

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de Technologie

Mémoire



Présentée pour l'obtention du diplôme de MASTER

En Génie Civil

Spécialité : Structure

Thème

Caractérisation à l'état frais et durci des mortiers fibrés

Présenté par :

Khaled Rania

Berrahou Ayoub

Soutenue publiquement, le 22 /06 / 2025 , devant le jury composé de :

M^f Houti Farid Brahim

MAA

Univ. Tlemcen

Président

M^{me} Reteri Khadidja

MCB

Univ. Tlemcen

Examinatrice

M^{me} Belaidi Amina

MCB

Univ. Tlemcen

Encadrante

M^{me} Brixî Nezha Khedoudja

MCB

Univ. Tlemcen

Co-Encadrante

Année Universitaire 2024 / 2025

Remerciements

Nous tenons à remercier avant tout l'ensemble des personnes qui ont participé au bon déroulement de notre travail, et qui nous ont permis de réaliser ce mémoire. Nous témoignons donc toute notre reconnaissance :

À nos encadrantes **Madame Belaidi Amina** Et **Madame Brixi Nezha Khedoudja** qui ont consacré leur précieux temps pour nous aider à réaliser ce modeste travail et qui sont toujours rendus disponible pour nous renseigner et a contribué à l'avancement du travail.

Nous tenons aussi à exprimer nos vifs remerciements à **Mr. Houti Farid Brahim** et Madame **Reteri Khadidja** pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail en acceptant de l'examiner.

Nos profonds remerciements vont à **Mr. Taleb Omar**, chef du département de génie civil. Nous remercions également tous les membres de ce département qui ont contribué à créer une ambiance chaleureuse de camaraderie et de travail.

Nos remerciements s'adressent également à Mr **Benmammam Mohamed** et le personnel du laboratoire **Hasnaoui** pour leur aide pour la réalisation de ce projet dans des meilleures conditions.

Nos remerciements vont également au personnel du **laboratoire de la faculté de génie civil et le laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement (EOLE)**, qui nous a soutenus et aidés durant la réalisation de notre projet.

Dédicace

C'est avec une très grande joie et un immense plaisir que je dédie ce modeste travail qui est le fruit de plusieurs années d'étude et de sacrifices aux être les plus chers :

Mes très chers parents pour leur amour, soutiens et sacrifices,

Que dieu les protèges.

Mes chers grands-pères que j'aime,

À mes amis d'université.

À ma promotion d'études,

À mes amis, que je ne peux pas tous citer, mais que je ne peux pas non plus oublier,

À tous ceux qui m'ont encouragé : je leur dédie ce modeste travail et je leur offre cette réussite.

Rania.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes parents, qui m'ont amenés à la vie et m'ont élevés, j'exprime ma profonde gratitude et mes sentiments les plus respectueux,

Ma sœur Iman, son mari et mes neveux Bahaa et Baraa,

Mon frère Abdljalil,

Mes amis, que je ne peux pas tous citer, mais que je ne peux pas non plus oublier,

À ma promotion d'études,

À tous ceux qui ont participé à ma formation,

Ayoub.

المخلص

يُعد دمج الألياف المعدنية في تركيبة الملاط تقنية واسعة الاستخدام في مجال البناء. ويعود ذلك إلى قدرة الألياف على منع التشقق. تؤثر هذه الألياف المعدنية على خصائص الملاط، سواء في حالته الطازجة أو المتصلبة. لذلك، من الضروري توصيف الملاط المقوى بالألياف لفهم سلوكه.

في هذه الدراسة، سعينا بشكل أساسي إلى فحص سيولة الملاط وخواصه الريولوجية ومقاومته الميكانيكية الذي يحتوي على نسب مختلفة من الألياف المعدنية (0%، 0.5%، 1%، 1.5%). وبالمثل، أُجريت دراسة لانتقال الموجات فوق الصوتية عبر عينات الملاط (4×4×16 سم). وقد أدى وجود الألياف المعدنية إلى تحسين مقاومة الملاط للضغط والانشاء بعد 7 و14 و28 يوماً من المعالجة. وبالتوازي، لوحظ زيادة في سرعة انتشار الموجات فوق الصوتية تبعاً لنسبة الألياف.

على الصعيد الريولوجي، يميل إدخال الألياف المعدنية إلى زيادة لزوجة الخليط، مما قد يجعل الملاط أكثر تماسكاً وأقل عرضة للترهل أو النزيف. ويتضح هذا التأثير بشكل أكبر مع نسب الألياف العالية (1% و1.5%). ومع ذلك، فإن زيادة الألياف قد تعقد أيضاً عملية التطبيق من خلال زيادة مقاومة التدفق، والتي تتميز بحد القص. لذا، فإن المفتاح هو إيجاد توازن لتحسين الأداء الميكانيكي وقابلية تشغيل الملاط في آن واحد.

الكلمات المفتاحية: ملاط، ألياف معدنية، هبوط، ريولوجيا، مقاومة، سرعة الموجات فوق الصوتية.

Résumé

L'incorporation des fibres métalliques dans la composition des mortiers est une technique largement employée dans le domaine de la construction. Cela est dû à la capacité des fibres à empêcher la fissuration. Ces fibres métalliques influencent les propriétés des mortiers, tant à l'état frais qu'à l'état durci. Il est donc essentiel de caractériser les mortiers fibrés pour comprendre leur comportement.

Dans cette étude, nous avons principalement cherché à examiner la fluidité, la rhéologie et les résistances mécaniques des mortiers contenant différents taux de fibres métalliques (0%, 0,5%, 1%, 1,5%). De même, une étude du transfert des ondes ultrasonores à travers des éprouvettes de mortiers (4x4x16 cm) a été menée. La présence de fibres métalliques a engendré une amélioration de la résistance à la compression et à la flexion du mortier après 7, 14 et 28 jours de cure. Parallèlement, une augmentation de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores a été observée en fonction du dosage en fibre.

Sur le plan rhéologique, l'introduction de fibres métalliques tend à augmenter la viscosité du mélange, ce qui peut rendre le mortier plus cohésif et moins susceptible de s'affaisser ou de s'écouler. Cet effet est accentué avec des dosages en fibre élevés (1% et 1,5%). Cependant, un excès de fibres peut également compliquer la mise en œuvre en augmentant la résistance à l'écoulement, caractérisée par le seuil de cisaillement. La clé est donc de trouver un équilibre pour optimiser à la fois la performance mécanique et la maniabilité du mortier.

Mots clés : Mortier, Fibres métalliques, Affaissement, Rhéologie, Résistance, vitesse des ondes ultrasonores.

Abstract

The incorporation of steel fibers into mortar compositions is a widely used technique in the construction field. This is due to the fibers' ability to prevent cracking. These steel fibers influence mortar properties in both their fresh and hardened states. Therefore, characterizing fiber-reinforced mortars is essential to understanding their behavior.

In this study, we primarily aimed to examine the fluidity, rheology, and mechanical strengths of mortars containing different metallic fiber contents (0%, 0.5%, 1%, 1.5%). Similarly, a study on ultrasonic pulse propagation through mortar specimens (4x4x16 cm) was conducted. The presence of metallic fibers led to an improvement in the compressive and flexural strength of the mortar after 7, 14, and 28 days of curing. Concurrently, an increase in ultrasonic pulse velocity was observed based on the fiber dosage.

From a rheological standpoint, the introduction of steel fibers tends to increase the mixture's viscosity, which can make the mortar more cohesive and less prone to sagging or bleeding. This effect is accentuated with higher fiber dosages (1% and 1.5%). However, an excess of fibers can also complicate placement by increasing flow resistance, characterized by the yield stress. The key, therefore, is to find a balance to optimize both the mechanical performance and workability of the mortar.

Keywords: Mortar, Steel Fibers, Slump, Rheology, Strength, Ultrasonic Pulse Velocity.

Sommaire

المخلص	i
Résumé	ii
Abstract	iii

LISTE DES FIGURES	I
LISTE DES TABLEAUX.....	IV
LISTE DES NOTATIONS ET DES ABREVIATIONS.	V
Introduction générale.....	1
I.1. Introduction	2
I.2. Définition d'un mortier :.....	2
I.3. Les composants du mortier.....	3
I.3.1. Le ciment :	3
I.3.2. La chaux :	6
a. Les chaux aériennes :	7
b. Les chaux hydrauliques :.....	7
c. Les chaux dolomitiques (magnésiennes) :	7
I.3.3. Le sable :.....	7
a. Sable d'origine naturelle :	8
b. Sable d'origine artificielle :	8
I.3.3.1. Granulométrie :.....	8
I.3.3.2. Rôle de sable dans le mortier	8
I.3.4. L'eau de gâchage :	9
I.3.5. Les adjuvants :	9
I.3.5.1. Types des adjuvants :.....	9
a. Les superplastifiants :.....	9

b. Les plastifiants :	10
c. Hydrofuges :	10
I.4. Les types de mortiers :	10
I.4.1. Mortier de ciment portland :	11
I.4.2. Mortier de chaux :	11
I.4.3. Mortiers bâtards :	11
I.4.4. Mortier à base de ciment de maçonnerie	12
I.4.5. Les Mortier industriel :	12
I.5. Caractéristiques principales d'un mortier :	12
I.6. Préparation des mortiers :	13
I.6.1. Mortier normal :	13
I.6.1.1. Le malaxage :	13
I.7. Définition des fibres :	13
I.8. Définition d'un mortier fibré :	13
I.9. Les différents types de fibres :	14
I.9.1. Fibres végétales :	14
Figure I.5: Exemples de fibres végétales : (a) Coton, (b) Lin, (c) Chanvre (Benmlik,2018)	15
I.9.2. Fibres d'amiante :	15
I.9.3. Fibres de verre :	16
I.9.4. Fibres de carbone :	17
I.9.5. Fibres organiques :	18
I.9.6. Fibres Métallique :	19
I.10. Propriétés des fibres :	21
I.10.1. La notion de fibres structurales :	21
I.10.2. Le facteur d'élancement :	21
I.10.3. La performance :	22
I.10.4. La valeur de résistance résiduelle :	22

I.10.5. La distribution des contraintes mécaniques :	22
I.11. Rôle des fibres :	23
I.12. Le domaine d'utilisation des mortiers fibrés :	24
I.12.1. Réparation du béton :	24
I.12.2. Réparation et renforcement des structures en béton :	24
I.12.3. Chapes à base de liants hydrauliques– Exigences et performances :	25
I.12.4. Utilisation des mortiers fibrés dans les travaux de génie civil :	25
I.12.5. Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances – BFUP :	25
I.13. Conclusion :	26
II.1 Introduction :	28
II.2. La microstructure des mortiers fibrés:	28
II.2. L'ouvrabilité des mortiers fibrés:	29
II.6.2.1 Essai du mini cône :	29
II.3.2. Essai rhéologique:	30
II.3.2.1. La contrainte de cisaillement :	30
II.3.2.2 Le taux de cisaillement :	30
Figure II.3 : Écoulement d'un fluide en régime laminaire, en cisaillement plan.....	31
II.3.2.3. La viscosité :	31
II.3.2.4. Le seuil de cisaillement:	34
II.3.2.5. Rhéomètre à mortier:	36
II.3.3. L'influence des fibres sur l'ouvrabilité des mortiers:	40
II.4. Comportement mécanique des mortiers fibrés:	42
II.5. Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques :	45
Tableau II.3: La Vitesse moyenne de propagation des ondes ultrasoniques (Ezziane et al., 2015).....	46
II.6. Conclusion :	46
III.1 Introduction :	49
III.2 Matériaux utilisés :	49

III.2.1 Ciment :	49
III.2.1.1 Essais de la surface spécifique de Blaine (SSB) :	51
III.2.1.2 Masse volumique du ciment (apparente et absolue) :	51
III.2.2 Le sable :	52
III.2.2.1 La masse volumique apparente et absolue :	52
III.2.2.2 Équivalent de sable :	53
III.2.2.3 Analyse granulométrique :	54
Tableau III. 3: Résultat de l'analyse granulométrique du sable.	55
Tableau III.4 : Caractéristiques physiques du sable.	56
III.2.3 Les adjuvants :	57
III.2.3.1 Dosage de saturation :	57
III.2.3.1.1 La méthode du mini cône :	57
Figure III.7 : Essai du mini cône.	59
III.2.3.1.2 L'essai de cône de Marsh :	60
Figure III.9 : Cône de marsh.	60
III.2.4 Les fibres métalliques:	61
II.2. Formulation du mortier fibré normal :	62
III.4 Essai de la résistance mécanique :	63
III.4.1 Confection des éprouvettes prismatiques :	63
III.4.2 Essais de compression et de traction par flexion :	63
III.4.3 La vitesse d'impulsion d'ultrason :	64
III.5 Conclusion :	65
IV.1. Introduction :	67
IV.2. Caractérisation des mortiers fibrés à l'état frais :	67
b. Les essais rhéologiques :	69
IV.3. Caractérisation des mortiers fibrés à l'état durci :	70
a. Essai de la résistance à la compression :	70

b. Essai de la résistance à la flexion :	71
c. Essai de la propagation des ondes ultrasonores :	72
IV.3 Conclusion :	73
Conclusion générale	75
Perspectives :	75
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	77

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Constituants des mortiers...	2
Figure I.2: Le ciment.....	3
Figure I.3: Cycle de la chaux (Ayat, 2015).....	6
Figure I.4: Les différents types de mortiers.	11
Figure I.5: Exemples de fibres végétales : (a) Coton, (b) Lin, (c) Chanvre (Benmlik,2018).....	15
Figure I.6: Fibres d'amiante.....	16
Figure I.7: Fibre verre	17
Figure I.8: Fibres de carbone (STAGNOLIGEARS,2023)	18
Figure I.9: Les fibres de polypropylènes.....	19
Figure I.10: Les fibres d'acier.....	19
Figure I.11 : Différentes formes des fibres métalliques (ABDELMADJID, 2021).....	20
Figure I.12 : Essais de l'ASTM C 1018 (SADOUN et DJEBRI,2019).....	23
Figure I.13: Illustration de l'apport du renfort par des fibres.....	24
Figure II.1 : L'effet de la nature des fibres sur la résistance des mortiers (Ezziane et al. 2015).....	29
Figure II.2 : Illustration du mini cône	30
Figure II.3 : Écoulement d'un fluide en régime laminaire, en cisaillement plan.....	31
Figure II.4: Comportement parfaitement visqueux la courbe d'écoulement passe par l'origine (Taleb, 2017).....	33
Figure II.5 : Comportement viscoplastique la courbe d'écoulement ne passe pas par l'origine (Taleb,2017).....	34
Figure II.6 : Comportement rhéologique des bétons (Wallevik et al., 2011).....	35
Figure II.7 : Dispositif de l'essai rhéologique.....	37
Figure II.8 : Profil de vitesse imposé au cours des essais rhéologiques du mortier (belaidi a et brixia ,2014)	38

Figure II.9 : Les deux pâles testées.	38
Figure II.10 : Illustration de récipient du rhéomètre	38
Figure II.11 : Les différents types de modèles d'écoulement (belaidi a et brixia ,2014).....	40
Figure II.12 : Propriétés rhéologiques , viscosité plastique (a) et seuil de cisaillement (b) des bétons fibrés avec et sans adjuvant en fonction de dosage en fibre (Abdelrazik et Khayat,2020).....	41
Figure II.13: Effet du superplastifiant sur les propriétés rhéologiques du mortier(adjoudj,2015).....	41
Figure II.14 : Orientation des fibres métallique en fonction du seuil de cisaillement (a) $\tau_0 = 25$ Pa ; (b) $\tau_0 = 70$ Pa (Bensaid et al., 2009).	42
Figure II.15 : Effet de la nature et la quantité de fibre sur la résistance à la compression (Setti, 2012)	45
Figure II.16 : Variation de la vitesse ultrasonique des mortiers fibrés en fonction de l'âge du mortier (Allioui et Mehdi ; 2024).....	46
Figure III.1 : Essai de surface spécifique utilisant le perméabilimètre de Blaine.....	51
Figure III.2 : Détermination de la masse volumique absolue de ciment utilisant le Toluène	52
Figure III.3 : Essai de détermination de la Masse volumique apparente du sable.	53
Figure III.4 : Essai de détermination de la Masse volumique absolue du sable.	53
Figure III.5 : L'éprouvette d'essai d'équivalent de sable.....	54
Figure III.6 : Courbe granulométrique	56
Figure III.7 : Essai du mini cône.....	59
Figure III. 8 : Graphe de dosage de saturation (méthode mini cône).....	59
Figure III.9 : Cône de marsh.	60
Figure III.10 : Éprouvettes prismatiques des mortiers.	63
Figure III. 11 : Essais mécaniques en: (a) traction par flexion et (b) compression.....	64
Figure III.12 : Essai d'ultrason sur des éprouvettes de mortiers.....	65
Figure IV.1. Essai d'étalement au cône à mortier	67

Figure IV.2 : Les résultats d'affaissement en fonction de pourcentage des fibres.....	68
Figure IV.3 : Formation des agglomérats de fibres.....	68
Figure IV.4 : Variation de la viscosité en fonction du dosage en fibres métalliques.....	69
Figure IV.5. Variation du seuil de cisaillement en fonction du dosage en fibres métalliques.....	70
Figure IV.6. Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en fibres métalliques.....	71
Figure IV.7 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du dosage en fibres métalliques.....	71
Figure IV.8 : La vitesse de propagation des ondes ultrasonores par rapport le taux des fibres.....	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Classification des ciments courants (NF EN 197-1).....	5
Tableau I.2: Propriétés mécaniques des fibres métalliques.....	21
Tableau I.3: Facteur d'élançement. (Sadoun et Djebri , 2019).....	22
Tableau II.1 : Effets et propriétés des différents types des fibres.....	43
Tableau II.2 : Les paramètres influant sur la résistance mécanique.....	44
Tableau II.3: La Vitesse moyenne de propagation des ondes ultrasoniques (Ezziane et al., 2015)	46
Tableau III. 1: Composition chimique du ciment de Béni-Saf CEM II/A 42.5.....	50
Tableau III. 2: La masse volumique apparente et absolue du ciment.	52
Tableau III. 3: Résultat essai analyse granulométrique.....	55
Tableau III. 4: Caractéristiques physiques du sable.....	56
Tableau III.5 : Caractéristiques du superplastifiant.....	57
Tableau III. 6 : Résultat des deux essais en adjuvant.....	60
Tableau III. 7 : Caractéristique des fibres Métallique.....	62
Tableau III. 8: Formulations des mortiers fibrés selon la norme EN 196-1.	62

LISTE DES NOTATIONS ET DES ABREVIATIONS.

τ_0	Le seuil de cisaillement.
μ	La viscosité dynamique.
$\dot{\gamma}$	Le gradient de vitesse de cisaillement.
τ	La contrainte de cisaillement.
dF	Projection de la force de frottement tangentielle.
dS	Surface élémentaire d'une couche cisillée.
K	Le facteur de consistance.
n	L'index de consistance.
ρ	La masse volumique.
τ_{ad}	La résistance additionnelle causée par la variation de l'empilement des particules
Ω	La vitesse de rotation de la pale.
M_{vide}	Couples à vide.
M_{total}	Couples totaux.
M	Couples finaux.
C	Dosage en ciment.
V_s	Volume solide.
V_v	Volume des vides.
ρ_c	La densité de ciment.
L	L'écartement.
$CaCO_3$	Carbonate de calcium.
CO_2	Dioxyde de carbone.
CaO	Oxyde de calcium.
σ'_c	Résistance à la compression.

ρ	Masse volumique de mortier (kg/m^3).
n	Coefficient de poisson de mortier.
v	Vitesse du son (km/s).
E_d	Module d'élasticité dynamique exprimé en (MPa)
V	La vitesse des ondes (m/s).
L	La longueur de parcours (mm).
t	Le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur (μs).

Introduction générale

Le mortier est un matériau de construction fondamental, utilisé depuis des siècles pour assembler, réparer ou revêtir des structures. Composé principalement de ciment, de sable et d'eau, il possède des propriétés essentielles telles que la cohésion, la résistance à la compression et la facilité d'application. Cependant, face aux exigences croissantes en matière de durabilité, de résistance mécanique et de performance face aux agressions extérieures, des améliorations ont été apportées à sa formulation traditionnelle. Parmi ces innovations, le mortier fibré a connu un grand succès. L'ajout de fibres dans le mortier permet d'en renforcer les propriétés mécaniques, notamment en augmentant sa résistance à la fissuration, sa ductilité et sa ténacité. Ces fibres peuvent être de différents types, comme synthétiques, végétales ou métalliques. En particulier, les fibres métalliques, telles que celles en acier ou en alliages métalliques, offrent des avantages considérables. Elles améliorent la résistance à la traction, la résistance à la fissuration et la durabilité du mortier, tout en contribuant à une meilleure absorption des chocs et à une cohésion renforcée du matériau. Leur utilisation permet ainsi de concevoir des mortiers plus performants, adaptés à des applications exigeantes, notamment dans des structures soumises à des contraintes mécaniques importantes.

En revanche, l'incorporation de fibres métalliques dans le mortier représente une avancée significative dans le domaine des matériaux de construction, combinant la simplicité du mortier traditionnel avec les propriétés renforcées offertes par ces fibres, pour répondre aux défis modernes de la construction durable et résistante. Toutefois, l'ajout de fibres peut affecter l'ouvrabilité du mortier, ce qui soulève plusieurs interrogations : Quel est l'effet des fibres métalliques sur la rhéologie du mortier à l'état frais ? Quel pourcentage de fibres est recommandé ? Comment influencent-elles ses propriétés mécaniques ? Quel est l'impact global sur les performances et la durabilité des structures en matériaux cimentaires fibrés ?

Cette étude vise à évaluer les paramètres rhéologiques, notamment la viscosité et le seuil de cisaillement, ainsi que les propriétés mécaniques en résistance à la traction par flexion et en compression et aussi des essais du transfert des ondes ultrasonores à travers des éprouvettes (4x4x16cm) d'un mortier renforcé par des fibres métalliques introduites à différents pourcentages. L'objectif est d'analyser l'effet de ces fibres sur les caractéristiques du mortier, tant à l'état frais qu'à l'état durci.

À cet effet, notre manuscrit est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique, présentant les différents types de mortiers et leurs constituants, ainsi que les types de fibres utilisés dans le mortier.

Le deuxième chapitre présente une étude sur les propriétés des mortiers, tel que l'ouvrabilité des mortiers contenant différents types de fibres, en mettant l'accent sur les mortiers à base de fibres métalliques. Les

résultats obtenus sur leurs propriétés rhéologiques et mécaniques y sont analysés.

Le troisième chapitre est consacré à l'identification et à la caractérisation des matériaux utilisés dans notre étude. Il décrit également les méthodes expérimentales mises en œuvre pour réaliser nos essais.

Enfin, le quatrième chapitre expose le programme expérimental conçu pour atteindre les objectifs de l'étude. Ce programme comprend l'analyse du comportement rhéologique et mécanique des mortiers, avec et sans fibres. Le chapitre se termine par la présentation des principales conclusions tirées des résultats expérimentaux.

En conclusion générale, nous résumons les principaux résultats obtenus et proposons des perspectives pour des recherches futures.

Chapitre I : Généralité Sur Les Mortiers

&

Les Fibres.

I.1. Introduction

Le mortier est un matériau indispensable dans toute construction, il permet d'assurer une liaison entre les différents éléments (blocs de béton, briques, éléments en béton préfabriqué, etc.). L'utilisation d'un mortier de ciment ou d'autre liant qui a pour but de :

- solidariser les éléments entre eux.
- assurer la stabilité de l'ouvrage.
- comblent les interstices entre les blocs de construction.

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additifs (Figure I.1). Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en modifiant les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau.

En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et leur dosage sont en fonction du type de l'ouvrage à réaliser et de son environnement. La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier. Les mortiers peuvent être :

- Préparés sur chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants y compris les adjuvants.
- Préparés sur chantier à partir de mortiers industriels secs préparés, il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire.
- Livrés par une centrale : ce sont des mortiers prêts à l'emploi.



Figure I.1: Constituants des mortiers.

I.2. Définition d'un mortier :

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de

construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux), d'eau, et d'adjuvant. Selon la nature et les proportions des composants, ainsi que la technique de mélange employée, divers types de mortiers peuvent être fabriqués (Delaldja , 2018).

I.3. Les composants du mortier

I.3.1. Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique composé de poudre minérale (Figure I.2). Habituellement produite à partir de calcaire, d'argile et d'autres composants. Il interagit avec l'eau pour former des hydrates stables qui lui procurent une solidité mécanique. Les réactions d'hydratation du ciment représentent les réactions chimiques qui se produisent pour transformer progressivement la pâte cimentaire (ciment Portland + eau) en un matériau solide (Mejdi, 2019).



Figure I .2 : Le ciment

Dans un mélange, le ciment assure les trois fonctions suivantes :

- La liaison : le ciment agit comme un liant qui permet de fixer les particules de sable et des matériaux entre eux, lors de l'hydratation il forme une pâte solide.
- La résistance : lors de son hydratation le ciment développe des cristaux qui se lient fortement, ce qui confère au mortier sa résistance à la compression
- La durabilité : le ciment rend le mélange plus résistant aux conditions climatiques variées.
- La plasticité : cette plasticité est essentielle pour l'adhérence et le façonnage des surfaces.

Le constituant principal du ciment est le clinker qui est obtenu grâce à la fusion, à 1450°C, d'un mélange de matériaux naturels provenant de carrière, tel que le calcaire et l'argile, jusqu'à ce qu'il atteigne une fusion partielle (clinkérisation). Il est dosé et homogénéisé et il se compose principalement de la chaux (CaO), de la silice (SiO₂) et d'alumine (Al₂O₃) (Siline, 2018)

Les oxydes tels que CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ se combinent pour former les phases minérales majeures du clinker :

- Silicate tricalcique (C₃S) : 3CaO.SiO₂ (Alite).
- Silicate bicalcique (C₂S) : 2CaO.SiO₂ (Belite).
- Aluminate tricalcique (C₃A) : 3CaO.Al₂O₃.
- Ferroaluminate calcique (C₄AF) : 4CaO .Al₂O₃ .Fe₂O₃ (Célite).

Le clinker ainsi obtenu, une fois broyé, est mélangé avec un peu de sulfate de chaux (gyserégulateur de prise. Ce qui donne naissance au Ciment Portland (Sadoun et Djebri, 2019).

L'ajout de gypse (CaSO₄) au clinker vise à stabiliser la prise du ciment, en particulier celui contenant d'importantes quantités d'aluminate tricalcique. Ce gypse permet au ciment de commencer à se solidifier, soit au début de son processus de durcissement, ou au plus tôt trente minutes après le début de son hydratation. Sans gypse, le durcissement ne serait pas uniforme et pourrait se produire trop vite (Smaine et Tahar, 2021). Selon la Norme algérienne NA 442, le ciment portland est composé de 95% de clinker et 5% de gypse.

Afin de modifier les propriétés hydrauliques, pouzzolaniques et physiques du ciment portland, des ajouts minéraux sont intégrés à sa composition. En fonction de la nature des constituants utilisés et de leur dosage, il existe une grande variété de types de ciments.

Sur le marché, il existe 27 familles de produits, regroupées en 5 types principaux, définis par la norme NF EN 197-1 commeciments "courants" :

CEM I : Ciment Portland pur (connu en France sous l'appellation CPA).

CEM II : Ciment Portland composé (CPJ).

CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF).

CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).

CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

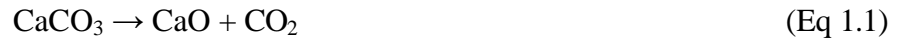
Ces ciments sont les plus fréquemment utilisés dans la construction. Le tableau (I.1) regroupe les 27 produits de la famille des ciments courants.

Tableau I.1: Classification des ciments courants (NF EN 197-1).

principaux types	Notation des 27 produits (types de ciments courants)		Composition (pourcentage en masse)												
			Constituants principaux												
			Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné	Calcaire		Constituants secondaires		
						Naturelle	Naturelle calcinée	Siliceuse	Calciq ue		L	LL			
K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL						
CEM I	Ciment portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Ciment portland au laitier	CEM I/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
	Ciment portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
	Ciment portland composé	CEM II/A-M	80-94	← 12-20 →									0-5		
CEM II/B-M		65-79	← 21-35 →									0-5			
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM IV	Ciment pouzzolanique	CEM IV/A	65-89	—	← 11-35 →					—	—	—	0-5		
		CEM IV/B	45-64	—	← 36-55 →					—	—	—	0-5		
CEM V	Ciment composé	CEM V/A	40-64	18-30	—	← 12-20 →				—	—	—	0-5		
		CEM V/B	20-38	31-49	—	← 21-35 →				—	—	—	0-5		

I.3.2. La chaux :

Le terme de chaux est générique. Il regroupe un grand nombre de produit, dont le seul point commun est d'être obtenu par calcination, c'est-à-dire chauffage à haute température de calcaire. La chaux vive CaO est le produit de la décomposition du carbonate de calcium CaCO_3 , un composant majeur du calcaire, lors de sa cuisson à une température de 1000°C . Ce processus libère également le gaz carbonique CO_2 (Eq I.1) :



La chaux vive CaO ne peut pas être utilisée directement, car son hydratation s'accompagne d'un gonflement inadmissible dans un ouvrage. On hydrate donc la substance pour obtenir une chaux éteinte Ca(OH)_2 , qui se présente sous forme de poudre blanche, légèrement soluble dans l'eau et dotée des caractéristiques d'un liant (Ayat,2015)

La (figure I.3) montre l'ensemble des transformations que subissent la chaux dans la chaîne opératoire du mortier.

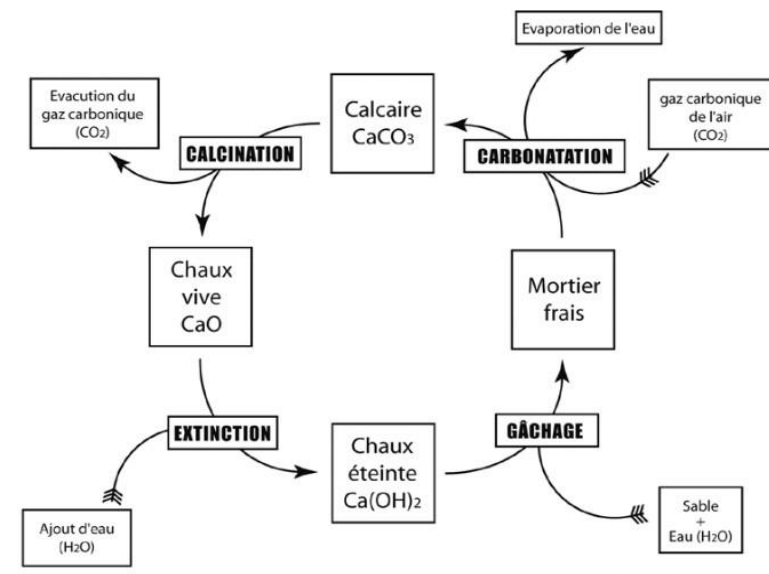


Figure I. 3 : Cycle de la chaux (Ayat, 2015)

La chaux se présente sous les trois formes suivantes :

a. Les chaux aériennes :

Les chaux aériennes sont produites par la calcination d'un calcaire pur, ou contenant une faible proportion d'argile (0 à 5 %). La chaux grasse et la chaux maigre sont deux variantes de la chaux aérienne. La première, dénommée ainsi en raison de son caractère onctueux qu'elle confère au mortier, possède une pureté notable en carbonate (supérieure à 95%), contrairement à la seconde qui présente un taux d'argile pouvant atteindre les 5%.

Les chaux aériennes sont caractérisées par leur lenteur de prise. Les bâtisseurs d'autrefois ne percevaient pas vraiment la lenteur comme un désavantage, car cette caractéristique permettait grâce à la malléabilité des mortiers un affaissement graduel de l'édifice au fur et à mesure de sa montée, ainsi qu'une distribution optimale des forces en présence (Oukil, 2019).

b. Les chaux hydrauliques :

Lorsque le calcaire contient de l'argile (8 à 20%), la calcination donne lieu à la formation de silicates et d'aluminates de calcium, ce qui confèrent au liant un caractère hydraulique, et les chaux obtenues sont appelées chaux hydrauliques.

La prise des chaux hydrauliques se fait en milieux humides ou dans l'eau. Leur résistance mécanique est également remarquable par rapport à celle des chaux aériennes.

c. Les chaux dolomitiques (magnésiennes) :

La calcination d'une roche calcaire contenant du carbonate de magnésium $MgCO_3$, produit des chaux magnésiennes, contenant à la fois de l'oxyde de calcium CaO et de l'oxyde de magnésium MgO (magnésie). Ces chaux sont également appelées chaux dolomitiques.

Tout comme les chaux aériennes, les chaux dolomitiques et hydrauliques naturelles peut être soit vives, soit éteintes. Cela dépend de si elles sont le résultat direct de la calcination et contiennent donc des oxydes, ou si elles ont été hydratées par la suite et contiennent alors des hydroxydes. (Ayat, 2015)

I.3.3. Le sable :

Les sables doivent respecter les normes NF EN 12620 et NF EN 13139. Le sable doit être siliceux, silico-calcaire ou même calcaire, à condition que les grains ne soient pas friables. Il doit être propre, c'est-à-dire exempt d'impuretés qui pourraient compromettre la qualité du mortier (argile, vase, terre végétale, plâtre, sels minéraux).

On peut classer les sables selon leur origine et on distingue les sables naturels (sables de mer, les sables de rivière et les sables de dunes) et les sables artificiels (les sables de carrière).

a. Sable d'origine naturelle :

Le sable naturel est une roche sédimentaire non consolidée, essentiellement composée de quartz. Il est issu de la décomposition des roches due à divers facteurs d'érosion et à l'altération des roches riches en quartz (granites, gneiss) par des processus physiques (vent, eaux courantes) ou chimiques (action dissolvante de l'eau). Les grains de sable qui se créent sont habituellement de grande taille et anguleux, ce qui rend leur transport par le biais du vent et des rivières difficiles. Ainsi, les plus gros grains de sable se trouvent généralement le long des rivières, sur les rivages des mers ou dans les zones désertiques. (Benyoucef et Derouez , 2021).

b. Sable d'origine artificielle :

Appelé aussi sable concassé, ce matériau est issu du broyage de roches massives suite à des opérations de concassage et de criblage. Ses grains présentent des aspérités nettes (Guidoum et Farhet, 2019). Une autre de ses origines est le concassage de blocs de laitier provenant des hauts-fourneaux (Dameche et Bekkouche, 2019).

I.3.3.1. Granulométrie :

Selon Benyoucef et Derouez (2021), le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est :

- Extra-fins : jusqu' à 0,08 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire).
- Fins : jusqu' à 1,6 mm.
- Moyens : jusqu' à 3,15 mm.
- Gros : jusqu' à 5 mm.

I.3.3.2. Rôle de sable dans le mortier

L'inclusion de sables permet de réduire le retrait du liant (ossature mortier) tout en renforçant les résistances mécaniques. Les sables de qualité doivent comporter des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se positionnent dans les espaces entre les gros pour remplir les vides. Leur rôle est crucial : ils diminuent les variations de volume, la quantité de chaleur dégagée et

même le coût. Les proportions seront mesurées en poids plutôt qu'en volume afin d'éviter les erreurs de dosage liées à l'expansion du sable humide.

I.3.4. L'eau de gâchage :

L'eau a un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours, le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA - 442. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale.

I.3.5. Les adjuvants :

D'après la norme NF EN 934-2, on définit les adjuvants comme des produits chimiques intégrés à une faible concentration (inférieure à 5 % du poids du ciment) dans le béton, les mortiers ou les coulis afin de modifier certaines propriétés, soit à l'état frais ou durci. Ainsi, selon la norme, on exclut du champ d'application des adjuvants les produits incorporés lors du broyage du clinker ou ceux dont la proportion excède 5 % dans le ciment.

I.3.5.1. Types des adjuvants :

a. Les superplastifiants :

Les superplastifiants, ou haut-réducteurs d'eau, sont des adjuvants essentiels pour les matériaux cimentaires. Ils améliorent l'ouvrabilité du béton frais sans nécessiter plus d'eau, ce qui, à son tour, facilite la mise en œuvre de béton ou de mortier (Zerrouk, 2015) et renforce la durabilité et les performances mécaniques du béton durci (Anagnostopoulos, 2014). Il s'agit généralement de produits de synthèse organique, comme les dérivés de la mélamine ou du naphthalène, et plus récemment, les polyacrylates et polycarboxylates (Benbaizid et Selmati , 2017).

Les superplastifiants améliorent considérablement les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires en réduisant le seuil de cisaillement et la viscosité, ce qui facilite l'écoulement sans altérer la résistance mécanique à long terme (El Barrak, 2005). Leur action repose principalement sur la dispersion des grains de ciment par répulsion électrostatique, liée à

l'adsorption des polymères sur les particules hydratées (Bonneau, 1997 ; Flatt et al., 2001). Taleb et al (2016) ont montré que l'augmentation de la teneur de l'adjuvant a tendance à diminuer la viscosité et le seuil de cisaillement des bétons autoplaçants. En effet, un surdosage en superplastifiant a des effets indésirables pouvant entraîner la ségrégation du matériau. Et un sous-dosage en ce matériau, il n'a que peu d'effet sur la rhéologie (Hynek, 2023).

b. Les plastifiants :

Les réducteurs d'eau, ajoutés dans l'eau de gâchage, servent soit à améliorer la maniabilité sans réduire les résistances mécaniques, soit à diminuer le contenu en eau pour maintenir une ouvrabilité constante. Ils renforcent la capacité de déformation et l'intensité des mortiers, tout en diminuant le volume d'eau intégré. En outre, ils simplifient l'application du mortier et minimisent la ségrégation. Ils sont composés de lignosulfonates, de sels d'acides organiques, ainsi que de dérivés de la mélamine ou du naphthalène. (Benbaizid et Semait , 2017)

c. Hydrofuges :

Les hydrofuges permettent de limiter la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton, sans altérer ses qualités plastiques et esthétiques. Il ne faut pas les confondre avec les hydrofuges de surface, qui s'appliquent au rouleau sur le béton durci et qui sont généralement à base de silicone. Les hydrofuges de masse sont généralement composés de stéarates solubles qui, lorsqu'ils sont en contact avec la chaux présente dans le ciment, produisent des cristaux de stéarate de calcium insolubles. Ces derniers ont tendance à boucher le réseau capillaire du béton. Ces produits ne sont réellement efficaces que si le béton est correctement densifié et uniforme, et que toutes les mesures sont mises en œuvre pour prévenir l'apparition de fissures (Zerrouk, 2015).

I.4. Les types de mortiers :

Les mortiers sont sélectionnés en fonction de leur usage, car il existe de nombreux types, chacun ayant des propriétés et des applications plus ou moins adaptées. Sur les chantiers, les mortiers les plus couramment employés sont :

I.4.1. Mortier de ciment portland :

Les mortiers de ciment, d'une grande solidité, se solidifient et se durcissent rapidement. En outre, une quantité adéquate de ciment les rend presque imperméables. Les quantités habituelles varient entre 300 et 400 kg de ciment pour un mètre cube de sable (DAD, 2019)

I.4.2. Mortier de chaux :

Il s'agit du constituant classique du mortier, qui présente une plasticité et une capacité de rétention d'eau remarquables. Toutefois, sa résistance mécanique est limitée et son processus de durcissement est lent. La chaux grasse, qui est produite par l'extinction de la chaux vive et nécessitant un vieillissement prolongé, est le produit de choix à privilégier. Toutefois, ce processus de vieillissement prend beaucoup de temps et la manipulation de la chaux grasse peut être particulièrement salissante. C'est pourquoi l'emploi de la chaux hydratée à l'état sec s'avère plus pratique. La carbonatation lente du mortier de chaux, due au dioxyde de carbone présent dans l'air, est à l'origine de sa cure. Ce processus peut être considérablement retardé en cas de temps froid et humide (Sadoun et Djebbari , 2019).

I.4.3. Mortiers bâtards :

Le mortier bâtard est constitué en proportions approximativement égales de sable, de ciment et de chaux (Figure I.4). Il combine la robustesse du ciment avec la flexibilité de la chaux.

Sa texture onctueuse facilite son maniement et minimise le risque de fissuration. (Thabet et Amakif, 2019)

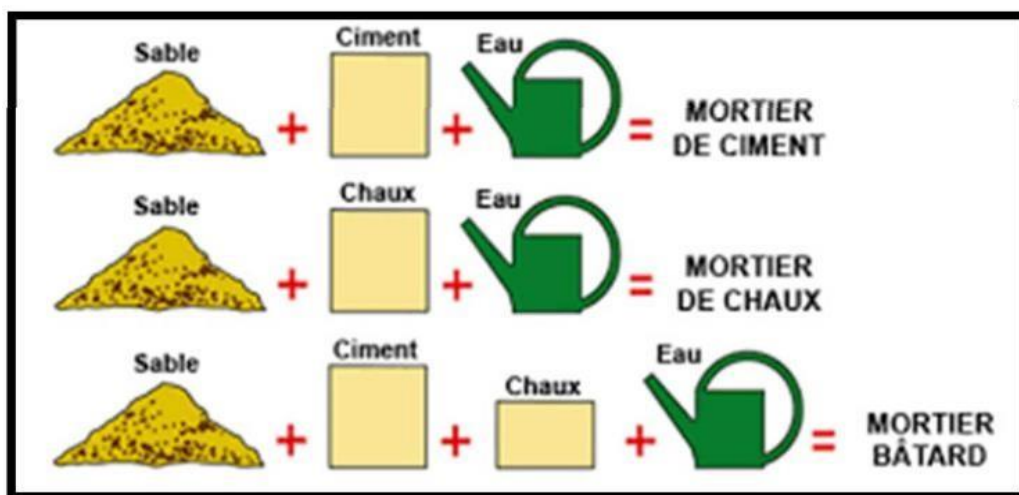


Figure I.4: Les différents types de mortiers.

I.4.4. Mortier à base de ciment de maçonnerie

Il s'agit d'un produit breveté qui comprend du ciment Portland, un filler minéral non réactif (calcaire), ainsi que divers adjuvants comme des agents de mouillage, des agents imperméabilisants et des entraîneurs d'air. Ces adjuvants confèrent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que la chaux apporte aux mortiers de ciment. Il existe des ciments de maçonnerie qui sont composés de mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, auxquels s'ajoutent des adjuvants (Sadoun et Djebri, 2019)

I.4.5. Les Mortier industriel :

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour l'emploi de ce mortier, il suffit d'ajouter la quantité appropriée d'eau et de mélanger. Les producteurs de mortiers industriels offrent une vaste sélection de produits adaptés à toutes les exigences :

- Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.
- Mortiers d'imperméabilisation.
- Mortier d'isolation thermique.
- Mortier de jointoiement.
- Mortier de scellement, mortier pour chapes.
- Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment.

I.5. Caractéristiques principales d'un mortier :

Pour être de bonne qualité, un mortier doit présenter plusieurs caractéristiques essentielles, aussi bien avant qu'après sa mise en œuvre. Il doit d'abord être homogène, sans ségrégation du sable et du liant, ce qui assure également une bonne ouvrabilité pour faciliter son application. Une prise suffisamment lente est cruciale, permettant une utilisation prolongée (au moins une heure après gâchage), le mortier bâtard offrant généralement des temps de prise plus longs. Une excellente adhérence aux éléments à lier est primordiale, nécessitant parfois de mouiller les supports pour éviter qu'ils n'aspirent l'eau du mortier. Par ailleurs, un bon mortier doit présenter un faible retrait hydraulique afin de prévenir les fissurations et d'assurer l'imperméabilité de la masse durcie, ce qui peut être favorisé par l'usage de mortier bâtard et la prévention d'un départ d'eau prématuré. Bien que les mortiers ne soient pas parfaitement imperméables, un dosage et une mise en œuvre corrects garantissent une perméabilité réduite. Enfin, la résistance à la compression est rarement un problème majeur en pratique, car les mortiers sont rarement soumis à des contraintes importantes.

I.6. Préparation des mortiers :

I.6.1. Mortier normal :

Pour préparer un mortier normal, la norme NF P15-403 exige les quantités massiques suivantes :

- Sable 0/3 : 1350 ± 5 g ;
- Ciment : 450 ± 2 g ;
- Eau de gâchage : 225 g (le rapport E/C est égale 0,5).

I.6.1.1. Le malaxage :

Le malaxage est effectué au moyen d'un malaxeur spécifié par la norme NF P15-403. Le malaxeur étant en position de fonctionnement :

- Mettre 225 ml d'eau ;
- Mettre 450 g de ciment
- Mélanger à basse vitesse pendant 30 secondes, ajouter le liant, les fibres et le sable de façon aléatoire, puis mélanger à haute vitesse pendant 2 minutes ;
- Arrêter le malaxeur, démonter le batteur et racler les parois et le fond du récipient pour s'assurer qu'aucune portion de mortier ne reste non mélangée ;
- Une fois le batteur remonté, poursuivre le malaxage à grande vitesse pendant 2 minutes ;
- Suite au malaxage, verser le mortier dans des moules standardisés ($4 \times 4 \times 16$ cm³), préalablement graissés, en remplissant la moitié du moule qui doit être positionné sur la table à choc avec un nombre de frappes équivalent à 60 coups par minute.

I.7. Définition des fibres :

Les fibres sont des composants discontinus, de nature diverse et de forme globalement cylindrique, caractérisés par un diamètre et une longueur variable. Elles sont dispersées au sein de la matrice, soit de façon aléatoire, soit selon une orientation préférentielle (Georges, 2007) Les fibres sont disponibles sous différentes formes (rondes, plates, gaufrées), d'origine minérale, organique ou métallique.

I.8. Définition d'un mortier fibré :

Un mortier fibré est un type de mortier auquel on ajoute des fibres pour améliorer ses propriétés mécaniques et réduire le risque de fissuration. Ces fibres peuvent être en divers matériaux tels que le verre, le polypropylène, ou même le métal. Ajout de fibres permet de

mieux répartir les contraintes, augmenter la résistance à la traction et améliorer la durabilité du mortier.

I.9. Les différents types de fibres :

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ... etc.), leur dimension (macro ou microfibres) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Les principales fibres utilisées sont :

I.9.1. Fibres végétales :

Les fibres végétales proviennent de la biomasse. Elles sont principalement constituées de cellulose, un polymère naturel caractérisé par de longues chaînes moléculaires de glucose, d'hémicelluloses, de lignines et de pectines. De nombreuses plantes peuvent être utilisées pour l'extraction de fibres, que ce soit à partir des tiges (comme le lin, le jute et le chanvre), des feuilles (comme le sisal), des graines (comme le coton et le kapok) ou même des fruits (comme la noix de coco). On peut diviser ces fibres en deux types : les fibres longues et les fibres courtes. Les fibres courtes sont généralement dérivées des fruits, fleurs ou graines de certaines plantes, tandis que les fibres longues sont obtenues à partir de l'écorce ou du liber de la tige et des feuilles des plantes. Les fibres végétales sont très utilisées pour leur faible densité, leur pouvoir d'isolation thermique, leur propriétés mécaniques et notamment pour leur biodégradabilité citée par (Benyoucef et Derouez, 2021). La (Figure I.5) représente quelques fibres végétales.

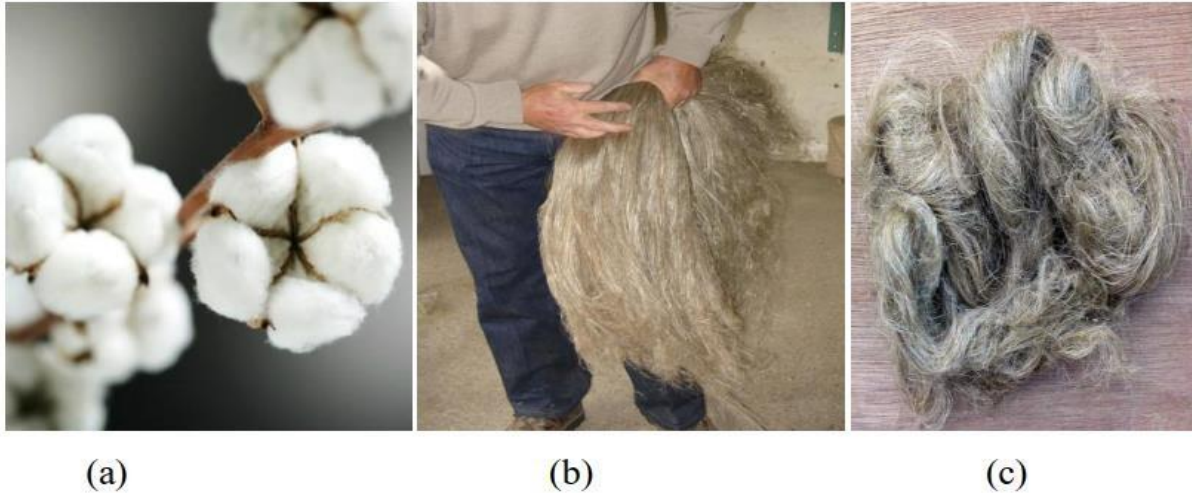


Figure I.5: Exemples de fibres végétales : (a) Coton, (b) Lin, (c) Chanvre (Benmlik,2018)

Les fibres végétales sont caractérisées par une faible densité (1,2 à 1,5 g/cm³), ce qui confère à ces matériaux des caractéristiques mécaniques spécifiques intéressantes. Les fibres longues présentent une résistance à la traction inférieure aux fibres courtes, car elles ont une probabilité plus élevée d'avoir des défauts de formation. La cellulose cristalline est un des polymères qui possède un module d'élasticité relativement supérieur (90-137 GPa), si l'on le compare à celui de la fibre de verre qui est de 75 GPa. Par conséquent, un indice élevé de cristallinité de la cellulose dans une fibre se traduit par de fortes propriétés mécaniques.

I.9.2. Fibres d'amiante :

Les fibres d'amiante sont faites de silicates de magnésium hydratés, parfaitement adaptés à la pâte de ciment. Elles ont une excellente résistance à la traction et un haut module d'élasticité. Il s'agit de fibres très largement commercialisées. Il n'est pas approprié d'utiliser les fibres d'amiante (Figure I.6) pour renforcer les mortiers ou les bétons, car leur distribution est très complexe et elles requièrent une quantité importante d'eau de gâchage. De plus, leur emploi pour le renforcement des ciments est de plus en plus délaissé et même prohibé par la réglementation dans de nombreuses applications, en raison du risque qu'il pose à la santé humaine (Senouci et Youcefi ,2023)

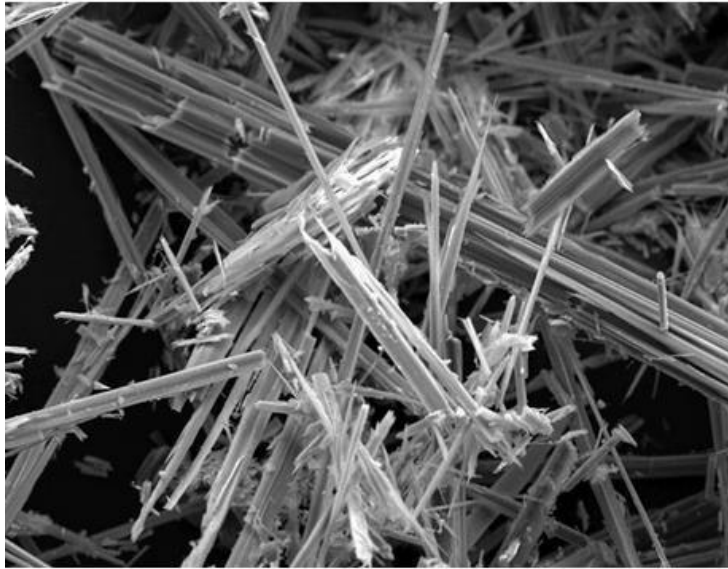


Figure I.6: Fibres d'amiante

I.9.3. Fibres de verre :

Ces fibres sont conçues à partir de verre fondu qui traverse une filière (Figure I.7), chauffée par l'effet Joule, et qui comporte entre 50 et 800 tours d'un diamètre variant de 10 à 100 mm. Elles sont proposées sur le marché sous forme de bobines (coupées selon les besoins) ou de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12 et 50 mm On distingue trois catégories : les fibres de verre standards (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre au borosilicate (REMIDINI, 2020) Ces fibres présentent une résistance à la traction allant jusqu'à 3000 MPA. Il convient aussi de noter leur remarquable capacité à résister au feu (jusqu'à 800 °C). Ce facteur, conjugué à un coefficient de dilatation similaire à celui de la pâte de ciment, confère aux bétons renforcés par des fibres de verre une solide résistance au feu.



Figure I.7: Fibre verre

I.9.4. Fibres de carbone :

Le carbone, étant très coûteux, est moins prisé que le verre qui est plus facilement disponible sur le marché. Cependant, les fibres de carbone sont réputées pour être les plus performantes. Les fibres de carbone sont catégorisées en fonction de leurs caractéristiques mécaniques. Ces caractéristiques sont liées aux cycles de pyrolyse et au type de précurseur (Figure I.8). On identifie deux catégories de fibres, subdivisées en quatre classes principales :

- les types hauts modules soient les classes UHM (Ultra Haut Module) et HM (Haut Module),
- les types hautes résistances soient les classes I THR ou VHS (Très haute résistance ou veryhigh strength) et HR ou HS (haute résistance ou high strength) (SADOUN et DJEBRI , 2019).



Figure I.8: Fibres de carbone (STAGNOLIGEARS, 2023).

I.9.5. Fibres organiques :

Les fibres de polypropylène sont spécifiquement élaborées pour être employées dans les situations où des fissures se forment suite à un retrait ou des déformations plastiques (Figure I.9), comme c'est le cas avec de grandes plaques de béton, des pièces préfabriquées en béton, des planchers chauffants, et ainsi de suite. Ils sont employés là où il est nécessaire d'assurer la cohésion des chapes ou du béton lors de leur installation, par exemple dans le cas de dalles inclinées, etc. On utilise aussi des fibres de polypropylène dans les applications de béton projeté (gunité), dans le but d'améliorer la densité et le compactage du béton projeté.

On distingue trois familles principales de ces fibres à savoir (SADOUN et DJEBRI, 2019) :

- Le polyamide qui représente la famille la plus importante des plastiques par leur tonnage. Le PA résiste mal aux acides minéraux.
- Le polychlorure de vinyle (PVC), est une matière thermoplastique obtenue par polymérisation du chlorure de vinyle. Le PVC résiste bien aux acides et aux alcalis.
- Le polypropylène (PP), est un thermoplastique formé de chaîne linéaire constitué de motifs propylènes dans le cas d'un homopolymère et d'une altération contrôlée de motifs propylène et éthylène dans les copolymères. Le PP résiste bien aux alcalis et aux acides.



Figure I.9: Les fibres de polypropylènes.

I.9.6. Fibres Métallique :

Ce type de fibre, qui inclut les fibres d'acier (Figure I.10) et celles en fonte amorphe, continue d'être un sujet majeur de recherche à l'échelle mondiale. Nous nous concentrons sur les fibres d'acier, probablement les plus répandues dans le secteur du génie civil. En effet, la résistance mécanique du béton armé par ces fibres est influencée par la qualité de l'adhérence entre la fibre et la matrice



Figure I.10: Les fibres d'acier.

Les fabricants de fibres d'acier ont déployé tous leurs efforts pour améliorer cette adhérence en modifiant l'irrégularité de la surface des fibres (Benali, 2010), ce qui les conduit aux nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur diamètre, leur section (ronde, carrée, rectangulaire), (Figure I.11) leur longueur et leurs modes d'opération. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0.1 et 0.7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 (SENOUCI et YUCEFI, 2023).

Il existe sur le marché, une panoplie de fibres métalliques d'acier, voici quelques types de fibres (SADOUN et DJEBRI, 2019) :

- Fils étirés et coupés : Ondulés, crantés, torsadés ou avec crochets pour un meilleur accrochage.
- Fibres usinées à surface rugueuse : Pour améliorer ; adhérence au béton.
- Fibres de fonderie : Minces rubans de fonte ; environ 30 μm épaisseur

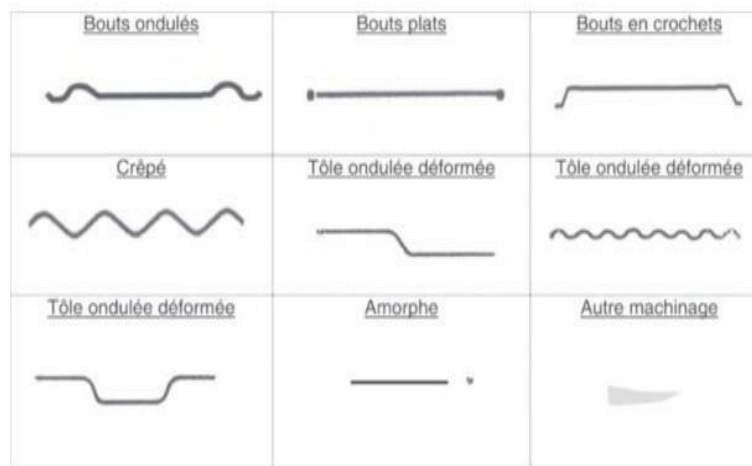


Figure I.11 : Différentes formes des fibres métalliques (ABDELMADJID, 2021)

En général, les fibres métalliques employées dans le dallage industriel sont des fibres tréfilées qui présentent habituellement des fils d'un diamètre de 1 mm. Les diverses fibres disponibles se distinguent les unes des autres par la nature de leur ancrage actif dans la matrice du béton. On trouve des fibres produites avec un ancrage qualifié de déformable, comme les fibres à

crochets proposées par l'entreprise Bekaert sous l'appellation « Dra mix », ou encore les fibres ondulées mises en vente par la société Trefil Arbed. Cette entreprise produit aussi une fibre vendue sous le nom de « Twin-set », qui dispose d'un cône immuable à chaque bout (Senouci et Youcefi ,2023).

La résistance des fibres métallique à la traction doit être supérieure à 1000 MPa selon la norme NF EN ISO 16120-2 (Tableau I.2).

Tableau I.2: Propriétés mécaniques des fibres métalliques

Type de fibre	Métallique
Masse Volumique (Kg/m ³)	7850
Résistance à la compression (MPA)	250-1000
Résistance à la traction (MPA)	1000
Résistance à la repture (MPA)	400 – 600
Module de Young E (GPA)	200

I.10. Propriétés des fibres :

I.10.1. La notion de fibres structurales :

Le concept de fibres structurales ne s'applique qu'à certaines sortes de fibres métalliques dont les résistances résiduelles correspondent à l'effet structural des armatures conventionnelles. Il est essentiel de comprendre que le concept de « fibre structurale » ne s'applique pas à la majorité des fibres.

Il est à noter que les applications de dalles sur sol ne sont pas considérées comme étant structurales. Les fibres métalliques et les macros fibres synthétiques peuvent être utilisées en concentration nécessaire pour satisfaire aux spécifications du devis.

I.10.2. Le facteur d'élanement :

L'élanement est défini par un rapport géométrique. Le facteur d'élanement est ainsi le rapport qui exprime la proportion de la longueur par rapport au diamètre équivalent de la fibre. (Tableau I. 3) présente des valeurs de rapport pour divers types de fibres.

La liaison entre la matrice de béton et la fibre se renforce proportionnellement au facteur d'allongement. En revanche, les fibres ayant un facteur d'élançement supérieur à 60 et possédant une géométrie spécifique sont potentiellement propices à la formation d'«oursins ».

Tableau I.3: Facteur d'élançement. (Sadoun et Djebri , 2019)

Types de fibres	Elancement (L/D)
Macro synthétiques	50-100
Métalliques	25-100
Fonte amorphe	1200-1400
Polypropylène	140-1700
Carbone	150-400

I.10.3. La performance :

La performance des fibres est étroitement liée à la valeur de résistance résiduelle pouvant être obtenue pour une formulation spécifique de béton. L'évaluation des performances des fibres se fait en fonction de diverses normes japonaises et américaines.

I.10.4. La valeur de résistance résiduelle :

L'intégration de fibres dans le béton renforce la résistance aux déformations en flexion des structures en béton exposées à des charges. C'est au moment où la première fissure se manifeste que les fibres sont mises à l'épreuve, ce qui permet d'établir une valeur de résistance résiduelle.

En effet, les fibres favorisent une meilleure cohésion et résistance intrinsèque du matériau, ce qui renforce la résistance à l'expansion et à l'intensification des fissures. Les fibres favorisent une récupération de charge après fissuration.

I.10.5. La distribution des contraintes mécaniques :

L'intégration de fibres offre l'avantage majeur d'un meilleur contrôle lors de la post-fissuration du béton. Les fibres ont la capacité d'absorber l'énergie de fissuration et de répartir les contraintes mécaniques dans la matrice du béton. L'agencement des fibres au sein du béton contribue à retarder la rupture soudaine du matériau en entravant la diffusion des

microfissures (Figure I.12). En fonction des fibres employées et des travaux auxquels elles sont intégrées, ce rôle se manifeste par des améliorations après fissuration concernant :

- La résistance à la traction.
- La résistance aux impacts.
- La résistance à la fatigue.
- La résistance à l'abrasion.
- La réduction des fissures de retrait.

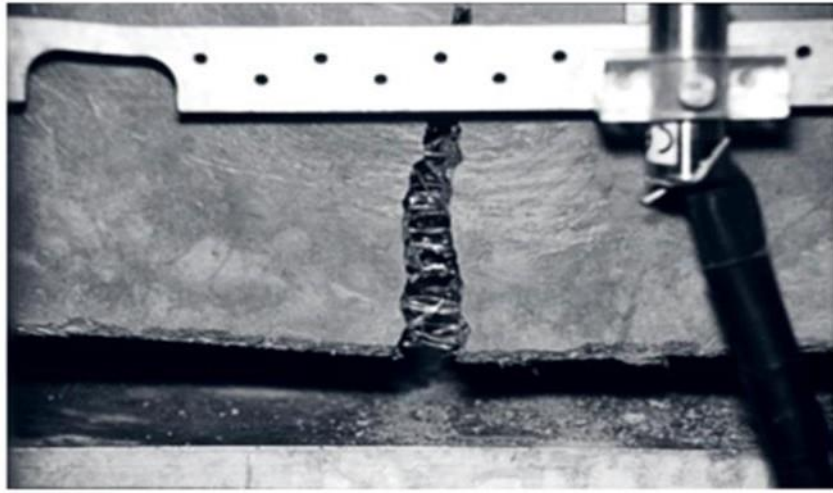


Figure I.12 : Essais de l'ASTM C 1018 (SADOUN et DJEBRI, 2019)

I.11. Rôle des fibres :

Initialement, les chercheurs ont tenté d'améliorer les propriétés mécaniques du béton ou du mortier (Figure I.13), telles que la résistance à la compression et la résistance à la flexion, en ajoutant des fibres. Cependant, le résultat obtenu était restreint. Ils ont seulement identifié le rôle prépondérant des fibres dans un matériau cimenté :

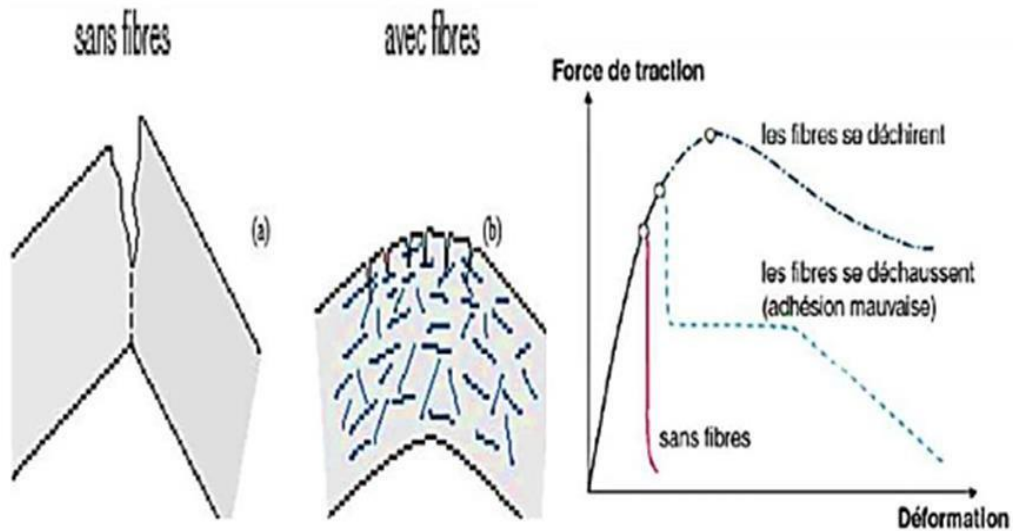


Figure I.13: Illustration de l'apport du renfort par des fibres.

I.12. Le domaine d'utilisation des mortiers fibrés :

I.12.1. Réparation du béton :

Les mortiers fibrés, spécifiquement dans le cadre de la réparation du béton selon la norme EN1504-3 'article Champs d'application', sont utilisés pour renforcer les structures existantes, y compris les ponts, les bâtiments et les infrastructures où la fissuration est un problème majeur. Les fibres ajoutées, telles que des fibres métalliques ou en polypropylène, permettent de :

- Renforcer la résistance à la fissuration : Cela est primordial dans les milieux exposés à des variations de chaleur, de froid ou de charges changeantes.
- Simplifier le processus de gunitage : Pour les réparations, ce mortier projeté en béton améliore l'adhérence et la longévité du support.

I.12.2. Réparation et renforcement des structures en béton :

Les mortiers fibrés sont spécifiquement recommandés pour les applications où des propriétés mécaniques élevées et une résistance accrue à l'impact sont nécessaires selon la norme NF P18-821. Ils sont utilisés pour :

- Réparation de structures porteuses : Lorsque le béton est détérioré par des facteurs externes (impacts, vibrations, milieu hostile).
- Renforcer des composantes structurelles : Par exemple, des poutres ou des colonnes qui sont sous-dimensionnées ou affaiblies, où l'incorporation de fibres renforce la résistance à la traction et la ductilité.

I.12.3. Chapes à base de liants hydrauliques– Exigences et performances :

Dans la norme EN 13813, les mortiers renforcés sont employés pour les chapes industrielles grâce à leur :

- Durabilité : Le mortier, renforcé par des fibres métalliques ou polymères, devient plus résistant aux charges pesantes et aux frottements dans les secteurs industriels.
- Diminution des fissurations : Ces mortiers sont utilisés dans des conditions où la température et l'humidité peuvent entraîner des craquelures.

I.12.4. Utilisation des mortiers fibrés dans les travaux de génie civil :

Dans les domaines du génie civil selon la norme EN 14487-1 , en particulier pour ce qui concerne les tunnels et les structures d'art, l'utilisation de béton projeté renforcé de fibres (fibré) offre :

- Renforcement des murs de tunnels : Les fibres renforcent l'adhésion du béton projeté, ce qui confère une meilleure résistance aux contraintes mécaniques.
- Durabilité améliorée : Les fibres renforcent la résistance à la fissuration dans des conditions extrêmes (pression, mouvement du sol).

I.12.5. Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances – BFUP :

Les BFUP sont employés pour des structures présentant une résistance élevée
Recommandations AFGC-SETRA :

- Œuvres d'art et édifices de grande hauteur : Avec leur remarquable résistance physique et leur capacité de résilience, ces mortiers sont employés dans des contextes rigoureux où la longévité est essentielle.
- Diminuer la dimension des composants : Grâce à leur robustesse renforcée, il est possible de minimiser les sections des éléments structuraux tout en préservant une résistance et une sûreté maximales

I.13. Conclusion :

Il est essentiel de suivre rigoureusement les recommandations du fabricant pour tous les types de mortier, en tenant compte des paramètres tels que la quantité d'eau de gâchage, le temps de malaxage, l'épaisseur, la technique de mise en œuvre, ainsi que les conditions climatiques et l'usage spécifique. Le choix du mortier doit également prendre en considération les caractéristiques de l'élément de maçonnerie (type, forme, propriétés), afin d'optimiser à la fois l'aspect esthétique et les performances mécaniques et thermiques, notamment la résistance à la compression, l'adhérence, la densité et l'épaisseur de mise en œuvre.

Par ailleurs, l'utilisation des fibres comme renfort dans les matériaux est largement répandue, car elle améliore notamment la résistance à la flexion en renforçant la matrice et en limitant la propagation des fissures. Cependant, certains aspects restent à perfectionner, tels que leur impact sur le comportement en phase humide et leur durabilité à long.

Chapitre II : Propriétés des mortiers fibrés

II.1 Introduction :

La rhéologie est une discipline dont le nom provient des termes grecs rhéo (couler) et logos (étude). Le mot rhéologie a été introduit en 1928 par Eugène Cook Bingham, s'inspirant de l'expression grecque "Ta panta rhei", signifiant "tout s'écoule". Ce terme a été adapté en français en 1943 [Encyclopædia Universalis].

La rhéologie étudie les relations entre les contraintes appliquées à un matériau et les déformations qui en résultent, en tenant compte, si nécessaire, de leur évolution dans le temps. Il s'agit donc de la science qui analyse les phénomènes de déformation et d'écoulement de la matière, et plus généralement la viscosité des matériaux soumis à des contraintes mécaniques. L'objectif principal est de comprendre le comportement mécanique des matériaux et de formuler des lois qui régissent leur réponse aux sollicitations.

Un matériau est considéré en écoulement lorsque sa déformation évolue au cours du temps. Le comportement rhéologique d'un élément de volume décrit la manière dont ses déformations réagissent aux contraintes qui lui sont appliquées. L'étude de ce comportement vise à déterminer soit les forces nécessaires pour provoquer une déformation donnée, soit les déformations résultant de l'application de forces spécifiques.

Un fluide peut présenter un comportement plastique ou viscoplastique lorsque l'écoulement ne se manifeste qu'au-delà d'un certain seuil de contrainte. Si, en revanche, la vitesse d'écoulement est proportionnelle à la contrainte de cisaillement, on parle de fluide visqueux. En dessous de ce seuil, le fluide ne s'écoule pas, mais peut néanmoins se déformer de façon élastique. (soualhi, 2014).

II.2. La microstructure des mortiers fibrés:

Selon Ezziane et al. (2015), les mortiers présentent généralement une microstructure dense avec une faible perméabilité. On considère que les mortiers renforcés de fibres sont des composites constitués de deux éléments majeurs : les fibres et la matrice cimentaire, offrant ainsi un comportement mécanique optimal. La répartition des fibres dans la matrice est aléatoire. D'après les études de (Ezziane et al. 2015) et (Setti 2012), l'introduction de fibres vise à créer un matériau doté de propriétés mécaniques améliorées, tant en compression qu'en traction, tout en ralentissant la progression des fissures.

Les fibres contribuent à minimiser la formation de fissures et à améliorer le rendement de la matrice cimentaire après fissuration, en maintenant une résistance élevée lors des déformations (Ezziane et al. 2015) (Figure II.1).

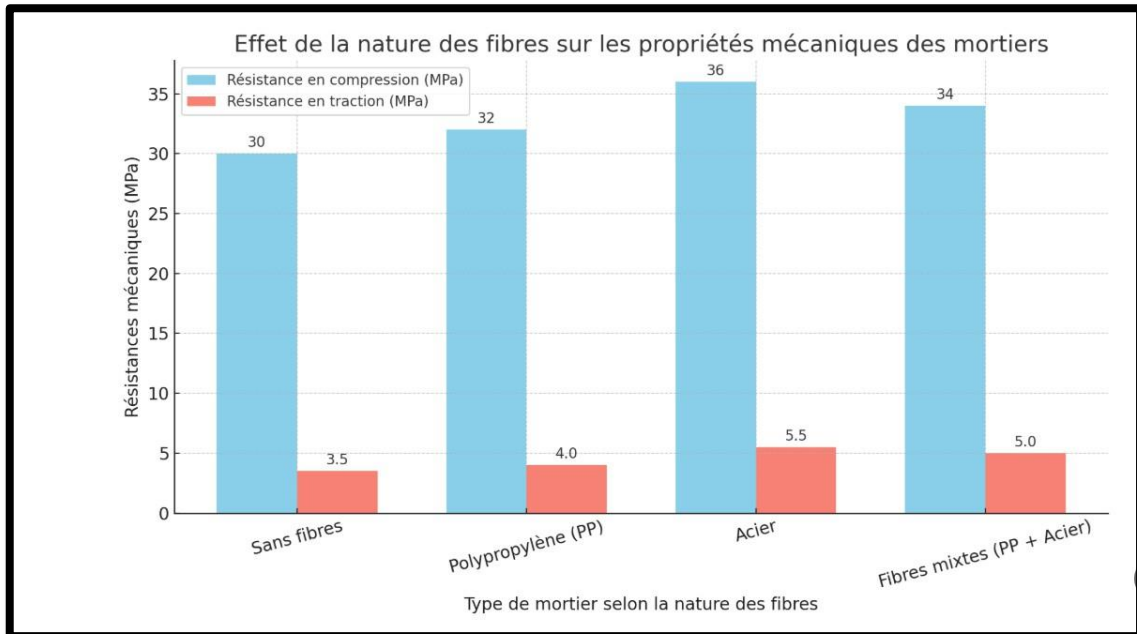


Figure II.1 : L'effet de la nature des fibres sur la résistance des mortiers (Ezziane et al. 2015).

II.2. L'ouvrabilité des mortiers fibrés:

L'ouvrabilité est l'aptitude du mortier à se mettre facilement en place dans les coffrages et à enrober les armatures. L'ouvrabilité est estimée grâce aux essais de consistance. L'essai le plus couramment utilisé est le mini-cône.

II.6.2.1 Essai du mini cône :

Le mini-cône est un instrument dont les dimensions sont obtenues par homothétie, à un facteur 1/2, du cône d'Abrams. Il possède un diamètre supérieur de 50 mm, un diamètre inférieur de 100 mm, et une hauteur de 150 mm (Figure II.2). Conçu à l'origine pour les mortiers à base de liants, il sert à évaluer la fluidité des mortiers en mesurant soit leur affaissement, soit leur étalement. Lors de l'essai, le cône est placé au centre d'une plaque en verre, puis rempli de mortier directement prélevé à la sortie du malaxeur. Une fois rempli, on le soulève lentement, ce qui permet de mesurer l'affaissement ou, le cas échéant, l'étalement

du mortier. Dans le cas de l'étalement, la valeur retenue correspond à la moyenne de deux diamètres perpendiculaires mesurés sur la tâche formée (Mesli et charif, 2016).



Figure II.2 : Illustration du mini cône.

II.3.2. Essai rhéologique:

II.3.2.1. La contrainte de cisaillement :

Lors d'un écoulement laminaire en régime de cisaillement, les différentes couches de fluide se déplacent les unes par rapport aux autres. Ce déplacement différentiel engendre des contraintes de cisaillement τ [Pa], agissant tangentiellement à la surface des couches (Poitou et Guillaume, 2001, cité par Adjoudj, 2015). Ainsi, la contrainte de cisaillement peut être définie comme la force exercée par unité de surface du fluide (voir Eq. 2.1).

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (\text{Eq 2.1})$$

Où :

dF : projection de la force de frottement tangentielle.

dS : surface élémentaire d'une couche cisailée.

II.3.2.2 Le taux de cisaillement :

Dans le cas d'un écoulement laminaire, tel qu'un écoulement de type Couette, la distribution des vitesses du fluide dans l'espace entre les deux plans parallèles suit une loi linéaire. L'un

des plans se déplace à une vitesse constante tandis que l'autre reste immobile. Un gradient de vitesse se forme entre les deux plans (Figure II.3).

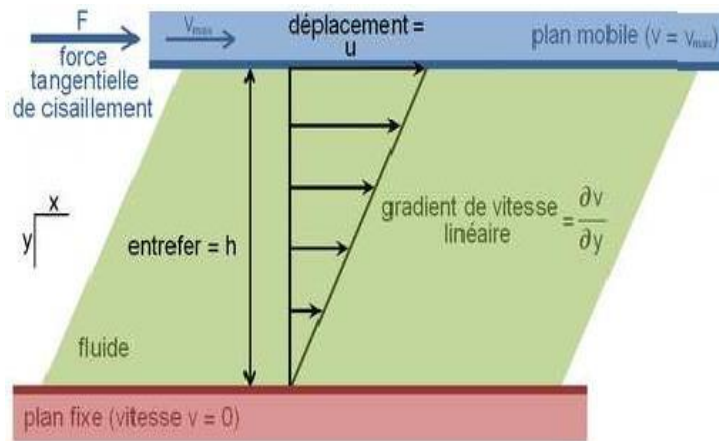


Figure II.3 : Écoulement d'un fluide en régime laminaire, en cisaillement plan.

Le déplacement (γ) entre les deux plans est défini comme la déformation (Eq 2.2)

$$\gamma = \frac{dx}{dy} \quad (\text{Eq 2.2})$$

II.3.2.3. La viscosité :

Lors du mouvement des éléments d'un fluide, une déformation macroscopique nécessite la surmontée de résistances internes locales. Ces résistances internes, également connues sous le nom de dissipations visqueuses, sont provoquées par le déplacement du liquide interstitiel à travers la porosité d'un système granulaire, par effet de friction. La viscosité apparente de la suspension est le reflet des dissipations d'énergie, comme l'indique Yammine (2007). En d'autres termes, la viscosité est une mesure qui indique la résistance au cisaillement ou l'évaluation du frottement d'un fluide. Plus un fluide présente une viscosité élevée, plus sa résistance au mouvement est importante. Dans le cas d'un fluide idéal ou Newtonien, la viscosité dynamique (μ) [Pa.s] est définie comme le coefficient de proportionnalité (la pente de la section linéaire du graphique d'écoulement) entre la contrainte de cisaillement (τ) imposée à une couche fluide et le gradient de vitesse (γ') qui est perpendiculaire au plan de cisaillement, définie par l'équation (Eq.2.3) :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (\text{Eq.2.3})$$

μ : la viscosité dynamique [Pa.s]

$\dot{\gamma}$: le gradient de vitesse

Dans ce contexte, la viscosité représente une propriété du matériau qui ne dépend pas de la vitesse de cisaillement. Elle traduit la résistance que le matériau oppose à l'accroissement de la vitesse de cisaillement (Punkki et autres, 1996). Quand l'écoulement d'une substance est non linéaire, la viscosité change en fonction de la vitesse de cisaillement. On fait alors appel à la notion de viscosité apparente (Edwige, 2010), qui est le cas du flux rhéofluidifiant (pseudo-plastique), et qui se caractérise par une diminution de la viscosité apparente lorsque la vitesse de cisaillement s'accroît, ainsi que du flux rhéoépaississant (dilatant), qui présente une augmentation de la viscosité apparente avec l'élévation de la vitesse de cisaillement. La loi de puissance suivante décrit ces deux sortes de fluides, (Eq 2.4).

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (\text{Eq 2.4})$$

où k représente le facteur de consistance et n l'index de consistance. L'index de consistance « n » est utilisé pour différencier le comportement rhéofluidifiant du rhéoépaississant. Pour n inférieur à 1, on observe un comportement de rhéofluidification, tandis que pour n supérieur à 1, le comportement se caractérise par une rhéoépaississement. Si n égal 1, le comportement linéaire obtenu est de type newtonien (figure II.4).

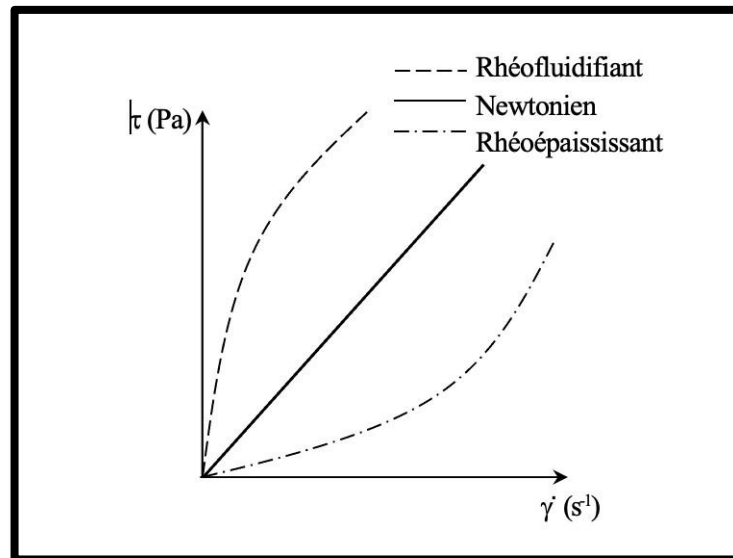


Figure II.4: Comportement parfaitement visqueux la courbe d'écoulement passe par l'origine (Taleb, 2017).

On distingue aussi la viscosité cinématique ν [m²/s] qui s'obtient en divisant la viscosité dynamique par la masse volumique, (Eq 2.5) :

$$\mathbf{V} = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{Eq 2.5})$$

μ : la viscosité dynamique [Pa.s].

ρ : la masse volumique

En règle générale, une viscosité accrue favorise la stabilité du mélange et diminue de manière significative la ségrégation dynamique (Hernandez et al. 2016).

II.3.2.4. Le seuil de cisaillement:

Dans la littérature scientifique, plusieurs terminologies sont utilisées pour désigner le seuil de cisaillement, telles que : seuil de plasticité, seuil de rigidité, contrainte seuil, point de fluage, ou encore simplement seuil de cisaillement. Le seuil de cisaillement, noté τ_0 [Pa], correspond à la contrainte minimale de cisaillement nécessaire pour initier ou arrêter l'écoulement d'un matériau. En deçà de cette valeur, le matériau se comporte comme un pseudo-solide, c'est-à-dire qu'il ne subit pas de déformations permanentes (Evans, 1992).

En revanche, dès que la contrainte appliquée dépasse ce seuil, le matériau adopte un comportement de fluide visqueux, entraînant un écoulement macroscopique irréversible (Coussot et al., 1999) ; (Hackley et al., 2001), comme illustré dans la figure (II.5)

Ce comportement peut être modélisé en intégrant τ_0 au modèle newtonien, ce qui conduit au modèle de Bingham (Eq 2.6). Alternativement, l'ajout de τ_0 à la loi de puissance permet de décrire le modèle de Herschel–Bulkley (Eq 2.7).

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (\text{Eq 2.6})$$

Ou

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (\text{Eq 2.7})$$

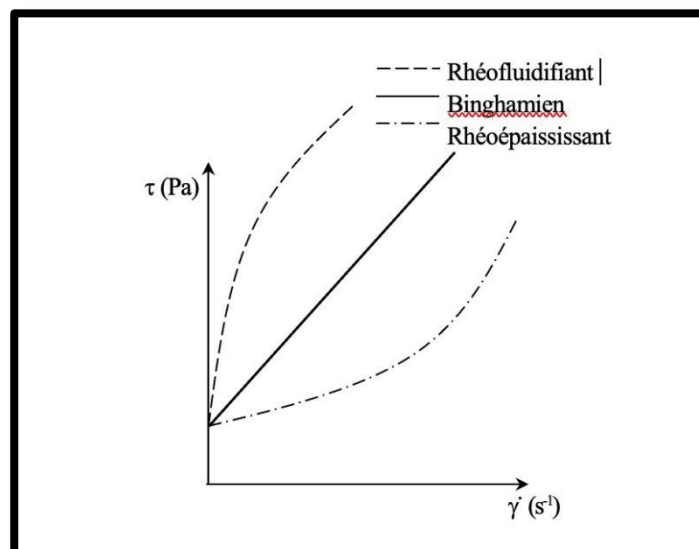


Figure II.5 : Comportement viscoplastique la courbe d'écoulement ne passe pas par l'origine (Taleb,2017).

Le seuil de cisaillement est le résultat soit des interactions électrostatiques entre particules du type Van der Waals, qui se produisent entre des grains colloïdaux de taille micrométrique (pâte), soit du frottement solide entre des grains ayant une dimension millimétrique granulats, (Yasmine, 2007).

Toutefois, ce seuil de cisaillement n'est pas uniquement tributaire du temps, mais également de l'historique du cisaillement (Banfill, 2006). Sur le plan physique, (Wallevik et al. 2011) ont clarifié qu'il n'existe pas de fluide seuil ; cependant, on observe une consistance particulièrement visqueuse sur un étroit intervalle du taux de cisaillement proche de zéro (figure II.6).

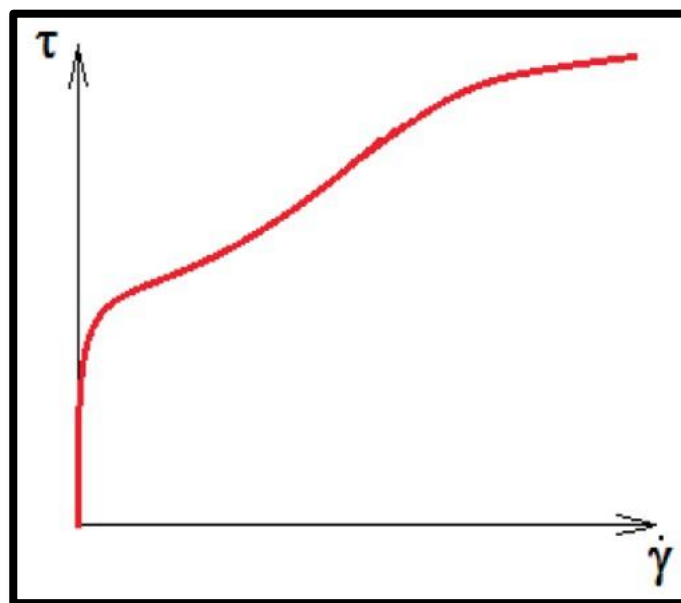


Figure II.6 : Comportement rhéologique des bétons (Wallevik et al, 2011).

Il existe deux concepts de seuil d'écoulement qui ont des interprétations physiques très distinctes (Wallevik, 2003) : - Le seuil de cisaillement statique « τ_s » ou seuil de mise en écoulement représente la contrainte minimale nécessaire pour initier l'écoulement du matériau, caractérisant ainsi le passage de l'état solide à l'état viscoplastique. La détermination du seuil de cisaillement statique se fait sur une suspension totalement structurée et donc exempte de toute sollicitation par le biais d'une contrainte croissante jusqu'à atteindre la valeur provoquant l'écoulement du matériau. La contrainte minimale nécessaire pour mettre fin à l'écoulement est désignée par le seuil de cisaillement dynamique « τ_0 ». On obtient sa valeur en extrapolant la partie linéaire de la courbe d'écoulement pour une vitesse de cisaillement nulle (Amziane et al.,

2011 cité par Tabet, 2012). La technique d'évaluation implique de décomposer intégralement la suspension examinée en appliquant un gradient de vitesse assez important, puis de tracer la courbe d'écoulement en modifiant le gradient de vitesse, et enfin de déduire la valeur de la contrainte à partir du modèle mathématique lorsqu'on considère un gradient de vitesse nul. Ces deux paramètres sont reliés par la relation suivante (Eq 2.8) :

$$\tau_0 = \tau_0 + \tau_{ad} \quad (\text{Eq 2.8})$$

Où τ_{ad} est la résistance additionnelle causée par la variation de l'empilement des particules.

II.3.2.5. Rhéomètre à mortier:

Les rhéomètres sont des appareils utilisés pour mesurer le seuil de cisaillement des matériaux cimentaires. Ces instruments permettent aussi d'établir les courbes d'écoulement des matériaux testés, ce qui permet de déterminer leur viscosité et de déduire le comportement du béton ou du mortier (Belaidi, 2021). Les rhéomètres sont généralement dotés de géométries rotatives et se classent selon leurs modes de fonctionnement : cylindres coaxiaux, cône-plan, ou plans parallèles. Ils se composent d'un récipient fixe, où le béton ou le mortier testés sont introduit, et d'un axe rotatif équipé d'un outil de mesure (souvent une pâle d'agitateur). La rotation de cet outil permet de cisailier le matériau.

Soualhi et ses collaborateurs (Soualhi et al., 2012 ; Soualhi, 2014), ont développé un rhéomètre spécialement conçu pour la caractérisation des bétons frais et des mortiers (figure II.7). Ce dispositif se caractérise par sa facilité de mise en œuvre, de son coût modéré, ainsi que de la précision et de la fiabilité des mesures qu'il permet d'obtenir, aussi bien en laboratoire que sur chantier.



Figure II.7 : Dispositif de l'essai rhéologique (Belaidi et al., 2021).

Le principe de l'essai consiste à mettre en rotation à différentes vitesses (Figure II.8) une pâle de diamètre 25 mm et de hauteur de 100 mm (Figure II.9) dans un échantillon cylindrique de mortier frais et de mesurer le couple appliqué.

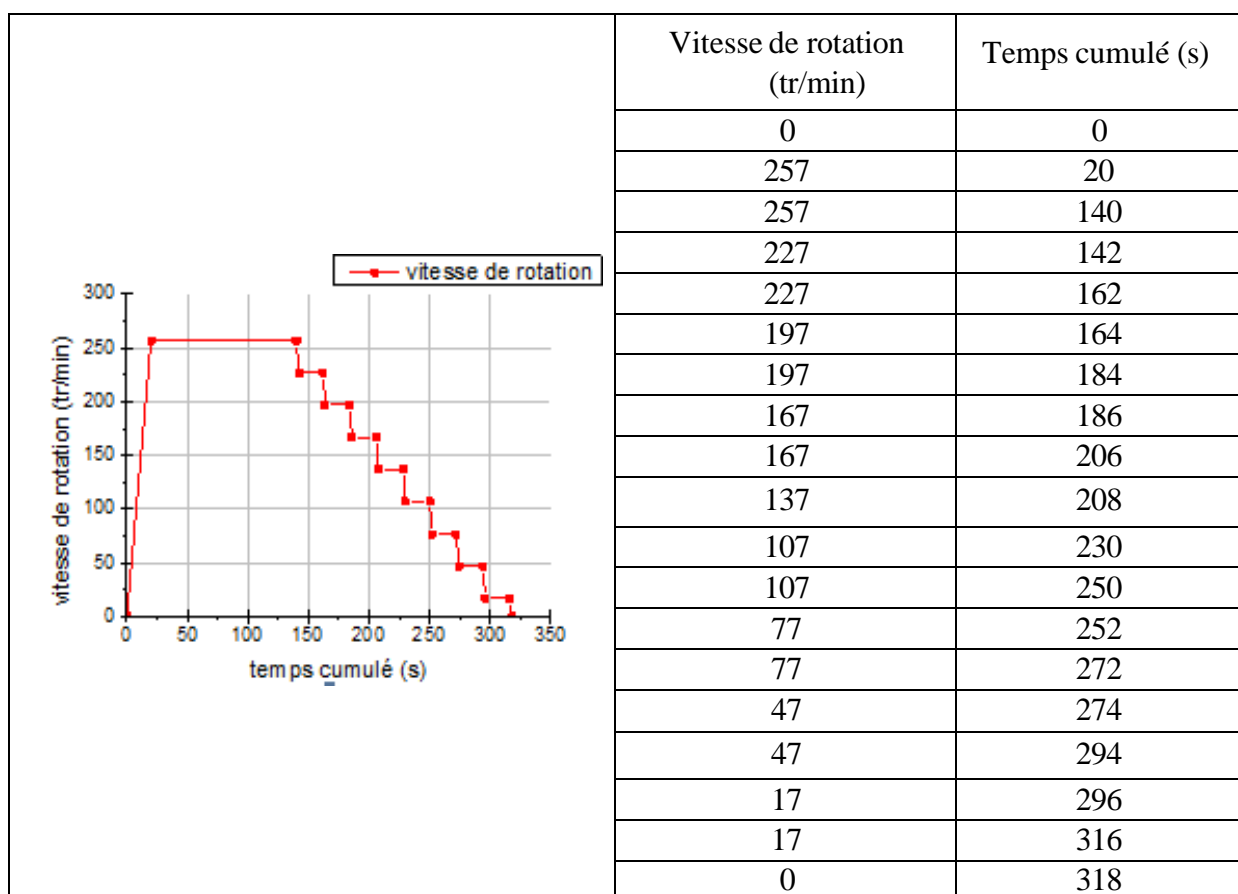


Figure II.8 : Profil de vitesse imposé (belaidi et brixi ,2014).



(a) Pâte pleine



(b) Pâte en forme de double U

Figure II.9 : Les deux pâtes testées.

Le récipient est caractérisé par un diamètre de 50 mm et une hauteur de 130 mm (Figure II.10).

**Figure II.10 : Illustration de récipient du rhéomètre.**

L'essai rhéologique se fait avec les étapes suivantes :

- ✓ 1^{ère} étape : mesure des couples à vide (M_{vide}). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est vide.

- ✓ 2^{ème} étape : remplissage du mortier dans le récipient. Il s'effectue en deux couches. Chaque couche reçoit 10 coups de piquage à l'aide d'une tige identique à celle utilisée dans l'essai mini cône [EN 12350-2].
- ✓ 3^{ème} étape : positionnement de la pôle. Elle est centrée (suivant le diamètre du récipient) puis plongée au milieu du mortier jusqu'à l'arase du mortier.
- ✓ 4^{ème} étape : mesure des couples totaux (M_{total}). Ils correspondent aux couples à imposer pour maintenir les vitesses en phase de palier lorsque le récipient est rempli de mortier.
- ✓ 5^{ème} étape : calculs des couples finaux (M). Les couples finaux s'obtiennent par la différence entre les couples totaux et les couples à vides pour chaque palier de vitesse :

$$M = M_{total} - M_{vide} \quad (\text{Eq 2.9})$$

- ✓ 6^{ème} étape : exploitation des mesures et calculs des paramètres rhéologiques, par des équations de passage suivant :

On considère que le comportement des bétons à l'état frais s'apparente à celui d'un fluide viscoplastique à seuil et suit le modèle de Bingham (Eq 2.10).

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (\text{Eq 2.10})$$

Avec :

τ : Contrainte de cisaillement en [Pa]

τ_0 : Seuil de cisaillement en [Pa]

μ : Viscosité en [s^{-1}]

$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement en [Pa.s]

Le modèle de Bingham modifié basé sur le modèle de Hershel-bulkley (Eq 2.11) mais ne contenant que deux caractéristiques rhéologiques indépendantes.

$$\tau = \tau_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad (\text{Eq 2.11})$$

Avec :

τ_0 : le seuil de cisaillement exprimé en (Pa)

K : le coefficient de viscosité

n : l'indice de viscosité

En faisant varier la constante n ainsi que le seuil de cisaillement τ_0 , il est possible de modéliser divers comportements rhéologiques. Exemple, lorsque $n=1$, le fluide présente un comportement de type Bingham. La (figure II.9) illustre de manière schématique les courbes d'écoulement, représentant l'évolution gradient de vitesse en fonction de la contrainte, correspondant aux différentes lois mentionnées précédemment (belaidi a et brixi a ,2014).

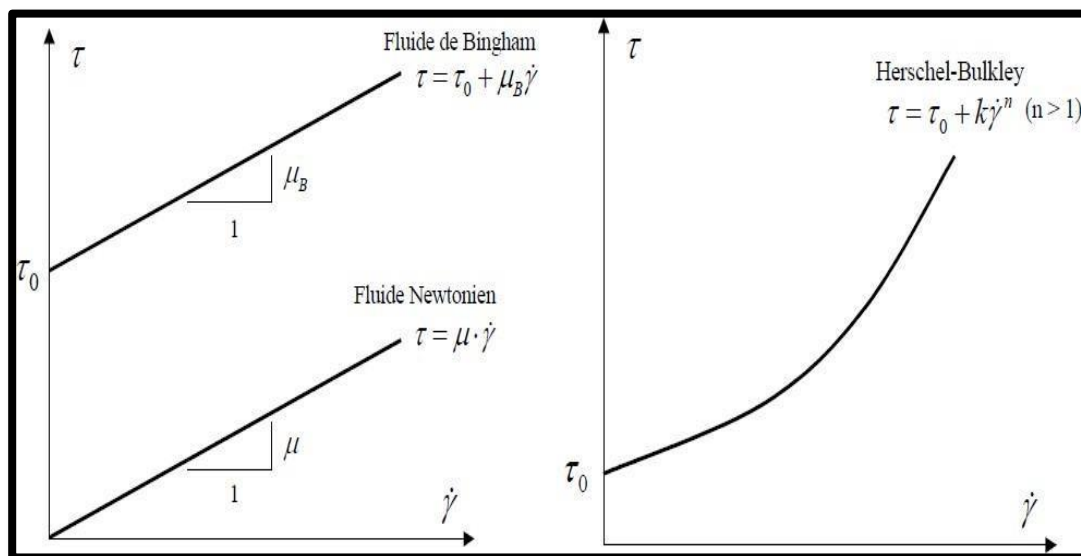


Figure II.11 : Les différents types de modèles d'écoulement. (belaidi a et brixi a ,2014)

II.3.3. L'influence des fibres sur l'ouvrabilité des mortiers:

Abdelrazik et Khayat (2020) ont étudié l'effet des fibres sur la rhéologie des mortiers. Ces auteurs ont constaté une augmentation des paramètres rhéologiques en fonction de l'augmentation du dosage en fibre. Cela a été expliqué par une modification de la structure granulaire et à une diminution de la compacité maximale causée par l'introduction des fibres. De plus, la présence des fibres dans le matériau cimentaires entrave le mouvement des granulats durant le test rhéologique (le cisaillement), ce qui entraîne une augmentation de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement (figure II.12).

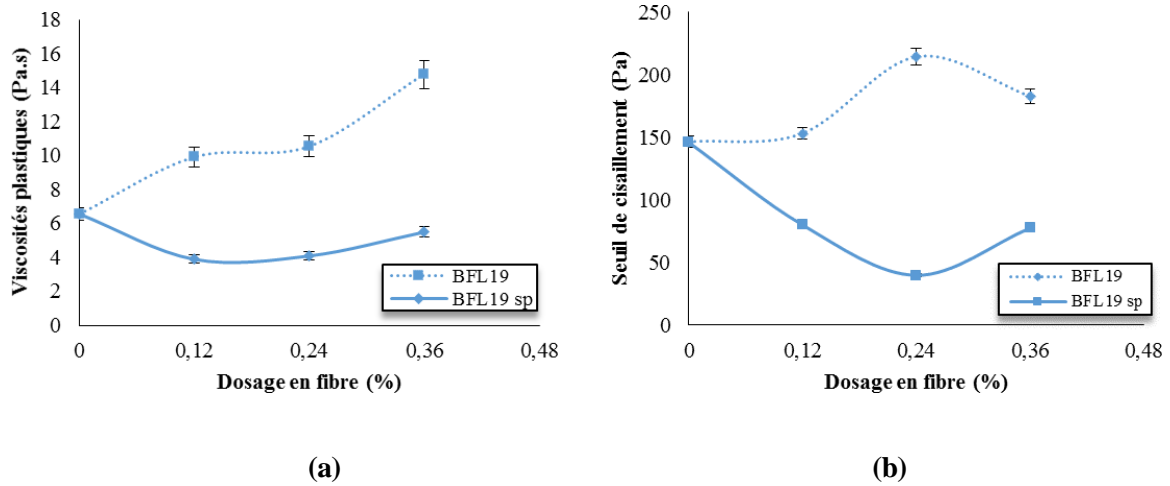


Figure II.12 : L'évolution des propriétés rhéologiques, viscosité plastique (a) et seuil de cisaillement (b) en fonction de dosage en fibre (Abdelrazik et Khayat, 2020).

Ils ont remarqué aussi que l'introduction des fibres à un dosage de 0,5 % induit une augmentation des paramètres rhéologiques d'environ 50 % (Abdelrazik et Khayat, 2020).

Selon une étude récente menée par Allioui et Mehdi (2024), l'incorporation de fibres métalliques dans les mortiers réduit le diamètre d'étalement (Figure II.13). Cette recherche a mis en évidence qu'aux dosages élevés en fibres, des agglomérats de fibres se forment en raison d'une concentration locale importante, empêchant ainsi une distribution uniforme des fibres dans le mélange.

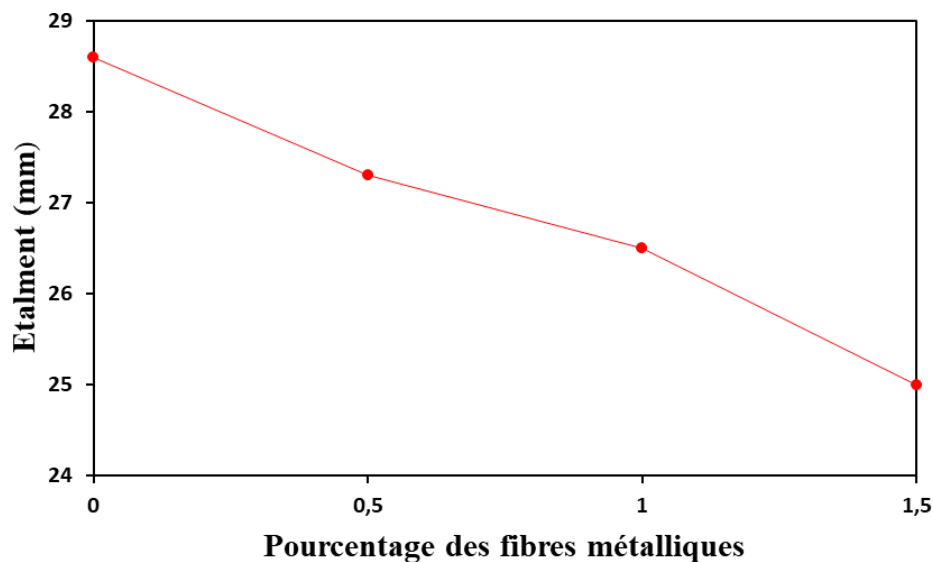


Figure II.13: Variation de l'étalement en fonction de pourcentage de fibres (Allioui et Mehdi, 2024).

Bensaid et al. (2009) ont révélé une forte corrélation entre l'orientation des fibres et le seuil de cisaillement. Ils ont observé qu'un seuil de cisaillement faible (inférieur à 50 Pa) assure une distribution homogène et une orientation perpendiculaire à l'écoulement. En revanche, pour un seuil élevé (supérieur à 100 Pa), la distribution ainsi que l'orientation deviennent moins homogènes, entraînant la formation d'amas fibreux (Figure II.14).

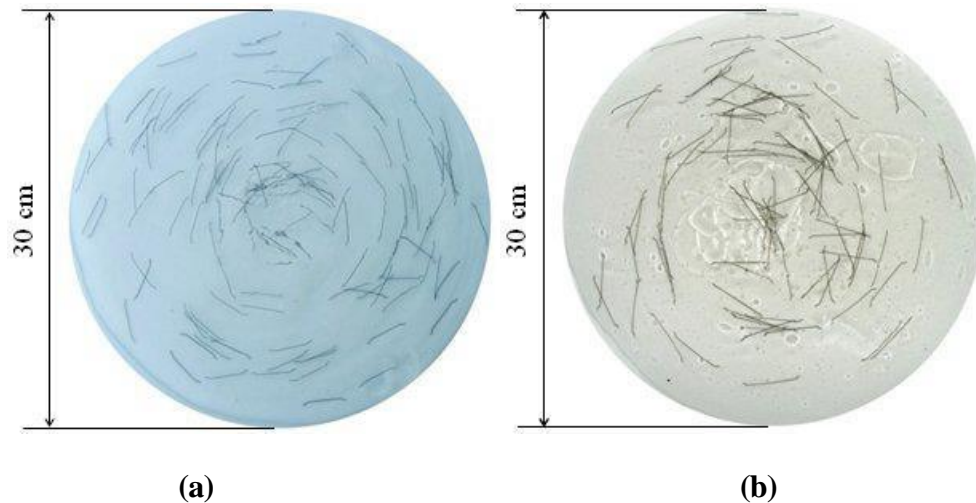


Figure II.14: Orientation des fibres métallique en fonction du seuil de cisaillement





(a) $\tau_0 = 25$ Pa ; (b) $\tau_0 = 70$ Pa (Bensaid et al., 2009).

II.4. Comportement mécanique des mortiers fibrés:

Le comportement mécanique des mortiers renforcés par des fibres constitue un domaine complexe, en raison de l'interaction de multiples facteurs, eux-mêmes influencés par diverses variables. Cette complexité rend l'analyse de ce matériau composite particulièrement délicate.

Les fibres, en tant qu'éléments solides et flexibles, jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de la résistance mécanique du mortier. Leur intégration permet de compenser la fragilité intrinsèque du matériau en limitant l'initiation et la propagation des microfissures. Ce renforcement fibreux confère au mortier une meilleure ductilité, réduit le retrait et améliore significativement sa capacité à résister aux efforts mécaniques tout en minimisant l'apparition des fissures. L'action des différents types de fibres sur le mortier est regroupée dans le (Tableau II.1).

Tableau II.1 : Effets et propriétés des différents types des fibres.

Type de fibres	Effet de la teneur d'incorporation	Propriétés clés	Aspect
Fibre d'acier	Améliore résistance à la traction et ductilité.	Très résistante, améliore la ténacité	
Fibre de verre	Peut améliorer résistance, mais sensible à l'environnement alcalin	Légère, résistante, mais fragile chimiquement	
Fibre polymère (PP, PE)	Limite la fissuration plastique	Très légère, bonne dispersion, faible module	
Fibre végétale (chanvre, coco...)	Bio-compatible, mais faible durabilité.	Renouvelable, faible coût, dégradable	

Les propriétés mécaniques de mortier sont influencées par plusieurs paramètres. Ces paramètres sont regroupés dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : Les paramètres influant sur la résistance mécanique.

Rapport E/C	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation du rapport E/C : diminue la résistance mécanique, augmente la porosité. - Rapport faible : meilleure résistance, mais difficulté de mise en œuvre.
Nature du ciment	<ul style="list-style-type: none"> - Ciments différents influencent la prise, la résistance et la durabilité. - Ciment Portland : résistance standard, durabilité. - Ciments spéciaux : propriétés spécifiques (rapide, haute résistance, etc.).
Effet du temps	<ul style="list-style-type: none"> - La résistance augmente généralement avec le temps jusqu'à un certain point. - La prise et le durcissement évoluent, influençant la performance finale.
Effet de la température	<ul style="list-style-type: none"> - Températures élevées accélèrent la prise, mais peuvent causer des fissures. - Températures basses ralentissent le durcissement, pouvant affecter la résistance.
Effet du malaxage	<ul style="list-style-type: none"> - Un malaxage adéquat assure une homogénéité, meilleure cohésion et résistance. - Malaxage insuffisant ou excessif peut compromettre la qualité du béton.
Effet de la vibration	<ul style="list-style-type: none"> - Favorise la consolidation, réduit les vides d'air, augmente la densité. - Une vibration excessive peut entraîner des ségrégations ou des fissures.

Selon la littérature, les recherches ont porté au premier lieu sur l'amélioration des performances mécaniques des matériaux cimentaires par l'incorporation de fibres, notamment en ce qui concerne la résistance à la compression et à la flexion (Meddah, 2014). Toutefois, l'ajout de fibres permet de diminuer la propagation des fissures en limitant leur profondeur, ce qui se traduit par un comportement mécanique globalement renforcé. En effet, les fibres

Améliorent la cohésion du béton frais, augmentent la ductilité et optimisent le comportement post-fissuration. Elles contribuent également à limiter les effets du retrait en cousant les microfissures, ce qui a pour effet de préserver la résistance mécanique à long terme. Par ailleurs, le mortier renforcé de fibres présente de meilleures performances en compression (figure II.15).

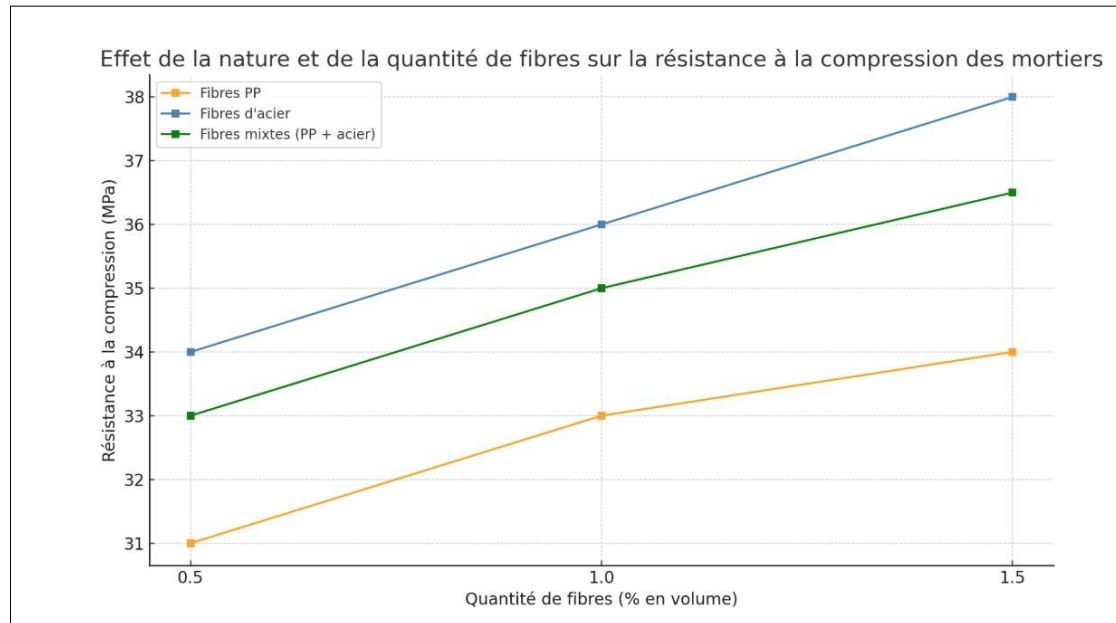


Figure II.15 : Effet de la nature et la quantité de fibre sur la résistance à la compression (Setti, 2012).

II.5. Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques :

Ezziane et al., (2015) ont étudié l'effet de l'incorporation des fibres métallique sur vitesse de propagation des ondes ultrasonores des mortiers en utilisant un système SOFRANEL 5800 PR, avec des transducteurs piézoélectriques émetteur-récepteur à fréquence d'harmonie de 0,5 MHz. Les valeurs moyennes de vitesse mesurées en présence et en absences des fibres d'acier dans un mortier normal sont représentées dans le (Tableau II.3).

Ces chercheurs ont remarqué, que les fibres d'acier augmentent légèrement la vitesse de propagation des ondes ultrasonores par rapport au mortier de référence (MN).

Tableau II.3: La Vitesse moyenne de propagation des ondes ultrasoniques (Ezziane et al., 2015).

Type de mortier	Vitesse moyenne (m/s)
MN (mortier non fibré)	4535 ± 20
Mortier fibré d'acier	4705 ± 20

À ce sujet, Allioui et Mehdi (2024) ont confirmé la règle selon laquelle l'augmentation du dosage en fibres s'accompagne toujours d'une augmentation de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores (UPV), et ce, quel que soit l'âge du mortier (Figure II.16).

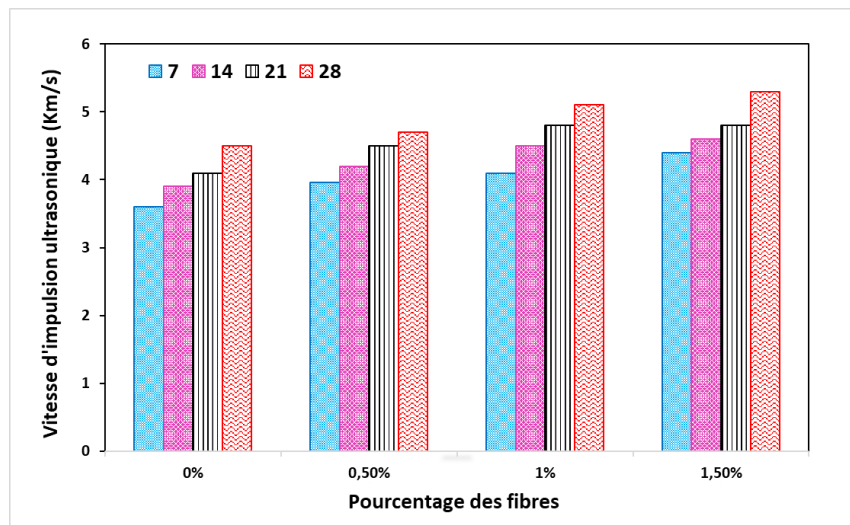


Figure II.16: Variation de la vitesse ultrasonique des mortiers fibrés en fonction de l'âge du mortier (Allioui et Mehdi ; 2024).

II.6. Conclusion :

Ce chapitre a éclairci de manière significative l'influence des fibres métalliques sur le comportement des mortiers à l'état frais et durci. Les notions fondamentales, à savoir la

contrainte de cisaillement, la viscosité, le seuil d'écoulement, le taux de cisaillement, ont été définis dans ce chapitre.

La présence de fibres change le comportement rhéologique des mortiers en lui appliquant une augmentation de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement, impliquant une structure plus résistante à l'écoulement. La raison en est une limitation sur glissement des particules granulaires et des mélanges compacts. Ajoutant à cela, l'effet de l'orientation des fibres sur les paramètres rhéologiques. Cette revue de la littérature a mis en évidence l'existence de taux de fibres optimaux qui améliorent l'ouvrabilité des mélanges. Elle révèle également qu'une introduction excessive de fibres métalliques (au-delà de 1,5%) entraîne la formation d'agglomérats. Cette concentration locale importante empêche une distribution uniforme des fibres, ce qui gênerait le bon déroulement des essais rhéologiques. Il est donc crucial de choisir avec soin le dosage des fibres métalliques pour éviter ces problèmes lors des tests rhéologiques.

D'un point de vue mécanique, les fibres jouent un rôle important car ils modifient non seulement la résistance du mortier, mais aussi diminuer la propagation des fissures en limitant leur profondeur.

L'étude bibliographique a montré ainsi que la vitesse de propagation des ondes ultrasonores est influencée par la présence des fibres métallique.

**CHAPITRE III : CARACTERISATION DE
MATERIAUX.**

III.1 Introduction :

Pour entamer une formulation, il faut d'abord commencer par la connaissance des matériaux utilisés. Les caractéristiques de ces matériaux sont déterminées au moyen de certain nombre d'essais normalisés. Dans ce chapitre, nous exposons les caractéristiques des matériaux utilisés pour la formulation d'un mortier à différent pourcentage en fibres métalliques tout en déterminant leur comportement rhéologique.

III.2 Matériaux utilisés :

Dans ce paragraphe, on présente les matériaux employés (en ciment, sable, adjuvant et fibres métalliques), les différentes formulations étudiées et les différents essais permettant d'étudier les propriétés physiques et mécaniques des mortiers.

III.2.1 Ciment :

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 conforme à la norme Algérienne (NA 442, 2000). Il est constitué de 85% de clinker, 12 % de pouzzolane naturelle et 3% de gypse. Il a été fabriqué à la cimenterie de Béni-Saf sis à Ain-Temouchent. Son analyse chimique faite à l'usine est présenté dans le (Tableau III.1).

Tableau III. 1: Composition chimique du ciment (Belaidi, 2021).

Composition chimique	Teneur (%)
SiO ₂	27,95
Al ₂ O ₃	5,43
Fe ₂ O ₃	3,05
CaO	56,37
MgO	0,71
SO ₃	2,53
Na ₂ O	0,30
K ₂ O	0,43
CaOFree	0,75
Perte au feu	3,11
C ₃ S	55,65
C ₂ S	20,18
C ₃ A	9,77
C ₄ AF	9,5

III.2.1.1 Essais de la surface spécifique de Blaine (SSB) :

Le test de Blaine est une méthode de mesure de la finesse du ciment par la surface développée par unité de masse, elle est généralement exprimée en (cm^2/g) . Le but de cet essai est la détermination de la surface spécifique Blaine en fonction du temps en utilisant l'appareil de Blaine, également appelé « perméabilimètre de Blaine » (Figure III.1) selon les spécifications de la norme européenne EN 196-6.



(a)



(b)

Figure III.1: Essai de surface spécifique utilisant le perméabilimètre de Blaine

III.2.1.2 Masse volumique du ciment (apparente et absolue) :

La masse volumique apparente du ciment correspond à la masse rapportée à l'unité de volume total, incluant les vides intergranulaires ainsi que les pores ouverts et fermés. En revanche, la masse volumique absolue représente la quantité de matière contenue dans un volume donné, sans considérer les espaces vides entre les particules. Elle est exprimée en (g/cm^3) et sert à définir la densité propre du ciment (Figure III.2).



Figure III.2 : Détermination de la masse volumique absolue de ciment utilisant le Toluène.

Les résultats obtenus pour la masse volumique et en surface de Blaine du ciment sont regroupés dans le (tableau III.2).

Tableau III. 2: La masse volumique apparente et absolue du ciment.

La masse volumique apparente (Kg/m^3)	932
Masse volumique absolue (kg/m^3)	3142
Surface spécifique de Blaine (cm^2/g)	3956

III.2.2 Le sable :

Le sable utilisé dans cette étude est fournis par la carrière de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) Sid-Abdelli sis à Tlemcen, de classe 0/4, ses caractéristiques physiques sont représentées dans le (Tableau III.3).

III.2.2.1 La masse volumique apparente et absolue :

Afin de caractériser notre sable, nous avons déterminé sa masse volumique apparente (Figure III.3) et absolue (Figure III.4), conformément à la norme NA EN 1097-6.

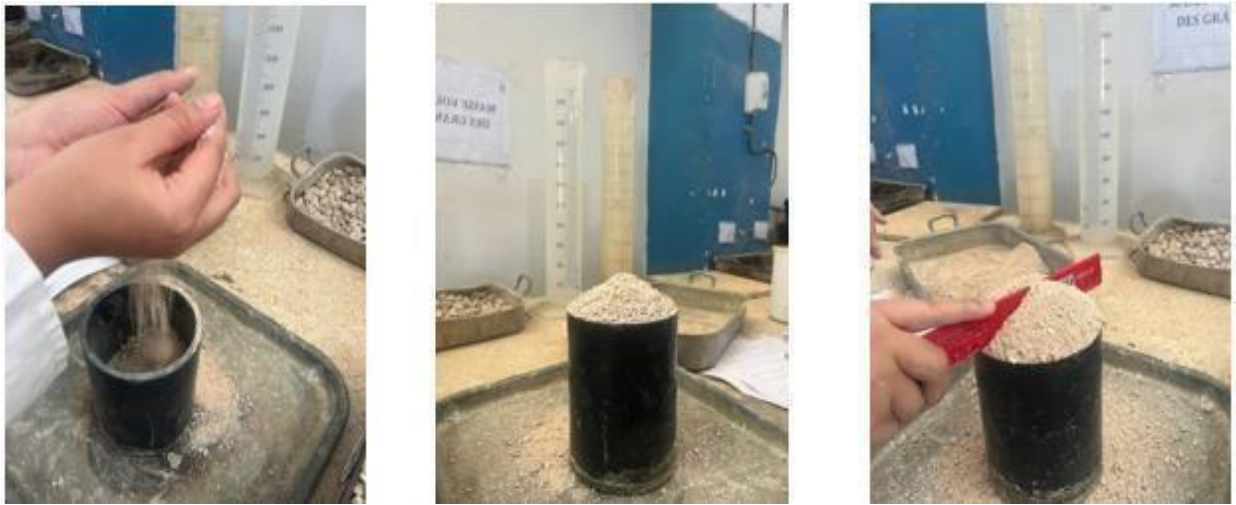


Figure III.3 : Essai de détermination de la Masse volumique apparente du sable.



Figure III.4 : Essai de détermination de la Masse volumique absolue du sable.

III.2.2.2 Équivalent de sable :

L'équivalent de sable est un indicateur caractérisant la propreté d'un sable. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains (Figure III.5).

Nous avons étudié la propreté de sable selon la norme NF EN 933-8. Les résultats (ES) sont regroupés dans le (tableau III.4).

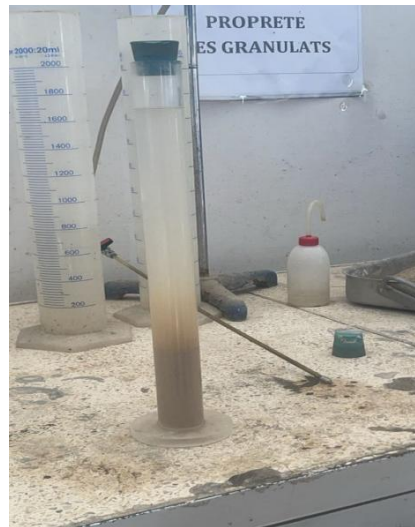


Figure III.5 : L'éprouvette d'essai d'équivalent de sable.

III.2.2.3 Analyse granulométrique :

La courbe granulométrique du sable peut être déterminée par un essai de tamisage réalisé conformément à la norme NF EN 933-1. Cet essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon à l'aide d'une série de tamis emboîtés les uns sur les autres, dont les ouvertures sont de dimensions décroissantes de haut en bas. Le matériau à analyser est placé dans la partie supérieure de la colonne de tamis, et le classement des grains est obtenu par vibration de l'ensemble. Les résultats de l'analyse granulométrique du sable sont regroupés dans le Tableau III.3 et représentés graphiquement sur la (Figure III.6).

Tableau III. 3: Résultat de l'analyse granulométrique du sable.

Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus mi (g)	Masse des refus cumulés Mc (g)	Pourcentage des refus cumulés Rc (%)	Pourcentage des tamisats cumulés Tc (%)
6,3	1	1	0,1	99,9
5	2	3	0,3	99,7
4	10	13	1,3	98,7
3,15	52	65	6,5	93,5
2,5	83	148	14,8	85,2
2	85	233	23,3	76,7
1,6	79	312	31,2	68,8
1,25	66	378	37,8	62,2
1	51	429	42,9	57,1
0,8	30	459	45,9	54,1
0,63	47	506	50,6	49,4
0,5	52	558	55,8	44,2
0,315	150	708	70,8	29,2
0,250	9	717	71,7	28,3
0,2	45	762	76,2	23,8
0,16	30	792	79,2	20,8
0,125	37	829	82,9	17,1
0,080	24	853	85,3	14,7
Fond	147	1000	100	0

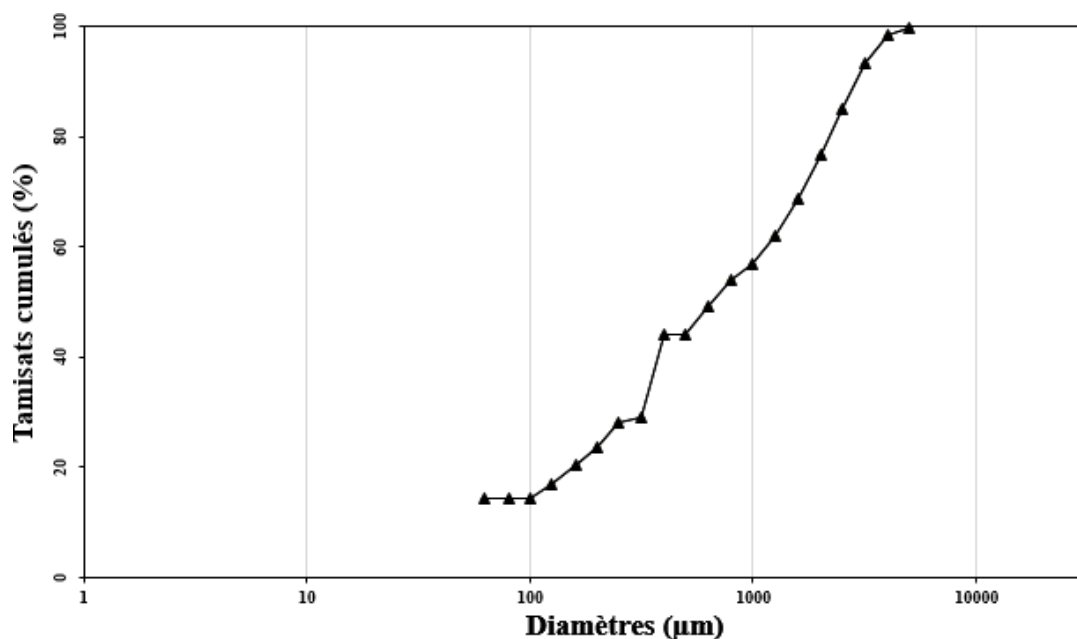


Figure III.6 : Courbe granulométrique.

L'analyse granulométrique de sable a révélé que le pourcentage des fines est de 15% et le module de finesse (Mf) de 2,5, ceci résulte que c'est un sable préférentiel. Au vue de ces résultats, le sable est conforme aux exigences de la norme NFP 18-540 qui fixe un module de finesse compris entre 2.2 à 2.8 (Tableau III.4).

Ces caractéristiques suggèrent que le sable est bien adapté pour offrir une bonne maniabilité ainsi qu'une meilleure résistance.

Tableau III.4 : Caractéristiques physiques du sable.

Mv apparente (Kg/m ³)	1508	
Mv absolue (Kg/m ³)	méthode de l'éprouvette graduée	2550
	La méthode du ballon	2800
Équivalent de Sable (%)	ESV	68
	ESP	61,5
Module de finesse	2,5	
% des fines	15	

L'équivalent de sable obtenu en utilisant le piston est égale à 61,5%. Ce qui montre que le sable est légèrement argileux de propreté admissible convenant parfaitement pour les mortiers de bonne qualité.

III.2.3 Les adjuvants :

Pour l'élaboration de nos mortiers, nous avons recours à un superplastifiant basé sur les polycarboxylates de nouvelle génération, ce qui nous permet de produire des mortiers fluides avec des proportions E/C très basses. Ce produit additif est adapté à tous les types de ciment et il est vendu sous la dénomination « SUPERIOR9WG». Ses propriétés physiques sont résumées dans le (Tableau III.5).

Tableau III.5 : Caractéristiques du superplastifiant.

État physique	Liquide
Couleur	Brun
Densité (g/cm³, à 20 °C)	1,10 (± 0,03)
PH (20 °C)	5,5 (± 1)
Extrait sec	33 % (± 2 %)
Teneur en chlorures	≤ 0,1 %

III.2.3.1 Dosage de saturation :

III.2.3.1.1 La méthode du mini cône :

La méthode du mini cône consiste à évaluer le dosage de saturation en superplastifiant SP à travers un essai d'étalement sur une très petite quantité de pâte de ciment en utilisant le cône présenté à la (Figure III.7).



Figure III.7 : Essai du mini cône.

Les résultats trouvés de l'étalement en fonction des différents dosages de saturation en adjuvants sont représentés sur (la figure III.8). D'où, le dosage de saturation optimal en superplastifiant a été déterminé à 0,7% (Tableau III.6).

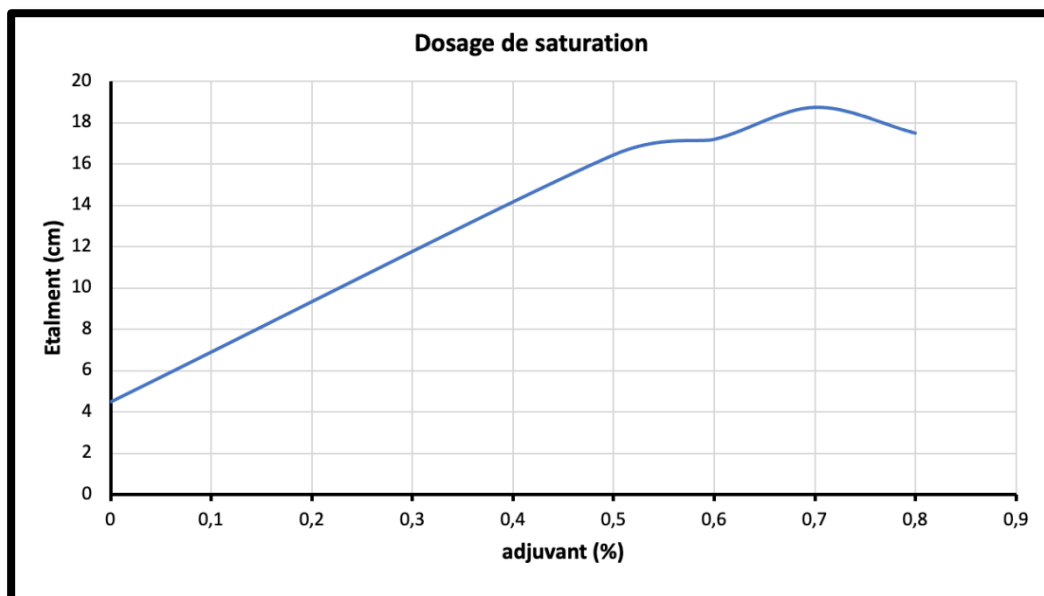


Figure III. 8 : Graphe de dosage de saturation (méthode mini cône).

III.2.3.1.2 L'essai de cône de Marsh :

Le test du cône de Marsh (Figure III.9) est une méthode fiable et simple pour étudier les propriétés rhéologiques des ciments et des mortiers. Le temps d'écoulement du ciment / mortier à travers le cône du Marsh est un indicateur de la viscosité, qui dépend de la compatibilité du super plastifiant du ciment. Il est largement utilisé pour étudier la compatibilité du plastifiant de ciment et pour déterminer le dosage optimal de super plastifiant de la combinaison de ciment/super plastifiant ((Tableau III.6).



Figure III.9 : Cône de marsh.

Tableau III. 6 : Résultat des deux essais en adjuvant.

Dosage de super plastifiant (%)	0.5%	0.6%	0.7%
Temps d'écoulement(s)	206	177	188

Grâce aux résultats obtenus, nous avons déterminé que le dosage de saturation en superplastifiant est de 0,7 %, ce qui a été confirmé par l'essai au mini-cône, une méthode reconnue pour sa précision. En effet, au-delà de 0,7 %, une fluidité excessive du mélange accompagnée de l'apparition de laitance de ciment a été observée.

Par ailleurs, l'essai au cône de Marsh a indiqué un dosage de saturation de 0,6 %, car le temps d'écoulement diminue jusqu'à 0,6 % puis augmente à 0,7 %, suggérant un seuil optimal à ne pas dépasser.

Sur la base de ces résultats, nous avons initialement choisi de travailler avec un dosage de 0,7 %. Cependant, lors de la formulation du mortier, celui-ci s'est révélé trop ferme, ce qui nous a conduits à augmenter le dosage à 1,3 %. Ce constat met en évidence l'importance d'un ajustement du dosage optimal, qui peut varier en fonction de la composition du mélange (Bonen et al., 2005 ; Pan, 2011).

III.2.4 Les fibres métalliques:

Les fibres métalliques utilisés dans notre étude sont connus sous l'appellation « Fibertek A » et sont fabriquées par étirage à froid de fil d'acier à haute résistance, avec une forme de bâtonnets métalliques avec des crochets aux extrémités qui facilitent l'adhérence à la matrice cimentaire. Elles sont conçues pour le renforcement structurel du béton et peuvent être fournies en version galvanisée selon les besoins. Ces fibres assurent une résistance accrue aux chocs, vibrations et charges concentrées. Leur répartition homogène dans le mortier permet de remplacer l'armature secondaire et de limiter la propagation des fissures. Elles sont disponibles en plusieurs longueurs et diamètres, et s'adaptent à de nombreux domaines d'application, notamment les sols industriels, tabliers, béton projeté, éléments préfabriqués, ou encore les structures hydrauliques. Les caractéristiques des fibres utilisées dans notre étude sont résumées dans le (tableau III.7).

Tableau III. 7 : Caractéristique des fibres métalliques.

Caractéristiques	Détails
Matériau	Acier haute résistance
Format	À crochet
Section	Circulaire
Longueur (L)	50 mm \pm 10 %
Diamètre du fil (de)	1 mm \pm 10 %
Rapport d'aspect (L/de)	50
Tension à la rupture	1100 – 2700 N/mm ²
Allongement à la rupture	< 4 %

II.2. Formulation du mortier fibré normal :

Dans cette étude, nous avons formulé des mortiers standard selon la norme EN 196-1 avec et sans fibres métalliques, en faisant varier leur taux d'incorporation à 0 %, 0,5 %, 1% et 1,5% par rapport au volume total du mortier (Tableau III. 8). Nous avons limité le dosage à 1,5 % afin d'éviter une perte significative de l'ouvrabilité des mortiers et d'assurer le bon déroulement des essais rhéologiques.

Tableau III. 8: Formulations des mortiers fibrés selon la norme EN 196-1

Désignation	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	Superplastifiant (% du ciment)	Masse des fibres métalliques (g)
Mortier 0%	450	1350	225	1,3 %	0
Mortier 0.5%	450	1350	225	1,3 %	33
Mortier 1%	450	1350	225	1,3 %	66
Mortier 1.5%	450	1350	225	1,3 %	100

Il convient de souligner que le dosage en adjuvant n'est pas celui de saturation. En effet, le mortier formulé avec 0,7% d'adjuvant présente une consistance ferme. Cela est probablement dû au taux élevé de fines dans le sable. Pour y remédier, des essais préliminaires ont été effectués sur le mortier de base (sans fibres). Le dosage en adjuvant a été varié de 0,7% à 1,3%, par pas de 0,1%, jusqu'à l'obtention d'un mortier fluide. C'est ce dosage en adjuvant (1,3%) qui a ensuite été préconisé pour formuler l'ensemble des mortiers étudiés.

III.4 Essai de la résistance mécanique :

III.4.1 Confection des éprouvettes prismatiques :

Des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16$) cm³ des mortiers (Figure III.10) sont confectionnées et maturées dans l'eau pendant 7, 14 et 28 jours pour les essais mécaniques de compression et de traction par flexion.



Figure III.10 : Éprouvettes prismatiques des mortiers.

III.4.2 Essais de compression et de traction par flexion :

Les propriétés mécaniques des mortiers ont été évaluées à travers des essais de flexion et de compression. Les résistances à la traction par flexion ont été mesurées à 7, 14 et 28 jours à l'aide d'un banc d'essai didactique (Figure III.11a) avec une vitesse constante de 0,5 kN/s. L'essai a été réalisé selon le dispositif de flexion en trois points, adapté à l'appareillage utilisé. Par ailleurs, les résistances à la compression ont été déterminées aux âges de 7, 14 et 28 jours à l'aide d'un banc d'essai didactique, équipé d'une presse hydraulique capable d'appliquer des charges allant jusqu'à 160 kN, avec une vitesse constante de 1 kN/s (Figure III.11b). Pour chaque formulation de mortier, la contrainte maximale atteinte a été considérée comme la résistance à la compression.



Figure III. 11 : Essais mécaniques en: (a) traction par flexion et (b) compression.

III.4.3 La vitesse d'impulsion d'ultrason :

L'essai d'auscultation dynamique connu sous le nom d'essai ultrasonique est une méthode non destructive. Il consiste à déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales à l'aide d'un émetteur et d'un récepteur (Figure III.12). Ces essais ont été effectués selon l'ASTM C597-22 sur des éprouvettes de mortiers 4x4x16 cm³ avec et sans fibres métalliques, permettant de déterminer la résistance du mortier et les diverses irrégularités que peut présenter le mortier (fissures, cavités ...). On calcule la vitesse de propagation selon l'expression suivante :

$$V=L/t \quad (\text{Eq 3.1})$$

Avec : V : la vitesse des ondes (m/s).

L : la longueur de parcours (mm).

t : le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur (μs).

On en déduit le module d'élasticité dynamique (Ed) selon la norme ASTM C 215-02 2003 :

$$E_d = \frac{v^2 (1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (\text{Eq 3.2})$$

ρ : masse volumique de mortier (kg/m³).

ν : coefficient de poisson de mortier.

v : vitesse du son (km/s).

E_d : module d'élasticité dynamique exprimé en MPa



Figure IV.12 : Essai d'ultrason sur des éprouvettes de mortiers.

III.5 Conclusion :

Ce chapitre a présenté les matériaux utilisés, leur composition, ainsi que la démarche expérimentale suivie dans le cadre de cette étude. Nous avons décrit les principales caractéristiques des matériaux et détaillé la méthodologie, en expliquant les essais réalisés et les normes utilisées pour évaluer les mortiers à l'état frais et durci. Cette approche méthodique vise à fournir une base solide pour l'analyse des résultats expérimentaux dans le chapitre suivant.

**Chapitre IV : Présentation et Interprétation des
Résultats.**

IV.1. Introduction :

L'étude des caractéristiques à l'état frais du mortier fibré permet d'évaluer sa maniabilité, sa résistance. Ces propriétés sont essentielles pour garantir une bonne mise en œuvre sur chantier.

IV.2. Caractérisation des mortiers fibrés à l'état frais :

a- Essais d'affaissement (étalement) au mini cône à mortier :

La consistance et la maniabilité des mortiers frais ont été évaluées à l'aide du cône à mortier (Figure IV.1). Ce cône, de 150 mm de hauteur, présente un diamètre supérieur de 50 mm et un diamètre inférieur de 100 mm. Après malaxage, le mortier est versé dans le cône, préalablement positionné au centre d'une table à surface lisse. Une fois le cône rempli, il est soulevé lentement pour permettre la mesure de l'affaissement ou de l'étalement. Il est à noter que les résultats d'étalement correspondent à la moyenne des deux mesures de diamètres perpendiculaires.

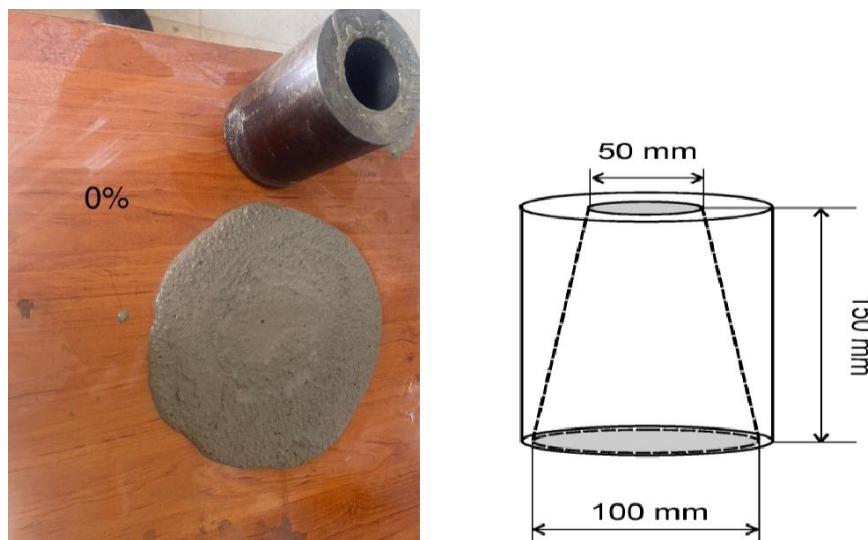


Figure IV.1: Essai d'étalement au cône à mortier.

La (Figure IV.2) présente l'évolution de l'étalement (en mm), indicateur de l'ouvrabilité des mortiers étudiés, en fonction du pourcentage de fibres ajoutées métalliques (0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 %). Ces résultats montrent que le mortier sans fibres affiche un étalement d'environ 265 mm, ce qui traduit une bonne ouvrabilité. L'ajout de 0,5 % de fibres augmente cette valeur à environ 330 mm, indiquant une fluidité accrue. Cela peut s'expliquer par une meilleure dispersion initiale des fibres et leur effet lubrifiant modéré à faible dosage. Cependant, à partir

de 1 %, l'affaissement redescend à 270 mm, et chute encore à 250 mm pour 1,5 %, illustrant une nette réduction de l'ouvrabilité à mesure que la quantité de fibres augmente. Ce comportement est typique : à dosage élevé, les fibres ont tendance à créer un réseau rigide qui freine l'écoulement du mortier, rendant le mélange plus compact et difficile à travailler. De plus, pour un taux en fibre égale à 1,5 %, nous avons observé une concentration élevée de fibres au centre de la galette de mortier (Agglomérats de fibres) (Figure IV.3). Cela peut expliquer la diminution de l'étalement des mortiers contenant un taux élevé des mortiers. Ces résultats confirment ceux trouvés par Ezziane et al. (2015) ; Hedjazi et Castillo (2020) et Allioui et Mehdi (2024).

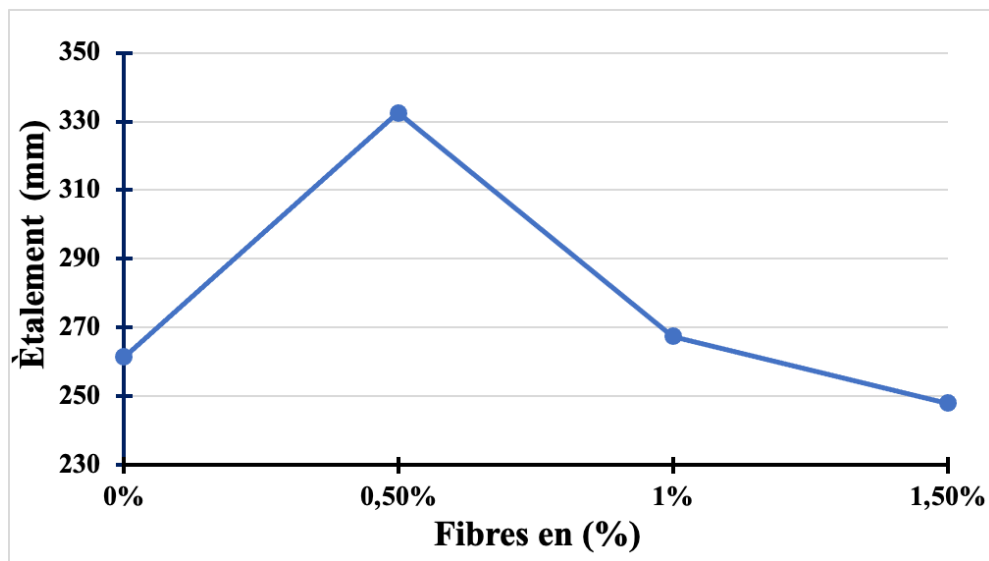


Figure IV.2 : Les résultats d'affaissement en fonction de pourcentage des fibres

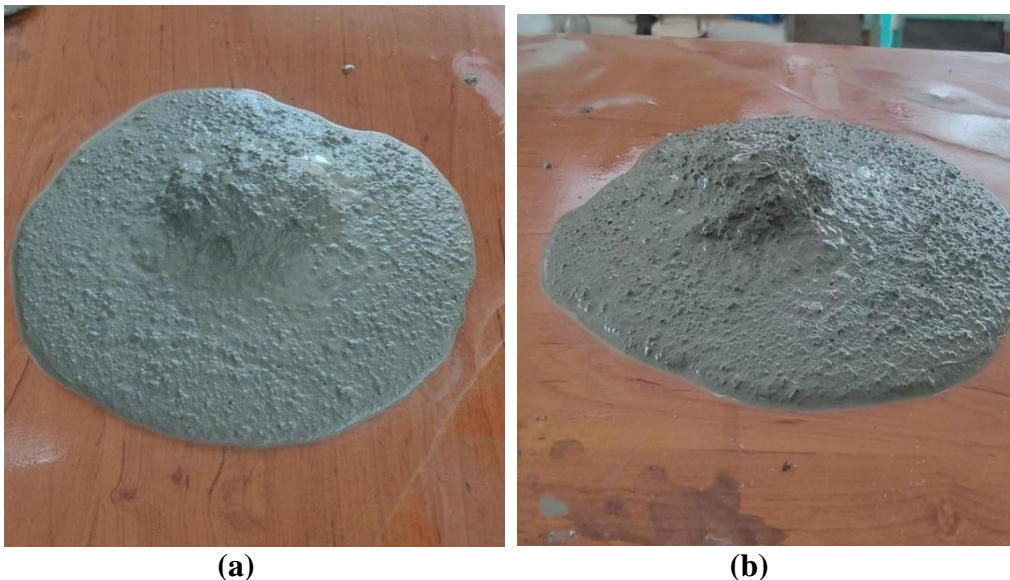


Figure IV.3 : Formation des agglomérats de fibres, (a) 1 % des fibres et (b) 1,5 % des fibres

b. Les essais rhéologiques :

Pour déterminer les propriétés rhéologiques des mortiers de notre étude, nous avons utilisé le rhéomètre et la méthode d'essai développés par Soualhi et al. (2014). Les résultats obtenus sur le rhéomètre montrent qu'une augmentation du dosage en fibres engendre une augmentation de la viscosité (Figure IV.4). Pour un mortier sans fibres (0 %) et avec 0,5 % de fibres, la viscosité reste stable autour de 6 Pa·s, indiquant une consistance fluide et facilement maniable. Cependant, à partir de 1 % de fibres, la viscosité augmente fortement à environ 24 Pa·s, et atteint 37 Pa·s pour un taux de 1,5 %, ce qui marque une transformation notable du comportement rhéologique du mortier. Cette augmentation rapide s'explique par la présence croissante de fibres qui entravent les mouvements internes du mélange, provoquant une résistance accrue à l'écoulement.

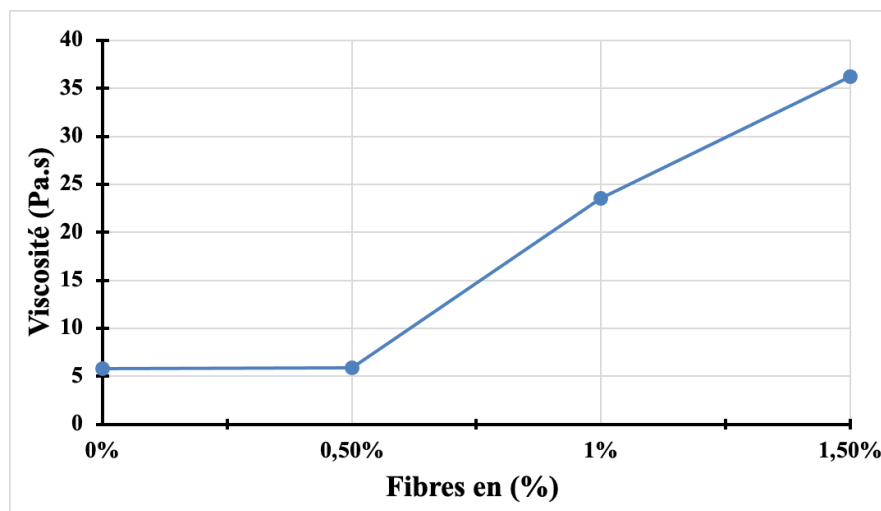


Figure IV.4 : Variation de la viscosité en fonction du dosage en fibres métalliques.

À partir des résultats présentés sur la (figure IV.5), il est clair que l'augmentation du taux des fibres influe négativement le seuil de cisaillement. À 0 % et 0,5 % de fibres, le seuil de cisaillement reste bas et stable, autour de 18 à 20 Pa, traduisant une faible résistance initiale à la mise en mouvement du matériau. Cependant, à partir de 1 %, ce seuil augmente fortement pour atteindre environ 75 Pa, puis grimpe jusqu'à 115 Pa à 1,5 % de fibres. Cette progression significative traduit une perte de fluidité du mortier : les fibres créent un réseau interne qui freine le déplacement des particules, augmentant ainsi l'effort nécessaire pour initier le mouvement.

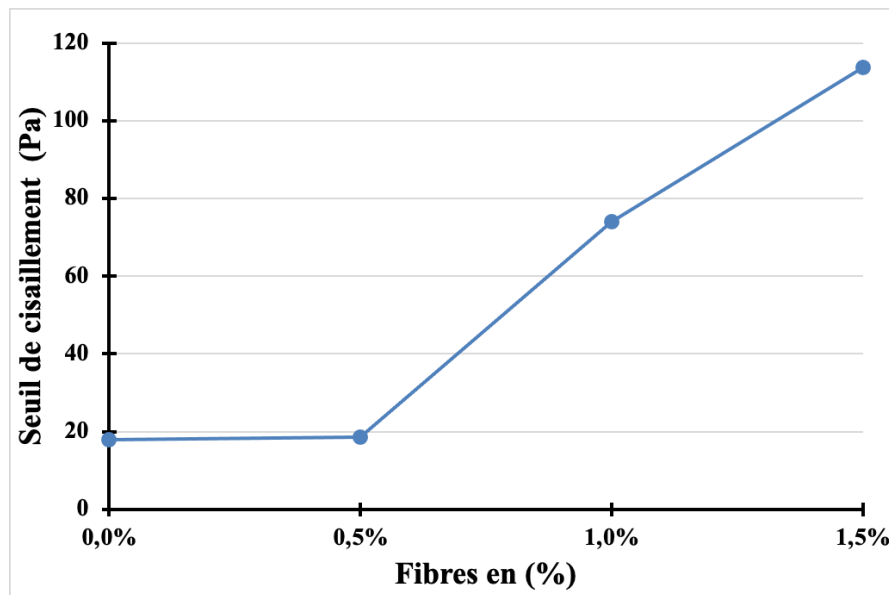


Figure IV.5: Variation du seuil de cisaillement en fonction du dosage en fibres métalliques.

IV.3. Caractérisation des mortiers fibrés à l'état durci :

a. Essai de la résistance à la compression :

La (figure IV.6) montre l'évolution de la résistance à la compression (en MPa) des mortiers étudiés, à différents pourcentages de fibres (0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 %) et à trois âges : 7, 14 et 28 jours. l'effet de l'augmentation du taux des fibres est un peu moins clair sur la résistance à la compression même si la tendance d'augmentation de la résistance l'emporte. À 7 jours, nous remarquons une amélioration modérée de la résistance à la compression du mortier contenant 1,5 % de fibres. À 14 jours, la tendance est similaire, mais la résistance est globalement plus élevée, avec un pic à 1,5 % de fibres. À 28 jours, la résistance maximale est atteinte à 1 %, tandis qu'à 1,5 %, une légère baisse est observée.

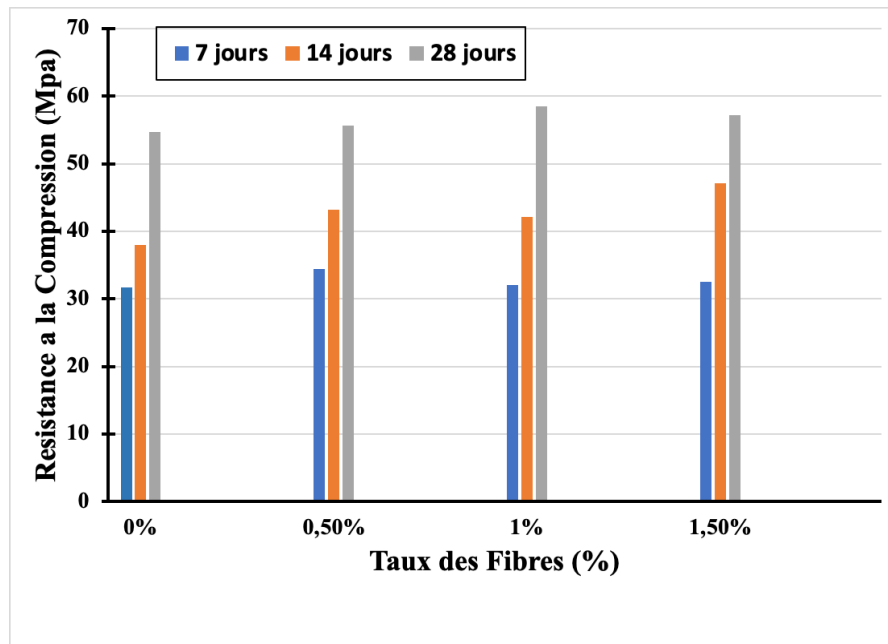


Figure IV.6: Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en fibres métalliques.

b. Essai de la résistance à la flexion :

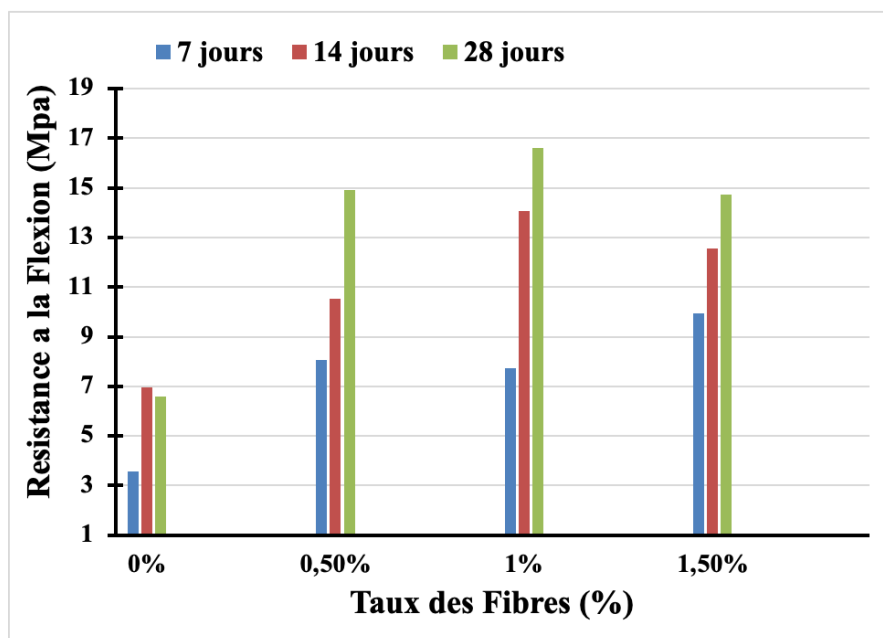


Figure IV.7 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du dosage en fibres métalliques.

Les résultats de la (figure IV.7) montrent que l'ajout de fibres améliore considérablement la résistance à la flexion du matériau à tous les âges étudiés. Au jeune âge, la résistance à la flexion passe d'environ 3,5 MPa pour le mortier sans fibres à 10 MPa pour le mortier contenant 1,5 % de fibres, indiquant une nette amélioration dès le jeune âge. Par contre, à 14 jours la résistance maximale a été atteinte lorsque le taux de fibres été 1%. À 28 jours, la tendance se confirme : la résistance augmente jusqu'à environ 16,5 MPa pour le mortier à base de 1 % de fibres. Dans l'ensemble, l'ajout de fibres améliore significativement la résistance en flexion, avec un seuil optimal autour de 1 %, au-delà duquel la résistance diminue.

En tout cas, il semble que l'ajout des fibres a un effet bénéfique sur les performances mécaniques du mortier. Cela peut être expliqué par l'effet de couture des fibres qui empêche la propagation des fissures (Ezziane et al., 2015) et leur module d'élasticité supérieur à celui du mortier (Wang et Liu ; 2020).

c. Essai de la propagation des ondes ultrasonores :

La vitesse de propagation des ondes ultrasonores augmente avec l'augmentation du taux des fibres (Figure IV.8). Ce comportement pourrait s'expliquer par la capacité des fibres métallique à minimiser l'effet néfaste des vides (AL-Ridha et al., 2020).

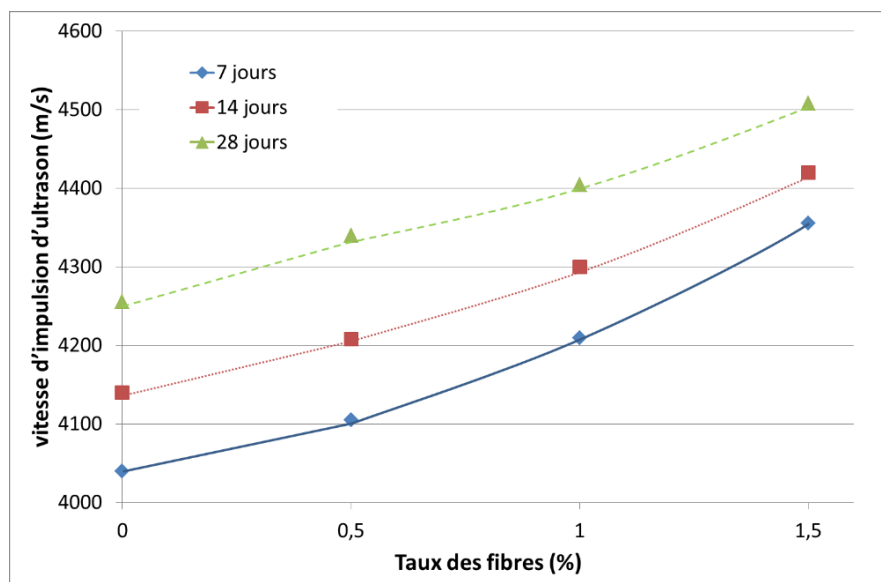


Figure IV.8 : La vitesse de propagation des ondes ultrasonores par rapport le taux des fibres.

IV.3 Conclusion :

L'étude expérimentale portant sur la caractérisation des mortiers fibrés à l'état frais et durci a mis en évidence l'impact significatif des fibres métalliques sur l'ouvrabilité, la rhéologie et les résistances mécaniques. Les résultats soulignent l'importance d'optimiser le dosage en fibres pour trouver le meilleur compromis entre les performances mécaniques et la facilité de mise en œuvre, en ajustant ce dosage aux exigences spécifiques de chaque chantier. Cette recherche nous a permis de tirer les enseignements suivants :

- L'ajout de fibres influence fortement l'ouvrabilité du mortier. Un faible dosage (0,5 %) améliore l'affaissement, mais des taux plus élevés (1 % et surtout 1,5 %) diminuent la fluidité du mélange.
- L'incorporation de fibres dans le mortier affecte fortement sa viscosité à partir de 1 %. Si de faibles dosages (jusqu'à 0,5 %) n'ont presque aucun impact, les dosages plus élevés (≥ 1 %) augmentent considérablement la viscosité, rendant le mortier plus ferme et potentiellement plus difficile à mettre en œuvre.
- L'ajout de fibres n'a que peu d'effet sur le seuil de cisaillement jusqu'à 0,5 %, mais au-delà de ce seuil, leur influence devient considérable. Une teneur en fibres supérieure à 1 % augmente fortement le seuil de cisaillement, ce qui peut poser des défis pour le malaxage, le pompage ou la mise en œuvre du mortier.
- L'ajout de fibres a un effet globalement positif sur la résistance à la compression, surtout à 14 jours et à 28 jours. Le dosage optimal semble être situé entre 0,5 % et 1 %, avec une performance maximale à 1 %. Une teneur plus élevée (1,5 %) peut entraîner une diminution légère de la résistance à long terme, probablement due à une dispersion moins homogène ou à une modification de la microstructure du matériau.
- L'ajout de fibres a un effet très bénéfique sur la résistance à la flexion, dès les premiers jours et de façon croissante avec le temps. Le pourcentage optimal est de 1 %, qui permet d'atteindre la résistance maximale à 14 et 28 jours. Un taux de 1,5 % donne également de bons résultats, mais avec une légère diminution, probablement liée à des problèmes de dispersion ou d'adhérence des fibres dans la matrice. En revanche, sans fibres, les résistances restent nettement inférieures à tous les âges.

- L'incorporation des fibres engendre une augmentation de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Cette effet s'amplifié avec le taux des fibres dans les mortiers étudiés.

Conclusion générale

L'étude a porté sur un seul type de mortier (mortier normal) préparé avec différents taux de fibres métalliques étudiant leur impact sur la rhéologie du mortier ainsi que sur leurs caractéristiques mécaniques. Pour ce faire, plusieurs essais expérimentaux ont été menés sur plusieurs compositions de mortier.

L'étude expérimentale menée sur les mortiers renforcés par des fibres métalliques, à l'état frais et durci, a permis de mettre en évidence l'influence significative de ces fibres sur les propriétés du matériau. Les résultats obtenus confirment que l'incorporation de fibres améliore certaines performances mécaniques, tout en impactant la rhéologie et l'ouvrabilité du mélange.

Il ressort que le dosage en fibres joue un rôle essentiel : un faible taux (environ 0,5 %) peut améliorer l'affaissement et préserver une bonne maniabilité, tandis qu'un dosage plus élevé (≥ 1 %) augmente la viscosité et le seuil de cisaillement, rendant le mortier plus ferme et plus difficile à mettre en œuvre. Cette évolution rhéologique doit donc être prise en compte pour assurer la faisabilité sur chantier.

Sur le plan mécanique, l'ajout de fibres métalliques améliore notablement la résistance à la flexion dès les premiers jours, avec une performance optimale observée autour de 1 %. La résistance à la compression est également renforcée, notamment à moyen et long terme (14 à 28 jours), bien qu'un excès de fibres (1,5 %) puisse engendrer une légère baisse de performance, liée à une dispersion moins homogène ou à des effets microstructuraux défavorables.

En somme, cette recherche souligne l'importance de maîtriser le dosage en fibres pour optimiser les propriétés du mortier en fonction des exigences spécifiques du projet. Le meilleur compromis entre performances mécaniques et facilité de mise en œuvre se situe généralement entre 0,5 % et 1 % de fibres métalliques.

Perspectives :

Notre investigation laisse la porte ouverte sur d'autres contributions à l'avenir afin d'enrichir cette recherche par des travaux complémentaires :

Conclusion générale et Perspectives

- Explorer la rhéologie des mortiers en utilisant d'autres types de fibres (végétales, organiques, etc.).
- Approfondir l'étude de la durabilité des mortiers fibrés.
- Élargir cette recherche aux bétons pour des essais comparatifs.
- Analyser la tribologie des bétons fibrés afin de mieux prédire leur comportement lors du pompage.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- **ABBA.K &ABBASSI.M., 2020** : Etude de propriété mécanique d'un mortier à base de verre recyclé ", Mémoire de fin d'études, Université Merbah , Ouargla, Algérie .
- **ADJOU DJ. M., 2015** : " Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton", Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France & Université Hassiba Benbouali, Chlef, Algérie.
- **ALIOUI. Z et MEHDI. K ., 2024** ; Étude du retrait de mortiers à base de fibres métalliques", mémoire de Master. Université Aboubakr belkaid, Tlemcen, Algérie.
- **Anagnostopoulos, C. A., 2014.** " Effect of different superplasticisers on the physical and mechanical properties of cement grouts ". *Construction and Building Materials*, 50, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.050>
- **AYAT. A ., 2015** : Contribution à l'élaboration et la caractérisation d'un Eco mortier d'enduit à base de chaux et déchets de briques pour la réhabilitation du vieux bâti " Mémoire de fin d'études, Université 20 Aout 1955, Skikda , Algérie.
- **BELAIDI A et BRIXI A ., 2014** : " Etude de l'influence des additions et des adjuvants sur les propriétés aux états frais et durci des bétons", mémoire de Master Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.
- **Belaidi A ., 2021** : " Influence des additions minérales et organiques sur la tribologie des bétons ", thèse de doctorat ,Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.
- **Belaidi, A., Kadri, E.-H., Taleb, O., 2021:** Tribological behavior of concrete with different mineral additions, *Advances in Concrete Construction*, vol. 11, pp. 231-238.
- **Benali.R,2010** : Étude du comportement mécanique et rhéologique de la pâte du ciment, mortier etbeton avec différentes fibres ", Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie.
- **Benbaizid. M & Selmati. A, 2017** : " Influence des polymères en tant que plastifiants sur le comportement chemomécaniques des mortiers des ciment ", Mémoire de master, Université Blida 1, Blida , Algérie .
- **BENTEGRI I ., NGO T T., BOUKENDAKDJI O., SOUALHI H., KADRI, E.,2021** "Étude du comportement rhéologique du béton renforcé par des fibres organiques", *AJCE*, vol. 39 , Page 413-420 .

- **Benyoucef .R & Derouez. J., 2021** : " Isolation Thermique d'Un Mortier à Base de fibres végétales, Mémoire de fin d'études ", Université MOULOUD MAMMARI, Tizi-Ouzou, Algérie.
- **DAMECHE. O & BEKKOUCHE.Z., 2019** : " Caractérisation des bétons ordinaires utilisés dans les chantiers de la ville d'Annaba : influence de la nature des sables utilisés ", Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, ANNABA , Algérie.
- **DELALDJA. D., 2018** : " Valorisation des déchets industriels dans la formulation des mortiers soumis à des températures élevées recyclés ", mémoire master Université de M'sila, Algérie.
- Domaines d'application des BFUP avec fibres.
- **EZZIANE, M., MOLEZ, L., MESSAOUDENE, I., KADRI, T., & JAUBERTHIE, R., (2015)**. " Caractérisations non destructives de mortiers renforcés par des fibres de natures différentes soumis à haute température". Actes du colloque NoMaD 2015 : Nouveaux Matériaux et Durabilité, Douai, France.
- **Flitti A et Chalabi R ., 2024** : "Béton bas carbone", mémoire de master .Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen, Algérie
- Fiche technique des fibres métallique «TEKNA CHEM"
- **Govin .A., 2004** :Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment, modification de l'hydratation du ciment par le bois ". Thèse de doctorat, Ecole National Supérieur des Minesde Saint Etienne, France.
- **GUIDOUM .A & FARHET. O., 2019** : Influence de la nature du sable sur les propriétés physicomécaniques d'un béton ordinaire", Mémoire de Master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA, Algérie.
- Hedjazi, S., Castillo, D. (2020). « Relationships among compressive strength and UPV of concrete reinforced with different types of fibers », Heliyon, vol 6, e03646.
- **Laetitia .P , 2011** : Modes d'action des éthers de cellulose sur la rétention d'eau des mortiers à l'état frais " , une thèse de doctorat , Ecole Nationale supérieur des mines SAINTE –ETIENNE , France
- **Mehdi M, 2019** : Compréhension des mécanismes d'hydratation des ciments composés incorporant de la poudre de verre ou des cendres de boues d'épuration calcinées", Mémoire de thèse, l'université Paris-Est.

- **Mesli.i et charif ikram.f,2016** : "etude rheologique de l'interaction entre les additions minérales et organiques sur des mortiers", mémoire de master d'Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen.
- **Mohammed Ezziane, Laurent Molez, Ibrahim Messaoudene, Tahar Kadri, Raoul Jauberthie.** Caractérisations non destructive de mortiers renforcés par des fibres de natures différentes soumis à haute température. NoMaD 2015 : Nouveau Matériaux et Durabilité, Nov 2015, Douai, France.
- **MOKHTARI. A., 2006** : Influence des ajouts de fines minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier", mémoire de magister, université de kasdi merbah, ouargla , Algérie.
- **MOKHTARIA., 2006** :Influence des ajouts de fines minérales sur lesperformances mécaniques des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier ", mémoire de magister, Université De Kasdi Merbah , Ouargla , Algérie .
- **MR. A, 2021** : Etude du comportement mécanique d'un béton à base de fibres métallique, mémoire de master ", Universite Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie.
- **NASSAH .D ., 2017** : Influence de la quantité de fibres naturelles (alfa) et commerciales (polypropylène) sur les propriétés physico mécaniques des mortiers fibrés ", mémoire master, Université de M'Hamed Bougara ,Boumerdas, Algérie .
- **Office de la Protection de la Vallée du M'zab,** «La chaux matériau de construction et de restauration ».
- **OUKIL .S ., 2020** : Effet de la poudre de verre et du métakaolin sur les propriétés des mortiers de chaux aériennes ", Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar , Annaba Algérie.
- **REMIDINI .H., 2020** : Contribution à l'étude des propriétés mécaniques d'un béton de Fibres ", Mémoire de Master, Université Mohamed khider ,Biskra , Algérie.
- **SADOUN.F &DJEBRI .L ., 2019** : Étude comparative entre les mortiers renforcés avec la fibre métalliques et verre", Mémoire de fin d'études ; Universite Akli Mohand Oulhadj , Bouira , Algérie .

Références Bibliographiques

- **SENOUCI .T &YOUCEFLA, 2023** : " Etude d'un mortier à base de fibres d'acier", Mémoire de fin d'études, Université Ibn Khaldoun ; Tiaret ,Algérie .
- **SETTLF, 2012** : "Comportement mécanique et rhéologique des mortiers contenant des fibres métalliques ".Mémoire de magister, Université Hassiba, Benbouali Chelf, Algérie.
- **SILINE M & OMARY S., 2018** : " Optimization of the SO₃ content of an Algerian Portland cement: Study on the effect of various amounts of gypsum on cement properties" *Construction and Building Materials*, vol. 164 ,page. 362-370.
- **Smaine.M & Tahar .A., 2022** : " Effet de la température sur les caractéristiques mécaniques d'un ciment de poudre de verre", Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib ,Ain-Temouchent , Algérie .
- **SOUALHI.H, 2014** : "optimisation de la viscosité des bétons a faible impact environnemental", thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie
- STAGNOLIGEARS matières plastiques renforcées de fibre de carbone.
- **TALEB., 2017** : "étude du comportement rhéologique des bétons autoplaçants locaux», thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie .
- **TALEB.O, GHOMARI. F, BOUKLI .H, KADRI. E, SOUALHI .H., 2018** : Effet du dosage en superplastifiant sur les caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants " , *Nature & Technology*, Vol. A: Fundamental and Engineering Sciences, 18 (2018) 17-26Hynek Estelle (2023), Formulation de mortiers imprimables à faible impact carbone incorporant des additions minérales, Thèse de doctorat, Université De Lille, France, P 262.
- **THABET. R &ZAMAKI.F., 2019** : Etude des propriétés mécaniques des bétons de sable de dune renforcés par des déchets industriels ", mémoire master, Université De Kasdi Merbah Ouargla ,Algérie ,www.stagnoligears.com 202.
- **Touil B., 2017** : "Etude de la durabilité des bétons dans un environnement marin approche performantielle et prédictive basée sur les indicateurs de durabilité", thèse de doctorat Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, Algeria.
- **Wang, Y.; Liu, F.; Yu, J.; Dong, F.; Ye, J.** Effect of polyethylene fiber content on physical and mechanical properties of engineered cementitious composites. *Constr, Build, Mater.* 2020, 251, 118917

Références Bibliographiques

- **YAMMINE. J .,2007** : "Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie ", thèse de doctorat de l'école normale supérieure de cachan- ENS Cachan, Français.
- **Zerrouk. h ., 2015** : Effet des adjuvant organique sur les propriété physico-mécanique et chimique des mortiers", Mémoire de fin d'études, UNIVERSITE SAAD DAHLEB, BLIDA Algérie .