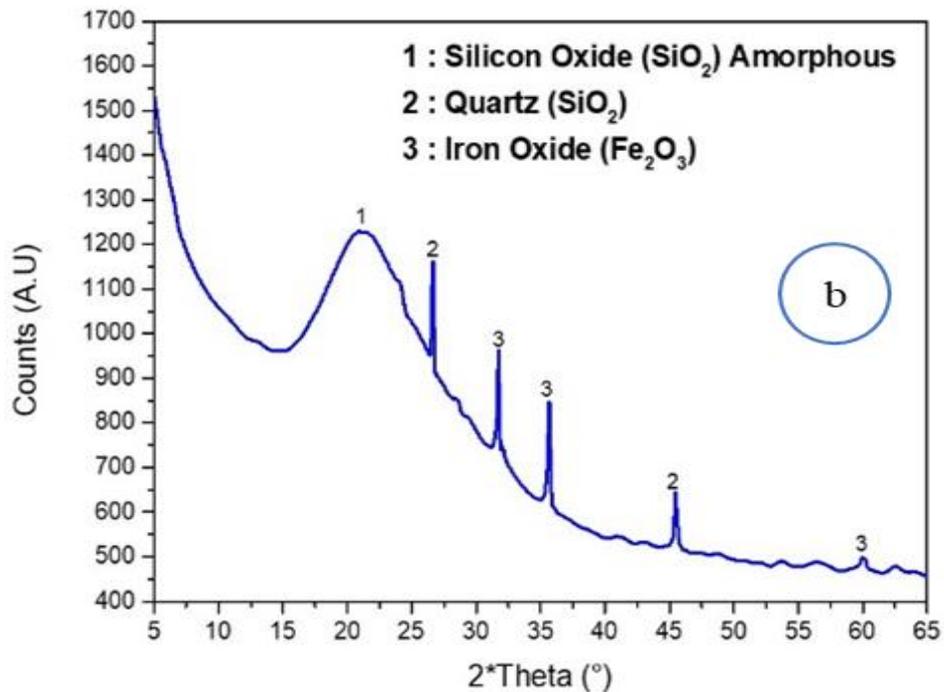


Figure 2. 4 Analyse par DRX du fumé de silice

### 2.2.3 Sable

Le Sable utilisés de fraction (0-3mm) est un sable Alluvionnaire locale de la wilaya Oued Souf (Algérie). Il est caractérisé par un équivalent de sable élevé égale à 88%, une densité de 2.60 et un module de finesse de 1.95 montrant que c'est un sable fin. L'analyse granulométrique du sable Alluvionnaire utilisé pour la fabrication du béton à haute performance fibré est présentée graphiquement dans la figure 2.05.

La nature de ce sable est riche en silice et quartz comme mentionné dans le tableau 2.4 qui résume leurs principales propriétés chimiques, l'image microscopique électronique à balayage MEB et l'analyse diffractogramme des rayons X sont présentées par les figures 2.06 et 2.07, respectivement.

Tableau 2. 4 Caractéristiques chimiques sable Alluvionnaire (%)

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl
84,7	4,05	4,37	0,93	0,57	0,71	2,35	2,31	0.01

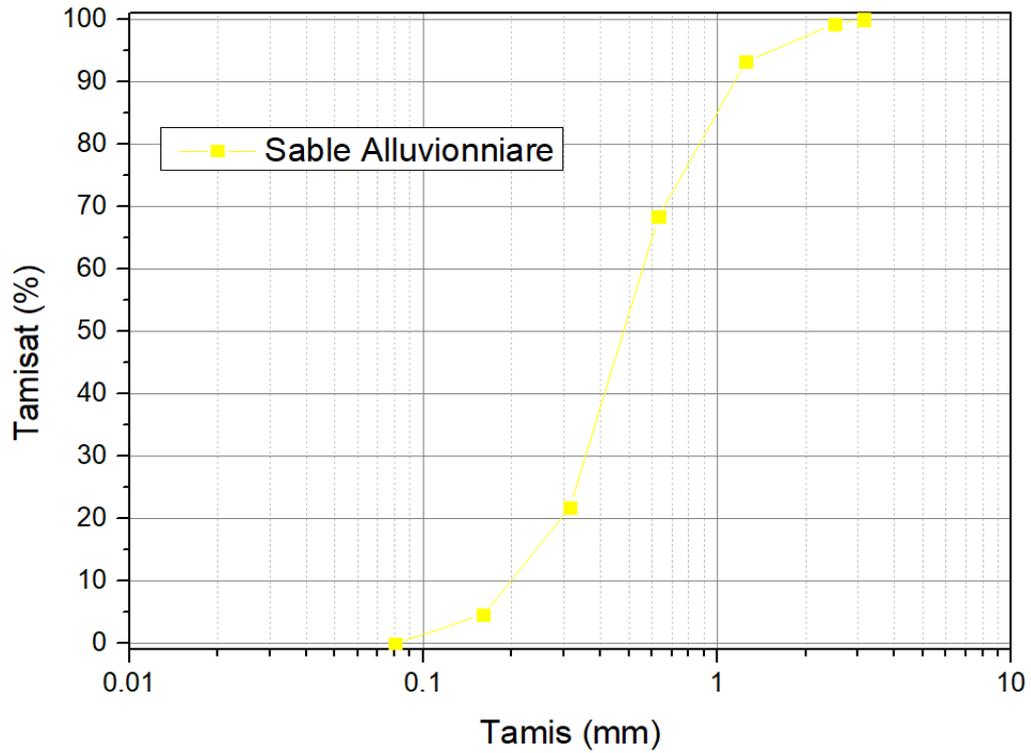


Figure 2. 5 Courbe granulométrique du sable Alluvionnaire

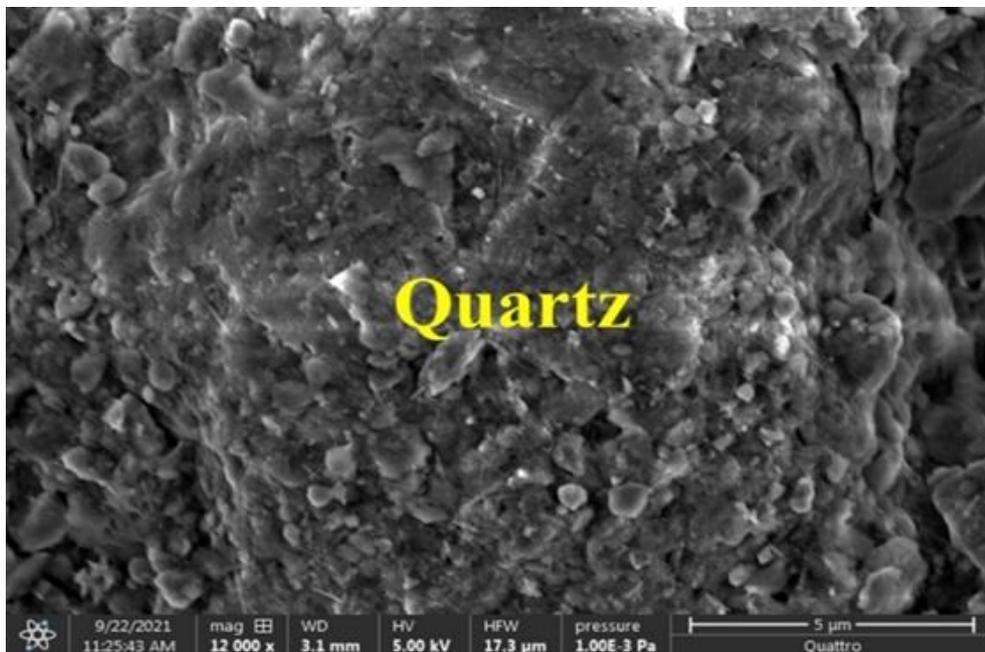


Figure 2. 6 Image microscopique électronique à balayage de sable Alluvionnaire - G=12000

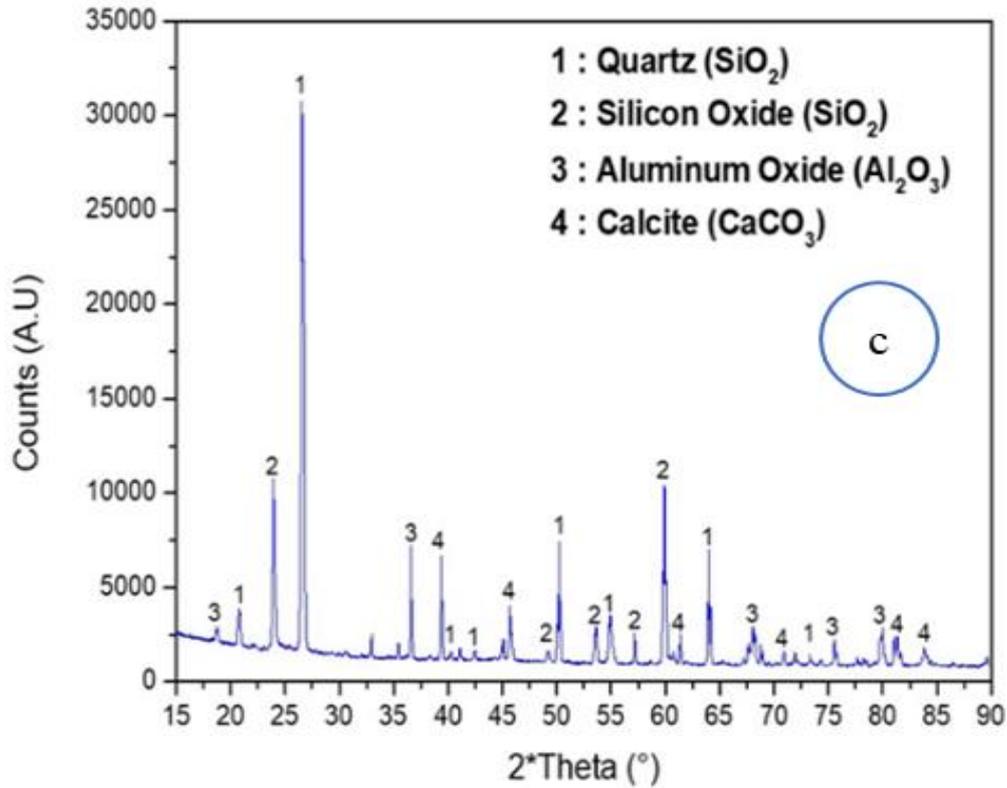


Figure 2. 7 Analyse par DRX du sable Alluvionnaire

### 2.2.4 Gravier

Deux classes de graviers G (3/8) et G (8/16) ont été utilisées dans cette étude. Ils sont de type concassé à partir d'une roche d'origine calcaire provenant d'une carrière située à la wilaya de Sétif -Algérie. Le tableau 2.5 regroupe les propriétés physiques de ces graviers. L'analyse granulométrique des deux fractions (3-8mm) et (8-16mm) est présentée graphiquement dans la figure 2.08.

Tableau 2. 5 Caractéristiques physiques du gravier (3/8) et (8/16)

Désignation	Unité	G 3/8	G 8/16
Densité Absolue	g/cm <sup>3</sup>	2.60	2.60
Densité Apparent	g/cm <sup>3</sup>	1.33	1.35
Compacité	%	49	49
Los Angeles (LA)	%	15.16	15.16

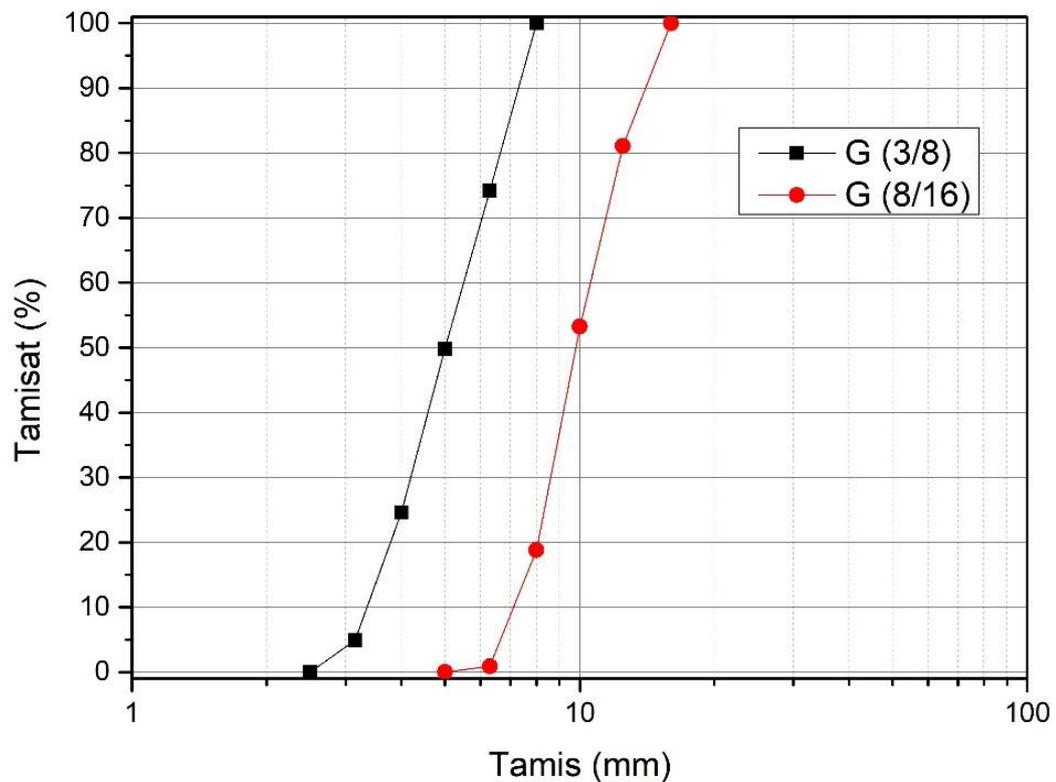


Figure 2. 8 Courbe granulométrique des graviers G (3/8) et G (8/16).

### 2.2.5 Superplastifiant

L'adjuvant employé est un superplastifiant de troisième génération, fourni par la société "Granitex NP" et vendu sous la dénomination de MEDAFLOW RE 25 (consultez l'annexe A). Ce superplastifiant est composé de polycarboxylates d'éther, ce qui entraîne une amélioration significative des propriétés des bétons et permet une réduction considérable de la teneur en eau. Ses caractéristiques sont données dans le tableau 2.6.

Tableau 2. 6 Caractéristiques du MEDAFLOW RE 25.

Aspect	Liquide
Couleur	Brun clair
PH	7
Densité	1,06 ± 0,01
Teneur en chlore	< 0,1 g/l
Extrait sec	25%

### 2.2.6 Fibres métalliques recyclées

Les quatre (4) câbles et les fils métalliques recyclés à l'état fragile de diverses origines de (19 torons \* 7 fils) utilisés dans cette étude ont été mis dans une solution de la soude caustique NaOH (à 10 % de concentration) pendant 24 heures pour le dégraissage et l'élimination des impuretés, des composés organiques et de la rouille sur la surface des fils. A la fin du traitement (figure 2.09), les fils ont été brossés et lavés à l'eau distillée. Les fibres sont coupées à cinq (5) rapports d'aspect (L/d) de forme ondulée requis comme présenté sur les figures 2. 09 et 2. 10. Les valeurs des cinq (5) rapports d'aspect (L/d) de la fibre choisie sont présentées dans le tableau 2.7.



Figure 2. 9 Préparation et traitement NaOH des câbles recyclés.



Figure 2. 10 Rapports d'aspect ( $L/d$ ) des fibres utilisées.

Tableau 2. 7 Rapports d'aspect ( $L/d$ ) des fibres recyclées.

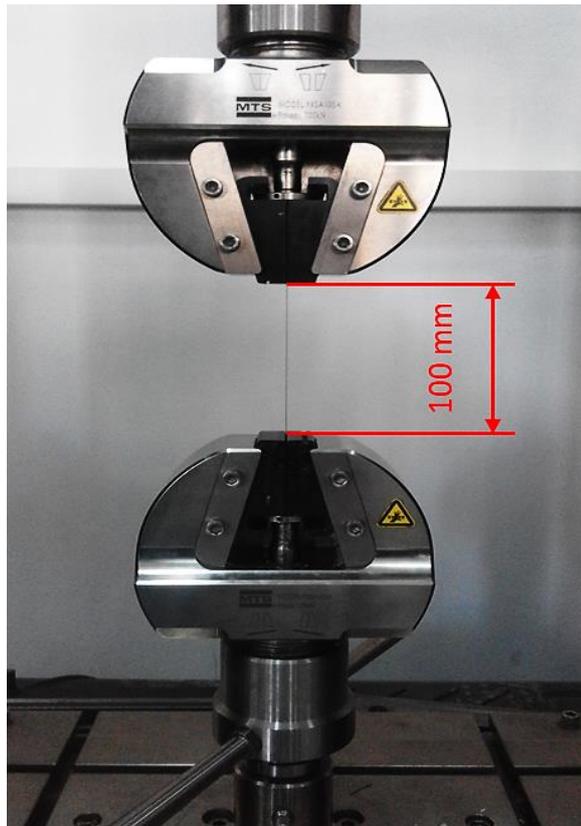
Longueur, L (mm)	Diamètre, d (mm)	Rapport d'aspect ( $L/d$ ) de fibre	Module de Young (GPa)	Densité
23	0.50	46	53 < 200	7.8
49	0.92	53	69 < 200	7.8
22	0.35	63	77 < 200	7.8
49	0.67	73	87 < 200	7.8
40	0.50	80	51 < 200	7.8

Selon la norme ISO 6892 [99] , nous avons préparé des éprouvettes normalisées de différents diamètres (0,35, 0,50, 0,67 et 0,92mm) et de 200 mm de longueur. La figure 2.11, montre la machine de traction (MTS Criterion « Modèle 45 ») d'une capacité de 2,5 KN, la vitesse programmée utilisée dans notre étude pour les tests de traction était de (2 mm/min).

On peut également constater que, pour les fibres ayant un module d'élasticité inférieur à 200 GPa, les fibres de meilleure qualité (en termes de résistance à la traction) étaient celles ayant un rapport d'aspect de 63 ( $d = 0,35$  mm,  $L = 22$  mm), bien que leur module d'élasticité (77 GPa) soit légèrement inférieur à celui (87 GPa) des fibres ayant un rapport d'aspect de

73 ( $d = 0,67 \text{ mm}$ ,  $L = 49 \text{ mm}$ ), c'est-à-dire que la longueur et le diamètre de la fibre influencent tous deux la résistance à la traction.

Cependant, grâce à d'autres propriétés (géométrie de la fibre usée, sa surface rugueuse et sa bonne adhérence avec la matrice cimentaire), on s'attend à des améliorations significatives dans le comportement des bétons haute performance renforcés de fibres. À partir de la figure 2.12, on peut également observer la surface rugueuse des fibres, qui peut contribuer à une meilleure adhérence entre la matrice et la fibre.



*Figure 2. 11 Machine de traction MTS Criterion (Modèle 45)*

La surface rugueuse des fibres peut contribuer à une meilleure adhérence matrice-fibre (Figure 2.12). Les analyses SEM-EDS représentent les composant de fer (Fe) sur le grand pic avec une quantité importante d'oxygène (C'est à dire l'oxydation des fils de câbles  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{3+}$ , Ce qui conduit à la rouille des fils). La quantité élevée de carbone (C) est dû aux composés organiques (impuretés) à la surface des fils. On constate la présence d'une quantité acceptable de chrome (Cr) dans certaines fibres. Cette substance protège les fibres des facteurs extérieurs.

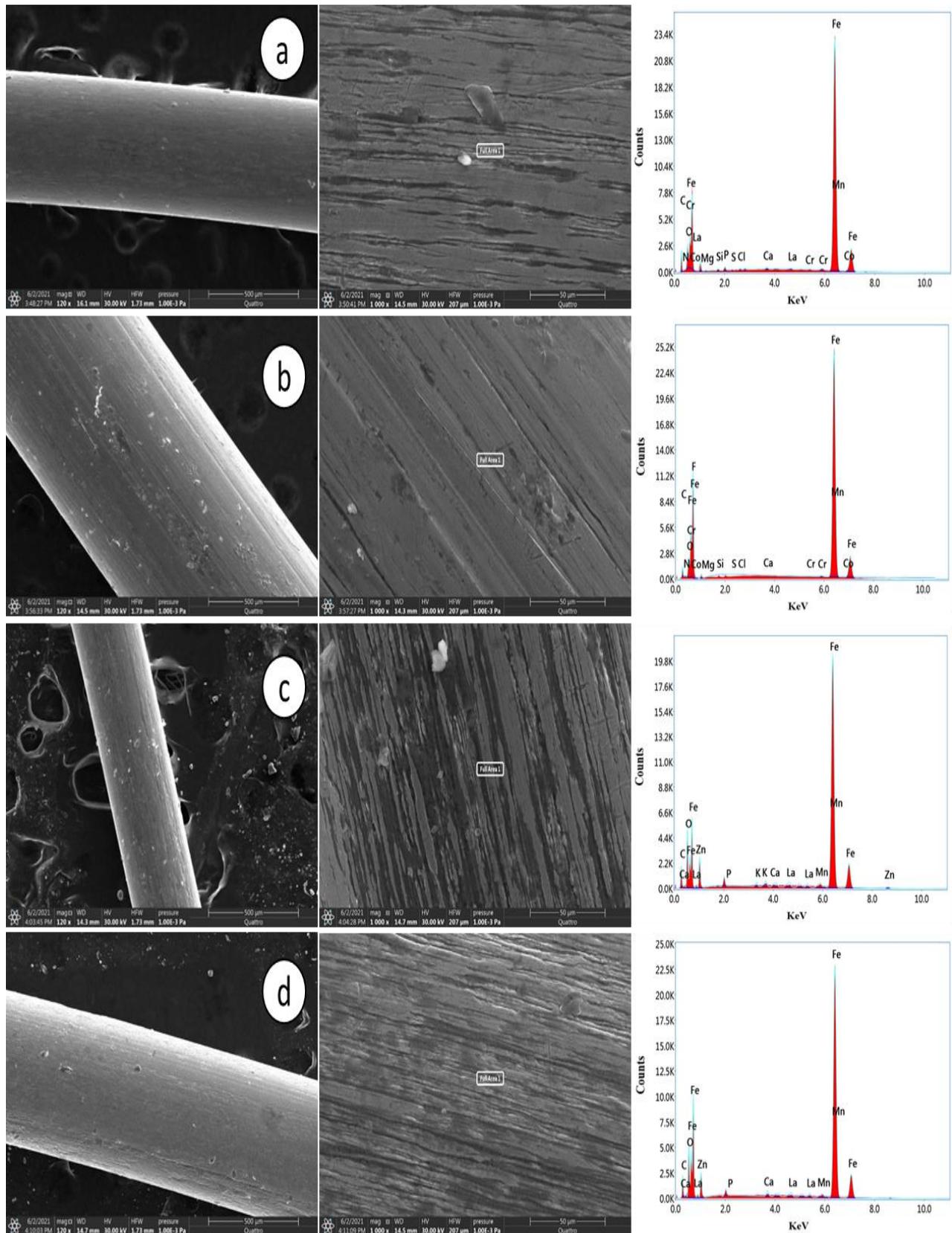


Figure 2. 12 Image MEB-EDS des fibres : (a)  $L/d = 46$  et  $L/d = 80$ , (b)  $L/d = 53$ , (c)  $L/d = 63$ , (d)  $L/d = 73$ .

## 2.3 Méthode des plans d'expériences

L'une des premières questions auxquelles est confronté un expérimentateur est : "Combien d'observations dois-je faire ?" ou alternativement, "Compte tenu de mon budget limité, comment puis-je obtenir autant d'informations que possible ?" Ce ne sont pas des questions auxquelles on peut répondre en quelques phrases. Ce sont pourtant des questions qui sont au cœur de la matière de ce chapitre. En tant que première étape pour obtenir une réponse, l'expérimentateur doit poser d'autres questions, telles que "Quel est le but principal de mener cette expérience ?" » et « Qu'est-ce que j'espère pouvoir montrer ? » [100]. Pour trouver des réponses à toutes ces questions auxquelles l'expérimentateur est confronté, il existe plusieurs techniques efficaces de prédiction, qui peuvent offrir une meilleure précision et interprétation, un coût minimum et un nombre d'essais minimums [100].

En règle générale, un test peut être exécuté pour une ou plusieurs des raisons suivantes.

Pour déterminer les principales causes de variation d'une réponse mesurée.

Pour trouver les conditions qui donnent lieu à une réponse maximale ou minimale.

Comparer les réponses obtenues à différents paramètres de variables contrôlables.

Obtenir un modèle mathématique afin de prédire les réponses futures.

Pour modéliser la formulation des mélanges du béton fibré à haute performance, il existe plusieurs techniques d'optimisation par la méthode de plan d'expérience :

- Plans factoriels ;
- Plans de surfaces de réponse ;
- Plans factoriels fractionnaires ;
- Plans de mélanges ;
- Plans de Taguchi ; etc... ;

### 2.3.1 Plans de surfaces de réponse

La méthodologie de surface de réponse a été développée par Box et Wilson en 1951 pour aider à l'amélioration des processus de fabrication dans l'industrie chimique. Le but était d'optimiser les réactions chimiques pour obtenir, par exemple, un haut rendement et une pureté à faible coût. Ceci a été accompli grâce à l'utilisation d'expérimentations séquentielles impliquant des facteurs comme la pression, la température, la durée de la réaction et la proportion de réactifs. La même méthodologie peut être utilisée pour modéliser ou optimiser

toute réponse qui est affectée par les niveaux d'un ou plusieurs facteurs quantitatifs [100].

Il y a trois plans de ce type : les plans centraux composites, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehlert [101].

Le modèle mathématique postulé, employé en conjonction avec les plans de surfaces de réponse, est un modèle du 2 degré qui inclut des interactions d'ordre 2 :

- Pour deux facteurs :

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_{12}X_1X_2 + A_{11}x_1^2 + A_{22}X_2^2 + E \quad (1)$$

- Pour trois facteurs :

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_{12}X_1X_2 + A_{13}X_1X_3 + A_{23}X_2X_3 + A_{11}X_1^2 + A_{22}X_2^2 + A_{33}X_3^2 + E \quad (2)$$

Y : Réponse prédite par le modèle.

$A_0, A_1, A_2, A_{12}, \dots, A_n, A_{nn}$ : Sont les coefficients du polynôme.

$X_i, X_j$  : représente un niveau des facteurs.

### 2.3.1.1 Plans centrale composites

Les plans centraux composites sont particulièrement adaptés à une étude séquentielle. En commençant initialement par un plan factoriel complet ou fractionnaire, cette étude incorpore également des points centraux pour confirmer la validité du modèle PDAI, incluant des termes du premier degré et des termes d'interaction. En cas de résultats de validation positifs, indiquant que la réponse mesurée au centre du domaine est statistiquement similaire à la réponse prédite à cet endroit, l'étude peut généralement être conclue. Cependant, des essais supplémentaires sont entrepris pour créer un modèle du second degré si les tests de validation sont négatifs. Des points d'expérience situés le long des axes de coordonnées et de nouveaux points centraux représentent ces essais supplémentaires. Les "points en étoile" sont des points situés sur les axes de coordonnées. Par conséquent, les plans composites se composent de trois composants distincts (comme indiqué dans la Figure 2.13) [101] :

Le plan factoriel est composé d'un plan fractionnaire ou factoriel complet comportant deux niveaux par facteur, et les points d'expérience sont situés aux coins du domaine d'étude.

Le plan en étoile se compose de points placés le long des axes, généralement à égale distance du centre du domaine d'étude.

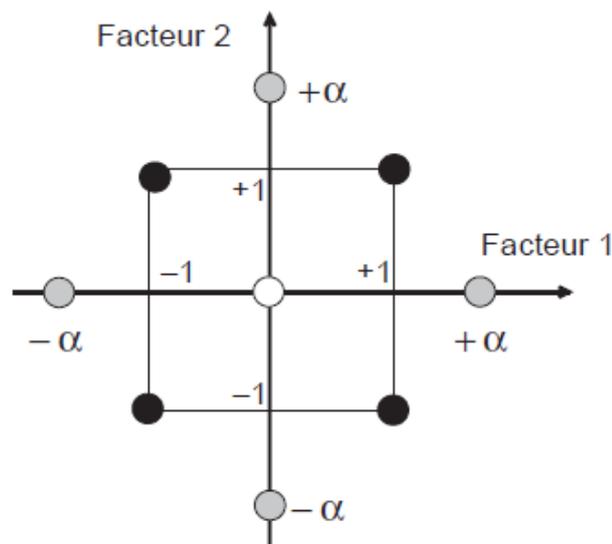
Les points d'expériences positionnés au centre du domaine d'étude sont systématiquement inclus dans la conception des plans d'expériences, que ce soit pour les plans factoriels ou les plans en étoile.

Le nombre total d'essais à effectuer, noté  $n$ , est calculé en additionnant les essais du plan factoriel ( $n_f$ ), les essais du plan en étoile ( $n_\alpha$ ), et les essais au centre ( $n_0$ ). Cette relation est donnée par la relation (3) :

$$n = n_f + n_\alpha + n_0 \quad (3)$$

$$\alpha = n_f^{1/4} = (2^k)^{1/4} \quad (4)$$

Où  $n_f$  : est le nombre de points factoriel,  $k$  : est le nombre des facteurs (paramètres).



*Figure 2. 13 plan central composite conçu pour analyser deux facteurs. Les points factoriels sont représentés en noir, les points en étoile sont en gris clair, et les points centraux sont en blanc [101].*

Le nombre de niveaux pour chaque facteur est de 5, mais il est réduit à 3 lorsqu'on utilise un plan central composite à faces centrées ( $\alpha = 1$ ).

## 2.4 Procédure expérimentale

Vingt compositions ont été sélectionnées à l'aide de conception composite centrale sous la méthodologie de surface de réponse afin de réaliser les tests expérimentaux comme le montre la figure 2.14 [102].

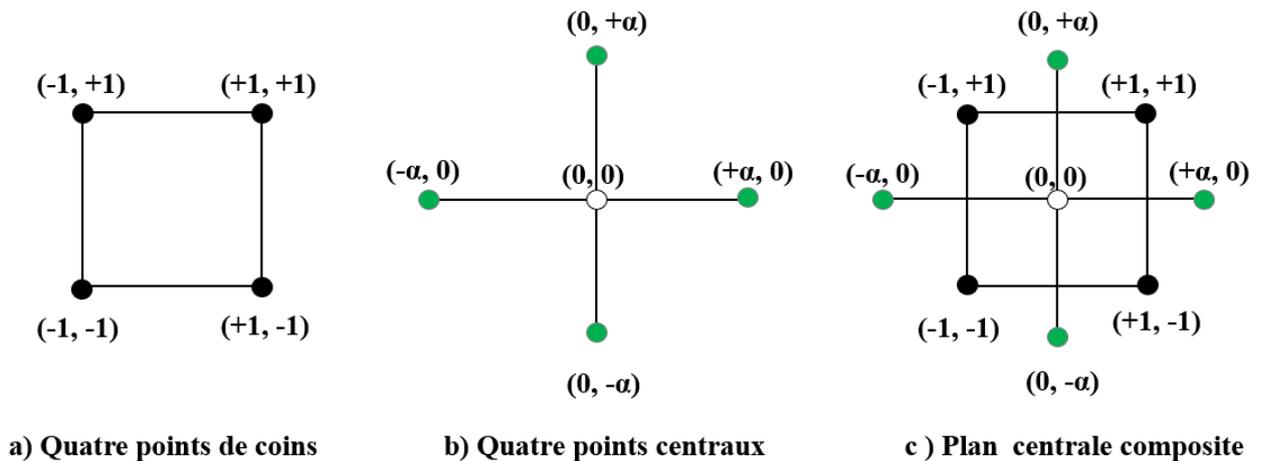


Figure 2. 14 Conception composite central sous la méthodologie de surface de réponse [102].

En effet, cette méthode a été utilisée pour prédire les variables dépendantes (réponses) dont l'affaissement, la résistance mécanique (compression, flexion, traction par fendage) et l'absorption d'eau. Dans cette conception, trois paramètres, appelés variables ou facteurs indépendants, ont été pris en compte.

Ces paramètres comprennent les rapports eau/liant (E/L), le rapport d'aspect longueur-diamètre (L/d) et le dosage en fibres en kg/m<sup>3</sup> notés A, B et C en termes codés, respectivement. Chaque valeur de facteur varie sur cinq (5) niveaux à savoir : les points axiaux ( $-a = -1.68 / +a = +1.68$ ), les points factoriels ( $-1/+1$ ) et le point central (0) [103]. Le nombre d'expériences est déterminé par l'Eq. (5) :

$$N = 2^k + 2k + c \quad (5)$$

Où; k est le nombre de variables indépendantes, 2k sont les points factoriels, 2k sont les points axiaux et c'est le nombre d'expériences aux points centraux [104]. Le modèle utilisé pour prédire la réponse et donner sa relation avec les variables indépendantes est représenté par le polynôme du second ordre Eq. (6) [105–107] :

$$Y = \beta_0 + \sum_i^k \beta_i X_i + \sum_i^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{ij}^k \beta_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + E \quad (6)$$

Où, Y est la fonction de réponse (dans notre cas, elle est représentée par l'affaissement, résistance à la compression, résistance à la flexion et à la traction par fendage et l'absorption d'eau,  $\beta_0$  est un coefficient constant,  $\beta_i$ ,  $\beta_j$  et  $\beta_{ij}$  sont les coefficients des termes linéaires, quadratiques et interactifs, respectivement,  $X_i$  et  $X_j$  sont les variables et E est l'erreur aléatoire [108].

La régression multiple est une approche statistique utilisée pour définir les coefficients optimaux pour chaque variable indépendante, assurant le meilleur ajustement possible pour les données expérimentales et facilitant la prédiction des variables dépendantes. Cette estimation est obtenue à l'aide de l'utilisation des techniques d'estimation par les moindres carrés ou d'estimation par maximum de vraisemblance [109,110]. Grâce à la mise en œuvre de la régression multiple, des informations précieuses peut être glanées concernant l'impact collectif exercé par plusieurs variables indépendantes sur la variable dépendante. De plus, ces coefficients obtenus permettent de faire des prédictions précises sur la base des relations établies dans le modèle de régression [111,112].

La formulation de béton fibré à haute performance sans air entraîné a été adoptée dans cette étude [45] (consultez l'annexe D). Cette méthode, issue de l'Université de Sherbrooke, est basée sur le même principe que l'ACI 211. 1-91, 1991. La méthode de formulation du béton de Dreux-Gorisse a été retenue pour la détermination de la composition granulaire des granulats grossiers [113]. La teneur en sable a été ajustée aux différentes compositions pour obtenir un mètre cube de béton.

Le tableau 2.8 présente un aperçu complet des variables d'entrée utilisées dans la conception expérimentale, y compris leur codage et les niveaux réels correspondants.

*Tableau 2. 8 Paramètres variables indépendante du plan central composite.*

Variables	Symbole	Niveaux de facteurs codés				
		-1.68	-1	0	+1	+1.68
Eau/liant (E/L)	A	0.27	0.28	0.29	0.3	0.31
Rapport d'aspect (L/d)	B	46	53	63	73	80
Dosage en Fibre (kg/m <sup>3</sup> )	C	19	21	24	27	29

L'incorporation d'un dosage élevé de fibres dans le béton a le potentiel de perturber l'arrangement granulaire de la matrice, entraînant une diminution de la maniabilité du mélange et altérant sa compacité [114]. Cette perturbation devient plus significative à mesure que le pourcentage de fibres augmente. C'est donc sur cette base que les teneurs en fibres ont été choisies allant de 15 à 30 kg/m<sup>3</sup>. Les chercheurs, qui ont utilisé des fibres d'acier recyclées extraites de pneus dans le béton, ont conclu que la caractérisation géométrique de ces fibres est très variable ; le diamètre nominal varie de 0,1 à 2 mm avec un rapport d'aspect moyen variant de 20 à 150 [115]. Ces écarts dépendent principalement à la fois du processus de recyclage et de la source d'origine.

Le temps de malaxage était d'environ 5 à 7 minutes afin d'assurer un enrobage acceptable des granulats et une homogénéité convenable du mélange [103].

Des moules cubiques de dimensions 100 x 100 x 100 mm ont été utilisés pour préparer les échantillons de béton destinés aux tests de résistance à la compression. Des échantillons prismatiques de dimensions 70 x 70 x 280 mm ont été coulés pour les tests de résistance à la flexion. Des spécimens cylindriques d'un diamètre (D) de 100 mm une hauteur (H) de 200 mm ont été utilisés pour la résistance à la traction par fendage. Tous les échantillons ont été conservés pendant 24 heures dans les moules, puis démoulés et soumis à une période de durcissement de 28 jours dans un bain d'eau à température contrôlée, situé dans la salle de contrôle du laboratoire, maintenu à 20 °C. Cette préparation préalable a été effectuée avant la réalisation des tests de performance.

Tous les échantillons ont été conservés pendant 24 heures dans les moules, puis trempés dans l'eau jusqu'à 28 jours de cure. La conception du mélange de béton pour les vingt (20) échantillons générés par la méthodologie de surfaces de réponse est présentée dans le tableau 2. 9. Il est important de noter que la teneur en eau a été maintenue constante pour tous les mélanges de béton. Par conséquent, l'évolution de rapport (Eau/liant) dans cette étude de cas est attribuée uniquement aux variations de la teneur en liant (c'est-à-dire qu'une augmentation de E/L de 0,27 à 0,31 indique une diminution correspondante de la teneur en liant de 518,51 kg/ m<sup>3</sup> à 451,61 kg/ m<sup>3</sup>).

La méthodologie utilisée dans les expériences est représentée par un organigramme présenté dans la Figure 2.15. Cette représentation visuelle décrit l'approche séquentielle du processus expérimental, facilitant la compréhension et la mise en œuvre pratique avec des détails supplémentaires [116].

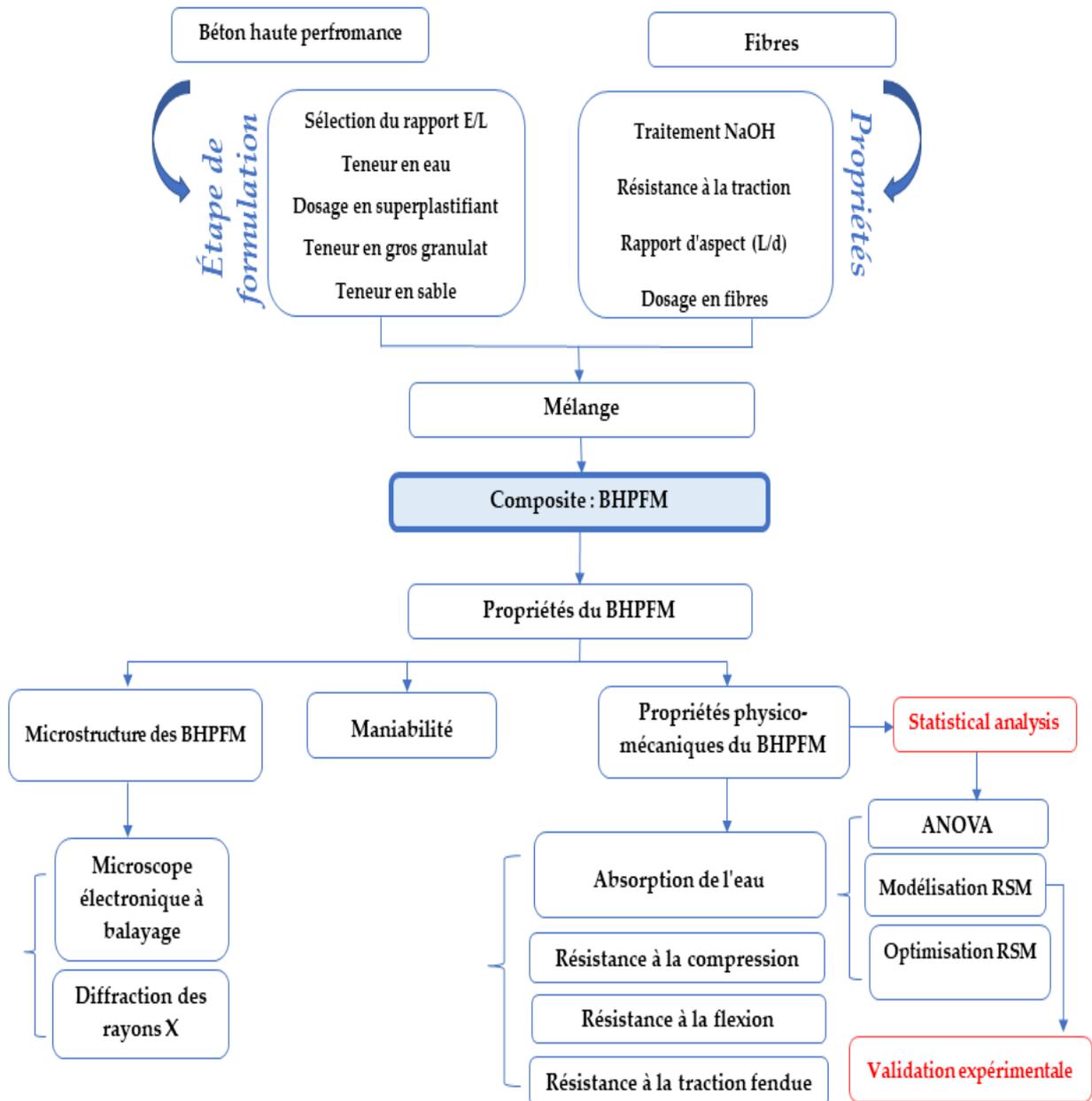


Figure 2. 15 Diagramme de flux illustrant la méthodologie globale

*Tableau 2. 9 Proportions des mélanges du béton fibré à haute performance.*

Mélange	Eau/liant (E/L)	Rapport d'aspect (L/d) de fibre	Fibres (kg/m <sup>3</sup> )	Eau (kg/m <sup>3</sup> )	Liant (kg/m <sup>3</sup> )	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Fumé de silice (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	Gravier (3/8) (kg/m <sup>3</sup> )	Gravier (8/16) (kg/m <sup>3</sup> )	Sable de dune (kg/m <sup>3</sup> )
BHPFM 1	0.28 (-1)	53 (-1)	21(-1)	140	500	454.54	45.45	19.99	367.5	682.5	739.81
BHPFM 2	0.28 (-1)	53 (-1)	27(+1)	140	500	454.54	45.45	19.99	367.5	682.5	737.81
BHPFM 3	0.28 (-1)	73 (+1)	21(-1)	140	500	454.54	45.45	19.99	367.5	682.5	739.81
BHPFM 4	0.28 (-1)	73 (+1)	27(+1)	140	500	454.54	45.45	19.99	367.5	682.5	737.81
BHPFM 5	0.30 (+1)	53 (-1)	21 (-1)	140	466.66	424.24	42.42	18.66	367.5	682.5	769.09
BHPFM 6	0.30 (+1)	53 (-1)	27(+1)	140	466.66	424.24	42.42	18.66	367.5	682.5	767.09
BHPFM 7	0.30 (+1)	73 (+1)	21(-1)	140	466.66	424.24	42.42	18.66	367.5	682.5	769.09
BHPFM 8	0.30 (+1)	73 (+1)	27(+1)	140	466.66	424.24	42.42	18.66	367.5	682.5	767.09
BHPFM 9	0.27 (-1.68)	63 (0)	24 (0)	140	518.51	471.38	47.13	20.73	367.5	682.5	722.54
BHPFM 10	0.31 (+1.68)	63 (0)	24 (0)	140	451.61	410.55	41.05	18.06	367.5	682.5	781.31
BHPFM 11	0.29 (0)	46 (-1.68)	24 (0)	140	482.75	438.87	43.88	19.30	367.5	682.5	753.96
BHPFM 12	0.29 (0)	80 (+1.68)	24 (0)	140	482.75	438.87	43.88	19.30	367.5	682.5	753.96
BHPFM 13	0.29 (0)	63 (0)	19 (-1.68)	140	482.75	438.87	43.88	19.30	367.5	682.5	755.62
BHPFM 14	0.29 (0)	63 (0)	29 (+1.68)	140	482.75	438.87	43.88	19.30	367.5	682.5	752.29
BHPFM 15	0.29 (0)	63 (0)	24 (0)	140	482.75	438.87	43.88	19.30	367.5	682.5	753.96
BHPFM 16	0.29 (0)	63 (0)	24 (0)	140	482.75	438.87	43.88	19.30	367.5	682.5	753.96
BHPFM 17	0.29 (0)	63 (0)	24 (0)	140	482.75	438.87	43.88	19.30	367.5	682.5	753.96
BHPFM 18	0.29 (0)	63 (0)	24 (0)	140	482.75	438.87	43.88	19.30	367.5	682.5	753.96
BHPFM 19	0.29 (0)	63 (0)	24 (0)	140	482.75	438.87	43.88	19.30	367.5	682.5	753.96
BHPFM 20	0.29 (0)	63 (0)	24 (0)	140	482.75	438.87	43.88	19.30	367.5	682.5	753.96

Plus Alpha (+ $\alpha$ ), moins Alpha (- $\alpha$ ) (points axiaux/étoiles), +1 (niveau élevé), -1 (niveau bas) (points factoriels) et point central (niveau moyen).

Après l'âge de durcissement, les tests suivants ont été réalisés; Le test d'affaissement a été mesuré selon la norme BS EN 12350-2 [117]. La résistance à la compression a été réalisée à l'aide d'éprouvettes cubiques de (100 x 100 x 100) mm<sup>3</sup> conformément à la norme BS EN 12390-3 [118]. La résistance à la flexion a été réalisée à l'aide d'échantillons prismatiques d'une dimension de (70 x 70 x 280) mm<sup>3</sup> conformément à la norme BS EN 12390-5 [119].

La résistance à la traction fendue a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques de 100 mm de diamètre et 200 mm de hauteur conformes à la norme BS EN 12390-6 [120]. L'absorption d'eau a été réalisée sur des éprouvettes cubiques de dimensions (100 x 100 x 100) mm<sup>3</sup> selon la norme ASTM C 642-06 [121].

Le comportement thermique réalisés sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (50 x 100 x 150) mm<sup>3</sup>. Il convient de noter que toutes les formulations ont été méticuleusement préparées selon des procédures uniformes, utilisant des ressources matérielles identiques et coulées dans des géométries de moules identiques dans des conditions étroitement contrôlées.

### 2.4.1 Essai d'affaissement

L'essai a été effectué conformément à la norme [117] pour connaître la consistance du béton fraîchement mélangé. La consistance d'un mélange de béton est étroitement liée à son ouvrabilité. Un cône d'affaissement de diamètre inférieur à 100 mm, de diamètre supérieur à 200 mm et de hauteur de 300 mm a été utilisé. Le béton a été rempli en trois couches, chaque couche recevant environ vingt-cinq coups (25) de la tige de sabotage (la tige de sabotage est un acier de 16 mm de diamètre et 600 mm de longueur). Lors du remplissage, la troisième couche de béton en excès a été enlevée à l'aide d'une truelle à main. Le moule a été immédiatement soulevé lentement dans une direction verticale. L'affaissement mesuré en centimètre (cm) est la différence entre la hauteur du moule et le point de hauteur du point le plus haut de l'échantillon testé (Figure 2.16).



*Figure 2. 16 Essai d’Affaissement.*

### 2.4.2 Résistance à la compression

Les échantillons de béton ont été préparés selon la norme [118] et testés à vingt-huit (28) jours. Les valeurs de résistance à la compression obtenues ont été calculées en prenant la moyenne de trois échantillons (figure 2.17). Les tests ont été effectués à l'aide d'une machine de test de compression. La surface d'appui des rouleaux de support et de chargement a été nettoyée avant de placer

l'échantillon. Le positionnement de l'échantillon a été effectué avec une charge appliquée sur la surface la plus haute de l'échantillon, coulée dans le moule. On a pris soin de s'assurer que l'échantillon était aligné avec le dispositif de chargement. Le chargement s'est fait progressivement et continuellement jusqu'à ce que le cadran cesse de bouger et que la charge maximale soit enregistrée. La résistance à la compression de l'échantillon a été exprimée comme la charge d'écrasement maximale en Newton (N) divisée par la surface effective de l'échantillon testé en millimètres carré (mm<sup>2</sup>). La résistance à la compression est calculée en utilisant l'équation. (7).

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (7)$$

R<sub>c</sub> : Résistance à la flexion

F : charge appliquée en Newton

S : surface de l'échantillon



*Figure 2. 17 La résistance à la compression mesurée sur des échantillons écrasés à 28 jours*

### **2.4.3 Résistance à la flexion**

La résistance à la flexion a été testés sous une charge en trois points jusqu'à rupture en utilisant une machine d'essai à la flexion conforme à [119]. Une configuration de chargement constant avec une portée de cisaillement de 300 mm et un rapport de profondeur de portée de cisaillement de 3,0 a été appliquée (figure 2.18). Des échantillons ont été placés sur les blocs de support avec le côté par rapport à sa position une fois moulés. La surface supérieure de l'éprouvette a été mise en contact avec le bloc d'application de charge à un quart de distance de l'extrémité des supports. Suite à cette action, le bloc d'application de la charge est mis en contact total avec la surface de la poutre. La poutre a été

vérifiée pour s'assurer qu'elle avait un contact uniforme avec le roulement et les blocs d'application de la charge. Le chargement a été effectué en continu jusqu'à ce que l'échantillon tombe en panne et que le cadran ne bouge plus. La charge maximale appliquée indiquée par la machine d'essai a été enregistrée. La résistance à la flexion est calculée en utilisant l'équation. (8).

$$R_f = \frac{1.5FL}{b^3} \quad (8)$$

$R_f$  : Résistance à la flexion (MPa)

$F$  : charge appliquée en Newton (N)

$L$  = Longueur entre les axes des deux appuis en millimètre (mm)

$b$  = Largeur de la section transversale de l'éprouvette en millimètre (mm)



*Figure 2. 18 La résistance à la flexion mesurée sur des échantillons écrasés à 28 jours*

#### **2.4.4 Résistance à la traction par fendage**

Les échantillons prélevés après vingt-huit (28) jours ont été soumis à des essais de compression selon BS EN 12390-6 [120]. Des échantillons ont été placés entre les surfaces de chargement d'une machine d'essai de compression. Les charges de ligne de compression appliquées le long d'un plan symétrique vertical. Cette disposition de chargement établit une contrainte de traction normale le long de l'axe de chargement de deux charges égales et opposées (Figure 2.19).

La division de l'échantillon à la charge maximale a été enregistrée et l'Equation. (9) a été utilisé pour déterminer la résistance à la traction fendue.

$$R_{t.f} = \frac{2F}{(\pi DL)} \quad (9)$$

$R_{t.f}$  : Résistance à la traction par fendage (MPa).

F : Charge à la rupture (N).

D : Diamètre du cylindre ou côté du cube (mm).

L : Longueur du cylindre / cube (mm).



Figure 2. 19 La résistance à la traction par fendage mesurée sur des échantillons écrasés à 28 jours

#### 2.4.5 Absorption d'eau

L'essai a été réalisé en conformité avec la norme ASTM C 642-06a été réaliser en accord avec la norme [121]. Les échantillons ont été immergés dans de l'eau à une température  $T=29$  °C pendant une durée de vingt-quatre (24) heures. Ensuite, ils ont été égouttés à l'aide d'une serviette pendant 10 minutes afin d'éliminer l'excès d'eau.

La mesure de l'absorption d'eau a été effectuée en utilisant l'équation (10). 3 échantillons ont été testés pour chaque composition de béton afin d'obtenir une valeur moyenne et fiable.

$$\frac{W2-W1}{W1} \times 100 \quad (10)$$

W1 : Masse de l'échantillon avant immersion dans l'eau.

W2 : Masse poids de l'échantillon après immersion dans l'eau.

#### 2.4.6 Analyse structurale

La microstructure a été examinée à l'aide d'une microscopie électronique à balayage (MEB) de type Quattro ESEM, disponible au Plateau Technique d'Analyses Physico Chimiques (PTAPC) de Laghouat. Des échantillons d'environ 1 cm de dimension ont été prélevés pour permettre leur insertion dans la chambre du MEB (voir Figure 2.20). Des images MEB ont été capturées à différents niveaux de grossissement (50x, 120x, 1000x et 5000x) pour examiner à la fois le BHP et les fibres.



*Figure 2. 20 Image Microscopie électronique à balayage « Quattro ESEM »*

De plus, les matrices cimentaires étudiées ont aussi été soumises à l'analyse par diffraction de rayons X (DRX) à l'aide d'un diffractomètre de type « Empyrean Malvern Panalytical » sur des échantillons broyés et tamisés à 80  $\mu\text{m}$  (Figure 2. 21). Les diffractogrammes correspondent à l'intensité des phases (pics) en relation avec l'angle de diffraction  $2\theta$ . La plage d'angles de diffraction utilisée dans le programme de diffraction des rayons X est de  $15^\circ$  à  $70^\circ$ , et cette plage peut varier en fonction de la nature spécifique de l'échantillon.



*Figure 2. 21 Empyrean Malvern Panalytical*

## **2.5 Préparation des essais thermiques**

La procédure de mesure et de préparation des échantillons comprend les étapes suivantes (voir figure 2. 22) :

1. Fixation de l'échantillon.

2. Perçage au milieu des éprouvettes à 25 mm :

ST1 : à une distance de 25 mm du mur gauche.

ST2 : à une distance de 75 mm.

ST3 : à une distance de 125 mm.

3. Installation de sondes à une profondeur de 25 mm.

4. Mesure de température pour les trois stations (ST1, ST2, ST3).

5. Mesure de la température à l'aide d'un thermomètre laser infrarouge numérique selon ASTM E1965 [122].

Un thermomètre infrarouge avec une caméra vidéo intégrée permet de visualiser la zone d'intérêt tout en mesurant la température sur une plage étendue de -50 à 1000°C, avec un temps de réponse rapide de 150 ms.

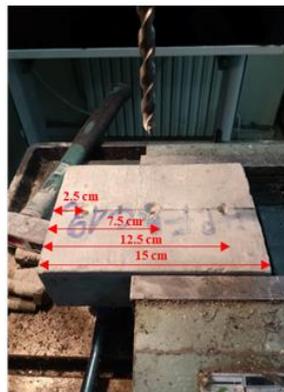
Dans cette étude expérimentale, les résultats de l'évolution de la température pour plusieurs éprouvettes de dimension (50 x 100 x 150) mm<sup>3</sup> des six (6) mélanges maximaux dans le tableau de 20 mélanges de plan de surface de réponse (RSM) du béton fibré à haute performance. En mesurant les

températures en différents points de ce système, après l'avoir soumis à une température de 50°C, les évolutions dans le temps sont analysées.

Les mesures de température ont été réalisées à l'aide de sondes de température à affichage numérique selon la norme ASTM E2877 [123] (figure 2.22) à plusieurs emplacements présélectionnés au milieu de la fibre - éprouvettes en béton armé à haute performance. Les mesures ont été effectuées dans un environnement de laboratoire où la température ambiante était maintenue à  $20^{\circ}\text{C} \pm 2$ . Afin de déterminer l'échantillon optimal, les mesures ont été prises à des intervalles de temps égaux (30 minutes) pour la même température imposée, ce qui a été réalisé en utilisant une résistance électrique selon ASTM C1760 [124] (figure 2.23).



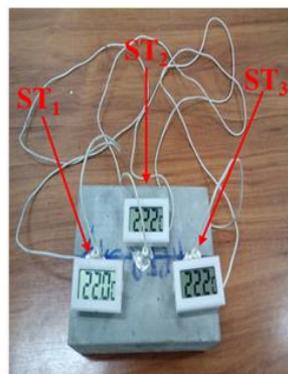
1. Fixation



2. Perçage au milieu



3. Installation des sondes



4. Mesure de température



5. thermomètre laser

*Figure 2.22. La préparation des échantillons du Béton fibré à haute performance*

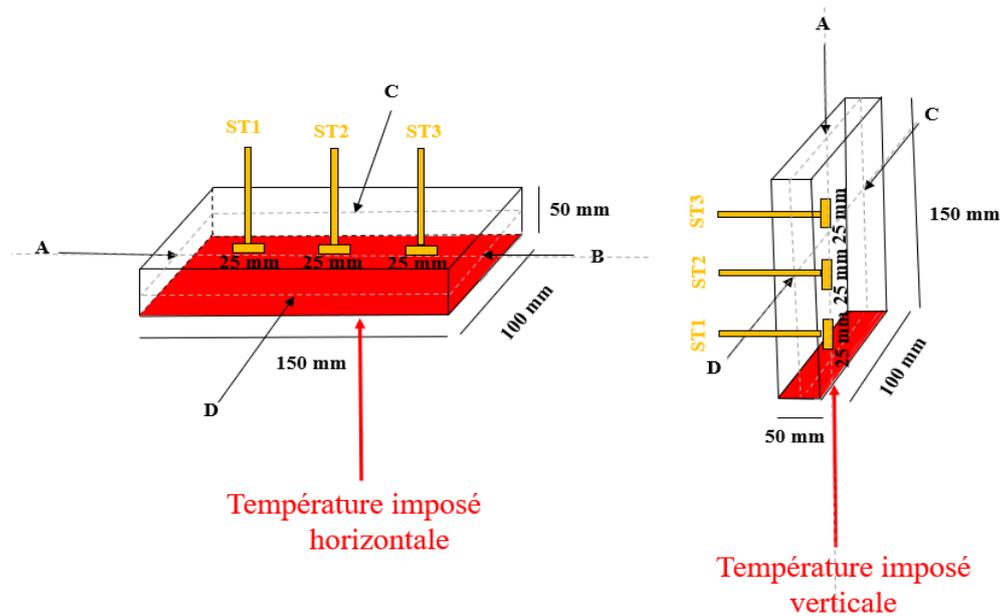


Figure 2.23. Température imposée de 50°C sur le béton fibré à haute performance à l'aide d'une résistance électrique.

## 2.6 Conclusion

Cette étude représente une contribution à l'exploration de l'impact de l'utilisation de fibres métalliques recyclées issues de déchets de câbles torsadés sur les propriétés du béton à haute performance, qu'elles soient à l'état frais, mécaniques ou thermiques.

Nous avons abordé dans ce chapitre, les points suivants de manière séquentielle :

1. La caractérisation des matériaux utilisés, notamment le ciment, la fumée de silice, les granulats, le superplastifiant, ainsi que les fibres métalliques recyclées.
2. La description des techniques expérimentales employées, notamment la préparation et le traitement des fibres recyclées, ainsi que la mise en place des plans d'expériences choisis.
3. Les méthodes de malaxage utilisées et les protocoles d'essais mis en œuvre.

---

## Chapitre 3: Optimisation de la formulation du BHP fibré

---

### **3.1 Introduction**

Cette étude a pour objectif de connaître l'effet des fibres recyclées sur les propriétés physico-mécaniques et thermique, ainsi que l'adhérence entre la fibre et le béton à haute performance. Dans ce chapitre nous présenterons en premier lieu les résultats expérimentaux des différents mélanges de béton à haute performance renforcée par des fibres métalliques recyclées, formulés par la méthode de surface de réponse appliquée (plan central composite).

Grâce à ces résultats, nous pouvons ensuite développer des modèles mathématiques qui décrivent l'influence des paramètres de formulation examinés, à savoir : le rapport eau-liant ( $E/L$ ), le rapport d'aspect longueur-diamètre ( $L/d$ ), et le dosage en fibres ( $Kg/m^3$ ) sur l'affaissement, la résistance mécanique (compression, flexion et traction par fendage) et l'absorption d'eau des BHP fibrés. Ensuite, des graphiques en (2D) et en (3D) issus du plan central composite de la surface de réponse pour les 20 mélanges du BHP fibrés seront utilisés pour étudier la variation des résultats par rapports les points prédisent.

### **3.2 Résultats et discussion**

#### **3.2.1 Propriétés physico-mécaniques du BHP fibré**

Les résultats des tests de laboratoire sont répertoriés dans le tableau 3.1. Chaque valeur rapportée est la moyenne de trois (3) lectures obtenues à partir de trois échantillons différents.

Tableau 3.1 Résultats expérimentaux

Mélange	Eau / liant (E/L)	Rapport d'aspect (L/d) de fibre	Dosage en Fibre (kg/m <sup>3</sup> )	Aff (cm)	Rc 28 jours (MPa)	Rf 28 jours (MPa)	R <sub>t,f</sub> 28 jours (MPa)	Abs (%)
BHPFM 1	0.28 (-1)	53 (-1)	21 (-1)	23	86.394	5.719	4.940	2.156
BHPFM 2	0.28 (-1)	53 (-1)	27 (+1)	22	89.028	6.247	6.680	1.703
BHPFM 3	0.28 (-1)	73 (+1)	21 (-1)	24	92.404	6.581	7.345	1.822
BHPFM 4	0.28 (-1)	73 (+1)	27 (+1)	23	97.144	7.933	7.419	1.341
BHPFM 5	0.30 (+1)	53 (-1)	21 (-1)	21	85.365	5.271	4.064	2.287
BHPFM 6	0.30 (+1)	53 (-1)	27 (+1)	20	86.892	6.145	6.030	2.080
BHPFM 7	0.30 (+1)	73 (+1)	21 (-1)	22.5	87.084	6.329	6.304	1.930
BHPFM 8	0.30 (+1)	73 (+1)	27 (+1)	21.5	94.226	7.749	6.577	1.554
BHPFM 9	0.27 (-1.68)	63 (0)	24 (0)	26	96.935	7.290	6.586	0.598
BHPFM 10	0.31 (+1.68)	63 (0)	24 (0)	19	84.895	6.096	5.210	2.104
BHPFM 11	0.29 (0)	46 (-1.68)	24 (0)	24	86.794	7.117	6.140	1.579
BHPFM 12	0.29 (0)	80 (+1.68)	24 (0)	23.5	87.327	7.188	6.393	1.298
BHPFM 13	0.29 (0)	63 (0)	19 (-1.68)	26	82.258	5.214	5.460	2.561
BHPFM 14	0.29 (0)	63 (0)	29 (+1.68)	18	102.339	8.304	7.645	1.010
BHPFM 15	0.29 (0)	63 (0)	24 (0)	25	95.494	7.212	6.530	0.791
BHPFM 16	0.29 (0)	63 (0)	24 (0)	25	95.494	7.212	6.530	0.791
BHPFM 17	0.29 (0)	63 (0)	24 (0)	25	95.494	7.212	6.530	0.791
BHPFM 18	0.29 (0)	63 (0)	24 (0)	25	95.494	7.212	6.530	0.791
BHPFM 19	0.29 (0)	63 (0)	24 (0)	25	95.494	7.212	6.530	0.791
BHPFM 20	0.29 (0)	63 (0)	24 (0)	25	95.494	7.212	6.530	0.791

Aff : Affaissement, R<sub>C</sub> : Résistance à la compression à 28 jours, R<sub>f</sub> : Résistance à la flexion à 28 jours, R<sub>t,f</sub> : Résistance à la traction par fendage, Abs : Absorption d'eau.

### 3.2.2 Modélisation et analyse de variance (ANOVA)

Les résultats des tests obtenus à partir des mélanges, préparés avec des variations de eau/liant (E/L), rapport d'aspect (L/d) et le dosage en fibre (kg/m<sup>3</sup>), ont été utilisés pour élaborer des modèles mathématiques. Ces modèles visent à décrire les effets individuels et combinés de chaque facteur sur les propriétés du BHPFM à l'état frais et durci, y compris l'affaissement, la résistance

mécanique (Compression, flexion, traction par fendage) à 28 jours et l'absorption d'eau. Les modèles mathématiques quadratiques, obtenus en termes de facteurs codés élaborés par un logiciel statistique (Expert design. Version 13), sont exprimés par les équations (1-5).

Dans les modèles générés, les facteurs A, B et C correspondent respectivement au rapport eau/liant (E/L), le rapport d'aspect (L/d) et le dosage en fibre. Il est très important de noter qu'une augmentation des valeurs des coefficients factoriels signifie une augmentation de la réponse modélisée correspondante, alors qu'une diminution représentée par des valeurs négatives entraîne une réduction de la réponse [125].

$$\text{Aff (cm)} = 25.02 - 1.37 \cdot A + 0.30 \cdot B - 1.28 \cdot C + 0.13 \cdot AB + 0.00 \cdot AC + 0.00 \cdot BC - 0.99 \cdot A^2 - 0.55 \cdot B^2 - 1.16 \cdot C^2 \quad (1)$$

$$\text{Rc (MPa)} = 95.49 - 2.32 \cdot A + 1.76 \cdot B + 3.65 \cdot C - 0.63 \cdot AB + 0.16 \cdot AC + 0.97 \cdot BC - 1.61 \cdot A^2 - 2.97 \cdot B^2 - 1.12 \cdot C^2 \quad (2)$$

$$\text{R}_f \text{ (MPa)} = 7.22 - 0.22 \cdot A + 0.39 \cdot B + 0.69 \cdot C + 0.014 \cdot AB + 0.052 \cdot AC + 0.17 \cdot BC - 0.26 \cdot A^2 - 0.095 \cdot B^2 - 0.23 \cdot C^2 \quad (3)$$

$$\text{R}_{t.f} \text{ (MPa)} = 6.53 - 0.42 \cdot A + 0.47 \cdot B + 0.57 \cdot C - 0.045 \cdot AB + 0.053 \cdot AC - 0.42 \cdot BC - 0.23 \cdot A^2 - 0.10 \cdot B^2 - 2.907 \cdot B \cdot 10^{-3} \cdot C^2 \quad (4)$$

$$\text{Abs (\%)} = 0.78 + 0.25 \cdot A - 0.15 \cdot B - 0.30 \cdot C - 0.023 \cdot AB + 0.044 \cdot AC - 0.025 \cdot BC + 0.26 \cdot A^2 + 0.29 \cdot B^2 + 0.41 \cdot C^2 \quad (5)$$

Analyse de variance (ANOVA) est une technique statistique utilisée pour évaluer l'importance et la contribution de différents facteurs expliquant la variabilité observée dans les réponses. La mise en œuvre de l'analyse de variance (ANOVA) facilite également la dissection des effets distincts de la variance observée dans la réponse mesurée. Les contributions résultantes des propriétés du béton fibré à haute performance à l'états frais et durcis sont résumées dans les tableaux 3.2 et 3.3, respectivement.

La technique statistique de l'ANOVA se conforme aux principes de probabilité et de mathématiques pour analyser et interpréter les données expérimentales [126]. Son objectif principal est de valider l'intégrité des modèles et d'évaluer l'impact des paramètres d'entrée sur la variabilité des réponses. L'analyse de la variance (ANOVA), réalisée avec un intervalle de confiance de 95% (niveau de signification = 0.05 = 5%), permet de déterminer la signification d'un modèle, d'une variable indépendante ou d'une interaction en se basant sur la probabilité (valeur de p).

- Si la valeur de  $p \leq 0.05$ , le paramètre est considéré comme significatif.
- Si la valeur de  $p > 0.05$ , le paramètre est considéré comme non significatif.

Il est également important de mentionner que l'analyse ANOVA a été réalisée à l'aide du logiciel Expert Design. En construisant sur cette analyse ANOVA, cette étude a suivi une séquence méthodique avec des étapes essentielles de l'analyse statistique. Tout a commencé par une entrée précise des données. Ensuite, nous avons utilisé la (RSM) pour mieux comprendre comment les différentes variables interagissent entre elles. Après cela, nous avons clairement défini ce sur quoi se concentrerait notre recherche à travers la définition des réponses attendues. Ensuite, nous avons procédé à la phase pratique de l'étude en réalisant des expériences et en recueillant des données essentielles. Il est essentiel de souligner que nous avons pris un soin particulier dans la création des tableaux ANOVA, une étape cruciale dans notre analyse.

Les résultats (ANOVA) révèlent que les valeurs de précision pour tous les modèles dépassent 4, indiquant leur capacité à capturer de manière précise la relation entre les variables indépendantes et les réponses. Les résultats obtenus montrent une P-value  $<0,05$  pour tous les paramètres étudiés, ce qui implique également que les modèles développés par la méthode de surface de réponse sont significatifs. Les coefficients de détermination ( $R^2$ ), calculés pour vérifier l'adéquation des modèles obtenus dépassent tous 80% signifiant une forte corrélation entre les résultats prédits et expérimentaux. Il est à noter que lorsque la valeur  $R^2$  s'approche de un (1), la précision du modèle proposé augmente [103,127,128].

L'importance de l'affaissement, de la résistance à la compression, de la résistance à la flexion, de la résistance à la traction par fendage et de l'absorption d'eau est confirmée par les valeurs F élevées, qui sont respectivement de 4,72, 5,54, 5,08, 8,67 et 7,40. Les termes linéaires sont statistiquement non significatifs (valeur de  $P > 0,05$ ), c'est-à-dire le terme B pour l'affaissement, l'absorption d'eau, la résistance à la compression et le terme A pour la résistance à la flexion. Alors que les autres termes linéaires sont significatifs (valeur de  $P < 0,05$ ). L'effet d'interaction BC sur la résistance à la traction par fendage est significatif, alors que les effets d'interaction sur les autres propriétés sont insignifiants. Les termes quadratiques  $A^2$ ,  $B^2$  et  $C^2$  sont significatifs pour l'absorption d'eau. Les termes  $A^2$  et  $C^2$  pour l'affaissement, le terme  $B^2$  pour la résistance à la compression et les termes  $A^2$  pour la résistance à la traction par fendage sont significatifs, tandis que tous les autres termes quadratiques sont insignifiants.

Selon la distribution de probabilité des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédites présentées dans la figure 3.1(a)-1(e), on peut voir que les nuages de réponse sont tous proches de la ligne d'ajustement. Cela indique que les modèles développés prédisent correctement les propriétés physico-mécaniques des bétons fibrés à hautes performances en fonction des facteurs

choisis. Il est important de mentionner que les points de distribution de probabilité, allant du bleu au rouge, représentent la variation des minimales aux valeurs maximales telles que générées par le logiciel « Design Expert ».

*Tableau 3. 2 Analyse de variance (ANOVA) des propriétés du BHP fibré à l'état frais.*

	Affaissement, cm				Absorption d'eau, %			
	Degrés de liberté	Somme des carrés	Valeur de F	Valeur de P (Prob > F)	Degrés de liberté	Somme des carrés	Valeur de F	Valeur de P (Prob > F)
<b>Modèle</b>	9	81.88	4.72	0.0117	9	6.33	7.40	0.0022
<b>A</b>	1	25.80	13.40	0.0044	1	0.83	8.71	0.0145
<b>B</b>	1	1.27	0.66	0.4362	1	0.31	3.24	0.1018
<b>C</b>	1	22.31	11.58	0.0067	1	1.25	13.12	0.0047
<b>AB</b>	1	0.13	0.65	0.8041	1	4.371 x 10 <sup>-3</sup>	0.046	0.8345
<b>AC</b>	1	0.000	0.000	1.0000	1	0.015	0.16	0.6957
<b>BC</b>	1	0.000	0.000	1.0000	1	4.851 x 10 <sup>-3</sup>	0.051	0.8258
<b>A<sup>2</sup></b>	1	14.04	7.29	0.0223	1	0.97	10.19	0.0096
<b>B<sup>2</sup></b>	1	4.28	2.22	0.1668	1	1.21	12.76	0.0051
<b>C<sup>2</sup></b>	1	19.52	10.13	0.0098	1	2.45	25.84	0.0005
<b>Résiduelle</b>	10	19.26			10	0.95		
<b>Manque d'ajustement</b>	5	19.26			5	0.95		
<b>Erreur pure</b>	5	0.000			5	0.000		
<b>Cor Total</b>	19	101.14			19	7.28		
	<b>ET</b>	1.39	<b>R<sup>2</sup></b>	0.8096	<b>ET</b>	0.31	<b>R<sup>2</sup></b>	0.8694
	<b>Moy</b>	23.18	<b>R<sup>2</sup> - Ajusté</b>	0.6382	<b>Moy</b>	1.44	<b>R<sup>2</sup> - Ajusté</b>	0.7519
	<b>C.V, %</b>	5.99	<b>R<sup>2</sup>- Prédit</b>	- 0.4462	<b>C.V, %</b>	21.43	<b>R<sup>2</sup>- Prédit</b>	0.0095
	<b>ERPSC</b>	146.26	<b>PA</b>	6.027	<b>ERPSC</b>	7.21	<b>PA</b>	7.688

Tableau 3. 3 Analyse de variance (ANOVA) des propriétés du BHP fibré à l'état durci.

	Résistance à la compression, MPa				Résistance à la flexion, MPa				Résistance à la traction par fendage, MPa			
	Degrés de liberté	Somme des carrés	Valeur de F	Valeur de P (Prob > F)	Degrés de liberté	Somme des carrés	Valeur de F	Valeur de P (Prob > F)	Degrés de liberté	Somme des carrés	Valeur de F	Valeur de P (Prob > F)
<b>Model</b>	9	467.91	5.54	0.0066	9	11.05	5.08	0.0091	9	12.08	8.67	0.0011
<b>A</b>	1	73.36	7.81	0.0189	1	0.66	2.71	0.1304	1	2.40	15.50	0.0028
<b>B</b>	1	42.44	4.52	0.0594	1	2.08	8.60	0.0150	1	2.96	19.12	0.0014
<b>C</b>	1	181.71	19.36	0.0013	1	6.43	26.59	0.0004	1	4.37	28.25	0.0003
<b>AB</b>	1	3.22	0.34	0.5713	1	1.625 x 10 <sup>-3</sup>	6.719 x 10 <sup>-3</sup>	0.9363	1	0.016	0.10	0.7549
<b>AC</b>	1	0.21	0.022	0.8842	1	0.021	0.089	0.7720	1	0.023	0.15	0.7105
<b>BC</b>	1	7.45	0.79	0.3939	1	0.23	0.97	0.3478	1	1.41	9.11	0.0129
<b>A<sup>2</sup></b>	1	37.25	3.97	0.0744	1	0.96	3.95	0.0749	1	0.79	5.11	0.0473
<b>B<sup>2</sup></b>	1	127.15	13.55	0.0042	1	0.13	0.54	0.4801	1	0.16	1.01	0.3392
<b>C<sup>2</sup></b>	1	18.03	1.92	0.1959	1	0.79	3.27	0.1008	1	1.218 x 10 <sup>-4</sup>	7.869 x 10 <sup>-4</sup>	0.9782
<b>Résiduelle</b>	10	93.87			10	2.42			10	1.55		
<b>Manque d'ajustement</b>	5	93.87			5	2.42			5	1.55		
<b>Erreur pure</b>	5	0.000			5	0.000			5	0.000		
<b>Cor Total</b>	19	561.78			19	13.47			19	13.62		
<b>ET</b>		3.06	<b>R<sup>2</sup></b>	0.8329	<b>ET</b>	0.49	<b>R<sup>2</sup></b>	0.8205	<b>ET</b>	0.39	<b>R<sup>2</sup></b>	0.8864
<b>Moy</b>		91.60	<b>R<sup>2</sup> - Ajusté</b>	0.6825	<b>Moy</b>	6.82	<b>R<sup>2</sup> - Ajusté</b>	0.6589	<b>Moy</b>	6.30	<b>R<sup>2</sup> - Ajusté</b>	0.7841
<b>C.V, %</b>		3.34	<b>R<sup>2</sup>- Prédit</b>	-0.2737	<b>C.V, %</b>	7.21	<b>R<sup>2</sup>- Prédit</b>	-0.3636	<b>C.V, %</b>	6.25	<b>R<sup>2</sup>- Prédit</b>	0.1369
<b>ERPSC</b>		715.55	<b>PA</b>	7.134	<b>ERPSC</b>	18.36	<b>PA</b>	7.565	<b>ERPSC</b>	11.76	<b>PA</b>	11.371

**ET** : Écart type, **Moy** : Moyenne, **C.V (%)** : Coefficient de variation, **ERPSC** : Erreur résiduelle prévue de la somme des carrés, **R<sup>2</sup>** : Coefficient de corrélation, **R<sup>2</sup> ajusté** : Coefficient de corrélation d'ajustement, **R<sup>2</sup>- Prédit** : Coefficient de corrélation de prédiction, **PA** : Précision adéquate.

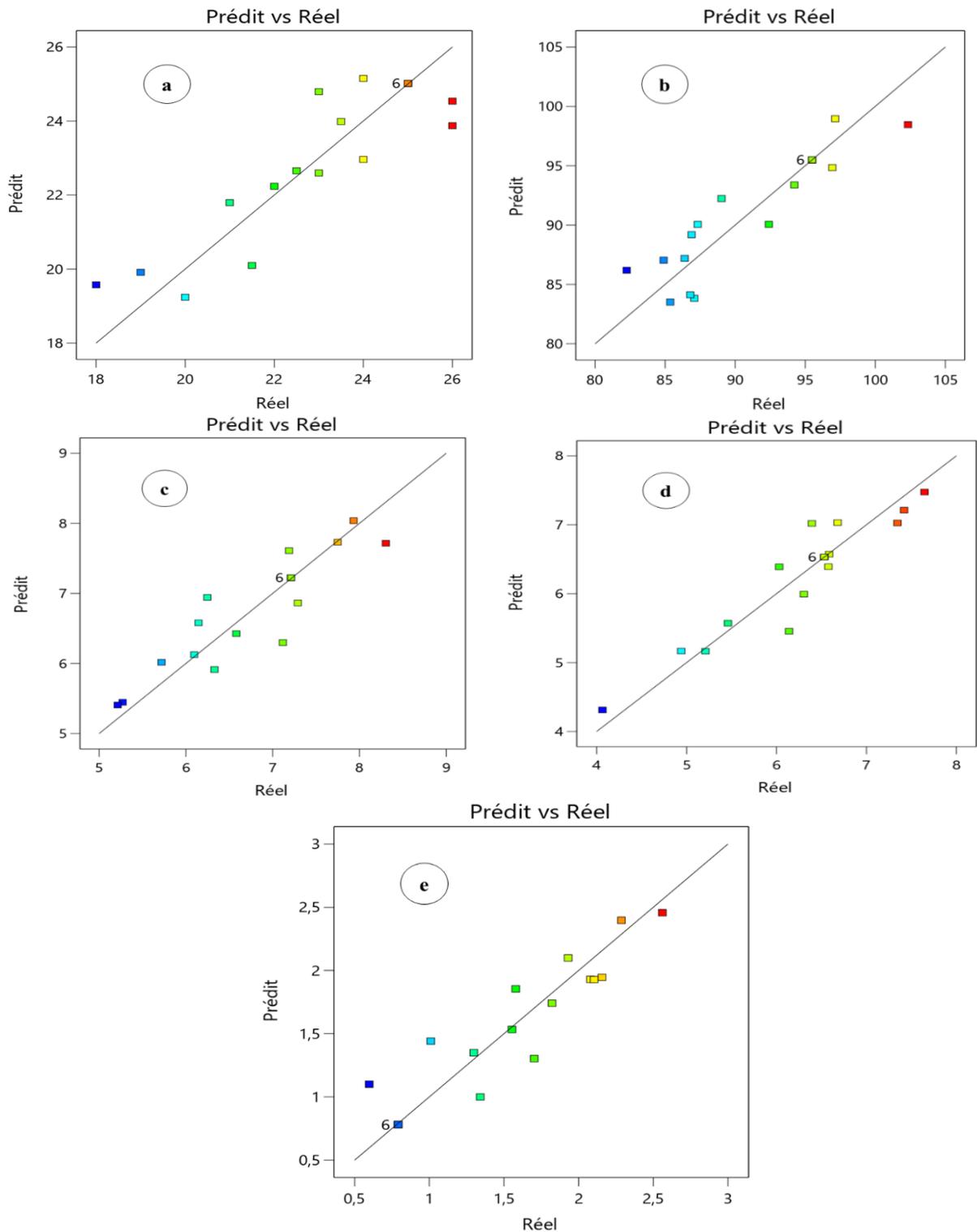


Figure 3. 1 Diagramme de distribution de probabilité pour : (a) l'affaissement, (b) la résistance à la compression à 28 jours, (c) la résistance à la flexion à 28 jours, (d) la résistance à la traction fendue à 28 jours, (e) l'absorption d'eau.

### 3.2.3 Diagramme de perturbation

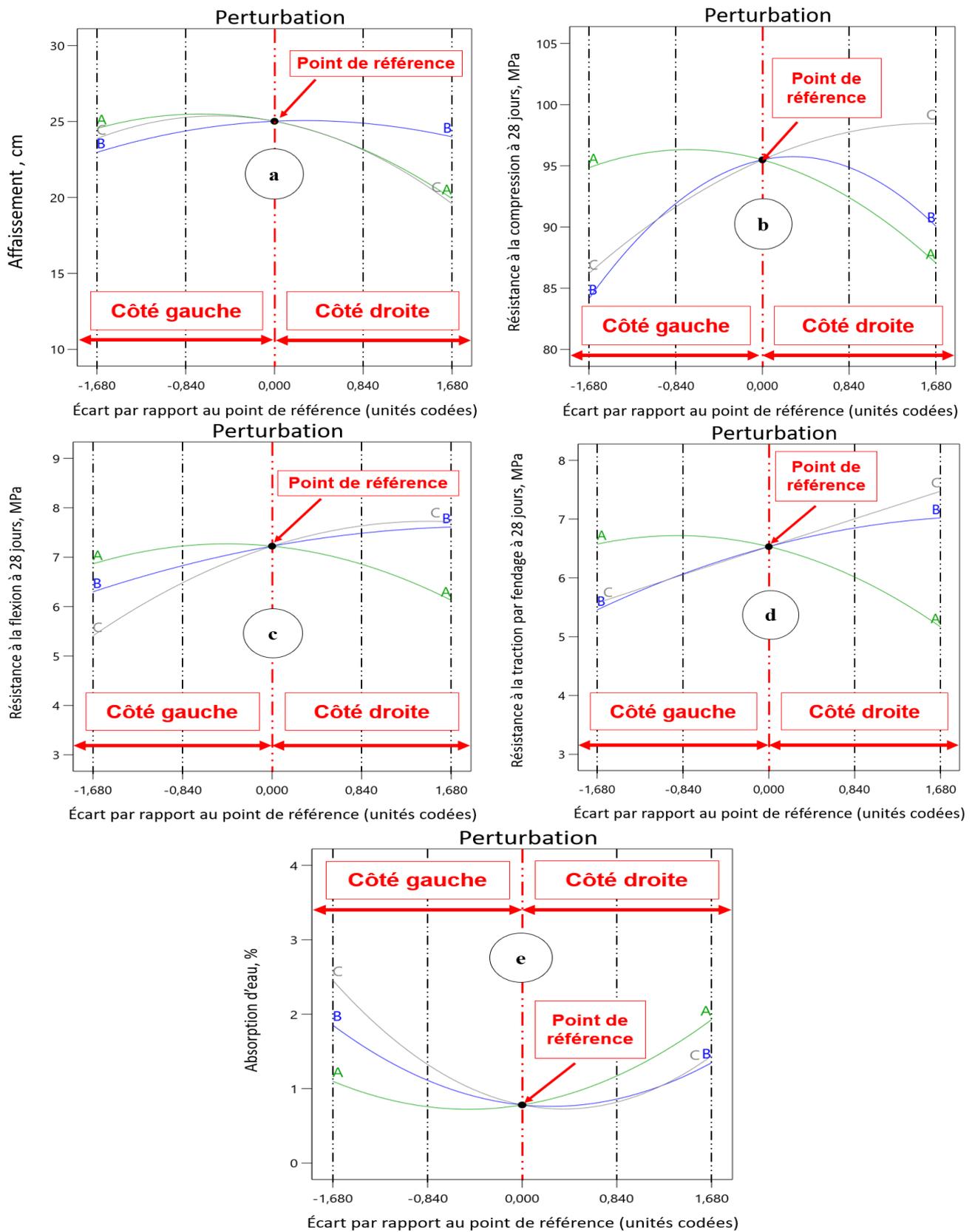


Figure 3. 2 Diagramme de perturbation pour : (a) l'affaissement, (b) la résistance à la compression à 28 jours, (c) la résistance à la flexion à 28 jours, (d) la résistance à la traction fendue à 28 jours, (e) l'absorption d'eau.

La figure 3.2 présente les graphiques de perturbation de la conception RSM, elle révèle que les paramètres sont significatifs en affichant les changements de réponse de chaque facteur lorsque celui-ci se déplace à partir du point de référence (codé zéro).

Le diagramme de perturbation de la figure. 3.2 (a) montre que l'affaissement maximum est atteint près du point de référence (0) du rapport eau/liant (A) et du dosage en fibres (C) vers la gauche et du rapport d'aspect (B) du côté droit. L'affaissement diminue avec l'évolution du rapport eau/liant (A) et du dosage en fibres (C). Mais, on remarque une diminution vers la gauche de référence des rapports d'aspects (B) des fibres courtes de diamètre constant (niveau -1.68) et des fibres de grand diamètre de longueur constante (niveau -1).

La résistance à la compression à 28 jours la plus élevée est atteinte près du point de référence (niveau zéro) du rapport eau/liant (A) vers la gauche de référence et du rapport d'aspect de la fibre (B) du côté droit de la référence, comme illustré dans la figure 3.2(b). La résistance à la compression augmente pour le dosage élevé en fibres (C) vers la droite du point de référence. Tandis qu'une certaine diminution a été observée vers la gauche et vers la droite de référence pour le rapport d'aspect (B) des fibres courtes de diamètre constant (niveau -1.68), des fibres de grand diamètre de longueur constante (niveau -1), des fibres de petit diamètre de longueur constante (niveau +1) et des fibres plus longues de diamètre constant (niveau +1.68). On remarque aussi une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation du rapport eau/liant (A) et la diminution de dosage en fibres (C).

Selon la figure 3.2(c), la résistance à la flexion à 28 jours la plus élevée est atteinte près du point de référence (niveau zéro) du rapport eau/liant (A) vers la gauche, et augmente vers la droite de référence pour les rapports d'aspects (B) des fibres de petit diamètre de longueur constante (niveau +1) et des fibres plus longues de diamètre constant (niveau +1.68) et le dosage élevé en fibres (C). La résistance à la flexion diminue avec l'augmentation du rapport eau/liant (A). Cette diminution est observée vers la gauche du point de référence pour le rapport d'aspect (B) des fibres courtes de diamètre constant (niveau -1.68), des fibres de grand diamètre de longueur constante (niveau -1) et du faible dosage en fibres (C).

Similairement au cas précédent la résistance à la traction fendue à 28 jours de la figure 3.2(d) montre que les mêmes valeurs des facteurs A, B et C influent presque de la même manière.

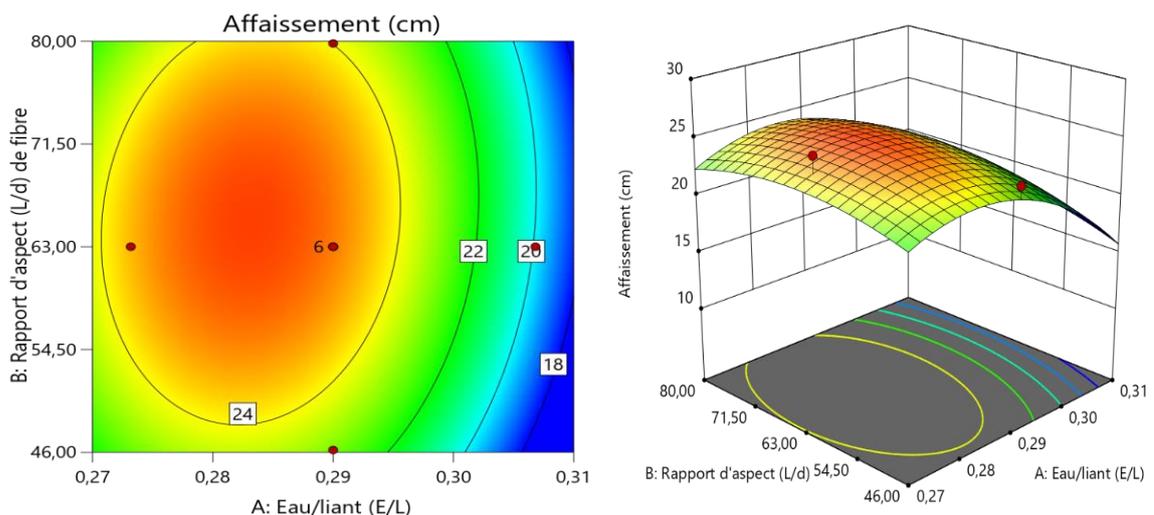
D'après la figure 3.2(e), on peut constater que l'absorption d'eau la plus basse est atteinte près du point de référence (niveau zéro) du rapport d'aspect longueur-diamètre (L/d) de fibre (B) et du dosage en fibres (C) vers la droite et du rapport eau/liant (A) vers la gauche. D'autre part, l'absorption d'eau augmente avec l'augmentation du rapport eau/liant (A) et la diminution du dosage en fibres (C). Elle augmente vers la gauche de

référence des rapports d'aspects (B) des fibres courtes de diamètre constant (niveau -1.68) et des fibres de grand diamètre de longueur constante (niveau -1). Cette augmentation est légère vers la droite des rapports d'aspects (B) des fibres de petit diamètre de longueur constante (niveau +1) et des fibres plus longues de diamètre constant (niveau +1.68).

### 3.2.4 Contour (2D) et courbe (3D) de surface pour toutes les réponses

Les tracés de contour (2D) et les courbes de surface (3D) sont utilisés pour visualiser la surface de réponse et pour évaluer la relation éventuelle et interactive entre les paramètres de conception du mélange et les propriétés des bétons fibrés à hautes performances. Ces graphiques ont pour objectif de représenter les valeurs des réponses examinées ainsi que les conditions de fonctionnement souhaitables, offrant ainsi une représentation visuelle plus claire de la surface de réponse.

Ils incluent les tracés de contour et les courbes de surface pour l'affaissement, la résistance à la compression, la résistance à la flexion et l'absorption d'eau montrent que les interactions entre le rapport eau/liant (E/L), le rapport d'aspect (L/d) et le dosage en fibres présentent des contours elliptiques parfaits. En revanche, les interactions entre les facteurs de la résistance à la traction par fendage présentent des contours elliptiques relativement parfaits.



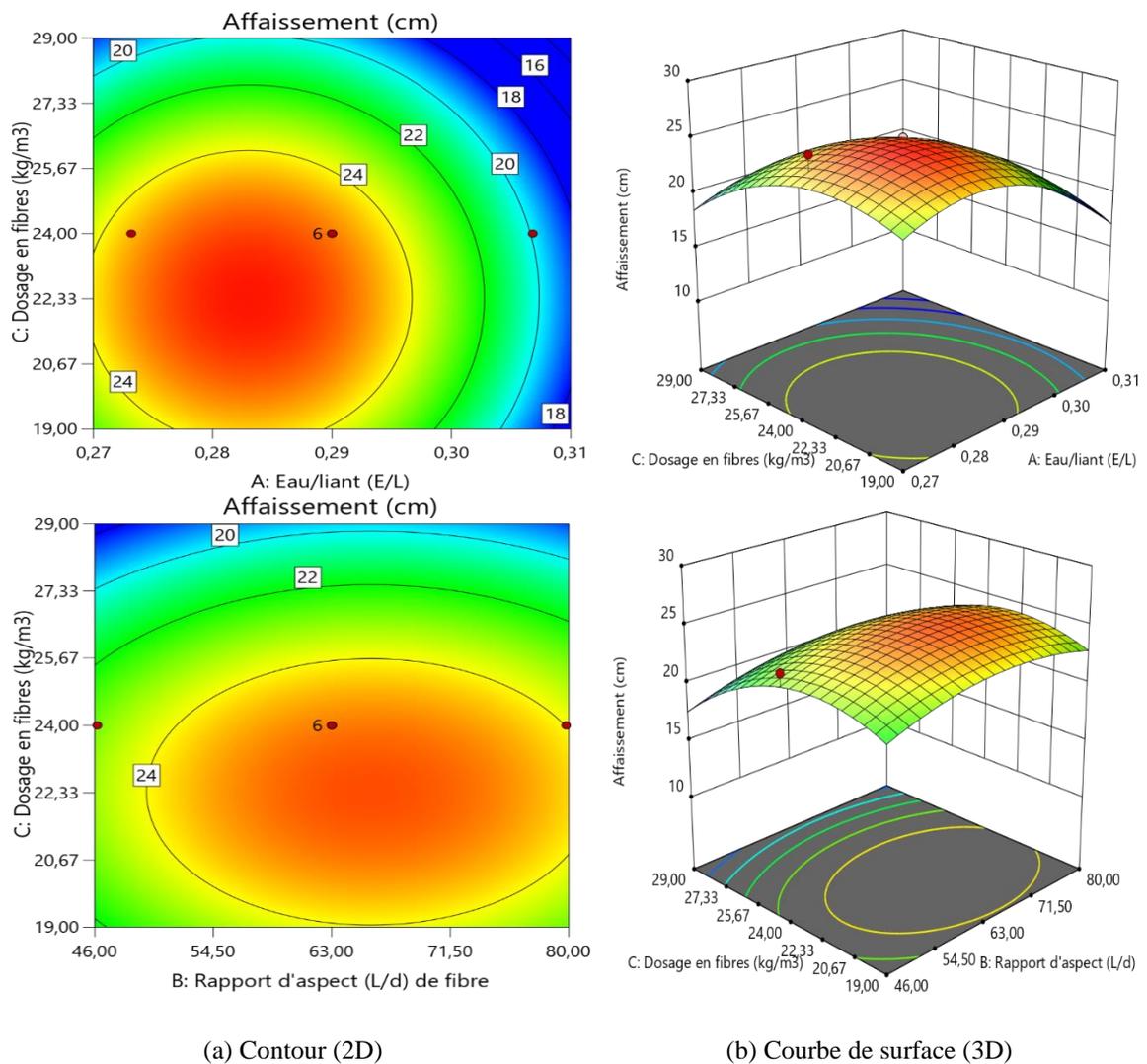


Figure 3. 3 Diagrammes de surface de réponse pour l'affaissement

Les tracés de réponse de surface présentés à la figure 3.3 illustrent la variation des valeurs d'affaissement en fonction du rapport eau/liant (E/L), rapport d'aspect (L/d) et le dosage en fibres. Sur la base des observations de cette figure, il est évident que l'affaissement des mélanges de béton a été relativement moins influencé par le rapport d'aspect (L/d) par rapport à l'impact significatif de dosage en fibres et le rapport (E/L). La variation de E/L de 0,28 à 0,31 et le dosage en fibres de 22 à 29 kg/m<sup>3</sup> a entraîné une différence substantielle dans les valeurs d'affaissement, d'environ 8 et 6 cm respectivement. Cependant, malgré l'augmentation du rapport d'aspect (L/d), le changement des valeurs d'affaissement est resté relativement constant dans une plage étroite de 2 cm.

Une valeur d'affaissement élevée a été obtenue avec un rapport d'aspect (L/d) de 63, un rapport eau/liant (E/L) d'environ 0,28 et un dosage en fibres d'environ 22 kg/m<sup>3</sup>. Inversement, les valeurs d'affaissement les plus basses ont

été observées lorsque le rapport eau/liant (E/L) et le dosage en fibres étaient à leurs valeurs maximales. L'affaissement du béton fibré à haute performance diminue à mesure que le rapport d'aspect (L/d) des fibres augmente, ce qui est un phénomène également observé dans le béton ordinaire [129,130]. Cette diminution peut être attribuée à l'augmentation de la surface spécifique résultant de l'ajout de fibres. La présence de fibres d'acier dans le béton agit comme un cadre structurel qui limite la fluidité du mélange. Par conséquent, la gêne causée par le réseau fibre conduit à une réduction de l'affaissement du béton fibré à haute performance [131–133].

De plus, les fibres d'acier avec un rapport d'aspect (L/d) élevé améliorent l'enchevêtrement et la liaison entre les fibres, ce qui entraîne une tendance accrue au regroupement ou au regroupement des fibres. Ce phénomène restreint davantage la fluidité du mélange, entraînant une diminution de l'affaissement [131,134].

Il est important de noter que la teneur en eau a été maintenue constante pour tous les mélanges de béton. Par conséquent, les changements observés des rapports (E/L) peuvent être attribués uniquement aux variations de la teneur en liant. En effet, une augmentation du rapport (E/L) de 0,27 à 0,31 correspond à une diminution de la teneur en liant de 518,51 kg/ m<sup>3</sup> à 451,61 kg/ m<sup>3</sup> (tableau 2.09).

Comme le montre la figure 3.3, il est évident qu'un accroissement du rapport (E/L) provoque une réduction des valeurs d'affaissement. En d'autres termes, une diminution de la teneur en liant entraîne une diminution de la fluidité. Plusieurs études ont indiqué qu'une pâte de ciment insuffisante dans le béton peut entraîner une diminution de la maniabilité, soulignant la nécessité d'ajuster la teneur en liant pour améliorer la maniabilité. Cet ajustement est crucial pour maintenir la résistance souhaitée du béton tout en atteignant simultanément le niveau de maniabilité souhaité [135–137]. Un volume plus élevé de liant dans les mélanges de béton diminue les interactions et le frottement des particules, entraînant une augmentation de la viscosité plastique, entraînant finalement une augmentation de la fluidité [138–143]. Les résultats indiquent également que l'augmentation de rapport d'aspect (L/d) a un effet moins significatif sur l'affaissement, quelles que soient les variations des valeurs de (E/L) et du dosage en fibres.

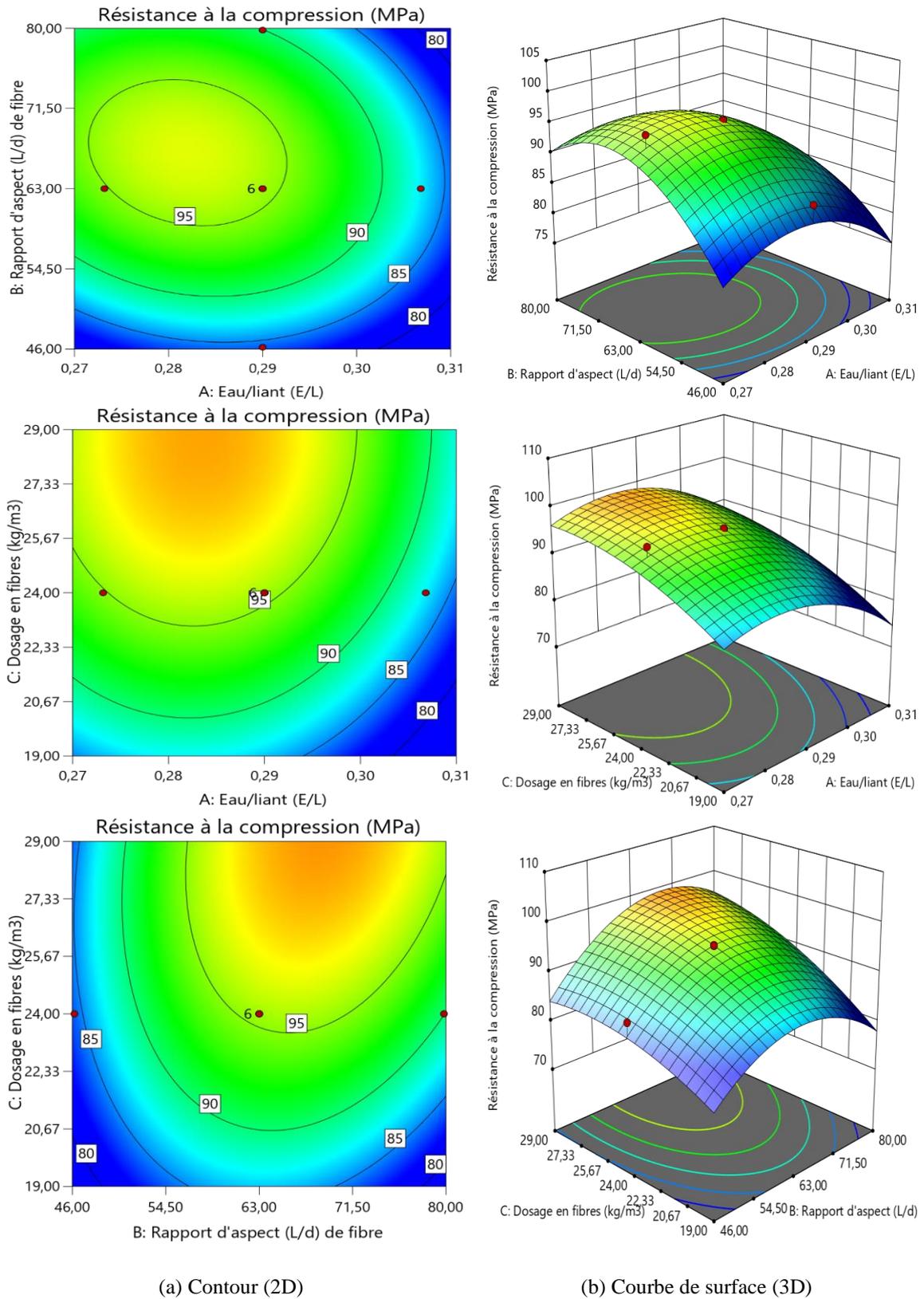
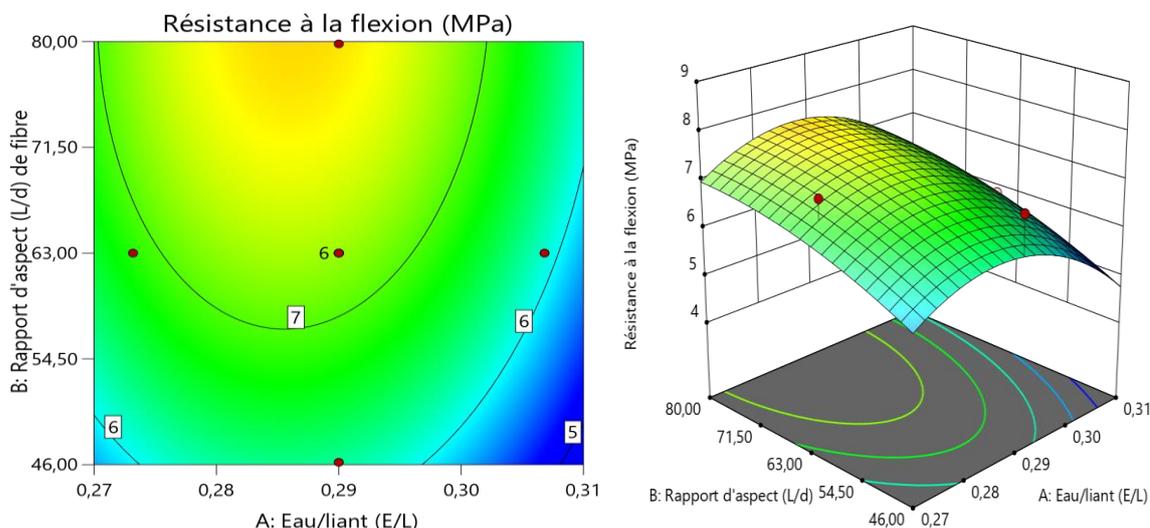


Figure 3. 4 Diagrammes de surface de réponse pour la résistance à la compression à 28 jours

Selon la figure 3.4, des valeurs élevées de résistance à la compression ont été obtenues avec un rapport d'aspect (L/d) d'environ 70, un rapport eau/liant (E/L) d'environ 0,28 et un dosage en fibres maximale (29 kg/ m<sup>3</sup>). A l'inverse, les valeurs de résistance à la compression les plus faibles ont été observées avec des valeurs maximales d'eau/liant (E/L) et minimales de dosage en fibres, quelles que soient les variations de rapport d'aspect (L/d). Yu et al [144] ont découvert que l'incorporation d'un faible pourcentage de fibres d'acier (environ 2,5 % en volume) dans le béton peut améliorer sa résistance à la compression en supprimant la formation de fissures. Cette amélioration peut être attribuée à l'effet de renforcement des fibres d'acier, qui fortifient le béton et améliorent sa résistance à la rupture lorsqu'il est soumis à la pression.

L'augmentation de la teneur en liant d'un mélange de béton peut avoir un impact positif sur sa résistance à la compression. Cette amélioration de la résistance peut être expliquée par la formation de produits d'hydratation, qui jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de la résistance à la compression du béton en apportant stabilité et résistance. Cependant, lorsque la teneur en liant est fortement augmentée, il peut agir davantage comme un matériau de remplissage plutôt que comme un ingrédient réactif dans le mélange. Ce déplacement du rôle du liant peut limiter la formation de produits d'hydratation, entraînant une diminution de la résistance à la compression. De ce fait, il est impératif de prêter une attention particulière à la teneur optimale en liant dans les mélanges de béton pour s'assurer que la résistance à la compression souhaitée est atteinte [145].

Sanjay, Aswath et Singh [146] précisent que lorsqu'il y a trop de liant dans le mélange, cela peut entraîner une diminution de la résistance à la compression. Cela se produit parce que l'excès de liant ne participe pas au processus qui rend le matériau solide, ce qui entraîne une diminution de la résistance globale du matériau.



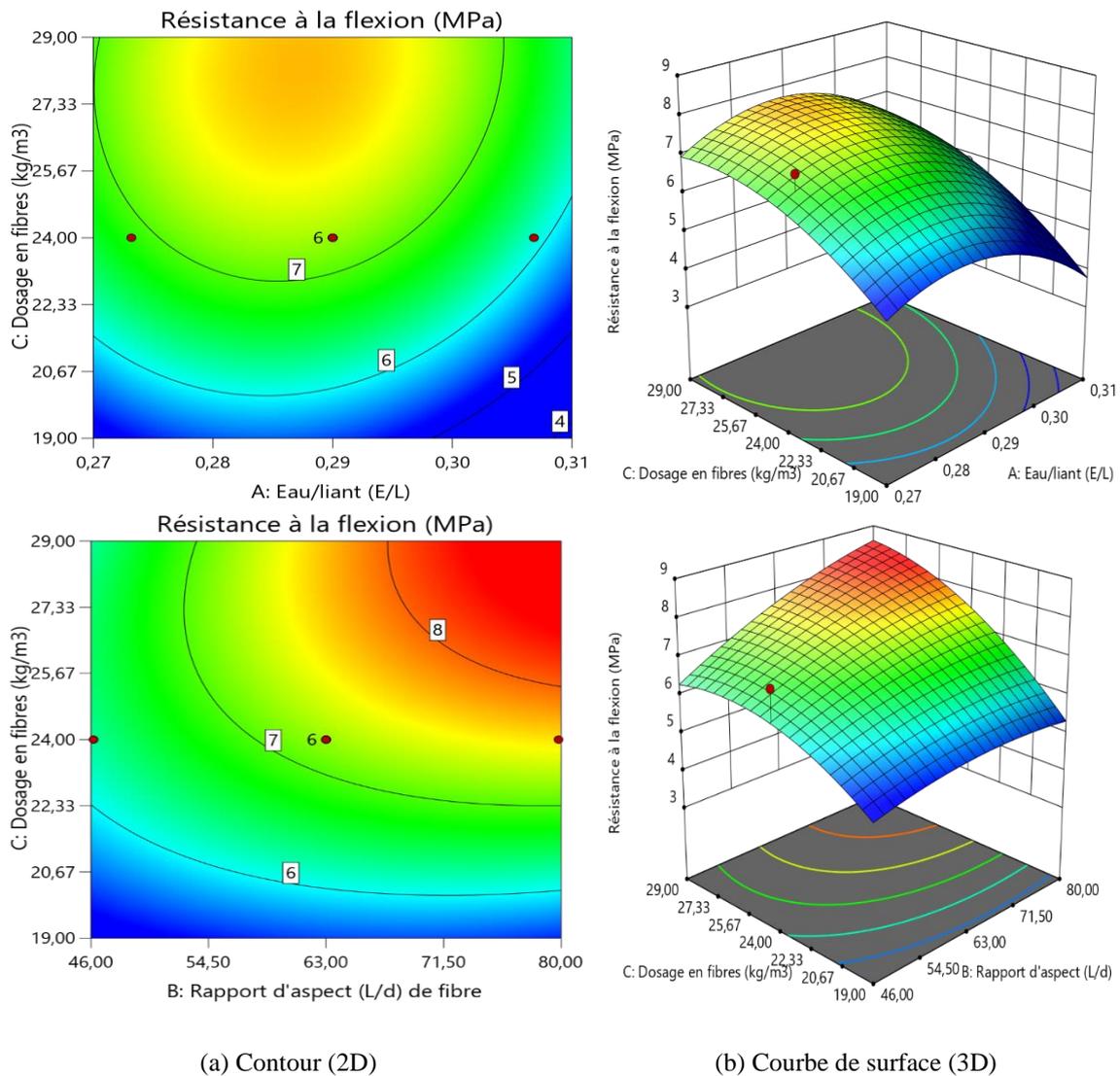
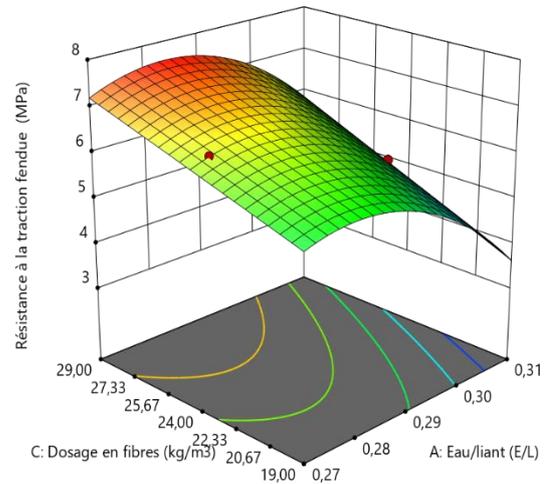
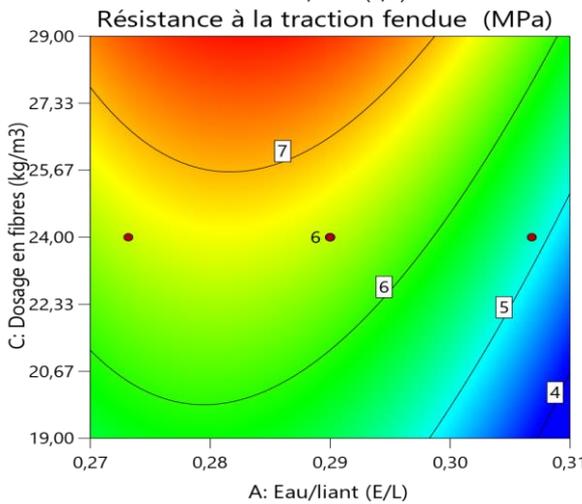
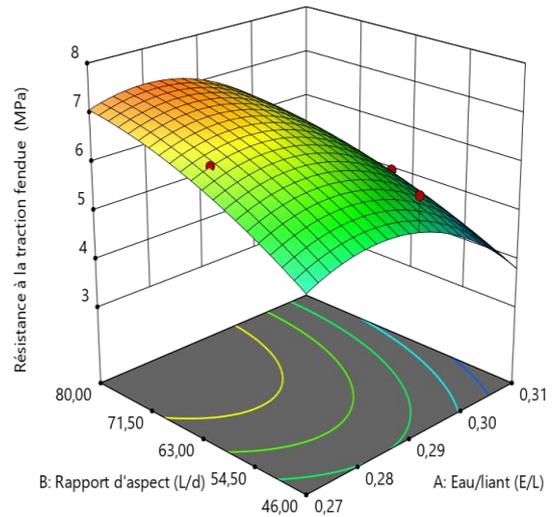
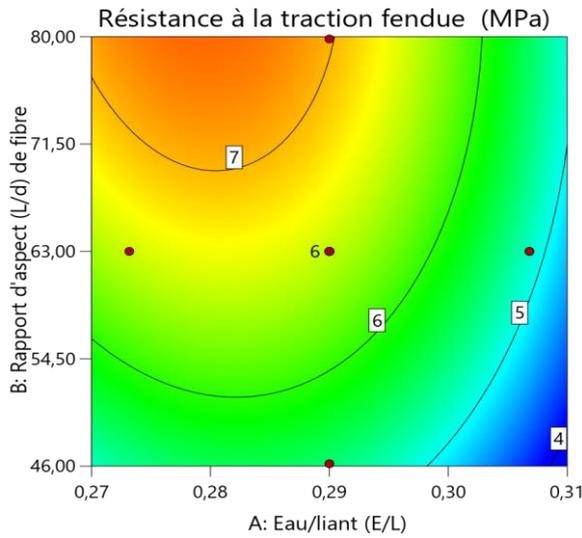


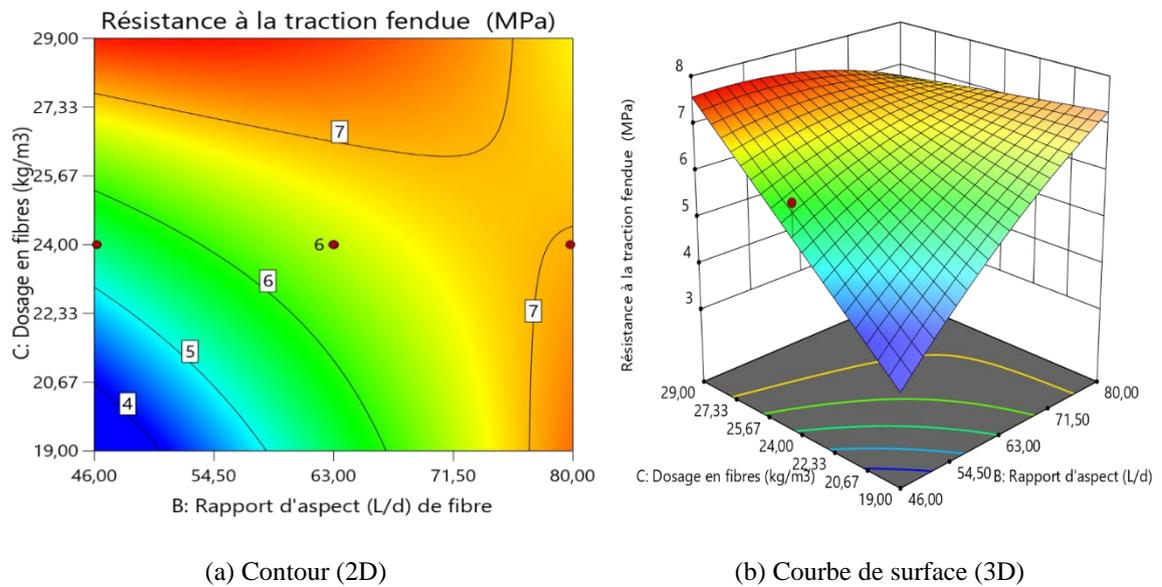
Figure 3. 5 Diagrammes de surface de réponse pour la résistance à la flexion à 28 jours

Sur la base des tracés de réponse de surface présentés à la figure 3.5, on peut observer qu'une résistance à la flexion élevée a été obtenue lorsque le dosage en fibres et le rapport d'aspect (L/d) étaient à leurs valeurs maximales, quelles que soient les variations de rapport (E/L). En revanche, les valeurs les plus faibles de résistance à la flexion ont été observées avec une faible teneur en fibres et un rapport (E/L) élevé.

Il a été démontré que l'incorporation de fibres d'acier dans les mélanges de béton améliore la résistance à la flexion, qui représente la résistance du matériau à la flexion ou à la déformation sous charge. Cette amélioration peut être attribuée à la résistance des fibres d'acier et à leur capacité d'emboîtement avec d'autres composants en béton, ce qui se traduit par une capacité de charge accrues. Cependant, il convient de noter qu'un dosage plus élevé de fibres

d'acier peut nuire à l'ouvrabilité, impactant la facilité de manipulation et de mise en place du béton. Par conséquent, le dosage des fibres doit être soigneusement considéré pour trouver un équilibre entre l'amélioration de la résistance à la flexion et la maniabilité [147–149].





(a) Contour (2D) (b) Courbe de surface (3D)  
 Figure 3. 6 Diagrammes de surface de réponse pour la résistance à la traction fendue à 28 jours

Les résultats obtenus à partir de la figure 3.6 ont révélé qu'une augmentation à la fois de rapport d'aspect (L/d) et de dosage en fibres, associée à un faible rapport (E/L), conduit à des valeurs de résistance à la traction plus élevées (jusqu'à 7 MPa). Inversement, les valeurs les plus basses de résistance à la traction fendue ont été produites lorsque le rapport (E/L) était élevé et que le dosage en fibres et le rapport d'aspect (L/d) étaient à leurs valeurs minimales. On peut également observer une amélioration notable de la résistance à la traction fendue avec un faible rapport (E/L).

Il a été observé que l'incorporation de fibres d'acier dans le béton améliore ses performances en termes de résistance à la traction fendue. Cette amélioration peut être attribuée à la capacité des fibres d'acier à combler les fissures qui se développent lorsque le béton est soumis à des contraintes. En comblant ces fissures, les fibres d'acier améliorent la ductilité du béton, réduisent sa fragilité et augmentent sa capacité de charge. Par conséquent, la présence de fibres d'acier contribue à l'amélioration globale des performances du béton en termes de résistance à la traction fendue [150–152].

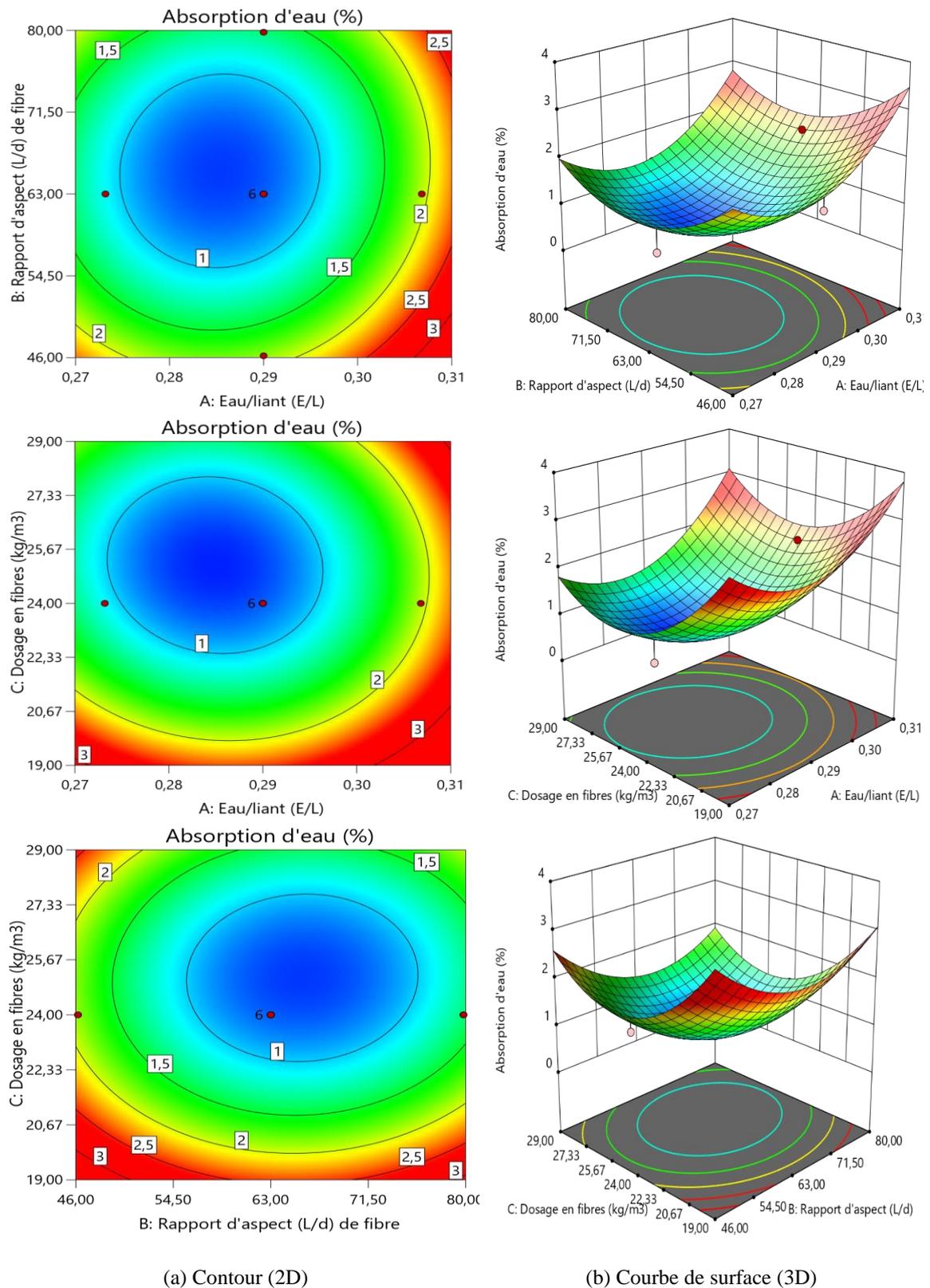


Figure 3. 7 Diagrammes de surface de réponse pour l'absorption d'eau

Les contours elliptiques parfaits illustrés à la figure 3.7 suggèrent que les mélanges des béton fibrés à haute performance avec un rapport d'aspect (L/d)

d'environ 65, de dosage en fibre d'environ 25 kg/ m<sup>3</sup> et un rapport eau/liant (E/L) entre 0,28 et 0,29 présentent une absorption d'eau plus faible par rapport aux autres mélanges. De plus, on peut observer que les mélanges contenant un faible dosage en fibre et un faible rapport d'aspect (L/d) présentent une absorption d'eau significativement élevée par rapport aux autres mélanges.

Selon Miloud et al. [96] et Rahmani et al. [153,154], l'ajout de fibres d'acier au béton peut entraîner une augmentation de la perméabilité à l'eau et au gaz, quelle que soit la quantité ou la longueur des fibres. Cette découverte contredit des recherches antérieures indiquant que le béton renforcé de fibres d'acier avait une absorption d'eau et une perméabilité inférieure à celles du béton ordinaire. La présence de fibres d'acier dans la matrice de béton peut créer des vides et des voies interconnectés, permettant un passage plus facile de l'eau et du gaz. Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'examiner attentivement les exigences spécifiques et les propriétés souhaitées lors de l'incorporation de fibres d'acier dans les mélanges de béton, en particulier en termes de caractéristiques de perméabilité.

### 3.2.5 Optimisation et validation expérimentale

L'objectif de l'optimisation de la conception du mélange de béton est de trouver un équilibre entre plusieurs propriétés souhaitées. Dans cette étude, le processus d'optimisation a été utilisé pour déterminer les valeurs optimales pour le rapport (E/L), le rapport d'aspect (L/d) et le dosage en fibres, dans le but d'obtenir des résultats favorables pour la résistance à la compression, la résistance à la traction, la résistance à la flexion, l'affaissement et l'absorption d'eau. En considérant tous ces facteurs simultanément, un optimum de compromis a été recherché pour assurer des valeurs souhaitables pour toutes les réponses étudiées. La validation des modèles générés a impliqué l'utilisation de trois paramètres optimaux (rapport (E/L) de 0,28, rapport d'aspect (L/d) de 63 et le dosage en fibres de 25 kg/ m<sup>3</sup>), qui ont été partagés par toutes les réponses.

Afin de valider les proportions de conception optimales dérivées du modèle de la méthodologie de surface de réponse, une expérience supplémentaire a été menée et les résultats sont documentés dans le tableau 3.4. L'analyse comparative de la désirabilité et du pourcentage d'erreur relative absolue entre le modèle de la méthodologie de surface de réponse et les résultats expérimentaux a révélé un minimum de valeurs. Cette observation suggère que le modèle de la méthodologie de surface de réponse prédit efficacement les réponses souhaitées avec précision. Par conséquent, la fiabilité et la précision du modèle de la méthodologie de surface de réponse dans la fourniture de prédictions précises pour les proportions de conception spécifiées peuvent être

affirmées [155] [103] . L'estimation du pourcentage d'erreur relatif absolue a été déterminée à l'aide de l'équation (6).

$$\text{Erreur relatif absolue, \%} = \left(1 - \frac{\text{valeur prédit}}{\text{valeur expérimentale}}\right) \times 100 \quad (6)$$

Les faibles valeurs du pourcentage d'erreur relatif absolu indiquent que le modèle d'objectif a prédit avec précision les réponses souhaitées, fournissant des estimations fiables pour les résultats expérimentaux. Les résultats indiquent que les valeurs mesurées présentent une erreur relative absolue inférieure à 6 % et correspondent à un coefficient de corrélation supérieur à 94 %. Le terme "Cible" désigne la valeur précise qui est recherchée ou prévue dans le processus d'optimisation. Il représente l'objectif ou le but souhaité pour un paramètre ou une variable spécifique. En établissant une valeur cible, le processus d'optimisation vise à atteindre les résultats souhaités dans les limites prescrites. La valeur cible sert de principe directeur, guidant le processus d'optimisation vers l'obtention des résultats escomptés pour le paramètre ou la variable spécifié [103,156].

La désirabilité reflète le degré auquel les réponses s'alignent sur les cibles souhaitées. Le tableau fourni présente à la fois les valeurs optimisées et expérimentales de ces propriétés, ainsi que le pourcentage de variation entre elles. Cela permet une évaluation complète de la mesure dans laquelle les valeurs atteintes correspondent aux objectifs souhaités pour chaque réponse. Une valeur de désirabilité proche de 1 signifie un niveau élevé de réussite dans l'atteinte des objectifs ou cibles souhaités pour les paramètres ou variables évalués. Essentiellement, cela indique que les conditions considérées sont très favorables pour atteindre les propriétés souhaitées [157].

*Tableau 3. 4 Validation expérimentale des modèles étudiés.*

Paramètres	Notation	Unité	But	Prédiction du modèle	Expérience en laboratoire	Erreur (%)	Desirabilité
Eau/liant (E/L)	A	/	Cible ->	0.28	0.28	-	-
Rapport d'aspect (L/d)	B	/	Cible ->	63	63	-	-
Dosage en fibre	C	kg/m <sup>3</sup>	Cible ->	25	25	-	-
Affaissement	Aff	cm	Maximum	24.8481	23.5	5.73	0.962
Résistance à la compression	Rc	MPa	Maximum	97.2399	96.513	0.75	0.929
Résistance à la flexion	R <sub>f</sub>	MPa	Maximum	7.37054	7.631	3.41	0.914
Résistance à la traction par fendage	R <sub>t,f</sub>	MPa	Maximum	6.88701	7.111	3.14	0.942
Absorption d'eau	Abs	%	Minimum	0.725127	0.764	5.08	0.983

Le diagramme de vue en rampe présenté à la figure 3.8 offre une représentation graphique qui démontre visuellement la relation entre les variables et leur influence sur le résultat souhaité au cours du processus d'optimisation. Ce diagramme est un outil précieux pour analyser et comparer les effets de divers facteurs, faciliter la prise de décision et améliorer l'efficacité globale [158–160]. En examinant la figure, il devient évident comment les niveaux optimaux du rapport E/L (0,28), du rapport L/d (63) et du dosage en fibres (25 kg/ m<sup>3</sup>) influencent les diverses réponses d'intérêt, à savoir l'affaissement, la résistance à la compression et à la flexion, la résistance à la traction ainsi que l'absorption d'eau.

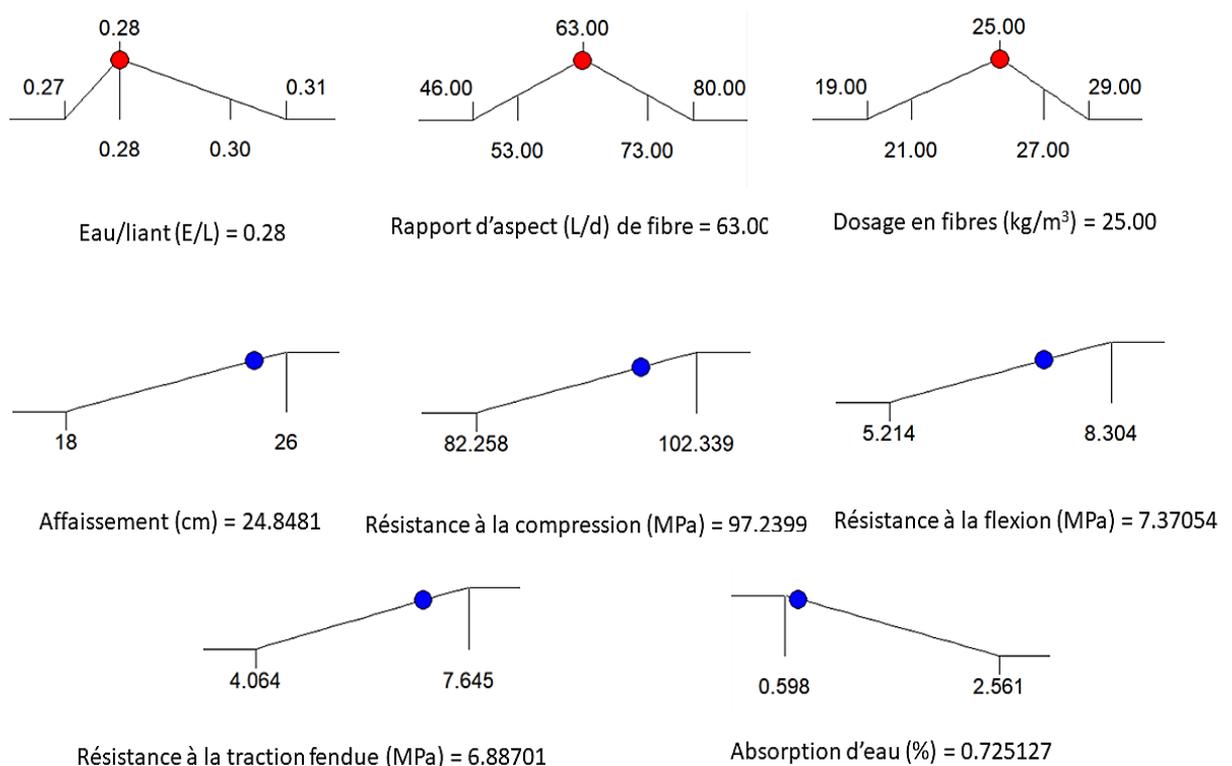


Figure 3. 8 Diagramme de la vue en rampe pour l'optimisation.

### 3.2.6 Microstructure des BHPFM

Les figures 3.8(a)-(e) représentent l'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) des différents mélanges maximaux de BHPFM. En général, il existe une relation claire entre le rapport d'aspect (L/d) des fibres et les propriétés d'adhérence dans le béton fibré. L'analyse effectuée par microscopie électronique à balayage (MEB) révèle que les matrices de béton avec différents rapports d'aspect des fibres (46, 53, 73 et 80) présentent des caractéristiques

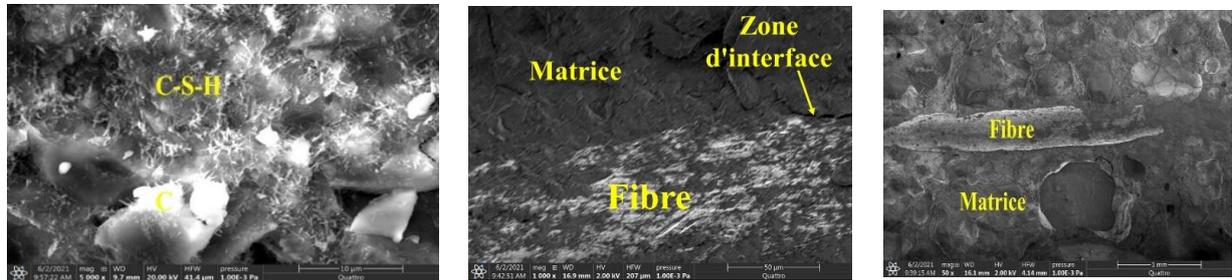
distinctes. Les spécimens de béton avec des rapports d'aspect plus élevés ont tendance à afficher plus de fissures, de pores et une interface plus faible entre les fibres et la matrice de béton. Ces observations suggèrent que le rapport d'aspect des fibres joue un rôle important dans la détermination de la qualité d'adhérence et de l'intégrité globale du béton fibré.

La figure 3.9(c) illustre l'émergence de produits d'hydratation entourant la surface des fibres d'acier dans la matrice. Ce phénomène joue un rôle crucial dans l'amélioration de la force d'adhésion interfaciale entre les fibres et la matrice. En conséquence, les fibres d'acier réagissent avec l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) et d'autres composants solubles, tels que le silicium (Si), l'aluminium (Al) et le calcium (Ca). Cette réaction facilite la formation de gels de silicate de calcium hydraté (C-S-H), favorisant ainsi la génération de produits d'hydratation du ciment [61]. Selon les découvertes de Khameneh Asl et Sadeghian [161], lorsque la longueur des fibres dans un composite cimentaire est inférieure à leur longueur critique, l'amélioration de la force de liaison entre les fibres et la matrice par enrobage peut conduire à une amélioration de la résistance à la rupture. Ceci est attribué à la résistance accrue à l'arrachement des fibres de la matrice. Le revêtement sur les fibres améliore l'adhérence interfaciale, ce qui rend plus difficile l'extraction des fibres, augmentant ainsi la résistance à la rupture globale du composite. Ces résultats mettent en évidence les avantages potentiels de l'optimisation de l'interface fibre-matrice pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires renforcés de fibres.

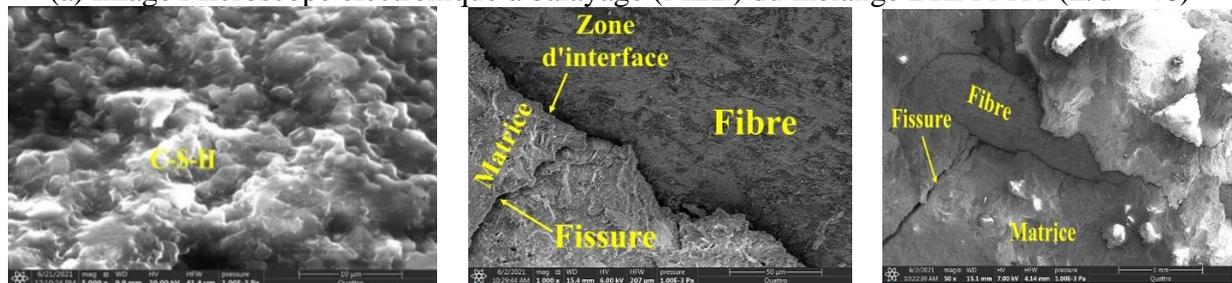
La figure 3.10, présente les résultats d'analyse par diffraction des rayons X (DRX) des mélanges étudiés. Les diagrammes DRX montrent la présence de pics proéminents correspondant au carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) et au quartz ( $\text{SiO}_2$ ) dans tous les échantillons analysés. Les intensités de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) sont très remarquables dans les bétons BHPFM4 et BHPFM14 de l'ordre de 5265 et 5232, respectivement. Le BHPFM2 présente le pic le plus intense de 6269, tandis que ceux des mélanges BHPFM11 et BHPFM12 présentent des intensités plus faibles, avec des valeurs de 2844 et 3228 respectivement. Il est clair que les pics de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) de tous les BHPFM testés sont à  $29,45^\circ$ . Ces observations sont attribuées à la nature calcaire des deux fractions de gravier (3/8) et (8/16) utilisées [162] [163].

Les intensités des pics de quartz ( $\text{SiO}_2$ ) sont plus élevées pour les mélanges BHPFM4 et BHPFM14, avec des valeurs de 8750 et 8228 respectivement. BHPFM2 présentait une intensité maximale de 6205, alors que les intensités des mélanges BHPFM11 et BHPFM12 étaient relativement plus faibles, avec des valeurs de 3452 et 4071 respectivement. Par contre, les BHPFM2, BHPFM4, BHPFM11, BHPFM12 et BHPFM14 présentent des pics de quartz

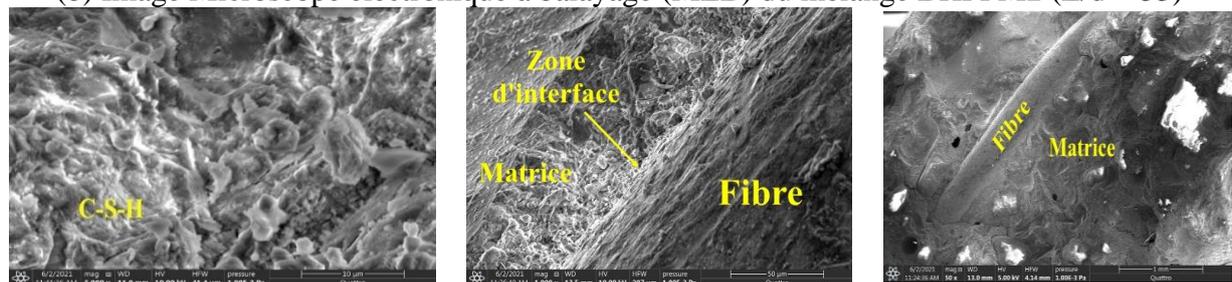
qui sont positionnés à un angle de  $26,72^\circ$ . En effet, la forte teneur en quartz est due à la nature siliceuse des fumées de silice et des sables de dunes utilisés [164,165].



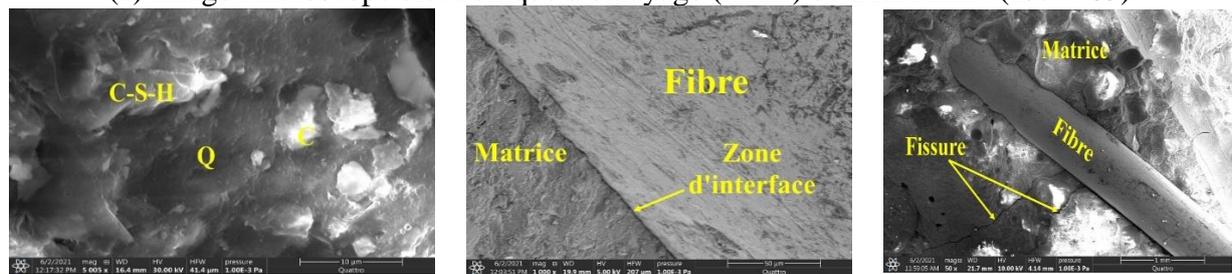
(a) Image Microscope électronique à balayage (MEB) du mélange BHPFM11 ( $L/d = 46$ )



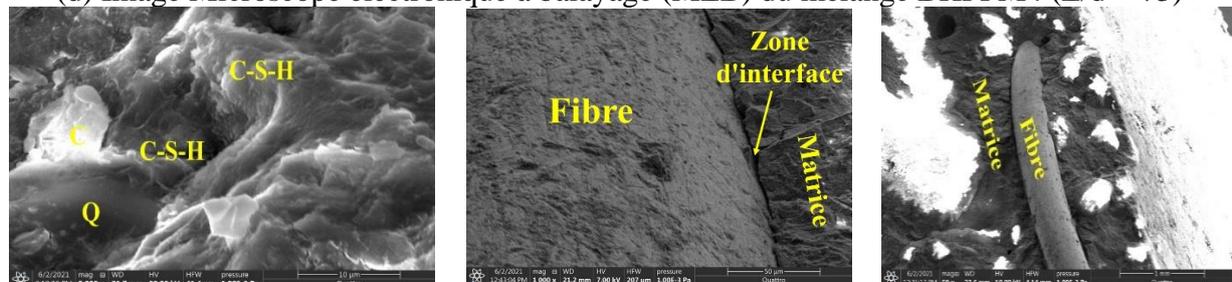
(b) Image Microscope électronique à balayage (MEB) du mélange BHPFM2 ( $L/d = 53$ )



(c) Image Microscope électronique à balayage (MEB) de BHPFM14 ( $L/d = 63$ )



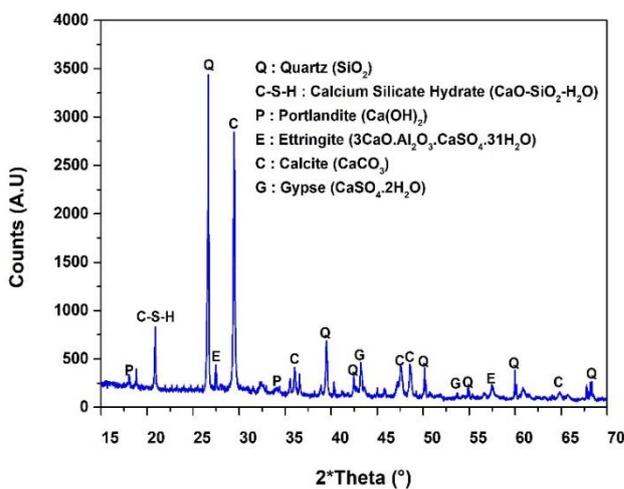
(d) Image Microscope électronique à balayage (MEB) du mélange BHPFM4 ( $L/d = 73$ )



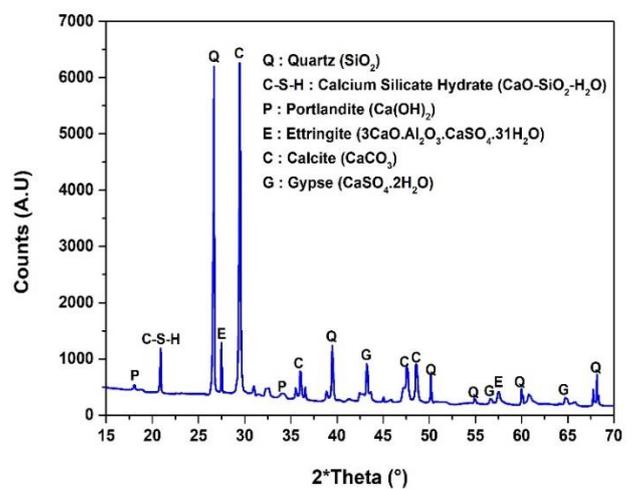
(e) Image Microscope électronique à balayage (MEB) de BHPFM12 ( $L/d = 80$ )

Figure 3. 9 Image Microscope électronique à balayage (MEB) de BHPFM à un agrandissement de 5000, 1000 et 50

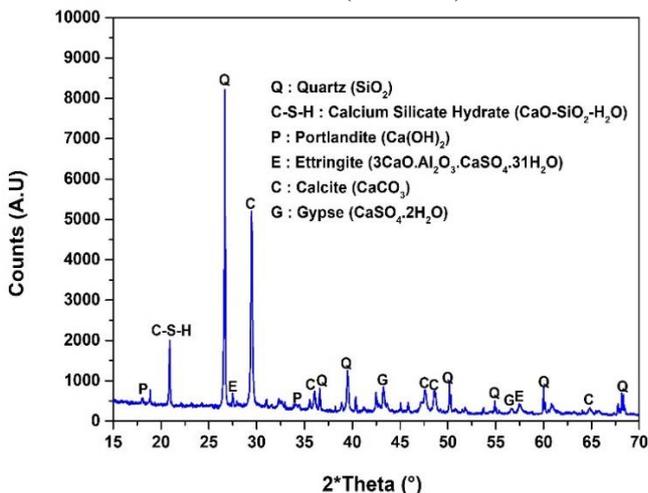
L'analyse DRX confirme la formation de silicate de calcium hydraté (C-S-H) dans les différents échantillons de BHPFM. Les pics caractérisant le C-S-H dans les mélanges BHPFM4 et BHPFM14 sont plus visibles et plus intenses avec des intensités 1851 et 2030, respectivement, alors qu'ils sont plus faibles dans les autres mélanges situés à 20,83°. L'analyse DRX révèle des pics proéminents de portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) observés à 18,02°. Ces pics présentent des intensités élevées, en particulier dans BHPFM4 et BHPFM14, avec des valeurs de 626 et 593, respectivement. En revanche, BHPFM2, BHPFM11 et BHPFM12 présentent des pics d'intensité plus faibles, avec des valeurs de 541, 348 et 345, respectivement. Des résultats similaires ont été trouvés par d'autres auteurs [166–168].



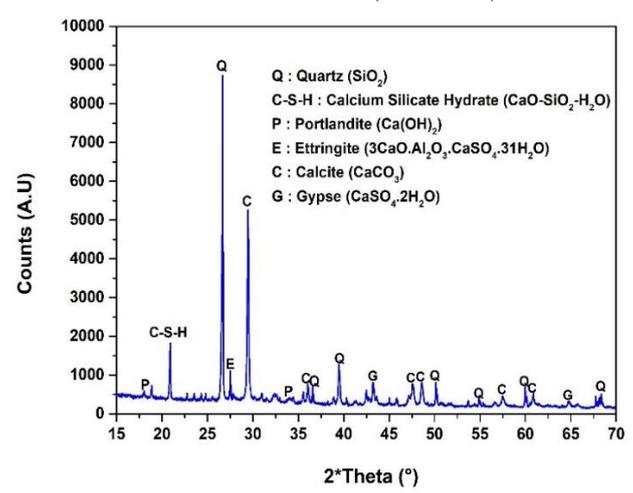
BHPFM11 (L/d = 46)



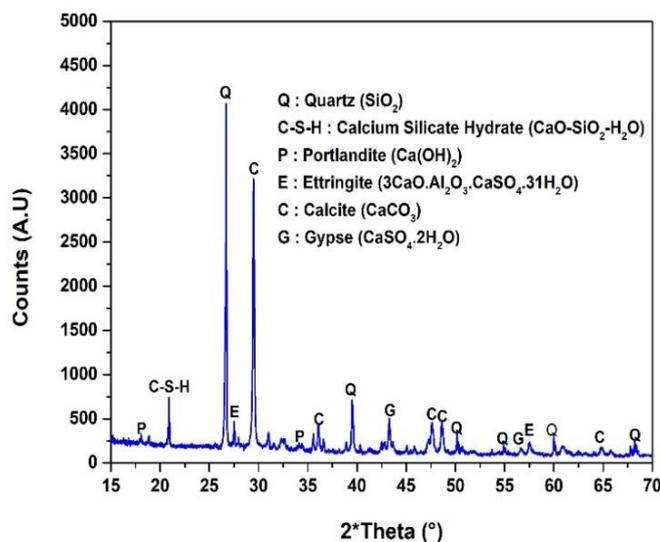
BHPFM2 (L/d = 53)



BHPFM14 (L/d = 63)



BHPFM4 (L/d = 73)



BHPFM12 (L/d = 80)

Figure 3. 10 Analyse par diffraction des rayons X (DRX) du BHPFM étudié.

### 3.2.7 Propriétés thermiques

#### 3.2.6.1 Évolution de la température

Il convient de noter que les profils de température commencent à s'établir à partir de la température initiale jusqu'à atteindre leurs valeurs maximales, après quoi ils restent stables pour le reste de la durée. Les caractéristiques de transfert de chaleur des matériaux poreux sont influencées par divers facteurs, notamment la composition, la forme, la taille et la microstructure des particules présentes dans le matériau, ainsi que l'arrangement et la structure de ses pores. En ce qui touche les matériaux de construction, différentes configurations peuvent être utilisées pour atteindre des exigences de performance spécifiques. Certaines propriétés, telles que la densité et la composition, peuvent être facilement modifiées pour répondre au résultat souhaité. En revanche, certaines propriétés, comme la taille des micro-pores et les propriétés minérales inhérentes qui ne peuvent pas être facilement modifiées [169,170].

Pendant la période initiale de 0 à 130 minutes, une augmentation progressive des températures a été observée (appelée régime transitoire). Cependant, une fois cette période écoulée, les températures ont atteint un niveau constant, indiquant l'établissement d'un régime permanent. Les variations observées parmi les différentes températures peuvent être attribuées à la distribution des températures sur la surface chauffée [171].

Selon les conclusions de Khaliq et Kodur [14], on a observé que l'augmentation de température au centre de l'échantillon de béton était plus lente par rapport à la surface et à la température du four. Ce comportement

peut être attribué à la faible conductivité thermique du béton, ce qui indique sa capacité limitée à conduire la chaleur. Par conséquent, la chaleur met plus de temps à se propager vers le centre de l'échantillon, ce qui entraîne une augmentation de température plus lente dans cette région particulière.

Les figures 3.10 et 3.12 illustrent l'évolution de la température en fonction du temps pour tous les échantillons analysés aux trois stations désignées (ST1, ST2, ST3) en orientation horizontale. Les résultats fournissent des preuves convaincantes que l'ajout de fibres d'acier à la composition du béton réduit considérablement ses propriétés d'isolation thermique. Cela peut être attribué à la conductivité thermique relativement plus élevée des fibres d'acier par rapport aux autres composants. L'incorporation de fibres d'acier établit un réseau bien connecté de voies de conduction au sein du béton, facilitant un transfert de chaleur amélioré. Par conséquent, la conductivité thermique effective du matériau augmente, ce qui se traduit par une diminution du niveau d'isolation thermique pendant toute la durée de l'expérience [169] [172].

L'effet du rapport longueur-diamètre sur l'isolation thermique en orientation verticale est clairement illustré dans les figures 3.11 et 3.13. On peut voir à partir de ces figures que la conductivité thermique croît à mesure que le rapport  $L/d$  augmente aux trois stations désignées. À mesure que le rapport longueur-diamètre des fibres augmente, la longueur des fibres par rapport à leur diamètre devient plus grande. Cette forme allongée permet aux fibres de créer des trajets plus longs pour le transfert de chaleur à l'intérieur du béton. Par conséquent, le transfert de chaleur à travers ces trajets devient plus obstrué, ce qui se traduit par une diminution de l'isolation thermique [173,174].

L'impact de la géométrie des fibres sur les propriétés thermiques effectives peut être largement sous-estimé dans des conditions extrêmes en raison de l'insensibilité du rapport longueur-diamètre. Plus précisément, lorsque le rapport longueur-diamètre des inclusions de fibres est exceptionnellement élevé, l'évaluation précise de leur influence sur les propriétés thermiques pourrait ne pas être correctement capturée [16]. Des résultats similaires ont été observés par plusieurs auteurs [175,176].

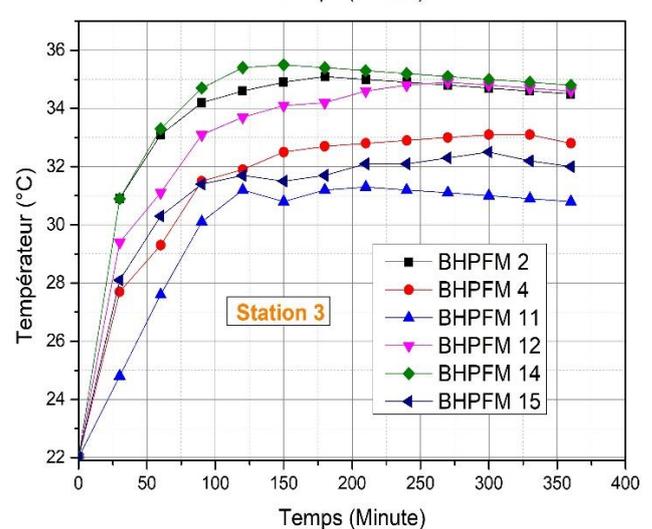
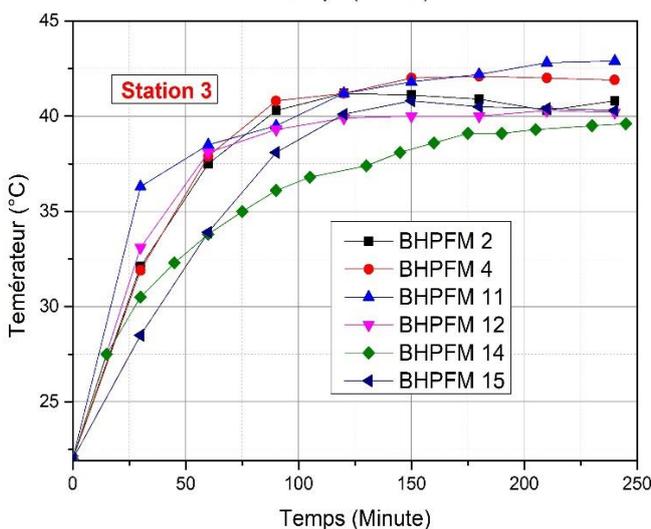
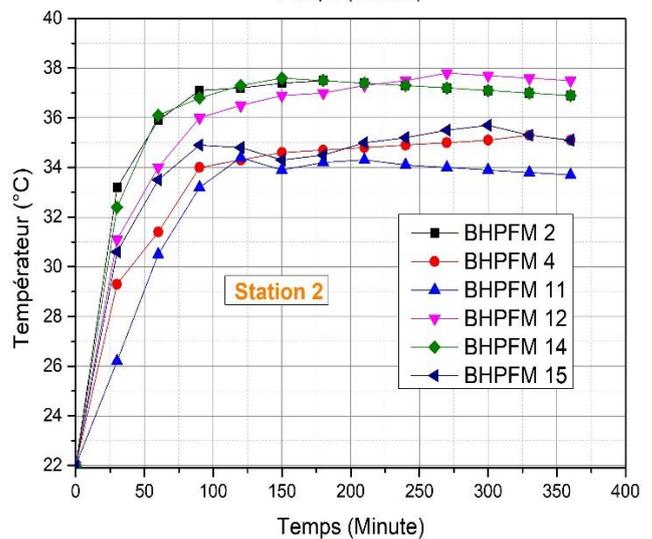
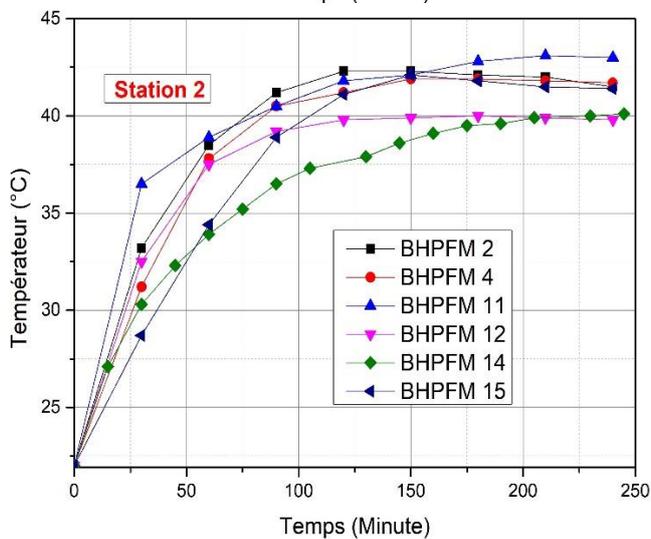
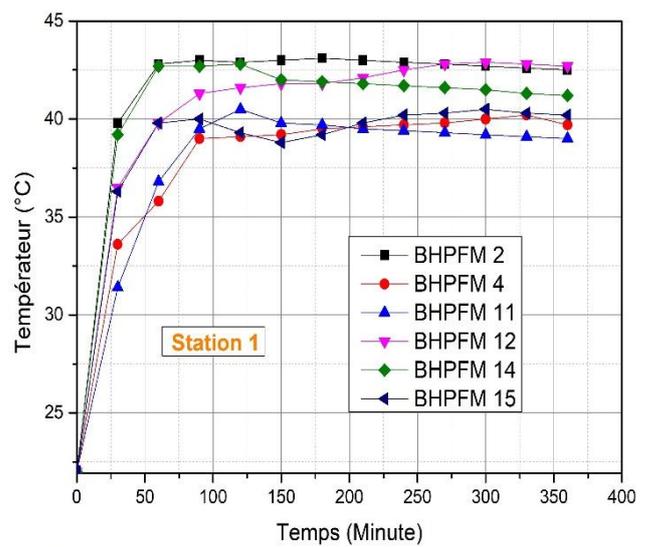
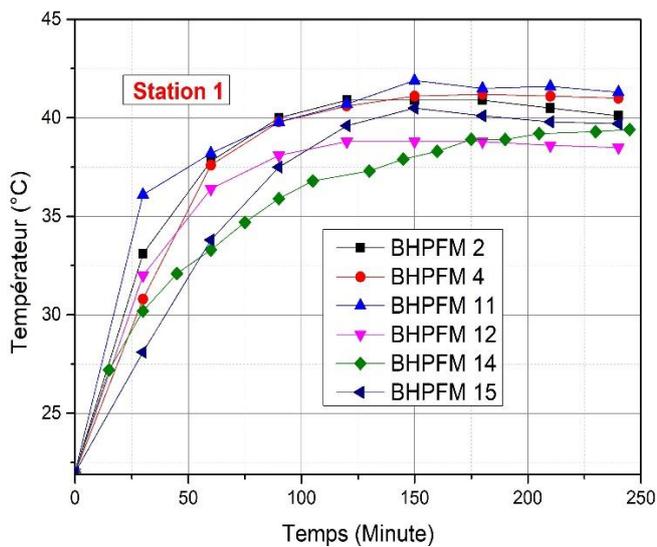


Figure 3. 11 Température imposée ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ) en fonction du temps (minutes) en orientation horizontale

Figure 3. 12 Température imposée ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ) en fonction du temps (minutes) en orientation verticale

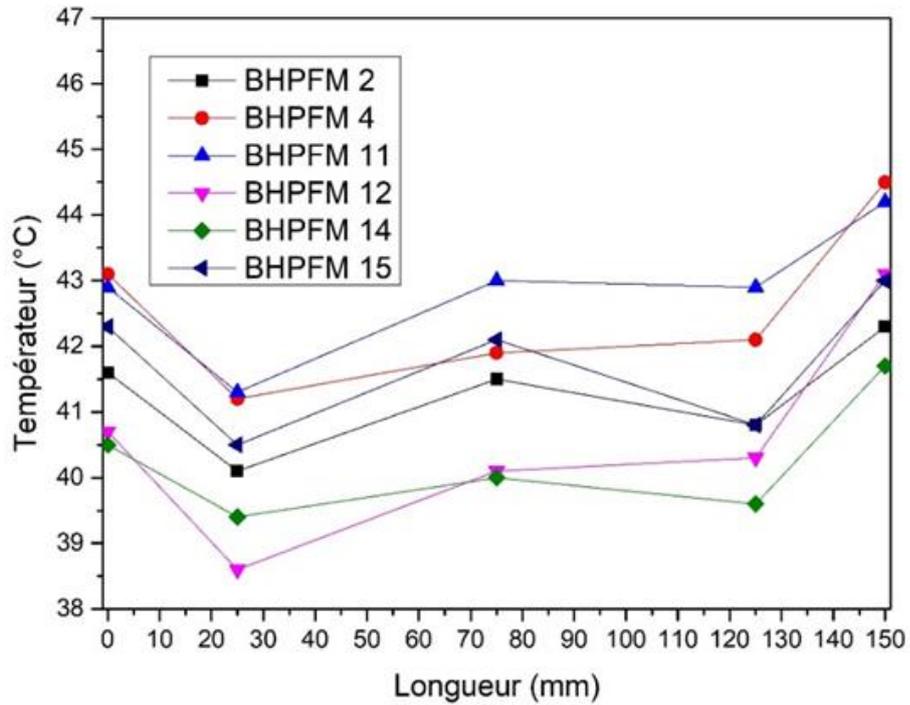


Figure 3. 13 Température horizontale imposée ( $T= 50^{\circ}\text{C}$ ) en fonction de la longueur (mm).

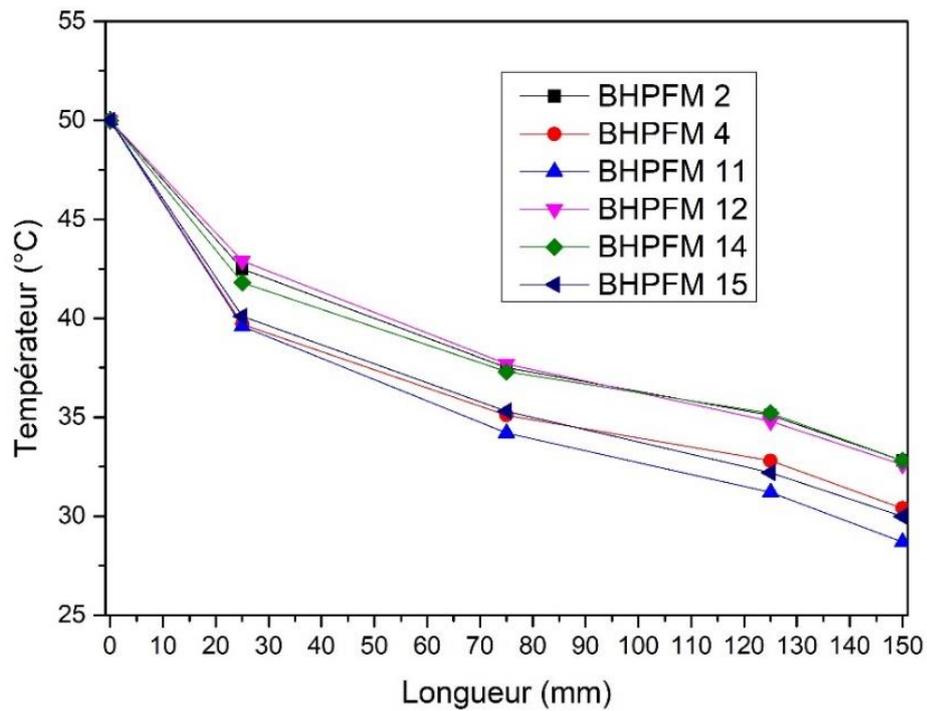


Figure 3. 14 Température verticale imposée ( $T= 50^{\circ}\text{C}$ ) en fonction de la longueur (mm).

### 3.3 Conclusion

L'objectif de cette étude expérimentale était d'évaluer le comportement physico-mécanique du béton fibré à haute performance (BHPFM) en développant des modèles de conception d'enrobés incorporant des fibres de câble recyclées dans les mélanges. L'analyse a pris en compte trois paramètres de variation : les rapports eau/liant, le rapport longueur/diamètre ( $L/d$ ) et le dosage en fibres. Des modèles mathématiques ont été développés pour prédire les propriétés du BHPFM dans ses états frais et durci. Sur la base des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette recherche :

1. La valeur d'affaissement la plus élevée a été obtenue en utilisant un rapport  $L/d$  de 63, un rapport  $E/L$  d'environ 0,28 et un dosage en fibres d'environ 22 kg/ m<sup>3</sup>. D'autre part, les valeurs d'affaissement les plus faibles ont été observées lorsque le rapport eau/liant ( $E/L$ ) et le dosage en fibres étaient à leurs niveaux maximaux.
2. En utilisant un rapport  $L/d$  d'environ 70, un rapport  $E/L$  d'environ 0,28 et un dosage en fibres maximale de 29 kg/ m<sup>3</sup>, des valeurs de résistance à la compression significativement élevées ont été obtenues.
3. L'obtention d'une résistance à la flexion élevée dépendait de la maximisation à la fois de dosage en fibres et du rapport  $L/d$ , quelles que soient les variations de  $E/L$ . A l'inverse, les valeurs les plus faibles de résistance à la flexion ont été observées lorsque le dosage en fibres était faible et le rapport  $E/L$  élevé.
4. Des valeurs de résistance à la traction fendue plus élevées, atteignant jusqu'à 7 MPa, ont été obtenues en augmentant à la fois le rapport  $L/d$  et le dosage en fibres, tout en maintenant un faible rapport  $E/L$ . D'autre part, les valeurs de résistance à la traction fendue les plus faibles ont été observées lorsque le rapport  $E/L$  était élevé et que le dosage en fibres et le rapport  $L/d$  étaient à leurs valeurs minimales.
5. Les mélanges BHPFM avec un rapport  $L/d$  d'environ 65, un dosage en fibres d'environ 25 kg/ m<sup>3</sup> et un rapport  $E/L$  compris entre 0,28 et 0,29 présentent une absorption d'eau réduite par rapport aux autres mélanges. À l'inverse, les mélanges à faible dosage en fibres et à faible rapport  $L/d$  présentent une absorption d'eau considérablement plus élevée.
6. L'implication significative des faibles valeurs de pourcentage d'erreur relative absolue révèle que les mesures expérimentales présentent une erreur relative absolue inférieure à 6 % et un coefficient de corrélation supérieur à  $R^2 = 94$  %. Cette découverte indique que le modèle de la méthodologie de surface de réponse a prédit avec exactitude et précision les réponses souhaitées.
7. Les images de microscopie électronique à balayage (MEB) fournissent des preuves convaincantes de l'excellente liaison entre la matrice cimentaire

et les fibres recyclées avec un rapport d'aspect ( $L/d$ ) de 63. Cette connexion interfaciale robuste améliore la performance globale et la durabilité de BHPFM.

8. L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a démontré son utilité pour analyser les résultats et identifier les composés minéraux présents dans les échantillons. En examinant les diagrammes de diffraction et les intensités des pics, des informations précieuses peuvent être obtenues sur la composition et la structure cristalline des matériaux.
9. L'augmentation du rapport d'aspect aux trois stations désignées entraîne une élévation de la conductivité thermique. À mesure que le rapport d'aspect des fibres augmente, leur longueur par rapport à leur diamètre augmente également. Cette configuration allongée permet aux fibres de créer des chemins de transfert de chaleur plus étendus au sein du béton.
10. Les résultats fournissent des preuves convaincantes que l'ajout de fibres d'acier à la composition du béton réduit significativement ses propriétés d'isolation thermique. Ceci peut être attribué à la conductivité thermique relativement plus élevée des fibres d'acier par rapport aux autres composants.

En conclusion, l'analyse du diagramme de vue en rampe souligne de manière concluante comment les niveaux optimaux du rapport eau/liant ( $E/L$ ) à 0,28, du rapport longueur/diamètre des fibres ( $L/d$ ) à 63, et du dosage en fibres ( $25 \text{ kg/m}^3$ ) influent de manière significative sur divers paramètres clés, tels que l'affaissement, la résistance à la compression et à la flexion, la résistance à la traction, ainsi que l'absorption d'eau. Ces observations mettent en évidence l'importance cruciale de ces paramètres dans l'optimisation des performances du béton étudié.

---

## Conclusion générale

---

# Conclusion générale

Cette étude approfondie a permis de mettre en lumière une série de découvertes significatives concernant les propriétés mécaniques et thermiques du béton à haute performance renforcé par des fibres métalliques recyclées. Après avoir examiné les résultats et les observations obtenus au cours de cette étude, nous pouvons en tirer les conclusions suivantes :

1. L'application de la méthodologie de surface de réponse a prouvé sa capacité prédictive dans la détermination des différentes propriétés de BHPFM à savoir l'affaissement, la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la résistance à la traction fendue et l'absorption d'eau. Cette approche réduit considérablement le temps et les efforts requis pour les tests de laboratoire répétitifs.
2. Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) montrent l'efficacité des modèles générés pour capturer la relation entre les variables indépendantes et les réponses correspondantes.
3. L'analyse de la distribution de probabilité des données expérimentales confirme la précision des modèles développés dans la prédiction des propriétés physico-mécaniques des bétons fibrés à haute performance en fonction des facteurs sélectionnés.
4. La maniabilité du BHPFM a montré une sensibilité inférieure au rapport L/d par rapport à l'influence significative du dosage en fibres et du rapport eau/liant (E/L).
5. L'optimisation du rapport E/L de (0,28), du rapport d'aspect L/d de (63) et de la teneur en FC ( $25 \text{ kg/ m}^3$ ) ont un impact significatif sur les réponses souhaitées, telles que l'affaissement, la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la résistance à la traction fendue et l'absorption d'eau.
6. Les résultats fournissent des preuves convaincantes que l'inclusion de fibres d'acier dans le mélange de béton entraîne une réduction notable de ses propriétés d'isolation thermique.
7. La conductivité thermique du béton augmente avec le rapport L/d en raison du diamètre plus grand et de la forme allongée des fibres, ce qui permet la création de trajets plus longs pour le transfert de chaleur.
8. L'incorporation de fils de câble en tant que fibres dans le béton constitue une méthode idéale et une solution supplémentaire pour améliorer les propriétés du béton à la fois à l'état frais et durci.
9. L'utilisation de fibres d'acier issues de déchets de câbles dans le béton présente des avantages tels que la réduction des déchets et la protection de l'environnement, tout en contribuant à la réduction de la consommation d'énergie.

# Recommandations et Perspectives

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse se sont principalement concentrés sur l'exploration des effets de l'incorporation de fibres métalliques recyclées issues de déchets de câbles torsadés sur les propriétés du béton à haute performance, qu'elles soient liées à son état frais, physico-mécanique ou thermique. Toutefois, il existe d'autres axes de recherche à explorer en profondeur. Par conséquent, pour orienter les futures études, nous émettons les recommandations et perspectives suivantes :

1. Il serait intéressant d'explorer davantage l'utilisation d'autres types de fibres recyclées ou de déchets industriels pour renforcer le béton à haute performance. Cela permettrait de diversifier les matériaux de renforcement tout en réduisant les déchets.
2. Une recherche plus approfondie sur l'impact des fibres métalliques recyclées sur la conductivité thermique du béton pourrait être entreprise. Cela pourrait inclure l'examen de différentes longueurs et formes de fibres pour déterminer leur influence sur les propriétés thermiques du matériau.
3. L'impact à long terme de l'utilisation de fibres métalliques recyclées sur la durabilité du béton à haute performance mérite une attention particulière. Des études sur la résistance à la corrosion des fibres et sur la durabilité du matériau dans des conditions environnementales variées pourraient être entreprises.
4. Il serait pertinent de réaliser des analyses de cycle de vie pour évaluer l'impact environnemental global de l'utilisation de fibres métalliques recyclées dans le béton, y compris la réduction des émissions de carbone associée à la production de fibres neuves.
5. Il serait avisé d'approfondir l'évaluation de la stabilité et de la durabilité des fibres recyclées au sein des Bétons à Haute Performance (BHP).

---

## Références bibliographiques

---

## Références bibliographiques

- [1] K.M. Liew, A. Akbar, The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.* 232 (2020) 117232. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117232>.
- [2] G. Centonze, M. Leone, M.A. Aiello, Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 46–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.088>.
- [3] T.F. Awolusi, L.O. Oke, O.O. Akinkurolere, D.P. Ubani, R.T. Bamisaye, O.G. Aluko, The Application of Response Surface Methodology in Understanding the Compressive Strength and Water Absorption Capacity of Sandcrete Blocks, *Silicon.* 13 (2021) 4123–4132. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00701-0>.
- [4] M. Fakoor, M. Nematzadeh, Evaluation of post-fire pull-out behavior of steel rebars in high-strength concrete containing waste PET and steel fibers: Experimental and theoretical study, *Constr. Build. Mater.* 299 (2021) 123917.
- [5] S. As'ad, P. Gunawan, M.S. Alaydrus, Fresh state behavior of self compacting concrete containing waste material fibres, *Procedia Eng.* 14 (2011) 797–804.
- [6] F. Bayramov, C. Taşdemir, M.A. Taşdemir, Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method, *Cem. Concr. Compos.* 26 (2004) 665–675. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00161-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00161-6).
- [7] K. Holschemacher, T. Mueller, Y. Ribakov, Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete, *Mater. Des.* 31 (2010) 2604–2615. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.025>.
- [8] Ş. Yazıcı, G. İnan, V. Tabak, Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1250–1253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025>.
- [9] A. Balea, E. Fuente, M.C. Monte, Á. Blanco, C. Negro, Fiber reinforced cement based composites, in: *Fiber Reinf. Compos.*, Elsevier, 2021: pp. 597–648.
- [10] B. Nagy, S.G. Nehme, D. Szagri, Thermal properties and modeling of fiber reinforced concretes, *Energy Procedia.* 78 (2015) 2742–2747.
- [11] M.K. Howlader, M.H. Rashid, D. Mallick, T. Haque, Effects of aggregate types on thermal properties of concrete, *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 7 (2012)

- 900–906.
- [12] M. Elsayed, B.A. Tayeh, M.A. Elmaaty, Y. Aldahshoory, Behaviour of RC columns strengthened with Ultra-High Performance Fiber Reinforced concrete (UHPFRC) under eccentric loading, *J. Build. Eng.* 47 (2022) 103857. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103857>.
- [13] A. Said, M. Elsayed, A.A. El-Azim, F. Althoey, B.A. Tayeh, Using ultra-high performance fiber reinforced concrete in improvement shear strength of reinforced concrete beams, *Case Stud. Constr. Mater.* 16 (2022) e01009. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01009>.
- [14] W. Khaliq, V. Kodur, Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 1112–1122. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.012>.
- [15] H. Li, X. Hao, Q. Qiao, B. Zhang, H. Li, Thermal properties of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete at high temperature, *J. Mater. Civ. Eng.* 32 (2020) 4020022. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.00030](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.00030).
- [16] T. Zhang, Y. Zhang, H. Zhu, Z. Yan, Characterizing the thermal properties of hybrid polypropylene-steel fiber reinforced concrete under heat exposure: Insights into fiber geometry and orientation distribution, *Compos. Struct.* 275 (2021) 114457. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114457>.
- [17] A. de la Rosa, G. Ruiz, E. Poveda, Study of the compression behavior of steel-fiber reinforced concrete by means of the response surface methodology, *Appl. Sci.* 9 (2019) 5330.
- [18] A. Kostrzanowska-Siedlarz, J. Gołaszewski, Statistical Models Supporting the High-Performance Self-Compacting Concrete (HPSCC) Design Process for High Strength, *Materials (Basel)*. 15 (2022) 690.
- [19] J. Resplendino, F. Toulemonde, *Designing and Building with UHPFRC*, John Wiley & Sons, 2013.
- [20] N.R. Baddoo, Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities, *J. Constr. Steel Res.* 64 (2008) 1199–1206.
- [21] A.O. Abiodun, O.M. Ayoola, T.O. Olajire, O.E. Oluwajire, O.J. Abidakun, A Detailed Comparison of Various Steel Types-Stainless Steel, Structural Steel and Aluminum Steel, (2020).
- [22] P.-C. Aïtcin, *Bétons haute performance*, 2001.
- [23] P.C. Aitcin, P. Laplante, C. Bedard, Development and experimental use of a90 MPa (13,000 psi) field concrete, *Am. Concr. Institute, ACI Spec. Publ. SP-087 (1985)* 51–70.

- [24] C. Horan, M. Genedy, M. Juenger, E. van Oort, Fly Ash-Based Geopolymers as Lower Carbon Footprint Alternatives to Portland Cement for Well Cementing Applications, *Energies*. 15 (2022) 8819.
- [25] X. Liu, S.D. Nair, K.L. Aughenbaugh, M.C.G. Juenger, E. van Oort, Improving the rheological properties of alkali-activated geopolymers using non-aqueous fluids for well cementing and lost circulation control purposes, *J. Pet. Sci. Eng.* 195 (2020) 107555.
- [26] I.J. Otaraku, F.O. Chukwuma, O.F. Joel, J. V Anaele, Effect of locally synthesized cement retarder on the setting time and rheological properties of cement slurry, *NSChE J.* 34 (2019) 1–9.
- [27] E.M.J. Berodier, Impact of the supplementary cementitious materials on the kinetics and microstructural development of cement hydration, EPFL, 2015.
- [28] N.F. Norme, EN 197-1, Ciment-Part1 Compos. Spécifications Critères Conform. Des Ciments Courants. (2012).
- [29] I.N. Borisov, A.A. Grebeniuk, V.I. Dyukareva, Combined cements with non-shrinking properties using sulfoferrite clinker, in: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, IOP Publishing, 2018: p. 12011.
- [30] İ. Soner, Utilization of fluidized bed combustion ashes as raw material in the production of a special cement, (2009).
- [31] G.O. AREMU, THERMAL TREATMENT OF PHOSPHOGYPSUM AS A SET RETARDER FOR PORTLAND CEMENT PRODUCTION, (2021).
- [32] F. Cardarelli, Cements, concrete, building stones and construction materials, *Mater. Handb. A Concise Deskt. Ref.* (2008) 967–981.
- [33] J. Sánchez del Río Sáez, A. Páez Pavón, J.M. Torralba Castelló, D. Garbiec, J.S. Moya, S. López-Esteban, C. Pecharromán, Portland cement clinkers turned into garnets by spark plasma sintering, (2022).
- [34] J. Sánchez del Río, A. Páez-Pavón, J.M. Torralba, D. Garbiec, J.S. Moya, S. López-Esteban, C. Pecharromán, Portland cement clinkers turned into garnets by spark plasma sintering, (2023).
- [35] S. Liu, W. Ma, Calcium-bearing minerals transformation during underground coal gasification, *Minerals*. 9 (2019) 708.
- [36] C. Vernet, Mécanismes chimiques d'interactions ciment-adjuvants, CTG Spa Guerville Service Physico-Chimie du Ciment, Janvier, 1995.
- [37] M. Karakouzian, V. Farhangi, M.R. Farani, A. Joshaghani, M. Zadehmohamad, M. Ahmadzadeh, Mechanical characteristics of cement paste in the presence of carbon nanotubes and silica oxide nanoparticles: An experimental study, *Materials (Basel)*. 14 (2021) 1347.

- [38] L. Li, Y. Wang, M. An, P. Yu, X. Hou, The Influence of Rehydration on the Properties of Portland Cement-Based Materials with Low Water/Binder Ratios: A Review of Existing Research, *Materials (Basel)*. 16 (2023) 970.
- [39] M.M.L. Pereira, A.L.R. de Souza, V.M.S. Capuzzo, R. de M. Lameiras, Effect of the water/binder ratio on the hydration process of Portland cement pastes with silica fume and metakaolin, *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.* 15 (2021).
- [40] C. Shi, D. Wang, L. Wu, Z. Wu, The hydration and microstructure of ultra high-strength concrete with cement–silica fume–slag binder, *Cem. Concr. Compos.* 61 (2015) 44–52.
- [41] F. De Larrard, *Structures granulaires et formulation des bétons*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2000.
- [42] W. Ladaoui, *Etude expérimentale du comportement Thermo-Hydro-Mécanique à long terme des BHP destinés aux ouvrages de stockage des déchets radioactifs*, PhD Thesis, Toulouse. 3 (2010) 282. <http://thesesups.ups-tlse.fr/1160/>.
- [43] R. Zaitri, *Effet de l’ajout de calcaire et de sable de dune broyés sur le comportement physico-mécaniques et sur la durabilité des bétons à hautes performances.*, (2016).
- [44] S. Grzeszczyk, L. Kucharska, Rheological properties of fresh cement pastes and clinker reactivity, *Rheol. Acta.* 26 (1987) 566–569. <https://doi.org/10.1007/BF01333741>.
- [45] P.-C. Aïtcin, *High performance concrete*, CRC press, 1998.
- [46] L. Stone, *Interaction between clinker, calcium sulphate and superplasticisers in cement-based mixes*, (2020).
- [47] N.E. Kamfjord, *Mass and Energy Balances of the Silicon Process:-Improved Emission Standards*, (2012).
- [48] M. Mazloom, A.A. Ramezani pour, J.J. Brooks, Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, *Cem. Concr. Compos.* 26 (2004) 347–357.
- [49] K. Manai, *Etude de l’effet d’ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants*, Université de Sherbrooke, 1995. [http://usherbrooke.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwnV1LT4NAEJ6YntRDfTW-muytF2l5LFBOHqNiVc9eGoWdokm24csJL34350pbGwULwYSMjw2EJaP2Zn5vgUI\\_LHr\\_MCEUInQV0nkTz3liSLPVCgIKwNXRIMplGq4yi-v4ewpSe20p5OWtj22ILlDbrnOKWg-oXE4537s3m8-HJpFirKt7ZQaCMmeH3t](http://usherbrooke.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwnV1LT4NAEJ6YntRDfTW-muytF2l5LFBOHqNiVc9eGoWdokm24csJL34350pbGwULwYSMjw2EJaP2Zn5vgUI_LHr_MCEUInQV0nkTz3liSLPVCgIKwNXRIMplGq4yi-v4ewpSe20p5OWtj22ILlDbrnOKWg-oXE4537s3m8-HJpFirKt7ZQaCMmeH3t).
- [50] C. Bresciani, *Simulation numérique de l’hydratation et du développement*

- des propriétés physiques et mécaniques d'une pâte de ciment afin de sélectionner de nouveaux ajouts minéraux, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008.
- [51] G. Zhang, H. Yang, C. Ju, Y. Yang, Novel selection of environment-friendly cementitious materials for winter construction: Alkali-activated slag/Portland cement, *J. Clean. Prod.* 258 (2020) 120592.
- [52] C. Amouri, H. Houari, Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires, (2009).
- [53] R. Lakhal, D. Achoura, Elaboration des bétons à haute performances à base de laitier granulé, in: 1st Int. Conf. Sustain. Infrastructures Dev. Ctries. ENSET Oran, Oran, Alger., 2009.
- [54] H. sheng Shi, B. wan Xu, X. chen Zhou, Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1980–1985. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.021>.
- [55] R. Patel, K.M.A. Hossain, M. Shehata, N. Bouzoubaâ, M. Lachemi, Development of statistical models for mixture design of high-volume fly ash self-consolidating concrete, *ACI Mater. J.* 101 (2004) 294–302. <https://doi.org/10.14359/13363>.
- [56] M. Mouli, Etude des propriétés physiques et mécaniques de la pouzzolane en vue de la fabrication des bétons légers et des bétons à haute performance, Thèse de doctorat d'état en Génie Civil USTO, 2006.
- [57] R. Chaid, others, (2009) R, in: R.J. Chaid, A. Boukhaled, : A.T. (Eds.), Endommagement, Déformations Microstruct. Des BHP Pouzzolane, SBEIDCO- 1st International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) --, 2009.
- [58] R. Flatt, I. Schober, Superplasticizers and the rheology of concrete, in: *Underst. Rheol. Concr.*, Elsevier, 2012: pp. 144–208.
- [59] Y. Fritih, Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé, (2009).
- [60] Z.E.A. Rahmouni, N. Tebbal, Mechanical Behavior of High-Performance Concrete under Thermal Effect, *Compressive Strength Concr.* 105 (2020).
- [61] A. Kaïkea, D. Achoura, F. Duplan, L. Rizzuti, Effect of mineral admixtures and steel fiber volume contents on the behavior of high performance fiber reinforced concrete, *Mater. Des.* 63 (2014) 493–499.
- [62] S. DJEBALI, Caractérisation Des Elements De Structures En Beton De Fibres Metalliques, Tizi Ouzou, 2013.
- [63] C. Johnston, 14 proportioning, mixing and placement of fibre-reinforced

- cements and concretes, *Prod Methods Work. Concr.* 32 (2004) 155.
- [64] E. Boghossian, L.D. Wegner, Use of flax fibres to reduce plastic shrinkage cracking in concrete, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 929–937. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.09.003>.
- [65] T. Ali-Boucetta, Caractérisation d'un Béton Autoplaçant avec Addition de Laitier Cristallisé et Renforcé par des Fibres de Polypropylène et de Diss = Characterization of a Self-Compacting Concrete with Addition of Crystallized Slag and Reinforced with Polypropylene and Di, *Synthèse Rev. Des Sci. La Technol.* 29 (2014) 100–110. <https://doi.org/10.12816/0027886>.
- [66] I. Shah, J. Li, S. Yang, Y. Zhang, A. Anwar, Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Concrete, *J. Renew. Mater.* 10 (2022) 1307–1320. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017513>.
- [67] C. Manniello, G. Cillis, D. Statuto, others, (2022) Blocs de béton renforcés de fibres naturelles d'Arundo donax avec différents rapports d'aspect pour une application en bioarchitecture, *Appl Sci.* 12 (2022) 2167.
- [68] B. Cotterell, Y.W. Mai, *Fracture Mechanics of Cementitious Materials*, CRC Press, 1995. <https://doi.org/10.1201/9781482269338>.
- [69] B.E.N.M. SABAH, Analyse expérimentale du comportement des bétons à hautes performances légers (BHPL)., (2018).
- [70] G. Yang, M. Park, S.-J. Park, Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites: A review, *Compos. Commun.* 14 (2019) 34–42.
- [71] D.-Y. Yoo, N. Banthia, Impact resistance of fiber-reinforced concrete—A review, *Cem. Concr. Compos.* 104 (2019) 103389.
- [72] S. Prashanth, K.M. Subbaya, K. Nithin, S. Sachhidananda, Fiber reinforced composites-a review, *J. Mater. Sci. Eng.* 6 (2017) 2–6.
- [73] T. Yu, J.G. Teng, Y.L. Wong, S.L. Dong, Finite element modeling of confined concrete-II: Plastic-damage model, *Eng. Struct.* 32 (2010) 680–691.
- [74] N. Dominguez Ramirez, Etude de la liaison acier-béton: de la modélisation du phénomène à la formulation d'un élément fini enrichi" béton armé", (2005).
- [75] M. Alkersh, A.M. Hilal, PARTIAL CONFINEMENT OF EXTERIOR REINFORCED CONCRETE COLUMNS, *J. Al-Azhar Univ. Eng. Sect.* 16 (2021) 1–10.
- [76] A. Hemmati, S. Mojaddad, Effect of steel confinement on behavior of reinforced concrete frame, *J. Rehabil. Civ. Eng.* 7 (2019) 1–14.
- [77] Z.K. Abbas, Roller compacted concrete: Literature review, *J. Eng.* 28 (2022)

- 65–83.
- [78] S. Al Baghdady, L. Khan, Designing Roller compacted concrete (RCC) dams, (2018).
- [79] U.E. Anyaoha, Applied computational analyses for concrete compressive strength performance assessment, (2019).
- [80] S. Ben Messaoud, New approach for the mix design of high-strength concretes valorization of local aggregates, *World J. Eng.* (2023).
- [81] A.M. Mohamed, B.A. Tayeh, Y.I. Abu Aisheh, M.N.A. Salih, Exploring the performance of steel fiber reinforced lightweight concrete: A case study review, *Case Stud. Constr. Mater.* 18 (2023).  
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01968>.
- [82] S.P. Yap, K.R. Khaw, U.J. Alengaram, M.Z. Jumaat, Effect of fibre aspect ratio on the torsional behaviour of steel fibre-reinforced normal weight concrete and lightweight concrete, *Eng. Struct.* 101 (2015) 24–33.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.007>.
- [83] T.F. Awolusi, O.L. Oke, O.O. Akinkurolere, A.O. Sojobi, Application of response surface methodology: Predicting and optimizing the properties of concrete containing steel fibre extracted from waste tires with limestone powder as filler, *Case Stud. Constr. Mater.* 10 (2019) e00212.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00212>.
- [84] P. Zhang, C.H. Liu, Q.F. Li, T.H. Zhang, P. Wang, Fracture properties of steel fibre reinforced high-performance concrete containing nano-SiO<sub>2</sub> and fly ash, *Curr. Sci.* 106 (2014) 980–987.
- [85] V. Afroughsabet, T. Ozbakkaloglu, Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 73–82.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051>.
- [86] A. Karimi, M. Nematzadeh, Axial compressive performance of steel tube columns filled with steel fiber-reinforced high strength concrete containing tire aggregate after exposure to high temperatures, *Eng. Struct.* 219 (2020) 8. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110608>.
- [87] S. Iqbal, A. Ali, K. Holschemacher, T.A. Bier, Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC), *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 325–333.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.112>.
- [88] P. Shafigh, H. Mahmud, M.Z. Jumaat, Effect of steel fiber on the mechanical properties of oil palm shell lightweight concrete, *Mater. Des.* 32 (2011) 3926–3932.
- [89] B. Ali, E. Yilmaz, A.R. Tahir, F. Gamaoun, M.H. El Ouni, S.M. Murtaza Rizvi, The Durability of High-Strength Concrete Containing Waste Tire

- Steel Fiber and Coal Fly Ash, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2021 (2021) 1–19.  
<https://doi.org/10.1155/2021/7329685>.
- [90] M. Zhao, M. Zhao, M. Chen, J. Li, D. Law, An experimental study on strength and toughness of steel fiber reinforced expanded-shale lightweight concrete, *Constr. Build. Mater.* 183 (2018) 493–501.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.178>.
- [91] J.H. Haido, A.A. Abdul-Razzak, M.M. Al-Tayeb, B.H. Abu Bakar, S.T. Yousif, B.A. Tayeh, Dynamic response of reinforced concrete members incorporating steel fibers with different aspect ratios, *Adv. Concr. Constr.* 11 (2021) 89–98. <https://doi.org/10.12989/acc.2021.11.2.089>.
- [92] M.K. Yew, H. Bin Mahmud, P. Shafigh, B.C. Ang, M.C. Yew, Effects of polypropylene twisted bundle fibers on the mechanical properties of high-strength oil palm shell lightweight concrete, *Mater. Struct. Constr.* 49 (2016) 1221–1233. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0572-z>.
- [93] E. Garcia-Taengua, J.R. Martí-Vargas, P. Serna, Residual Flexural Strength of SFRC: A Multivariate Perspective, in: *RILEM Bookseries*, Springer, 2022: pp. 232–243. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-83719-8\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-83719-8_21).
- [94] K.Y. Shin, S.B. Kim, J.H. Kim, M. Chung, P.S. Jung, Thermo-physical properties and transient heat transfer of concrete at elevated temperatures, *Nucl. Eng. Des.* 212 (2002) 233–241. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(01\)00487-3](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(01)00487-3).
- [95] V.K.R. Kodur, M.A. Sultan, Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 15 (2003) 101–107.
- [96] W.H. Khushefati, R. Demirboğa, K.Z. Farhan, Assessment of factors impacting thermal conductivity of cementitious composites—A review, *Clean. Mater.* (2022) 100127.
- [97] A.İ. Çelik, Y.O. Özkılıç, Ö. Zeybek, N. Özdöner, B.A. Tayeh, Performance assessment of fiber-reinforced concrete produced with waste lathe fibers, *Sustainability.* 14 (2022) 11817.
- [98] J. jun Li, C. jun Wan, J. gang Niu, L. feng Wu, Y. chao Wu, Investigation on flexural toughness evaluation method of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 131 (2017) 449–458.
- [99] J. Aegerter, H.-J. Kühn, H. Frenz, C. Weißmüller, EN ISO 6892-1:2009 Tensile Testing: Initial Experience from the Practical Implementation of the New Standard\*, *Mater. Test.* 53 (2011) 595–603.  
<https://doi.org/10.3139/120.110269>.
- [100] A. Dean, D. Voss, D. Draguljić, Design and Analysis of Experiments, (2017).  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-52250-0>.
- [101] J. Goupy, L. Creighton, Introduction aux plans d'expériences - 3ème édition - Livre+CD-Rom, Dunod, 2006.

- <https://books.google.dz/books?id=8m0sVxgfruUC>.
- [102] B.S. Mohammed, V.C. Khed, M.F. Nuruddin, Rubbercrete mixture optimization using response surface methodology, *J. Clean. Prod.* 171 (2018) 1605–1621.
- [103] G. Ren, X. Gao, H. Zhang, Utilization of hybrid sisal and steel fibers to improve elevated temperature resistance of ultra-high performance concrete, *Cem. Concr. Compos.* 130 (2022) 104555. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104555>.
- [104] E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio, RSM-based model to predict the performance of self-compacting UHPC reinforced with hybrid steel micro-fibers, *Constr. Build. Mater.* 66 (2014) 375–383.
- [105] Y. Gong, J. Song, S. Lin, J. Yang, Y. He, G. Tan, Design optimization of rubber-basalt fiber-modified concrete mix ratios based on a response surface method, *Appl. Sci.* 10 (2020) 6753.
- [106] B.W. Chong, R. Othman, R. Putra Jaya, M.R. Mohd Hasan, A.V. Sandu, M. Nabiałek, B. Jez, P. Pietrusiewicz, D. Kwiatkowski, P. Postawa, Design of experiment on concrete mechanical properties prediction: a critical review, *Materials (Basel)*. 14 (2021) 1866.
- [107] D.C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, John wiley & sons, 2017.
- [108] F. Dahmoune, H. Remini, S. Dairi, O. Aoun, K. Moussi, N. Bouaoudia-Madi, N. Adjeroud, N. Kadri, K. Lefsih, L. Boughani, Ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from *P. lentiscus* L. leaves: Comparative study of artificial neural network (ANN) versus degree of experiment for prediction ability of phenolic compounds recovery, *Ind. Crops Prod.* 77 (2015) 251–261.
- [109] C. Wang, L. Zhou, J. Ma, A. Shi, X. Li, L. Liu, Z. Zhang, D. Zhang, GB-RAR Deformation Information Estimation of High-Speed Railway Bridge in Consideration of the Effects of Colored Noise, *Appl. Sci.* 12 (2022) 10504.
- [110] M. Behnisch, H. Poglitsch, T. Krüger, Soil sealing and the complex bundle of influential factors: Germany as a case study, *ISPRS Int. J. Geo-Information.* 5 (2016) 132.
- [111] P. Guo, W. Meng, M. Xu, V.C. Li, Y. Bao, Predicting mechanical properties of high-performance fiber-reinforced cementitious composites by integrating micromechanics and machine learning, *Materials (Basel)*. 14 (2021) 3143.
- [112] M.B. Khan, A. Waqar, N. Bheel, N. Shafiq, N. Hamah Sor, D. Radu, O. Benjeddou, Optimization of Fresh and Mechanical Characteristics of Carbon Fiber-Reinforced Concrete Composites Using Response Surface Technique, *Buildings.* 13 (2023) 852.
- [113] G. Dreux, J. Festa, *Nouveau guide du béton et de ses constitutants*,

- Eyrolles, 1998.
- [114] P. Rossi, *Le développement industriel des Bétons de Fibres Métalliques: projet national BEFIM: conclusions et recommandations*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.
- [115] H. Hu, P. Papastergiou, H. Angelakopoulos, M. Guadagnini, K. Pilakoutas, Mechanical properties of SFRC using blended manufactured and recycled tyre steel fibres, *Constr. Build. Mater.* 163 (2018) 376–389.
- [116] J. Salmons, Doing qualitative research online, *Doing Qual. Res. Online.* (2021) 1–100.
- [117] B.S. EN, 12350-2. Testing fresh concrete, Slump-Test. London Br. Stand. Inst. (2009).
- [118] BSI, BS EN 12390-3: Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens, (2009).
- [119] A. UNE-EN, 12390-5. Testing Hardened Concrete—Part 5: Flexural Strength of Test Specimens, Asoc. Española Norm. Madrid, Spain. (2009).
- [120] E.N. CSN, 12390-6: Testing hardened concrete-Part 6: Tensile splitting strength of test specimens, Czech Repub. (2009).
- [121] C. ASTM, 642-06 Standard, Stand. Test Method Density, Absorption, Voids Hardened Concr. (2006).
- [122] A. Standard, Standard Specification for Infrared Thermometers for Intermittent Determination of Patient Temperature, E1965-98. (2016).
- [123] ASTM Volume 14.03: Sensory Evaluation; Temperature Measurement; Language Services And Products, (n.d.). <https://www.astm.org/astm-bos-14.03.html> (accessed June 30, 2023).
- [124] C. Astm, Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete, West Conshohocken ASTM. (2012).
- [125] M. Sahraoui, T. Bouziani, Effect of coarse aggregates and sand contents on workability and static stability of self-compacting concrete, *Adv. Concr. Constr.* 7 (2019) 97.
- [126] S.H. Dashatan, T. Azdast, S.R. Ahmadi, A. Bagheri, Friction stir spot welding of dissimilar polymethyl methacrylate and acrylonitrile butadiene styrene sheets, *Mater. Des.* 45 (2013) 135–141.
- [127] W. Hamla, D. Benamara, A. Noui, Statistical modeling of physical and mechanical responses of roller-compacted sand concrete made with ternary sand using the experimental design method, *Constr. Build. Mater.* 345 (2022) 128354.
- [128] R. Travincas, P. Bellei, I. Torres, I. Flores-Colen, G. Matias, D. Silveira, The Use of Fibreglass Mesh in the Experimental Characterisation of

- Applied Coating Mortars, Coatings. 12 (2022) 1091.
- [129] Y. Pan, J. Kang, S. Ichimaru, J.E. Bolander, Multi-field models of fiber reinforced concrete for structural applications, *Appl. Sci.* 11 (2020) 184.
- [130] L. Martinie, P. Rossi, N. Roussel, Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction, *Cem. Concr. Res.* 40 (2010) 226–234.
- [131] O.Y. Bayraktar, G. Kaplan, J. Shi, A. Benli, B. Bodur, M. Turkoglu, The effect of steel fiber aspect-ratio and content on the fresh, flexural, and mechanical performance of concrete made with recycled fine aggregate, *Constr. Build. Mater.* 368 (2023) 130497.
- [132] G.A. Pikus, Steel fiber concrete mixture workability, *Procedia Eng.* 150 (2016) 2119–2123.
- [133] Z. Wu, C. Shi, W. He, L. Wu, Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete, *Constr. Build. Mater.* 103 (2016) 8–14.
- [134] R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), *Cem. Concr. Res.* 56 (2014) 29–39.
- [135] M.Y. Yardimci, B. Baradan, M.A. Taşdemir, Effect of fine to coarse aggregate ratio on the rheology and fracture energy of steel fibre reinforced self-compacting concretes, *Sadhana.* 39 (2014) 1447–1469.
- [136] W. Dong, W. Li, Z. Tao, A comprehensive review on performance of cementitious and geopolymeric concretes with recycled waste glass as powder, sand or cullet, *Resour. Conserv. Recycl.* 172 (2021) 105664.
- [137] J.H. Su, Y.F. Cheng, N.J. Wu, Mixture Proportioning Design of Pervious Concrete Using the Paste Content Ratio Method (Aggregate Gradation 19mm~ 9.5 mm and 9.5 mm~ 4.75 mm), in: *Mater. Sci. Forum, Trans Tech Publ*, 2019: pp. 207–211.
- [138] Y. Kou, H. Jiang, L. Ren, E. Yilmaz, Y. Li, Rheological properties of cemented paste backfill with alkali-activated slag, *Minerals.* 10 (2020) 288.
- [139] B.H. Tekle, L. Hertwig, K. Holschemacher, Rheology of alkali-activated blended binder mixtures, *Materials (Basel).* 14 (2021) 5405.
- [140] M. Thiedeitz, I. Dressler, T. Kränkel, C. Gehlen, D. Lowke, Effect of pre-shear on agglomeration and rheological parameters of cement paste, *Materials (Basel).* 13 (2020) 2173.
- [141] Y. Ma, J. Bai, C. Shi, S. Sha, B. Zhou, Effect of PCEs with different structures on hydration and properties of cementitious materials with low water-to-binder ratio, *Cem. Concr. Res.* 142 (2021) 106343.

- [142] K.H. Khayat, W. Meng, K. Vallurupalli, L. Teng, Rheological properties of ultra-high-performance concrete—An overview, *Cem. Concr. Res.* 124 (2019) 105828.
- [143] S. Bhattacharjee, A.S. Basavaraj, A. V Rahul, M. Santhanam, R. Gettu, B. Panda, E. Schlangen, Y. Chen, O. Copuroglu, G. Ma, Sustainable materials for 3D concrete printing, *Cem. Concr. Compos.* 122 (2021) 104156.
- [144] R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC): Towards an efficient utilization of binders and fibres, *Constr. Build. Mater.* 79 (2015) 273–282.
- [145] P. Jagadesh, A. Juan-Valdés, M.I. Guerra-Romero, J.M. Morán-del Pozo, J. García-González, R. Martínez-García, Effect of design parameters on compressive and split tensile strength of self-compacting concrete with recycled aggregate: an overview, *Appl. Sci.* 11 (2021) 6028.
- [146] R. Sanjay, M.U. Aswath, S. Singh, An Experimental Study on Flexural Behaviour of Reinforced Geopolymer Concrete Beams with Recycled Aggregate in Bending, *Res. Gate.* 6 (2012).
- [147] K.H. Chachar, M. Oad, B.A. Memon, Z.A. Siyal, K.F. Siyal, Workability and Flexural Strength of Recycled Aggregate Concrete with Steel Fibers, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* 13 (2023) 11051–11057.
- [148] S. Kim, C. Park, Y. Kim, Effect of SIFRCCs with Varying Steel Fiber Volume Fractions on Flexural Behavior, *Appl. Sci.* 10 (2020) 2072.
- [149] B.Q.K. Al Harki, M.S. Al Jawahery, A.A. Abdulmawjoud, Hybrid Steel Fiber of Rigid Pavements: A 3D Finite Element and Parametric Analysis, *Coatings.* 12 (2022) 1478.
- [150] A. Simalti, A.P. Singh, Comparative study on performance of manufactured steel fiber and shredded tire recycled steel fiber reinforced self-consolidating concrete, *Constr. Build. Mater.* 266 (2021) 121102.
- [151] E. Arunakanthi, J.D.C. Kumar, Experimental studies on fiber reinforced concrete (FRC), *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 7 (2016) 329–336.
- [152] A. AHMEDIN, EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE EFFECTS OF MACRO STEEL FIBERS ON THE BEHAVIOR OF CONCRETE, (2019).
- [153] B. Miloud, Permeability and porosity characteristics of steel fiber reinforced concrete, (2005).
- [154] T. Rahmani, B. Kiani, F. Sami, B.N. Fard, Y. Farnam, M. Shekarchizadeh, Durability of glass, polypropylene and steel fiber reinforced concrete, in: *Proc. Int. Conf. Durab. Build. Mater. Components, Porto, Port., 2011: pp. 12–15.*
- [155] J.L. Pilkington, C. Preston, R.L. Gomes, Comparison of response surface

- methodology (RSM) and artificial neural networks (ANN) towards efficient extraction of artemisinin from *Artemisia annua*, *Ind. Crops Prod.* 58 (2014) 15–24.
- [156] M. Botis, L. Imre, M. Conțiu, Numerical Method of Increasing the Critical Buckling Load for Straight Beam-Type Elements with Variable Cross-Sections, *Appl. Sci.* 13 (2023) 1460.
- [157] B.S. Mohammed, V.C. Khed, M.S. Liew, Optimization of hybrid fibres in engineered cementitious composites, *Constr. Build. Mater.* 190 (2018) 24–37.
- [158] B. Adda, A. Belaadi, M. Boumaaza, M. Bouchak, Experimental investigation and optimization of delamination factors in the drilling of jute fiber-reinforced polymer biocomposites with multiple estimators, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 116 (2021) 2885–2907.
- [159] V.A. Yiga, M. Lubwama, S. Pagel, P.W. Olupot, J. Benz, C. Bonten, Optimization of tensile strength of PLA/clay/rice husk composites using Box-Behnken design, *Biomass Convers. Biorefinery.* (2021) 1–27.
- [160] W.C. Hong, B.S. Mohammed, I. Abdulkadir, M.S. Liew, Modeling and Optimizing the Effect of Palm Oil Fuel Ash on the Properties of Engineered Cementitious Composite, *Buildings.* 13 (2023) 628.
- [161] S. Khameneh Asl, A. Sadeghian, Strength and Toughness of Reinforced Concrete with Coated Steel Fibers, *Adv. Ceram. Prog.* 5 (2019) 9–14.
- [162] T.S. Al-Attar, A.A. Taha, Performance of high-volume fly ash self-compacting concrete exposed to external sulfate attack, in: *Proc. 6th Int. Conf. Durab. Concr. Struct. ICDCS, Leeds, UK, 2018*: pp. 18–20.
- [163] H. Bahmani, D. Mostofinejad, Microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC)—a review study, *J. Build. Eng.* 50 (2022) 104118.
- [164] S. Amri, M. Akchiche, A. Bennabi, R. Hamzaoui, Geotechnical and mineralogical properties of treated clayey soil with dune sand, *J. African Earth Sci.* 152 (2019) 140–150.
- [165] B. Uzbas, A.C. Aydin, Microstructural analysis of silica fume concrete with scanning electron microscopy and X-ray diffraction, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* 10 (2020) 5845–5850.
- [166] L. Liu, C. Sun, G. Geng, P. Feng, J. Li, R. Dähn, Influence of decalcification on structural and mechanical properties of synthetic calcium silicate hydrate (CSH), *Cem. Concr. Res.* 123 (2019) 105793.
- [167] B. Ma, J. Wang, H. Tan, X. Li, L. Cai, Y. Zhou, Z. Chu, Utilization of waste marble powder in cement-based materials by incorporating nano silica, *Constr. Build. Mater.* 211 (2019) 139–149.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.248>.

- [168] S. Wu, Q. Wu, J. Shan, X. Cai, X. Su, X. Sun, Effect of morphological characteristics of aggregate on the performance of pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 367 (2023) 130219.
- [169] Z. Pezeshki, A. Soleimani, A. Darabi, S.M. Mazinani, Thermal transport in: Building materials, *Constr. Build. Mater.* 181 (2018) 238–252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.230>.
- [170] N.C. Balaji, M. Mani, B.V.V. Reddy, Discerning Heat Transfer in Building Materials, *Energy Procedia.* 54 (2014) 654–668. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.307>.
- [171] A. François, L. Ibos, V. Feuillet, J. Meulemans, Novel in situ measurement methods of the total heat transfer coefficient on building walls, *Energy Build.* 219 (2020) 110004. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110004>.
- [172] P. Apostolidis, X. Liu, A. Scarpas, C. Kasbergen, M.F.C. van de Ven, Advanced evaluation of asphalt mortar for induction healing purposes, *Constr. Build. Mater.* 126 (2016) 9–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.011>.
- [173] C.-S. Shon, T. Mukashev, D. Lee, D. Zhang, J. Kim, Can Common Reed Fiber Become an Effective Construction Material? Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Mortar Mixture Containing Common Reed Fiber, *Sustainability.* 11 (2019) 903. <https://doi.org/10.3390/su11030903>.
- [174] X. Liang, C. Wu, Investigation on Thermal Conductivity of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Mesoscale Modeling, *Int. J. Thermophys.* 39 (2018) 142. <https://doi.org/10.1007/s10765-018-2465-1>.
- [175] K.K. Alaneme, M.O. Bodunrin, Corrosion behavior of alumina reinforced aluminium (6063) metal matrix composites, *J. Miner. Mater. Charact. Eng.* 10 (2011) 1153–1165.
- [176] A. Belferrag, A. Kriker, F. Youcef, S. Abboudi, S. Tié Bi, Thermal Conductivity of Dune Sand Concrete Reinforced with Pneumatic Waste Metal Fibers, *Int. J. Thermophys.* 43 (2022) 140. <https://doi.org/10.1007/s10765-022-03065-2>.

---

# Annexe

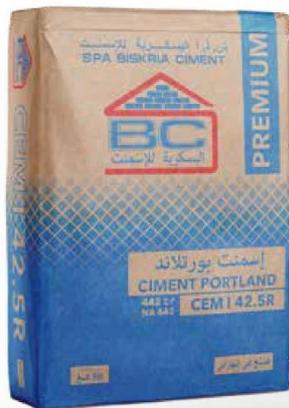
---

## Annexe

### Annexe A : Fiches techniques des matériaux utilisés



# SPA BISKRIA CIMENT



## FICHE TECHNIQUE

### CEM I 42.5R CIMENT PORTLAND

**CEM I 42.5R** Ciment portland, pour les bétons hautes performances et a une résistance rapide à court terme, destiné aux domaines où les délais de décoffrage sont courts, il est recommandé particulièrement pour le bétonnage par temps froid

**CEM I 42.5R :**  
Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013)

#### 👉 DOMAINES D'APPLICATION

Un ciment pour tous vos travaux de constructions de haute résistance a jeune âge, il est aussi recommandé pour les utilisations suivantes :

- Produits en bétons qui demandent un durcissement rapide.
- Le bétonnage dans des coffrages coulissant, surtout en période hivernale.
- Béton résistant au gel en présence de sels de déverglaçage.
- Tabliers de ponts.
- Béton pompé.
- Béton projeté



## ✓ APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Béton armé à haute résistance.
- Béton autoplaçant.

## 🪣 FORMULATION CONSEILLÉE

	<b>ciment</b> 	<b>Sable</b> (sec) 0/5 	<b>Gravillons<sup>(sec)</sup></b> 8/15mm 15/25mm 	<b>Eau</b> (litres) 
<b>Dosage pour béton</b>	50k <b>X1</b> 	+ <b>X7</b> 	+ <b>X5</b>  + <b>X4</b> 	+ <b>25 L</b>
	<b>ciment</b> 	<b>Sable</b> Correcteur 0/1mm 	<b>Sable (sec)</b> 0/4mm 	<b>Eau</b> (litres) 
<b>Mortier de briquetage</b>	50k <b>X1</b> 	+ <b>X6</b> 	+ <b>X9</b> 	+ <b>35 L</b>
<b>Mortier de finitions</b>	50k <b>X1</b> 	+ <b>X9</b> 	+ <b>X6</b> 	+ <b>35 L</b>

Remarque: un bidon = 10 litres

## 🔍 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	2.6 – 3.7
Teneur en sulfates (SO <sub>3</sub> )	2.2 – 2.8
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1.7 – 2.8
Teneur en Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	0.03 – 0.07
Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	valeur
C <sub>3</sub> S	56 – 66
C <sub>3</sub> A	5.1 – 7.2
Propriétés physiques	valeur
Consistance normale (%)	25.8 – 26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25 – 1.0
Temps de prise (min)	valeur
Début de prise	150 – 190
Fin de prise	220 – 250
Résistance à la compression	valeur
2 jours (MPa)	20 – 29
28 jours (MPa)	42.5 – 52.5



Version : 01/2021

SPA BISKRIA CIMENT  
Adresse : Djar Belahrache  
Branis, Biskra Algeria

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

## NOTICE TECHNIQUE

**MEDAFLOW RE 25**

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

**Super plastifiant–Haut réducteur d'eau  
Pour travaux de préfabrications****Description**

Le **MEDAFLOW RE 25** est un super plastifiant haut réducteur d'eau. Il est conçu à base de polymères de synthèse et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un rapport E/C très bas.

Le **MEDAFLOW RE 25** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

**Domaines D'application**

- Bétons à hautes performances
- Réduction du temps de décoffrage
- Accélération de la rotation des moules
- Bétons précontraints et architecturaux

**Propriétés**

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW RE 25** permet :

**Sur béton frais :**

- Obtention d'un rapport E/C très bas
- Amélioration considérable de la fluidité
- Faciliter la mise en œuvre du béton
- Décoffrage rapide

**Sur béton durci :**

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

**Mode D'emploi :**

Il est recommandé d'ajouter le **MEDAFLOW RE 25** dans le béton après introduction des  $\frac{3}{4}$  de l'eau de gâchage. Il est conseillé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage adéquat pour les résultats recherchés.

Il peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie), puis malaxer à grande vitesse : 1min/m<sup>3</sup>.

Par temps chaud, le **MEDAFLOW SR25** peut être combiné à un retardataire de prise (**MEDARETARD GR**).

**Dosage :**

Plage de dosage recommandée :

1.0 à 2.5% du poids de ciment soit 0,93 litres à 2,36 litres.

Pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

**Conditionnement Et Stockage :**

Le **MEDAFLOW RE 25** est conditionné en bidons de 11 kg , fûts de 240 kg et cubétaire 1100 kg.

**Délai de conservation :**

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C)

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

**Précautions D'emploi :****Manipulation non dangereuse.**

Se référer à la fiche de données de sécurité disponible sur : [www.granitex-dz.com](http://www.granitex-dz.com)

**NB :** Les produits à base de Poly carboxylates d'Ether (PCE), exposés aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en 06 FEV 2012

DESIGNATION	Rc (MPA)	
Jours	1J	28J
Témoin	5,4	28,0
MEDAFLOW RE25 (%)	13,2	39,5

Ciments CPJ = 42.5 = 350Kg/m<sup>3</sup>  
E/C = 0.38

**Caractéristiques :**

- Aspect..... liquide
- Couleur.....Brun clair
- pH.....7
- Densité.....1,06 + 0,01
- Teneur en chlore.....< 0,1 g/l
- Extrait sec..... 25%

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandée de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

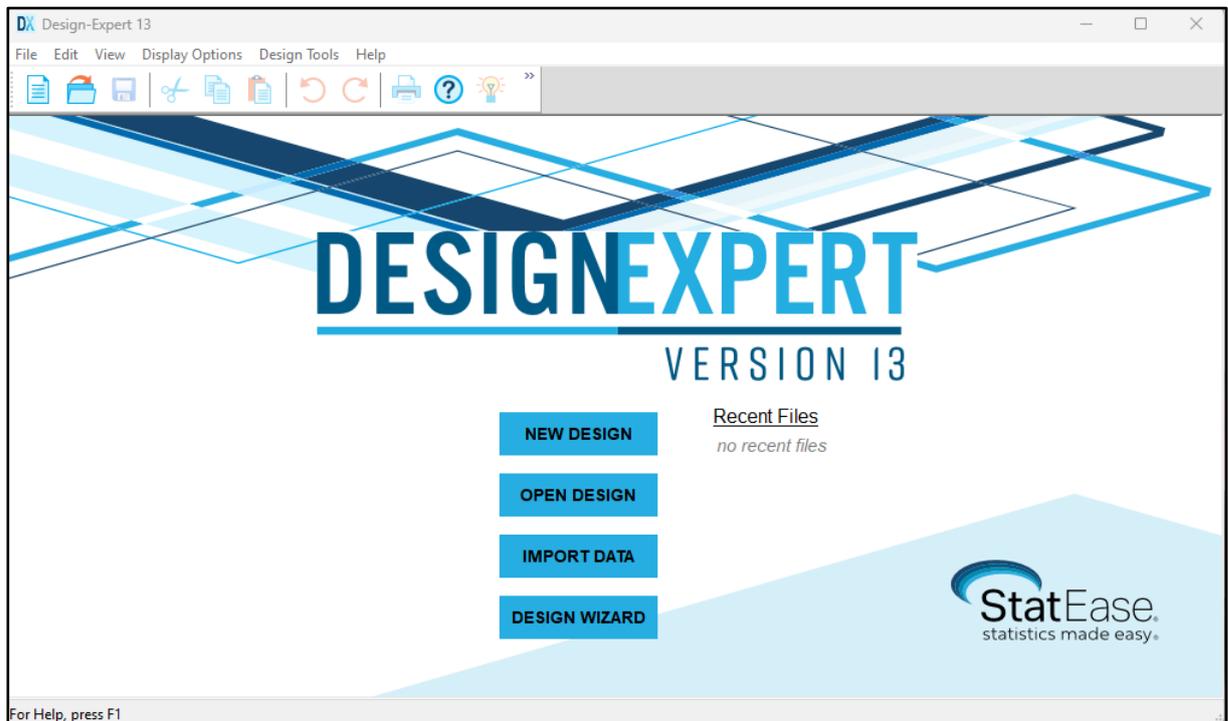
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

[www.granitex.dz](http://www.granitex.dz) - E-mail: [granitex@granitex.dz](mailto:granitex@granitex.dz)



## Annexe B : Logiciel de modélisation statistique Design-Expert



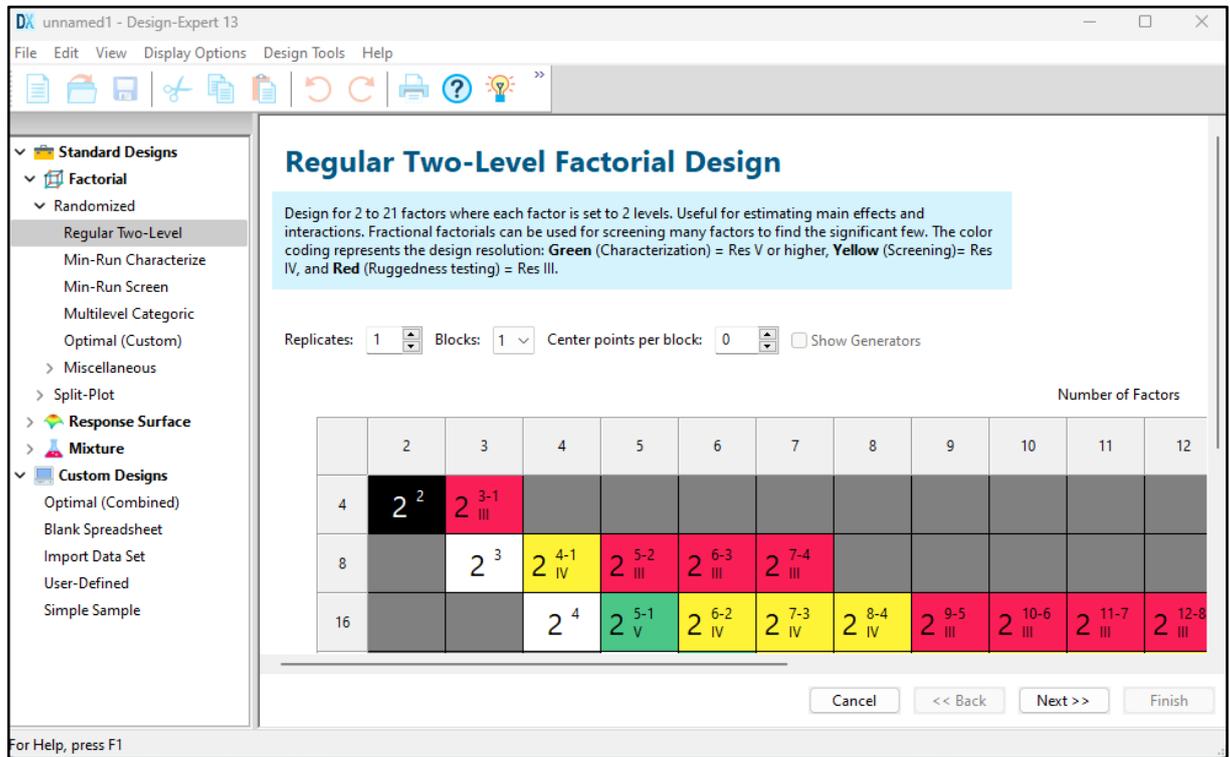
### B.1 Présentation du logiciel

Design-Expert est un logiciel de conception expérimentale développé par Stat-Ease, Inc. Il est utilisé principalement pour planifier, analyser et optimiser des expériences, en particulier dans le domaine de la recherche et du développement.

Design-Expert offre des outils puissants pour planifier une expérience idéale sur un processus, un mélange ou une combinaison de facteurs et de composants. Il simplifie la détection de ce qui, le cas échéant, émerge comme statistiquement significatif et comment modéliser les résultats de la manière la plus précise possible. De plus, Design-Expert propose une large sélection de graphiques qui aident à identifier les effets remarquables et à visualiser les résultats. En utilisant ce logiciel, on peut atteindre les paramètres de processus optimaux et les recettes de produits. On peut également définir des indicateurs et explorer des contours sur des graphiques interactifs en 2D, puis visualiser la surface de réponse sous tous les angles grâce à des graphiques en 3D rotatifs.

## B.2 Conception et analyse d'un plan

Pour effectuer une optimisation à l'aide de la Méthodologie de Surface de Réponse (RSM) et de la Conception des Composites Centraux (CCD) dans Design-Expert, suivez ces étapes générales :



### a) Créer un Plan Expérimental :

- On lance le logiciel Design-Expert.
- On définit les facteurs (variables indépendantes) et les réponses (variables dépendantes).
- On sélectionne "Surface de Réponse" comme type de conception.
- On choisit "Conception des Composites Centraux" (CCD) comme mise en page de la conception. Le CCD est couramment utilisé pour la RSM.
- On spécifie la plage et les niveaux des facteurs.

### b) Générer les Essais Expérimentaux :

- Design-Expert génère un ensemble d'essais expérimentaux en fonction des entrées. Ces essais comprennent diverses combinaisons de niveaux de facteurs, y compris les points centraux.

### c) Effectuer les Expériences :

- On effectue les expériences conformément à la conception générée.
- On enregistre les réponses pour chaque essai expérimental.

**d) Saisir les Données dans Design-Expert :**

- On entre les données enregistrées (réponses) dans Design-Expert.

**e) Élaborer les Modèles de Surface de Réponse :**

- Design-Expert aide à élaborer des modèles de régression pour décrire la relation entre les facteurs et les réponses. Il ajuste des modèles quadratiques ou d'ordre supérieur en fonction de la conception choisie.
- On analyse l'ajustement du modèle et évalue sa signification statistique.

### **B.3 ANOVA (Analyse de la Variance)**

L'ANOVA, ou Analyse de la Variance, est une technique statistique utilisée pour analyser la variation des données et évaluer la signification de différents facteurs ou variables dans l'explication de cette variation. Elle est particulièrement précieuse lors de l'analyse de données expérimentales afin de déterminer si les variations d'une variable de réponse peuvent être attribuées à des modifications d'une ou plusieurs variables indépendantes (facteurs).

**Génération d'un Tableau ANOVA dans Design-Expert :**

Dans Design-Expert, la génération d'un tableau ANOVA comprend généralement plusieurs paramètres importants et statistiques qui aident à analyser la signification de différents facteurs et interactions dans une étude expérimentale. Voici les principaux paramètres couramment présents :

- 1. Degrés de Liberté (DF) :** Les degrés de liberté indiquent le nombre de valeurs dans le calcul final d'une statistique qui sont libres de varier. Dans les tableaux ANOVA, vous verrez DF associé à chaque source de variation.
- 2. Somme des Carrés (SS) :** La somme des carrés quantifie la variation totale au sein de chaque source. Elle représente la somme des carrés des différences entre les points de données individuels et la moyenne globale.
- 3. Moyenne des Carrés (MS) :** La moyenne des carrés est calculée en divisant la somme des carrés par les degrés de liberté d'une source de

variation particulière. Elle permet d'évaluer la variation moyenne au sein de chaque source.

4. **Statistique F (F)** : La statistique F est calculée en divisant la moyenne des carrés du facteur par la moyenne des carrés de l'erreur (résidus). Elle est utilisée pour tester l'hypothèse que le facteur n'a pas d'effet significatif sur la variable de réponse.
5. **Valeur p (p-Value)** : La valeur p associée à la statistique F indique la probabilité d'obtenir la statistique F observée (ou une valeur plus extrême) si l'hypothèse nulle était vraie. Une faible valeur p (généralement inférieure à un niveau de signification, tel que 0,05) suggère que le facteur est statistiquement significatif.
6. **R<sup>2</sup> Ajusté** : Dans certains tableaux ANOVA, vous pouvez trouver le R<sup>2</sup> ajusté, qui indique la proportion de la variance dans la variable de réponse expliquée par le modèle. Il est ajusté en fonction du nombre de prédicteurs dans le modèle.
7. **Coefficients de Régression (Coefficients)** : Dans les tableaux ANOVA de régression multiple, vous pouvez voir des coefficients associés à chaque facteur ou interaction. Ces coefficients représentent l'effet estimé de chaque facteur sur la variable de réponse.

Ces paramètres fournissent des informations précieuses pour interpréter les résultats d'un tableau ANOVA. Les analystes les utilisent pour déterminer la signification des facteurs, comprendre leurs effets sur la réponse et prendre des décisions éclairées concernant la conception expérimentale, l'optimisation et l'amélioration des processus.

## Annexe C : Analyses MEB-DRX

### C.1 Microscope électronique à balayage MEB

# Microscope Électronique à Balayage MEB à Pression Variable

Le **Thermo Scientific Quattro ESEM** combine des performances globales en imagerie et en analyse avec un mode environnemental unique (ESEM) qui permet d'étudier les échantillons dans leur état naturel. Il est idéal pour une grande variété de laboratoires universitaires, industriels et gouvernementaux.

Le Quattro ESEM dispose d'un canon à émission de champ (FEG), qui assure une excellente résolution, tandis que ses trois modes de vide offrent la flexibilité nécessaire pour accueillir une large gamme d'échantillons,



10

Plateau Technique d'Analyses  
Physico-Chimiques (PTAPC-CRAPC)-LAGHOUAT

# Domaines d'application ET POINTS FORTS

## Caractéristiques techniques

- **Observations** d'échantillons propres à haute température en Haut vide.
- **Modes de travail** sous vide (Haut vide, vide faible et ESEM).
- **Résolution Imagerie sous vide poussé**
  - 0,8 nm à 30 kV (STEM); 1,0 nm à 30 kV (SE) sous Haut vide; 1,3 nm à 30 kV (SE) en faible vide et en mode ESEM.
  - 3,0 nm à 1 kV (SE)
- **Détecteurs standard :**
  - ETD, SED à faible vide (LVD), SED gazeux pour le mode ESEM (GSED), caméra IR
- **Détecteurs en option :**
  - Nav-Cam +, DBS, DBS-GAD, ESEM-GAD, ICD, STEM 3+, WetSTEM, RGB-CLD, EDS, EBSD, Raman, EBIC, etc.
- **Mode vide faible :**
  - Jusqu'à 2600 Pa (H<sub>2</sub>O) ou 4000 Pa (N<sub>2</sub>).

## Domaine d'application

Métaux et alliages, fractures, soudures, matériaux magnétiques et supraconducteurs, optoélectronique, matériaux composites, / revêtements, Coupes géologiques polymères, produits pharmaceutiques, filtres, gels, matériel végétal, Particules, matériaux poreux, fibres, etc.

## C.2 Diffractomètre « Empyrean MalvernPanalytical »

# Diffractomètre à Rayons X DRX

Le système **Empyrean, Malvern Panalytical** a introduit un nouveau standard en développant la meilleure plateforme de rayons X pour l'analyse de poudres, de couches minces, de nanomatériaux et d'objets solides.

Cette plateforme est la réponse de Malvern Panalytical à tous les enjeux de la recherche actuelle en matériaux, dans laquelle la durée de vie d'un instrument dépasse celle d'un projet de recherche.

- Avec la troisième génération Empyrean, Malvern Panalytical a maintenant redéfini le concept du diffractomètre polyvalent:



### Les avantages:

HTK 1200N - chauffage de four :

Chambre de four polyvalente à haute température

**Anton Paar HTK 1200N** est conçu pour la diffraction des rayons X sur poudre dans les géométries de réflexion et de transmission avec chauffage environnemental de l'échantillon jusqu'à 1200 °C dans l'air.

38

Plateau Technique d'Analyses  
Physico-Chimiques (PTAPC-CRAPC)-LAGHOUAT

# Domaines d'application ET POINTS FORTS

- Avec la troisième génération Epyrean, Malvern Panalytical a maintenant redéfini le concept du diffractomètre spéciale :

## Principales d'applications

- SAXS et WAXS : diffusion de rayons X aux petits et grands angles.  
( pour calculer la taille des particules )
- Incidence rasante sur les couche minces.
- Application de texture et stresse.
- Les analyses des poudres.



## Domaine d'application



Le système Epyrean est une véritable plateforme de rayons X multi-usage pour la recherche. Contrairement aux autres systèmes disponibles, elle est conçue pour l'industrie actuelle et celle des années à venir.

39

Plateau Technique d'Analyses Physico-Chimiques  
(PTAPC-CRAPC)-LAGHOUAT

## Annexe D : La méthode de formulation

Tableau présentant la formulation des Bétons à Haute Performance (BHP) fibrés sous forme ondulée extrait à partir de déchets câbles torsadés, établis par la méthode de surface de réponse.

Nombre d'essai	BHPFM 14
Eau /Liant (E/L)	0.29
Rapport d'aspect (L/d)	63
Fraction Massique des F.M (Kg/m <sup>3</sup> )	29
Eau (l/m <sup>3</sup> )	140
Liant (Kg/m <sup>3</sup> )	482.758
Ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	438.87
Fumé de silice (Kg/m <sup>3</sup> )	43.88
Super plastifiant (Kg/m <sup>3</sup> )	19.3
Gravier (3/8) (Kg/m <sup>3</sup> )	367.5
Gravier (8/16) (Kg/m <sup>3</sup> )	682.5
Sable de dune (0/3), (Kg/m <sup>3</sup> )	752.29

Granulat	%			
	d <sub>SSS</sub>	E <sub>abs</sub>	E <sub>tot</sub>	E <sub>h</sub>
G (3/8)	2.67	3.10	0	-3.10
G (8/16)	2.67	0.92	0	-0.92

La teneur en eau totale ( $E_{tot}$ ) = (Masse des granulats humides – Masses granulats sec / Masses granulats sec) \*100

L'absorption d'un granulat ( $E_{abs}$ ) = (Masse des granulats à l'état SSS – Masses granulats sec / Masses granulats sec) \*100

L'humidité d'un granulat, ( $E_h$ ) est égale =  $E_h = E_{tot} - E_{abs}$

$d_{SSS}$  : Densité des granulats à l'état saturé superficiellement sec .

La densité des matériaux (ou la masse volumique Absolue) :

Masse Volumique Absolue de Ciment CPA CEMI 42.5Beskra (C) =3.14

Masse Volumique Absolue de Fumé de Silice de SIKA (SF) = 2.24

Masse Volumique Absolue de Superplastifiant RE 25 (SP) =1.06

Masse Volumique Absolue de Fibre Métallique torsadé inox (MF) =7.8

Masse Volumique Absolue de Gravier G (3/8) =2.60

Masse Volumique Absolue de Gravier G (8/16) =2.60

Masse Volumique Absolue de Sable Alluvionnaire (0/5) = 2.60

Masse Volumique Absolue de l'eau (E) =1

Exemple de calcul des dosages des matériaux en (kg/m<sup>3</sup>) du BHPFM14 :

$$\frac{Eau}{Liant} = 0.29 ;$$

$$Liant = \frac{Eau}{0.29} = \frac{140}{0.29} ;$$

$$Liant = 482.758 \text{ Kg/m}^3 ;$$

$$Liant = \text{Ciment} + \text{fumé de silice} ;$$

$$Liant = \text{Ciment} + 10 \% * \text{Ciment} ;$$

$$Liant = (1 + 0.1) * \text{Ciment} ;$$

$$Liant = 1.1 * \text{Ciment} ;$$

$$\text{Ciment} = \frac{Liant}{1.1} = \frac{482.758}{1.1} = 438.871 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Fumé de silice} = \text{Liant} - \text{Ciment}$$

$$\text{Fumé de silice} = 482.758 - 438.871 ;$$

$$\text{Fumé de silice} = 43.887 \text{ Kg/m}^3 ;$$

$$\text{Ciment (l/m}^3) = \frac{\text{Ciment (Kg/m}^3)}{3.14} = \frac{438,871}{3.14} = 139.767 \text{ l/m}^3 ;$$

$$\text{Fume de silice (l/m}^3) = \frac{\text{Fumé de silice (Kg/m}^3)}{2.24} = \frac{43,887}{2.24} = 19.592 \text{ l/m}^3 ;$$

Selon la méthode de Dreux Gorisse, on trouve 35% de Gravier (3/8) et 65% de Gravier (8/16) :

$$M (G (3/8)) = M_{G3/8} * (1 + E_h/100) = 367.50 * (1 - (3.10/100)) = 356.107 \text{ Kg/m}^3;$$

$$\text{Gravier (3/8) (l/m}^3) = \frac{\text{Gravier (3/8) (Kg/m}^3)}{2.60} = \frac{367.5}{2.60} = 141.346 \text{ l/m}^3;$$

$$M (G (8/16)) = M_{G8/16} * (1 + E_h/100) = 682.50 * (1 - (0.92/100)) = 676,221 \text{ Kg/m}^3;$$

$$\text{Gravier (8/16) (l/m}^3) = \frac{\text{Gravier (8/16)(Kg/m}^3)}{2.60} = \frac{682.5}{2.60} = 262.500 \text{ l/m}^3;$$

$$\text{Gravier (3/8) + Gravier (8/16) = 356.107 + 676.221}$$

$$\text{Gravier (3/8) + Gravier (8/16) = 1032 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Fibre métallique recyclées (l/m}^3) = \frac{\text{Fibre métallique recyclées (Kg/m}^3)}{7.8} = \frac{29}{7.8} =$$

$$3.717 \text{ l/m}^3$$

Volume solide de l'extrait sec (S) = 25 % ;

Point de saturation = 1% ;

$$\text{Masse des particules solides (M}_{\text{sol}}) \text{ de superplastifiant} = L * (d_L/100) = (482.758 * 1) / 100 = 4.827 \text{ Kg/m}^3;$$

$$\text{Poids d'adjuvant Total : Volume liquide (V}_{\text{liq}}) \text{ de superplastifiant} = (M_{\text{sol}} * 100) / (s * d_{\text{sup}}) = (4.827 * 100) / (1.06 * 25) = 18.215 \text{ l/m}^3;$$

$$\text{Quantité d'eau à introduire dans le malaxeur : (V}_{\text{Eau}}) = V_{\text{liq}} * d_{\text{sup}} * ((100 - S)/100) = 17.041 * 1.06 * ((100 - 25) / 100) = 14.481 \text{ Kg/m}^3;$$

$$\text{Extrait sec (V}_{\text{sol}}) \text{ en l/m}^3 : V_{\text{sol}} = V_{\text{liq}} - V_E = 18.215 - 14.481 = 3.734 \text{ l/m}^3;$$

$$\text{Dosage en superplastifiant en kg/m}^3 = 18.215 \text{ l/m}^3 * 1.06$$

$$\text{Dosage en superplastifiant en kg/m}^3 = 19.30 \text{ kg/m}^3$$

Le sable est déterminé par la méthode du volume absolue :

Sable Alluvionnaire ( $l/m^3$ ) = 1000 – Eau ( $l/m^3$ ) – Ciment – Fumé de silice ( $l/m^3$ ) – Gravier (3/8) ( $l/m^3$ ) – Gravier (8/16) ( $l/m^3$ ) – Superplastifiant ( $l/m^3$ ) – Fibre métallique ( $l/m^3$ )

Sable ( $l/m^3$ ) = 1000 – 140 – 139.767 – 19.592 – 141.346 – 262.500 – 3.734 – 3.717 = 289.344  $l/m^3$

Sable Alluvionnaire (0/3) ( $Kg/m^3$ ) = Sable Alluvionnaire (0/3) ( $l/m^3$ ) \* Masse Volumique Absolue de Sable Alluvionnaire.

Sable Alluvionnaire (0/3) ( $Kg/m^3$ ) = Sable Alluvionnaire (0/3) ( $l/m^3$ ) \* 2.6

Sable Alluvionnaire (0/3) ( $Kg/m^3$ ) = 289.344  $l/m^3$  \* 2.6 = 752.294  $Kg/m^3$

Volume d'eau d'absorption par mélange :

Gravier (3/8) \*  $E_{abs}$  = 367.5 \* (3.10/100)

Gravier (3/8) \*  $E_{abs}$  = 11.392  $l/m^3$

Gravier (8/16) \*  $E_{abs}$  = 682.5 \* (0.92/100)

Gravier (8/16) \*  $E_{abs}$  = 6.279  $l/m^3$

Eau ( $l/m^3$ ) = 140  $l/m^3$  ;

$E_{fficaces}$  ( $l/m^3$ ) = 140 –  $V_E$  +  $E_{abs}$  (Gravier (3/8)) +  $E_{abs}$  (Gravier (8/16)) = 140 – 18.215 + 11.,392 + 6.279

$E_{fficaces}$  ( $l/m^3$ ) = 139.456  $l/m^3$  = 139.456  $kg/m^3$

Les symboles suivants :

$d_{sss}$  : Densité des granulats à l'état saturé superficiellement sec

L : Dosage en liant

$d_L$  : Densité du liant

S : Teneur en solides du superplastifiant (en pourcentage)

$d_{sup}$  : Densité du superplastifiant liquide

$E_{abs}$  : Quantité d'eau absorbée dans les granulats (en pourcentage)

$E_{tot}$  : Teneur en eau totale des granulats (en pourcentage)

$E_h$  : humidité des granulats (en pourcentage) :  $E_h = E_{tot} - E_{abs}$

$M_{sol}$  : Masse de solides dans le superplastifiant

$V_{liq}$  : Volume de superplastifiant liquide

$V_E$  : Volume d'eau dans le superplastifiant

$V_{sol}$  : Volume de solides dans le superplastifiant