

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Master en Génie civil

Option : Structures

Présenté par

MANSOURI Sonia

MESSAOUDI Sara

Thème :

**Impact des fibres d'aluminium sur les caractéristiques
mécaniques et thermiques des mortiers avec la prise en compte de
la dispersion des résultats de mesure par weibull.**

Soutenu le : 23/06/2025

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		Qualité
Mr A. OURABAH	M.A.A	Univ. de Bejaia	Président
Mr A. BOUKELLOUDA	M.C. B	Univ. de Bejaia	Rapporteur
Mr A. LAICHAOUI	M.C. B	Univ. de Bejaia	Examineur

Promotion 2024/2025

Table des matières

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : l'état de l'art

I.1. Introduction	3
I.2. Mortier	3
I.2.1. Généralités sur les mortiers	3
I.2.2 Les constitutions des mortiers	4
I.2.3. Les caractéristiques des mortiers	7
I.2.4. Les différents types de mortier	8
I.2.5. Domaines d'utilisation des mortiers	14
I.2.6. Méthode de préparation des mortiers	16
I.3. Les mortiers fibrés	18
I.3.1. Les caractéristiques des mortiers fibré	18
I.3.2. Les différents types de fibres	18
I.3.3. Choix et rôles des fibres	25
I.4. Les propriétés mécaniques du béton renforcé par les fibres	26
I.4.1. Résistance à la compression	26
I.4.2. Résistance à la traction directe	26
I.4.3. Résistance à la flexion	27
I.5. Conclusion	27

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales

II.1. Introduction	28
II.2. Les matériaux utilisés	28
II.2.1. Ciment	28
II.2.2. Sable	29
II.2.3. Les adjuvants	29
II.2.4. L'eau de gâchage	31
II.2.5. Les fibres d'aluminium	31
II.3. Les méthodes utilisées	31
II.3.1. Les essais sur la matière première	31

II.3.2. Les essais de caractérisation sur les mortiers	43
II.3.3. Les essais mécaniques	49
II.3.4. Propriété thermique et leur essai	51
II.4. Conclusion.....	52

Chapitre III : Caractérisation de la matière première

III.1. Introduction	53
III.1.1. Analyse granulométrique par tamisage du sable	53
III.1.2. Équivalent de sable	54
III.1.3. Masse volumique apparente.....	54
III.1.4. Masse volumique absolue	55
III.1.5. Essai de bleu de méthylène (NF EN 933-9)	56
III.1.6. Analyse chimique.....	57
III.2. Conclusion	57

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction	58
IV.2. Essais sur les mortiers.....	58
IV.2.1. Essais à l'état frais	58
IV.2.1.1. La masse volumique fraîche (NF EN 1015-6)	58
IV.2.2. Essais à l'état durci	60
IV.2.3. Les essais mécaniques	64
IV.2.4. Les résultats des mesures de propriétés thermique	67
IV.3. Conclusion	68

Chapitre V : Analyse de la dispersion

V.1.Introduction	70
V.2. Modèle de Weibull	70
V.2.1. Détermination des paramètres de Weibull	71
V.3. Modélisation statistique.....	73
V.3.1. Calcul de probabilité de rupture	73
V.3.2. Détermination des paramètres de Weibull	74
V.3.3. Paramètres de rupture	79
V.3.4. Probabilité de service	85
V.4. Conclusion	86
Conclusion générale.....	88

Résumé

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'influence de l'ajout de fibres d'aluminium, issues de déchets métalliques, à des taux allant de 0 % à 2,5 %, sur les propriétés mécaniques et thermiques d'un mortier cimentaire. Des essais de résistance à la compression et à la flexion ainsi que de la conductivité thermique ont été menés. Les résultats ont montré que l'introduction modérée de fibres améliorent à la fois la résistance mécanique et les propriétés thermiques, en renforçant la matrice cimentaire tout en réduisant la conductivité, jusqu'à un certain seuil au-delà duquel les performances deviennent irrégulières. Pour évaluer la variabilité des résultats de la résistance à la compression des mortiers, le modèle de Weibull a été utilisé afin de prendre en compte la dispersion entre les résultats de mesure. Les résultats ont montré que le dosage optimal est (2%) de fibre d'aluminium offrant le meilleur équilibre qui permet d'améliorer les performance mécanique et thermique du mortier.

Mots clés : Résistance, fibres, aluminium, mortier, Weibull, dispersion.

Abstract

This study aims to evaluate the influence of adding aluminium fibres, derived from metal waste, at rates ranging from 0% to 2.5%, on the mechanical and thermal properties of a cement mortar. Compression and flexural strength tests, as well as thermal conductivity assessments, were conducted. The results indicated that a moderate introduction of fibres enhances both mechanical strength and thermal properties by reinforcing the cement matrix while reducing conductivity, up to a certain threshold beyond which performance becomes inconsistent. To assess the variability of the compression strength results of the mortars, the Weibull model was employed to account for the dispersion among the measured results. The findings revealed that the optimal dosage is 2% of aluminium fibre, providing the best balance to improve the mechanical and thermal performance of the mortar.

Key words: Strength, fibres, aluminium, mortar, Weibull, dispersion.

ملخص

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم تأثير إضافة ألياف الألومنيوم، المشتقة من خردة المعادن، بنسب تتراوح بين 0% و 2.5%، على الخواص الميكانيكية والحرارية للملاط الأسمنتي. أجريت اختبارات قوة الانضغاط والانحناء، بالإضافة إلى اختبارات التوصيل الحراري. أظهرت النتائج أن إضافة الألياف بجرعات معتدلة تحسّن كلاً من القوة الميكانيكية والخصائص الحرارية من خلال تقوية مصفوفة الأسمنت مع تقليل التوصيل، حتى حد معين يصبح الأداء بعده غير متسق. لتقييم تباين نتائج قوة الانضغاط للملاط، استُخدم نموذج ويبيل لمراعاة التشتت بين نتائج القياس. أظهرت النتائج أن الجرعة المثلى (2%) من ألياف الألومنيوم تُوفر أفضل توازن لتحسين الأداء الميكانيكي والحراري للملاط.

الكلمات المفتاحية: القوة، الألياف، الألومنيوم، الملاط، ويبيل، التشتت.

Remerciements

Louange à Allah, le tout-Puissant, qui nous a donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce projet. C'est grâce à sa volonté que nous avons pu franchir chaque étape de ce travail avec confiance et détermination.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur ABDELHAFID BOUKELLOUDA, notre encadrant universitaire, pour sa disponibilité, son accompagnement rigoureux et ses conseils précieux tout au long de ce projet il a généreusement partager avec nous son expérience et ses connaissances dans le domaine. Sa bienveillance, son exigence scientifique et sa confiance en notre travail ont été essentiels à la réussite de cette étude.

Nous remercions également l'ensemble de l'équipe du laboratoire pédagogique MDC 1 de l'Université Abderrahmane-MIRA de Bejaïa, pour leur accueil chaleureux, leur assistance technique et leur soutien durant la phase expérimentale. Travailler dans ce cadre a été une opportunité enrichissante tant sur le plan scientifique que personnel.

Nos sincères remerciements vont aussi à notre établissement et à l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil de la faculté technologie, pour la qualité de l'enseignement et les moyens mis à notre disposition tout au long de notre formation.

Nous remercions tous les membres du jury qui ont accepté d'examiner notre travail.

Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos familles et à nos amis pour leur soutien moral constant, leurs encouragements et leur patience tout au long de ce parcours.

Merci infiniment.

Sonia & Sara

Dédicace

Ce modeste travail est dédié à toutes les personnes qui m'ont soutenue et accompagnée tout au long de ce parcours.

Mon défunt père, dont l'amour silencieux et les valeurs profondes continuent de guider mes pas. Ce mémoire lui est dédié, en hommage à sa mémoire et à tout ce qu'il a semé en moi.

Ma mère, pilier de mon cheminement, grâce à qui j'ai pu avancer, croire en moi et mener ce parcours jusqu'au bout.

À ma sœur Amel, ainsi qu'à mes frères Lyes et Sofiane, pour leurs encouragements constants.

À Mehdi, un ami précieux, pour sa loyauté et son soutien indéfectible, jour après jour.

Ma binôme Sonia, pour son engagement, sa rigueur et la qualité de notre collaboration.

Mon encadrant, Mr A.BOUKELLOUDA pour son encadrement rigoureux, ses remarques constructives et sa grande disponibilité.

Sara

Dédicace

Je dédie ce travail, fruit de plusieurs années d'efforts, à ceux qui ont été mes piliers tout au long de ce parcours, à des personnes chères à mon cœur :

À mes très chers parents, pour leur grand amour, leurs sacrifices silencieux, et leur confiance en moi même dans les moments de doute. Rien de tout cela n'aurait été possible sans vous.

À mes frères et ma sœur, pour votre présence, votre écoute et mots d'encouragement qui m'ont porté durant les moments les plus difficiles.

*A mes neveux Léa, Ayden, Dalia, Dilane et le petit Alés.
A toute ma famille, source d'espoir.*

À mes amis proches, pour leur amitié sincère, leur aide et les bons moments partagés durant ces années d'études.

À mon encadreur, Mr A. BOUKELLOUDA, pour ses conseils, sa patience, sa confiance et l'accompagnement précieux tout au long de ce projet.

A toutes les personnes du Laboratoire des Travaux Publics de l'Est (LTPE) de Béjaïa, pour leur aide précieuse, leur disponibilité et leur accompagnement tout au long de mon stage. Leur soutien technique et humain a été d'une grande importance dans la réalisation de ce projet.

A ma binôme sara avec qui j'ai partagé des moments inoubliables durant la préparation de ce mémoire.

À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet, je vous exprime ma profonde gratitude.

Enfin, je me le dédie aussi à moi-même, pour avoir persévéré, douté parfois, mais jamais abandonné malgré les obstacles.

Sonia

Liste des symboles

Propriétés Physique

Rn	:	les quantités de refus
MF	:	Module de finesse.
ES	:	Equivalence de sable.
ESV	:	Equivalence de sable visuel.
ESP	:	Equivalence de sable piston.
VB	:	Valeur de bleu de méthylène.
V1	:	Volume de bleu introduit
V'	:	Volume de bleu adsorbé par la kaolinite.
M1	:	La masse de la prise d'essai.
ρ_{app}	:	Masse volumique apparente.
ρ_{abs}	:	Masse volumique absolue.
ρ_L	:	Masse volumique de l'eau (1 g/cm ³).
VL	:	Volume liquide.
ML	:	Masse du liquide déplacé.
E/C	:	Rapport eau / ciment.
V	:	Volume totale du matériau.
$V_1 - V_2$	:	Volume absolu.
ρ_d	:	Masse volumique à l'état sec.
m_i	:	Masse immergée.
m_h	:	Masse humide.
m_s	:	Masse sèche.
P	:	Porosité.
P_h	:	Masse humide.
P_s	:	Masse sèche.
P_{hyd}	:	Masse hydrostatique.

A : Absorption d'eau.

λ : Conductivité thermique.

Grandeurs caractéristique de la rupture fragile.

P_s : Probabilité de service.

P_r : Probabilité de rupture.

σ_r : Contrainte de rupture

σ_0 : Paramètre de forme.

V : Volume de l'éprouvette.

V_0 : Volume standard.

m : Module de Weibull.

λ : Paramètre représentant la population des défauts.

Listes des figures**Chapitre I**

Figure I.1 : Le mortier	3
Figure I.2 : Les constitutions des mortiers.....	4
Figure I.3: Ciment	4
Figure I.4 : exemple de dénomination catégorie de ciment.....	6
Figure I.5 : Moule triplé 4*4*16 pour les prismes	7
Figure I.6 : Différents mortiers en fonction du type de liant	9
Figure I.7 : Le mortier-ciment.....	10
Figure I.8 : La chape au mortier hydrofuge de la piscine.....	10
Figure I.9 : Le mortier réfractaire	11
Figure I.10 : Le mortier de chaux	11
Figure I.11 : Le mortier bâtard	12
Figure I.12 : Le mortier-colle.....	12
Figure I.13 : Mortier rapide.....	13
Figure I.14 : Mortier industrie	14
Figure I.15 : Hourdage de maçonnerie	14
Figure I.16 : Enduit de façade	15
Figure I.17 : Mortier de pose.....	15
Figure I.18 : Les chapes.....	16
Figure I.19 : Les scellements et les calages	16
Figure I.20 : La préparation manuelle de mortier	17
Figure I.21 : La préparation mécanique de mortier	17
Figure I.22 : Fibres végétales	19
Figure I.23 : Fibres animales.....	20
Figure I.24 : Fibres d'amiante	20
Figure I.25 : Fibres de verre	21
Figure I.26 : Fibres de carbone	21

Figure I.27 : Fibres polymère	22
Figure I.28 : Différentes formes des fibres métalliques	23
Figure I.29 : Fibres d'aluminium	24
Figure I.30 : Effet de retardement de la fissuration avec fibres et béton	25
Figure I.31 : Différents facteurs influant sur le comportement mécanique D'un béton renforcé de fibres	26

Chapitre II

Figure II.1 : Photo de ciment prise au laboratoire	28
Figure II.2 : Photo de sable de dune prise au laboratoire	29
Figure II.3 : Photo de l'adjuvant prise au laboratoire	30
Figure II.4 : Fiche technique de Sikaplast-40 Pro	30
Figure II.5 : Les fibres d'aluminium utilisé.....	31
Figure II.6 : Sérier des tamis.....	33
Figure II.7 : L'essai d'équivalent de sable	35
Figure II.8 : L'essai de la masse volumique	38
Figure II.9 : Méthode des éprouvettes graduées	39
Figure II.10 : La méthode de pycnomètre	40
Figure II. 11 : Appareil d'essai de bleu de méthylène	42
Figure II.12 : Le malaxeur	44
Figure II.13 : Les matériaux.....	44
Figure II.14 : Le mortier prêt à l'emploi	44
Figure II.15 : Les moules	45
Figure II.16 : Table à chocs	45
Figure II.17 : Recouvrir les moules	45
Figure II.18 : Numérotation et conservation des éprouvettes.....	46
Figure II.19 : Essai de la masse volumique à l'état frais	47
Figure II.20 : La pèse hydrostatique	47
Figure II.21 : Stabilisation du poids par étuvage	48
Figure II.22 : Des éprouvettes dans un bac de conservation	49

Figure II.23 : Machine de flexion au de compression CONTROLS	49
Figure II.24 : Essai de la flexion trois-points.....	50
Figure II.25 : Essai de la résistance à la compression	51
Figure II.26 : Appareil CT-mètre utilisée	52
Figure II.27 : Dispositif de l'essai de la conductivité thermique	52

Chapitre III

Figure III.1 : La courbe granulométrique du sable utilisé (Oued Zhour)	53
Figure III.2 : Résultat de l'essai de bleu de méthylène.	56

Chapitre IV

Figure IV.1 : Variation de la masse volumique fraîche pour les différents pourcentages des fibres dans le mortier.	59
Figure IV.2 : Variation de la masse volumique à l'état sec pour les différents pourcentages des fibres dans le mortier.	60
Figure IV.3 : Résultats de la porosité des mortiers à l'état durci.	62
Figure IV.4 : Valeurs de l'absorption d'eau pour les différents pourcentages des fibres Dans le mortier.	63
Figure IV.5 : Résultats de l'essai de la flexion-trois points des différents pourcentages des fibres d'aluminium dans le mortier.	65
Figure IV.6 : Résultats de l'essai de la résistance à la compression des différents pourcentages des fibres d'aluminium dans le mortier.	66
Figure IV.7 : Conductivité thermique λ en fonction du pourcentage de fibres d'aluminium...68	

Chapitre V

Figure V.1 : Diagramme de Weibull pour les mortiers 0% à 7 jours	76
Figure.V.2 : Diagramme de Weibull pour les mortiers 2% à 7 jours.	77
Figure V.3 : Diagramme de Weibull pour les mortiers 0% à 28 jours.	77
Figure V.4 : Diagramme de Weibull pour les mortiers 2% à 28 jours.	78
Figure V.5 : Comparaison des résultats expérimentaux et ceux calculés pour la série des prismes MT 0 % à 7 jours.	82
Figure V.6 : Comparaison des résultats expérimentaux et ceux calculés pour la série des prismes MF 2 % à 7 jours.	82
Figure V.7 : Comparaison des résultats expérimentaux et ceux calculés pour la série des prismes MT 0 % à 28 jours.	83

Figure V.8 : Comparaison des résultats expérimentaux et ceux calculés pour la série des prismes MF 2 % à 28 jours.	83
Figure V.9 : La densité d'activation de défauts en fonction de la contrainte de rupture.	84
Figure V.10 : Probabilité de rupture en fonction de la population de défauts.	84
Figure V.11 : Probabilité de survie en fonction de la contrainte de rupture.	86

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : La qualité de sable	36
Tableau II.2 : Composition des mortiers étudiés	43

Chapitre III

Tableau III.1 : Analyse granulométrique du sable (Oued Zhour).	53
Tableau III.2 : Détermination de la propreté de sable utilisé (Oued Zhour)	54
Tableau III.3 : Les résultats obtenus pour le sable de dune (Oued Zhour)	54
Tableau III.4 : Les résultats obtenus pour les fibres d'aluminium	55
Tableau III.5 : Les résultats obtenus par la méthode d'éprouvette graduée pour le sable de dune	55
Tableau III.6 : Les résultats obtenus par la méthode de pycnomètre pour le sable de dune.	55
Tableau III.7 : Les résultats obtenus de la masse volumique absolue des fibres d'aluminium	56
Tableau III.8 : Résultat d'essai bleu de méthylène	56
Tableau III.9 : Résultats d'analyse chimique (FRX) de sable de dune	57

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Résultats de la masse volumique fraîche des mortiers	58
Tableau IV.2 : Résultats des mesures de la masse volumique de mortier à 7 et 28 jours	60
Tableau IV.3 : Résultats des mesures de la porosité de mortier à 7 et 28 jours	61
Tableau IV.4 : Valeur de l'essai d'absorption d'eau à 7 et 28 jours pour les différents mortiers d'étude.....	63
Tableau IV.5 : Résultats de l'essai de flexion des mortiers pour les différents pourcentages des fibres	64

Tableau IV.6 : Résultats de l'essai de compression des mortiers pour les différents pourcentages des fibres	66
--	----

Tableau IV.7 : Résultats thermique des différents pourcentages des fibres d'aluminium dans le mortier	67
--	----

Chapitre V

Tableau V.1 : Probabilité de rupture des mortiers 0% à 7 jours.	73
---	----

Tableau V.2 : Probabilité de rupture des mortiers 2% à 7 jours.	73
---	----

Tableau V.3 : Probabilité de rupture des mortiers 0% à 28 jours.	73
--	----

Tableau V.4 : Probabilité de rupture des mortiers 2% à 28 jours.	74
--	----

Tableau V.5 : Détermination des paramètres de Weibull mortier 0% à 7 jours.	74
---	----

Tableau V.6 : Détermination des paramètres de Weibull de mortiers 2% à 7 jours	75
---	----

Tableau V.7 : Détermination des paramètres de Weibull de mortier 0% à 28 jours	75
---	----

Tableau V.8 : Détermination des paramètres de Weibull de mortier 2% à 28 jours	76
---	----

Tableau V.9 : les valeurs des paramètres de Weibull pour chaque série des prismes.	78
--	----

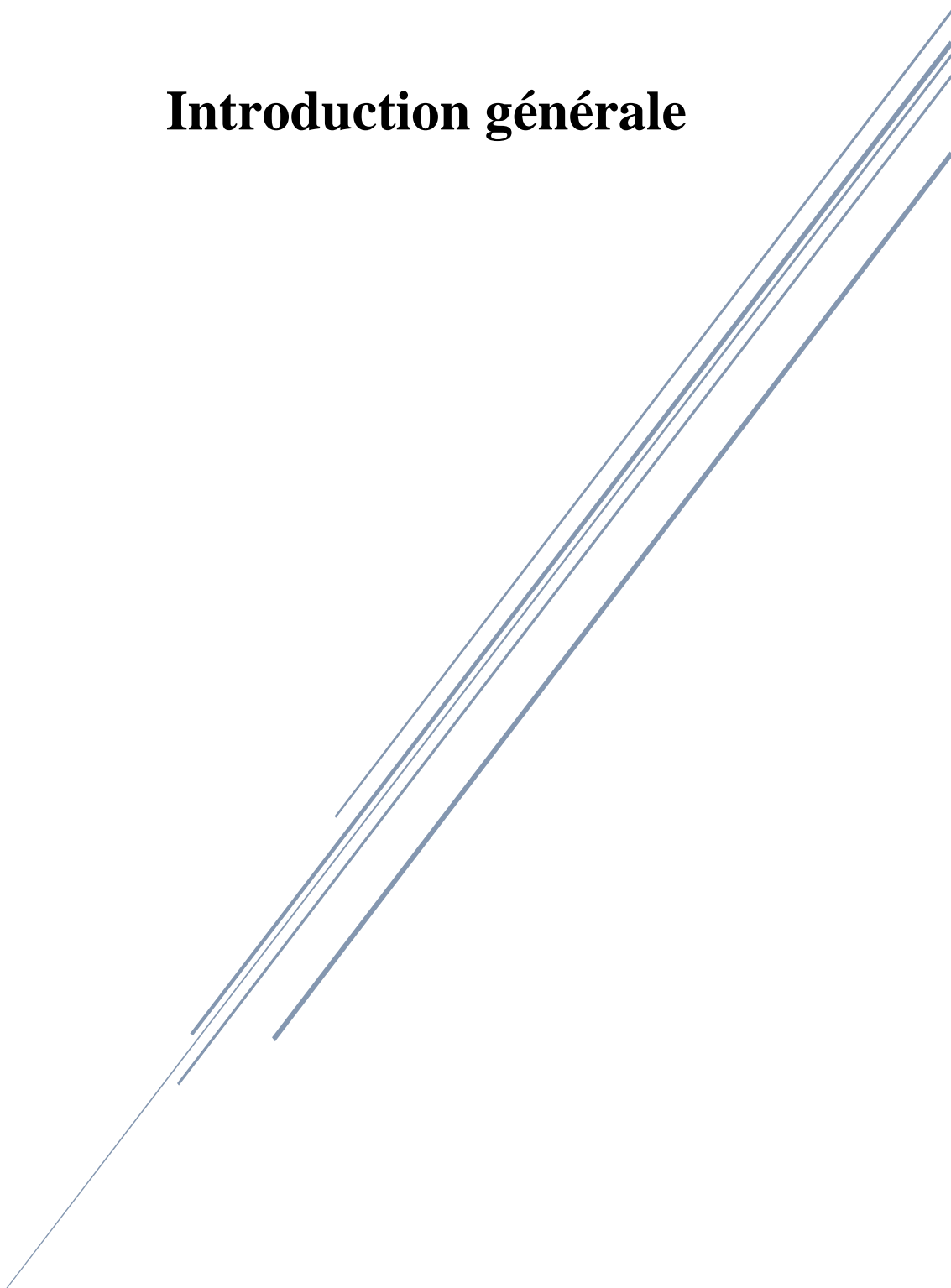
Tableau V.10 : Détermination de la probabilité de rupture et de la densité d'activation des défauts par modèle Weibull pour la série des prismes MT 0 % à 7 jours.	80
--	----

Tableau V.11 : Détermination de la probabilité de rupture et de la densité d'activation des défauts par modèle Weibull pour la série des prismes MT 2 % à 7 jours.	80
--	----

Tableau V.12 : Détermination de la probabilité de rupture et de la densité d'activation des défauts par modèle Weibull pour la série des prismes MT 0 % à 28 jours.	81
---	----

Tableau V.13 : Détermination de la probabilité de rupture et de la densité d'activation des défauts par modèle Weibull pour la série des prismes MT 2 % à 28 jours.	81
---	----

Introduction générale



Introduction générale

L'ingénierie des matériaux de construction tire sa force du développement durable et de la perception constructive des déchets industriels. L'évolution actuelle de l'ingénierie vise à améliorer les performances mécaniques et la durabilité des matériaux, tout en réduisant leur impact environnemental. Les mortiers, des matériaux couramment utilisés en construction pour les travaux de rejointoiement et d'enduit et comme matrice pour le béton, sont un exemple pertinent d'une classe de matériau se développant avec l'influx d'éléments innovants. [1]

L'une des options les plus prometteuses est l'introduction de fibres dans la matrice du mortier, favorisant la résistance à la traction, la ductilité et la résistance à la fissuration. En ce sens, les fibres d'aluminium fabriquées à partir de déchets industriels ou de chutes de production peuvent être une solution écologique et performante. L'aluminium, de par ses propriétés physiques (faible densité, résistance à la corrosion, bonne isolant thermique), présente des atouts qui pourraient contribuer à améliorer les performances mécaniques du mortier. [2]

Ce projet de fin d'études s'inscrit donc dans une démarche à la fois scientifique et environnementale, visant à étudier l'influence de l'ajout de fibres d'aluminium sur les caractéristiques physico-mécaniques du mortier. À travers une campagne expérimentale, ce travail cherchera à évaluer l'effet de différents pourcentages de fibres sur la résistance à la compression, à la flexion, ainsi que sur d'autres propriétés comme la porosité ou encore la durabilité du mortier.

L'objectif global de ce projet de fin d'études est valoriser un matériau métallique léger souvent sous-utilisé dans le domaine du béton et mortier.

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie rigoureuse a été adoptée, combinant les expérimentations en laboratoire et les analyses théoriques. Les essais physiques et les essais mécaniques ainsi que les essais thermiques permettent d'évaluer les performances des mortiers fibres sous diverses conditions.

Le mémoire est structuré en cinq chapitres principaux :

Le premier chapitre est consacré à un état de l'art. Celle-ci se focalise tout d'abord, généralités sur les matériaux composites, mortier et ces différents types et l'influence des fibres et leurs caractéristiques physiques et mécaniques.

Le second chapitre porte sur l'analyse des propriétés des matériaux utilisés et de leur formulation, ainsi que sur les différents essais réalisés sur les mortiers. Il s'agit également des caractéristiques mécaniques (flexion, compression) et thermique des mortiers contenant des fibres d'aluminium qui ont été examinées. Afin d'évaluer le comportement de ce matériau.

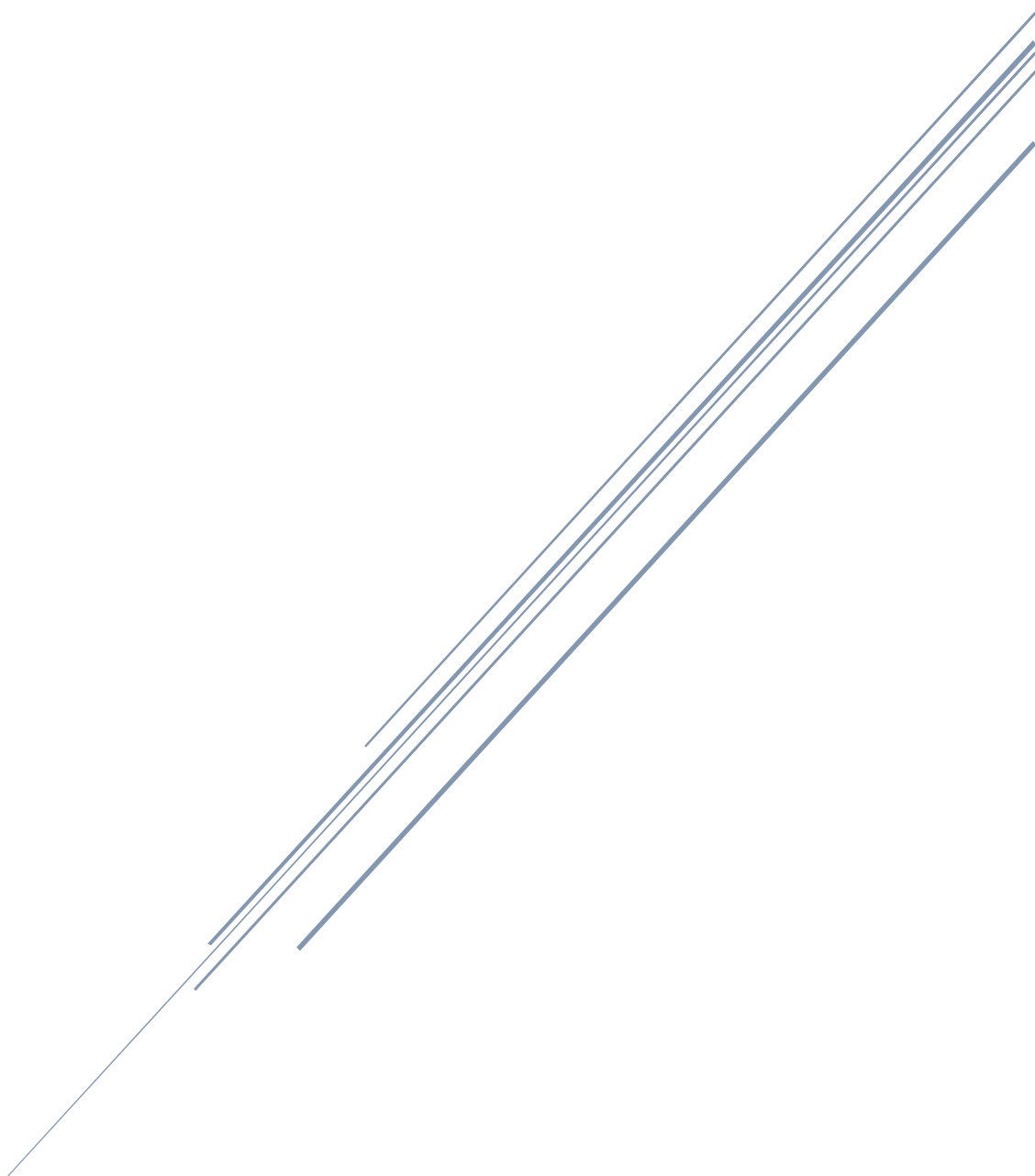
Le chapitre trois portera sur les résultats de la caractérisation de la matière première le sable de dune (Oued Zhour) et les fibres d'aluminium.

L'avant dernier chapitre résume les différents résultats physiques et mécaniques du mortier témoin et fibré en fonction des différents pourcentages étudié.

Le dernier chapitre s'intéresse à l'analyse de la dispersion c'est une étude statistique modélisé par le modèle de Weibull.

Enfin, le manuscrit se termine par une conclusion générale.

Chapitre I : L'état de l'art



I.1. Introduction

Le mortier est un matériau complexe dont les constituants présentent des caractéristiques et des propriétés mécaniques variées. Le mortier est principalement constitué de sable, de ciment et d'eau de gâchage, avec l'ajout d'adjuvants permettant d'améliorer certaines caractéristiques ou propriétés afin de s'adopter à des situations spécifiques. Chaque composant du mortier joue des rôles essentiels dans ses propriétés et ses performances. Sont largement utilisés en construction pour diverses applications, notamment : maçonnerie, enduits et revêtements, scellement et fixation, réparation et rénovations ...etc.

I.2. Mortier

I.2.1. Généralités sur les mortiers

Le mortier est un matériau de construction, obtenu par mélange de liant, de sable et d'eau, des additions éventuellement des adjuvants. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants. [3]

Il est nécessaire que la durée de malaxage soit idéale pour garantir un mélange uniforme et constant.

Les mortiers peuvent être :

- élaborés sur le lieu de construction en mélangeant quantités bien mesurées des divers composants, y compris les adjuvants.

- élaborés sur le lieu de travail à partir de mortiers industriels pré dosés et secs, requise d'eau avant utilisation.

- fournis par une centrale : il s'agit de mortiers prêts à l'usage.

Les mortiers industriels ont connu une importante évolution au cours des dernières années, ce qui permet d'éliminer le besoin de stocker et de mélanger les composants sur les sites de construction. [4]



Figure.I.1 : Le mortier.

I.2.2. Les constitutions des mortiers

Les mortiers sont principalement constitués de : sable, de liant et l'eau. Depuis le début du 20^e siècle, le ciment portland est le liant le plus fréquemment utilisé. Cependant l'ancien mortier de chaux reste employé dans certaines constructions récentes. [5]

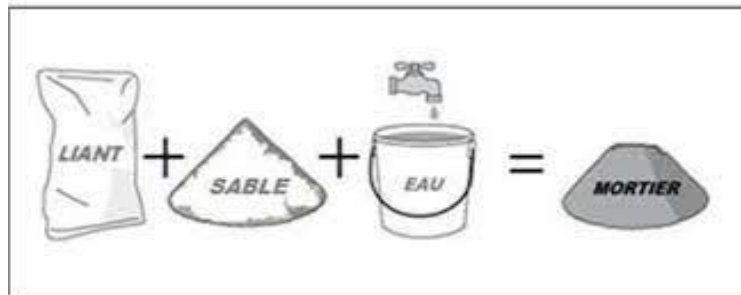


Figure.I.2 : Les constitutions des mortiers. [6]

I.2.2.1. Le ciment

Le ciment est un élément essentiel dans la construction. C'est le plus vieux liant hydraulique connu, il durcit en présence d'eau.

En réalité, son rôle est celui d'une (colle à cailloux). [7]



Figure.I.3: Ciment.

I.2.2.1.1. Les constituant du ciment

Les principaux constituants du ciment :

I.2.2.1.1.1. Clinker :

Il s'agit d'un produit fabriqué par la cuisson du mélange calcaire et argile jusqu'à ce qu'il atteigne une fusion partielle (clinkérisation), puis dosé et uniformisé. Il se compose principalement de chaux (CaO), de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3).

En générale, le mélange est préparé en utilisant des matériaux naturels extraits de carrières tels que le calcaire, l'argile, la marne. Le clinker une fois broyé et en présence d'une petite quantité de sulfate de chaux (gypse) qui joue le rôle de régulateur. Produit du portland. [8]

I.2.2.1.1.2. Le gypse (CaSO_4)

L'ajout de gypse au clinker vise à stabiliser la prise du ciment, en particulier ceux qui contiennent de grandes quantités d'aluminate tricalcique. Ce gypse permet au ciment de commencer à durcir, soit la prise, généralement pas avant une demi-heure après le début du processus d'hydratation. En l'absence de gypse, la prise serait inégale et pourrait se produire trop vite. [4]

I.2.2.1.2. Les différentes catégories de ciment

La norme NF EN 197-1 établit cinq catégories de 27 ciments courants, basées sur leur composition. [9]

➤ **CEM I ou Ciment Portland ordinaire (CPO) ou CPA en Algérie :**

Comporter au minimum 95% de clinker et au maximum 5% de composants secondaires. Les CEM I sont adaptés au béton armé au précontraint, là où une haute résistance est demandée.

➤ **CEM II ou Ciment portland compose (CPJ) :**

Contient 65% de clinker et 35% d'autres composants : laitier de haut fourneau, fumé de silice (concentration maximale de 10%), pouzzolane naturelle, cendres volantes et calcaires. Les CEM II sont appropriés pour les travaux massifs.

➤ **CEM III ou Ciment de haut fourneau (CHF) :**

Il contient entre 5 et 64% de clinker et entre 36 et 80% de laitier, il est destiné à être utilisé pour les fondations. Les travaux souterrains ou dans des environnements hostiles.

➤ **CEM IV ou Ciment pouzzolanique (CPZ) :**

Il se compose de 45 à 89% de clinker et de 10 à 55% de pouzzolane, cendres volantes et fumée de silice. On l'utilise pour le béton armé dans les projets de construction maritimes.

➤ **CEM V ou Ciment au laitier et aux cendres (CLC) :**

Il se compose de 20 à 64% de clinker, de 18 à 50% de laitier et de 18 à 50% cendres volantes. Il est employé pour le béton dans des terrains hostiles.

Il est essentiel de choisir le ciment convenable en fonction des particularités des travaux à entreprendre. Les propriétés de chaque catégorie de ciment sont indiquées sur les emballages. [10]

Voici la méthode pour déchiffrer la désignation suivante :

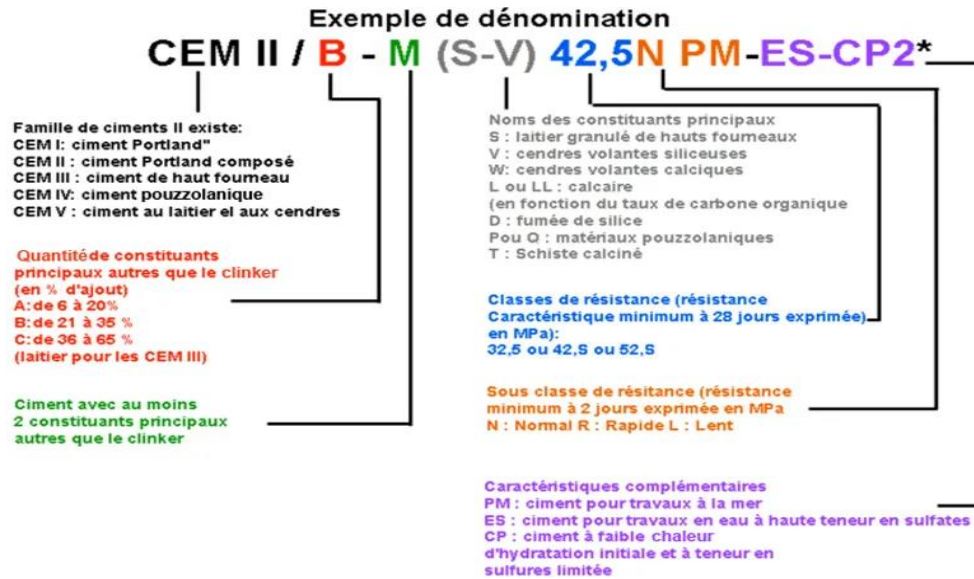


Figure.I.4 : exemple de dénomination catégorie de ciment. [11]

I.2.2.2. L'eau

Le choix de l'eau de gâchage a aussi une grande importance, car elle joue un double rôle : Elle permet d'hydrater le ciment, et surtout elle améliore son ouvrabilité.

I.2.2.3. Le sable

Le choix de la granulométrie du sable est en fonction des travaux à réaliser, pour des travaux de maçonnerie, on emploie souvent des sables 0/5 mm ; Cependant pour des travaux de briquetage ou d'enduits, le sable est plus fin 0,5 et 2 mm

Le rôle du sable dans un mortier est de :

- diviser la masse du liant pour permettre la prise (liant aérien).
- abaisser le prix de revient du mortier.
- diminuer le retrait et ses conséquences (les fissurations) du fait que le sable est Incompressible que le retrait se trouve amoindri. [5]

Dans le domaine de la construction, on utilise diverses sortes de sables, chacune présentant des propriétés spécifiques :

- **Sable de rivière** : le sable extrait par dragage des cours d'eau doit être dur et pur pour son utilisation dans les bétons.
- **Sable de plage** : originaire des cotés marins, doit avoir une taille de grain appropriée et être précisément nettoyé pour éliminer le sel avant d'être ajouté aux formulations du béton.
- **Sable de carrière** : malgré sa disponibilité il contient généralement de l'argile qui entoure les grains, nuisant ainsi à leurs adhérences aux liants et le rendant impropre à l'emploi dans les bétons.

- **Sable synthétique** : produit par concassage de roches résistantes comme le calcaire au le gré, peut être intégré dans les bétons. Bien qu'il puisse contenir un surplus de particules fines qui doivent être maîtrisées.
- **Sable de dune** : cette variété de sable marin extrêmement fin, est majoritairement présente dans les zones sud du pays, en région présaharienne. Ces sables issus des dunes continentales sahariennes, conviennent tout particulièrement à des usages spécifiques. [12]

I.2.2.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont employés pour les mortiers de maçonnerie et dans certains cas leur emploi est certainement avantageux. Cependant, leur emploi n'est généralement pas recommandé. Ils donnent la plasticité et le pouvoir de rétention d'eau que confère la chaux aux mortiers de ciment et chaux. Certains ciments de maçonnerie sont des mélanges de ciment portland et de chaux hydratée, avec en plus des adjuvants. [5]

I.2.3. Les caractéristiques des mortiers

Les caractéristiques principales des mortiers son :

I.2.3.1. La prise :

Cette opération est généralement réalisée sur une pâte de ciment pure ayant une consistance standard, dont le taux d'humidité varie entre (24 et 30%), en accord avec les normes précises établies. [13]

I.2.3.2. La résistance mécanique :

On effectue souvent des tests sur des échantillons prismatiques de $4*4*16\text{ cm}^3$, maintenus dans l'eau à une température de 20°C . Ces éprouvettes subissent des tests de rupture en traction via la flexion, puis par la compression.

Généralement, les résistances que ce soit en traction par flexion au en compression, tendent à croître de façon logarithmique avec le temps, sur une durée de 1 à 28 jours. [14]



Figure.I.5 : moule triplé $4*4*16$ pour les prismes.

I.2.3.3. Retraits et gonflements :

On évalue les retraits en utilisant des prismes de dimensions $(4*4*16) \text{ cm}^3$ en mortier 1/3, dotés de repères à leurs bouts, et gardés, une fois démoulés dans un environnement maintenu à 20°C et à une humidité relative de 90% ce retrait évalue à peu près de la même manière que le logarithme entre 1 et 28 jours.

Le mortier se durcit plus vite que la pâte pure. L'écart de retrait de la pâte pure par rapport au mortier augmente avec le temps. Les premiers jours il s'élève à environ 1,5 à 2,5, puis grimpe pour culminer entre 2,5 et 3,5 au bout d'un an.

En général, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois inférieur à celui de la pâte pure (étant donné qu'elle contient le même ciment).

L'évaluation du gonflement des mortiers (qui survient lorsqu'ils sont maintenus dans l'eau) s'effectue sur les mêmes prismes de $4*4*16 \text{ cm}^3$ gardés dans l'eau à une température de 20°C . habituellement, ils sont assez faibles (par exemple : pour le ciment stable dont l'expression par rapport aux aiguilles de le Chatelier sur pâte pure est inférieure à 10 mm). [13]

I.2.4. Les différents types de mortier

On sélectionne les variétés de mortier en fonction de leur usage. On trouve une grande variété de mortiers aux propriétés et usage divers, qui diffèrent principalement selon les composants utilisés. La composition du mortier varie considérablement en fonction du liant (nature et son dosage), du sable (son type et sa granulométrie), des adjuvants et ajouts (plastifiant, entraîneur d'air, hydrofuge, agent d'adhérence, fibres) ainsi que des quantités d'eau. [15]

I.2.4.1. Différents mortiers en fonction du type de liant

I.2.4.1.1. Les mortiers de ciment :

Le mortier-ciment est l'élément le plus élémentaire qui soit, essentiel pour l'édification d'un mur et assurer la liaison entre les pierres au brique. C'est un mélange traditionnel de ciment, de sable et d'eau.

Le mortier à base de ciment possède une grande résistance et une imperméabilité, présente néanmoins une tendance à la fissuration : il est approprié pour l'assemblage des blocs de béton. Il est réalisable de se priver de sable pour les joints et les scellements. [5]

I.2.4.1.2. Les mortiers de chaux :

Il s'agit d'un genre de mortier où la chaux (qu'elle soit grasse ou hydraulique) est employée comme liant et le sable sert de granulats fins. On utilise fréquemment ce mélange pour la couverture des murs, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur.

Les mortiers de chaux présentent une texture grasse et onctueuse. Ils prennent plus de temps à se solidifier que les mortiers de ciment, en particulier quand la chaux est calcique. Il présente une certaine flexibilité, mais il est moins imperméable que le ciment. [16]

I.2.4.1.3. Les mortiers bâtards :

Le mélange de ciment et de la chaux offre conjointement les caractéristiques des deux liants. La résistance lui est donnée par le ciment, tandis que la souplesse est assurée par la chaux. L'association de ces deux liants permet d'obtenir un mortier résistant, qui se fixe plus rapidement grâce au ciment et présente une consistance suffisamment riche et crémeuse grâce à la chaux. Cela lui offre une simplicité dans la manipulation. Habituellement on combine la chaux et le ciment en quantités équivalentes; toutefois on ajustera la quantité de l'un ou de l'autre selon l'application et la quantité appréciée. [16]

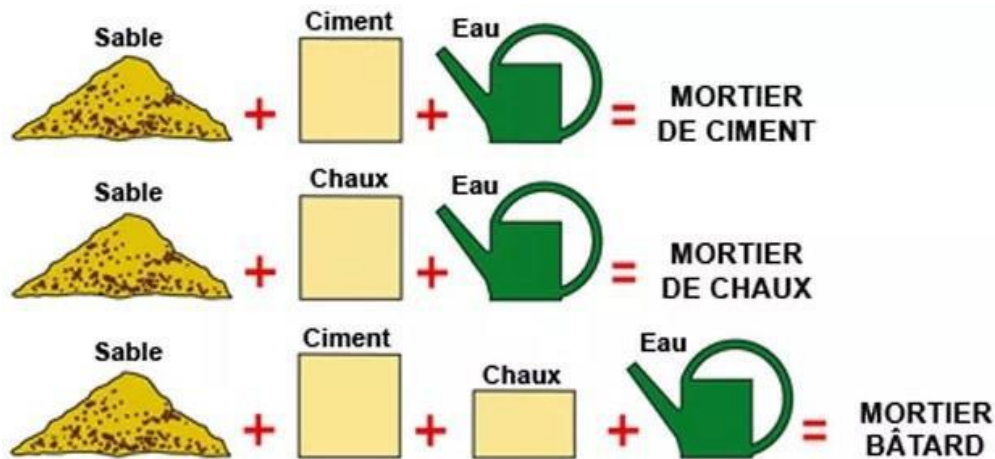


Figure.I.6 : Différents mortiers en fonction du type de liant. [16]

I.2.4.2. Différents mortiers en fonction de l'usage

I.2.4.2.1. Le mortier-ciment :

Ce matériau est convenable à toute construction standard (mur, chapes, etc.), qui n'exigent pas l'utilisation d'un mortier particulier. L'avantage du ciment réside dans sa remarquable capacité à la compression. Il se solidifie aussi plus rapidement que bon nombre d'autres alternatives.

Les quantités couramment employées varient de : 300 à 400 kg de ciment pour 1 m³ de sable. De plus, un dosage insuffisant en ciment le rend presque imperméables. [5]



Figure.I.7 : le mortier-ciment. [17]

I.2.4.2.2. Le mortier hydrofuge :

Comme son appellation le suggère, le mortier hydrofuge est un mortier qui résiste à l'eau et aide à prévenir les problèmes d'humidité sur une surface. Il permet de :

- Remplir des fissures.
- Appliquer un enduit sur un mur.
- Effectuer les chapes.

On l'emploie principalement dans les endroits humides (salle de bain, extérieur, etc.) ou pour la fabrication de structures imperméables telles qu'un bassin de piscine. [5]



Figure.I.8 : La chape au mortier hydrofuge de la piscine.

I.2.4.2.3. Le mortier réfractaire :

Le mortier réfractaire est un type de mortier qui résiste à des températures élevées. En fonction des préparations, il peut généralement supporter des températures atteignant 900 C° au moins. Il est donc exclusivement employé pour les constructions qui sont soumises à ce genre de températures, notamment pour l'assemblage et le jointoiment des :

- Foyers de cheminée.
- Barbecues construits en maçonnerie.

Ainsi, ce matériau offre une protection aux joints et à la structure des bâtiments exposés au feu et à la chaleur. [5]



Figure.I.9 : le mortier réfractaire.

I.2.4.2.4. Le mortier de chaux :

Dans les constructions anciennes, la chaux est l'un des liants les plus couramment employés. On utilise encore souvent des mortiers à base de chaux. On peut affirmer que cette sorte de mortier offre une meilleure respiration au mur, tout en ayant des propriétés hydrofuges (parfait pour les espaces humides).

L'emploi de la chaux dans un mortier facilite généralement l'application en raison d'un temps de séchage légèrement prolongé. Néanmoins, la mesure de ces mortiers est plus compliquée que celle du ciment. [16]



Figure.I.10 : Le mortier de chaux.

I.2.4.2.5. Le mortier bâtard :

Le mortier dit « bâtard » est un mortier qui combine deux sortes de liants différents (ciment + chaux ou deux ciments différents) généralement en proportion équivalents.

Un mortier intermédiaire (composé de chaux) permet de bénéficier des avantages des deux liants. Il s'agit d'un matériau plus adhérent et flexible que le ciment pur, ce qui lui confère une meilleure résistance aux fissures : un équilibre parfait pour la brique en terre cuite et la pierre semi-tendre. [16]



Figure.I.11 : Le mortier bâtard.

I.2.4.2.6. Le mortier-colle au ciment-colle :

Comme son nom l'indique, c'est un mortier adhésif qui permet de fixer un revêtement sur un mur ou un sol. On utilise ce matériau pour fixer des plaquettes de parement, des carrelages muraux ou de sol, ainsi que des dalles. Selon le type de mortier-colle sélectionné, son application peut être réalisée à l'intérieur et/ou à l'extérieur. [16]



Figure.I.12 : le mortier-colle.

I.2.4.2.7. Le mortier rapide :

Le mortier rapide, un élément essentiel dans le domaine du bâtiment, présente des ressemblances avec le mortier classique, puisqu'il est constitué de ciment, de sable et d'eau. Toutefois, il se caractérise par l'intégration d'adjuvants qui favorise la rapidité de la prise du mortier. Cette composition spécifique donne au mortier la capacité de se solidifier rapidement tout en garantissant une résistance supérieure. Par conséquent, il est particulièrement utilisé dans les travaux de scellement qui nécessitent une mise en œuvre rapide. [17]



Figure.I.13 : Mortier rapide. [18]

I.2.4.2.8. Le mortier industriel :

Le mortier industriel est une combinaison d'ingrédients sélectionnés avec soin, conditionnée en sac et fabriquée en usine afin d'être prêt à l'emploi. Il est habituellement élaboré pour un usage facile, ou il suffit d'intégrer la quantité d'eau requise et de remuer. Les producteurs de mortier offrent une diversité de produit pour satisfaire différentes exigences, engobant :

- Les mortiers de diverses teintes.
- Les mortiers étanches.
- Les mortiers d'isolation thermique.
- Les mortiers de nivellement.
- Les mortiers pour scellement.
- Les mortiers destinés aux chapes.
- Les mortiers-colles pour carrelage composé de plâtre au de ciment. [19]



Figure.I.14 : mortier industriel.

I.2.5. Domaines d'utilisation des mortiers

En principe, les différentes catégories de mortier sont directement associées à leurs domaines d'utilisation qui sont extrêmement variés. Une classification des mortiers basés sur leurs usages permet d'identifier les différentes catégories suivantes :

I.2.5.1. Le hourdage de maçonnerie :

La réalisation de structures en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre taillée, briques) exige leur assemblage au moyen d'un mortier qui doit avoir des propriétés mécaniques appropriées pour garantir la répartition des charges et une densité suffisante pour assurer l'étanchéité. [5]



Figure.I.15 : hourdage de maçonnerie.

I.2.5.2. Les enduits :

Cette portée d'application représente l'un des débouchés les plus larges pour les mortiers. En plus des revêtements traditionnels en trois couches, on constate actuellement l'essor de revêtements monocouches épais et de revêtement isolants. [5]



Figure.I.16 : enduit de façade.

I.2.5.3. Mortiers de pose :

Mortiers de pose sont des matériaux essentiels dans la construction, utilisée pour l'assemblage de la liaison de petits composants de revêtement de sol et de parois (carrelage). [15]



Figure.I.17 : mortier de pose.

I.2.5.4. Les chapes :

Le rôle des chapes est de garantir un nivellement uniforme du dallage et une surface régulière. Les chapes peuvent servir de revêtement final. Elles peuvent également servir de base pour un revêtement de sol. Les chapes doivent être suffisamment résistantes pour garantir la transmission des charges au support, et parfois elles doivent résister à l'abrasion ou au poinçonnement (dans le cas de sol industriel) que ce soit adhérente au flottante, la chape peut aussi jouer un rôle thermique ou acoustique. [15]



Figure.I.18 : Les chapes.

I.2.5.5. Les scellements et les calages :

L'abondance des problèmes liés au scellement au calage à développer des produits spécifiques adaptés aux travaux à accomplir: scellement d'élément de toiture, d'élément de finition, de mobilier urbain, de regards de visite. [5]

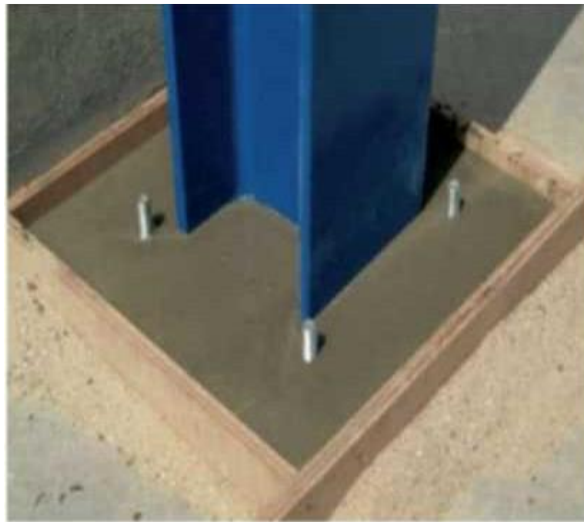


Figure.I.19 : Les scellements et les calages. [5]

I.2.6. Méthode de préparation des mortiers :

I.2.6.1. Préparation manuelle :

Dans un premier temps à l'aide d'une pelle, il est essentiel de mélanger le sable et le liant à sec de manière aussi homogène que possible. Par suite une cuvette doit être formée au centre du mélange pour accueillir l'eau de gâchage. La pâte est progressivement humidifiée puis pétrie à l'aide d'un robot de malaxage.

Il est important de savoir que :

- Le mélange à sec doit être effectué avec précision afin d'assurer une distribution uniforme du liant dans l'ensemble.
- Il est nécessaire de verser l'eau en plusieurs fois, d'abord pour faciliter le mélange et garantir sa quantité, ensuite parce qu'il est simple d'ajouter un peu d'eau alors qu'on ne peut pas retirer. [5]



Figure.I.20 : La préparation manuelle de mortier.

I.2.6.2. Préparation mécanique

Les mortiers sont fabriqués à l'aide de machines spécialisées appelées bétonnières. Pour certains modèles, le mélange doit être effectué à sec, en partie avant l'intégration dans le tambour mélangeur où il est ensuite humidifié correctement. Certains réalisent le mélange complet par leurs propres moyens : ils intègrent tous les composants du mortier soit directement dans le tombereau, soit dans une benne.

La procédure se prend que quelques minutes, elle est nettement plus rapide et moins inconfortable que le faire manuellement. [5]



Figure.I.21 : La préparation mécanique de mortier.

I.2.7. Rôle de l'utilisation de mortier

La pâte plastique obtenue peut assumer plusieurs fonctions essentielles :

- Assurer l'interconnexion et la cohérence des composants de maçonnerie, ce qui assure la robustesse de la construction et lui confère une unité.
- L'emploi de revêtements aériens comme barrières imperméables. Assure la défense des bâtiments contre les aléas climatiques ou l'ascension de l'humidité depuis le sol.
- Protéger les structures des infiltrations d'humidité dues aux conditions climatiques où à la remontée capillaire du sol en appliquant des revêtements aériens sous forme de barrières étanches. [20]

I.3. Les mortiers fibrés

Les mortiers fibrés sont des mortiers traditionnels (mélange de ciment, sable et eau) auxquels on ajoute des fibres synthétiques, métallique ou naturelles. Ces fibres améliorent leurs propriétés mécaniques, notamment en renforçant leur résistance à la traction, à la fissuration et aux chocs.

I.3.1. Les caractéristiques des mortiers fibré

- **Réduction du risque de fissuration** : grâce à une meilleure réparation des contraintes.
- **Améliorations de la résistance mécanique** : traction, flexion, compression.
- **Augmentations durabilité** : Augmenter la résistance aux agressions chimiques.
- **Meilleure adhérences** aux supports.

I.3.2. Les différents types de fibres

Les fibres sont catégorisées en fonction de leur provenance (naturelle, synthétique, artificielle) de leur structure (droite, ondulée, aiguille) de leur taille (macro ou microfibres) et également selon leur caractéristique mécanique.

Ainsi l'adoption d'une fibre influencera les facteurs suivants : [21]

- Densité,
- Résistance tension et en compression.
- Résistance aux impacts et à la fatigue.
- Module d'élasticité.
- Conductivités thermique et électrique.
- Stabilité dimensionnelle.
- Résistance aux conditions environnementales.
- Coût

I.3.2.1. Les fibres naturelles

Sont des matériaux d'origine animale ou végétale, qui se trouvent dans la nature et qui ne demandent pas de procédures chimiques pour être transformé.

I.3.2.1.1. Fibres végétale

Les fibres végétales présentant une source renouvelable et écologique, ces fibres sont utilisées depuis des millénaires dans divers domaines comme le textile, la fabrication de cordages, de papier et même dans l'industrie moderne.

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leur provenance. A s'avoir : les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface. [22]



Figure.I.22 : fibres végétales.

I.3.2.1.1.1. Différent type de fibres végétales

❖ Les fibres de Feuille

Ces fibres proviennent des résidus de plantes monocotylédones. Elles sont produites par le chevauchement de faisceaux entourant les feuilles, ce qui les renforce. Ces fibres sont caractérisées par leur dureté et leur rigidité. [15]

❖ Les fibres de Tiges

Les fibres de tige proviennent des tiges des plantes dicotylédones. Elles assurent la rigidité de ces tiges. Sur le marché, elles se présentent sous forme de faisceaux de fibres continues, puis sont séparées individuellement grâce au processus de défilage. [15]

❖ Les fibres de Bois

Les fibres de bois, issues du broyage d'arbres comme le bambou ou les roseaux, sont généralement de courte longueur. Plusieurs études ont démontré leur efficacité dans le renforcement des matériaux cimentaires. [15]

❖ Les fibres de Surface

Les fibres de surface se trouvent généralement autour de la tige, des fruits ou des graines. Celles provenant des graines représentent le groupe le plus significatif de cette catégorie. Parmi elles, on peut citer le coton et la fibre de coco. Cette dernière a montré de bonnes performances en matière de résistance à la flexion du ciment renforcé par fibres. [15]

I.3.2.1.2. Fibres animales

Sont des fibres naturelles obtenues à partir du pelage, des poils ou des sécrétions de certains animaux, essentiellement composées de protéines.



Figure.I.23 : Fibres animales.

I.3.2.2. Les fibres minérales

Sont des matériaux sous forme de filants ou de fibres, produits à partir de matière naturelles, elles sont particulièrement reconnues pour leurs excellentes propriétés d'isolation thermique et acoustique dans la construction des bâtiments.

I.3.2.2.1. Les fibres d'amiante

Les filaments d'amiante sont de minuscules particules minérales composées de silicates fibreux naturels, elles résistent aux températures élevées. Grâce à ces propriétés, elles ont longtemps été utilisées comme isolants thermique et acoustique, permettant de réduire efficacement la chaleur et le bruit.



Figure.I.24 : fibres d'amiante.

I.3.2.2.2. Les fibres de verre

Les fibres de verre sont des fibres minces produites à partir de verre fondu qui est extrait à travers une filière par effet joule, comportant entre 50 et 800 tours d'un diamètre approximatif de 10 à 100 μ m. On les trouve dans le commerce en bobines (coupées selon les besoins) ou en sections prédécoupées de 3, 6, 12 et 50 mm de longueur.

On distingue trois catégories :

- Les fibres de verre traditionnelles (composées de silice, de soude et de chaux)
- La fibre de verre au zirconium

- La fibre de borosilicate [23]

Les fibres de verre possèdent plusieurs caractéristiques

- La résistance à la compression et à la traction
- La résistance aux réactions chimiques
- Elles peuvent supporter des températures élevées



Figure.I.25 : Fibres de verre.

I.3.2.2.3. Fibres de carbone

La fibre de carbone se compose de fibres extrêmement fines, dont le diamètre varie généralement entre 5 et 10 micromètres, sont énormément sensibles, ce qui complique considérablement le malaxage du béton avec ces fibres, possédant des propriétés de durabilité très intéressantes.

En fonction des méthodes de fabrication, on trouve une large gamme de fibres de carbone mais trois types spécifiques sont actuellement disponibles sur le marché

- Les fibres de hautement résistant
- Les fibres à module intermédiaire
- Les fibres à hauts modules [24]



Figure.I.26 : Fibres de carbone.

I.3.2.3. Fibres organiques

Les fibres polymères qui sont extraites du plastique, peuvent être classées en trois catégories majeures :

- Le polyamide, qui constitue la catégorie la plus importante de plastique en termes de tonnage. Le PA n'est pas très résistant aux acides minéraux.
- Le polychlorure de vinyle (PVC) est un matériau thermoplastique fabriqué par la polymérisation du chlorure de vinyle. Le PVC a une bonne résistance contre les acides et éléments.
- Le polypropylène (PP) est un thermoplastique composé d'une chaîne linéaire formée de motifs propylène lorsqu'il s'agit d'un homopolymère, et de l'altération équilibrée de motifs propylène et éthylène pour les copolymères. Le PP a une bonne résistance face aux acides et aux alcalis. [25]

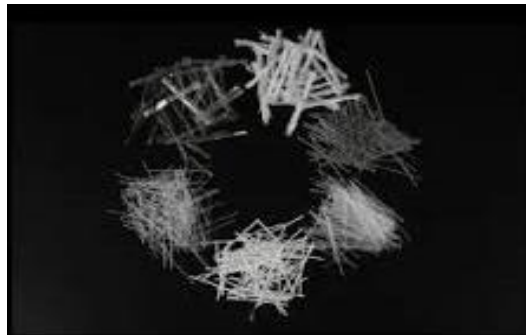


Figure.I.27 : Fibres polymères.

I.3.2.4. Fibres métalliques

Les fibres métalliques, souvent fabriquées en acier respectent des normes strictes pour garantir leur efficacité. Elles existent dans diverses formes, comme les fibres droites, ondulées ou en crochet dans des dimensions allant de 10 mm à 70 mm de longueur, des diamètres entre 0.1 et 0.7 mm, sont idéales pour les dalles industrielles, les ponts et les structures soumises à des charges lourdes.

Les fibres métalliques sont classées en deux catégories :

- Les fibres qui fonctionnent par adhérence, généralement de forme plate possèdent une surface spécifique significative, une faible ductilité. Leur contribution majeure est la restriction de l'élargissement des fissures.
- Les fibres à ancrage, de forme cylindrique et en acier tréfilé, présentent un comportement ductile. Le maintien est garanti soit par des crochets positionnés aux bouts de la fibre, soit par la configuration ondulée de celle-ci. Ces fibres offrent une grande ductilité au béton grâce à leur aptitude à supporter des efforts considérables lorsque les fissures sont suffisamment larges. [26]



Figure.I.28 : Différentes formes des fibres métalliques.

I.3.2.4.1. Les Fibres d'acier

Les fibres d'acier comptent parmi les types de fibres les plus couramment utilisées pour renforcer les bétons et les mortiers.

Parmi les fibres d'acier les plus utilisées nous citons :

I.3.2.4.1.1. Les Fibres Euro-Steel

Ce sont des fibres ondulées en acier à haute résistance, tréfilé, dur, à teneur en carbone inférieur à 0.15%. La contrainte limite de rupture en traction est de 1400 MPA. [22]

I.3.2.4.1.2. Les Fibres Bekaert de Chez Dramix

Ces fibres en acier tréfilé sont fabriquées par Bekaert. Elles se présentent sous forme de plaquettes collées, ce qui facilite leur introduction dans le béton et évitent la formation d'oursins. En effet, la colle se dissout facilement dans l'eau de gâchage. [22]

I.3.2.4.1.3. Les Fibres Harex

La fibre Harex est obtenue par fraisage. Les copeaux produits légèrement enroulés sur eux-mêmes possèdent une résistance à la traction d'environ 700 MPA. [22]

I.3.2.4.1.4. Les Fibres de Beki -Shield

Ce sont des fibres métalliques spéciales, fabriquées et commercialisées sous le nom de Beki-Shield, présentent des caractéristiques intéressantes, elles sont très minces et moins abrasives, moins irritantes au toucher que les fibres de verre. Ces fibres sont fabriquées à partir d'un acier inoxydable qui offre de très grande résistance à la corrosion. [22]

I.3.2.5. Les fibres d'aluminium

La présence d'aluminium dans l'environnement est naturelle et anthropique. L'aluminium est un métal relativement jeune par rapport à des métaux comme le fer et le cuivre. L'aluminium est l'élément métallique naturel le plus abondant de l'écorce terrestre dont il est le 3e élément constitutif le plus important, il représente environ 8%. Il n'y est présent que combiné avec l'oxygène, le silicium, le fluor ou autres éléments. On le trouve sous forme : d'alumine Al_2O_3

(corindon α Al_2O_3 , émeri, rubis, saphir, émeraude, etc.) • ou hydratée (hydrargillite ou Gibbsite γ $\text{Al}(\text{OH})_3$, boehmite γ $\text{AlO}(\text{OH})$, diaspore α $\text{AlO}(\text{OH})$). [27]

I.3.2.5.1. Propriété de l'aluminium

I.3.2.5.1.1. Propriété mécanique

➤ **Résistance à la traction** : Les propriétés mécaniques d'aluminium non allié recuit sont très limitées, il est moins rigide que les aciers. Son module de Young est de l'ordre de 65 000 à 70 000 MPA (comparé à celui des aciers de construction qui est égal à 210 000 MPA). L'allongement à la rupture varie de 23 à 43%, les caractéristiques de traction dépendent de la nature de l'alliage et de son état métallurgique (recuit, écroui ou trempé). Malgré que les éléments d'addition offrent à l'aluminium non allié recuit une multitude de propriétés, mais là plus part d'eux n'influent pas sur le module de Young, du fait que leurs masses ne dépassent pas 8% du composé. [27]

I.3.2.5.1.2. Propriété physique

L'aluminium est un élément du 3ème groupe de la classification de Mendeleïev, dont le nombre atomique est 13 et la masse atomique $M=26.98$. Sa température de fusion est 660°C et celle d'ébullition 2467°C environ, il possède un réseau cubique à face centré (CFC) à équidistance : $a = 4.0412 \text{ \AA}$. Sa caractéristique la plus importante est sa faible densité 2.7 g/cm^3 à température ambiante. Cette densité ne varie pas de façon sensible dans les alliages légers, elle reste toujours inférieure à 3 g/cm^3 . Sa conductibilité thermique est de $0.57 \text{ cal/cm.s.}^\circ\text{C}$ et sa conductibilité électrique est élevée ($2.6548 \text{ ohm. mm}^2/\text{m}$). [27]

I.3.2.5.1.3. Propriété de mise en forme

La température de fusion de l'aluminium est relativement basse 660°C d'où une facilité de fusion qui représente un avantage pour les opérations de fonderie, il est très ductile, on peut facilement le mettre en forme à l'état solide par déformation plastique. [27]



Figure.I.29 : Fibres d'aluminium.

I.3.3. Choix et rôles des fibres

I.3.3.1. Choix des fibres

Le choix des fibres est déterminé par l'application prévue (éléments minces et massif, renforcement de pâte pure de béton, réparation de structures, etc.), ainsi que par leurs caractéristiques (résistance et module variables, adhérence variable, etc.). Selon leur disponibilité et leur coût. De nos jours, divers sorts de fibres sont employés, les critères essentiels qu'elles doivent respecter incluent : l'aptitude à se lier parfaitement à la pâte de ciment, présente une excellente résistance à la traction, ne pas être affectées par l'environnement basique du ciment, ne pas se détériorer avec le temps tout en préservant leur caractéristique intrinsèque et ne pas engendrer une augmentation démesurée du coût du béton. [24]

I.3.3.2. Rôles des Fibres dans le Béton

Lorsque le béton est soumis à des charges proches de sa résistance à la rupture, des fissures peuvent apparaître rapidement. L'incorporation de fibres dans le béton permet de freiner la propagation de ces fissures, comme illustré à la figure [I.30]. À ce titre, les fibres remplissent une fonction similaire à celle des armatures en acier, qui jouent un rôle de fibres longues. Toutefois, les fibres courtes et discontinues présentent l'avantage de pouvoir être mélangées facilement et réparties de manière homogène dans le béton. Ces fibres sont intégrées au mélange de béton, lequel est généralement composé de ciment, d'eau et d'agréats fins et grossiers. [21]

Ce rôle peut conduire à des améliorations sûres :

- Déformation pré-fracture
- Résistance à la traction
- Ductilité et résistance aux fissures.
- Résistance à la fatigue
- Résistant au feu
- Résistant aux chocs.

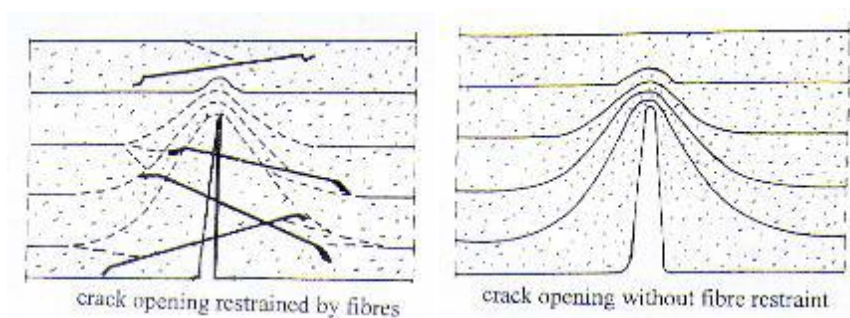


Figure.I.30 : Effet de retardement de la fissuration avec fibres et béton [21]

I.4. Les propriétés mécaniques du béton renforcé par les fibres

Le comportement du béton renforcé de fibres se distingue de celui du béton ordinaire. Les caractéristiques des fibres, telles que leur nature, leur forme géométrique et leur volume, influencent de manière significative la propagation des fissures dans la matrice, tout en contribuant à améliorer la ductilité du matériau. Ainsi, on peut en déduire que la résistance des bétons à matrice fibrée, qu'ils contiennent des fibres courtes ou longues discontinues, dépend principalement de l'adhérence à l'interface fibre-matrice ainsi que de la qualité des fibres utilisées, en lien avec différents paramètres.

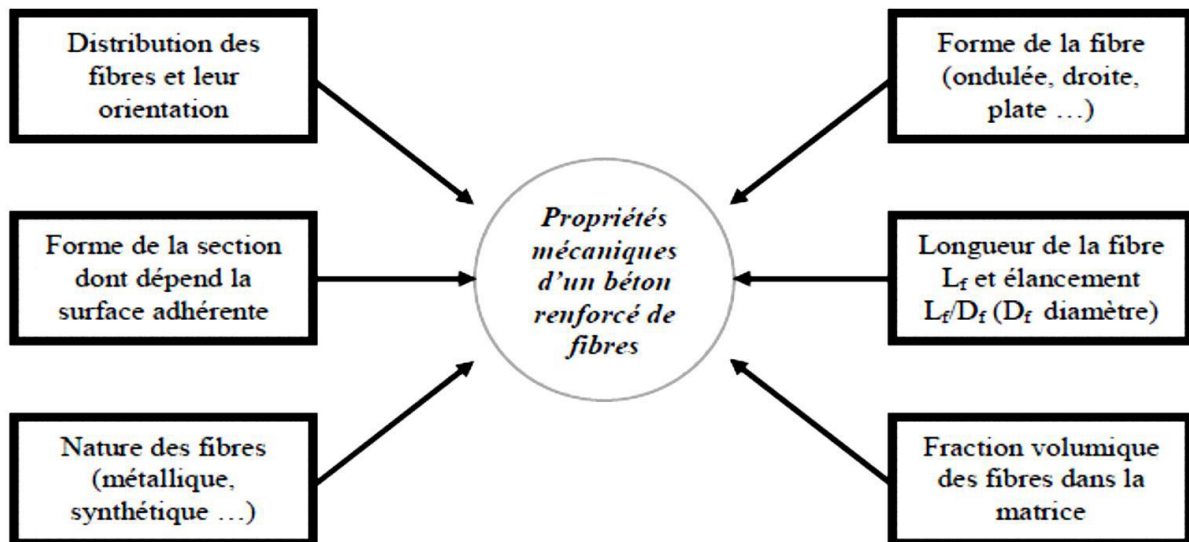


Figure.I.31 : Différents facteurs influant sur le comportement mécanique D'un béton renforcé de fibres. [28]

I.4.1. Résistance à la compression

Les recherches menées par divers spécialistes sur l'influence des fibres sur la résistance à la compression du béton fibré présentent certaines divergences. Toutefois, un consensus se dégage sur le fait que les fibres n'améliorent pas significativement cette propriété. Dans certains cas, une légère hausse de la contrainte ultime est observée, tandis que dans d'autres, on note une légère baisse. Cette diminution peut résulter d'une compacité insuffisante du béton, due à un dosage excessif en fibres ou à une formulation inadéquate du mélange. [28]

I.4.2. Résistance à la traction directe

Peu d'essais en traction directe ont été effectués, en raison de la complexité et du coût élevé de cette méthode. Les gains de résistance en traction apportés par les fibres varient considérablement. De manière générale, ces améliorations dépendent principalement de la forme des éprouvettes, du type d'essai réalisé, de la géométrie et du taux de fibres incorporées, ainsi que du béton de référence utilisé. [28]

I.4.3. Résistance à la flexion

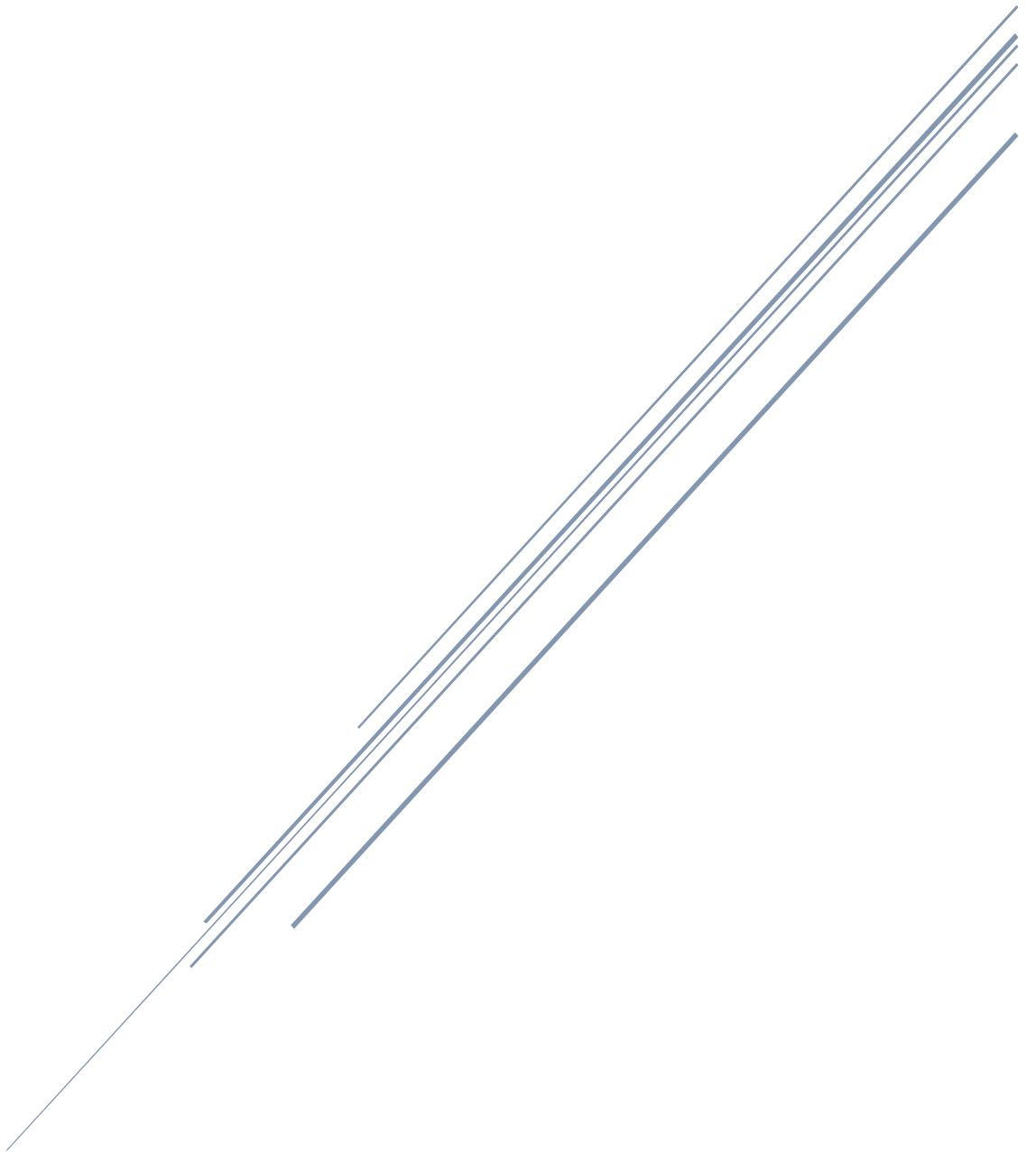
Le comportement en flexion constitue un élément essentiel pour le béton renforcé de fibres, car ce matériau composite est fréquemment soumis à ce type de sollicitation dans ses diverses applications. L'incorporation des fibres dans la matrice vise à accroître la ductilité du matériau et à maîtriser le processus de formation et de propagation des fissures. [28]

I.5. Conclusion

Ce chapitre présente un état de l'art des différents types de mortiers et de leurs applications, soulignant l'importance de choisir le mortier adapté aux exigences techniques et environnementales des projets.

L'analyse des mortiers fibrés révèle leur potentiel à améliorer les performances mécaniques, notamment en résistance à la compression et à la traction par flexion. Les fibres, qu'elles soient synthétiques, métalliques ou naturelles, sont essentielles pour optimiser les propriétés des mortiers, offrant des solutions innovantes face aux défis actuels de la construction.

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales



II.1. Introduction

L'analyse des matériaux et les méthodes utilisées dans les mortiers essentiels pour comprendre leur efficacité, leur durabilité et leur application dans le domaine de construction. L'objectif de ce chapitre est d'étudier les composants essentiels des mortiers, tels que le ciment, le sable, l'eau, les adjuvants et les fibres pour les mortiers fibrés, ainsi que les différentes méthodes de préparation et de la mise en œuvre ont été réalisées au laboratoire pédagogique MDC 1 de l'Université Abderrahmane-MIRA de Bejaïa.

L'intention est de proposer une étude détaillée des caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux utilisés, elle vise à améliorer la qualité et l'efficacité des mortiers dans les différents domaines de construction.

II.2. Les matériaux utilisés

II.2.1. Ciment :

Le ciment que nous avons utilisé dans notre étude est un ciment de type CPJ CEM II 42.5, provenant de la société de ciments d'Ain El Kebira, située dans la Wilaya de Sétif. Il s'agit d'un ciment portland composé, obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'autres matériaux additionnels.

C'est un ciment conforme à la norme [NA 442 :2000].



Figure.II.1. Photo de ciment prise au laboratoire.

II.2.2. Sable :

Nous avons employé du sable d'Oued Zhour, situé dans la wilaya de Skikda. Ce type de granulat est le plus couramment utilisé, surtout dans le secteur du bâtiment et des travaux publics, grâce à sa disponibilité locale. Il se caractérise par sa finesse, sa propreté et son origine naturelle, ce qui le rend adapté aux formulations de mortiers.



Figure.II.2. Photo de sable d'Oued Zhour prise au laboratoire.

II.2.3. Les adjuvants :

L'adjuvant utilisé est le SikaPlast-40 Pro est super plastifiant haut réducteur d'eau, à base de poly carboxylates modifiés.

Dans les bétons fluides, SikaPlast-40 Pro améliore la stabilité, limite les risque de ségrégation et rend la formule plus robuste vis-à-vis des variations de dosage en eau et des propriétés des constituants.



Figure II.3. Photo de l'adjuvant prise au laboratoire.



Figure II.4. Fiche technique de Sikaplast-40 Pro.

II.2.4. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée est celle du robinet du laboratoire pédagogique MDC 1 de génie civil, l'université de Bejaïa.

II.2.5. Les fibres d'aluminium :

Dans notre recherche on a utilisé les fibres d'aluminium (copeaux d'aluminium) ont des formes différentes qui sont des résidus métalliques produits lors de l'usinage ou de fraisage de l'aluminium.



Figure II.5. Les fibres d'aluminium utilisées.

II.3. Les méthodes utilisées

II.3.1. Les essais sur la matière première :

Dans notre recherche on a utilisé deux matières premières le sable d'Oued Zhour et les fibres d'aluminium.

II.3.1.1. L'analyse granulométrique (NF EN 933-1) :

❖ Définition :

L'analyse granulométrique est une méthode permettant d'étudier la répartition des grains d'un matériau, comme le sable. Le gravier ou les roches, en fonction de leur taille.

❖ Principe de l'essai :

L'analyse granulométrique a trois buts principaux :

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions de grains de même dimension.
- En déduire le module de finesse (MF).

❖ Matériels utilisés :

Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Dans notre étude expérimentale on a utilisé :

- Une série de tamis disposé par ordre décroissant d'ouverture de haut en bas suivante en (mm) : 2.5, 1.6, 1.25, 0.63, 0.315, 0.16, 0.125, 0.080, 0.063.
- Une tamiseuse électrique.
- Une balance pour faire les pesées.

❖ Mode opératoire :

- Le matériau sera séché à l'étuve à une température de 105°C.
- On emboîte les tamis les uns sur les autres, dans un ordre décroissant.
- En partie inférieure, on dispose un fond du tamis étanche qui permettra de récupérer les fillers.
- Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci entre en vibration à l'aide de la tamiseuse électrique.
- La somme des refus cumulés, mesurée sur les différents tamis, ainsi que du tamisât sur le fond (fillers), doit correspondre au poids initial de l'échantillon introduit en tête de colonne.

On appellera **Tamisât** le poids du matériau passant à travers un tamis donné et **Refus** le poids de matériau retenu par ce même tamis.

- La perte éventuelle de matériaux pendant l'opération de tamisage ne doit pas excéder plus de 1% du poids total de l'échantillon.
- Les résultats des refus sont exprimés en pourcentage de la masse sèche initiale.

On note les quantités de refus (R_n), puis on détermine les pourcentages de ces refus en basant sur la formule suivante :

$$\text{Refus cumulés \%} = \frac{R_n}{M} \times 100$$

La courbe granulométrique est déterminée en calculant le pourcentage des tamis, effectué selon la formule suivant :

$$\text{Tamisâts cumulés \%} = 100 - \text{refus (\%)}$$



Figure II.6. Sérier des tamis.

❖ Module de finesse :

Après l'analyse granulométrique d'un sable, il est nécessaire de connaître son module de finesse afin de le classer.

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

- Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).
- Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.
- La norme française [NFP 18-540] donne la formule de calcul du module de finesse qui est :

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{0,16_0,315_0,63_1,25_2,5_5\}$$

Lorsque le module de finesse MF est compris entre :

- **1.8 et 2.2** : le sable est à majorité de grains fins,
- **2.2 et 2.8** : on est en présence d'un sable préférentiel,
- **2.8 et 3.3** : le sable est un peu grossier (petite quantité des fines). Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

II.3.1.2. Équivalent de sable (NF P 18-597 et NF P 18-598) :

❖ Définition :

L'équivalent de sable est un paramètre, utilisé en géotechnique, caractérisant la propreté d'un sable ou d'un gravier. Il indique la teneur en éléments fins ayant un diamètre inférieur à 0.5 mm, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains. Ce terme désigne également l'essai qui permet de déterminer cet indicateur. On parle « d'essai d'équivalent de sable piston » ou, plus simplement, « d'essai d'équivalent de sable ».

❖ But de l'essai :

L'objectif de l'essai est d'évaluer la propreté des sables. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable.

❖ Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un pourcentage normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- Hauteur h1 : sable propre + éléments fins.
- Hauteur h2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable par la relation ci-dessous :

$$ES = \frac{h2}{h1} \times 100$$

❖ Matériels utilisés :

- 03 éprouvettes, en matière plastique, avec 2 traits repères ; bouchons.
- Entonnoir pour introduire le sable.
- Solution lavant.
- Tuyau souple de 1.5m.
- Tube laveur métallique.
- Machine agitatrice ; électrique.
- Règle de mesure.
- Piston taré pour la mesure.

➤ Chronomètre.

❖ Mode opératoire :

- Remplir l'éprouvette avec la solution lavant jusqu'au premier trait.
- Verser la quantité de sable (égale à 120 g), Laisser reposer 10 min pour éliminer les bulles d'air.
- Boucher l'éprouvette et faire l'agiter par la machine (90 cycles en 30s) pour laver le sable.
- On lave les parois intérieures de l'éprouvette en utilisant le tube laveur qui est tourné entre les doigts.
- Sortir le tube laveur puis laisser reposer 20 min en évitant toute vibration jusqu'au fin de la décantation.
- Mesure de la hauteur de sable h2 et de la hauteur h1 de l'ensemble sable plus floculat après 20 min.
- Mesure de la hauteur h'2 dans le cas de l'utilisation du piston.
- Calcul du E.S.V et E.S.P.



Figure II.7. L'essai d'équivalent de sable.

Equivalent de sable visuel (E.S.V) :

Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h1, de niveau supérieure de floculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle et mesurer également avec la règle la hauteur h2 compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

$$ESV = \frac{h2}{h1} \times 100$$

Equivalent de sable piston (E.S.P) :

Introduire le piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, à cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.

$$ESP = \frac{h'2}{h1} \times 100$$

❖ Classification des sables :

Tableau II.1. La qualité de sable.

ESV (%)	ESP(%)	Qualité de sable
ESV < 65	ESP < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualités.
$65 \leq ESV < 75$	$60 \leq ESP < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
$75 \leq ESV < 85$	$65 \leq ESP \leq 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileux convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$ESV \geq 85$	ESP > 80	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

II.3.1.3. Masse volumique apparente (NF EN 1097-6) :

❖ Définition :

La masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume, exprimée en t/m³, en Kg/m³, ou en g/cm³. Cette masse volumique intègre les grains de l'agrégat ainsi que les vides compris entre ces grains.

❖ But de l'essai :

Cet essai permet de déterminer la masse volumique apparente des différents matériaux (ciment, sable, gravier, etc.), c'est-à-dire la masse en gramme de ce matériau pour 1cm³ de volume. Cette masse volumique apparente est appelée (ρ_{app}).

❖ Principe de l'essai :

Il suffit de remplir un récipient, dont on connaît le volume, en prenant de grandes précautions pour éviter tous phénomènes parasites que pourrait provoquer le tassement trop important au trop faible donneraient un résultat erroné. Pour limiter ce risque d'erreurs, l'essai se fera sur plusieurs pesées, avec lesquels on fera une moyenne.

La valeur de la masse volumique apparente du matériau est donnée par la formule suivante :

$$\rho(app) = \frac{M}{V} \quad [g/cm^3]$$

M : masse du matériau étudié ($M = M_1 - M_0$).

M₀ : masse du récipient vide.

M₁ : masse du récipient rempli.

V : volume du récipient.

❖ Matériel utilisés :

- Un récipient en plastique de forme cylindrique ($V = 1 \text{ L}$).
- Une balance.
- Entonnoir spécial.
- Une règle pour arasement du récipient.

❖ Mode opératoire :

- Peser le récipient vide (M_0).
- Prendre le matériau dans les deux mains en formant un entonnoir.
- Places les deux mains à environ 10 cm au-dessus de récipient et laisser le matériau s'écouler lentement.
- Laisser couler le matériau toujours au centre du récipient, jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône.
- Araser à la règle avec précaution la partie du matériau dépassant les bords supérieurs du récipient.
- Peser l'ensemble et noter le résultat (M_1).
- Calculer la masse volumique apparente.



Figure.II.8. L'essai de la masse volumique.

II.3.1.4. Masse volumique absolue (NF EN 1097-6) :

❖ Définition :

La masse volumique absolue représente la masse du matériau par unité de volume, prenant en compte uniquement les grains de l'agrégat, donc sans tenir compte des espaces vides entre ces grains.

❖ But de l'essai :

Cet essai permet de déterminer la masse volumique absolue des différents matériaux (ciment, sable et gravier, etc.), mais seulement en ce qui concerne les particules spécifiques formant le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister entre les particules.

* Méthode d'éprouvette graduée :

❖ Principe de l'essai :

On prolonge une masse de granulat dans un volume d'eau, la masse volumique absolue s'obtient en divisant cette masse par la différence de volume.

$$\rho(abs) = \frac{M}{V} \quad [g/cm^3]$$

M : masse du matériau étudié.

V = V1 - V2

V1 : volume dans l'éprouvette avant introduire le matériau étudié.

V2 : volume dans l'éprouvette après introduire le matériau étudié.

❖ Matériels utilisés :

- Une éprouvette graduée.
- Une balance.

❖ Mode opératoire :

- Remplir une éprouvette avec un volume **V1** d'eau.
- Peser un échantillon sec **M** de granulats (environs 300g).
- Introduire l'échantillon dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer les bulles d'air.
- Lire le nouveau volume **V2**.
- Calculer la masse volumique absolue.

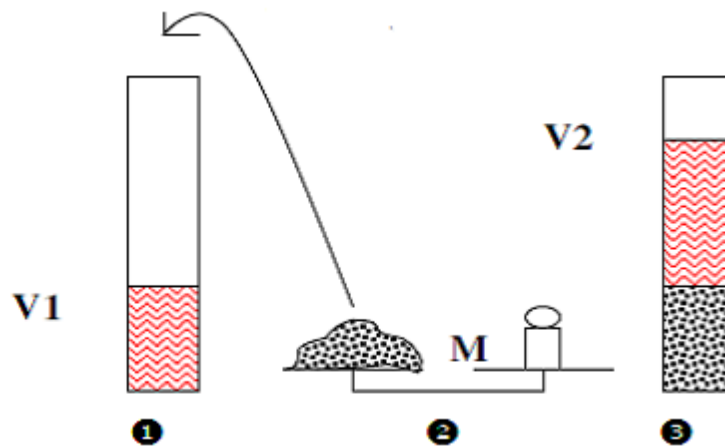


Figure.II.9. Méthode des éprouvettes graduées

* Méthode de pycnomètre :

❖ Principe de l'essai :

On utilise un volume d'eau pour remplir le pycnomètre et on mesure la masse du liquide déplacé par le matériau.

$$\rho = \frac{M2}{V} \quad [\text{g/cm}^3]$$

M0 : masse vide du pycnomètre.

M1 : masse de pycnomètre remplis d'eau jusqu'à le trait de repère.

M2 : masse du matériau étudié.

M3 : masse du pycnomètre + sable + l'eau.

ML : masse du liquide déplacé.

$$ML = (M1 + M2) - M3$$

VL : volume liquide.

$$VL = \frac{ML}{\rho L}$$

ρ_L : Masse volumique de l'eau (1 g/cm^3)

❖ **Matériels utilisés :**

- Une balance.
- Un pycnomètre.

❖ **Mode opératoire :**

- Peser le pycnomètre vide (**M0**).
- Remplir le pycnomètre d'eau jusqu'au trait de repère.
- Peser le pycnomètre rempli d'eau (**M1**).
- Peser l'échantillon (environ 50g) (**M2**).
- Introduire l'échantillon dans le pycnomètre.
- Remplir le pycnomètre avec l'eau jusqu'au repère, puis peser (**M3**).



Figure.II.10. La méthode de pycnomètre.

II.3.1.5. Essai de bleu de méthylène (NF EN 933-9) :

Essai utilisé pour la qualification des fines. Utilisé principalement pour quantifier la propreté des sables utilisés dans les enrobés ou pour la fraction sableuse des graves.

❖ **Principe d'essai :**

Cet essai permet de déterminer le degré d'argilo site d'un sable, d'un granulat ou, plus généralement, d'un sol. Les résultats obtenus sont ensuite interprétés afin d'évaluer cette teneur :

- **VB < 0,5** : Très faible teneur en fines argileuses.
- **VB entre 0,5 et 1,0** : Faible teneur en fines argileuses.
- **VB entre 1,0 et 2,0** : Teneur moyenne en fines argileuses.
- **VB entre 2,0 et 3,0** : Haute teneur en fines argileuses.
- **VB > 3,0** : Très haute teneur en fines argileuses.

❖ Mode opératoire :

- Les échantillons de laboratoire doivent être réduits conformément à l'EN 933-2 pour obtenir deux sous échantillons de 200 g minimum de la fraction 0/2 mm ou de 30 g de la fraction 0/0,125 mm.
- On sèche le sous échantillon 1 à 110 ± 5 °C. Et ensuite on calcule la teneur en eau.
- On pèse une masse M0 du sous échantillon 2 de plus 200 g pour la fraction 0/2 mm et plus de 30 g pour la fraction 0/0,125 mm et on détermine la masse M1.
- On place la masse M1 dans un bêcher contenant 500 ± 5 ml d'eau déminéralisée.
- Cas d'un matériau pauvre en éléments fins, on ajoute dans le bêcher 30g de kaolinite séchée à 110 ± 5 °C de valeur de bleu MBK $v \approx 30$ MBK v exprimé en ml de la solution de bleu adsorbée par la kaolinite.
- Ensuite on met en agitation à 600 tr/min pendant 5 minute l'ensemble (eau+M1) ou (eau+kaolinite).
- Introduire dans un bécher une dose de 5 ml de solution de colorant et l'agiter à 400 ± 40 tr/min pendant au moins une minute puis on va effectuer un test à la tache (on le prélève à l'aide d'une baguette de verre une goutte en suspension et la déposer sur le papier filtre pour obtenir un dépôt qui doit avoir un diamètre 8 à 12 mm).
- Si après l'ajout des 5 ml de solution, l'auréole n'apparaît pas, on effectue encore une fois des additions de 5 ml tout en agitant pendant 1 min et on fait des tests à la tache jusqu'à apparition de l'auréole.
- Continuer l'agitation sans ajout de solution et effectuer des tests à la tache toutes les minutes pendant 5 minutes.
Si l'auréole persiste toujours pour les cinq taches le test est positif.
Si l'auréole disparaît au bout de la cinquième tache ajouter 2 ml de colorant et faire le test à la tache si l'auréole disparaît au bout de la quatrième tache ajouter 5 ml de colorant de faire le test à la tache.
- La quantité totale de colorant V1 ajoutée doit être enregistrée afin d'obtenir une auréole visible pendant 5 minutes à 1 ml près.

La valeur de bleu de méthylène est calculée selon la formule suivante :

$$V_B = \frac{V_1 - V'}{M_1} \times 10 \text{ (g/kg)}$$

Avec :

V_1 : volume de bleu introduit.

V' : volume de bleu adsorbée par la kaolinite

M_1 : la masse sèche de la prise d'essai.



Figure .II . 11. Appareil d'essai de bleu de méthylène

II.3.1.6. Essai de caractérisation chimique de sable :

Cet essai a été effectué au laboratoire de l'université Abderrahmane MIRA de Bejaia

II. L'analyse Chimique (FRX) :

La spectrométrie de fluorescence X est une méthode d'analyse élémentaire globale utilisée pour identifier et quantifier la majorité des éléments chimiques présents dans un échantillon. Elle s'applique à une grande variété de matériaux, qu'ils soient solides ou liquides, tels que les minéraux, céramiques, ciments, métaux, huiles, eaux ou verres. [29]

❖ Mode opératoire

L'analyse est effectuée à l'aide d'un spectromètre selon les étapes suivantes :

- L'échantillon est d'abord broyé jusqu'à obtention d'une poudre fine et homogène, capable de passer entièrement à travers un tamis de maillage $\Phi=0.5\text{mm}$. Environ 10 grammes de cette poudre sont recueillis dans un récipient étanche et chimiquement inerte.

- Ensuite transporté l'échantillon au laboratoire d'analyse dans des sacs stériles. Il est placé dans le porte-échantillon du diffractomètre, puis l'analyse FRX est lancée en respectant les paramètres requis (tension, courant, temps de comptage, etc.)

II.3.2. Les essais de caractérisation sur les mortiers

II.3.2.1. Formulations des mortiers d'étude :

La méthode de préparation d'un mortier témoin utilisée est celle donnée par la norme (EN-196-1). Sa composition massique suivante :

- Sable : 1350 g
- Ciment : 450 g
- Eau de gâchage (le rapport E/C est égal 0.5) : 225 g
- L'adjuvant 0.8% de poids de ciment : 3.6 g

Tableau.II.2. Composition des mortiers étudiés.

Pourcentages	Sable (g)	Ciment (g)	Eau (g)	Adjuvant (g)	Fibre d'aluminium (g)
0%	1350	450	225	3.6	0
0.5%					2.25
1%					4.5
1.5%					6.75
2%					9
2.5%					11.25

II.3.2.1.1. Préparation des mortiers :

❖ Procédure de malaxage :

Un malaxeur de la marque CONTROLS est utilisé pour la fabrication du mortier, selon les étapes suivantes :

- Introduction les matériaux sec (sable, ciment, fibre d'aluminium) en premier dans le malaxeur, puis malaxés pendant 1 minutes à vitesse lente.
- Verser 2/3 de la quantité d'eau et d'adjuvant, toujours à une vitesse lente pendant 30 secondes.
- Les 1/3 restants de l'eau et d'adjuvant ont été introduits et le tout a été malaxé pendant 90 secondes.
- Arrêter le malaxeur et mélanger manuellement le mortier avec une truelle.



Figure.II.12. Le malaxeur.



Figure.II.13. Les matériaux.



Figure.II.14. Le mortier prêt à l'emploi.

❖ Confection des éprouvettes :

- Les moules sont bien nettoyés et bien montés.
- Huiler l'intérieur des moules d'une légère couche pour faciliter le démoulage.
- Introduire la première des deux couches de mortier dans le moule.
- Placer le moule à compacter mécaniquement à l'aide d'une table à chocs par 60 chocs.

- Introduire la seconde couche de mortier, et en appliquant 60 chocs une autre fois.
- En utilisant une règle métallique pour éliminer le surplus de mortier.
- La surface des éprouvettes doit être lissée à l'aide d'une spatule.
- Étiqueter ou marquer les moules (nom, date, caractéristique)
- Recouvrir les moules à l'aide d'une plaque de verre.
- Le démoulage se fait après 24 heures et les prismes de mortier $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ sont maintenus dans l'eau jusqu'aux 7 et 28 jours.
- Avant de mettre les prismes de mortier dans l'eau, il faut les numérotter et mentionner la date de confection.



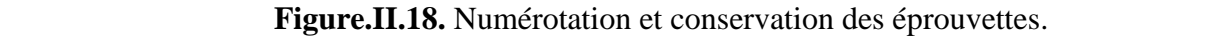
Figure.II.15. Les moules.



Figure.II.17. Recouvrir les moules.



Figure.II.16. Table à chocs.



II.3.2.2. A l'état frais

II.3.2.2.1. La masse volumique (NF EN 1015-6) :

La masse volumique du mortier frais peut être déterminée à l'aide d'essais dédiés, consistant notamment à peser un moule avant et après son remplissage. Cette dernière caractérisée par la masse d'une quantité de béton frais rapporté à son volume comme il est indiqué dans la formule suivant :

$$\rho = \frac{M2 - M1}{V}$$

ρ : La masse volumique relative à l'état de l'échantillon, en g/cm³.

$M1$: La masse de moule vide.

V : Le volume de l'échantillon



Figure. II.19. Essai de la masse volumique à l'état frais.

II.3.2.3. A L'état durci

II.3.2.3.1. La masse Volumique à l'état sec (NF EN 1936) :

Les mesures ont été effectuées après conservation des éprouvettes de dimensions (4x4x16 cm^3) dans l'eau à température ambiante pendant des périodes de 7 jours et 28 jours.

- Conduite de l'essai

Pour déterminer la masse volumique à l'état sec (ρ_d) par la pesée hydrostatique Après saturation de l'échantillon, pesez-le immergé dans l'eau à l'aide d'un dispositif de pesée hydrostatique pour déterminer sa masse immergée (m_i). Retirez ensuite l'échantillon de l'eau, séchez délicatement sa surface avec un chiffon, puis mesurez sa masse humide (m_h) à l'aide d'une balance de précision. Faites ensuite sécher l'échantillon dans un four réglé à pendant 24 heures. Enfin, pesez l'échantillon sec pour obtenir sa masse sèche (m_s).

$$\rho_d = \frac{m_s}{m_h - m_i}$$



Figure. II.20. La pèse hydrostatique.

II.3.2.3.2. La porosité (NF P 18-459) :

La porosité a été mesurée sur des échantillons d'éprouvette après 7 jours et 28 jours de maturation.

La détermination de la porosité s'effectue selon les étapes suivantes :

- L'éprouvette est d'abord immergée dans l'eau, puis pesée pour obtenir sa masse hydrostatique P_{hyd} .
- Ensuite, après avoir essuyé superficiellement l'éprouvette, on la pèse de nouveau pour déterminer sa masse humide P_h .
- après un séjour de 24 heures dans l'étuve, on mesure sa masse sèche P_s .

$$P(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_h - P_{hyd}} \times 100$$



Figure. II.21. Stabilisation du poids par étuvage.

II.3.2.3.3. L'absorption d'eau (NF EN 1015-18) :

La capacité d'absorption d'eau est évaluée à l'aide d'une méthode simple qui consiste à peser des éprouvettes de mortier à l'état sec, puis après immersion à l'état humide.

$$A(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$



Figure. II.22. Des éprouvettes dans un bac de conservation.

II.3.3. Les essais mécaniques

Dans notre recherche nous avons réalisé deux tests : la résistance au flexion-trois point et à la compression, sur une machine d'essai de flexion ou de compression utilisé au laboratoire de recherche de l'université de Bejaïa (LGCA), c'est un modèle de la marque CONTROLS, série PILOT.



Figure. II.23. Machine de flexion ou de compression CONTROLS.

II.3.3.1. La résistance à la flexion-trois points (NF EN 1015-11) :

C'est une méthode utilisée pour mesurer la résistance mécanique des mortiers, c'est un essai qui permet de comprimer un prisme ($4 \times 4 \times 16$) cm³ jusqu'à ce qu'il rompe en deux. Les mortiers étudiés ont été testés à 7 et 28 jours.

❖ Mode opératoire :

- Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage lisse sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire au rouleau support.
- Appliquer une charge verticalement la face latérale opposée du prisme jusqu'à rupture.
- Le demi-prisme doit être conservé jusqu'au moment de l'essai de compression.



Figure II.24. Essai de la flexion trois-points.

II. 3.3.2. La résistance à la compression (NF EN 1015-11) :

L'essai de compression est une technique d'analyse mécanique qui sert à évaluer la résistance et le comportement à la déformation d'un matériau. Lorsqu'il est soumis à une charge axiale normale jusqu'à sa rupture. Le test de compression est effectué sur les demi-prismes récupérés après essai de flexion.

❖ Mode opératoire :

- Positionner chaque demi-prisme de manière centrée par rapport aux plateaux de l'appareil, sur le plan latéral.

- Appliquer la charge en l'augmentant à vitesse constante jusqu'à ce que la rupture se produise.



Figure II.25. Essai de la résistance à la compression.

II.3.4. Propriété thermique et leur essai

Les méthodes de mesure des propriétés thermiques en régime stationnaire figurent parmi les premières techniques développées. Elles restent largement employées en raison de la simplicité de leur mise en œuvre expérimentale et de leur modélisation théorique, comparativement aux autres méthodes. Ces techniques permettent principalement de déterminer la conductivité thermique d'un matériau.

Nous avons utilisé la méthode du fil chaud par CT-mètre pour notre programme expérimental.

II.3.4.1. La conductivité thermique :

Des éprouvettes de dimensions (4x4x16cm) ont été confectionnées afin de mesurer la conductivité thermique.

II.3.4.1.1. Méthode de fil chaud par CT-mètre (NF EN 993-15) :

Le CT-METRE a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques thermiques d'un certain nombre de matériaux homogènes et isotropes. Le CT-mètre se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester, et la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température.



Figure II.26. Appareil CT-mètre utilisée

- Cette méthode implique l'utilisation d'un fil chaud, pour appliquer une source de chaleur à deux éprouvettes de béton de manière à ce que la sonde de l'appareil CT-mètre soit placée entre elles. La conductivité thermique est symbolisée par la lettre lambda λ et s'exprime en **W/m.K**.



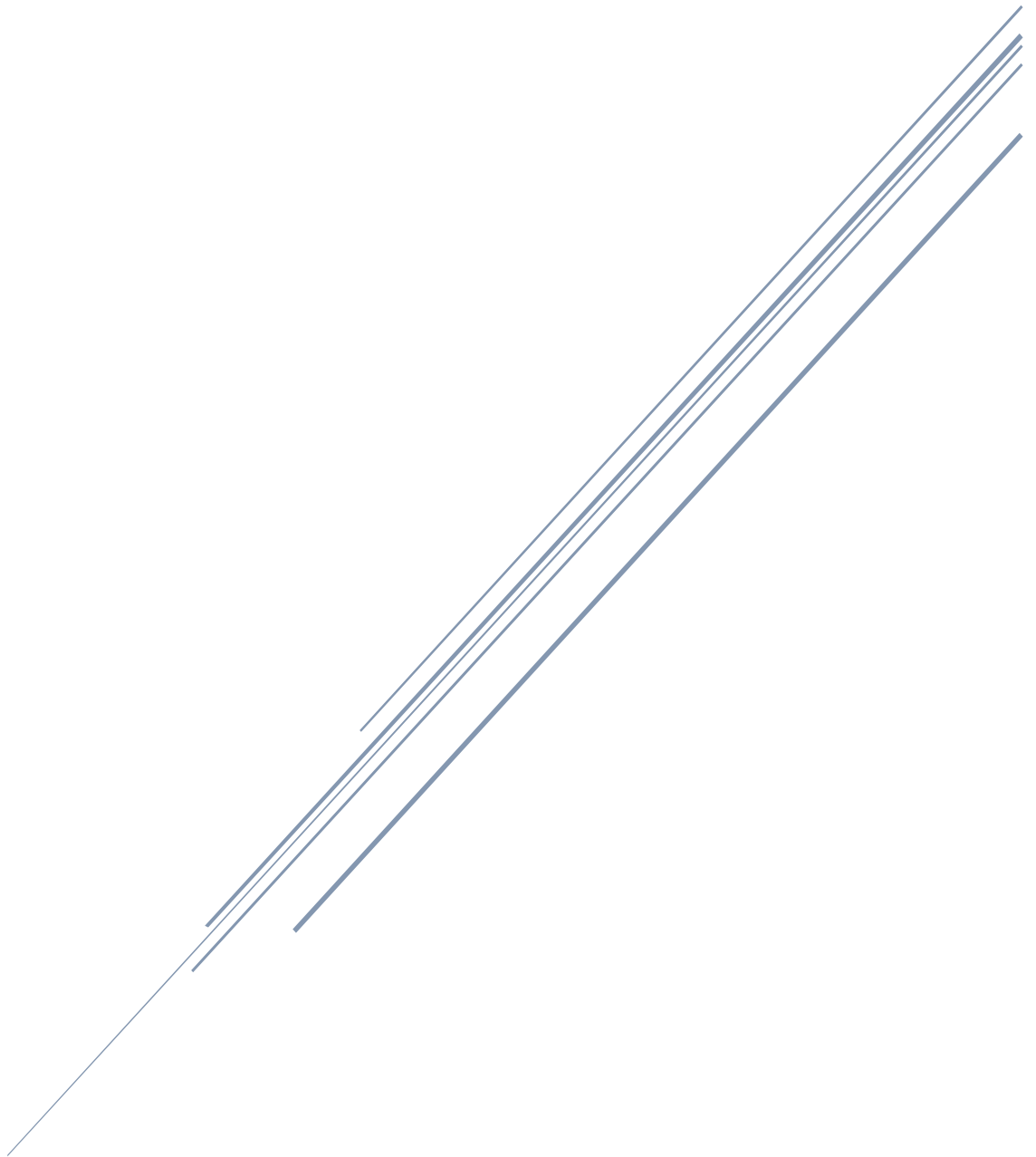
Figure II.27. Dispositif de l'essai de la conductivité thermique

II.4. Conclusion

La présentation des caractéristiques des matériaux utilisés, de la composition des mélanges ainsi que des procédures expérimentales permettra d'analyser plus efficacement les résultats et de mieux comprendre l'influence des différents paramètres étudiés sur le comportement mécanique et thermique des mortiers.

CHAPITRE III :

Caractérisation de la matière première



III.1. Introduction

Cette étude à accorder une importance particulière sur l'analyse approfondie des caractéristiques de la matière première. Ce chapitre vise à exposer les résultats des tests réalisés, en mettant en valeur les caractéristiques essentielles et particulières de cette matière première.

III.1.1. Analyse granulométrique par tamisage du sable

Les résultats obtenus d'analyse granulométrique sont donnés dans le tableau.III.1 :

Tableau III.1 : Analyse granulométrique du sable (Oued Zhour).

Masse sèche (g)	Tamis (mm)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
1200	2.5	0	100
	1.6	2	98
	1.25	6	94
	0.63	19	81
	0.315	78	22
	0.16	96	4
	0.125	98	2
	0.080	99	1
	0.063	99	1

La courbe granulométrique suivant donnant la répartition des différentes tailles des grains du sable utilisé (Oued Zhour).

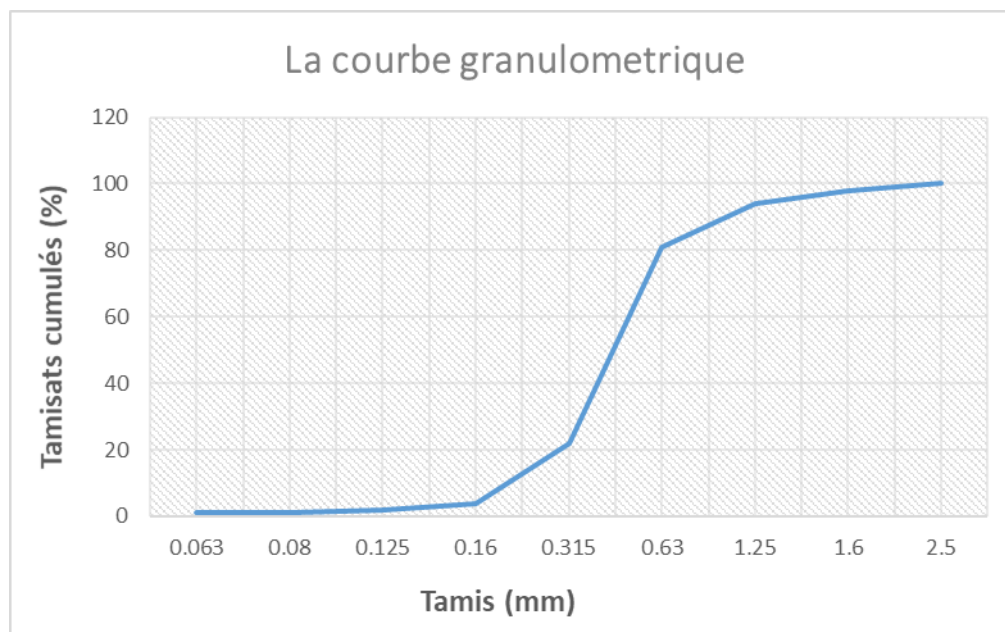


Figure III.1. La courbe granulométrique du sable utilisé (Oued Zhour).

❖ Module de finesse (MF) :

Application numérique :

$$MF = \frac{1}{100} \times (96 + 78 + 19 + 6 + 0) = \frac{202}{100}$$

$$MF = 2.02$$

$1.8 < MF=2.02 < 2.2$: d'après les résultats de module de finesse le sable est à majorité de grains fins.

III.1.2. Équivalent de sable :

Les résultats sont donnés dans le Tableau.III.2 ci-dessous :

Tableau III.2 Détermination de la propreté de sable utilisé (Oued Zhour).

Eprouvettes	h1	h2	h'2	E.V.S (%)	E.S.P (%)
1	10	8.3	8.5	85	83
2	10.1	8.3	8.5	84.15	82.17
3	10	8.7	8.6	86	87
La moyenne				85.05	84.05

❖ Interprétation des résultats :

Notre sable, avec une pureté supérieure à 85 % pour l'ESV et à 80 % pour l'ESP, est de haute qualité. Toutefois, son absence presque totale de fines argileuses pourrait réduire la plasticité du béton, nécessitant ainsi une augmentation du dosage en eau pour compenser.

III.1.3. Masse volumique apparente :

Les résultats obtenus de l'essai de la masse volumique apparente du sable de dune (Oued Zhour) et des fibres d'aluminium sont présente dans les deux tableaux III.3 et III.4 :

Tableau.III.3 : Les résultats obtenus pour le sable de dune (Oued Zhour).

Essai	Masse de récipient vide M1 (g)	Masse de récipient rempli M2 (g)	Volume de récipient (cm³)	ρ_{app} (g/cm³)
1	486.20	2102.2	1000	1.616
2		2150.2		1.664
3		2138.2		1.652
La moyenne				1.644

Tableau.III.4 : Les résultats obtenus pour les fibres d'aluminium.

Essai	Masse de récipient vide M1 (g)	Masse de récipient rempli M2 (g)	Volume de récipient (cm³)	ρ_{app} (g/cm³)
1	486.20	569.70	1000	0.0835
2		565.75		0.0795
3		569.05		0.0828
La moyenne				0.0819

Ces valeurs montrent que la masse volumique apparente du sable est plus élevée que celle des fibres d'aluminium. Cela indique que le sable a une densité plus grande.

III.1.4. Masse volumique absolue :

On a utilisé deux méthodes pour la détermination de la masse volumique absolue (méthode d'éprouvette graduée et la méthode de pycnomètre) pour le sable les résultats sont dans les tableaux (III.5 et III.6) suivants :

Tableau.III.5. Les résultats obtenus par la méthode d'éprouvette graduée pour le sable d'Oued Zhour.

	Masse de sable M (g)	Volume de l'eau V1 (cm³)	Volume de l'eau + sable V2 (cm³)	ρ_{abs} (g/cm³)
Essai 1	300	250	370	2.5
Essai 2		200	320	2.5
Essai 3		150	270	2.5
La moyenne				2.5

Tableau.III.6. Les résultats obtenus par la méthode de pycnomètre pour le sable d'Oued Zhour.

	Masse de pycnomètre vide M0 (g)	Masse de pycnomètre + sable M1 (g)	Masse de sable M2 (g)	Masse de pycnomètre + sable + l'eau M3 (g)	Masse du liquide déplacé ML (g)	Volume de liquide VL (cm ³)
Sable	224.9	1218	50	1250	18	1
ρ_{abs} (g/cm ³)	2.7					

La masse volumique absolue des fibres d'aluminium on a utilisé la méthode de pycnomètre les résultats sont présents dans le tableau (III.7) ci-dessous :

Tableau.III.7. Les résultats obtenus de la masse volumique absolue des fibres d'aluminium.

	Masse de pycnomètre vide M0 (g)	Masse de pycnomètre + sable M1 (g)	Masse de sable M2 (g)	Masse de pycnomètre + sable + l'eau M3 (g)	Masse du liquide déplacé ML (g)	Volume de liquide VL (cm ³)
Sable	223.84	1217.79	25	1231.08	11.71	1
ρ_{abs} (g/cm ³)	2.13					

Le sable, composé principalement de grains de silice (quartz), présente une densité élevée qui lui confère robustesse et stabilité en tant que granulat dans le béton et mortier, ce qui est essentiel pour la résistance et la durabilité des structures. En revanche, les fibres d'aluminium, bien qu'elles soient solides, sont issues d'un métal léger, ce qui leur confère une densité plus faible. Ainsi, même si ces fibres renforcent le béton et le mortier en améliorant certaines propriétés mécaniques, elles n'ajoutent pas autant de poids que le sable.

III.1.5. Essai de bleu de méthylène (NF EN 933-9)

La valeur de bleu de méthylène a été déterminé selon la norme NF EN 933-9. Les résultats obtenus lors du test VB sont présentés dans le tableau III.8.

Tableau III.8. Résultat d'essai bleu de méthylène.

Type de sable	M1 (g)	V1 (cm ³)	V' (cm ³)	VB (g/kg)
Oued Zhour	200	37	30	0,35

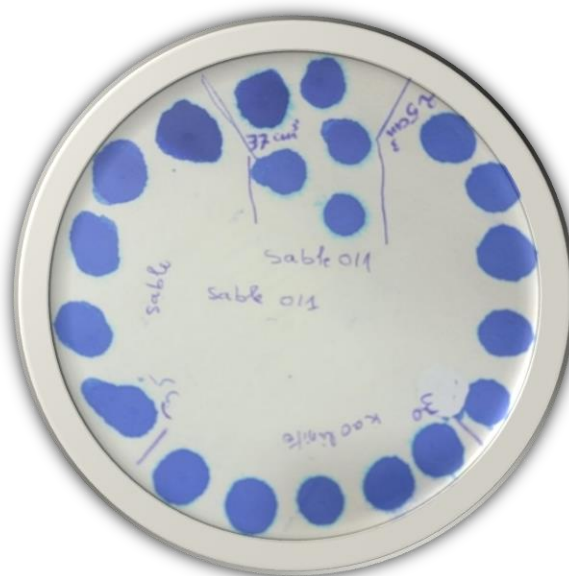


Figure III.2. Résultat de l'essai de bleu de méthylène

D'après la valeur de bleu de méthylène obtenu (tableau III.8.), (VB) est inférieur à 0.5 ce qui indique une très faible teneur en fines argileuses.

III.1.6. Analyse chimique

Le tableau (III.9), montre les pourcentages des composants chimiques du sable de dune, le sable de dune analysé présente une teneur dominante en dioxyde de silicium (SiO_2) avec 42,76 %, ce qui est typique des sables siliceux. La perte au feu (PAF) est également élevée à 54,76 %, ce qui indique une forte proportion de matières volatiles ou organiques. Cela peut affecter la stabilité thermique du matériau. Les autres oxydes sont présents en faibles quantités : Al_2O_3 (0,717 %), CaO (0,744 %), K_2O (0,384 %) et Fe_2O_3 (0,1784 %). Ces faibles teneurs montrent que le sable contient peu d'argiles, de chaux ou d'impuretés métalliques, ce qui peut être avantageux dans certaines formulations industrielles.

Tableau III.9. Résultats d'analyse chimique (FRX) de sable d'Oued Zhou.

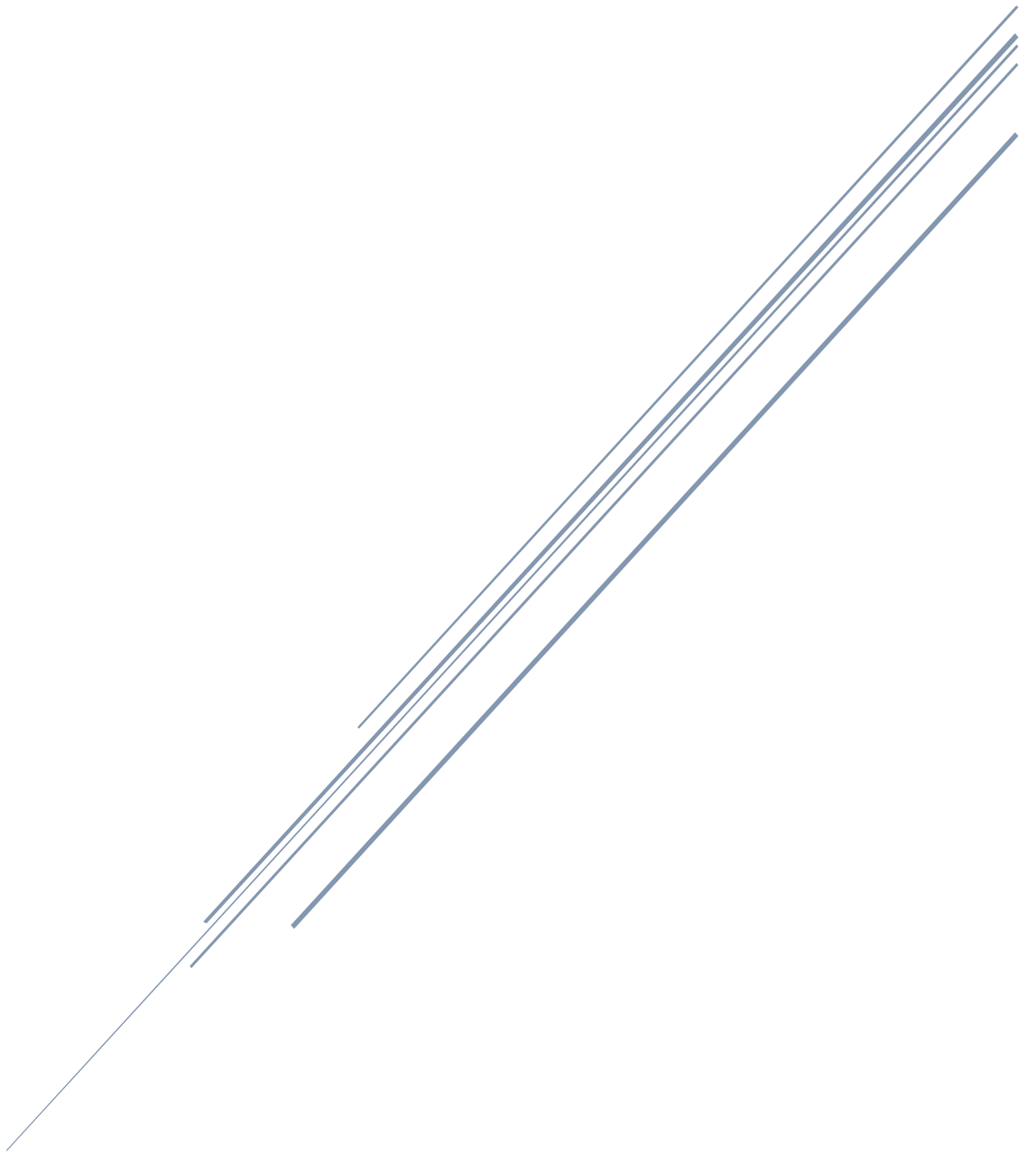
Composants	Pourcentages(%)
SiO_2	42,76
Al_2O_3	0,717
Fe_2O_3	0,1784
CaO	0,744
MgO	0
SO_3	0
K_2O	0,384
Na_2O	0
PAF	54,76
RI	0

III.2. Conclusion

Nous avons pu juger la qualité des matières premières choisies pour cette étude grâce aux tests d'identification précédemment cités. Notre connaissance approfondie des caractéristiques des matières premières nous autorise à fournir des commentaires et des justifications significatives concernant les résultats des tests à effectuer. C'est également une phase indispensable avant de commencer l'analyse expérimentale de ces mortiers.

Chapitre IV :

Résultats et discussions



IV. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les différents résultats physiques et mécaniques du mortier en fonction des pourcentages étudiés. Pour cela, des essais ont été réalisés à l'état frais et à l'état durci, afin d'observer l'évolution des performances du mortier aux âges de 7 et 28 jours, cette approche progressive permet d'évaluer de manière détaillée les propriétés du mortier et d'interpréter les résultats obtenus à chaque étape.

On a utilisé les abréviations suivantes :

- ✓ Mortier témoin → Combinaisons : MT (0%).
- ✓ Mortier avec 0,5% de fibre d'aluminium → Combinaisons : MF (0,5).
- ✓ Mortier avec 1% de fibre d'aluminium → Combinaisons : MF (1%).
- ✓ Mortier avec 1,5% de fibre d'aluminium → Combinaisons : MF (1,5%).
- ✓ Mortier avec 2% de fibre d'aluminium → Combinaisons : MF (2%).
- ✓ Mortier avec 2,5% de fibre d'aluminium → Combinaisons : MF (2,5%).

IV.2. Essais sur les mortiers

IV.2.1. Essais à l'état frais

IV.2.1.1. La masse volumique fraîche (NF EN 1015-6)

Dans le tableau IV.1 et la figure IV.1 nous avons rassemblé les résultats des messeuses de la masse volumique à l'état frais en fonction du pourcentage de fibre pour les différentes compositions. (Les résultats obtenus représentant la moyenne de trois valeurs).

Tableau IV.1. Résultats de la masse volumique fraîche des mortiers.

Type de mortier	La masse volumique fraîche (g/cm^3)
	La masse moyenne
MT 0%	2,325
MF 0,5%	2,310
MF 1%	2,321
MF 1,5%	2,247
MF 2%	2,261
MF 2,5%	2,247

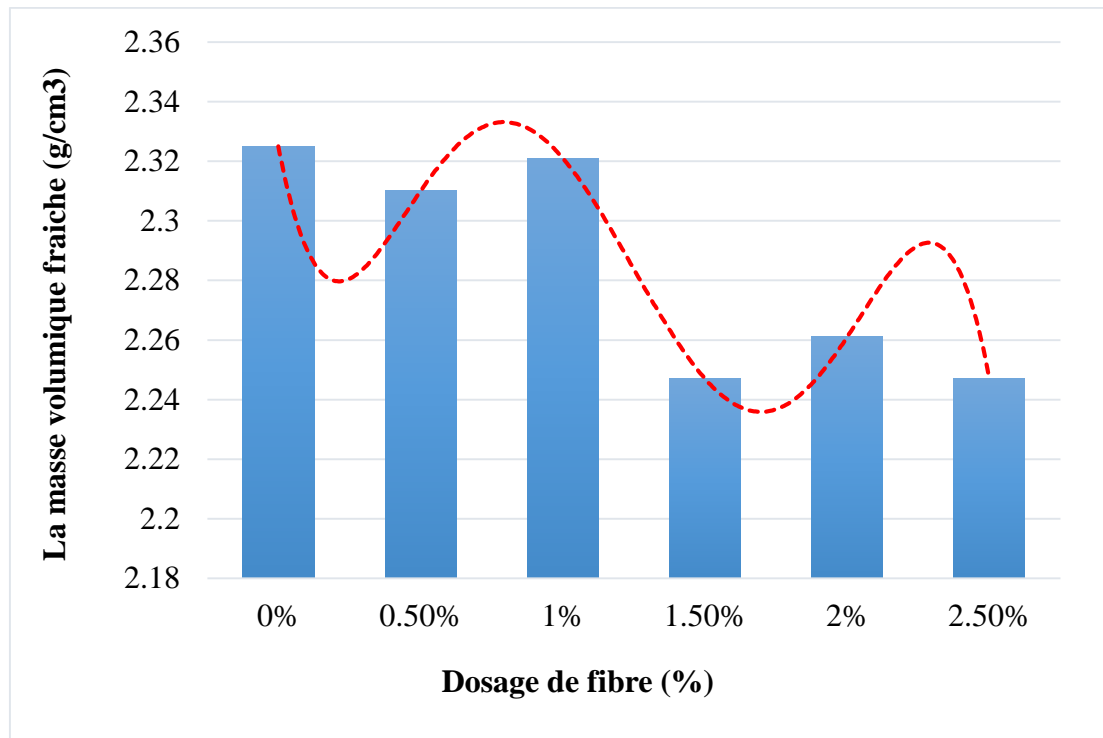


Figure IV.1. Variation de la masse volumique fraîche pour les différents pourcentages des fibres dans le mortier.

➤ Interprétation des résultats

L'analyse de la masse volumique fraîche moyenne des mortiers en fonction du taux de fibres incorporé révèle une tendance non linéaire. Le mortier témoin (MT), sans fibres, présente la masse volumique la plus élevée (2,325 g/cm³), servant de référence. À 0,5 % de fibres, on observe une légère diminution (2,310 g/cm³), probablement due à l'introduction de fibres qui perturbent légèrement la compacité de la matrice. Curieusement, à 1 % de fibres, la masse volumique augmente de nouveau (2,321 g/cm³), suggérant un possible effet de réarrangement ou de meilleure répartition des fibres dans le mélange. Cependant, à partir de 1,5 %, une baisse significative est constatée, atteignant 2,247 g/cm³, et ce niveau reste stable à 2,5 % de fibres. Cette diminution peut s'expliquer par l'effet de saturation : une trop grande quantité de fibres crée des vides ou empêche une bonne compaction du mélange, diminuant ainsi sa masse volumique.

IV.2.2. Essais à l'état durci

IV.2.2.1. La masse volumique à l'état sec (NF EN 1936)

Le tableau IV.2 ainsi que la figure IV.2 présentent les résultats obtenus concernant la variation de la masse volumique à sec en fonction des différents pourcentages de fibres d'aluminium introduits dans les différentes formulations.

Tableau IV.2. Résultats des mesures de la masse volumique de mortier à 7 et 28 jours.

Type de mortier	La masse volumique à l'état sec (g/cm^3)	
	7 jours	28 jours
MT 0%	2,162	2,158
MF 0,5%	2,107	2,167
MF 1%	2,105	2,088
MF 1,5%	1,982	2,052
MF 2%	1,997	2,061
MF 2,5%	1,968	2,066

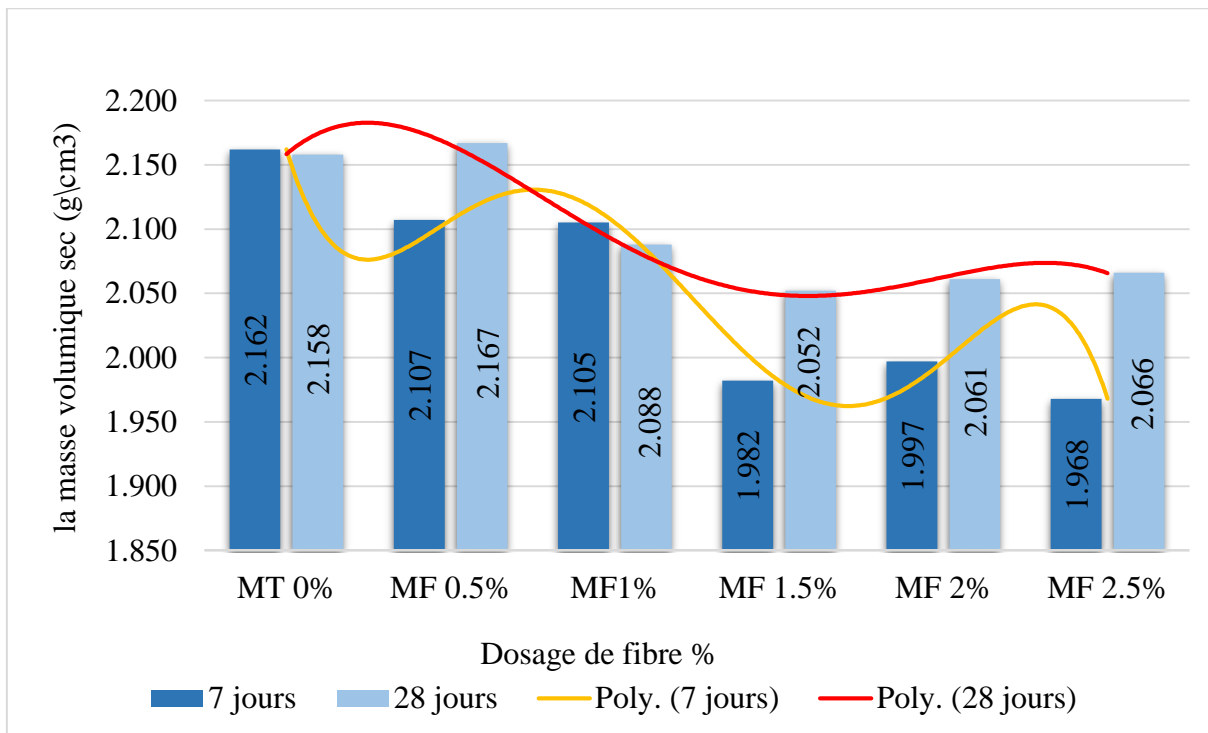


Figure IV.2. Variation de la masse volumique à l'état sec pour les différents pourcentages des fibres dans le mortier.

➤ **Interprétation des résultats**

Les résultats montrent que la masse volumique des mortiers varie en fonction du pourcentage d'ajout de fibres (MF) et du temps de cure.

À 7 jours, on observe une diminution progressive de la masse volumique avec l'augmentation du taux de fibres, ce qui peut s'expliquer par l'introduction de matériaux moins denses et une compaction légèrement altérée.

Cependant, à 28 jours, une augmentation générale de la masse volumique est observée, traduisant une amélioration de la compacité due à l'hydratation continue du ciment. Notamment, le mortier MF 0,5% affiche la masse volumique la plus élevée à 28 jours, suggérant un bon équilibre entre la quantité de fibres et la densification du matériau au fil du temps.

IV.2.2.2. La porosité (NF P 18-459)

Les résultats des mesures de la porosité du mortier après 7 et 28 jours seront présentés respectivement dans le tableau IV.3 et la figure IV.3.

Tableau IV.3. Résultats des mesures de la porosité de mortier à 7 et 28 jours.

Type de mortier	La porosité (%)	
	7 jours	28 jours
MT 0%	12,275	11,688
MF 0,5%	12,141	10,859
MF 1%	11,565	10,829
MF1, 5 %	11,376	9 ,677
MF 2%	10,083	6,533
MF 2,5%	10,124	9,821

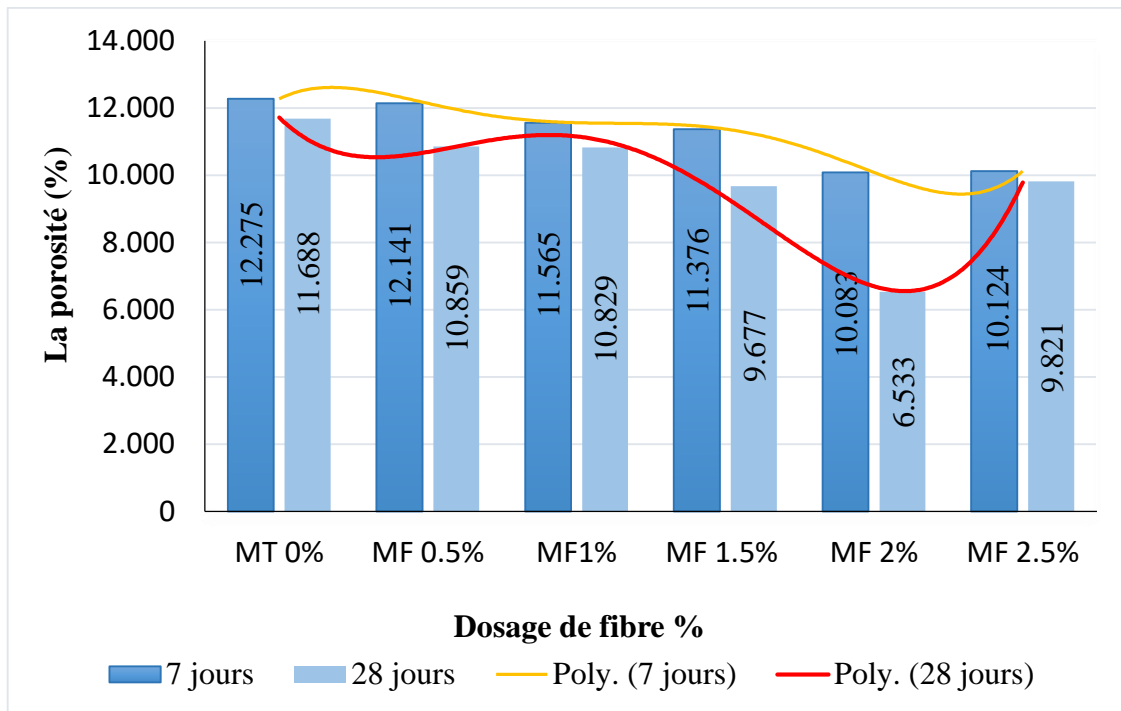


Figure.IV.3. Résultats de la porosité des mortiers à l'état durci

➤ Interprétation des résultats

Les résultats présentés dans le tableau IV.3 et la figure IV.3 montrent une tendance générale à la diminution de la porosité des mortiers avec l'âge (de 7 à 28 jours), ce qui est typique en raison de l'hydratation progressive du ciment. Le mortier témoin (MT 0%) présente une porosité relativement stable entre 7 et 28 jours, avec une légère diminution. En revanche, les mortiers formulés avec différents pourcentages de fibres (MF) montrent une évolution plus marquée. Notamment, le MF 2% affiche la plus forte réduction de porosité, passant de 10,083% à seulement 6,533%, ce qui indique une compacité accrue et une meilleure microstructure. Toutefois, à 2,5%, la porosité remonte légèrement à 9,821% à 28 jours, suggérant qu'un excès de fibres pourrait perturber la cohésion du mélange. Ainsi, l'ajout modéré de fibres (jusqu'à 2%) semble améliorer la densité du mortier, tandis qu'un dosage excessif pourrait compromettre cette amélioration.

IV.2.2.3. Absorption d'eau (NF EN 1015-18)

Le tableau IV.4 et la figure IV.4 synthétisent les données relatives à l'absorption d'eau des mortiers en fonction des proportions variées des fibres ajoutées.

Tableau IV.4. Valeur de l'essai d'absorption d'eau à 7 et 28 jours pour les différents mortiers d'étude.

Type de mortier	Absorption d'eau (%)	
	7 jours	28 jours
MT 0%	4,666	4,509
MF 0,5%	5,488	5,010
MF 1%	4,809	4,704
MF 1,5 %	6,197	5,276
MF 2%	5,697	5,675
MF 2,5%	6,174	3,168

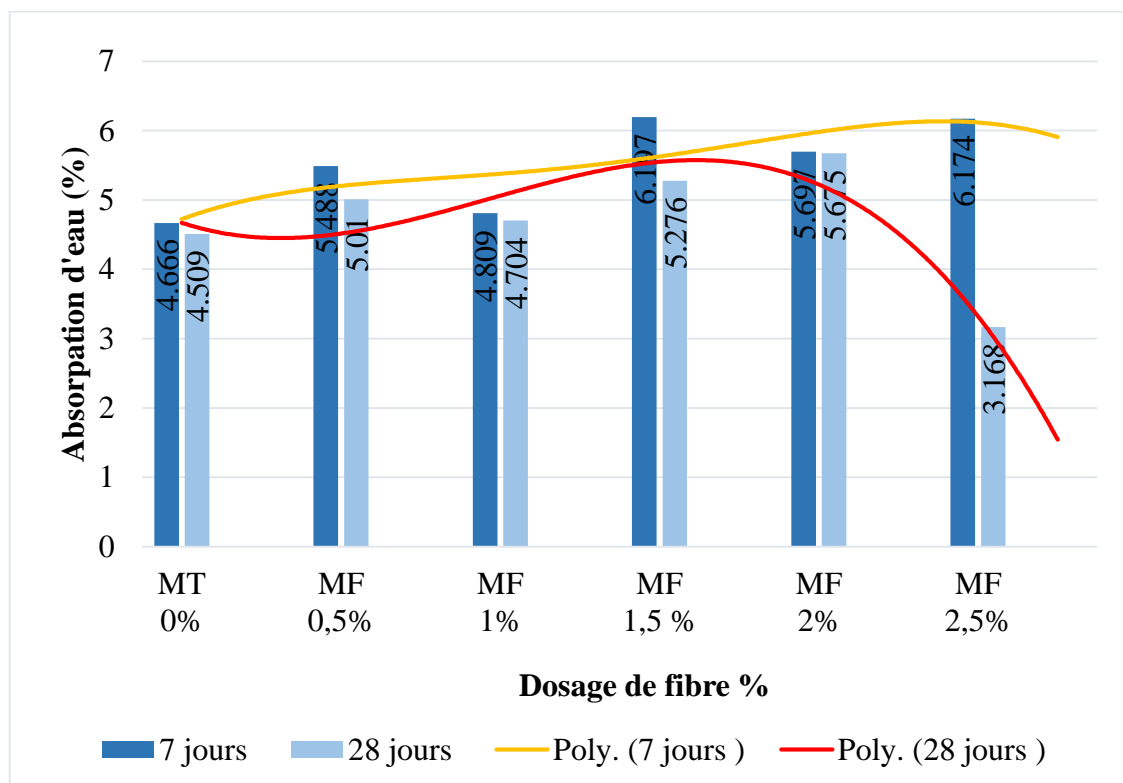


Figure IV.4. Valeurs de l'absorption d'eau pour les différents pourcentages des fibres Dans le mortier.

➤ Interprétation des résultats

On constate que le mortier témoin (MT 0%) présente une faible absorption d'eau, avec une légère diminution entre 7 et 28 jours de 4,666 % à 4,509 %, ce qui indique une bonne compacité. L'ajout de 0,5 % de fibres (MF 0,5%) entraîne une augmentation notable de l'absorption à 7 jours (5,488 %) et reste élevée à 28 jours (5,010 %). À 1 % l'absorption diminue par rapport à (MF 0,5 %), ce qui pourrait indiquer une meilleure dispersion des fibres et une structure plus homogène. Cependant, à 1,5 % et 2 %, les valeurs augmentent de nouveau, atteignant respectivement 6,197 % et 5,697 % à 7 jours, Curieusement, le mortier (MF 2,5 %) présente une très forte absorption à 7 jours (6,174 %), mais une chute spectaculaire à 28 jours (3,168 %).

IV.2.3. Les essais mécaniques**IV.2.3.1. La résistance au flexion-trois point (NF EN 1015-11)**

Le tableau (IV-5) suivant, résume les résultats des essais mécaniques en flexion-trois points, à savoir les contraintes de rupture en flexion des éprouvettes des différents pourcentages élaborés aux âges (7, 28 jours), les résultats représentent la moyenne des essais dans chaque pourcentage étudié.

Tableau IV.5. Résultats de l'essai de flexion des mortiers pour les différents pourcentages des fibres.

Type de mortier	Résistance au flexion-trois point (MPa)	
	7 jours	28 jours
MT 0%	3.32	3.481
MF 0.5%	3.478	3.630
MF 1%	3.728	3.8
MF 1.5%	3.88	3.96
MF 2%	4.38	4.28
MF 2.5%	3.92	4.058

La figure ci-dessous représente les résultats de la résistance au flexion-trois point des différents mortiers étudiés :

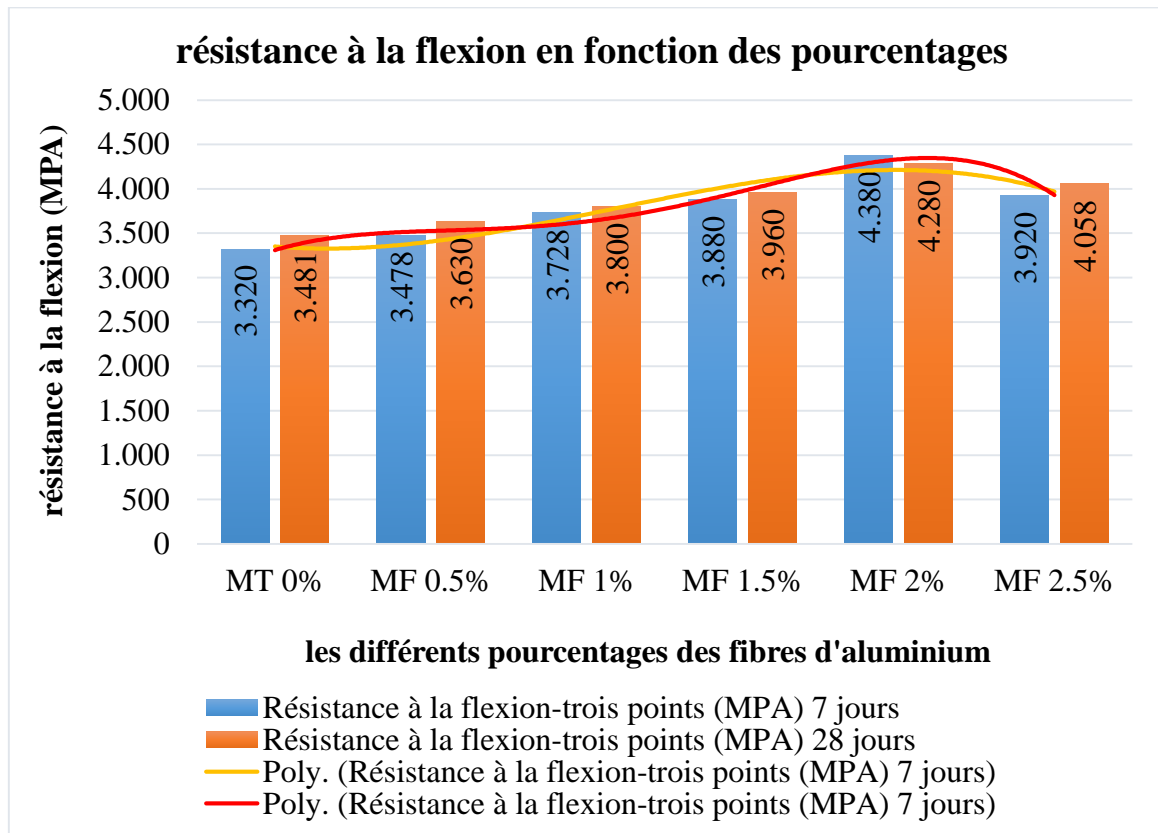


Figure IV.5. Résultats de l'essai du flexion-trois point des différents pourcentages des fibres d'aluminium dans le mortier.

➤ Interprétation des résultats

Le tableau (IV.5) et la figure (IV.5) montre les résultats de la résistance à la flexion (en MPa) en fonction des pourcentages de fibres d'aluminium mesuré à 7 jours et 28 jours. De manière similaire, la résistance à la flexion augmente jusqu'à 2 % (4,380 MPa à 7 jours et 4,280 MPa à 28 jours), puis diminue légèrement à 2,5 %. L'effet des fibres est plus prononcé sur la résistance initiale, suggérant une amélioration de la ductilité et du comportement post-fissuration.

IV .2.3.2. La résistance à la compression

Le tableau (IV-6) ci-dessous présente les résultats des essais mécaniques de compression, à savoir les contraintes de rupture des éprouvettes correspondant aux différents pourcentages élaborés aux âges de 7 et 28 jours. Ces résultats illustrent la moyenne des essais pour chaque pourcentage évalué.

Tableau IV.6. Résultats de l'essai de compression des mortiers pour les différents pourcentages des fibres.

Type de mortier	Résistance à la compression (MPa)	
	7 jours	28 jours
MT 0%	25.950	40.511
MF 0.5%	27.416	41.705
MF 1%	27.425	42.005
MF 1.5%	29.42	43.202
MF 2%	31.173	45.012
MF 2.5%	30.529	42.943

La figure suivante illustre les résultats concernant la résistance à la compression des divers mortiers examinés :

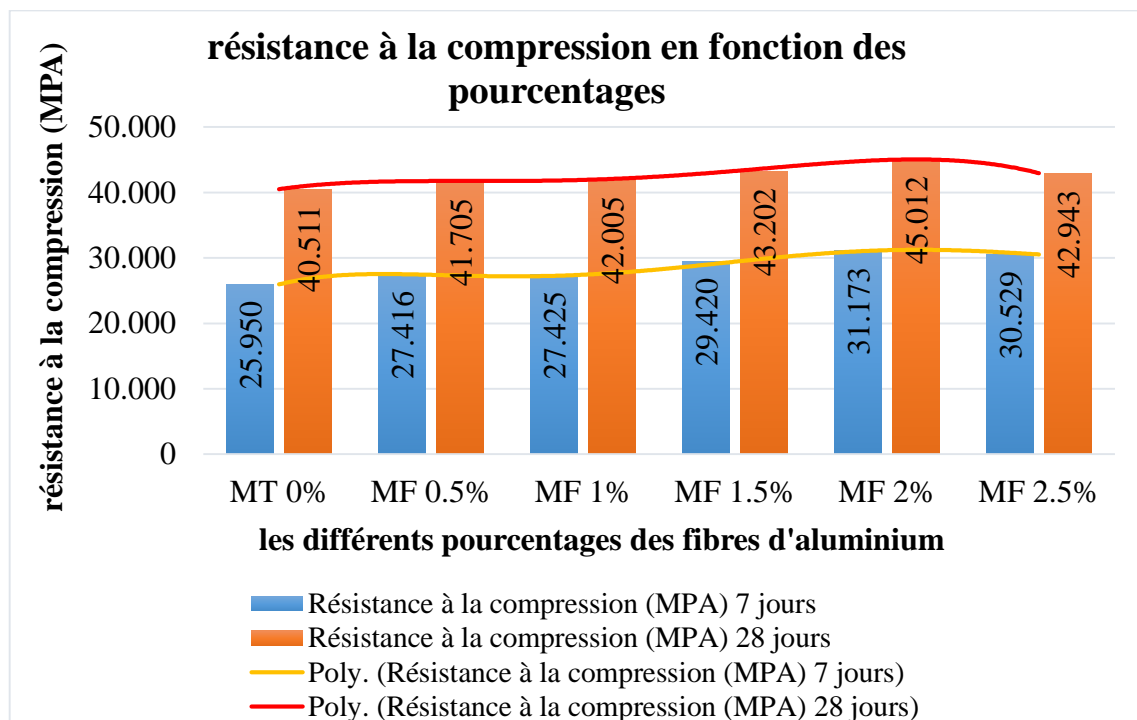


Figure IV.6. Résultats de l'essai de la résistance à la compression des différents pourcentages des fibres d'aluminium dans le mortier.

➤ **Interprétation des résultats :**

Le tableau (IV.6) et la figure (IV.6) montre les résultats de la résistance à la compression (en MPa) d'un mortier renforcé avec différents pourcentages de fibres d'aluminium (MF), mesuré à 7 jours et 28 jours. La résistance à la compression augmente avec l'ajout de fibres jusqu'à 2 % de fibres, atteignant un maximum de 31,173 MPA à 7 jours et 45,012 MPA à 28 jours. Au-delà de ce taux, une légère baisse est observée à 2,5 %. Cela indique un effet optimal à 2 %, au-delà duquel les fibres peuvent perturber la matrice du mortier.

IV.2.4. Les résultats des mesures de propriétés thermique

Afin d'évaluer l'influence du pourcentage de fibres d'aluminium dans le mortier sur la conductivité thermique, plusieurs essais ont été réalisés. Le tableau IV.7 et la figure IV.7 présentant la variation de cette conductivité en fonction du pourcentage de fibres. Les résultats correspondent à la moyenne des essais effectués pour chaque taux étudié.

Tableau. IV.7. Résultats thermique des différents pourcentages des fibres d'aluminium dans le mortier.

Type de mortier	7 jours	28 jours
	λ (W/m.K.)	λ (W/m.K.)
MT 0%	2,246	2,423
MF 0,5%	2,314	2,624
MF 1%	2,169	2,730
MF 1,5 %	1,765	2,073
MF 2%	1,996	2,176
MF 2,5%	1,999	2,153

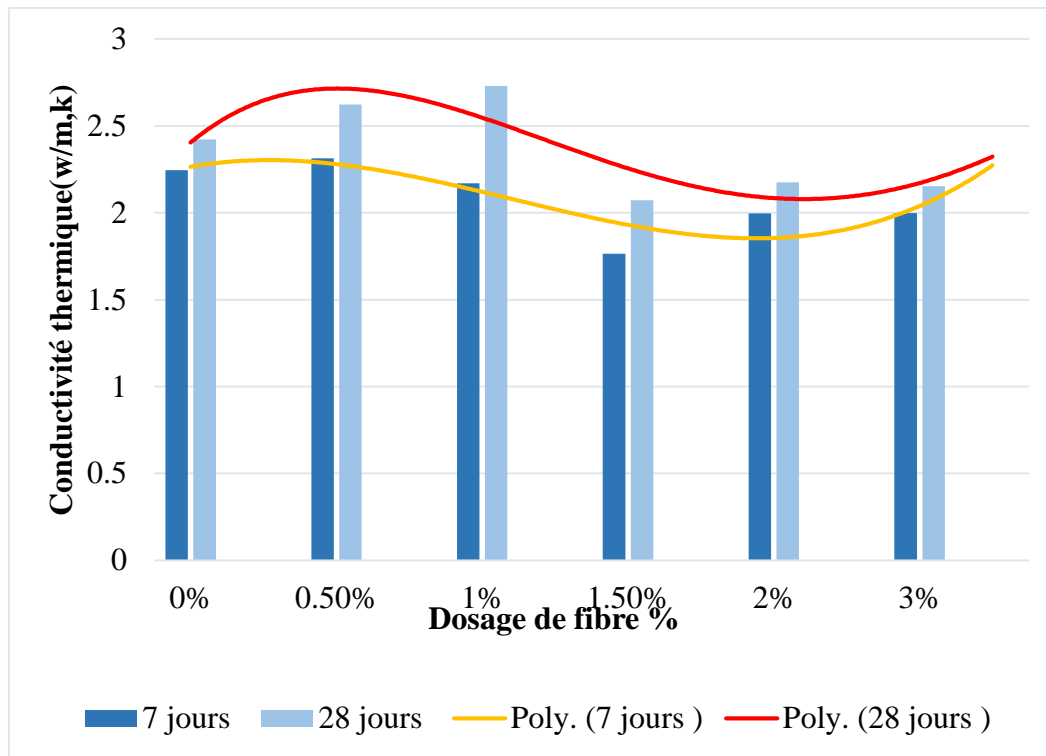


Figure IV.7. Conductivité thermique λ en fonction du pourcentage de fibres d'aluminium.

➤ Interprétation des résultats

On observe de manière générale, que l'ajout de fibres influence significativement cette propriété thermique. À 7 jours, la conductivité thermique augmente légèrement pour un faible taux d'incorporation (0,5 %), atteignant un maximum de (2,314 W/m.K) par rapport au mortier témoin (2,246 W/m.K). Cependant, au-delà de ce taux, une diminution progressive est notée, atteignant un minimum à (1,765 W/m.K) pour 1,5 % de fibres, avant de remonter légèrement pour des pourcentages plus élevés.

À 28 jours, la tendance est différente : la conductivité thermique augmente avec l'ajout de fibres jusqu'à 1 %, atteignant (2,730 W/m.K), puis diminue au-delà, pour atteindre (2,153 W/m.K) à 2,5 %. Cette évolution suggère que, bien qu'une faible quantité de fibres puisse améliorer la conductivité thermique à long terme, une teneur trop élevée a un effet inverse, probablement en raison de la perturbation de la matrice du mortier. Ainsi, un dosage optimal semble exister autour de 1 %, au-delà duquel l'efficacité thermique décroît.

IV.3. Conclusion

Les résultats exposés dans ce chapitre mettent en évidence l'impact de l'incorporation de fibres d'aluminium sur les caractéristiques du mortier, tant à l'état frais qu'à l'état durci. L'interprétation de ces données nous a conduits à formuler les conclusions suivantes :

-L'ajout de fibres d'aluminium modifie de manière non linéaire la masse volumique à l'état frais. À l'état durci, cet ajout entraîne une diminution de la masse volumique à 7 jours, tandis qu'à 28 jours, il favorise une augmentation, attribuée à l'amélioration de la compacité du mortier.

-L'incorporation de fibres d'aluminium diminue la porosité du mortier jusqu'à un certain seuil (environ 2 %), ce qui améliore sa compacité. Au-delà de ce taux, la porosité peut augmenter légèrement.

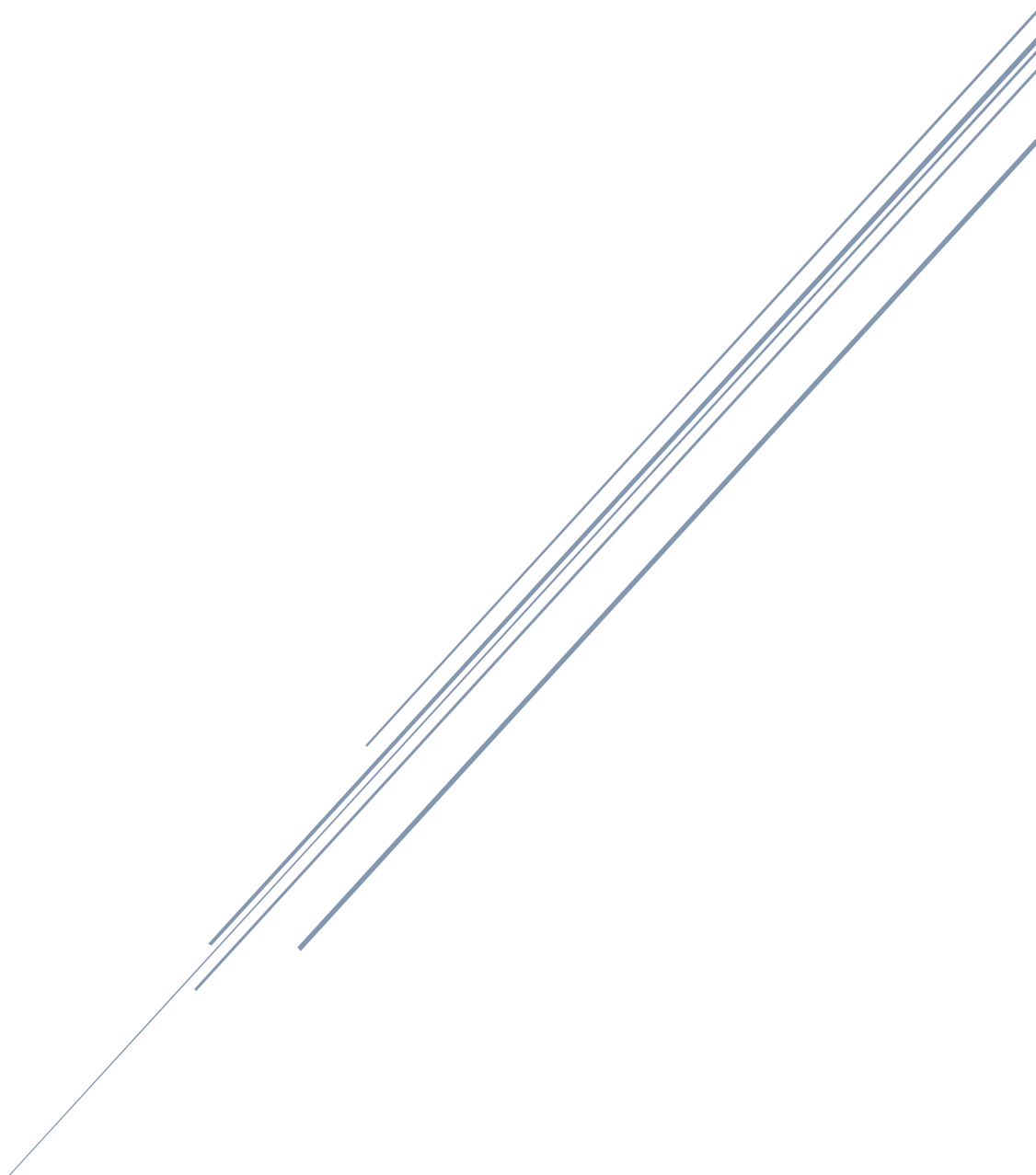
-L'ajout de fibres d'aluminium influence de manière variable l'absorption d'eau, soulignant l'importance d'un dosage optimal pour maintenir de bonnes performances de durabilité à l'eau.

-L'intégration de fibres d'aluminium dans le mortier améliore globalement ses propriétés mécaniques, notamment la résistance à la compression et à la flexion. Un effet optimal est observé autour de 2 % de fibres : à cette concentration, la résistance à la compression atteint son maximum, tandis que la résistance à la flexion s'améliore également de manière significative.

-La conductivité thermique varie en fonction du pourcentage de fibres d'aluminium ajoutées dans le mortier.

Chapitre V :

Analyse de la dispersion



V.1. Introduction

Dans le cadre de l'étude du comportement à la rupture des matériaux, il est important de s'appuyer sur un critère capable de représenter correctement les résultats observés en laboratoire. Ce critère doit non seulement prendre en compte les variations naturelles des contraintes à la rupture, mais aussi rester simple à appliquer, en utilisant des essais accessibles et peu coûteux. [29]

Les approches purement déterministes, qui supposent une connaissance parfaite des propriétés internes du matériau, montrent rapidement leurs limites. En effet, les matériaux présentent souvent des défauts internes comme des microfissures ou des inclusions difficiles à détecter et à caractériser. Ces défauts jouent pourtant un rôle essentiel dans le mécanisme de rupture, notamment dans le cas des matériaux fragiles. Pour mieux tenir compte de cette réalité, il est donc préférable d'adopter une approche statistique. Parmi les modèles existants, le critère de Weibull constitue une référence couramment utilisée pour décrire le comportement des matériaux fragiles. [30]

V.2. Modèle de Weibull

Le modèle de Weibull (Weibull, 1951) est largement utilisé en mécanique probabiliste, notamment dans le cadre de la théorie du maillon faible. Conçu pour les matériaux fragiles, ce modèle permet de relier la probabilité de rupture d'un matériau à la contrainte maximale appliquée. Il sert ainsi à décrire le comportement de rupture en fonction du chargement subi. La probabilité de survie d'un volume, soumis à une contrainte, est exprimée par une fonction spécifique. [31]

$$Ps(\sigma, v) = \exp(-\varphi(\sigma)xv)$$

Il faut que la probabilité de survie d'un volume respecte certaines conditions asymptotiques. Pour un matériau aussi fragile que le béton, il est normal d'atteindre une valeur de 1 si la contrainte principale maximale est nulle ou négative, et de se rapprocher de zéro lorsque la contrainte principale augmente. La valeur maximale approche l'infini. Cela établit des restrictions sur la fonction φ . L'une des méthodes les plus courantes et simples pour la fonction φ est la statistique de Weibull (Weibull, 1951).

$$\begin{aligned} \varphi(\sigma) &= \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m && \text{Pour : } \sigma > \sigma_u \\ \varphi(\sigma) &= 0 && \text{Pour : } \sigma < \sigma_u \end{aligned}$$

La formule qui exprime la probabilité de rupture d'un volume donné en fonction de ce même volume V et de la contrainte σ est définie par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} Pr &= 1 - \exp\left(-v\left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m\right) && \text{Pour } \sigma \geq \sigma_u \\ Pr &= 0 && \text{Pour } \sigma < \sigma_u \end{aligned}$$

L'état du matériau avant la mise en charge a une influence significative sur l'appréciation de la contrainte de rupture des échantillons. Il est nécessaire d'intégrer cet aspect lors de la modélisation du problème. Si λ est le paramètre qui dénote la population de défauts pour le Matériau : il est exprimé comme une densité d'activation des défauts dans le matériau soumis à une contrainte σ . Plus la contrainte est élevée, plus la densité des défauts activés est importante. Les données expérimentales ont conduit Weibull à opter pour une description du paramètre λ sous forme de loi de puissance afin de représenter λ , ce qui correspond à la phénoménologie traditionnelle de la rupture fragile. [31]

$$\lambda = \frac{1}{v_0} \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m$$

Le module de Weibull m . C'est une caractéristique de la dispersion et donc de la forme du graphique. On diminue la dispersion lorsque m augmente et on l'augmente lorsque m diminue. σ_0 est le facteur d'échelle dépourvu de signification physique lorsque l'exception des autres paramètres fixes, il détermine la localisation des courbes en fonction de l'axe des contraintes. [31]

La formule ci-dessous présente la probabilité de rupture pour un volume spécifique sous une contrainte donnée. Les valeurs de m et σ_0 doivent être fixées par la méthode d'expérimentations.

$$\Pr(v, \sigma) = 1 - \exp\left[-\frac{v}{2(m+1)^2 v_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right]$$

\Pr représente la probabilité de défaillance complète de la structure face à une contrainte σ , V exprime le volume de l'éprouvette, m correspond au coefficient de Weibull, σ_0 signifie le paramètre de forme et V_0 désigne le volume standard. Ce dernier est unitaire (1m^3), ce qui permet de régler la taille du facteur de forme. [31]

V.2.1. Détermination des paramètres de Weibull

La détermination des paramètres de Weibull consiste à estimer les valeurs qui permettent de représenter au mieux un jeu de données à l'aide du modèle Weibull. Ces paramètres sont généralement calculés à partir des données observées grâce à différentes méthodes statistiques, adaptées selon la qualité et la quantité des données disponibles. Une estimation précise est essentielle pour garantir la fiabilité du modèle et sa capacité à décrire correctement le phénomène étudié.

V.2.1.1. Régression linéaire

La méthode la plus simple à appliquer (Trustrum, 1979) consiste à utiliser une représentation graphique de la distribution des contraintes à la rupture, ainsi que de leurs estimateurs de probabilité correspondants. En prenant simplement le double logarithme de la formule de Weibull on obtient les expressions suivantes :

$$\ln(1 - Pr) = -\frac{v}{2(m+1)^2 v_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m$$

$$\ln(-\ln(1 - Pr)) = m \ln(\sigma) + \ln\left(\frac{v}{2(m+1)^2 v_0 \sigma_0^m}\right)$$

Par conséquent, en mettant en place l'interpolation linéaire du nuage de points défini par les couples $[\ln(\sigma), \ln(-\ln(1 - P_i))]$, nous sommes en mesure d'établir le paramètre de Weibull m , ce dernier représentant la direction du coefficient qui correspond graphiquement à la pente de la ligne dessinée sur la base des données expérimentales. Par la suite, on peut donc définir le facteur d'échelle. [31]

V.2.1.2. Régression linéaire pondéré

Cette méthode, proposée par Bergman (1986), repose sur l'idée que tous les points expérimentaux ne contribuent pas de manière égale à la détermination des paramètres. Les valeurs situées près de la moyenne des contraintes à la rupture sont jugées plus significatives que celles aux extrémités (valeurs minimale et maximale). La théorie suppose qu'une droite de régression doit minimiser une somme pondérée des carrés des écarts, tenant compte de l'importance relative des données. [31]

V.2.1.2. Méthode des moments

En théorie des probabilités, les moments sont des mesures qui donnent des informations sur la dispersion d'une variable aléatoire réelle. Le moment du premier ordre correspond à la moyenne, celui du second ordre centré à la variance, et celui du troisième ordre centré au coefficient d'asymétrie. Ces moments permettent d'estimer les caractéristiques de la loi de probabilité survie par la variable aléatoire. Pour la loi de Weibull, les deux premiers moments sont représentés par la moyenne et la variance, comme le précisent les travaux de (Mauduit ,2016) et (Tebbi ,2005). [31]

V.2.1.3. Méthode de maximum de vraisemblance

Il s'agit de la méthode la plus couramment utilisée et reconnue pour sa grande précision (Trustum, 1979 et Basu, 2009). Elle a été initialement développée par Fisher en 1922, par le biais de la création de la fonction de vraisemblance associée à une distribution statistique. Cette fonction est construite à partir du produit des valeurs de la densité de probabilité d'une distribution, c'est-à-dire la dérivée de la fonction de répartition par rapport à la variable aléatoire. [31]

V.3. Modélisation statistique

V.3.1. Calcul de probabilité de rupture

Pour estimer la probabilité de rupture de la résistance à la compression à 7 et 28 jours avec (0% et 2%) des fibres, il est nécessaire de diviser l'échelle des contraintes mesurées en classes d'amplitudes, chaque classe étant reliée à son effectif cumulé associé.

La probabilité de rupture (Pr) de chaque classe de contrainte est calculée en divisant son effectif cumulé par le nombre total d'éprouvettes pour chaque série.

Les résultats de calcul de la probabilité de rupture pour les différents pourcentages et âges sont résumés sur les tableaux ci-dessous :

Tableau.V.1 : Probabilité de rupture des mortiers 0% à 7 jours.

classe de contrainte	nombre d'éprouvettes rompues	nombre d'éprouvettes rompues cumulés	probabilités de rupture (Pr)
<20	0	0	0
[20-23[	2	2	0.167
[23-26[	5	7	0.583
[26-29[	2	9	0.75
[29-31[	3	12	1

Tableau.V.2 : Probabilité de rupture des mortiers 2% à 7 jours.

classe de contrainte	nombre d'éprouvettes rompues	nombre d'éprouvettes rompues cumulés	probabilités de rupture (Pr)
< 29	0	0	0
[29-31[	4	4	0.667
[31-33[	1	5	0.833
>33	1	6	1

Tableau.V.3 : Probabilité de rupture des mortiers 0% à 28 jours.

classe de contrainte	nombre d'éprouvettes rompues	nombre d'éprouvettes rompues cumulés	probabilités de rupture (Pr)
< 31	0	0	0
[31-34[	1	1	0.083
[34-37[	2	3	0.25
[37-40[	0	3	0.25
[40-43[	6	9	0.75
[43-46[	3	12	1

Tableau.V.4 : Probabilité de rupture des mortiers 2% à 28 jours.

classe de contrainte	nombre d'éprouvettes rompues	nombre d'éprouvettes rompues cumulés	probabilités de rupture (Pr)
< 36	0	0	0
[36-40[	2	2	0.167
[40-44[	1	3	0.25
[44-48[	7	10	0.833
[48-52[	2	12	1

V.3.2. Détermination des paramètres de Weibull

Pour déterminer les paramètres de Weibull, on a utilisé la méthode de régression linéaire, Cela nous a permis d'acquérir les tableaux suivants :

Tableau.V.5 : Détermination des paramètres de Weibull mortier 0% à 7 jours.

contrainte de rupture (σ)	probabilité de rupture (Pr)	$X=\ln(\sigma)$	$Y=\ln[-\ln(1-Pr)]$
20.37	0.167	3.01406323	-1.701
20.66	0.167	3.02819946	-1.701
23.04	0.583	3.13723184	-0.132
24.73	0.583	3.20801708	-0.132
25.41	0.583	3.2351428	-0.132
25.42	0.583	3.23553627	-0.132
25.64	0.583	3.24415363	-0.132
27.46	0.75	3.3127304	0.326
27.79	0.75	3.32467624	0.326
29.67	0.999	3.39013643	1.932
30.59	0.999	3.42067316	1.932
30.63	0.999	3.42197992	1.932

Tableau.V.6 : Détermination des paramètres de Weibull de mortiers 2% à 7 jours.

contrainte de rupture (σ)	probabilité de rupture (Pr)	$X=\ln(\sigma)$	$Y=\ln[-\ln(1-Pr)]$
29.9	0.667	3.397	0.094
30.1	0.667	3.404	0.094
30.75	0.667	3.425	0.094
30.95	0.667	3.432	0.094
32.17	0.833	3.471	0.583
33.17	0.999	3.501	1.932

Tableau.V.7 : Détermination des paramètres de Weibull de mortier 0% à 28 jours.

contrainte de rupture (σ)	probabilité de rupture (Pr)	$X=\ln(\sigma)$	$Y=\ln[-\ln(1-Pr)]$
31.956	0.0833	3.464	-2.441
35.225	0.25	3.561	-1.245
36.875	0.25	3.607	-1.245
40.062	0.75	3.690	0.326
40.53	0.75	3.702	0.326
40.75	0.75	3.707	0.326
42	0.75	3.737	0.326
42.22	0.75	3.742	0.326
42.53	0.75	3.750	0.326
43.47	0.999	3.772	1.932
45.156	0.999	3.810	1.932
45.37	0.999	3.814	1.932

Tableau.V.8 : Détermination des paramètres de Weibull de mortier 2% à 28 jours.

contrainte de rupture (σ)	probabilité de rupture (Pr)	$X=\ln(\sigma)$	$Y= \ln [-\ln(1-Pr)]$
36.456	0.167	3.596	-1.701
39.725	0.167	3.681	-1.701
41.379	0.583	3.722	-0.132
44.562	0.583	3.796	-0.132
45.03	0.583	3.807	-0.132
45.25	0.583	3.812	-0.132
46.5	0.583	3.839	-0.132
46.720	0.75	3.844	0.326
47	0.75	3.850	0.326
47.97	0.999	3.870	1.932
49.656	0.999	3.905	1.932
49.87	0.999	3.909	1.932

Dans les figures suivantes, en représentant Y en fonction de X pour chaque série d'essais un graphique en nuages de points, on obtient des droites de régression.

Ces droites décrivent de manière optimale la tendance des points observés et facilitent l'identification des paramètres de Weibull.

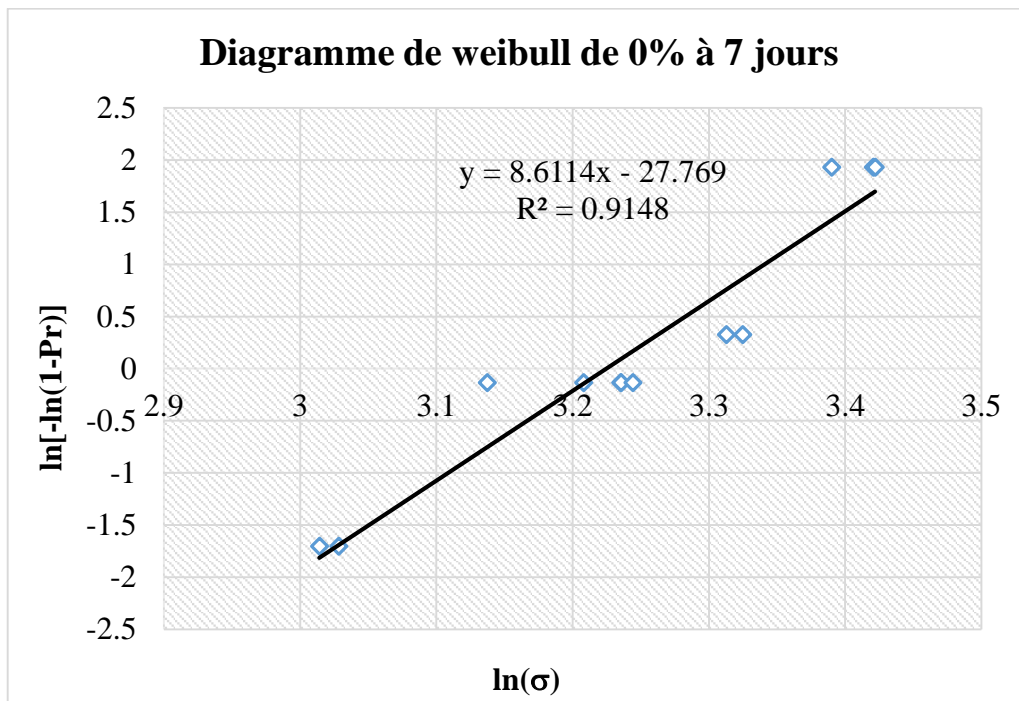


Figure.V.1. Diagramme de Weibull pour les mortiers 0% à 7 jours.

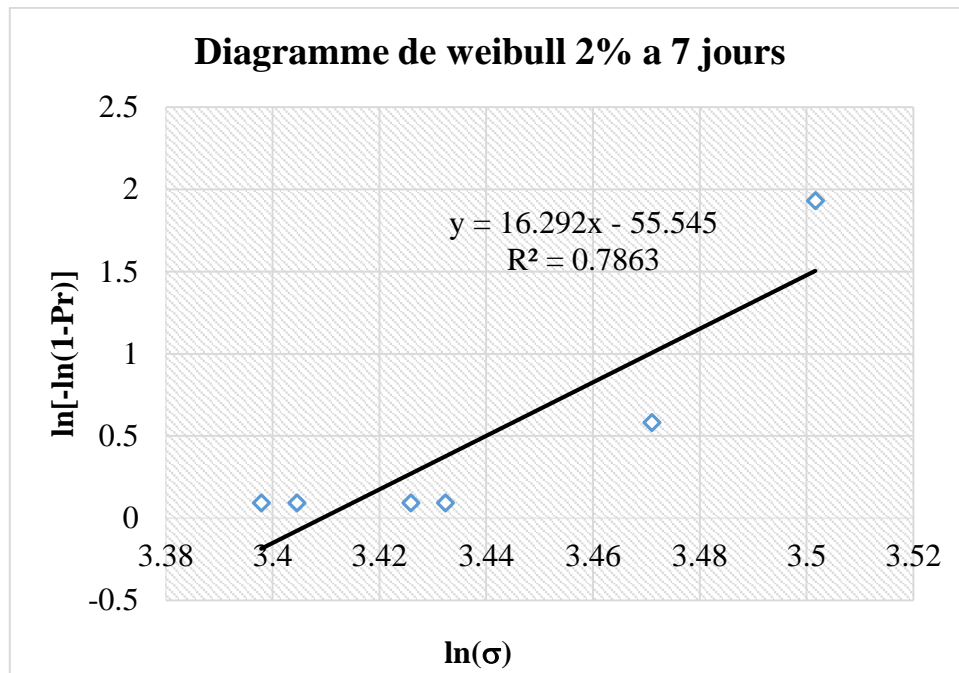


Figure.V.2. Diagramme de Weibull pour les mortiers 2% à 7 jours.

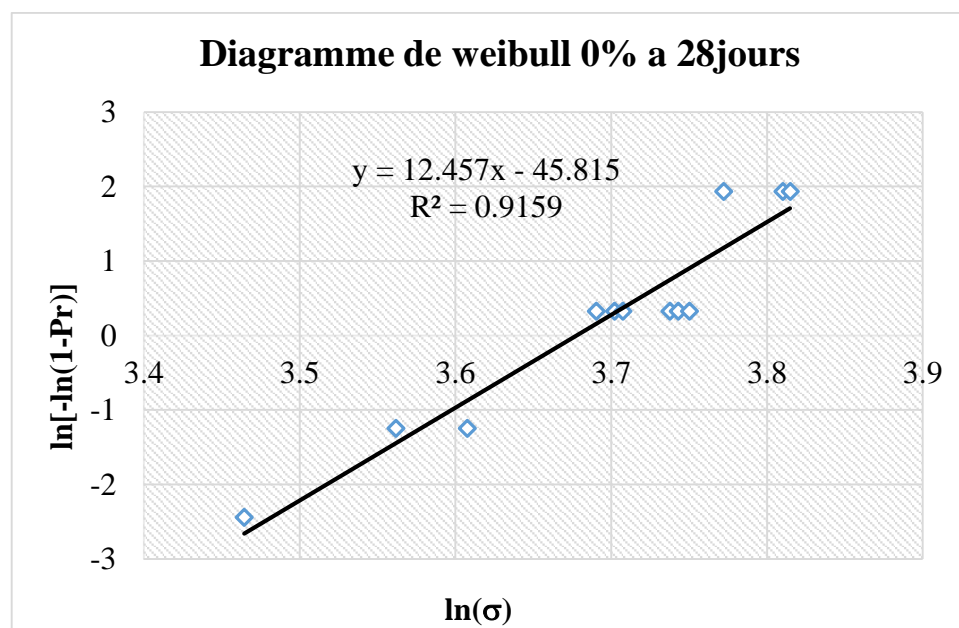


Figure.V.3. Diagramme de Weibull pour les mortiers 0% à 28 jours.

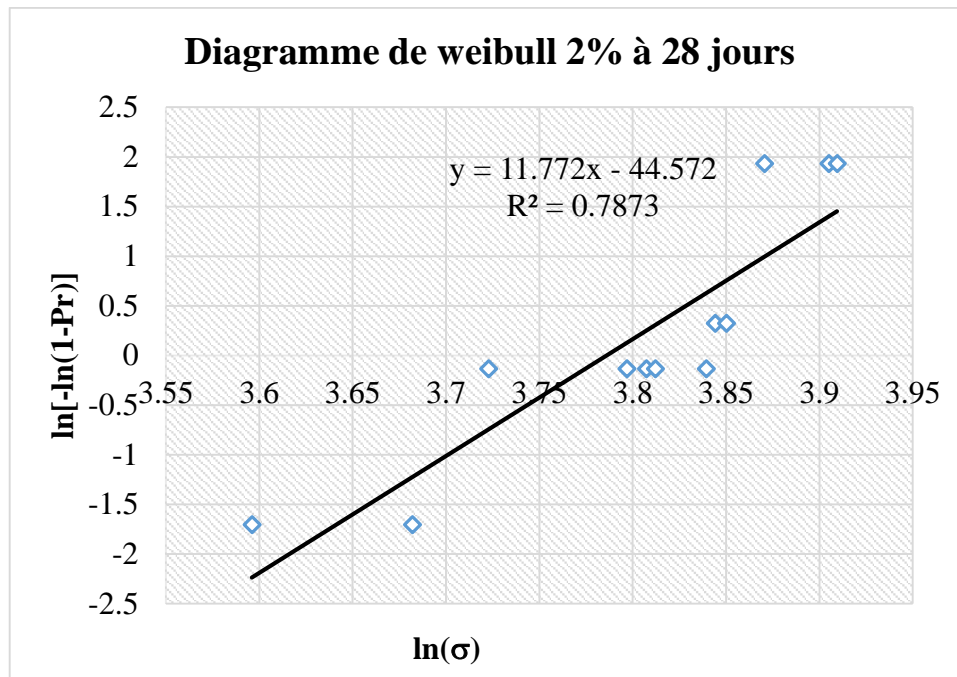


Figure.V.4. Diagramme de Weibull pour les mortiers 2% à 28 jours.

Le tableau (V.9) montre les paramètres de Weibull déterminés, en se basant sur les figures précédemment présentées, pour chaque série d'éprouvettes.

Tableau.V.9 : les valeurs des paramètres de Weibull pour chaque série des prismes.

Série des prismes	Coefficient de détermination R^2	B	m	$\sigma_0 = \exp(-\frac{B}{m})$
MT 0% à 7 j	0.9148	-27.769	8.6114	25.1454
MF 2% à 7 j	0.7863	-55.545	16.292	30.2453
MT 0% à 28 j	0.9159	-45.815	12.457	39.5613
MF 2% à 28. j	0.7873	-44.572	11.772	44.0917

➤ Interprétation des résultats

L'étude des courbes linéarisées présentées dans les figures (V.1, V.2, V.3, V.4) a permis d'évaluer la qualité de l'ajustement au modèle de Weibull pour différentes formulations, à travers l'analyse du coefficient de détermination R^2 . Pour le mortier sans fibres d'aluminium (0 %), les résultats sont très satisfaisants, avec des valeurs de 0,9148 à 7 jours et 0,9159 à 28 jours, ce qui indique une bonne correspondance entre les données expérimentales et la droite de régression. Cela montre que la résistance à la rupture est régulière et bien modélisée dans ce cas. En revanche, l'incorporation de 2 % de fibres d'aluminium entraîne une diminution de la

qualité de l'ajustement, avec des valeurs de 0,7863 à 7 jours et 0,7873 à 28 jours. Cette baisse reflète une dispersion plus importante des résultats, probablement liée à une répartition moins homogène des fibres ou à leur influence sur le mécanisme de rupture.

Par ailleurs, l'analyse des pourcentages de variation de **Y** en fonction de **X** permet d'apporter un complément à cette interprétation. Les formulations sans fibres d'aluminium présentent des valeurs élevées, atteignant environ 91 % à 7 jours et 92 % à 28 jours. Cela indique un comportement relativement stable et homogène du matériau dans le temps. En revanche, pour les formulations contenant 2 % de fibres d'aluminium, ces valeurs diminuent à environ 79 % pour les deux âges.

Le module de Weibull **m** permet d'évaluer la régularité des résultats. Une valeur élevée signifie que les résistances mesurées sont proches les unes des autres, donc plus stables. À 7 jours, la formulation sans fibres donne une valeur de 8,6114, alors qu'elle atteint 16,292 avec 2 % de fibres, ce qui montre que l'ajout de fibres rend les résultats plus réguliers à ce stade. À 28 jours, la valeur est de 12,457 sans fibres et de 11,772 avec fibres. Cela signifie que, avec le temps, le béton sans fibres devient un peu plus stable que celui contenant des fibres.

La contrainte caractéristique de Weibull permet d'avoir une idée de la résistance du matériau. Les résultats montrent qu'elle augmente avec le temps et avec l'ajout de fibres d'aluminium. À 7 jours, la valeur est de 25,1454 MPa sans fibres et de 30,2453 MPa avec 2 % de fibres, ce qui montre que les fibres améliorent la résistance dès les premiers jours. À 28 jours, ces valeurs montent à 39,5613 MPa pour le mortier sans fibres et à 44,0917 MPa avec 2 % de fibres. On remarque donc que plus la durée de cure est longue, plus le mortier devient résistant, et que l'ajout de fibres contribue aussi à cette amélioration.

V.3.3. Paramètres de rupture

À ce point de l'analyse, la contrainte de rupture n'est pas une valeur déterministe mais chaque valeur de contrainte appliquée est reliée à une probabilité de rupture. Ici, nous employons le modèle statistique de la rupture, via la loi de Weibull, qui nous a aidé à déterminer la probabilité et la densité d'activation des défauts sont également utilisées pour tracer ses courbes de manière plus représentative en fonction des contraintes de rupture. Ces deux paramètres, déterminés pour chaque série des prismes.

Tableau.V.10 : Détermination de la probabilité de rupture et de la densité d'activation des défauts par modèle Weibull pour la série des prismes MT 0 % à 7 jours.

contrainte de rupture (σ_r)	Pr par calcul direct	Pr par modèle Weibull	Densité d'activation des défauts λ
20.37	0.1667	0.1506	636.93
20.66	0.1667	0.1684	719.39
23.04	0.5833	0.3759	1839.64
24.73	0.5833	0.58	3384.24
25.41	0.5833	0.6657	4274.72
25.42	0.5833	0.6669	4289.23
25.64	0.5833	0.6940	4619.63
27.46	0.75	0.8820	8338.29
27.79	0.75	0.9064	9241.72
29.67	0.999	0.9844	16239.27
30.59	0.999	0.9955	21123.71
30.63	0.999	0.9958	21362.76

Tableau.V.11 : Détermination de la probabilité de rupture et de la densité d'activation des défauts par modèle Weibull pour la série des prismes MT 2 % à 7 jours.

contrainte de rupture (σ_r)	Pr par calcul direct	Pr par modèle Weibull	Densité d'activation des défauts λ
29.9	0.6667	0.5636	3239.78
30.1	0.6667	0.6032	3611.49
30.75	0.6667	0.7300	5115.10
30.95	0.6667	0.7666	5684.92
32.17	0.8333	0.9349	10672.69
33.17	0.999	0.9888	17573.84

Tableau.V.12 : Détermination de la probabilité de rupture et de la densité d'activation des défauts par modèle Weibull pour la série des prismes MT 0 % à 28 jours.

contrainte de rupture (σ_r)	Pr par calcul direct	Pr par modèle Weibull	Densité d'activation des défauts λ
31.956	0.0833	0.0675	273.38
35.225	0.25	0.2097	919.77
36.875	0.25	0.3406	1626.82
40.062	0.75	0.6895	4568.78
40.53	0.75	0.7411	5279.99
40.75	0.75	0.7644	5648.33
42	0.75	0.8783	8229.57
42.22	0.75	0.8944	8782.96
42.53	0.75	0.9148	9620.97
43.47	0.999	0.9605	12632.49
45.156	0.999	0.9944	20293.23
45.37	0.999	0.9959	21524.31

Tableau.V.13 : Détermination de la probabilité de rupture et de la densité d'activation des défauts par modèle Weibull pour la série des prismes MT 2 % à 28 jours.

contrainte de rupture (σ_r)	Pr par calcul direct	Pr par modèle Weibull	Densité d'activation des défauts λ
36.456	0.1667	0.1011	416.42
39.725	0.1667	0.2539	1144.38
41.379	0.5833	0.3772	1849.80
44.562	0.5833	0.6779	4425.91
45.03	0.5833	0.7223	5005.13
45.25	0.5833	0.7425	5300.70
46.5	0.5833	0.8459	7305.45
46.720	0.75	0.8615	7722.86
47	0.75	0.8801	8258.66
47.97	0.999	0.9326	10538.20
49.656	0.999	0.9810	15487.90
49.87	0.999	0.9859	16647.77

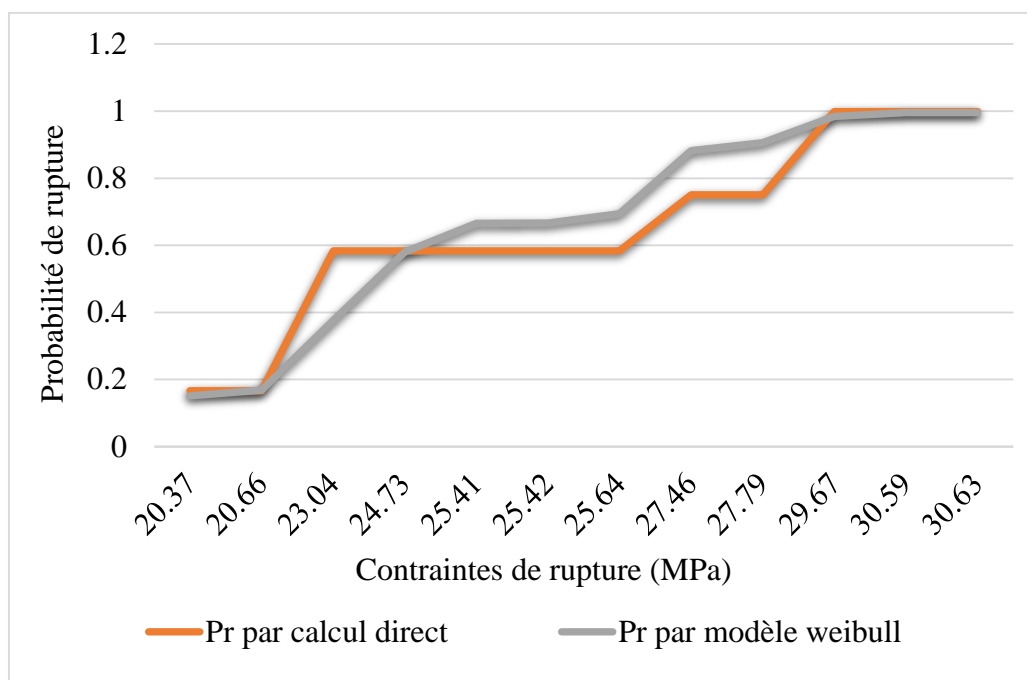


Figure.V.5. Comparaison des résultats expérimentaux et ceux calculés pour la série des prismes MT 0 % à 7 jours.

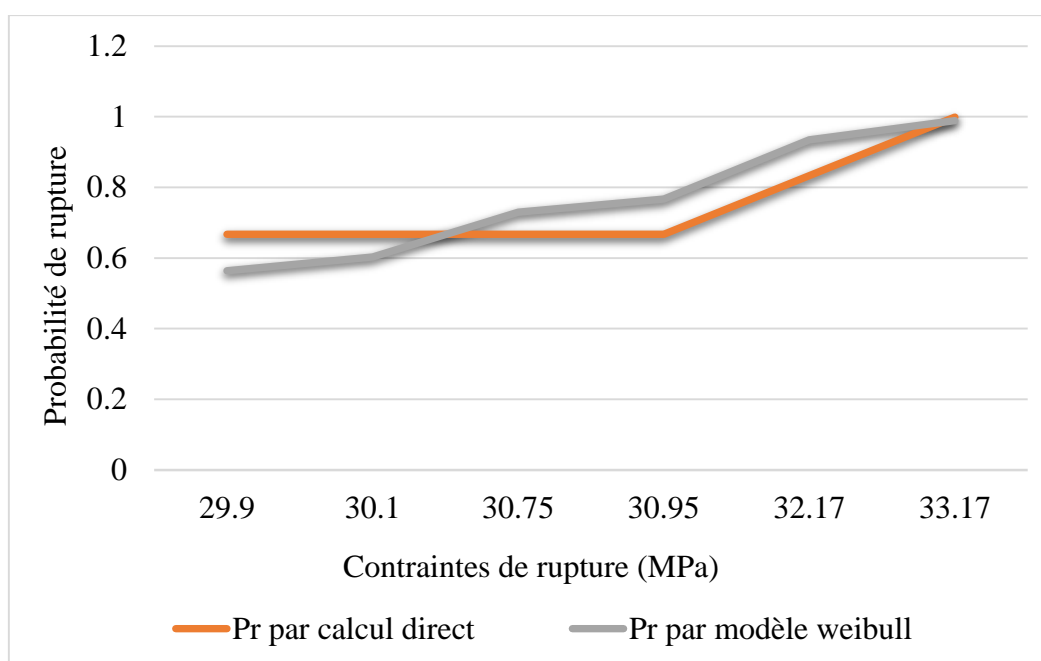


Figure.V.6. Comparaison des résultats expérimentaux et ceux calculés pour la série des prismes MF 2 % à 7 jours.

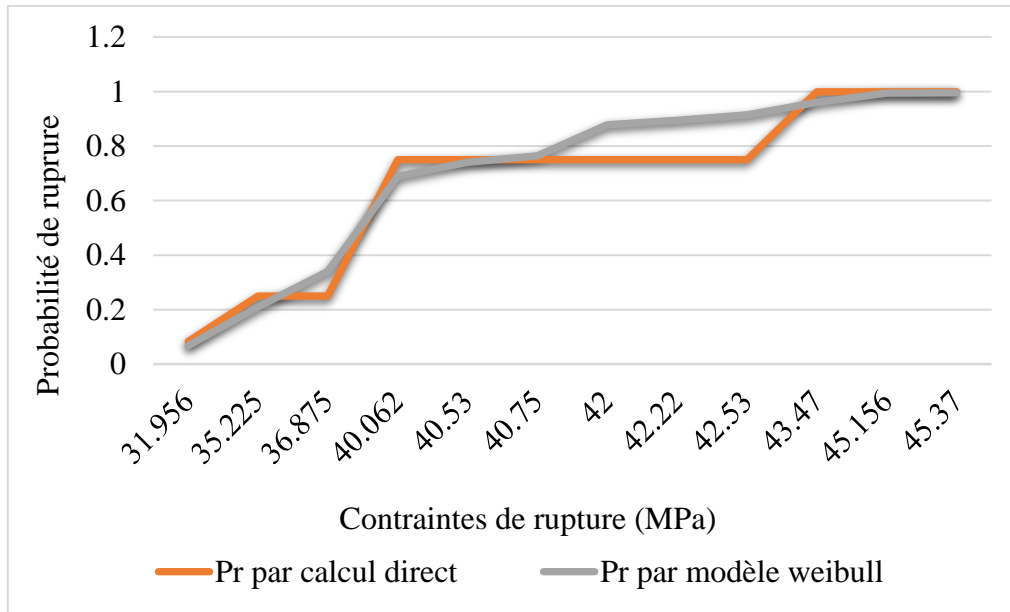


Figure.V.7. Comparaison des résultats expérimentaux et ceux calculés pour la série des prismes MT 0 % à 28 jours.

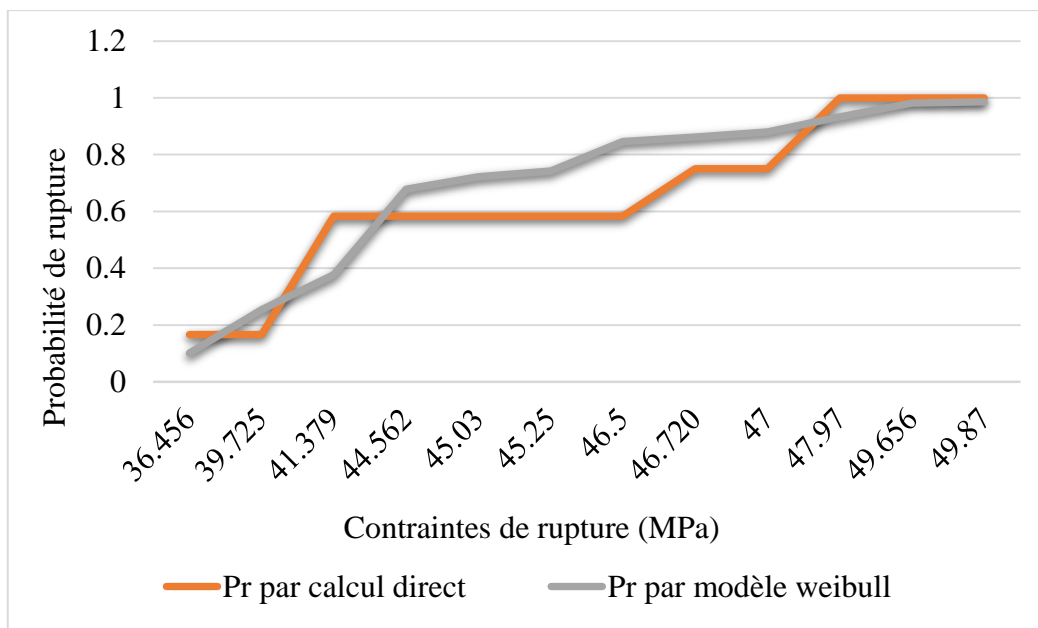


Figure.V.8. Comparaison des résultats expérimentaux et ceux calculés pour la série des prismes MF 2 % à 28 jours.

Les figures suivantes montrent la densité d'activation des défauts en fonction de la contrainte de rupture ainsi que la probabilité de rupture en fonction de la quantité de défauts.

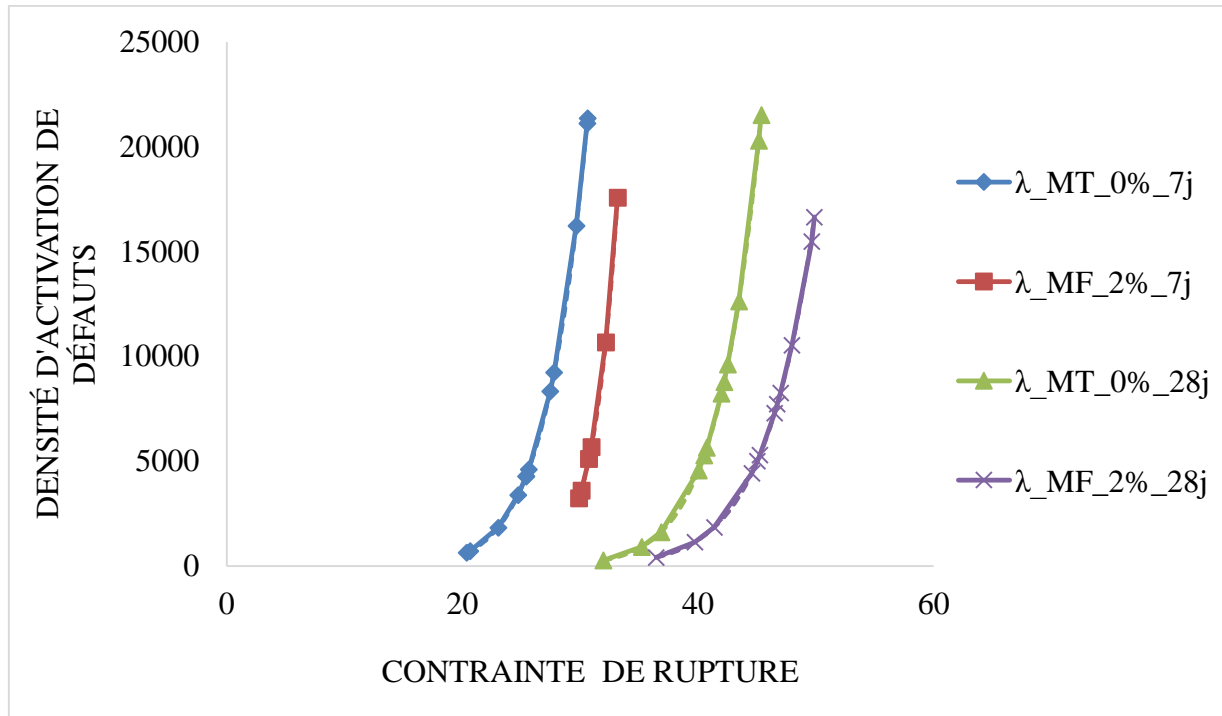


Figure.V.9. La densité d'activation de défauts en fonction de la contrainte de rupture.

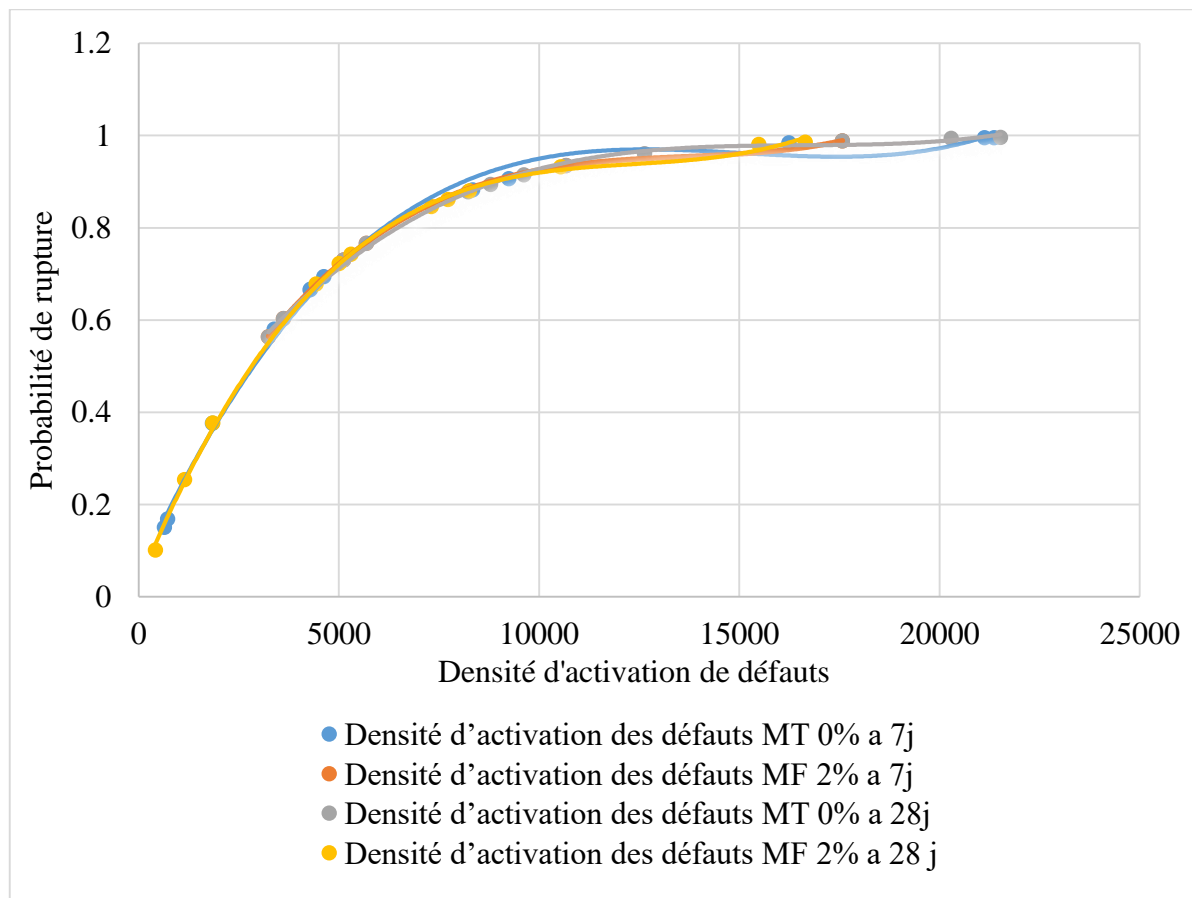


Figure.V.10. Probabilité de rupture en fonction de la population de défauts.

➤ Interprétation des résultats

L'analyse des résultats issus du laboratoire en les comparant avec ceux calculés pour chaque catégorie d'âge des échantillons de mortier, indique que ces derniers présentent une tendance similaire à celle observée expérimentalement, bien qu'avec un petit décalage. Cela signifie il est possible que l'expression dérivée du processus suivi puisse illustrer la rupture des éprouvettes sous une charge spécifique.

Les graphiques (V.5, V.6, V.7, V.8) représentent la probabilité de rupture selon la contrainte pour les différents mortiers. Cette présentation met en lumière le facteur probabiliste lié à la contrainte de rupture des échantillons de mortier et de leurs résistances. La comparaison des résultats expérimentaux avec ceux issus de calculs atteste d'une vaste dispersion des contraintes de rupture. On peut illustrer cette dispersion à l'aide de la loi de Weibull.

Dans la figure (V.9), on remarque une relation proportionnelle entre la densité d'activation des défauts et la contrainte de rupture. Toutefois, bien que la contrainte de rupture soit relativement élevée, cette densité a tendance à diminuer au fil du temps. Cela correspond à la réduction du volume et du nombre de vides en fonction du temps résultant de l'hydratation constante des différents mortiers, et donc la réduction du nombre de défauts.

L'étude de la variation du risque de rupture en fonction des contraintes de rupture, notamment la dégradation de sa pente de rencontre, peut être associée à la relation entre la probabilité de rupture et la répartition des défauts illustrée par la densité d'activation. Comme il est démontré sur la figure (V.10) pour les quatre séries des prismes.

V.3.4. Probabilité de survie

Le calcul de la probabilité de survie des éprouvettes de béton s'effectue selon la formule :

$$P_s = 1 - P_r$$

Avec :

P_s : Probabilité de survie des éprouvettes qui correspond au pourcentage des éprouvettes non rompues.

P_r : Probabilité de rupture des éprouvettes qui correspond au pourcentage des éprouvettes rompues.

La probabilité de survie des éprouvettes représente le rapport entre les éprouvettes initialement participantes au test de compression qui continuent à résister à la pression σ , ou bien il s'agit de la probabilité qu'aucun défaut ne soit détecté.

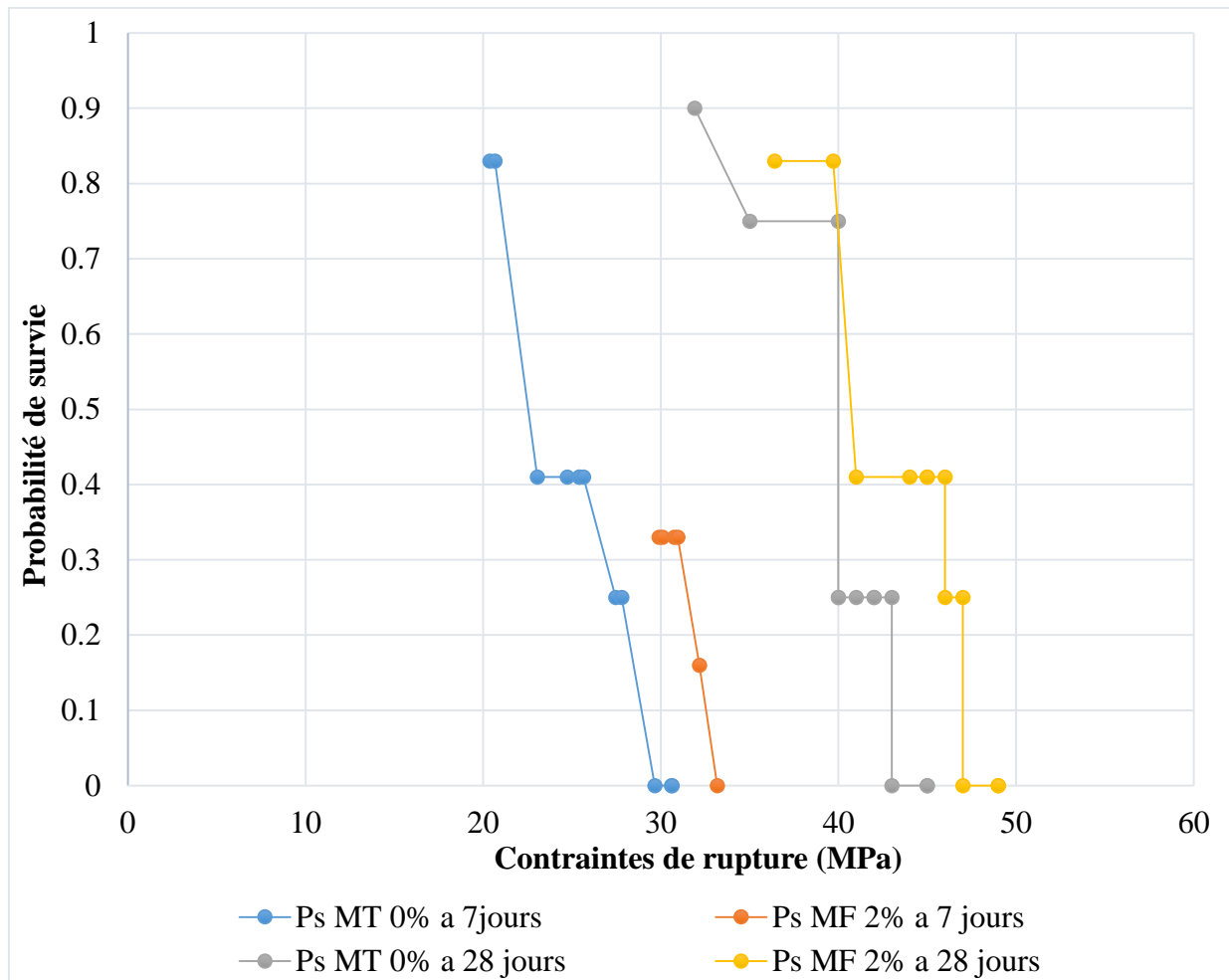


Figure.V.11. Probabilité de survie en fonction de la contrainte de rupture.

➤ Interprétation des résultats

Le graphique montre comment la probabilité de survie varie selon la résistance à la rupture pour différents mortiers à 7 et 28 jours, avec ou sans fibres. À 7 jours, l'ajout de 2 % des fibres diminue légèrement la résistance. En revanche, à 28 jours, les performances sont comparables, voire meilleures avec les fibres. Cela signifie que les fibres peuvent ralentir le développement initial, mais il n'impacte pas négativement la résistance à long terme. C'est une information utile pour des applications où la performance finale est prioritaire.

V.4. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons étudié la résistance à la compression de mortier, avec et sans fibres d'aluminium, à 7 jours et à 28 jours. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

Pour analyser les résultats, nous avons utilisé le modèle de Weibull, qui permet d'évaluer non seulement la résistance moyenne du mortier, mais aussi la dispersion des valeurs et la probabilité de rupture sous une certaine charge. Pour le mortier sans fibres, les résultats sont assez réguliers et s'adaptent bien au modèle de Weibull. Cela signifie que les résistances mesurées sont proches les unes des autres, ce qui permet de prédire de manière fiable le

comportement du matériau. En d'autres termes, le mortier sans fibres présente une bonne stabilité et une fiabilité satisfaisante.

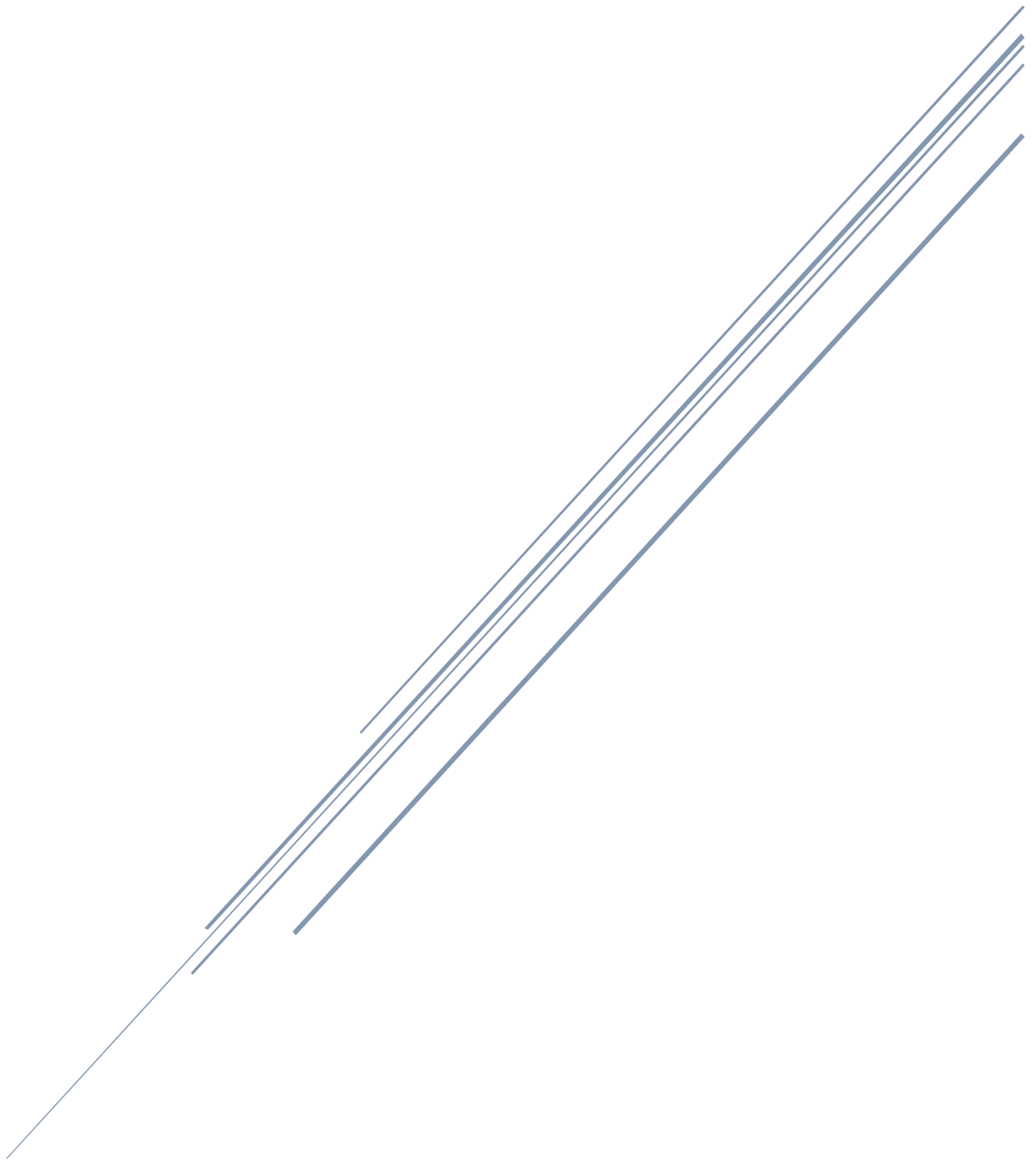
Lorsqu'on ajoute 2 % de fibres d'aluminium, on observe une plus grande variation dans les résultats. Cette dispersion est probablement due à une répartition non homogène des fibres, rendant certaines zones du mortier plus résistantes que d'autres. Ainsi, la prédiction précise de la rupture devient plus complexe. Cependant, à 7 jours, le module de Weibull indique que le mortier avec fibres présente une variabilité légèrement moindre, traduisant une certaine régularité dans les résistances. À 28 jours, le mortier sans fibres devient plus stable, montrant que les propriétés mécaniques évoluent favorablement avec le temps. La résistance moyenne du mortier, appelée contrainte caractéristique dans le modèle de Weibull, augmente avec l'âge pour tous les types de mortier. De plus, le mortier avec fibres reste plus résistant que celui sans fibres, aussi bien à 7 jours qu'à 28 jours.

L'analyse du paramètre de rupture des mortiers suit une tendance cohérente entre les résultats expérimentaux et théoriques. Le modèle de Weibull reflète bien la dispersion des ruptures, liée à la présence de défauts. La diminution progressive de ces défauts grâce à l'hydratation améliore la résistance, ce qui confirme l'intérêt d'une approche probabiliste.

Ainsi, l'introduction de la notion de probabilité de service permet d'évaluer la sécurité du matériau dans des conditions réelles, en tenant compte à la fois de la résistance moyenne et de la variabilité des propriétés mécaniques.

Il ressort de cette étude que l'ajout de fibres d'aluminium améliore la résistance du mortier et sa capacité à supporter les charges. Le modèle de Weibull nous a permis de mieux comprendre les performances du mortier avec ou sans fibres, en montrant que les fibres augmentent la résistance, mais peuvent au départ introduire une certaine variabilité. Avec le temps, le mortier fibré devient plus stable tout en conservant de bonnes performances.

Conclusion générale



Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur l'étude du comportement de mortiers renforcés par des fibres d'aluminium, dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques et leur durabilité. À travers les différentes étapes de ce travail, nous avons pu établir un lien solide entre la nature des matériaux utilisés, leur formulation, et les propriétés finales des mortiers obtenus.

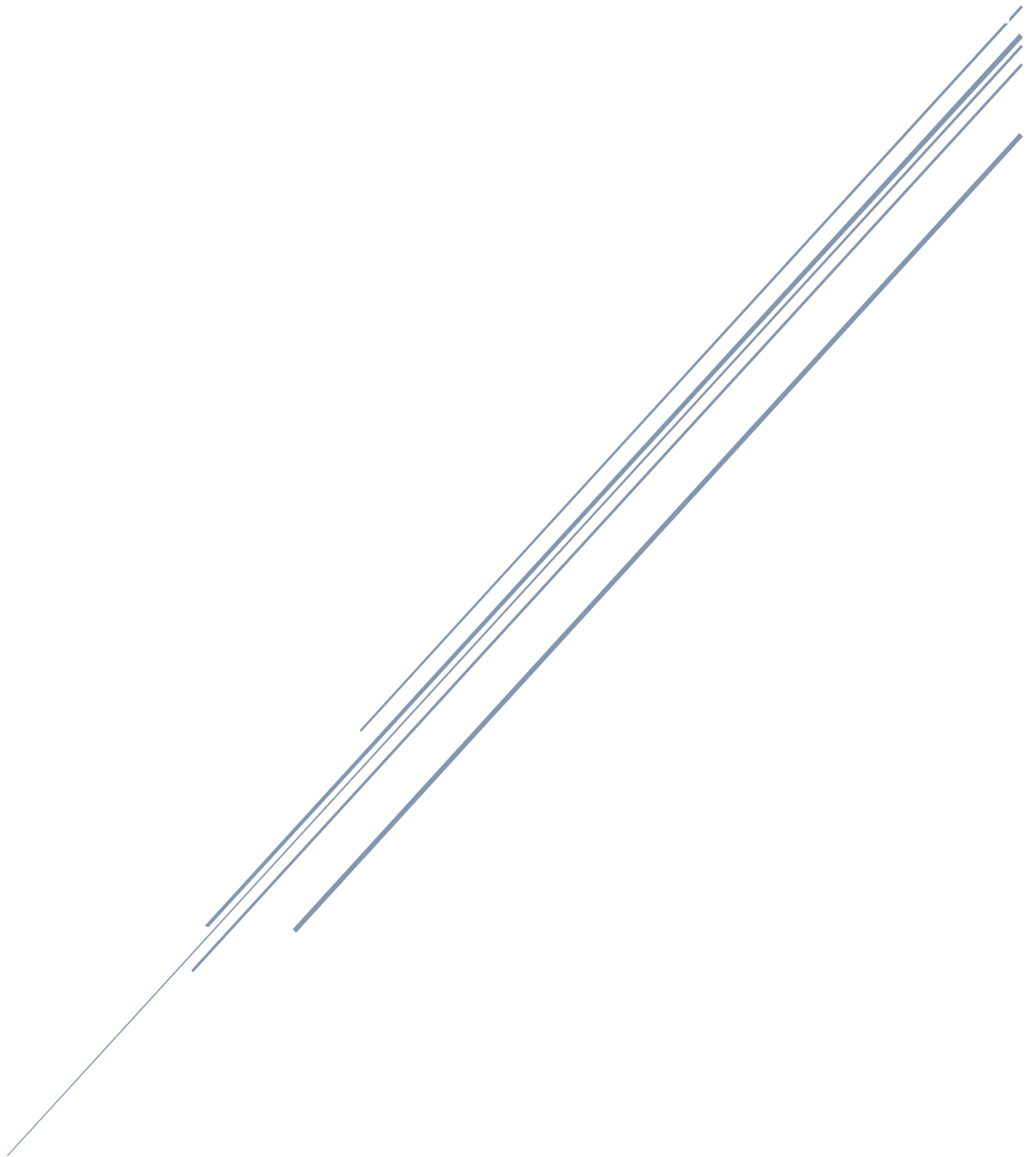
Dans un premier temps, un état de l'art a permis de mettre en lumière la diversité des types de mortiers et l'intérêt croissant pour les mortiers fibrés, notamment pour leurs propriétés renforcées face aux exigences mécaniques et environnementales. Les fibres d'aluminium, en tant qu'additifs innovants, présentent un réel potentiel d'amélioration des performances des mortiers.

Les matériaux utilisés ont été caractérisés avec précision afin d'assurer une formulation fiable des mélanges. La connaissance approfondie des constituants de base a été un préalable indispensable pour interpréter les résultats expérimentaux avec pertinence. Les différentes étapes expérimentales ont permis d'évaluer l'influence des fibres d'aluminium sur le comportement des mortiers, à l'état frais, durci, et sous sollicitations mécaniques et thermiques.

L'analyse des résultats a démontré que l'ajout de fibres d'aluminium améliore sensiblement les résistances à la compression d'une valeur maximale (31.173 Mpa) à 7 jours et (45.012 Mpa) à 28 jours et à la flexion nous donne (4.380 Mpa) à 7 jours et (4.280 Mpa) à 28 jours, tout en influençant la porosité (10.083%) à 7 jours et (6.533%) à 28 jours, la masse volumique et pour la conductivité thermique à 7 jours (1.996 w/m.k) et à 28 jours (2.176 w/m.k) du mortier. Un dosage optimal, situé autour de 2 %, a été identifié comme étant le plus efficace pour obtenir un bon compromis entre résistance mécanique, durabilité et homogénéité.

Enfin, l'application du modèle de Weibull a permis d'intégrer une approche probabiliste à l'analyse des résultats, rendant compte de la variabilité des résistances et de la fiabilité du matériau. Cette démarche a confirmé que, malgré une dispersion initiale liée à la distribution des fibres, le mortier renforcé tend à devenir plus stable avec le temps, tout en conservant des performances mécaniques supérieures à celles du mortier traditionnel.

Références bibliographiques et normatives



Références bibliographique

[1] L'article de Youmatter sur la construction durable (écoconstruction / green building), mis à jour au 11 juin 2024.

[2] Article — plus précisément un billet de blog intitulé « Matériaux durables et innovants : révolutionner la construction et l'industrie » publié sur le site KnowHow de Distrelec. Rédigé par Justyna Matuszak et mis en ligne le 25 juin 2024.

[3] REMIDINI HADJER Contribution à l'étude des propriétés mécaniques d'un béton de fibres, Mémoire de Master, Université Mohamed khider –Biskra 2020.

[4] SADOON, DJEBRI. Etude comparative entre les mortiers renforcés avec la fibre métalliques et verre. Mémoire de fin d'études, UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ de Bouira. (2019).

[5] Les mortiers cour TMC1, LMD1. Université Badji Mokhtar-Annaba.

[6] GHRIGA, OULAD SAID. Étude physico-mécanique d'un mortier à base de sable de carrier et déchets industrielles (déchets de brique et déchets de plastique PET). Mémoire de fin d'études, Université de Ghardaïa.

[7] De Larrard F. « Construire en béton l'essentiel sur les matériaux ». Thèse de doctorat, Presses de l'Ecole National Des Ponts et Chaussées, 2002, 199p.

[8] M. Venuat– La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. 1989- 277 p.

[9] Norme ciment NF EN 197-1 : Composition des ciments courants.

[10] BOUDRIES Abderezak, SAIFI Melissa (2024). Influence de la granulométrie des sables par différent matériaux sur les performances des mortiers cimentaires. Mémoire de fin d'études, Université A. Mira-Bejaia, Algérie.

[11] Sur le site MACONNERIE (les ciments ABC-MACONNERIE).

[12] ABLOCRETE. (1994). Béton de sable. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.

[13] VIMANE PHOUMMAVONG «Cours en ligne Matériaux de Construction». Université National LAOS 2006.

[14] SLIMANOU, H. (2021). Gestion, caractérisation et valorisation des sédiments dragués des ports en matériaux de construction et leur impact sur l'environnement (cas du port de Bejaia). Thèse de doctorat, Université A. Mira-Bejaia, Algérie.

[15] BENBIDA Lilia Caractérisation physico-mécanique du mortier de ciment renforcé de fibres de jonc : influence de la teneur et de la longueur des fibres. Mémoire master 2 (2023.'Universite Badji Mokhtar-Annaba'.

[16] SELLAMI GHAZALA Comportement des mortiers renforcés par fibres de Diss, étude expérimentale, analyse statistique, mathématique et optimisation. Master 2 année 2023 ‘Université 8 Mai 1945 de Guelma’.

[17] Pade, C., & Guérin, R. (2016). Bétons et mortiers : Formulation, fabrication et mise en oeuvre. Éditions Eyrolles

[18] Sur le site de la publicité -mortier-sika-rapide-5kg.html

[19] Pérales, F., & López-Colina Pérez, P. C. (2017). Tecnología de los morteros. Acondicionamiento de morteros para la reparación y restauración de la arquitectura monumental. Bellaterra : Universitat Politècnica de Catalunya.

[20] SOUMIA, Samia. Formulation d’un mortier avec ajout de pouzzolane naturelle soumis à températures élevées. 2016. Mémoire de Master. Université de Mohamed Boudiaf m’sila faculté de technologie.

[21] ABDELMADJID Bilal, Étude du comportement mécanique d’un béton à base de fibres métallique. 2021. Mémoire de fin d’études. Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU.

[22] MOKHTARI ABDESSAMED Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de Palmier Dattier ‘université Ouargla, thèse de magister, 2006’

[23] Chapitre-4-les mortiers, pdf.03/2020, université d’Oum el Bouaghi.

[24] FETNI-GOUBI. Mémoire, Contribution à l’étude des caractéristiques mécaniques des mortiers renforcés par les fibres de polypropylène (issues des déchets industriels), université KASDI MERBAH OUARGLA. Mémoire master 2019.

[25] AIT AMEUR, Contribution à l’étude expérimentale des bétons renforcés de fibres d’acier locales. Mémoire de magister, U Tiaret, 1998.

[26] DJEBALI S. (2013) : « Caractérisation des éléments de structures en béton de fibres métalliques », Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou.

[27] LAZIZI Hakim Influence de la variation de la température de revenu sur l’évolution des caractéristiques mécaniques et structurales de l’alliage Al-4%Cu trempe dans un fluide à 70% h₂o et 30% d’huile soluble. (2013). ‘Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou’.

[28] GUERMITI LAID contribution à l’amélioration de certaines caractéristiques du béton de structure à base de sable de dune corrigé et renforcé par des fibres métalliques.

[29] Thirion-Merle, V., Spectrométrie de fluorescence X. 2014, Editions des archives contemporaines.

[31] BOUKELLOUDA Abdelhafid (2023), Etude statique de la variation de la résistance à la compression du béton formulé par la méthode de Dreux Grorisse ‘ THESE pour l’obtention du grade de DOCTEUR EN SCIENCES ‘Université A. Mira-Bejaia, Algérie.

[30] EDUSCOL STI. Le modèle de Weibull : un critère de rupture probabiliste. <https://sti.eduscol.education.fr>.

Références normatives

NF EN 933-1 : Norme française, essai pour déterminer l'analyse granulométrique des granulats.

NF EN 1097-6 : Norme française, essai de la masse volumique absolue par la méthode de pycnomètre.

NF 933-9 : Norme française, qualification des fines, essais au bleu de méthylène.

NF EN 1015-6 : Norme française, la masse volumique à l'état frais.

NF EN 1936 : Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale.

NF P 18-459 : Norme français, essai de porosité et de masse volumique pour béton durci.

NF P 18-597 et NF P 18-598 : normes françaises qui traitent des granulats, notamment des sables utilisés en construction, l'équivalent de sable.

NF EN 1015-18 : Norme française, l'absorptions d'eau des mortiers a l'état durci.

NF EN 1015-11 : Norme français, méthode d'essai des mortiers pour maçonnerie –partie 11 : détermination de la résistance en flexion et en compression du mortier durci.

NF EN 993-15 : Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés dense, partie 15 : détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle).

NA 442 :2000 : Norme algérienne relative aux matériaux de construction, au béton ou aux essais de laboratoire.