

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE BLIDA I
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
LABORATOIRE DE GEOMATERIAUX ET GENIE CIVIL



MEMOIRE DE MASTER

Spécialité: Matériaux en génie civil

Performance des éco mortiers autoplaçant de Réparation à base des fibres végétales

Par

M^{lle} OUAMRI Ferial

Devant le jury composé de :

Debbih amina	U. Saad Dahleb-Blida1	Président
Bensaci hamza	U. Saad Dahleb-Blida1	Examineur
Said KANAI Pro	U. Saad Dahleb-Blida1	Promoteur
Walid YAHIAOUI MCA	U. Saad Dahleb-Blida1	Co-promoteur

2022/2023

Remerciement

Avant tout, nous exprimons notre gratitude envers Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous avons eu l'honneur d'être encadrés par le Dr Walid YAHIAOUI et le Pr. Said KENAI dans le cadre de cette recherche. Nous souhaitons les remercier sincèrement pour leur encadrement et leur suivi tout au long de ce travail. Leur disponibilité, leurs conseils avisés, leurs remarques pertinentes et leurs orientations constructives sont hautement appréciés.

Nos remerciements les plus sincères vont également au Dr.YAHIAOUI Walid, Directeur du Laboratoire de Géomatériaux et Génie Civil, pour nous avoir facilité l'accès pour la réalisation de notre étude expérimentale. Nous tenons également à remercier les membres du jury pour leur présence et leur acceptation d'examiner notre travail. Leur participation à ce processus est un grand honneur pour nous.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance envers nos professeurs qui nous ont accompagnés tout au long de ces cinq années d'études. Leurs enseignements nous ont été précieux.

Nous souhaitons adresser un grand merci à toutes les personnes qui nous ont encouragés et apporté leur aide précieuse dans la réalisation de ce travail.

Enfin, nous ne saurions trop remercier nos familles, nos sœurs et nos frères, qui ont toujours été présents à nos côtés. Nous leur devons tout ce que nous sommes aujourd'hui, et nous sommes reconnaissants envers le Tout-Puissant, le Miséricordieux, pour leur soutien inconditionnel.

Dédicace :

Pour les heures pleines de bonheur et de tendresse. Pour les chaudes larmes qui hantent ma mémoire. Pour l'ampleur de tes sacrifices.

Pour toi ma chère maman qui mis l'avenir de tes enfants en premiers et les jouissances de la vie terrestre en dernier. Tu es ce que j'ai de plus cher au monde et je vous jure qu'aucun mot, ni expression ne serait exprimer tout mon amour et toute ma gratitude. Merci de faire l'impossible pour moi. Ma mère je dédie ce travail à vous.

Je tiens aussi à remercier ma sœur farah et mon frère fayssal , mes amies hakima , batoula , imeno aussi feriel et ines ahlem amina et tous qui était là pour moi je vous aime tous .

Résumé

L'évolution de la réparation et de la réhabilitation des ouvrages en béton armé est indéniable. Cependant, ces processus nécessitent une compréhension approfondie du support à réparer, des matériaux de réparation et de l'environnement dans lequel ils seront utilisés. Actuellement, les mortiers de réparation industriels disponibles sur le marché sont souvent coûteux.

Dans cette optique, notre étude vise à formuler un mortier autoplaçant de réparation écologique, économique en utilisant des ressources locales. Pour atteindre cet objectif, nous avons incorporé des fibres de palmier dattier de 1% par volume totale du mortier de réparation et le ciment a été substitué de 15% de laitier dans notre formulation. De plus, nous avons réparé notre support par mortier de réparation est autoplaçant qui présente une excellente fluidité et une capacité d'écoulement élevée, facilitant ainsi son application dans les zones difficiles d'accès.

L'incorporation des fibres de palmier dattier dans le mortier entraîne une diminution de la porosité, et de la masse volumique par rapport au mortier témoin. Les fibres traitées hydrauliquement ont démontré les meilleurs résultats en termes de résistance en flexion, cependant les fibres traitées en alcali démontrent les meilleurs résultats en adhérence.

Mots clés : mortiers autoplaçants de réparation, fibres végétales, laitier haut fourneau, durabilité, fibres palmier dattier, propriétés mécaniques.

ملخص

تتطور عمليات إصلاح وتجديد المنشآت المصنوعة من الخرسانة المسلحة بشكل ملحوظ. ومع ذلك، يتطلب ذلك معرفة دقيقة للدعم المراد إصلاحه، ومواد الإصلاح المستخدمة، والبيئة التي ستتم فيها استخدامها. حالياً، تكون مواد الإصلاح الصناعية المتاحة في السوق غالباً مكلفة

وفي هذا السياق، يهدف بحثنا إلى تطوير مونة إصلاح صديقة للبيئة واقتصادية تستخدم موارد محلية. لتحقيق هذا الهدف، قمنا بإضافة ألياف نخيل التمر بنسبة 1% و15% من السلاغ في تركيبتنا. بالإضافة إلى ذلك، فإن المونة التي طورناها تتمتع بالقدرة على التوضع ذاتياً، مما يعني أنها تتدفق بشكل ممتاز وتنساب بسهولة، مما يسهل تطبيقها في المناطق التي يصعب الوصول إليها

من خلال استغلال ألياف نخيل التمر، الموارد المحلية الوفيرة، نسعى إلى تحسين خصائص مونة الإصلاح وفي الوقت نفسه تقليل تكلفتها. بالإضافة إلى ذلك، تساهم هذه التركيبة في الحد من الأثر البيئي للمواد المستخدمة في الإصلاح

التضمين المناسب لألياف نخل البلح في الملاط يؤدي إلى تقليل في الانتفاخ، التوصيل الحراري والكتلة الحجمية بالمقارنة مع الملاط الأساسي. أظهرت الألياف المعالجة بطريقة الهيدروليكية أفضل النتائج في مقاومة الانحناء، في حين أظهرت الألياف المعالجة بالقلوي أفضل النتائج في الالتصاق

الكلمات الرئيسية: الملاط الذاتي التمهيدي للإصلاح، ألياف نباتية، السائل الفرن العالي، المتانة، ألياف نخل البلح، الخصائص الميكانيكية

Abstract

The evolution of the repair and rehabilitation of reinforced concrete structures is undeniable. However, these processes require a deep understanding of the substrate to be repaired, the repair materials, and the environment in which they will be used. Currently, industrial repair mortars available in the market are often expensive.

In this context, our study aims to formulate an ecological and cost-effective repair mortar that utilizes local resources. To achieve this goal, we have incorporated 1% date palm fibers and 15% slag into our formulation. Additionally, our repair mortar is self-placing, meaning it exhibits excellent fluidity and high flowability, facilitating its application in hard-to-reach areas.

By valorizing abundant local resources such as date palm fibers, we aim to improve the properties of the repair mortar while reducing its cost. Furthermore, the addition of slag, an industrial by-product from iron and steel production, helps reduce the carbon footprint of the mortar.

The incorporation of date palm fibers into the mortar leads to a decrease in porosity, thermal conductivity, and bulk density compared to the control mortar. Hydraulically treated fibers have demonstrated the best results in terms of flexural strength, while alkali-treated fibers have shown the best results in terms of adhesion.

Keywords: Self-compacting repair mortars, plant fibers, blast furnace slag, durability, date palm fibers, mechanical properties.

Table des matières

Remerciement	2
Dedicace	3
Résumé	4
ملخص	5
Abstract	6
Introduction générale	9
1. CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	17
1.1 Introduction :	18
1.2 Durabilité :	18
1.3 Pathologie :	19
1.4 Dégradation de béton :	20
1.4.1 Les causes de dégradations :	20
1.5 Les dégradations :	23
1.6 Mortier autoplaçant :	24
1.7 Mortier de réparation :	25
1.7.1 Définition :	25
1.7.2 Classification des mortiers de réparation :	25
1.7.3 Interaction des mortiers de réparations avec les supports :	25
1.7.4 Caractéristiques des mortiers de réparation :	27
1.7.5 Durabilité de la réparation :	27
1.7.6 Compatibilité :	28
1.7.7 Application aux réparations réalisées avec des mortiers :	28
1.7.8 Influence de la rugosité :	29
1.8 Fibres végétales :	31
1.8.1 Définition :	31
1.8.2 Structure d'une fibre végétale :	31
1.8.3 Classification des fibres végétales :	32
1.8.4 Quelques fibres végétales cellulosiques :	32
1.8.5 Propriétés physiques, mécaniques et chimiques des fibres végétales : [24], [25]	35
1.8.6 Avantages et inconvénients :	36
1.9 Palmier dattier :	38
1.9.1 .Disponibilité du palmier dattier en Algérie :	38

1.9.2	Morphologie de fibre palmier dattier :	39
1.9.3	Fibre de palmier dattier :	40
1.9.4	Propriétés physiques chimiques et mécaniques des palmiers dattier :	40
1.10	Durabilité des fibres :	42
1.10.1	Interface fibre-matrice : notion d'adhésion :	42
1.11	Traitement des fibres :	45
1.11.1	Traitement physiques :	46
1.11.2	Traitement chimique :	46
1.12	Compatibilité matrice cimentaire fibre :	48
1.13	Effet des fibres végétales sur :	48
1.13.1	La conductivité thermique :	48
1.13.2	Résistance à la flexion :	49
1.13.3	La porosité :	50
1.13.4	.la résistance a la compression :	51
1.13.5	Retrait :	52
1.14	Les ajouts minéraux :	54
1.14.1	Définition :	54
1.14.2	Classification des ajouts minéraux :	54
1.14.3	.Effet du laitier sur les propriétés des bétons et mortiers autoplaçants :	54
1.15	Conclusion	56
2	CHAPITRE 02	57
2.1	Introduction :	58
2.2	. Caractérisation des matériaux utilisés :	58
2.2.1	Ciment :	58
2.2.2	Les granulats utilisés pour le béton :	59
2.2.3	Les sables utilisés pour les mortiers	59
2.2.4	Essais réalisés sur sables :	60
2.2.5	.Eau de gâchage :	62
2.2.6	.Adjuvant :	62
2.3	Ajouts :	63
2.3.1	Laitier haut fourneau :	63
2.3.2	Les fibres :	64
2.4	Formulations adaptés :	66
2.4.1	Pour le béton :	66
2.4.2	Pour le mortier autoplaçant de réparation :	68

.....	71
2.5 Essai réalisés sur mortier autoplaçant de réparation a l'état frai :	72
2.5.1 .Essai d'étalement au Mini-Cône :	72
2.5.2 .Masse volumique apparentes :	72
2.6 Essai réalisés sur mortier autoplaçant de réparation a l'état durci	73
2.6.1 .L'absorption capillaire :	73
2.6.2 la porosité accessible :	74
2.6.3 .Essai d'adhérence par arrachement :	75
2.6.4 .La résistance a la flexion :	77
2.6.5 Conductivité thermique :	78
2.7 Résumé du plan expérimental :	79
3 CHAPITRE 03	80
3.1 Introduction :	81
3.2 Influence des fibres palmiers dattiers et le laitier sur états frais :	81
3.2.1 Etalement :	81
3.2.2 Masse volumique :	82
3.3 Effet des fibres palmiers dattiers et le laitier sur l'Etat durci	83
3.3.1 Absorption capillaire :	83
3.3.2 Porosité :	85
3.3.3 Résistance à la flexion :	86
3.3.4 L'arrachement :	87
3.3.5 Conductivité thermique :	89
3.4 Conclusion	90
4 CONCLUSION GENERALE	91
Liste de références :	92

Liste des figures :

Figure 1.1: principaux causes des défauts et de dégradations dans les constructions...	19
Figure 1.2: différentes échelles d'études.....	21
Figure 1.3 : effet de superplastifiant sur les matières cimentaires.....	22
Figure1. 4: les constituants du béton.	23
figure1.5:différentes étapes de réparation.....	26
Figure 1.6 : Facteurs affectant la durabilité d'une réparation.....	27
Figure 1.7 : différentes formes de compatibilité entre le matériau de réparation et le support.	28
Figure 1.8. Différents types de tests pour mesurer la pour mesurer l'adhérence des mortiers de réparation.....	29
Figure 1.9 : méthode de la tache de sable.	30
Figure 1.10: différents formes des fibres végétales.....	31
Figure1.11: structure des fibres végétales	31
Figure 1.12 : classification des fibres végétales.	32
Figure 1.13: comparaison de la composition chimique des fibres végétales.....	35
Figure 1.14 : Analyse comparative des coûts des fibres végétales par rapport aux fibres de verre.	37
Figure1.15 : répartition du palmier dattier en Algérie.....	38
Figure1.16 : coupe longitudinale de fibre palmier dattier.	39
Figure1.17 : coupe verticale de fibre palmier dattier.....	39
Figure1.18 : fibre palmier dattier en contact avec le ciment.....	39
Figure1.19 : catégorie des fibres de palmier dattier.....	40
Figure1.20 : fibre de pulpe de confiere en contact avec le ciment.....	42
Figure1.21 : image SEM de la rupture en traction d'un composite avec une fraction volumique de fibres.....	43

Figure1.22 : observation microscopique d'une fibre de lechiguila non traité après 12 mois de conservation dans un milieu alcalin.....	44
Figure1.23: dissolution de lignine et d' hémicellulose dans la pâte de ciment.....	44
Figure1.24: traitement des fibres végétales.....	45
Figure1.25 : courbes d'hydratation des fibres naturelles d'eucalyptus.....	48
Figure1.26 : conductivité thermique en fonction de fraction massique des fibres	49
Figure1.27 : courbes contrainte déformation obtenues lors d'un essai flexion 4 points.	49
Figure1.28 : résistance à la flexion des mortiers fibres avec des fibres de lins traitées.	50
1.29 : Porosité des différents composites en fonction du volume des fibres de palmier.	51
Figure1.30 : résistance à la compression du béton renforce avec des fibres de palmier dattier soumis à une cure humide.....	52
Figure1.31 : résistance à la compression du béton renforce Avec de palmier dattier conservé à l'aire libre	52
Figure1.32 : influence de la teneur en fibres et du longueur sur la résistance à la compression.....	52
Figure1.33 : Retrait total des composites des fibres polypropylène sèches et humidifiées.....	53
Figure1.34: effet de finesses de laitier sur la résistance à la compression.....	55
Figure1.35 : absorption d'eau des bétons autoplaçants a base des laitiers.....	56
Figure 2.1: ciment GICA (CEM II/A-L 42.5 R).....	58
Figure 2.2 : différents types de sable utilisé.	59
Figure2.3: sable Hassi Bahbah sable Baghlia	60
Figure 2.4. Masse volumique absolue des sables : Baghlia, Hassi Bahbah.....	60
Figure 2.5 : équivalent de sable.....	61
Figure2.6 : analyse granulométrique.....	61
Figure2.7 : Optimisation du pourcentage du superplastifiant.	63

Figure2.8: broyage de laitier.....	64
Figure2.9: fibres de palmier dattier à l'état premier.....	64
Figure2.10 : masse volumique des fibres.....	64
Figure2.11: découpage des fibres.....	64
Figure 2.12 : fibres découpés.....	64
Figure2.13: photo SEM des fibres palmier dattier.....	65
Figure 2.14 : Les procédures entamées pour le traitement hydrothermique sur les fibres palmier dattier	65
Figure 2.15 : Les procédures entamées pour le traitement hydrothermique sur les fibres palmier dattier.....	66
Figure2.16: préparation des éprouvettes en béton 7*7*28.....	68
Figure2.17: séquence de malaxage	69
Figure2.18: temps de malaxage adapté	69
Figure2.19 : différentes application de MAP de réparation.....	70
Figure2.20: Application du mortier de réparation sur les dalles.....	70
Figure2.21 : les dalles après 28 jours de conservation.....	71
Figure2.22 : éprouvettes 4*4*16.....	71
Figure2.23 : éprouvette 7*7*28 après application du MAP de réparation, conservation des éprouvettes.....	71
Figure 2 .24 : étalement du mortier autoplaçant de réparation.	72
Figure2.25 : masse volumique des mortiers.....	72
Figure2.26 : essai d'absorption capillaire.....	73
Figure2.27 : essai de porosité.....	75
Figure2.28 : principe d'essai d'arrachement.....	76
Figure2.29 : carottage des dalles.....	76

Figure 2.30 : Essai d'adhérence par arrachement.....	77
Figure2.31: principe d'essai de flexion 4 points	77
Figure2.32: essai de flexion.....	78
Figure2.33 : appareil conductivité thermique.....	78
Figure3.1: influence des fibres palmier dattier et du laitier sur l'étalement des mortiers autoplaçant de réparation.....	81
Figure 3.2 : influence d'incorporation des fibres palmier dattier et du laitier sur la masse volumique des mortiers.....	82
Figure3.3 Variation de l'absorption d'eau capillaire dans les mortiers avec ajout de fibres de palmier et de laitier.....	84
Figure 3.4 : Sorptivité des différents mélanges petit pores	84
Figure 3.5 : Sorptivité des différents mélanges grand pores	85
Figure 3.6 : influence des fibres palmier dattier et du laitier sur la porosité des mortiers.....	86
Figure 3.7:influence des fibres palmier dattier et du laitier sur la résistance a la flexion des différents mortiers.....	87
Figure 3.8 : différents mode de rupture.....	87
Figure 3.9 : résultats d'essai d'arrachement.....	88
Figure 3.10 : influence des fibres palmier dattier et du laitier sur les mortiers.....	88
Figure 3.11 : influence des fibres palmier dattier et du laitier sur la conductivité thermique .	89

Liste des tableaux :

Tableau 1.1. Classification des mortiers de réparation	25
Tableau 1.2:Classification des mortiers selon leur caractéristiques mécaniques.....	27
Tableau 1.3. formes de fibres et coupes transversales/longitudinales.....	33-34
Tableau 1.4 : propriétés chimiques des fibres végétales.....	35
Tableau1.5 : propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales.....	36
Tableau 1.6. Coefficients d'absorption des fibres végétales.....	36
Tableau 1.7 : avantages et inconvénients des fibres végétales	37
Tableau1.8 :propriétés physiques et mécaniques des fibres palmier dattier	41
Tableau 1.9 : propriétés chimiques des fibres palmiers dattiers	41
Tableau 1.10 : effet de dégradations par minéralisation et leurs causes.....	45
Tableau1.11 : Comparaison entre les résultats des différents types de traitement	47
Tableau1.12 : classification des ajouts minéraux.....	54
Tableau 2.1 : caractéristique physiques du ciment CEM II/A-L 42.5 R.....	58
Tableau 2.2 : caractéristiques des granulats utilisés	59
Tableau2.3 : caractéristiques des sables utilisés pour mortier	60
Tableau 2.4 : description du superplastifiant.....	63
Tableau 2.5:caractéristiques chimiques des fibres.....	65
Tableau 2.6 : composition du béton	67
Tableau 2.7 : proportions des mélanges des mortiers autoplçants de réparation	69
Tableau 3.1 : Contraintes d'adhérences et modes des ruptures.....	88

Liste des symboles et abréviations :

Al : Aluminium

Ca : Calcium.

Ca(OH) : La portlandite.

CMP : Les composites à matrice polymérique.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

DPF : Fibres de palmier dattier.

E/C : Eau/ciment.

g : Gramme.

GPa : Giga pascal.

H₂O : Eau

I : Coefficient d'absorption d'eau par capillarité.

Kg : kilo gramme.

Kg /m³ : kilogramme par mètre cube.

LHF : Laitier haut fourneau.

MAP : Mortier autoplaçant.

MEB : microscope électronique à balayage (SEM Scanning Electron Microscopy)

mm : Millimètre.

MPa : Méga pascal.

NaOH : Hydroxyde de sodium.

NF EN : Norme européenne version française.

S/M : rapport (volumique) sable sur mortier SP/L.

SP : superplastifiant.

SSP : surface spécifique d'une poudre.

Introduction générale :

Le béton occupe actuellement une place prépondérante en tant que matériau de construction le plus largement utilisé au niveau mondial, surpassant tous les autres matériaux combinés. Son utilisation ne cesse d'évoluer, que ce soit en termes de performances mécaniques ou de composition, avec l'introduction croissante d'ajouts minéraux ou de fibres visant à améliorer sa durabilité, à réduire son coût et à atténuer son impact environnemental. Toutefois, le béton demeure vulnérable aux dommages occasionnés par divers facteurs tels que la corrosion des armatures, les sollicitations physiques ou chimiques, nécessitant ainsi des interventions de réparation et de renforcement pour garantir une durabilité accrue.

Parmi les éléments clés de ce système de réparation, le mortier de réparation occupe une place centrale, exigeant une connaissance approfondie du support, des matériaux de réparation, des mécanismes d'adhérence et de la compatibilité. Dans ce contexte, l'utilisation de fibres végétales suscite un intérêt croissant dans l'industrie de la construction, notamment en raison de leurs avantages tels qu'une faible densité, une disponibilité renouvelable, un coût abordable et une résistance à la traction élevée. Bien que l'Algérie dispose d'une abondance de ressources en fibres végétales, leur valorisation dans les matériaux de construction demeure encore limitée.

Cette étude se focalise sur l'évaluation de la durabilité des mortiers autoplaçants renforcés de fibres végétales issues du palmier dattier, une approche à la fois respectueuse de l'environnement et économiquement viable. Dans cette optique, le premier chapitre se consacre à une revue bibliographique approfondie portant sur les causes de dégradation du béton, les fibres végétales et leurs différentes applications. Le deuxième chapitre met l'accent sur les caractéristiques des matériaux utilisés et présente les programmes expérimentaux mis en place pour étudier les mortiers renforcés. Enfin, les conclusions générales de cette étude sont exposées, fournissant ainsi des éclairages pertinents pour les praticiens et les chercheurs du domaine.

CHAPITRE 1 : **REVUE BIBLIOGRAPHIQUE**

1. **CHAPITRE 1 : REVUE
BIBLIOGRAPHIQUE**

1.1 Introduction :

Dans ce chapitre on présente une revue bibliographique sur les mortiers autoplaçants de réparations à base des fibres végétales (palmier dattier), avec des additions minérales (laitier) ainsi que leurs influences sur les performances des mortiers a l'état frais et durci.

1.2 Durabilité :

La durabilité des ouvrages en génie civil fait référence à la capacité d'une construction, telle qu'un bâtiment, un pont, une route ou un barrage, à maintenir ses performances et son intégrité structurelle pendant une période prolongée, sous les sollicitations et les conditions environnementales auxquelles elle est exposée.[1]

Les indicateurs de durabilité peuvent être regroupés en fonction de la nature des essais :

Destructifs, non destructifs, microscopiques ou de performances. Dans la littérature internationale, il existe de nombreux essais qui évaluent la durabilité du béton. Certains de ces essais sont normalisés par des organismes tels que l'AFNOR, l'ASTM, RILEM, tandis que d'autres suivent des protocoles expérimentaux ou des projets de normes. Ces indicateurs peuvent être classés comme suit :

- Indicateurs généraux : Ils ne correspondent pas à un mécanisme de dégradation spécifique, tels que la diffusion des ions chlorures, la teneur en portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, la porosité accessible à l'eau, la perméabilité aux gaz et la porosité .[2]
- Indicateurs spécifiques : Ils sont liés à une dégradation spécifique liée à un environnement particulier, tels que la résistance aux attaques sulfatiques, le gel-dégel et la carbonatation.
- Indicateurs de substitution : Ils incluent des mesures telles que l'absorption capillaire, l'absorption d'eau et la résistivité électrique.

1.3 Pathologie :

La pathologie des ouvrages en génie civil fait référence à l'étude des anomalies, des défaillances et des problèmes structurels qui peuvent survenir dans les constructions telles que les bâtiments, les ponts, les barrages, les routes, etc. Elle concerne l'identification, l'analyse et la compréhension des causes de ces problèmes, ainsi que le développement de solutions pour les réparer, les prévenir ou les minimiser.[3], [4]

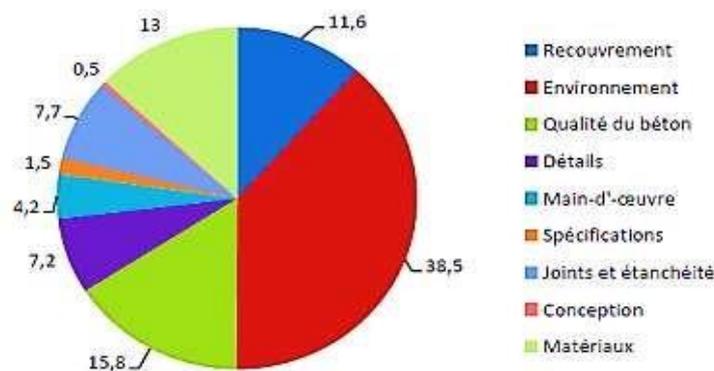
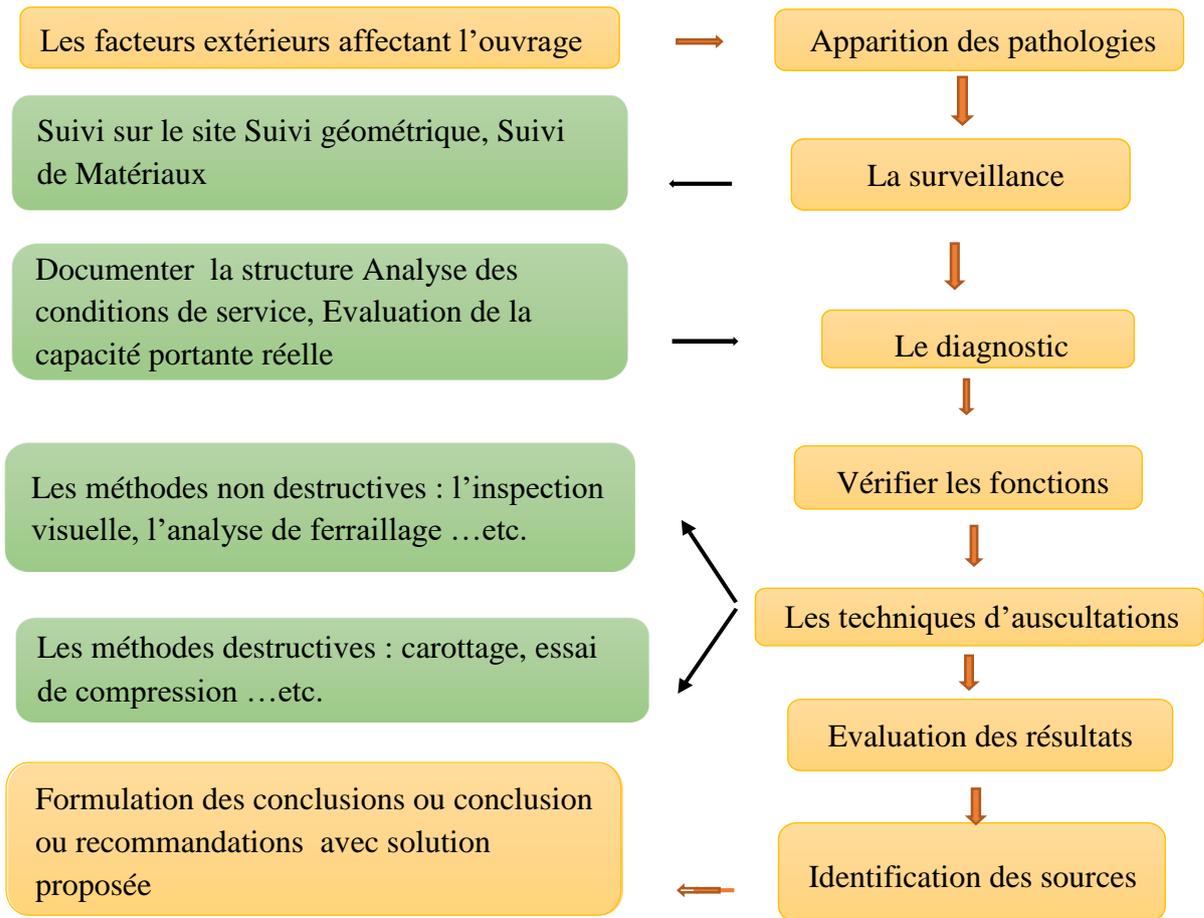


Figure 1.1: principaux causes des défauts et de dégradations dans les constructions. [3].

1.4 Dégradation de béton :

La dégradation du béton est un processus dans lequel les propriétés mécaniques et physiques du béton sont altérées, ce qui peut entraîner une dégradation de sa résistance et de sa durabilité au fil du temps. [4]

Les ouvrages de génie civil peuvent connaître divers problèmes dus à plusieurs causes :[5][6]

1.4.1 Les causes de dégradations :

Un ouvrage est constitué d'une combinaison de différents éléments tels que des matériaux, des produits de construction, des équipements, des méthodes (savoir-faire, réglementation), de l'ingénierie et des matériels. Tout au long de son cycle de vie, de sa conception à sa déconstruction en passant par sa mise en œuvre, son exploitation, son inspection, sa maintenance, sa réparation et sa réhabilitation, un ouvrage est exposé à des conditions climatiques et d'utilisation variables.

L'étude de la durabilité des produits de construction nécessite des recherches académiques pour comprendre leur comportement fonctionnel dans le temps. Cela implique l'analyse de scénarios de dégradation, la modélisation multi-échelle et l'intégration de données provenant de différentes sources. Des méthodes existantes telles que l'analyse des dysfonctionnements et l'évaluation de la performance sont utilisées, tout en tenant compte des différentes échelles d'étude : [4]

- Échelle géométrique : il est possible d'étudier l'ouvrage dans sa globalité, au niveau de ses produits, de ses composants ou de ses matériaux.
- Échelle phénoménologique : l'étude des mécanismes de dégradation peut être réalisée au niveau du phénomène, du scénario ou des scénarii de dégradation.
- Échelle fonctionnelle : il est possible de s'intéresser à une fonction particulière ou à l'ensemble des fonctions et de leur combinaison.
- Échelle temporelle : les recherches peuvent se focaliser sur la phase de conception, ou celle de mise en œuvre, ou celle d'exploitation ou celle d'inspection maintenance réparation.

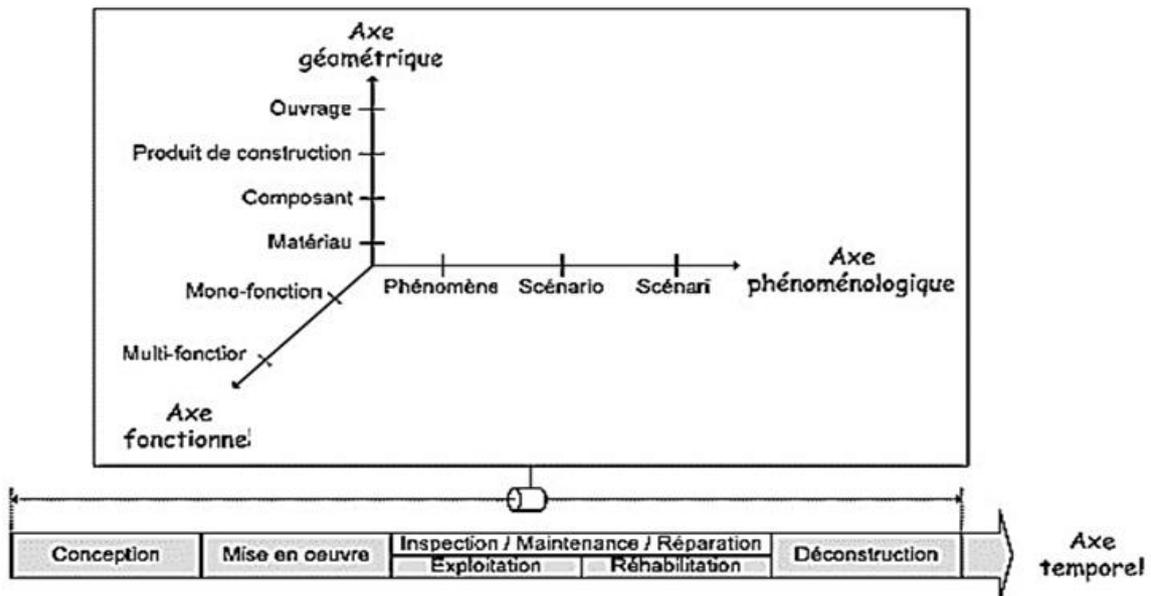


Figure 1.2: différentes échelles d'études.

1.4.1.1 Défauts de conception :

Les défauts de conception dans le domaine du génie civil sont des erreurs ou des insuffisances dans la planification et la conception des structures en béton. Ils peuvent entraîner des problèmes de durabilité et de dégradation. Parmi ces défauts, on trouve souvent une armature insuffisante, une protection contre la corrosion inadéquate et une mauvaise conception des joints de dilatation.

1.4.1.2 Défauts de mise en œuvre :

Les erreurs de mise en œuvre du béton sont nombreuses, voici quelques-unes des plus courantes :

1. Mauvaise préparation de la surface de coffrage.
2. Mauvais mélange du béton.
3. Mauvaise vibration du béton.
4. Démoulage prématuré.
5. Utilisation d'outils de finition.

6. Non-respect des spécifications de durcissement. [5], [7]

1.4.1.3 Qualité des matériaux :

- Ciment : choisir un ciment de teneur en alcalis faible pour limiter les risques de réaction alcalis-granulats.
- Granulats : éviter l'utilisation des granulats (granulats gélifs) qui sont sensibles à l'effet de basses températures (gel/dégel) dans le béton exposé à l'action de gel/dégel.
- Eau de gâchage : Une eau de gâchage de qualité supérieure peut aider à obtenir un béton homogène avec un taux d'hydratation optimal pour une résistance maximale.
- Adjuvants : sont utilisés pour modifier les propriétés du béton, comme la fluidité, le temps de prise, la résistance et la durabilité. Ils peuvent être des produits chimiques tels que les superplastifiants, les retardateurs ou les accélérateurs de prise, ou des matériaux tels que les fibres.[8]

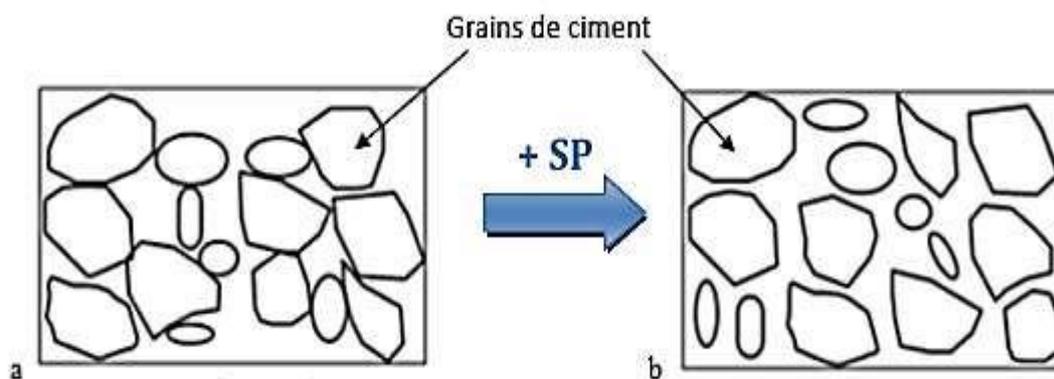


Figure 1.3 : effet de superplastifiant sur les matières cimentaires.

- Les ajouts cimentaires : sont des matériaux qui sont ajoutés au ciment pour améliorer certaines propriétés du béton, telles que la résistance, la durabilité et la réduction de la perméabilité. La qualité des ajouts cimentaires peut varier en fonction de leur source et de leur procédé de fabrication. Pour assurer une haute qualité ils doivent répondre à certaines normes et exigences pour garantir leur qualité et leur performance. Par exemple, les laitiers de haut fourneau doivent correspondre à la norme ASTM C989. [61]

- L'air : sa présence dans le béton est cruciale pour assurer la durabilité et la résistance des structures. L'air emprisonné dans le béton joue un rôle de tampon en permettant au béton de se dilater et de se contracter sans se fissurer, ce qui le protège contre les cycles de gel-dégel et les dégradations prématurées. En outre, l'air peut protéger les armatures en acier de la corrosion en permettant la formation d'une couche d'oxyde de fer qui protège les armatures contre la corrosion. La quantité d'air recommandée peut varier de 4 % à 8 % en volume.

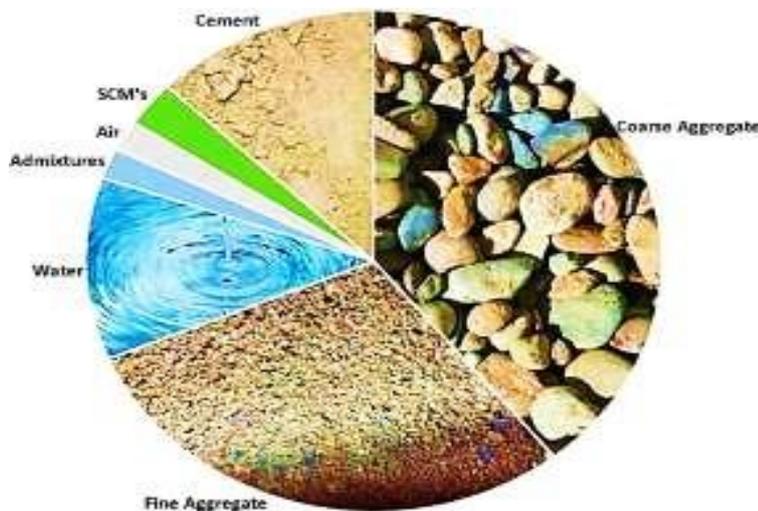


Figure 1. 4: les constituants du béton.

1.5 Les dégradations :

Les dégradations du béton sont des altérations, détériorations ou dommages qui se produisent dans la structure du béton au fil du temps. Ces dégradations peuvent être causées par divers facteurs tels que l'environnement, l'utilisation, les contraintes mécaniques, les réactions chimiques, etc.

Chaque processus de dégradation du béton se manifeste de manière unique, et les conséquences sur la fonctionnalité, la sécurité et l'intégrité de l'ouvrage dépendent de leur évolution dans le temps, de leur interaction avec d'autres formes de détérioration, ainsi que des conditions environnementales auxquelles la structure est soumise.[5]

La gravité d'un mode de défaillance est évaluée sur une échelle qualitative à quatre niveaux :

- Catégorie 1 - Catastrophique : il s'agit d'une défaillance qui peut entraîner la perte de vies humaines ou la destruction complète du système d'armes (avion, char, missile, navire, etc.).
- Catégorie 2 - Mineure : il s'agit d'une défaillance qui peut causer des blessures graves, des dommages aux structures ou des dommages importants au système, pouvant entraîner la perte de la mission.
- Catégorie 3 - Marginale : il s'agit d'une défaillance qui peut entraîner des blessures légères, des dommages mineurs aux structures ou des dommages mineurs au système, pouvant entraîner un retard, une perte de disponibilité ou une dégradation de la mission.
- Catégorie 4 - Négligeable : il s'agit d'une défaillance qui n'est pas suffisamment significative pour causer des blessures, des dommages aux structures ou des dommages au système, mais qui peut nécessiter une maintenance ou une réparation non planifiée.[4]

1.6 Mortier autoplaçant :

Le mortier autoplaçant (MAP) se distingue par sa grande fluidité et sa capacité élevée de remplissage, tout en maintenant sa stabilité et en offrant de bonnes performances mécaniques et de durabilité. Les caractéristiques clés du MAP sont les suivantes :[9]

- a. Un volume de pâte élevé : Le mortier de type MAP est composé d'une proportion significative de pâte. Cette pâte assure la séparation des granulats les uns des autres..
- b. Une quantité significative de fines : Pour assurer une maniabilité adéquate tout en limitant les risques de ségrégation et d'exsudation, le MAP contient une quantité de fines supérieure à celle des mortiers traditionnels.
- c. Un dosage élevé de superplastifiant : L'ajout d'une quantité relativement importante de superplastifiant dans le MAP permet de réduire la quantité d'eau tout en maintenant une bonne maniabilité.

1.7 Mortier de réparation :

1.7.1 Définition :

Les mortiers de réparation sont des pâtes utilisées pour la réparation de zones entières ou des fissures très larges (> 1 cm) [10].

1.7.2 Classification des mortiers de réparation :

La norme EN 1504[14] établit deux catégories de mortiers de réparation :

Les mortiers de réparation structurelle : sont appliqués sur une structure en béton pour remplacer les parties défectueuses et restaurer l'intégrité et la durabilité de la structure

Les mortiers de réparation non structurelle : sont utilisés pour redonner à la surface en béton son aspect géométrique ou esthétique [11]

On peut classer les mortiers de réparation en deux familles en fonction de leur composition : les mortiers à base de liant hydraulique et les mortiers à base de liants hydrauliques modifiés par des polymères.

D'autres types de classifications existent résumés dans le tableau 1.1, ci-joint :

Tableau 1.1. Classification des mortiers de réparation

Mortiers classiques	Mortiers modifie par des polymères	Mortiers à base de résine
- Mortiers a base ciment portland ordinaire	- Mortiers à base de ciment modifie par un polymère styrene butadiène	-Mortier d'époxy
- Mortiers a base ciment alumineux	- Mortier à base de ciment modifie par un polymère vinyle acétate	- Mortier acrylique
		- Mortier polyester

1.7.3 Interaction des mortiers de réparations avec les supports :

Les six étapes suivantes de la procédure de réparation sont présentées, qui ont été développées, utilisées et évaluées sur une longue période de durée de vie de service. Cette méthodologie convient à la réparation de béton nouvellement construit présentant des défauts, ainsi qu'aux

anciennes structures en béton endommagées par une exposition prolongée due à des conditions strictes :

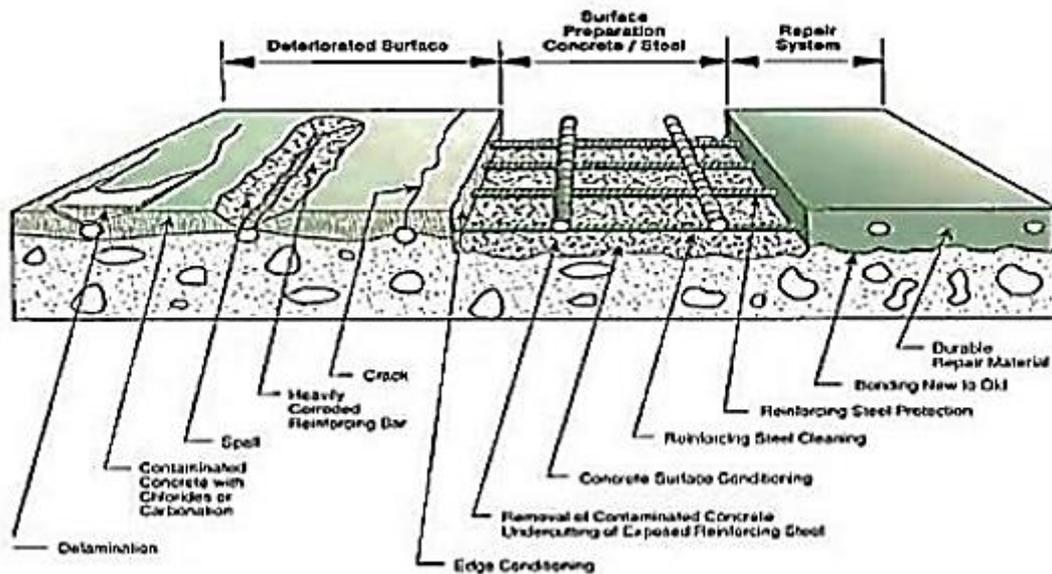


figure 1.5: différentes étapes de réparation.

- Étape 1 : Détection des causes de dégradation (dommages ou défauts).
- Étape 2 : Auscultation - diagnostic (identification des pathologies et évaluation de l'étendue de la zone dégradée).
- Étape 3 : Préparation du système de réparation proposé. Les éléments nuisibles doivent être éliminés ou nettoyés (saletés et dépôts superficiels tels que poussière, huile et graisse, cire de paraffine, produits de cure, efflorescence de calcite, etc.). Les structures en béton non compact doivent être enlevées, les joints et les fissures doivent être rebouchés avec du mortier.
- Étape 4 : Application des produits de réparation (conditions du site, respect des spécifications de durcissement).
- Étape 5 : Évaluation de l'efficacité de la réparation (performances attendues : propriétés Mécaniques renforcées du béton réparé, durée de vie prolongée, etc.) .
- Étape 6 : Surveillance et suivi (pendant les premières années après les travaux de réparation).

[12]

1.7.4 Caractéristiques des mortiers de réparation :

Il existe des exigences obligatoires communes à toutes les applications, tandis que d'autres sont optionnelles. Les matériaux sont classés en quatre catégories, allant de R1 à R4, en fonction de leur résistance à la compression croissante.

Tableau 1.2: Classification des mortiers selon leur caractéristiques mécaniques

Caractéristique de performance	Support de référence (EN 1766)	Méthode d'essai	Exigence			
			Structurale		Non-structurale	
			Classe R4	Classe R3	Classe R2	Classe R1
■ Résistance en compression	Aucun	EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
■ Teneur en ions chlorure	Aucun	EN 1015-17	≤ 0,05%			
■ Adhérence	MC(0,40)	EN 1542	≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
■ Retrait/expansion empêchés	MC(0,40)	EN 12617-4	Contrainte d'adhérence après essai			Aucune exigence
			≥ 2,0 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
■ Résistance à la carbonatation	Aucun	EN 13295	$d_s^* \leq$ béton témoin MC(0,45)		Aucune exigence	

* d_s : profondeur de carbonatation

1.7.5 Durabilité de la réparation :

La durabilité à long terme des systèmes de réparation est souvent déterminée par leur microstructure. Une excellente durabilité est associée à d'excellentes propriétés mécaniques (résistance à la compression ou à la traction, type d'expansion, joints de construction, déformation endogène, etc.) et à une faible perméabilité (réseau de pores capillaires, porosité, tortuosité ou connectivité, etc.). Une résistance inadéquate de la structure (structures conçues, fissurations causées par le retrait ou les charges de service, problèmes de joints, etc.) et des résistances faibles du béton conduisent à une faible durabilité.

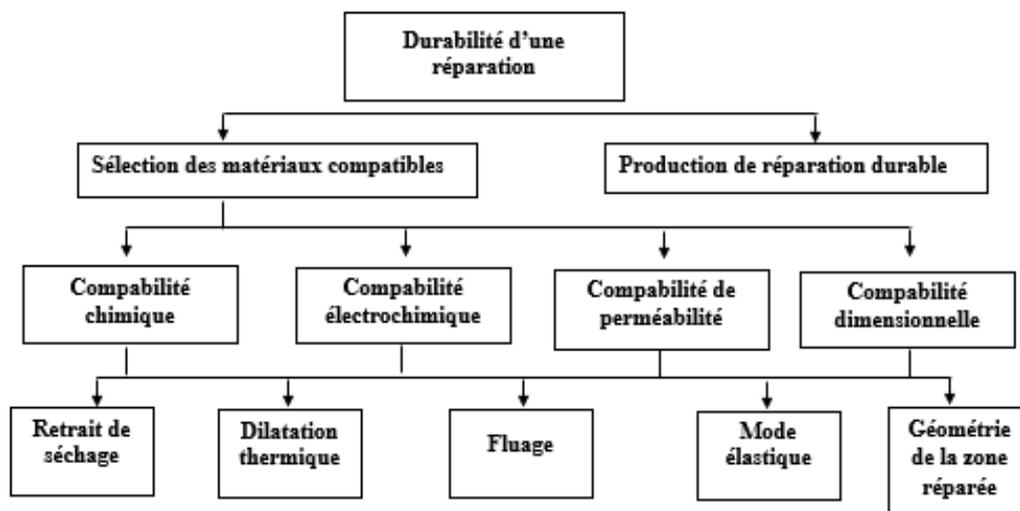


Figure 1.6. : Facteurs affectant la durabilité d'une réparation.

1.7.6 Compatibilité :

En particulier, le choix du produit de réparation doit être réalisé en tenant compte des propriétés du support dégradé et de l'environnement de l'ouvrage. Ainsi, le matériau de réparation doit être compatible avec les caractéristiques du béton. En particulier, les critères de compatibilité dimensionnelle sont essentiels pour éviter le décollement de la couche réparatrice.[13]

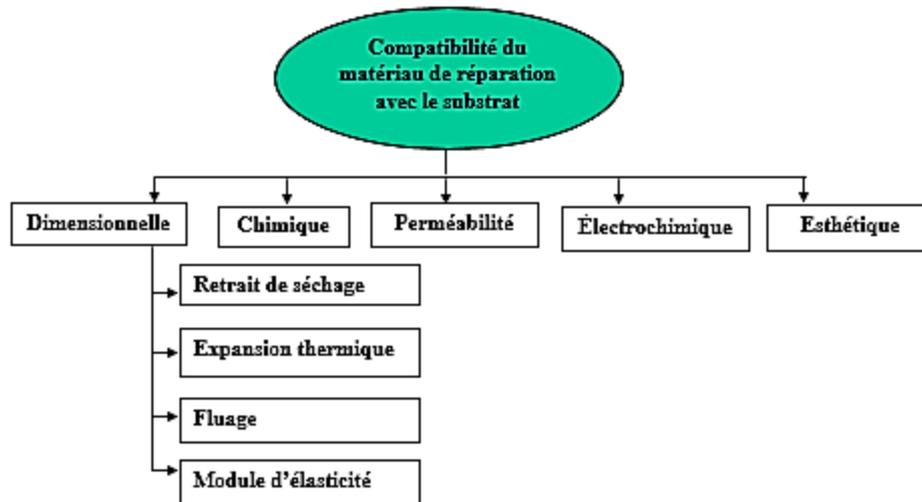


Figure 1.7 : différentes formes de compatibilité entre le matériau de réparation et le support.

1.7.7 Application aux réparations réalisées avec des mortiers :

1.7.7.1 Adhérence :

L'adhérence entre le mortier de réparation et le support à réparer joue un rôle crucial dans la qualité de la réparation. La théorie de l'adhésion repose sur deux phénomènes principaux [13] :

- L'adhérence mécanique : elle est assurée par l'ancrage mécanique du matériau de réparation, qui pénètre dans les pores et les aspérités de surface du support avant de durcir. La préparation adéquate de la surface à réparer est donc une étape essentielle pour assurer une bonne adhérence du mortier de réparation. Différentes techniques, telles que l'utilisation d'un marteau-piqueur ou l'hydro-démolition, peuvent être employées pour éliminer le béton dégradé, ce qui aura des répercussions sur la rugosité du support.
- L'adhérence spécifique : elle prend en compte les interactions chimiques, électrostatiques et une approche thermodynamique ou de mouillage. Pour choisir un matériau de réparation qui puisse adhérer au support en béton, il est nécessaire de

maximiser le travail d'adhérence ou de minimiser l'énergie interfaciale. Cela demande la connaissance des énergies libres de surface des solides et des liquides impliqués.

Il existe différents types de tests sont utilisés pour mesurer l'adhérence des mortiers de réparation sur la surface à réparer.

Différentes méthodes sont disponibles pour évaluer l'adhérence d'un produit de réparation sur la surface à réparer. La norme NF EN1504-3 [14] propose un test de traction directe sur des Pastilles en acier collées à la surface du produit de réparation, permettant de mesurer la force nécessaire pour rompre la réparation et de déterminer le mode de rupture. Cependant, cette méthode peut ne pas être suffisamment sensible pour détecter des différences significatives d'adhérence entre différents produits. Par conséquent, d'autres tests ont été développés, impliquant des sollicitations en traction, en cisaillement ou en flexion de l'interface entre le produit de réparation et le support (Anagnostopoulos 2007[15], Momayez 2005[16], Medeiros 2009[17]).

Les valeurs les plus élevées sont obtenues avec les éprouvettes soumises à des sollicitations en cisaillement par compression, tandis que les valeurs les plus faibles sont observées dans les tests de traction directe et de fendage.

1.7.8 Influence de la rugosité :

La rugosité d'un support en béton peut exercer une influence significative sur les performances de la réparation. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la rugosité de surfaces en béton, notamment :

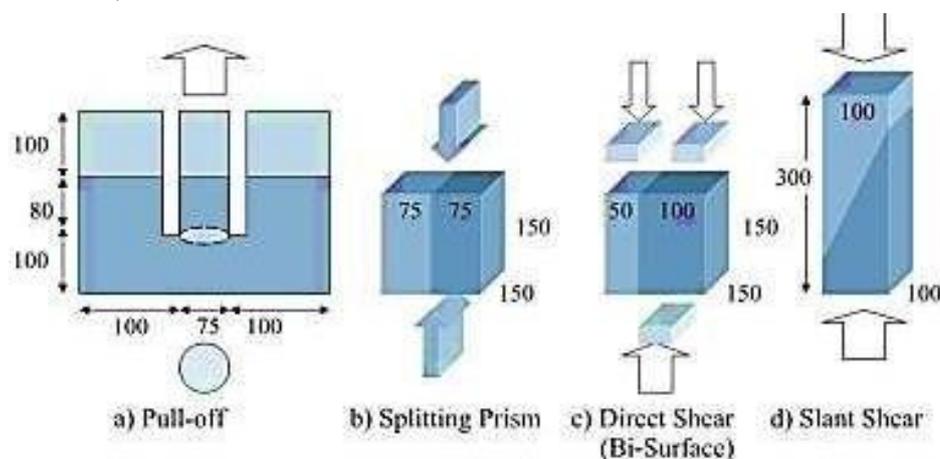


Figure 1.8. Différents types de tests pour mesurer la pour mesurer l'adhérence des mortiers de réparation.

La méthode de la "tâche de sable" est largement utilisée pour évaluer la macrotexture d'une surface de chaussée. Elle permet de mesurer la profondeur moyenne de texture (PMT), également appelée indice de rugosité, en fonction du volume de sable et du diamètre moyen de la surface couverte par le matériau. Cette méthode utilise généralement des billes de verre ou du sable de granulométrie contrôlée. Elle est recommandée par la norme NF EN 1766[70] pour les tests d'adhérence par traction directe en utilisant du sable d'une granulométrie de 50 à 100 μm . L'avantage de cette méthode est sa rapidité, sa non-destructivité et son applicabilité sur le terrain. Cependant, il convient de noter qu'elle est limitée aux surfaces horizontales et permet de mesurer des indices de rugosité compris entre 0,25 et 5 mm.



Figure 1.9: méthode de la tache de sable.

Différentes méthodes de profilométrie peuvent être utilisées pour mesurer la rugosité des surfaces en béton. Ces méthodes permettent de détecter les variations de la géométrie de la surface en utilisant un capteur qui balaye l'ensemble de la surface.

Dans le cas de la profilométrie mécanique, le choix de la pointe utilisée a une influence sur le profil mesuré. Une pointe trop large peut ne pas détecter les rugosités très fines. En revanche, la profilométrie laser est particulièrement adaptée à ce type de rugosité. Un laser est projeté sur la surface étudiée, et la distance entre le dispositif de mesure et l'échantillon est influencée par la rugosité. Cela permet d'obtenir une représentation numérique de la surface de l'échantillon.

1.8 Fibres végétales :

1.8.1 Définition :

Une fibre végétale est une structure filiforme qui se compose principalement de cellulose, d'hémicelluloses, de lignines et de pectines. Elle existe sous deux formes : isolée en tant qu'entité individuelle ou regroupée avec d'autres fibres. Une fibre individuelle représente une cellule fibreuse élémentaire et forme un faisceau de fibres lorsqu'elle est groupée avec d'autres fibres. Ces fibres sont principalement liées ensemble par des pectines et des hémicelluloses. Les fibres végétales se caractérisent par leur grande longueur par rapport à leur diamètre, généralement entre 50 et 100 [37].

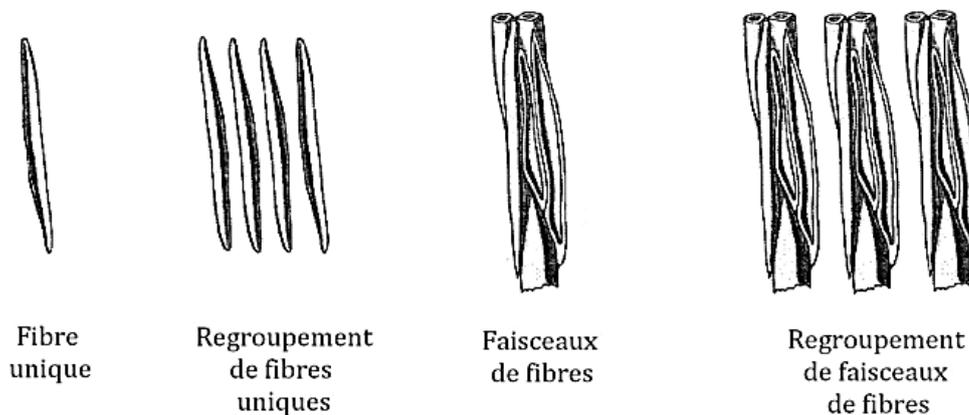


Figure 1.10: différents formes des fibres végétales.

1.8.2 Structure d'une fibre végétale :

La matrice est principalement composée d'hémicellulose et de lignine, renforcée par des microfibrilles de cellulose. Ces trois polymères constituent les composants essentiels des fibres végétales, auxquels s'ajoutent les pectines et les protéines.

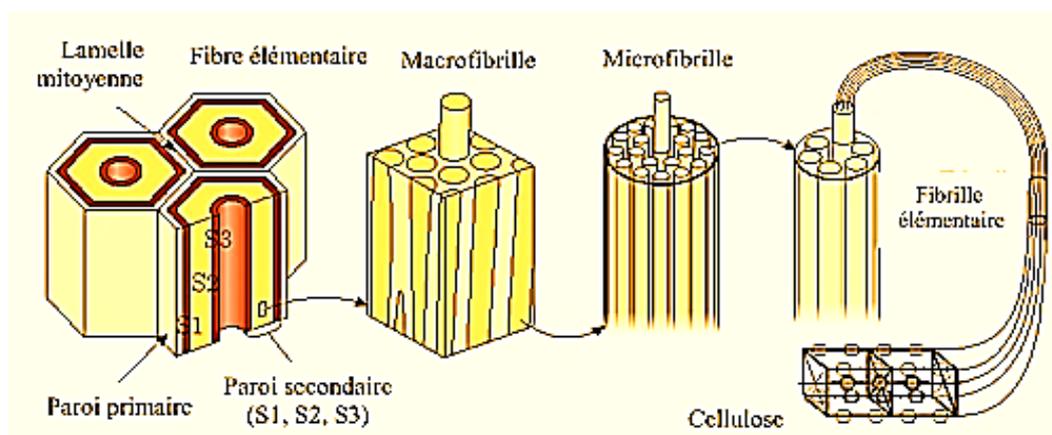


Figure1.11: structure des fibres végétales .[19]

1.8.3 Classification des fibres végétales :

Les fibres végétales sont classifiées selon leurs origines en 5 groupes sont présentés dans la figure 1.12 :

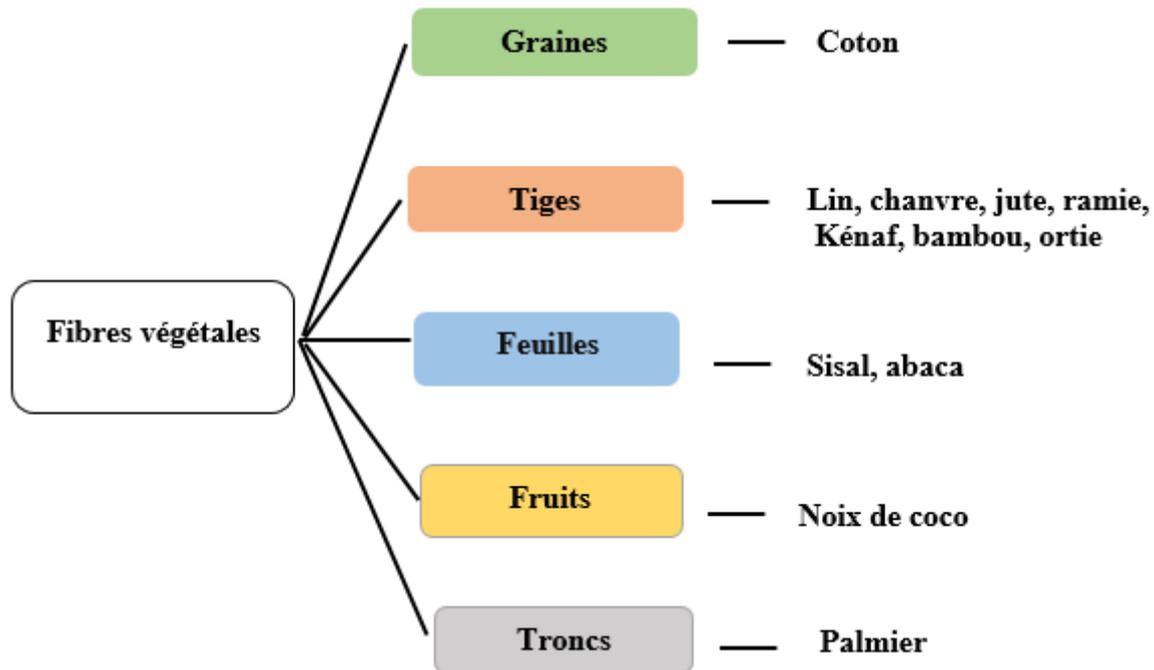


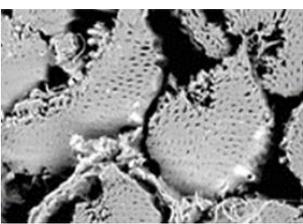
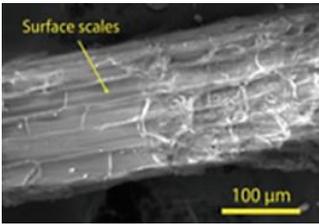
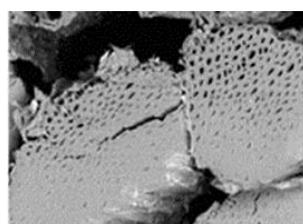
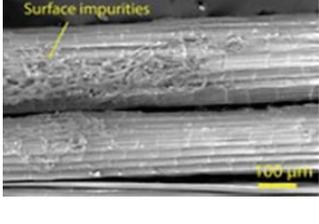
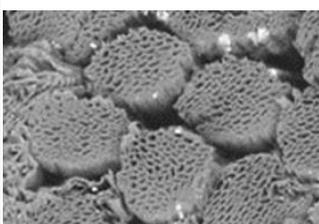
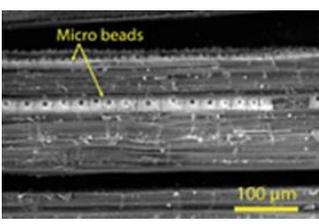
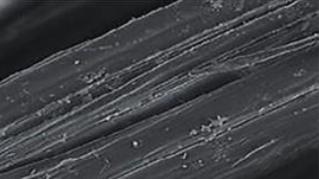
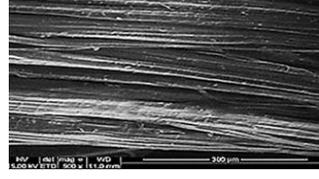
Figure 1.12 : classification des fibres végétales.

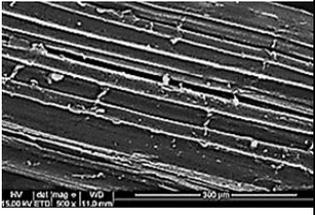
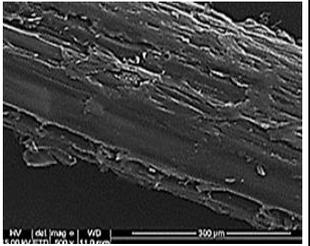
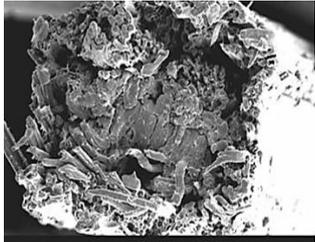
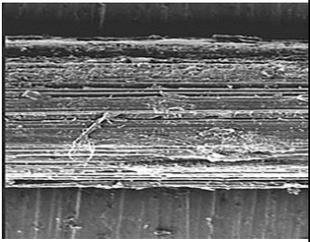
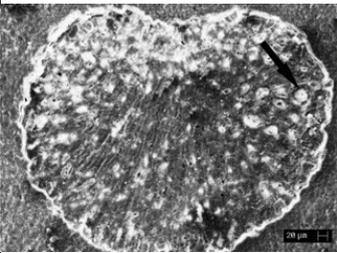
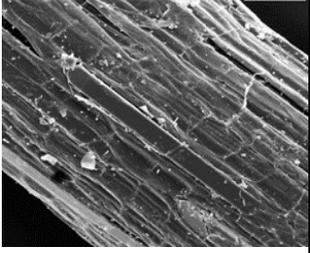
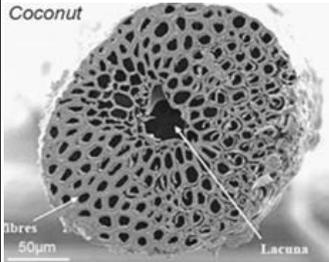
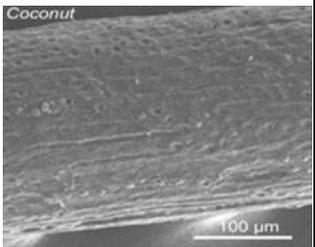
1.8.4 Quelques fibres végétales cellulosiques :

Les fibres peuvent avoir différentes formes, notamment cylindriques, plates, triangulaires, en forme de L et creuses. Chaque forme présente des caractéristiques spécifiques qui les rendent adaptées à différents usages.

Le Tableau 1.3 présente différents types de fibres avec des photographies, ainsi que des coupes longitudinales et transversales pour permettre une meilleure compréhension des différences entre chaque type de fibre.

Tableau 1.3. formes de fibres et coupes transversales/longitudinales [20]–[23]

Fibres	Photos	Vue transversale	Vue longitudinale
Sisal			
abaca			
banana			
Kénaf			
Jute			

<p>Ramie</p>			
<p>Chanvre</p>			
<p>Bambou</p>			
<p>Iecheguila</p>			
<p>COCO</p>			

1.8.5 Propriétés physiques, mécaniques et chimiques des fibres végétales :[24], [25]

Les fibres végétales, en tant que composites naturels à structure cellulaire composés de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, possèdent des propriétés mécaniques remarquables. Leur composition chimique et leur structure unique, notamment le pourcentage de cellulose, l'angle microfibrillaire de la section et le degré de polymérisation, contribuent à la variabilité de leurs caractéristiques. Malgré leur faible module d'élasticité, ces fibres présentent une résistance élevée à la traction, ce qui les rend appropriées pour le renforcement des matériaux. Ces propriétés sont présentées respectivement dans les tableaux 1.4, 1.5, 1.6.

Tableau 1.4 : propriétés chimiques des fibres végétales

constituants	Cellulose(%)	Hémicellulose(%)	Lignine(%)	Cire(%)
Lin (flax)	62.0-72.0	18.6- 20.6	2.0- 5.0	1.5 -1.7
Chanvre (hemp)	68.0- 74.4	15.0- 22.4	3.7- 10	0.8
Jute	59.0- 71.5	13.6 -20.4	11.8- 13.0	0.5
kenaf	31- 72	20.3 -21.5	8 -19	-
Banane	53.5- 67.6	10 -28.6	5 -15.4	-
Abaca	56- 63	20- 25	7- 13	3
coco	36- 43	0.15- 0.25	41- 45	-
sisal	60.0 -78.0	10.0- 14.2	8.0- 14.0	2.0
Cotton	82.7- 90.0	5.7	<2.0	0.6
hardwood	31- 64	25 -40	14- 34	-

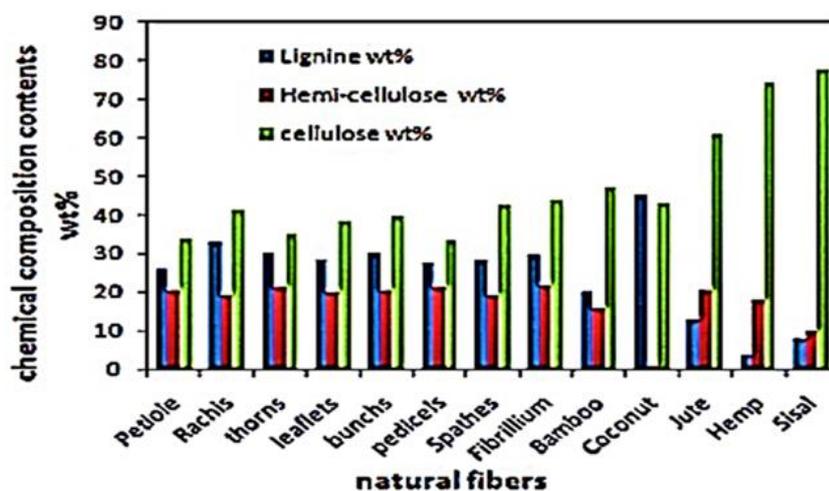


Figure 1.13: comparaison de la composition chimique des fibres végétales.

Tableau 1.5 : propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales

Fibres propriétés	Lin	chanvre	coton	ramie	jute
Densité (Kg/m)	1,4	1,48	1,51	1,5	1,46
Résistance à la traction(MPa)	800-1500	500-900	400	550	400-800
Module d'élasticité(GPa)	60-80	70	12	44	10-30
E/ densité	26-40	47	8	29	7-21
Allongement a la rupture(%)	1,2 – 1,6	1,6	3-10	2	1,8

Tableau 1.6. Coefficients d'absorption des fibres végétales

Nature des fibres	Absorption(%)	Références
Lin	136±25	Chafei(2014)[26]
Chanvre	158±30	Magniont(2011)[27]
jute	281	Ramakrishna et sundararajan(2005)[28]
sisal	230±16	Toledo Fihlo et al(2003)[29]
coco	146	Savastano et al(2002)[30]

1.8.6 Avantages et inconvénients :

Les fibres végétales jouent un rôle significatif en tant que matériau de renforcement, offrant un ensemble unique d'avantages et de défis. D'un côté, ces fibres naturelles possèdent des caractéristiques mécaniques exceptionnelles telles qu'une résistance à la traction élevée, associée à une faible densité, ce qui les rend idéales pour renforcer divers matériaux.

Cependant, les fibres végétales peuvent présenter une certaine variabilité en termes de composition chimique et de structure, ce qui peut influencer leurs propriétés et leur comportement dans différentes applications.

Il est donc essentiel de comprendre les avantages et les limites des fibres végétales afin de les exploiter de manière optimale dans divers domaines tels que la construction.

Tableau 1.7 : avantages et inconvénients des fibres végétales

Avantages	Inconvénients
Biodégradabilité	Biodégradabilité
Ressources renouvelables	Variabilité de la qualité en fonction de paramètres externes
Neutre pour l'émission de CO ₂	Absorption d'eau
Pas de résidus après incinération	Faible tenue thermique
Faible cout	Fibres anisotropes
Faible consommation d'énergie pour la production	Faible stabilité dimensionnelle
Bonne isolation thermique et acoustique	Faible résistance microbienne /fongique
Propriétés mécaniques spécifiques importantes	Gestion de stock

Le coût est l'un des avantages les plus importants des fibres végétales, ce qui les rend plus économiques. La Figure 1.24 présente une comparaison des coûts entre différents types de fibres végétales et les fibres de verre.

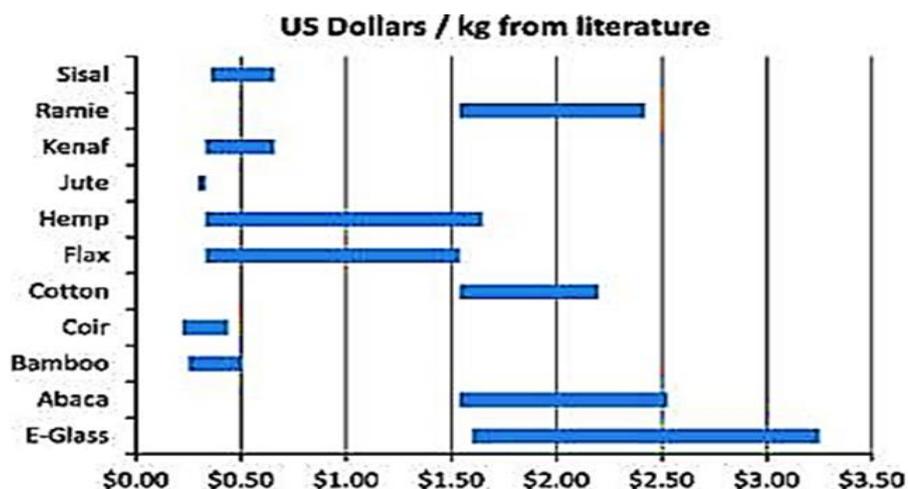


Figure 1.14 : Analyse comparative des coûts des fibres végétales par rapport aux fibres de verre.

1.9 Palmier dattier :

Le palmier dattier est une culture fruitière importante dans les régions arides, notamment en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et dans la péninsule arabique. Au fil des siècles, la culture des dattes s'est étendue à de nouvelles régions telles que l'Australie, l'Inde, le Pakistan, le Mexique, l'Afrique du Sud, l'Amérique du Sud et les États-Unis. Les dattes sont cultivées depuis au moins 5000 ans en Afrique du Nord et au Moyen-Orient. Le palmier dattier, appartenant à la famille des *Arecacea* (*Palmaceae*), est une plante pérenne qui produit des fruits en forme de doigts. Il existe plusieurs espèces de palmiers dattiers, dont cinq sont comestibles en dehors du palmier dattier commun.

Les palmeraies de dattiers couvrent des superficies importantes dans le monde entier, avec chaque arbre pouvant vivre pendant plus de 100 ans. Le palmier dattier est adapté aux régions arides et constitue une source de subsistance essentielle pour les populations vivant dans les zones désertiques. Bien qu'il soit principalement cultivé en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, sa culture s'est étendue à d'autres régions du monde. Les dattes sont un produit commercialisé à l'échelle mondiale, générant des revenus importants. Malgré son importance économique, l'histoire et l'origine de son exploitation ont été peu étudiées jusqu'à présent. La production mondiale de dattes a connu une croissance significative au fil des années, dépassant les 7 millions de tonnes annuellement..[24], [31]

1.9.1 .Disponibilité du palmier dattier en Algérie :



Figure1.15 : répartition du palmier dattier en Algérie. [19]

La palmeraie de datte est essentielle pour l'écosystème du désert en Algérie, couvrant une grande partie du pays. Les palmiers dattiers sont cultivés dans différentes régions, notamment dans les oasis des montagnes de l'Atlas à l'entrée du Sahara, dans l'est avec des variétés de grande valeur commerciale, et dans l'ouest où se trouvent des cultivars de moindre qualité. Des régions centrales comme El Golea, le M'Zab et Laghouat sont également impliquées dans la culture des palmiers dattiers.[32]

1.9.2 Morphologie de fibre palmier dattier :

Les fibres de palmier dattier présentent une structure caractéristique. Elles ont une forme cylindrique allongée, avec un diamètre variant généralement de quelques micromètres à plusieurs dizaines de micromètres. Ces fibres sont constituées de cellules végétales alignées de manière parallèle le long de leur axe principal.

Lorsqu'on examine la section transversale des fibres de palmier dattier, on constate qu'elles sont généralement creuses. Cette cavité centrale confère aux fibres une légèreté et une capacité d'absorption d'eau. Elle favorise également une meilleure circulation de l'air à travers les fibres et facilite l'évacuation de l'humidité.

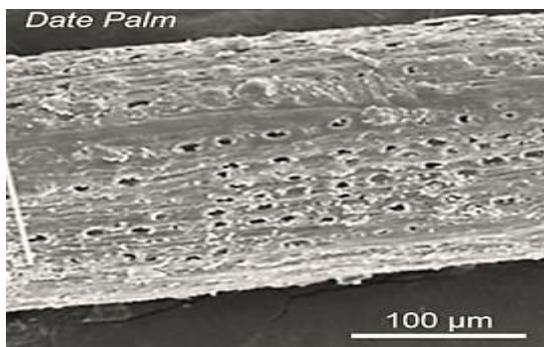


Figure 1.16 : coupe longitudinale de fibre palmier dattier.

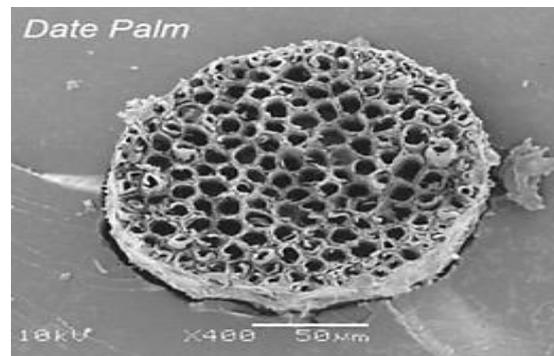


Figure 1.17 : coupe verticale de fibre palmier dattier.



Figure 1.18 : fibre palmier dattier en contact avec le ciment.

1.9.3 Fibre de palmier dattier :

Le palmier dattier a une structure fibreuse, possédant cinq types de fibres :

Fibres de bois de tronc.

Fibres de feuilles au niveau des pédoncules.

Fibres de tige au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier (grappe).

Fibres de surface autour de son tronc ou de bases de palmes (pétiole).

Fibres de liffe (entre les Kornafs , le tronc est recouvert d'une bourre fibreuse que l'on appelle le liffe) .

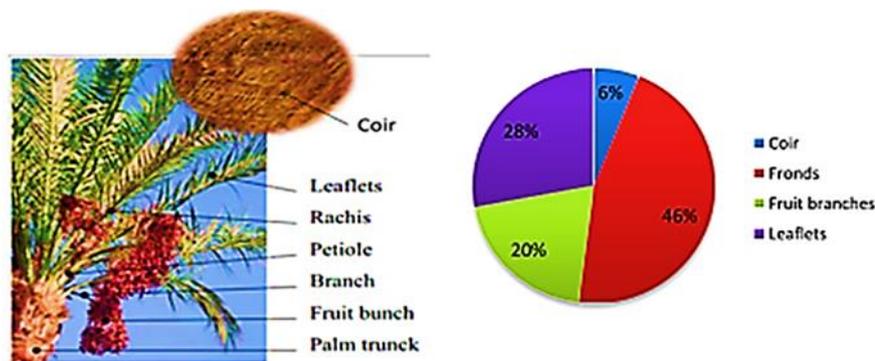


Figure1.19 : catégorie des fibres de palmier dattier.

1.9.4 Propriétés physiques chimiques et mécaniques des palmiers dattier :

Les fibres extraites des palmiers dattiers ne sont pas seulement des composants naturels, mais elles détiennent également des propriétés distinctes qui les rendent précieuses dans divers domaines. Du point de vue physique, ces fibres se distinguent par leur longueur, leur finesse et leur flexibilité, qualités idéales pour des applications textiles variées sur le plan chimique, l'analyse compositionnelle révéla une teneur significative en cellulose conférant aux fibres une résistance accrue et les rendant adaptées à des processus tels que la teinture. Sur le front mécanique, la robustesse des fibres de palmiers dattiers les rend propices à diverses applications, notamment dans la fabrication de cordages, de tissus et même dans des matériaux de construction respectueux de l'environnement .

Tableau 1.8 : propriétés chimiques des fibres palmiers dattiers

Région	DPF Type	Cellulose (%)	Hémicellulose(%)	Lignine (%)	Cendre (%)	Cire (%)	Humidité (%)
Algérie	liffe	43± 2	8± 2	35± 5	1.2±0.3	-	9± 10
Maroc	liffe	50.6± 1.3	8.1± 0.3	31.9±1.3	6.8 0.2	0.4 0.1	9.1± 0.9
Maroc	Feuilles	29.7 ±1.3	23.3± 1.2	11.6±1.3	9.2 0.4	6.8±0.7	5.9± 0.7
Maroc	grappe	34± 0.7	28.9 ±1.8	18.2±0.7	12.3 0.2	0.5±0.1	8.8± 1.1
Maroc	Rachis	39.8± 0.9	31.4 ±3.2	14 ±0.9	9.2 0.1	1 0.2	7.5± 1.4
Iran	Feuilles	40.21	12.8	32.2	10.54	-	-
Iran	Rachis	38.26	28.17	22.53	5.96	-	-
Arabie saoudite	Feuilles	47.14	36.73	16.13	-	-	-
Arabie saoudite	Rachis	45.16	28.68	28.16	-	-	-
Arabie saoudite	Pétiole	46.41 40.74 1.9	25.89 33.84 2.7	- 25.45	7.91 7.64		- -

Tableau1.9 :propriétés physiques et mécaniques des fibres palmier dattier [33]

Source Région	DPF Type	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	densité (kg/m)	Résistance à la flexion (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Elongation (%)
Tunisie	liffe	100	0.2-0.8	-	72.34±18 72.34±15	3.15±1.5 2.3± 2	8.7 2.2 9.5 2.5
Algérie	liffe	100	0.1-0.8	1300-1450	170±40 175±30	4.74± 2 3.78± 2	416± 3 17.4± 2
Algérie	liffe	20	0.1-0.8	1300-1450	290± 20 300± 20	5.25± 3 3.55± 2	11± 2 12± 2
Qatar	feuilles	-	-	900	100	62	1.4
Lebanie	feuilles		0.2-0.3	600-800	90± 110	4.5± 6.5	1.5± 2
Maroc	life		0.389	979	129± 0.6	1.26±0.34	-
Maroc	feuilles		0.374	1011	8.4± 2.7	0.93±0.4	-
Maroc	grappes		0.354	881	6.1± 1.5	0.43±0.13	-

1.10 Durabilité des fibres :

La durabilité des fibres cellulosiques est une mesure de leur résistance à la dégradation, qu'elle soit causée par des facteurs externes tels que les intempéries et les attaques alcalines, ou par des facteurs internes tels que la compatibilité de l'interface fibre-matrice et les variations volumétriques de la fibre. Lorsqu'elles sont immergées dans des précurseurs de ciment/aluminosilicate, les fibres cellulosiques peuvent se fragiliser à différents degrés de dégradation en raison de ces facteurs.

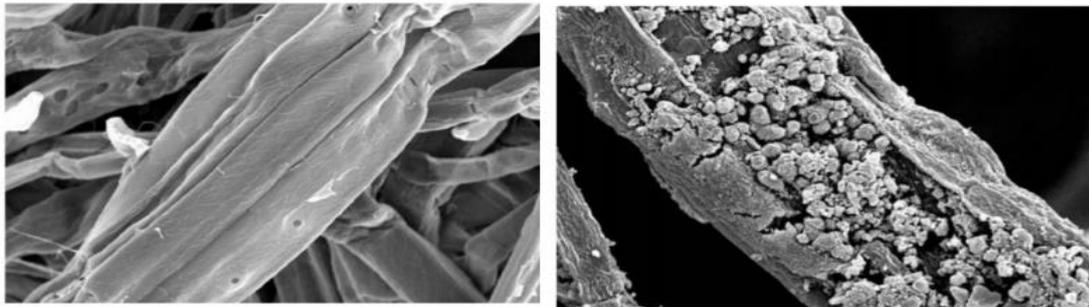


Figure 1.20 : fibre de pulpe de conifère en contact avec le ciment. [31]

1.10.1 Interface fibre-matrice : notion d'adhésion :

Les interfaces entre les fibres et la matrice sont le siège de phénomènes physico-chimiques complexes dus aux interactions moléculaires entre les matériaux. Pour que les matériaux composites présentent les propriétés mécaniques requises, ces interfaces doivent être capables de supporter les contraintes et de les transmettre de la matrice aux fibres. La taille des fibres influence la microstructure de l'interface.

Selon le diamètre des fibres, on distingue les microfibrilles ($\leq 70\mu\text{m}$) et les macrofibrilles.

Les microfibrilles ont des diamètres similaires à ceux des particules de ciment, ce qui crée une interface dense et peu différente de la matrice.

Les macrofibrilles, quant à elles, ont des diamètres plus grands et leur interface présente une microstructure similaire à celle de la zone de transition granulaire dans le béton, avec la formation d'un film duplex, d'une couche discontinue de cristaux issus de l'hydratation du ciment et d'une zone poreuse. L'adhésion interfaciale est le résultat de trois phénomènes simultanés à différents degrés :

L'interpénétration mécanique entre la pâte de ciment et la surface de la fibre, l'adhésion physique moléculaire et l'adhésion chimique.

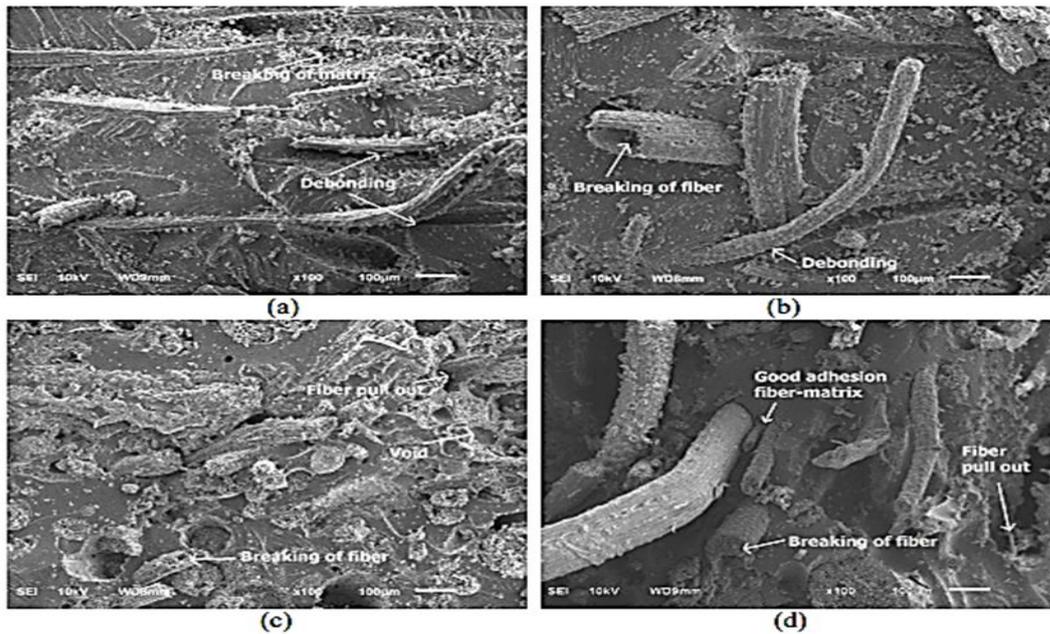


Figure 1.21 : image MEB de la rupture en traction d'un composite avec une fraction volumique de fibres.

1.10.1.1 La dégradation alcaline :

Les mécanismes de dégradation alcaline des fibres cellulosiques dans les matrices cimentaires peut être résumé en quatre étapes fondamentales :

1-la décomposition de la lignine et d'une partie de l'hémicellulose, créant ainsi une exposition accrue à la phase solide fraîche et durcie de la matrice de ciment

2-la décomposition des liaisons hydrogène intramoléculaires et de l'hémicellulose résiduelle, contribuant à une réduction de l'intégrité et de la stabilité des parois cellulaires des fibres végétales

3- la dispersion et la dégradation des fibres de cellulose par la matrice cimentaire alcaline

4- la dégradation des microfibrilles de cellulose, qui aboutit à la dégradation complète de la fibre végétale naturelle.[34]

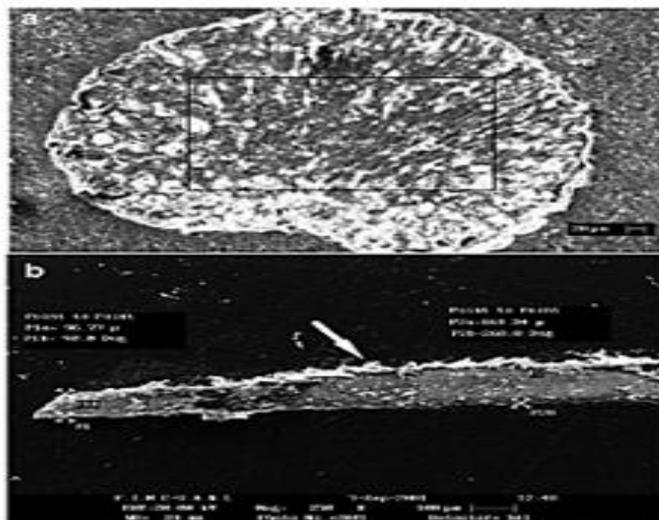


Figure 1.22 : observation microscopique d'une fibre de lechigula non traité après 12 mois de conservation dans un milieu alcalin.

1.10.1.2 La Dégradation par minéralisation. :

L'imprégnation des parois cellulaires des fibres et des pores ouverts par des espèces ioniques telles que Ca, Mg, Al et Si pendant le processus d'hydratation est définie par la minéralisation des fibres . Ainsi, les fibres perdent leur flexibilité et deviennent rigides, ce qui entraîne une diminution de leur capacité de renforcement. [34], [35]

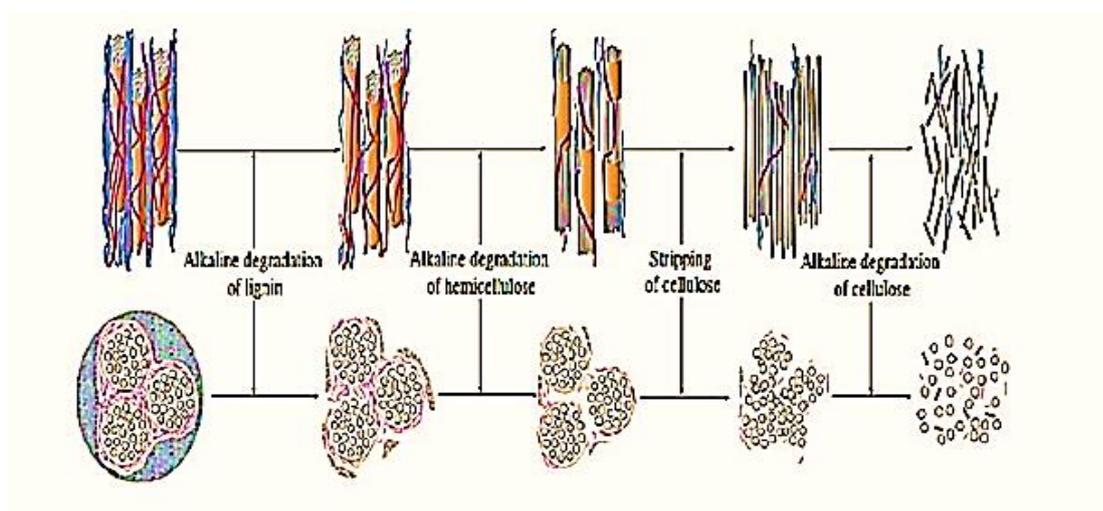


Figure 1.23 : dissolution de lignine et d' hémicellulose dans la pâte de ciment. [36]

Les effets de dégradations par minéralisation et ses causes sont présentés dans le tableau 1.10 :

Tableau 1.10 : effet de dégradations par minéralisation et leurs causes

Phénomène	Causes	Auteur
Diminution de résistance et la capacité de déformation des fibres	La migration des produits d'hydratation du ciment, tels que le $\text{Ca}(\text{OH})_2$.	Gram [37]et Toledo Filho et al [38]
Réduction de flexibilité et la capacité de déformation des fibres	La minéralisation des parois cellulaires des fibres du a l'alcalinité de la matrice (quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$) et de la concentration de Ca^{2+} dans la solution des pores	Wei and Meyer [39]

1.11 Traitement des fibres :

Pour assurer une compatibilité optimale entre les fibres végétales et la matrice cimentaire, différentes techniques sont utilisées pour établir des liaisons chimiques à l'interface. Ces techniques peuvent être regroupées en deux catégories : les méthodes de modification physique et les méthodes chimiques. L'objectif de ces modifications est d'améliorer l'adhésion en créant des liaisons qui n'existaient pas auparavant.

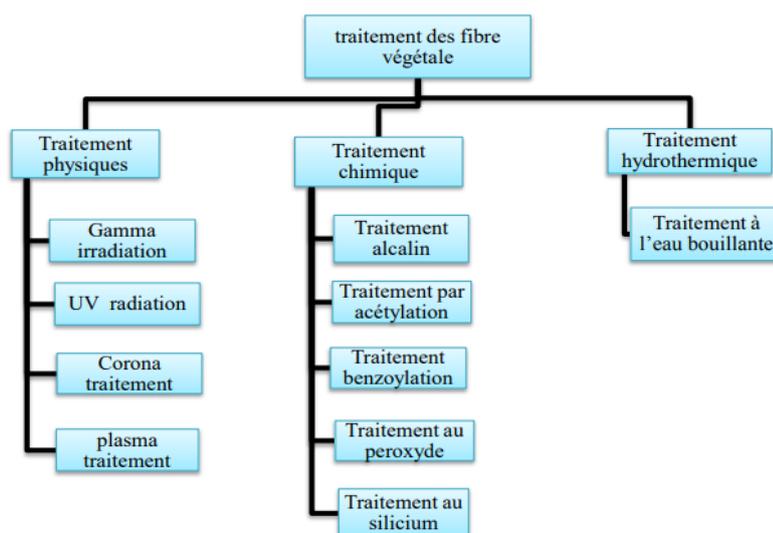


Figure1.24 : traitement des fibres végétales.

1.11.1 Traitement physiques :

Les agents dispersifs, tels que les cires, les paraffines, les élastomères et les plastifiants, sont largement utilisés dans les composites à base de bois pour améliorer la fabrication du matériau. Ces substances modifient la surface des fibres, facilitant ainsi le processus de fabrication en ajustant les paramètres tels que la température et l'homogénéisation du mélange. Les composites à matrice polymérique (CMP), composés de résine et de fibres, sont couramment utilisés, allant des thermoplastiques aux thermodurcissables.

Les traitements par décharges électriques, tels que le traitement Corona et les plasmas à basse température, sont utilisés pour modifier les fibres cellulosiques dans les composites. Ces traitements activent la surface des fibres en les oxydant, ce qui conduit à une augmentation des groupes aldéhyde présents à la surface. Les plasmas à basse température offrent des résultats similaires. Ces traitements altèrent la surface des fibres sans affecter les propriétés intrinsèques du matériau et ne nécessitent pas l'utilisation de solvants. Les temps de traitement sont courts. Le choix du gaz utilisé lors du traitement influence les modifications obtenues. L'oxygène favorise la formation de groupes acides, tandis que l'azote ou l'ammoniaque favorisent la formation de groupes basiques.

1.11.2 Traitement chimique :

Taha et al. [40] Les fibres de palmier dattier ont été traitées dans une solution de soude (2% à 5%) à 23°C pendant différentes durées (2, 4, 6 et 24 heures) en vue de les incorporer dans des composites à base de polymères. Ce traitement a permis de laver les impuretés de surface des fibres ainsi qu'une partie des hémicelluloses, ce qui a influencé les propriétés d'absorption, notamment l'absorption d'humidité.



Dans une autre étude, Balnois et al.[41] ont réalisé des traitements successifs sur les fibres de lin afin d'optimiser l'interface entre les fibres de lin et une résine polyester insaturée dans des composites. Ces traitements comprenaient l'utilisation de soude (10g/l), d'anhydride acétique et d'acide formique. La modification a entraîné une augmentation des propriétés d'adhésion entre la fibre et la matrice polymère, tout en rendant la surface des fibres de lin plus lisse et moins rugueuse.

Dans une troisième étude, Joshy et al.[43] ont traité les fibres d'Isora avec une solution alcaline à 1% à 30°C pendant 4 heures, en vue de les utiliser comme renfort dans une matrice polyester. Les composites fabriqués avec les fibres traitées ont présenté de meilleures propriétés mécaniques par rapport à ceux fabriqués avec les fibres non traitées. Le traitement alcalin des fibres d'Isora a conduit à des composites avec des modules E' et E'' élevés. De plus, le taux de fibres traitées dans le composite pouvait atteindre 66% en volume, contre seulement 45% pour les fibres non traitées.

Soukaina et al [43]. Ont effectué divers traitements sur les fibres d'alfa, et les résultats de ces traitements sont présentés dans le Tableau 1.12.

Tableau 1.11 : Comparaison entre les résultats des différents types de traitement : [43]

Types de traitement	conditions	résultats	Photos
Par Ultrason	Traitement en utilisant de l'eau distillé pendant 10 min, avec une puissance de 200w	Légère diminution de la contrainte de cisaillement (3%)	
Enzymatique	Immersion dans une solution de pectinase à 2% (en volume) pendant une durée de 12 heures, à une température de 60±1°C	Augmentation de la contrainte de cisaillement (18%)	
Hydrothermal	Immersion pendant 1 heure dans une température de 100 ±1° C	Augmentation de la contrainte de cisaillement (29%)	
Alcalin	Immersion dans une solution de NaOH à 6% pendant une durée de 6 heures, à une température de 20°C.	Augmentation significative de la contrainte de cisaillement(39%)	
Par enrobage	Mélange préparé en utilisant un rapport de fibres/ciment de 2/3, un rapport (E/C) de 1, et un temps de malaxage de 4 minutes, à une température ambiante de 20°C.	Augmentation de la contrainte de cisaillement (7%)	

1.12 Compatibilité matrice cimentaire fibre :

Marquez et al.[44] a déterminé le degré de compatibilité en utilisant des composites contenant 2,5% de fibres végétales sèches dans une matrice de ciment. L'expérience a été réalisée en utilisant 200,0 g de ciment, 80 g d'eau déminéralisée (rapport eau/liant = 0,4) et 5 g de fibres sèches. La courbe d'hydratation (température x temps) a été obtenue à l'aide d'un système de thermocouples, avec des mesures prises toutes la 1 seconde pendant 48 heures. Les échantillons ont été placés dans une chambre d'isolation thermique en polystyrène pour minimiser les pertes de chaleur.

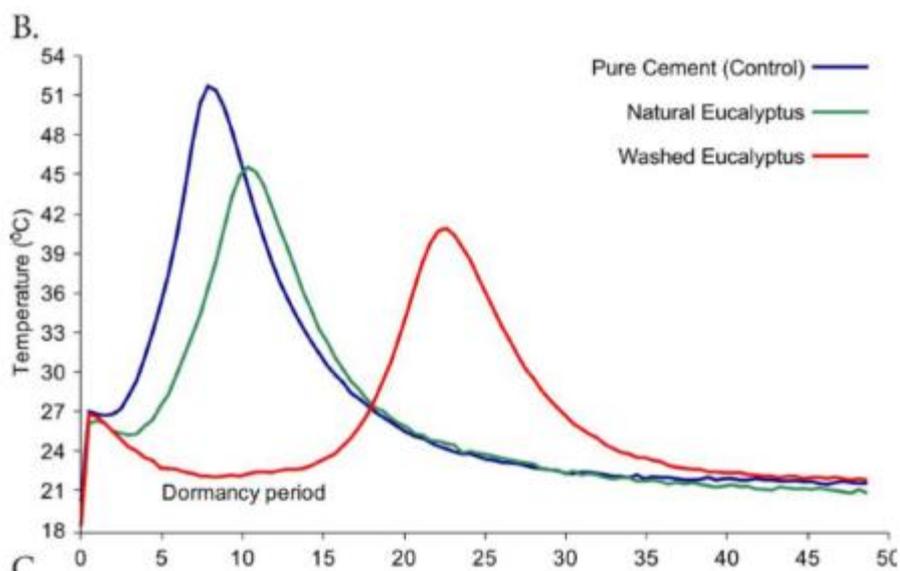


Figure 1.25 : courbes d'hydratation des fibres naturelles d'eucalyptus.

Grâce à un traitement à l'eau chaude, les fibres d'eucalyptus ont démontré une compatibilité accrue. Le prétraitement à l'eau chaude des fibres d'eucalyptus permet d'améliorer leur compatibilité avec le ciment en éliminant les substances extractibles solubles dans l'eau. Ces substances peuvent interférer avec le processus d'hydratation du ciment.

1.13 Effet des fibres végétales sur :

1.13.1 La conductivité thermique :

D. Taoukil et al[45] ont observé que l'ajout de fibres réduit progressivement et simultanément la conductivité thermique et la diffusivité des composites. Pour 30% de fibres, la conductivité thermique du béton est réduite de 1,4 W.m⁻¹.K⁻¹ à 0,11 W.m⁻¹.K⁻¹. Le dégraissage des fibres n'a pas d'impact sur les propriétés thermiques. Ainsi, dès l'ajout de 5% de fibres, les composites

présentent une meilleure isolation thermique. L'ajout de copeaux de bois et de laine de bois sur les propriétés thermiques des bétons ont également conclu que l'incorporation de fibres naturelles améliore les caractéristiques d'isolation des bétons.

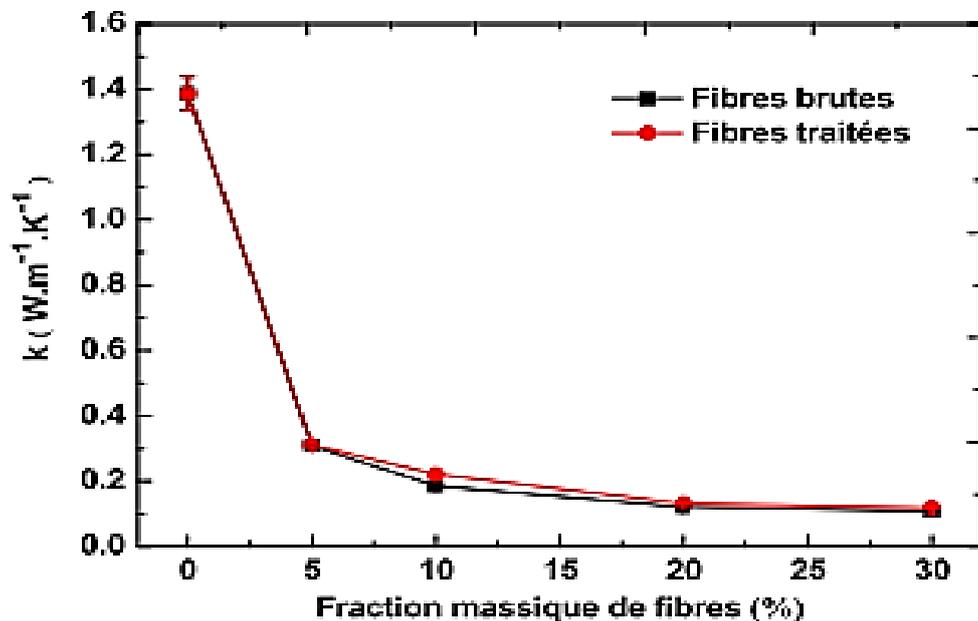


Figure 1.26 : conductivité thermique en fonction de fraction massique des fibres.

1.13.2 Résistance à la flexion :

Aziz et al, L'incorporation de fibres végétales modifie peu la charge d'apparition de la première fissure, qui est principalement liée aux caractéristiques de la matrice, notamment sa déformation ultime. Cependant, une fois la première fissure apparue, les fibres permettent de limiter les propagations.

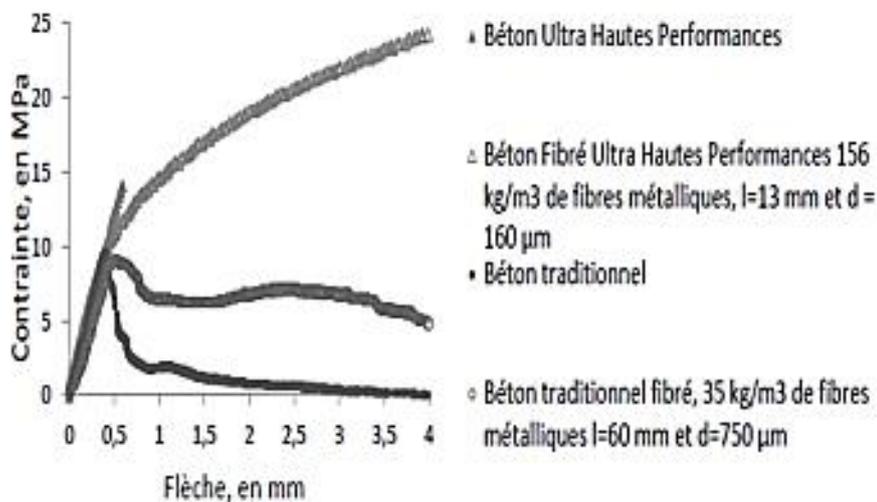


Figure 1.27 : courbes contrainte déformation obtenues lors d'un essai flexion 4 points.

Chafai et al.[46] Les différents mortiers fibrés avec des fibres de lin ont montré une meilleure résistance à la flexion comparativement aux mortiers témoins, quel que soit le type de traitement appliqué. Cependant, il a été observé que les fibres nettoyées avec de l'eau bouillante montrent une meilleure résistance à la traction. Ceci est attribué à une meilleure adhérence entre les fibres de lin et la matrice cimentaire

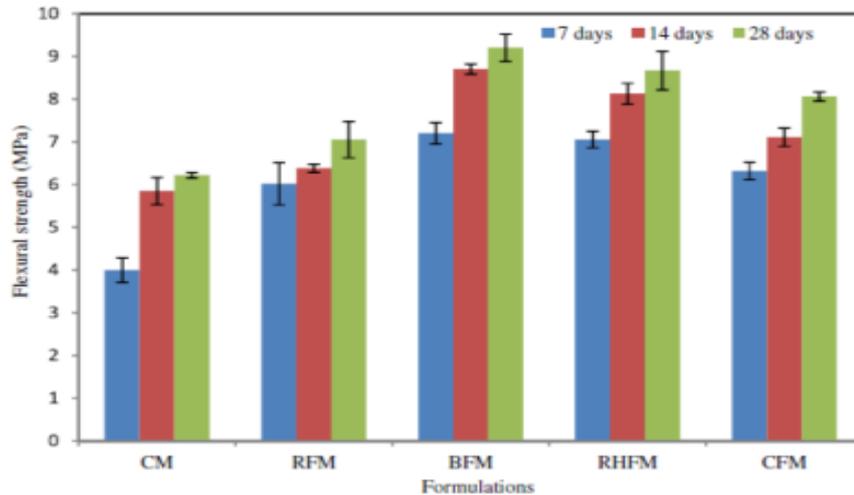
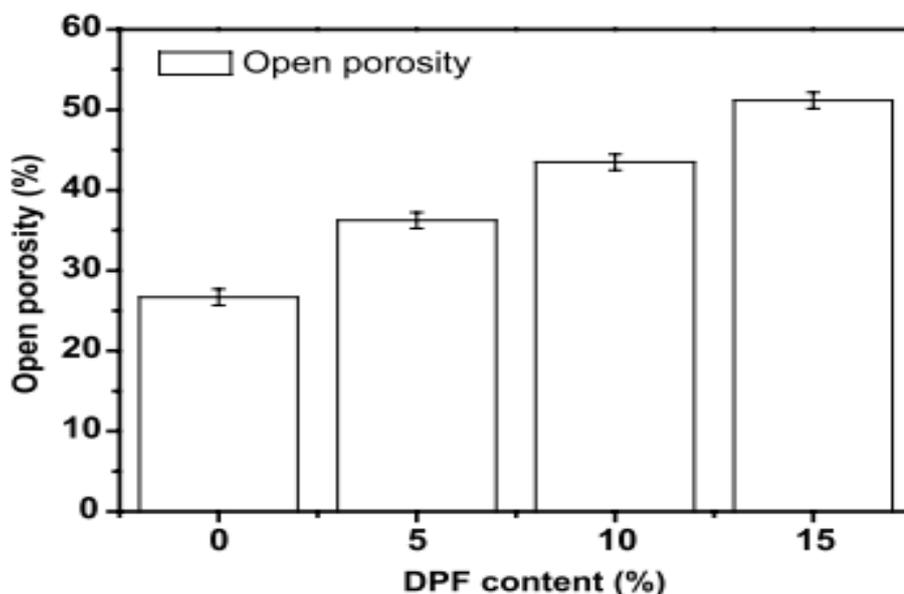


Figure 1 .28 : résistance à la flexion des mortiers fibres avec des fibres de lins traitées.

1.13.3 La porosité :

Kareche et al. [47] ont constaté que la porosité ouverte des composites testés augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres, tandis que le mortier pur présente la valeur la plus basse (environ 27%). En revanche, le DPC-15 présente la valeur de porosité ouverte la plus élevée (environ 51%). Une porosité ouverte élevée entraîne généralement une perméabilité élevée à la vapeur d'humidité

Dans leur étude, Haba et al.[48] ont découvert que le DPC contenant 15 % en poids de fibres courtes de palmier-dattier présentait une teneur élevée en pores ouverts (58 %),



1.29 : Porosité des différents composites en fonction du volume des fibres de palmier.

Représentant ainsi 91 % de la porosité totale. Cette augmentation de la teneur en vides peut être attribuée à la porosité des fibres elles-mêmes ainsi qu'aux espaces interparticulaires créés entre les fibres.

1.13.4 la résistance a la compression :

A. Kriker et al. [49] Ont étudié la résistance à la compression de différents échantillons de béton en variant le pourcentage et la longueur des fibres de palmier. Les échantillons ont été soumis à trois conditions de conservation différentes : immersion dans l'eau, exposition à l'air libre à différentes températures et conservation en chambre à vapeur. Les résultats indiquent qu'un béton contenant 2% de fibres de palmier dattier présente une résistance à la compression d'environ 90% par rapport au béton de référence lorsqu'il est conservé dans l'eau. Cependant, dans le cas d'une cure à l'air libre avec le même pourcentage et la même longueur de fibres, la résistance à la compression est d'environ 70% par rapport au béton non renforcé. Cette différence s'explique par la porosité accrue du béton due à l'évaporation de l'eau absorbée par les fibres.

Ali et al. [51] ont rapporté que l'ajout de 5% des fibres de noix de Coco au ciment de 5 cm de long permet d'augmenter la résistance à la compression de 21%.

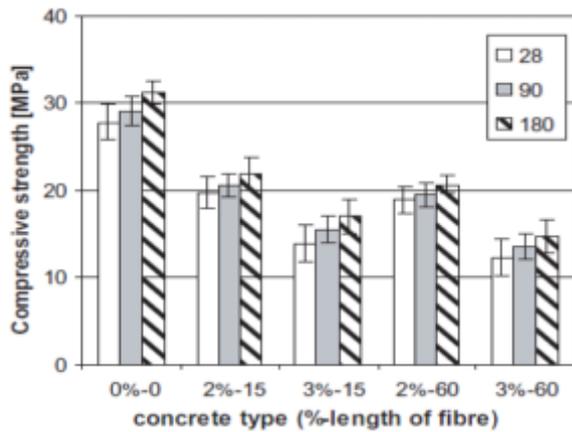


Figure 1.30 : résistance à la compression du béton renforcé avec des fibres de palmier dattier soumis à une cure humide.

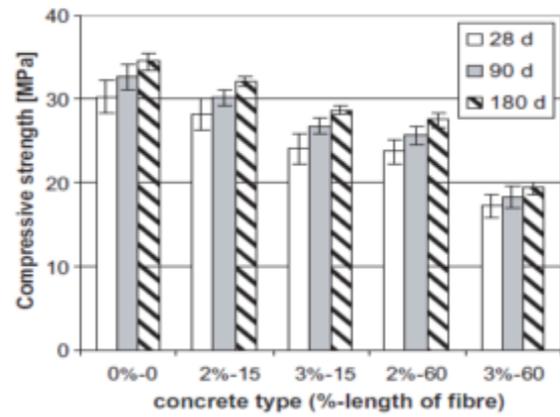


Figure 1.31 : résistance à la compression du béton renforcé avec de palmier dattier conservé à l'air libre.

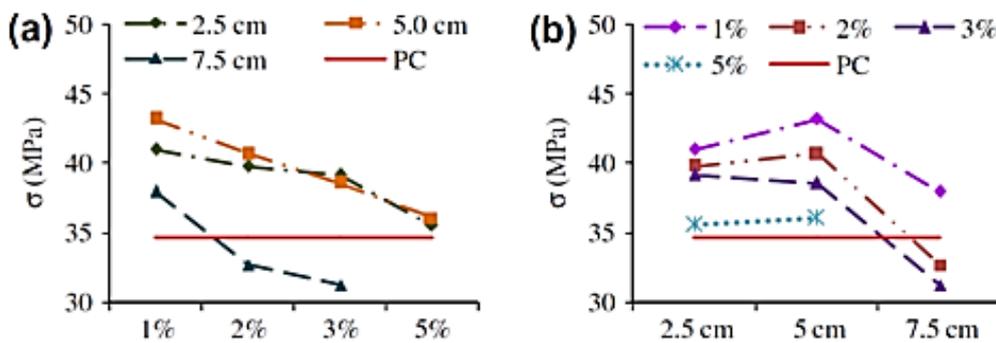


Figure 1.32 : influence de la teneur en fibres et du longueur sur la résistance à la compression.

Ramli et Dawood [50] ont étudié l'effet d'ajout de fibres naturelles de palme sur les performances mécaniques d'un béton, ils ont trouvé que la résistance à la compression ainsi que celle de la flexion augmentent respectivement d'environ 13,40% et 16,10% suite à l'ajout de 0,80% des fibres. En général, il a été constaté que les fibres aléatoires discrètes et courtes augmentent la résistance à la compression du béton à 7 et 28 jours.

1.13.5 Retrait :

Boghossian et al. [52] ont explorés l'effet de l'incorporation de fibres courtes de lin (longueur variant entre 10 et 38 mm) à des échantillons de mortier de ciment Portland. Les résultats ont révélé qu'une fraction volumique de 0,3% de fibres de lin réduisait considérablement le taux de fissuration par rapport aux échantillons sans fibres de renforcement. De plus, la longueur des fibres de lin n'a pas eu d'effet significatif sur le comportement de fissuration du matériau.

Khelifa et son équipe [53] ont démontrés que l'ajout d'une fraction volumique de 1% de fibres d'alfa était optimal pour renforcer le béton et retarder le retrait à court terme. À long terme, le retrait total des bétons contenant des fibres d'alfa était similaire à celui du béton ordinaire, mais inférieur à celui du béton armé de polypropylène. Sur le plan économique et environnemental, l'utilisation de fibres d'alfa non traitées s'est avérée plus avantageuse que l'utilisation de fibres synthétiques, en raison de leur caractère naturel, de leur coût abordable et de leur faible impact environnemental.

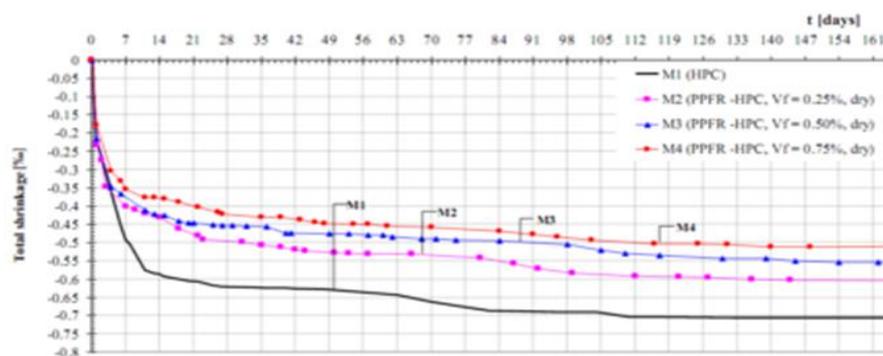


Figure 1.27 : Le retrait total des composites contenant des fibres de polypropylène sèches [88].

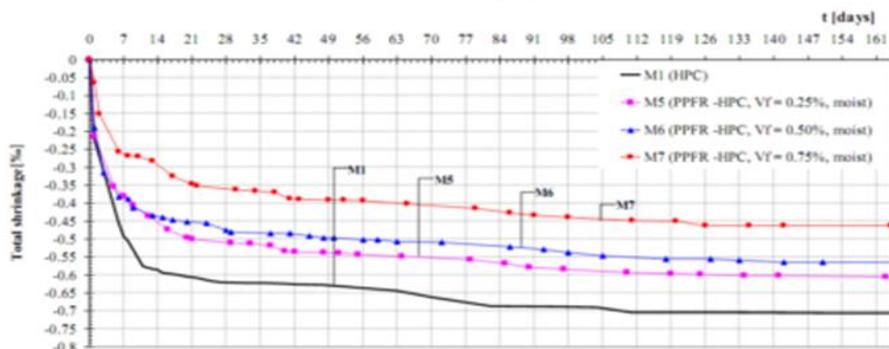


Figure 1.33 : Retrait total des composites des fibres polypropylène sèches et humidifiées.

1.14 Les ajouts minéraux :

1.14.1 Définition :

Les ajouts minéraux sont définis comme étant des substances distinctes de l'eau, des agrégats, du ciment et de l'acier d'armature, qui sont utilisées comme ingrédients dans le béton ou le mortier. Ils sont ajoutés soit juste avant, soit pendant le processus de mélange.[54]

1.14.2 Classification des ajouts minéraux :

Les ajouts minéraux sont classés en actifs et inertes. Ils se divisent selon leur réactivité. Comme le montre le tableau 1.12 :

Tableau 1.12 : classification des ajouts minéraux

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granule-cendres volants riche en calcium (calciques)
pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (Verre volcanique, tufs volcanique, terre à diatomées)
	Faiblement Réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Files fibres pigments colorants matières expansives, dispersions synthétique

1.14.3 Effet du laitier sur les propriétés des bétons et mortiers autoplaçants :

1.14.3.1 La résistance à la compression :

Hammat et al. [55] ont présenté les résultats de leur étude sur l'effet de 15% de laitier. Les variations des résistances à la compression des mélanges SCM avec différentes finesses de laitier ont été observées après 1, 7, 28, 56, 90 et 180 jours de durcissement, pour des taux de substitution de 15% de laitier. Les résultats montrent que les résistances à la compression, en particulier pour un taux de substitution de 15% de laitier, sont similaires quelles que soient les finesses de laitier utilisées. À des âges de durcissement plus avancés (au-delà de 90 jours), les

mélanges avec une finesse de laitier plus élevée (420 et 500 m²/kg) ont tendance à présenter des résistances à la compression plus élevées.

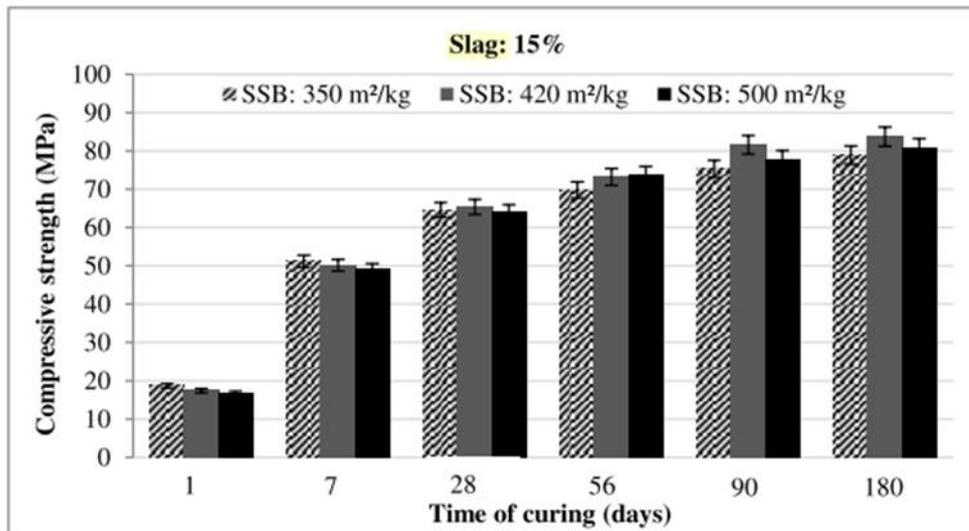


Figure 1.34: effet de finesse de laitier sur la résistance à la compression.

1.14.3.2 L'absorption d'eau :

L'eau joue un rôle crucial dans la détérioration des structures de construction. Lorsque le béton est partiellement immergé dans l'eau, celle-ci pénètre à travers les pores du béton, ce qui entraîne la corrosion des armatures en acier et la détérioration du béton due aux cycles de gel et de dégel.

Yahiaoui et al. ont démontré que l'absorption d'eau par capillarité (I) d'un béton autoplaçant à base de laitier de hauts fourneaux (LHF) est influencée non seulement par la composition du liant, mais également par la durée initiale de cure dans l'eau. Les résultats indiquent qu'une cure à l'air libre à une température de 30 à 45 °C et une humidité relative de 65 à 70% entraîne une augmentation du coefficient d'absorption pour toutes les compositions de liant étudiées.

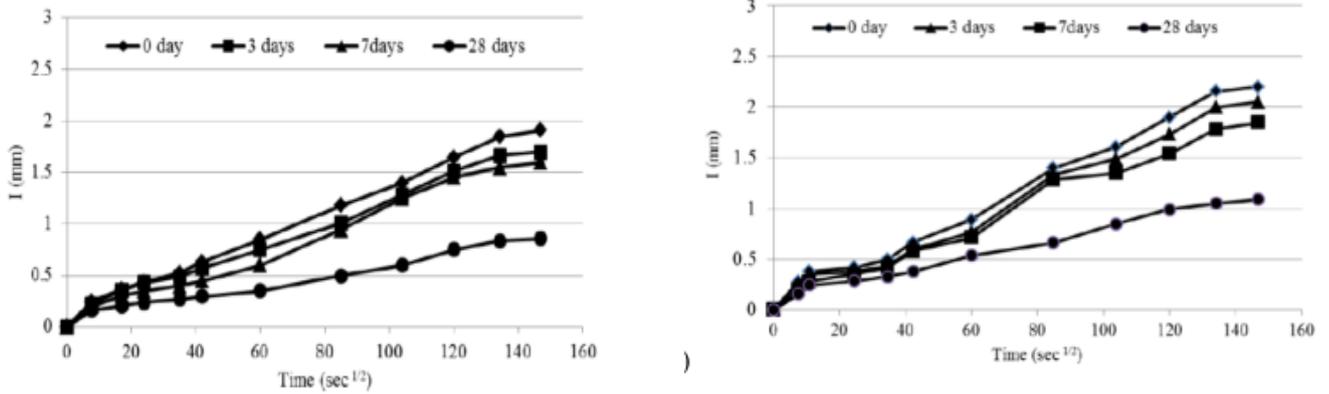


Figure1.35 : absorption d'eau des bétons autoplaçants a base des laitiers.

1.15 Conclusion :

- Le développement de mortiers de réparation durables et abordables est une nécessité pour assurer la longévité et la sécurité des infrastructures.
- La composition du support à réparer, les matériaux de réparation et l'environnement doivent être pris en compte lors de la formulation du mortier.
- L'utilisation de fibres végétales permet de réduire le coût du mortier tout en améliorant ses caractéristiques.
- Les fibres végétales présentent un intérêt croissant dans l'industrie de la construction en raison de leur faible densité, de leur disponibilité renouvelable et de leur résistance à la traction élevée.
- Le mortier de réparation autoplaçant offre de nouvelles perspectives pour la réparation et la réhabilitation des structures en béton armé.
- Les fibres de palmier-dattier traitées hydrauliquement et hydrothermiquement ont démontré des résultats prometteurs

CHAP2: MATERIAUX ET ESSAIS

2.1 Introduction :

Le deuxième chapitre traite à la fois des matériaux couramment employés dans la formulation du béton et des mortiers, ainsi que des principales méthodes et techniques d'évaluation de la performance des mortiers de réparation.

2.2 .Caractérisation des matériaux utilisés :

2.2.1 Ciment :

Nous avons utilisé le ciment type CEM II/A-L 42.5 R de masse volumique 3057 kg/m^3 , sa surface spécifique est de $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$, ce ciment est fourni par le groupe Gica.

Tableau 2.1 : caractéristique physiques du ciment CEM II/A-L 42.5 R

Caractéristiques Physiques	RC a 28j (MPa)	Pabs (kg/m ³)	ρ_{app} (kg/m ³)	SSB (cm ² /g)	Début de prise (min)	Fin de Prise (min)
CEM II/A-L 42.5 R	42.5	3057	1100,92	4200	181	240



Figure 2.1: ciment GICA (CEM II/A-L 42.5 R).

2.2.2 Les granulats utilisés pour le béton :

Pour la confection des dalles pour l'essai de flexion on a utilisé des graviers provenant de Sétif :

Gravier 3/8.

Gravier 8/15.

Deux types de sable ont été utilisés :

Sable baghlia : c'est un sable d'oued de classe 0/5.

Sable d'oued souf : c'est un sable de dune de classe 0/2.

Tableau 2.2 : caractéristiques des granulats utilisés

Granulats	Sable 0/2	Sable 0/5	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2504	2536	2684	2697
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1526	1515	1497	1472
Composition (%)	86	14	14	86

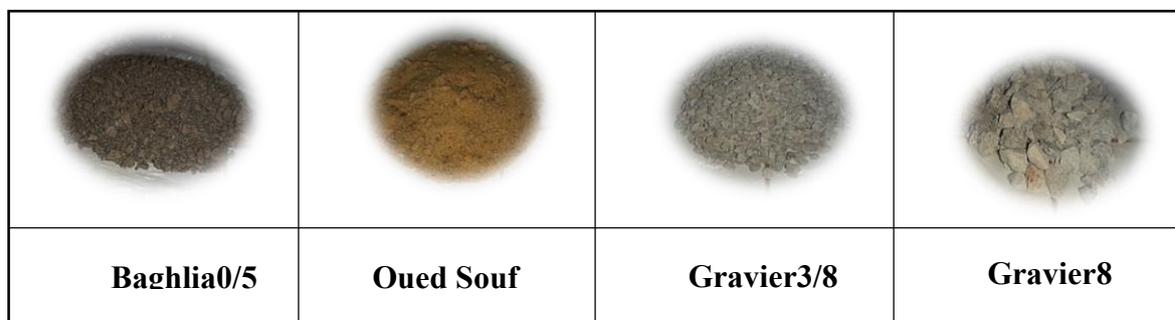


Figure 2.2 : différents types de sable utilisé.

2.2.3 Les sables utilisés pour les mortiers

- Le sable de Baghlia qui est : un type de sable provenant de la région de Baghlia et récupéré dans les cours d'eau, dont les grains présentent une forme arrondie avec une granulométrie comprise entre 0 et 5 mm.

- Le sable de Hassi Bahbab est : un sable naturel provenant de la région de Hassi Bahbab, qui se caractérise par des grains arrondis et une granulométrie allant jusqu'à 2 mm.

Tableau2.3 : caractéristiques des sables utilisés pour mortier

Caractéristiques	Sable de Baghlia	Sable hassi babhab	Sable corrigé
ρ_{app} (kg/m ³)	1574,23	1432,89	1532,12
ρ_{abs} (kg/m ³)	2651,27	2500	2575,76
Coefficient d'absorption (%)	1,5	1,5	1,5
Module de finesse	3.5	1	2 .4
Eq	74	80	79



Figure2.3: sable Hassi Bahbah et sable Baghlia.

2.2.4 Essais réalisés sur sables :

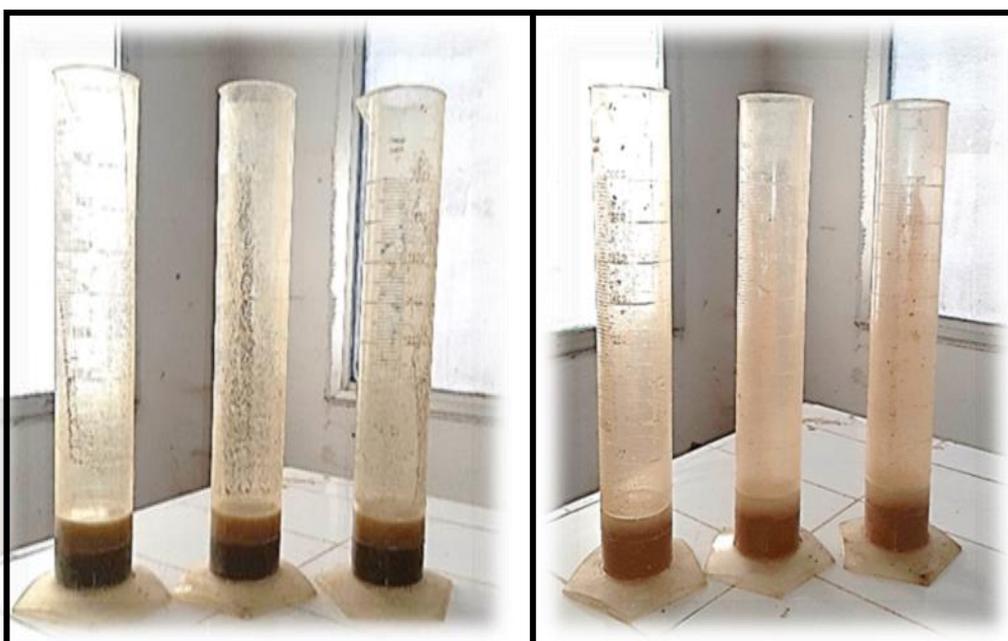


Figure 2.4. Masse volumique absolue des sables : Baghlia, Hassi Bahbah.



Figure 2.5 : équivalent de sable.



Figure2.6 : analyse granulométrique.

2.2.5 Eau de gâchage :

La qualité de l'eau utilisée dans la préparation du mortier est d'une importance capitale pour garantir les performances optimales du matériau. Au laboratoire de génie civil de Blida, nous veillons à utiliser de l'eau du robinet de qualité, propre et dépourvue d'impuretés. L'eau joue un rôle essentiel dans l'hydratation du liant et l'interaction avec les granulats, ce qui influence directement la résistance et la durabilité du mortier.

2.2.6 Adjuvant :

Le superplastifiant est un type d'adjuvant chimique utilisé dans l'industrie du mortier pour améliorer considérablement sa fluidité et sa maniabilité. Il agit en dispersant les particules de ciment et en réduisant les forces de friction entre elles, ce qui permet d'obtenir un mortier plus fluide sans augmenter significativement la quantité d'eau utilisée.[65]

Nous avons utilisé dans ce travail le MEDAFLOW 30 c'est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de Polycarboxylates d'Ether. Il améliore considérablement les propriétés des bétons. Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet sans modifier la consistance, de réduire fortement la teneur en eau du béton.

Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet de retard de prise. Les propriétés de MEDAFLOW 30 sur l'état frais :

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

Les propriétés de MEDAFLOW 30 sur l'état frais durci :

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

Tableau 2.4 : description du superplastifiant

Aspect	Liquide
Couleur	Brun clair
Densité	1,07 ±1
Extrait sec (%°)	30
ph	6-6,5
Teneur en chlore	<0,1g/l

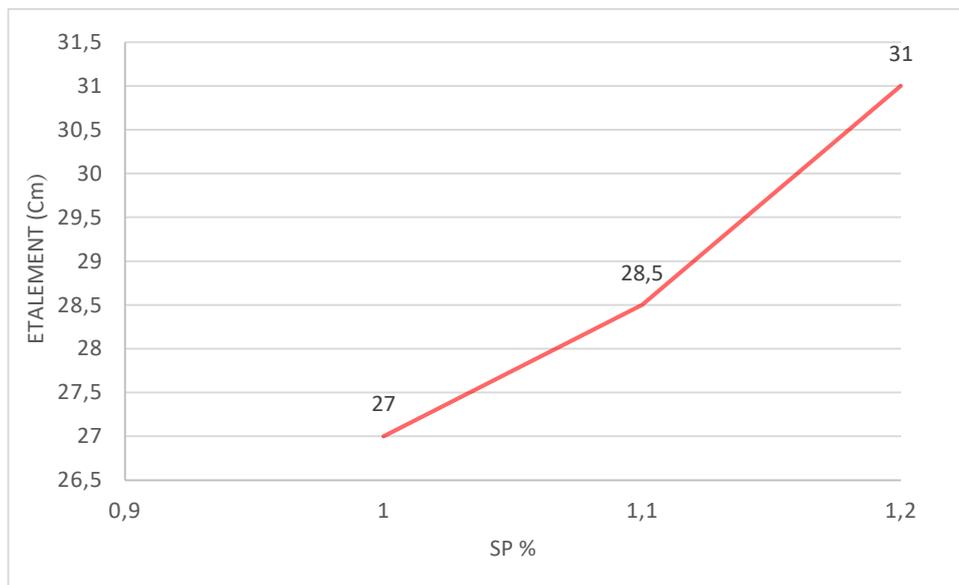


Figure 2.7 : Optimisation du pourcentage du superplastifiant.

2.3 Ajouts :

2.3.1 Laitier haut fourneau :

Le laitier utilisé provient du haut fourneau du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Wilaya d'Annaba). Ce dernier est fourni sous forme de grains sphériques (classe granulométrique 0/5 mm) de couleur jaune clair

Avant d'être ajouté aux différentes compositions de MAP, le laitier a été soumis à un processus d'étuvage à une température de 50°C afin de faciliter son broyage. Pour cette opération, nous avons utilisé un broyeur à boulets d'une capacité de 5 kg.

On a broyé le laitier pendant 2h45min pour obtenir une finesse qui rapproche à celle de ciment 4200 cm²/g.



Figure2.8 : broyage de laitier.

2.3.2 Les fibres :

Dans le cadre de notre étude on a utilisé des fibres de palmier dattier qui sont d'une nature cellulosique, coupés en longueur de 10mm, la masse volumique de ces derniers est à 1018,78 kg/m³ et un coefficient d'absorption de 132,5%.



Figure2.9: fibres de palmier dattier à l'état premier.



Figure2.10 : masse volumique des fibres.

2.3.2.1 .Prétraitement des fibres :

Les fibres provenant du palmier dattier sont découpées à la main, atteignant une longueur de 10 mm. Elles sont soigneusement lavées à l'eau pour éliminer toute trace de poussière. Ensuite, elles sont placées dans une étuve chauffée à 60°C pendant 24 heures afin de maintenir une teneur en humidité constante. À ce stade, ces fibres séchées sont appelées "fibres brutes"



Figure2.11 : découpage des fibres.



Figure 2.12 : fibres découpés.

2.5:caractéristiques chimiques des fibres[33]

ELEMENT	Cellulose(%)	hémicellulose (%)	Lignine(%)	cendre(%)	Cires (%)
Fibres palmier dattier	43±2	8±2	35±5	1,2±0,3	9-10

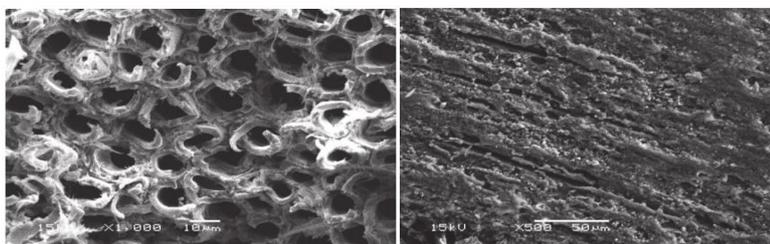


Figure2.13 : photo SEM des fibres palmier dattier.[69]

2.3.2.2 Traitement des fibres :

2.3.2.2.1 Traitement chimique :

Le processus de traitement chimique des fibres de palmier dattier commence par les immerger dans une solution composée d'eau distillée et d'hydroxyde de sodium (NaOH) à une concentration de 3 % en poids, pendant une durée de 2 heures. Ensuite, les fibres sont rincées une première fois avec une solution d'eau distillée contenant une faible quantité d'acide acétique (1 % en poids) afin de neutraliser tout excès d'hydroxyde de sodium. Dans une deuxième étape, les fibres traitées sont à nouveau rincées à l'eau distillée pour abaisser le pH jusqu'à un pH égale à 7. Enfin, les fibres sont placées dans une étuve à une température de 60 °C pendant une période de 48 heures.



Préparation de la solution d'hydroxyde de sodium (3%NaOH + 97% eau distillée). Immersion des fibres de palmier dattier dans la solution pendant 2h de temps



Rinçage des fibres avec une solution qui contient de l'eau distillée et (1 % en poids) d'acide acétique pendant 5min, Puis rinçage des fibres en utilisant l'eau distillée jusqu'à attendre un résultat de PH ≤9



Les fibres obtenus sont séchés dans un étuve a une température de 60C pendant 48h.

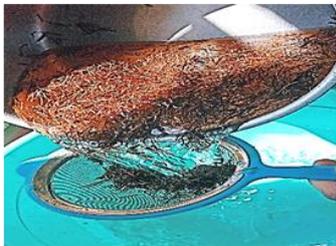
Figure 2.14 : Les procédures entamées pour le traitement hydrothermique sur les fibres palmier dattier.

2.3.2.2.2 Traitement hydrothermique :

Le processus de traitement des fibres a débuté en les plongeant dans de l'eau portée à ébullition pendant 60 minutes. Ensuite, les fibres bouillies ont été soigneusement rincées à l'aide d'eau distillée pour éliminer les matières extractibles qui se sont libérées. Enfin, les fibres nettoyées ont été séchées à température ambiante pendant une période de 48 heures.



Les fibres de palmier dattier sont immergés dans l'eau bouillante distillée pendant 60 min



Rinçage des fibres bouillies en utilisant l'eau distillée.



Séchage des fibres à une température ambiante pendant 48 heures.

Figure 2.15 : Les procédures entamées pour le traitement hydrothermique sur les fibres palmier dattier.

2.4 Formulations adaptés :

2.4.1 Pour le béton :

Les supports de béton utilisés dans cette étude est de type B25/30, fréquemment employé sur les chantiers de construction en Algérie en raison de sa robustesse et de sa durabilité.

Afin d'établir la composition exacte de, la méthode Dreux-Gorisse a été utilisée .

Tableau 2.6 : composition du béton

Constituants		Quantité (kg/m ³)
Ciment		389,29
Gravier	3/8	140,92
	8 /15	884,88
Sable	Oued souf	528,24
	Baghlia	86
Eau		211,06
E/C		0,55

Les mélanges de béton sont fabriqués à l'aide d'un malaxeur d'une capacité maximale de 40 litres.

Séance de malaxage du béton :

1. Gravier + Sable + ciment (sec) 30 sec.
2. Ajouter de l'eau et malaxer 1min 30.
3. Arrêter le malaxeur et racler les parois.
4. Remalaxer pendant 2 min.

Les éprouvettes en béton armé sont produites à l'aide de moules en acier mesurant 70 x70 x 280 mm, Une fois que le béton a été coulé dans les moules, un coffrage 140 *70 *20 mm a été appliqué et retiré une fois que le béton a durci pour créer un vide dans les dalles.

La surface des éprouvettes a été brossée pour permettre l'application uniforme du mortier autoplaçant de réparation et assurer son adhérence.



Figure 2.16 : préparation des éprouvettes en béton 7*7*28

2.4.2 Pour le mortier autoplaçant de réparation :

Les mortiers de réparation autoplaçant sont formulés en combinant deux types de sable, soit 56% de sable (0/5) provenant de Baghliia et 44% de sable (0/2) provenant de Hassi Bahbah. Le liant utilisé est un ciment de type CEM II/42.5 R fourni par GICA. Pour améliorer les propriétés du mortier, un adjuvant superplastifiant est ajouté avec un dosage de 1.2%. Le rapport eau/Ciment (E/C) est maintenu constant, aussi pour le dosage en superplastifiant. Ce dosage est déterminé expérimentalement à partir d'essais réalisés sur le mortier frais afin d'obtenir une consistance d'étalement allant de 270 à 330 mm.

Le rapport $E/c = 0,35$, $S/M = 0,5$ respectivement.

Pour la confection des mortiers, nous avons utilisé un malaxeur de 5 litres de capacité. La séquence de malaxage est expliquée dans la figure 2.19. [70]



Figure2.17 : Séquence de malaxage .

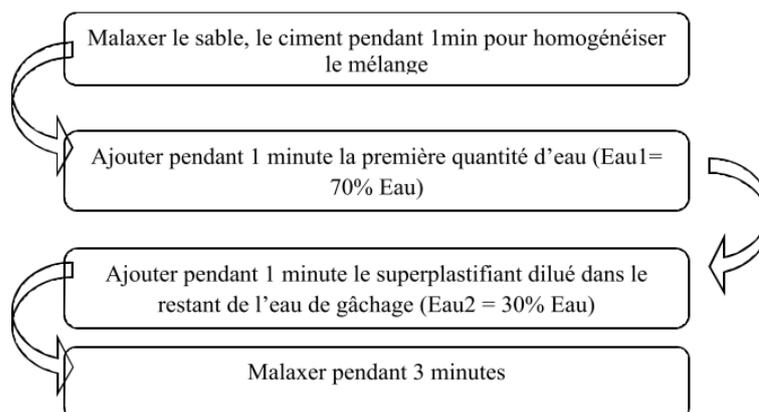


Figure2.18 : Temps de malaxage adapté.

2.4.2.1 Formulation adapté :

Les formulations adaptées sont présentées dans le tableau 2.7 :

Tableau 2.7 : proportions des mélanges des mortiers autoplaçants de réparation

Mortier	Eau (g)	Ciment (g)	LHF (g)	Sable (g)	SP (g)	Fibres (g)
MREF	262,9	764,25	0	1287,9	9,17	0
MNONT	262,9	764,25	0	1287,9	9,17	1,01
MEBT	262,9	764,25	0	1287,9	9,17	1,01
MNaOHT	262,9	764,25	0	1287,9	9,17	1,01
MNONT15%L	263,07	632,22	111,57	1287,9	8,93	1,01
MEBT15%L	263,07	632,22	111,57	1287,9	8,93	1,01
MNaOH15%L	263,07	632,22	111,57	1287,9	8,93	1,01

MREF : mortier de référence , MNONT :mortier contenant des fibres de palmier non traité, MEBT :mortier contenant des fibres de palmier traité par eau bouillante , MNaOHT :mortier contenant des fibres de palmier traité par NaOH , MNONT15%L : mortier contenant des fibres de palmier non traité et 15% du laitier , MEBT15%L : mortier contenant des fibres de palmier traité par eau bouillante et 15% du laitier , MNaOH15%L : mortier contenant des fibres de palmier traité par NaOH et 15% du laitier.

2.4.2.2 .Application du MAP de réparation :



Figure2.19 : différentes application de MAP de réparation.

Les dalles en béton sont positionnées à l'intérieur de moules en bois mesurant 50×360×160 mm, de manière à pouvoir appliquer uniformément une couche de mortier de réparation d'une épaisseur de 20 mm sur toute la surface.



Figure2.20 : Application du mortier de réparation sur les dalles.



Figure 2.21 : les dalles après 28 jours de conservation.

Des moules normalisés sont utilisés pour fabriquer trois éprouvettes prismatiques de section carrée mesurant $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Une fois le moulage terminé, les moules contenant les spécimens sont enveloppés dans un film en plastique et entreposés dans l'environnement du laboratoire. Après une période de 24 heures, les échantillons sont démoulés et plongés dans de l'eau maintenue à une température de $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.



Figure 2.22 : éprouvettes $4 \times 4 \times 16$.

Insérez les éprouvettes de dimensions $7 \times 7 \times 28$ dans des moules fabriqués en bois, puis procédez au remplissage avec du mortier autoplaçant de réparation d'une couche de 20 mm.

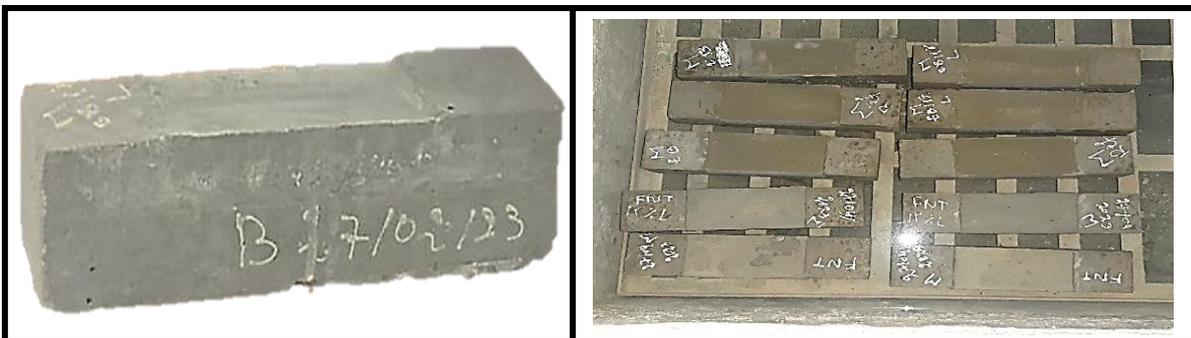


Figure 2.24 : éprouvette $7 \times 7 \times 28$ après application du MAP de réparation, conservation des éprouvettes.

2.5 Essai réalisés sur mortier autoplaçant de réparation a l'état frais :

2.5.1 Essai d'étalement au Mini-Cône :

Le procédé d'étalement implique de remplir un moule tronconique placé sur une plaque horizontale. Une fois le moule soulevé, on mesure le diamètre d'étalement du mortier dans deux directions perpendiculaires et on retient la moyenne des deux mesures. Selon DOMONE et al[75]. , un mortier de bonne qualité se caractérise par un diamètre d'étalement compris entre 270 et 330 mm.



Figure 2 .24 : étalement du mortier autoplaçant de réparation.

2.5.2 Masse volumique apparentes :

Les masses volumiques apparentes des mortiers sont déterminées selon la norme NF EN 1015-6.[72]



Figure2.25: masse volumique des mortiers.

2.6 Essai réalisés sur mortier autoplaçant de réparation a l'état durci

2.6.1 L'absorption capillaire :

Le phénomène d'absorption d'eau par capillarité, qui correspond au transfert d'eau à travers un matériau poreux en raison des tensions de surface liquide/solide/gaz dans les pores capillaires, est étudié dans cet essai. L'absorption capillaire est influencée par la structure poreuse du matériau (porosité ouverte, taille et interconnexion des pores) ainsi que par son état hydrique.

Pour mesurer le taux d'absorption d'eau par succion capillaire, des échantillons de mortier de dimensions $40 \times 40 \times 80 \text{ mm}^3$, préalablement non saturés, sont préparés. Avant de procéder aux mesures de Sorptivité, les échantillons sont soumis à une pré-conditionnement conforme aux recommandations de la norme ASTM C1585-13[71] . Ils sont placés dans une étuve ventilée maintenue à une température de $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que la variation de masse entre deux pesées successives soit inférieure à 0,1 %. Les faces latérales des échantillons sont revêtues d'une résine de type MedaPoxy colle afin d'assurer l'écoulement unidirectionnel de l'eau absorbée et d'éviter toute évaporation latérale.

L'essai d'absorption capillaire est ensuite réalisé suite à cette phase de pré-conditionnement. Les échantillons sont partiellement immergés dans l'eau contenue dans un récipient, en maintenant une hauteur maximale d'immersion de 5 mm à l'aide de cales . À des intervalles de temps prédéterminés (1 minute, 5 minutes, 10 minutes, 20 minutes, 30 minutes, 1 heure, 2 heures, 3 heures, 4 heures, 5 heures, 6 heures, 1 jour, 2 jours, 3 jours, 5 jours, 6 jours, 7 jours, 8 jours), les échantillons sont retirés du récipient, essuyés à l'aide d'une éponge, pesés et replacés dans le récipient pour la suite des mesures.

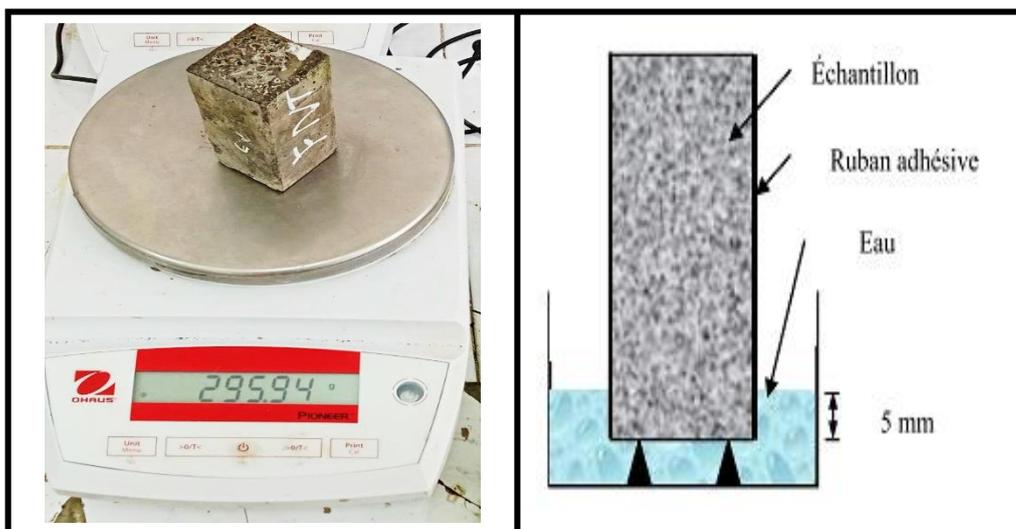


Figure2.26 : essai d'absorption capillaire.

Le Coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante :

$$I = \frac{m\tau}{a*b}$$

Où :

I : Coefficient d'absorption capillaire (mm).

m τ : la différence de masse de l'éprouvette à une échéance donnée (g).

a : section de l'éprouvette (mm²).

d : densité de l'eau (g/mm³).

2.6.2 La porosité accessible à l'eau :

L'objectif de cet essai est d'évaluer le volume de pores ouverts dans un matériau qui sont accessibles à l'eau. La porosité, exprimée en pourcentage (ϵ), représente le rapport entre le volume total des pores ouverts dans le matériau poreux et son volume apparent. L'essai de porosité accessible à l'eau a été réalisé conformément à la norme NF P18-459.[74]

L'essai commence par la détermination de la masse de l'échantillon à l'état sec. Pour ce faire, les éprouvettes sont séchées dans une étuve à une température de $80 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que deux pesées successives, effectuées avant et après une période de 24 heures dans l'étuve, montrent une différence inférieure à 0,1 %. La masse M_{sec} de l'échantillon est mesurée avec une balance précise au centième de gramme. Ensuite, l'échantillon est placé dans une enceinte fermée, également appelée dessiccateur, et soumis à une pression constante pendant 4 heures. Par la suite, de l'eau est introduite progressivement dans l'enceinte jusqu'à ce que l'échantillon soit entièrement recouvert d'environ 20 mm d'eau. La pompe est ensuite déconnectée, marquant ainsi le début de la phase d'immersion dans l'eau. Cette procédure permet de déterminer la masse apparente de l'échantillon après son immersion dans l'eau, étant donné qu'il a été préalablement saturé sous vide. Après une période de saturation de 18 ± 2 heures, les éprouvettes sont retirées du récipient et pesées à la fois dans l'eau et dans l'air à l'aide d'une balance hydrostatique. Ces mesures permettent d'obtenir les valeurs de masse M_{eau} (masse dans l'eau) et M_{air} (masse dans l'air) respectivement.



Figure2.27 : essai de porosité.

La porosité accessible à l'eau, ϵ , est exprimée en pourcentage en volume, est donnée par l'équation :

$$\epsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100$$

Ou :

M_{eau} : la masse du spécimen immergé dans l'eau,

M_{air} : la masse du spécimen pesé dans l'air,

M_{sec} : la masse du spécimen sec.

2.6.3 Essai d'adhérence par arrachement :

L'essai d'arrachement est une méthode qui implique l'application d'une pastille métallique sur la surface revêtue, suivie d'une force de traction progressive jusqu'à la rupture. Dans le cadre de cette étude, des pastilles circulaires d'un diamètre de 50 mm ont été utilisées, conformément à la norme NF EN 24624(1542)[73]. Selon cette norme, il est recommandé de réaliser un

carottage autour de la pastille dans le revêtement, avec une distance d'environ 2 cm jusqu'au substrat, en utilisant une carotteuse.

Pour assurer la liaison entre la pastille et la surface du mortier carotté, le produit Sika dure 31-CF a été utilisé. La force appliquée sur la pastille est augmentée de manière progressive à une vitesse constante jusqu'à ce qu'elle atteigne une force maximale correspondant à la rupture. La contrainte d'arrachement est ensuite calculée en divisant cette force maximale par la surface de la pastille.

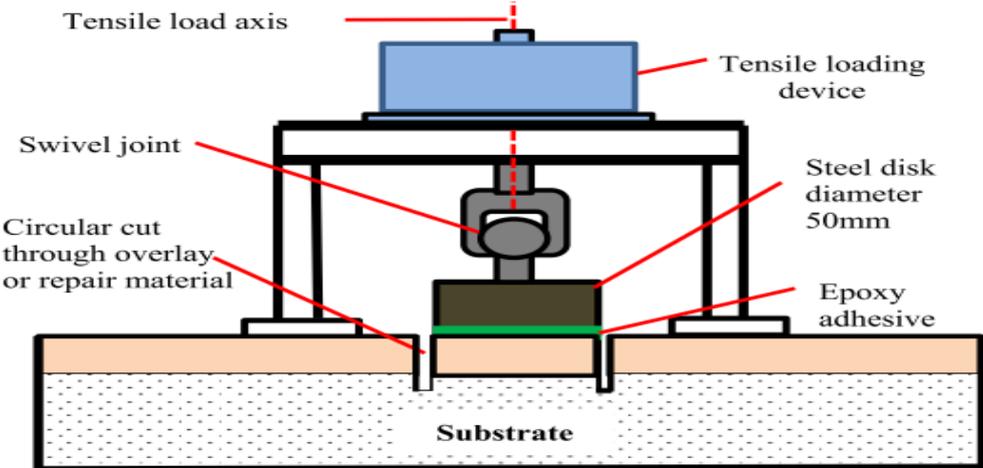


Figure2.28 : principe d'essai d'arrachement.

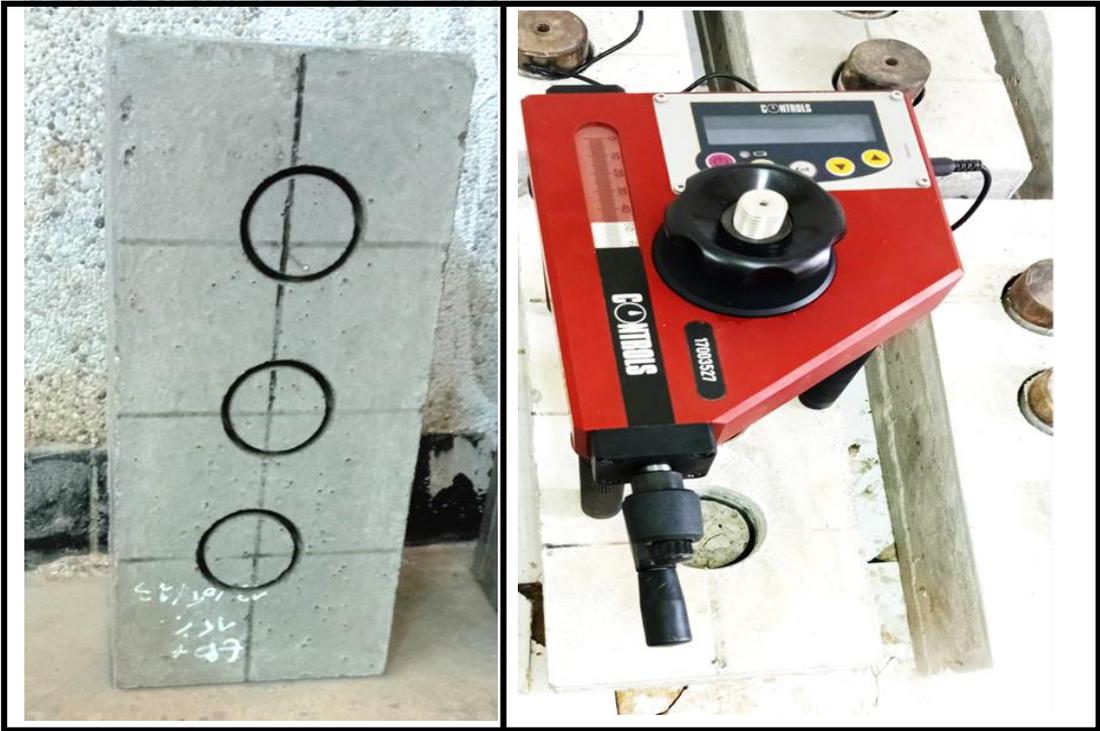


Figure2.29 : carottage des dalles.

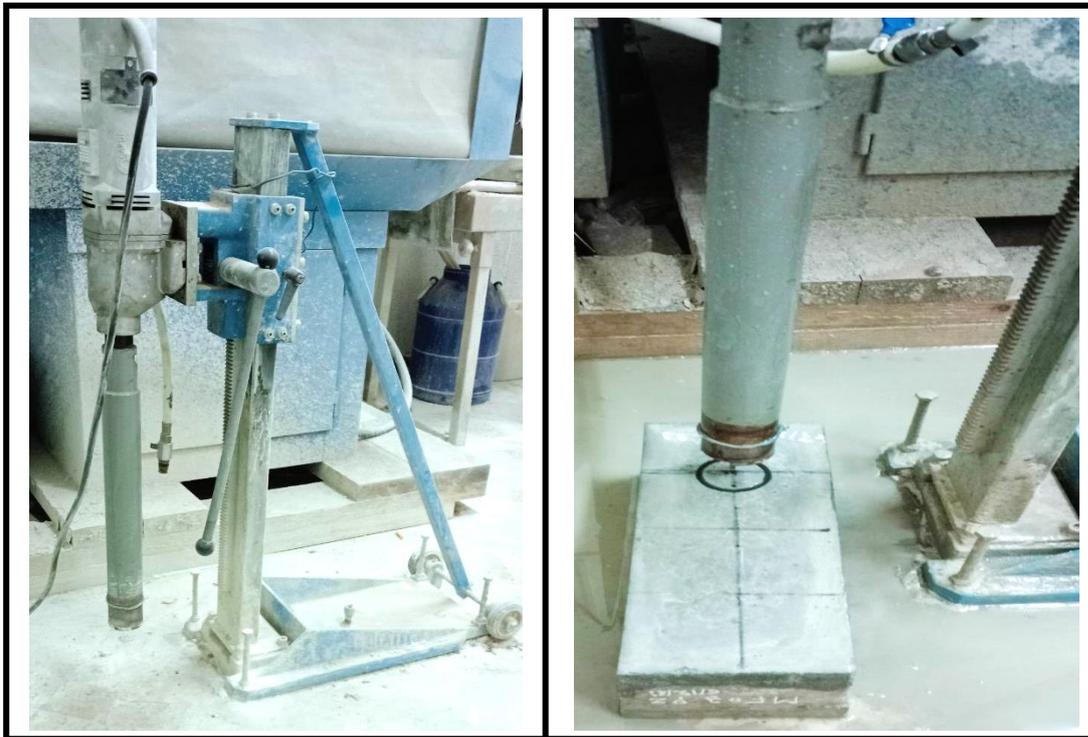


Figure 2.30 : Essai d'adhérence par arrachement.

2.6.4 La résistance à la flexion :

La résistance à la flexion 4 points a été réalisée sur des éprouvettes 70*70*280 mm (Béton + mortier autoplaçant de réparation) conservés dans l'eau à 20 °C Pendant 28 jours.

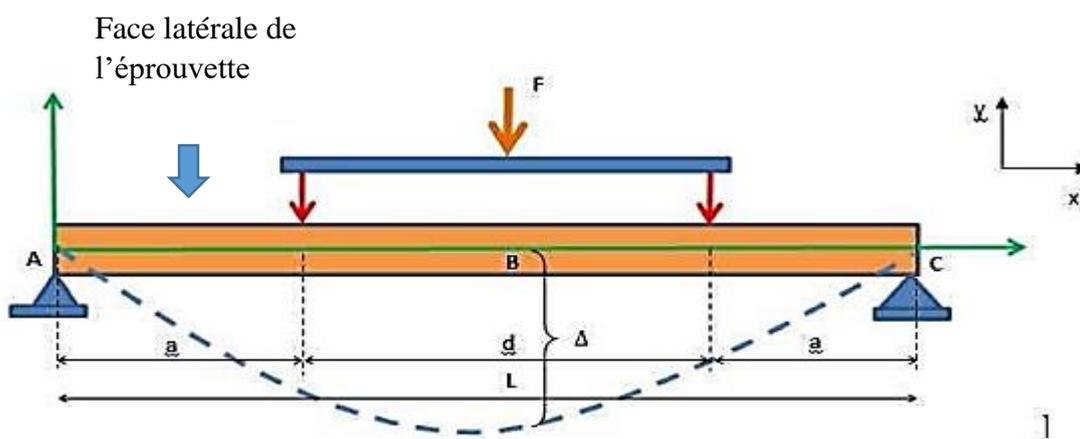


Figure 2.31 : principe d'essai de flexion 4 points.



Figure2.32 : essai de flexion.

2.6.5 Conductivité thermique :

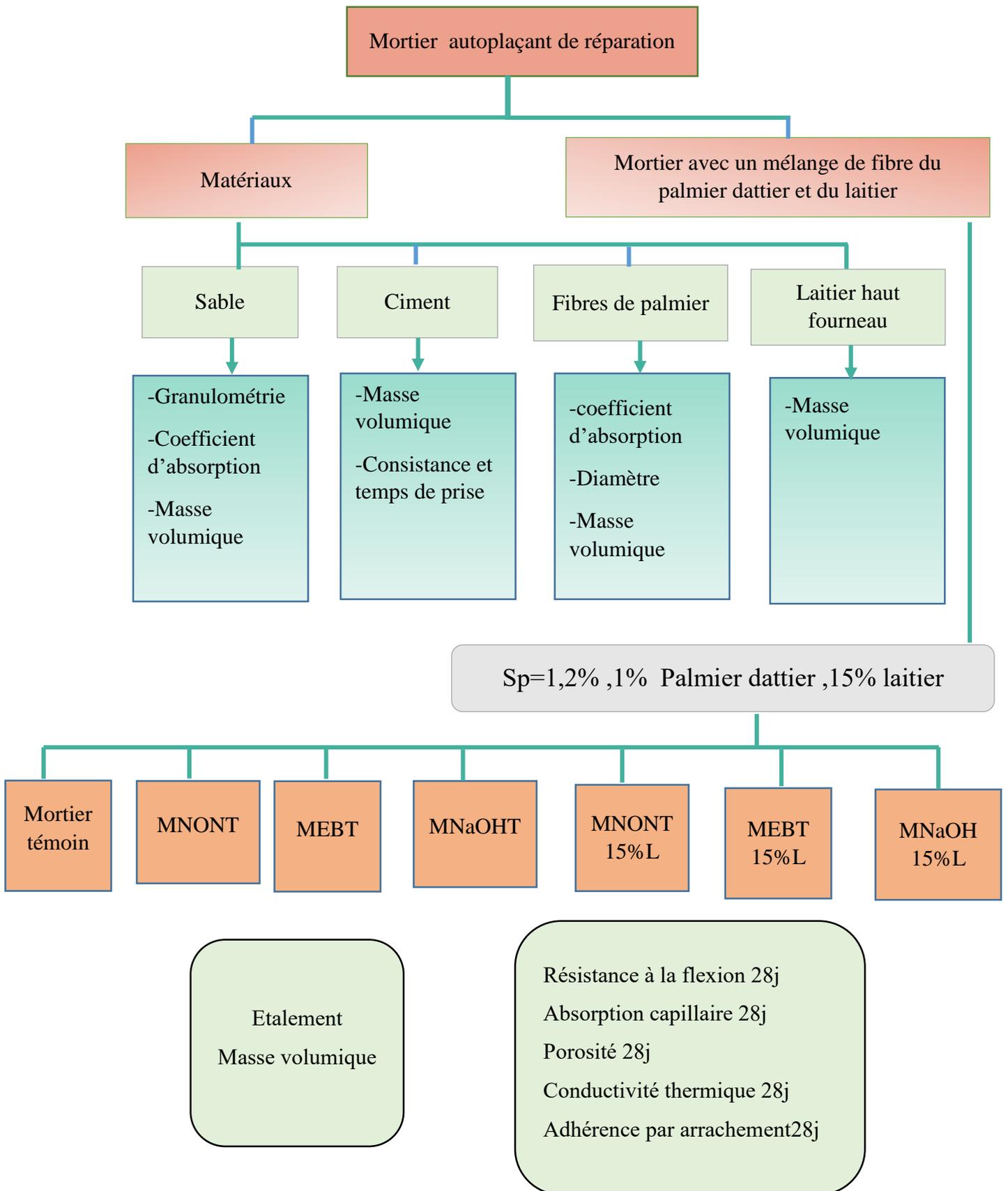
Pour mesurer la conductivité thermique, nous utilisons un CT mètre, un appareil portable et robuste équipé d'une poignée réglable. Il est équipé d'une sonde de résistance de 5,72 ohms.

Dans notre protocole expérimental, nous préparons deux échantillons plats du matériau à mesurer de manière à ce que la sonde puisse être positionnée entre eux, créant ainsi une configuration de type "sandwich". Ensuite, nous insérons la sonde dans l'appareil et lançons le logiciel d'acquisition pour programmer les paramètres nécessaires à la mesure.



2.33 : appareil conductivité thermique.

2.7 Résumé du plan expérimental :



CHAP 3
RESULTATS ET
DISCUSSIONS

3.1 Introduction :

Ce chapitre se concentre sur la présentation des résultats des essais portant sur l'impact de la substitution du laitier et l'ajout de fibres de palmier dattier sur le comportement des mortiers autoplaçants de réparation a l'état frais et durci .

3.2 Influence des fibres palmiers dattiers et le laitier sur états frais :

3.2.1 Étalement :

Les résultats des tests d'étalement sont présentés dans la figure 3.1 Ces résultats indiquent que l'ajout de fibres de palmier dattier, qu'elles soient traitées ou brutes, dans les mortiers autoplaçants de réparation MNONT, MEBT et MNAOHT réduit respectivement le diamètre d'étalement de 4,83%, 4,83% et 3,22% par rapport au mortier témoin. En revanche, l'incorporation simultanée de fibres et de 15% de laitier dans les mortiers MNONT15%L, MEBT15%L et MNAOH15%L conduit à une augmentation du diamètre d'étalement. Cela s'explique Par l'effet bénéfique du laitier sur l'ouvrabilité des mortiers. Toutefois, il convient de noter que le diamètre d'étalement reste inférieur ou égal à celui du mortier de référence, à l'exception du cas du MNONT15%L qui a connu une augmentation de 1,61%.

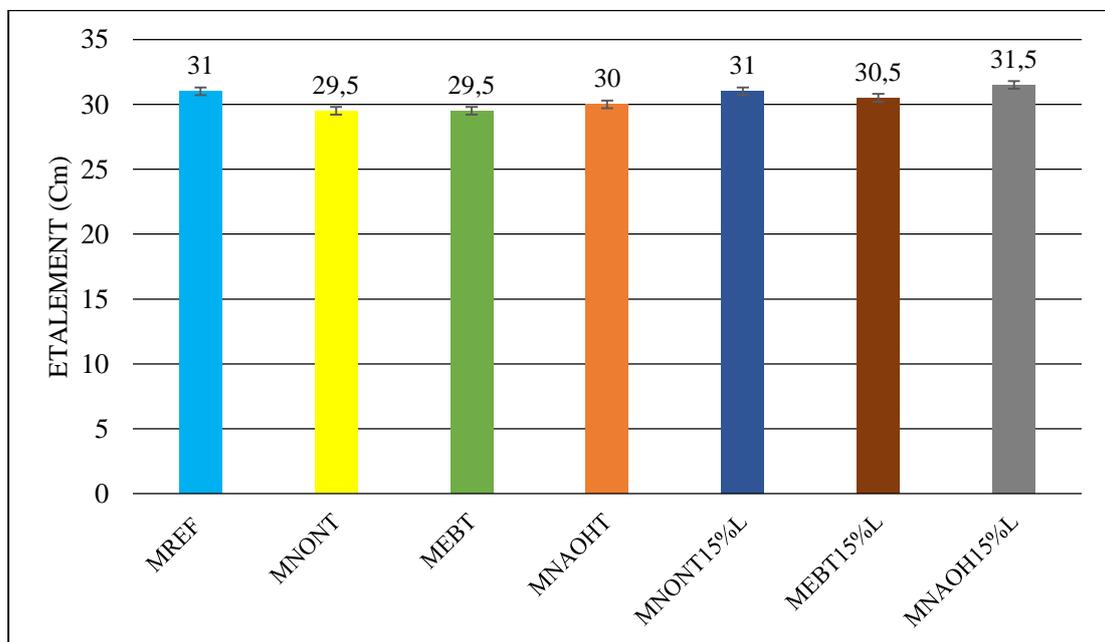


Figure3.1: influence des fibres palmier dattier et du laitier sur l'étalement des mortiers Autoplaçant de réparation.

3.2.2 Masse volumique :

La figure 3. 2 présente l'effet de l'ajout des fibres palmiers dattiers ainsi que le laitier sur la masse volumique des mortiers autoplaçants de réparation .L'introduction de fibres de palmiers dattiers à raison de 1% du volume total dans les mortiers MNONT, MEBT et MNAOHT a entraîné une réduction respective de la masse volumique de 18,72%, 18,6 %et 18,83%. En revanche, l'ajout de laitier à hauteur de 15% dans les mortiers MNONT15%L, MEBT15%L et MNAOH15%L a provoqué une diminution de la masse volumique de 2,28%, 1,73% et 1,3 %respectivement. Il est important de noter que la densité du mortier de référence M0 reste la plus élevée, indiquant que tout ajout de matériau supplémentaire conduit à une diminution de la densité

Ces résultats sont compatible a ceux de Rachedi, M[56] et al qui ont observé que la densité des composites (mortier + fibres) diminuait à mesure que le pourcentage et la longueur des fibres augmentaient. Les résultats ont montré que les composites de référence, sans fibres de palmier-dattier, présentaient la densité la plus élevée, Cette diminution de densité s'explique par la formation de vides causés par l'ajout des fibres, réduisant ainsi la cohésion entre les fibres et les mortiers.

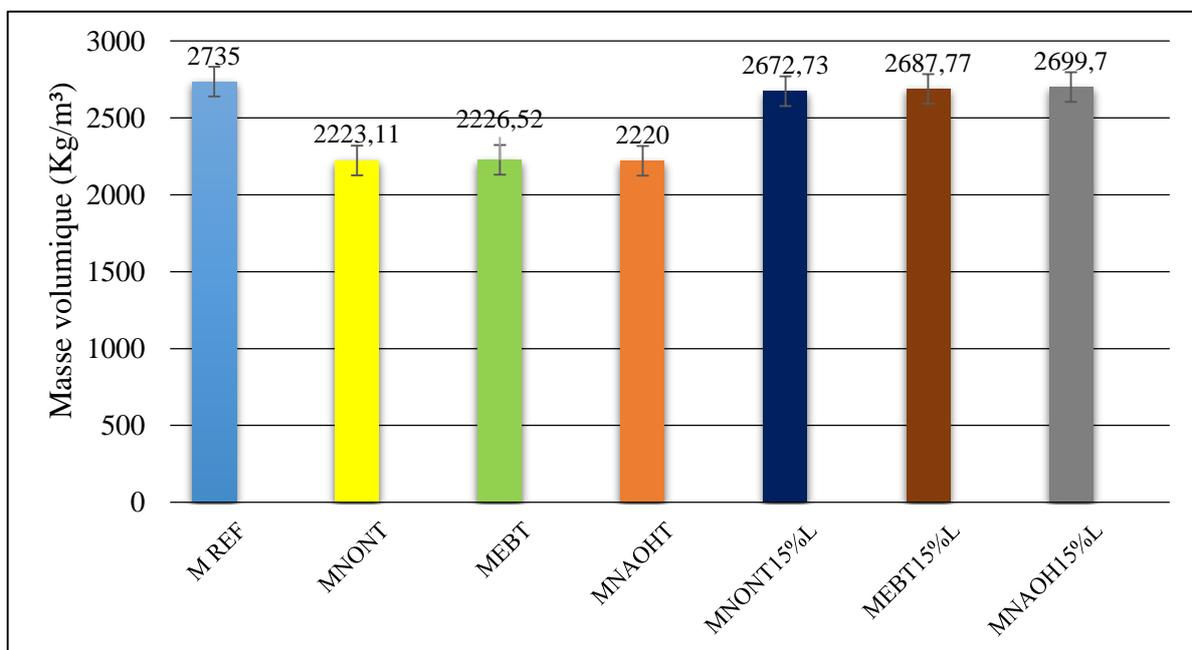


Figure 3.2 : influence d'incorporation des fibres palmier dattier et du laitier sur la masse volumique des mortiers.

3.3 Effet des fibres palmiers dattiers et le laitier sur l'Etat durci

3.3.1 Absorption capillaire :

Les fibres de palmier dattier, qu'elles soient traitées ou non, mesurées à une longueur de 10 mm et à un pourcentage de 1%, ont montré une augmentation rapide de l'absorption capillaire d'eau au début de l'essai, principalement due au remplissage des pores de grande taille près de la surface de contact, suivi d'une diffusion vers des capillaires de plus petit diamètre. La progression de l'eau par action capillaire dépend de la répartition des pores capillaires.

Les résultats indiquent que l'ajout de fibres de palmier dattier traitées et non traitées aux mortiers M NONT, MEBT et MNAOHT entraîne une réduction de l'absorption capillaire par rapport aux mortiers M NONT15%L, MEBT15%L et MNAOHT15%L. Cependant, l'absorption capillaire dans ces mélanges reste supérieure à celle du mortier M0 pendant les 6 premières heures et les 8 jours suivants. Cette constatation peut être influencée par l'hydratation lente du laitier, qui affecte la distribution des tailles de pores dans la structure poreuse.

Ces résultats sont en accord avec ceux de Benmansour et al[58]., qui ont observé l'évolution de l'absorption d'eau des échantillons de fibres de palmier dattier en fonction du temps d'immersion. Ils ont constaté que la fibre DPF3 absorbe jusqu'à 241% d'eau après 40 minutes et 176% après 150 minutes, tandis que la fibre DPF6 absorbe moins d'eau. De plus, il a été rapporté que l'augmentation du rapport longueur/diamètre des fibres entraîne une augmentation de l'absorption d'eau.

Ces résultats sont en accord aussi avec l'étude de Chikhi et al.[60] qui ont examiné l'effet de l'eau sur des composites en plâtre remplis de fibres de palmier dattier, et avec l'étude de Taoukil et al.[4] , qui ont étudié l'effet de l'eau sur le mortier de sable rempli de fibres de bois. Dans les deux cas, il a été constaté que la nature hautement hygroscopique des fibres entraîne une importante variation dimensionnelle des composites en réponse à l'eau.

Cependant Ces résultats contredisent les conclusions de Yahiaoui et al[57]., qui ont rapporté que l'utilisation de mortiers de réparation à fibres contenant du laitier et des fibres naturelles (MSLPD) conduit à des coefficients d'absorption capillaire plus faibles pour les pores de grande et petite taille par rapport au mortier de référence.

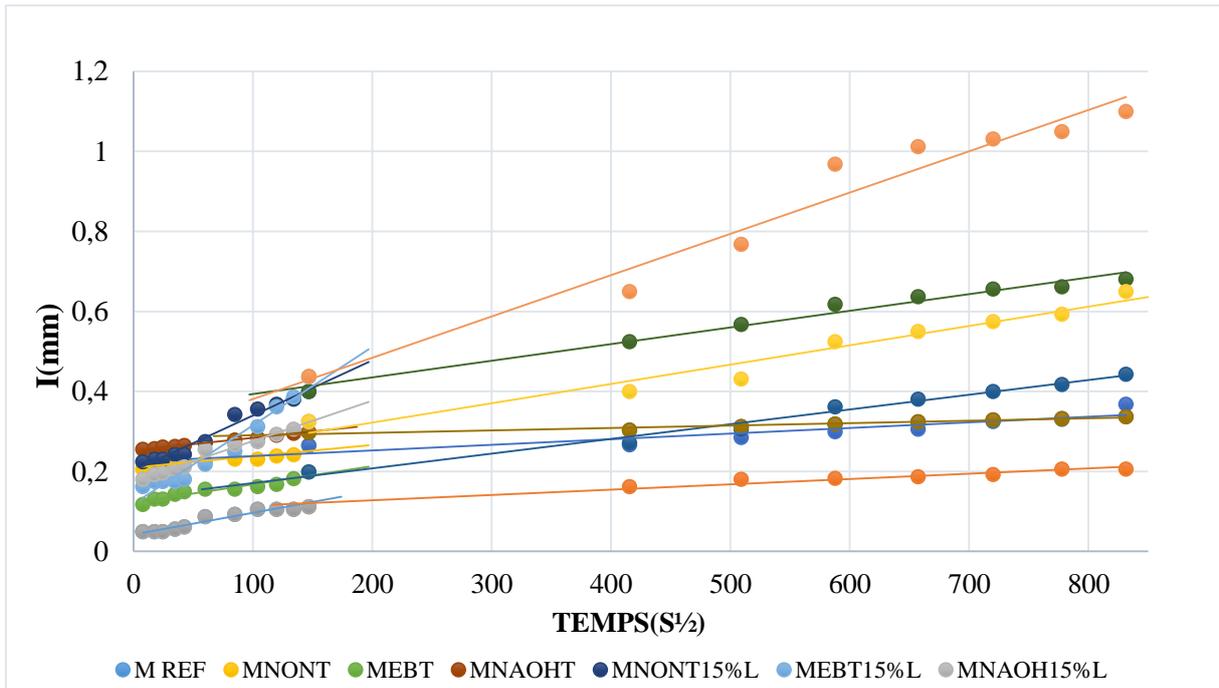


Figure 3.3 : Variation de l'absorption d'eau capillaire dans les mortiers avec ajout de fibres de palmier et de laitier.

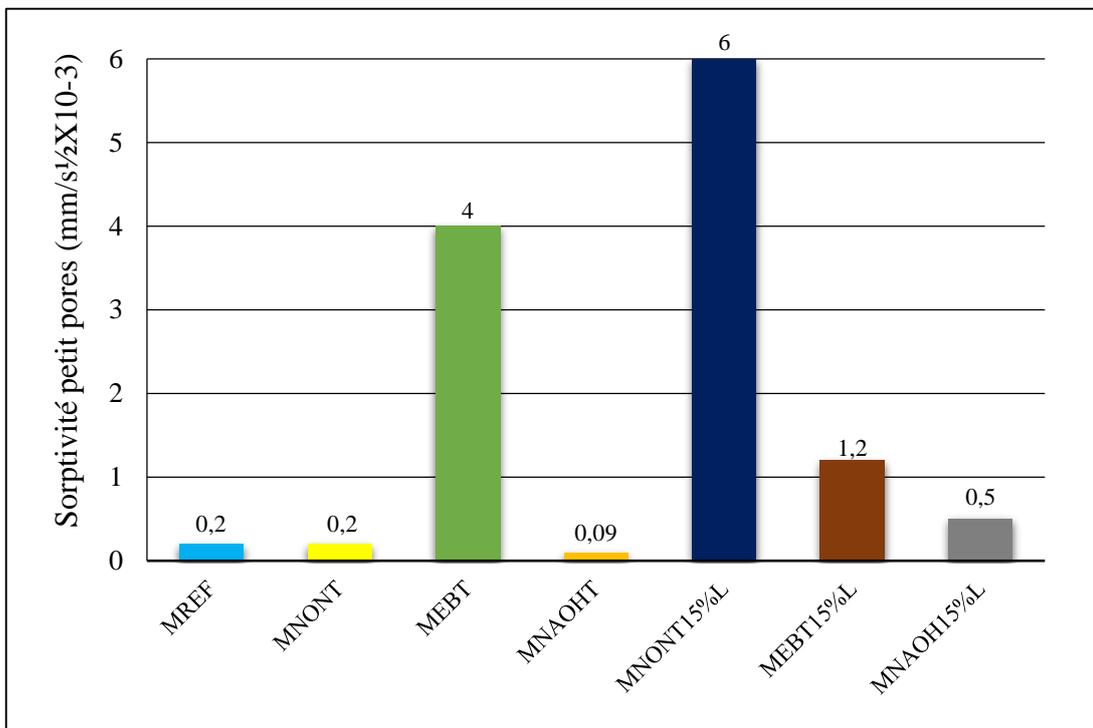


Figure 3.4 : Sorpitivité des différents mélanges petit pores.

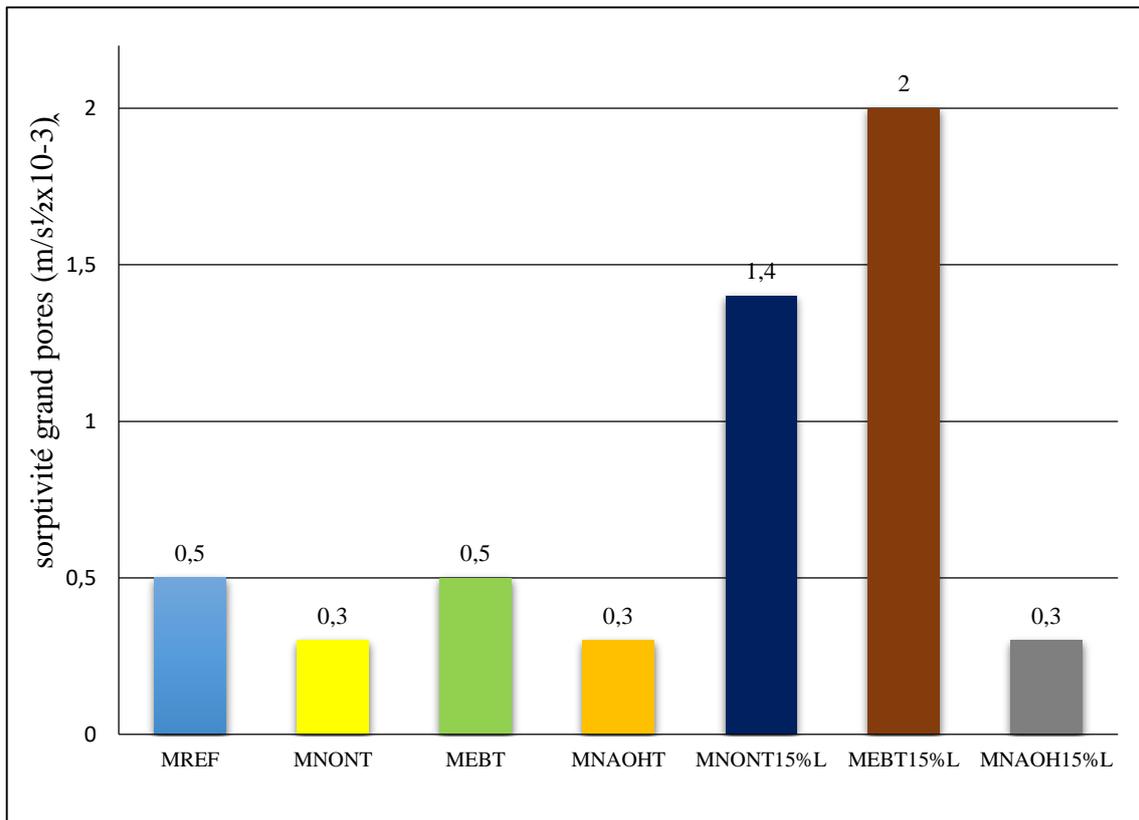


Figure 3.5 : Sorptivité grand pores des différents mélanges.

3.3.2 Porosité :

L'incorporation de fibres de palmier dattier, qu'elles soient traitées ou non traitées, dans les mortiers autoplaçants de réparation (MNONT, MEBT, MNAOHT) a pour effet de réduire la porosité par rapport au mortier témoin respectivement de 4,15%, 7,84%, 19,04%. Cela signifie que les fibres contribuent à diminuer le nombre et la taille des pores dans les mortiers. En revanche, l'ajout de laitier et de fibres ensemble dans les mortiers MNONT15%L, MEBT15%L, MNAOH15%L a un effet contraire et augmente la porosité respectivement de 3,91%, 12,09%, 12,76%. Cela peut être expliqué par la réaction lente du laitier

Ces résultats diffèrent des études menées par Kareche et al [61]. Et Haba et al. [48] Qui ont constaté une augmentation de la porosité avec l'ajout de fibres de palmier dattier de différentes longueurs et volumes.

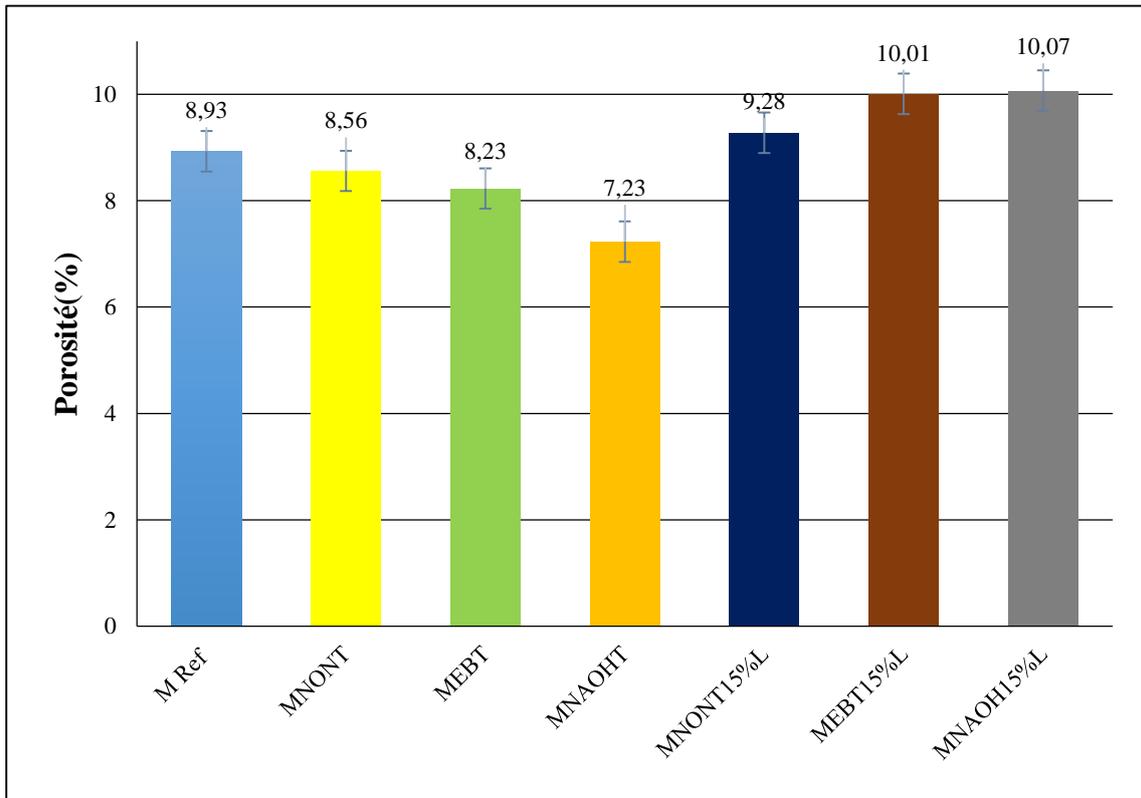


Figure 3.6 : influence des fibres palmier dattier et du laitier sur la porosité des mortiers.

3.3.3 Résistance à la flexion :

La figure 3.7 présente les résultats de la résistance à la flexion en quatre points des différents mélanges de mortier autoplaçant de réparation. On observe que les mortiers contenant des fibres traitées MEBT et MNAOHT ont obtenu des résultats supérieurs à ceux des fibres non traitées MFNT, avec des valeurs de 5,36 et 5,02 respectivement, tandis que le mortier MNONT n'a atteint que 4,46, Seul le mortier MEBT a démontré une résistance supérieure à celle du mortier témoin. Pour les mélanges contenant du laitier, toutes les valeurs sont inférieures à celles des mélanges précédents, ce qui peut s'expliquer par la réaction pouzzolanique du laitier. Ces résultats sont compatibles à ceux de YAHIAOUI et al [57] qui ont trouvé que l'incorporation du laitier et les fibres de palmier dattier diminue la résistance de flexion à cause de réaction lente du laitier.

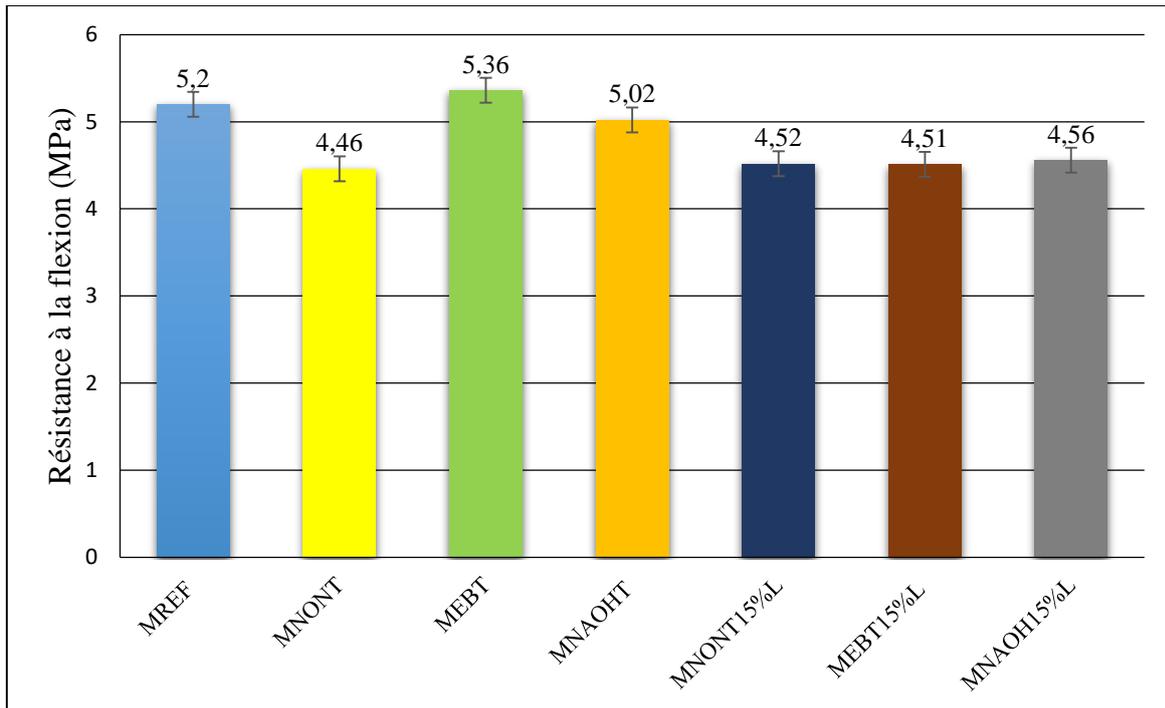


Figure 3.7: influence des fibres palmier dattier et du laitier sur la résistance à la flexion des différents mortiers.

3.3.4 L'arrachement :

Selon la norme EN 1766[62] :

- a : rupture cohésive dans le béton.
- b : rupture adhésive entre le substrat et la couche de mortier de réparation.
- c : rupture cohésive dans la couche de mortier de réparation.
- d : rupture cohésive dans la couche de l'adhésive

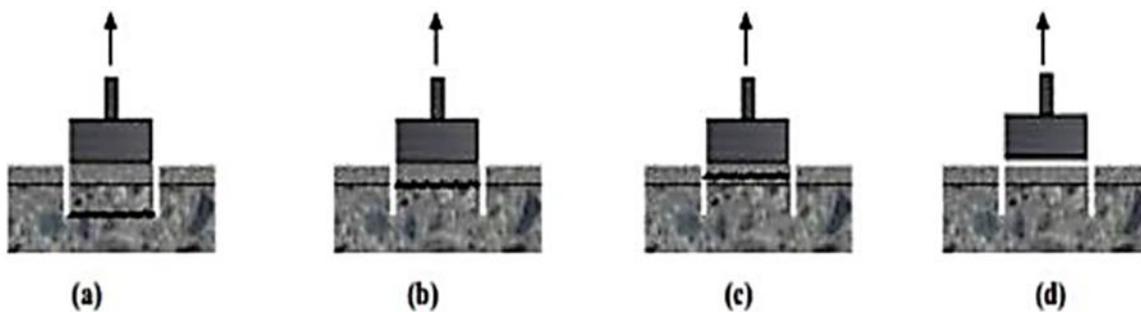


Figure 3.8 : différents mode de rupture.

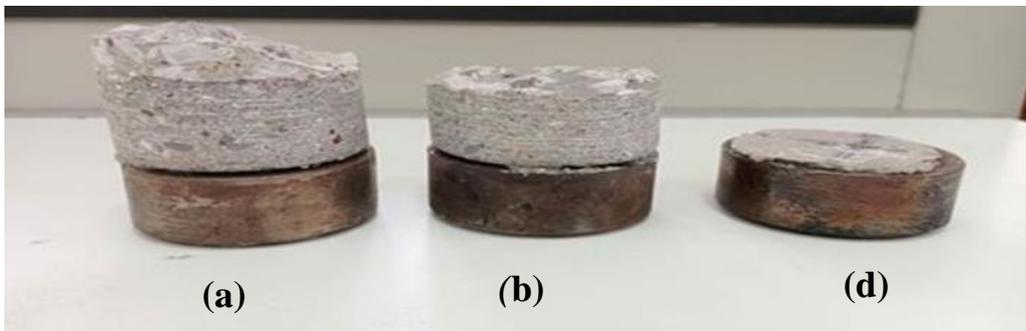


Figure 3.9 : résultats d'essai d'arrachement.

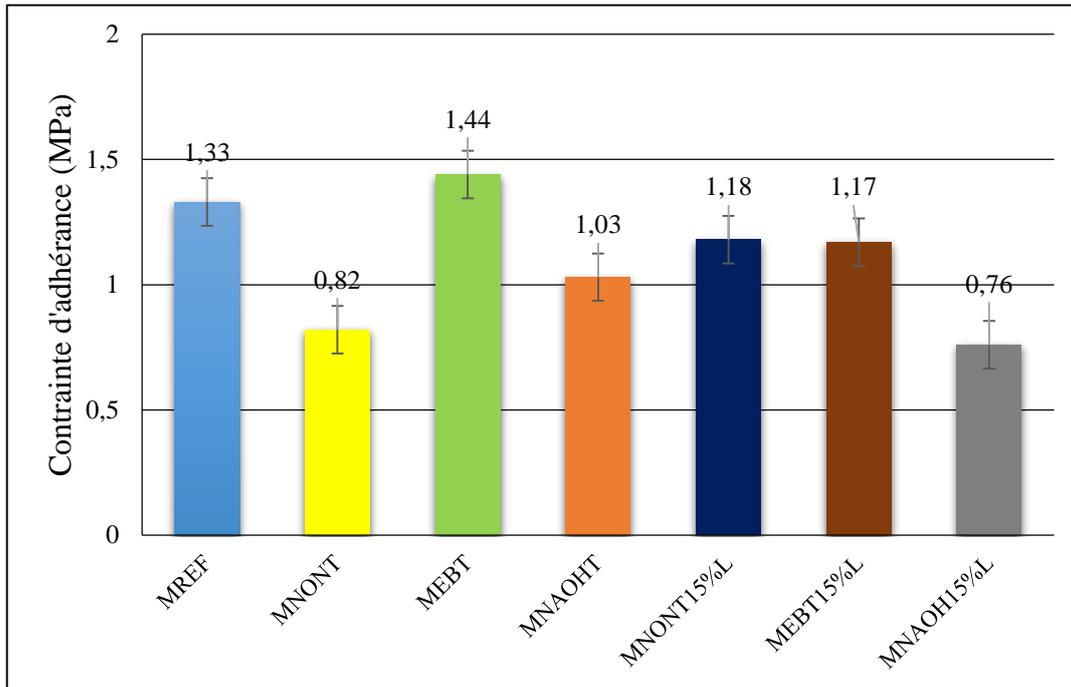


Figure 3.10 : influence des fibres palmier dattier et du laitier sur les mortiers.

Tableau 3.1 : Contraintes d'adhérences et modes des ruptures

Mortier	1	2	3	MOYENNE
M REF	1,11/b	1,43/a	1,45/a	1,33
MNONT	0,81 /a	0,83/d	/	0,82
MNAOH	1,46/d	1,42/a	1,43/a	1,44
MEBT	1,01/d	0,9 /a	1,19/a	1,03
MNONT	1,37/a	0,84/d	1,33/a	1,18
MNAOH15%L	1,25/b	1,14/a	1,11/a	1,17
MEBT15%L	0,68/d	0,91/d	0,71/d	0,76

3.3.5 Conductivité thermique :

La figure 3.11 met en évidence que l'ajout de fibres de palmier dattier réduit la porosité dans les mortiers MNONT, MEBT et MNAOHT, tandis que l'incorporation de laitier dans les mortiers MNONT15%L, MEBT15%L et MNAOH15%L montre une augmentation de la porosité. Cette observation peut être expliquée par l'augmentation de la compacité due à la présence de laitier dans ces mélanges.

L'ajout de fibres naturelles pour renforcer les matériaux de construction entraîne une augmentation de la proportion de vides, ce qui réduit la densité du composite et, par conséquent, sa conductivité thermique. Il peut donc être conclu que la teneur en fibres naturelles dans le plâtre joue un rôle vital dans l'amélioration de la conductivité thermique. Ces résultats sont en accord avec les observations rapportées par plusieurs chercheurs tels que B. Nagy et al. [63], dans leur étude sur l'effet des fibres naturelles sur les propriétés thermiques du béton, et V. Hospodarova et al. [64], dans leur recherche sur l'influence des fibres cellulaires.

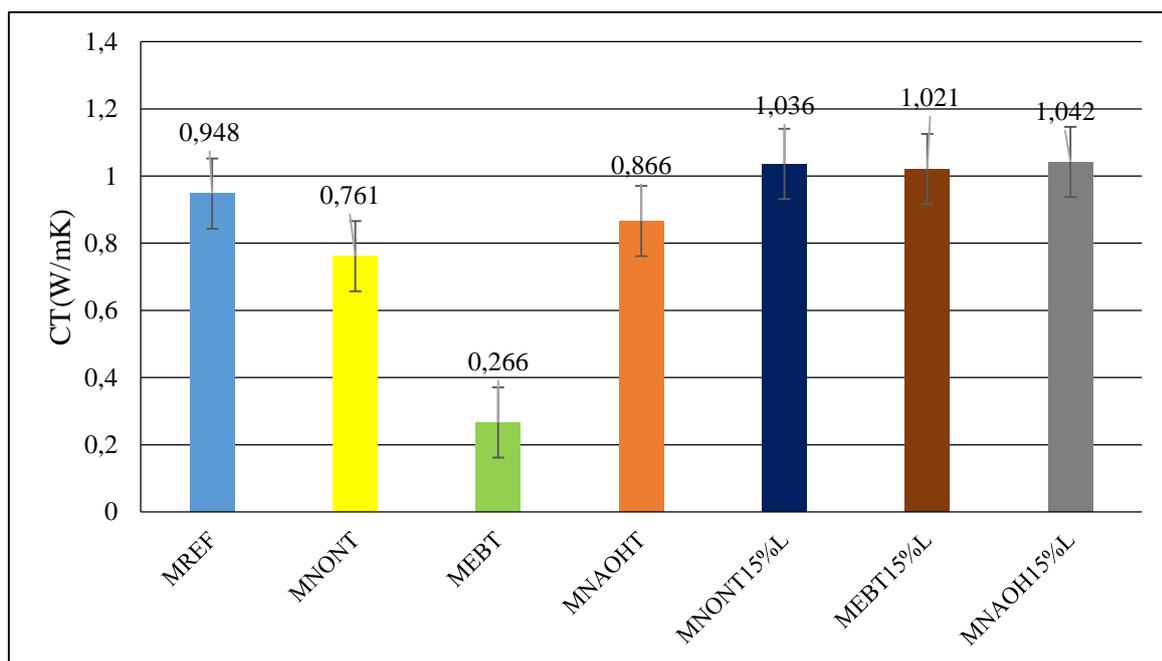


Figure 3.11 : influence des fibres palmier dattier et du laitier sur la conductivité thermique.

3.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mieux comprendre l'effet de l'incorporation des fibres palmier dattier sur les performances d'un mortier de réparation. A partir de cette étude expérimentale il en ressort les conclusions suivantes :

Ce chapitre a été essentiel pour approfondir notre compréhension de l'incorporation des fibres de palmier dattier et de leur impact sur les performances d'un mortier de réparation. Les conclusions de cette étude expérimentale sont les suivantes :

1. Les fibres de palmier dattier ont un effet positif sur la durabilité du mortier de réparation en réduisant son absorption d'eau. Cela contribue à préserver l'intégrité du mortier et à prolonger sa durée de vie.
2. L'incorporation de fibres de palmier dattier renforce la résistance à la flexion du mortier de réparation. Ces fibres agissent comme des renforts structurels, améliorant ainsi la capacité du mortier à supporter des charges et à résister aux contraintes.
3. Les fibres de palmier dattier réduisent la porosité et la conductivité thermique du mortier de réparation. Cela signifie que le mortier devient plus compact, ce qui limite la circulation de l'eau et de la chaleur à travers le matériau. Cette propriété est bénéfique pour la résistance aux intempéries et la performance thermique du mortier.

4 CONCLUSION GENERALE

cette étude approfondie sur l'incorporation des fibres de palmier dattier dans les mortiers autoplaçants de réparation a permis de mettre en évidence les nombreux avantages de ces fibres naturelles dans le domaine de la construction. Les résultats obtenus démontrent clairement que l'ajout de fibres de palmier dattier améliore les performances globales des mortiers de réparation.

- L'ajout de fibres de palmier dattier réduit également la conductivité thermique et augmente la masse volumique des mortiers, améliorant ainsi leurs performances globales.
- Les fibres de palmier dattier traitées par traitement alcalin (NaOH) présentent une meilleure adhérence et réduction de la porosité par rapport aux fibres non traitées.
- Les fibres de palmier dattier améliorent la résistance à la flexion des mortiers, en particulier les fibres traitées hydrauliquement ont montré les meilleurs résultats.
- L'ajout de fibres de palmier dattier réduit également la conductivité thermique et diminue la masse volumique des mortiers, améliorant ainsi leurs performances globales.
- L'utilisation de fibres de palmier dattier présente des avantages environnementaux, car elles sont des ressources locales, abondantes et renouvelables, contribuant ainsi à une approche durable de la construction.

Liste de références :

- [1] A. el M. Safhi, “Valorisation des sédiments de dragage dans des bétons autoplaçants : optimisation de la formulation et étude de la durabilité.,” p. 170, 2020.
- [2] W. Deboucha, N. Leklou, K. Abdelhafid, and A. Pertue, “L’effet du laitier de haut fourneau sur la porosité du mortier,” *Ajce*, vol. 35, no. 1, pp. 190–193, 2020.
- [3] C. Radhia, N. Ferhoune, and F. B. Bouabdallah, “Pathologies , diagnostic à l ’ aide de CND et techniques de réparation et protection des ouvrages en béton armé : état de l ’ art . Résumé : 1- Introduction ;,” no. December, 2018.
- [4] A. Talon and D. Génie, “To cite this version : Thèse S PECIALITE : G ENIE C IVIL Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction,” 2012.
- [5] M.A.Bouabdallah , A.Bouabdallah , A,Houari “DIAGNOSTIC DES DÉGRADATIONS DES OUVRAGES EN BÉTON-ARME ET METHODOLOGIE D’INTERVENTION (2) : CTC Ouest Organisme National de Contrôle Technique de la Construction,” no. December 2019, 2007.
- [6] U. M. El, I.B., “Pathologies des Constructions,” no. October, 2019, [Online]. Available <https://www.researchgate.net/publication/336287624>
- [7] R. Des et al., “Réparation Des Structures En Béton Armé : Le Pont D ’ Ain M â€ TM Lila Dans La Wilaya D ’ Oum El Bouaghi OEB (L ’ Est Algérien).,” no. November, pp. 0–7, 2020.
- [8] A. Boukhelkhal, “Comportement physico-mécanique et durabilité en climat chaud des mortiers autoplaçants a base d’ajouts binaires et ternaires,” Thèse Dr., p. 271, 2019.
- [9] K. Yahiaoui and M. Sadki, “Propriétés de mortier autoplaçant à base de différents types de sables , mémoire de master,” p. 70, 2017.
- [10] I.Feurgard “Développement d ’ une méthode de réparation des matériaux cimentaires fissurés par biocicatrisation « Thèse de doctorat, université de sherbrooke , 2017.
- [11] V.Lathem , “calculi de résistance des structures planes en béton armé de fibres “, Département de construction katholieke , université de Louvain, Belgique ,2017, no. 1, pp. 163–168.
- [12] B. Wang, “Application of NMR / MRI and gamma-ray attenuation analysis to the Repair of old concrete : investigation of moisture transport , impact on hydration of repair mortar and durability of repaired concrete,” 2016.

- [13] Inès Léana Tchegnina Ngassam “Durabilité des réparations des ouvrages d’art en béton ”université de Cape Town : HAL Id : tel-00981689,” no. November, 2015.
- [14] NF EN 1504-3 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, exigences, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 3 : réparation structurale et réparation non structurale, Février 2006
- [15] C. A. Anagnostopoulos, Cement–clay grouts modified with acrylic resin or methyl methacrylate ester: Physical and mechanical properties, *Construction and Building Materials* 21, p. 252–257, 2007
- [16] A. Momayez, M.R. Ehsani, A.A. Ramezani pour, H. Rajaie, Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials, *Cement and Concrete Research* 35, p. 748–757, 2005
- [17] M.H.F. Medeiros, P. Helene, S. Selmo, Influence of EVA and acrylate polymers on some mechanical properties of cementitious repair mortars, *Construction and Building Materials* 23, p. 2527–2533, 2009
- [18] J. Page, “Formulation et caractérisation d ’ un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée To cite this version : HAL Id : tel-01713160 pour des procédés de construction préfabriquée,” no. December 2017, p. 241, 2017.
- [19] D. Fili and S. Maritimes, “Présentée par : BENZIDANE RACHID Intitulé Étude du comportement en fatigue des plaques sandwichs à base de bois de palmier,” 2019.
- [20] M. A. O. Mydin, M. N. M. Nawi, R. A. Odeh, and A. A. Salameh, “Durability Properties of Lightweight Foamed Concrete Reinforced with Lignocellulosic Fibers,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 12, 2022, doi: 10.3390/ma15124259.
- [21] H. El-mously, M. Midani, and E. Atef, “Date Palm Byproducts in Fibers , Textiles and Composites Date Palm Byproducts in Fibers , Textiles,” no. May, pp. 28–30, 2023, doi:10.1007/978-981-99-0475-4.
- [22] K. J. Wong, B. F. Yousif, and K. O. Low, “The effects of alkali treatment on the interfacial adhesion of bamboo fibres,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 224, no. 3, pp. 139–148, 2010, doi: 10.1243/14644207JMDA304.
- [23] A. Au, C. Lam, and B. Tharmabala, “Investigation of shear resistance of steel bridge girders by load testing and monitoring of load response data under highway traffic conditions,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 36, no. 3, pp. 449–462, 2009, doi: 10.1139/L09-009.
- [24] L. Lods, “De la mise en œuvre à l’analyse du comportement mécanique de

composites techniques biosourcés recyclables polymères thermoplastiques / fibres continues de bambou,” no. January, 2022.

[25] “Doctorat en sciences : Génie mécanique Option : Génie Mécanique Contribution au développement des matériaux de construction à base des sous-produits du palmier dattier Présentée par : Tahar MASRI Soutenue publiquement le,” no. July, 2018.

[26] Chafei, S. Influence de différents traitements sur les comportements rhéologique et mécanique d’un composite cimentaire mortier-fibres de lin (Thèse de doctorat). Université de Caen Basse-Normandie, Caen, France,2014.

[27] Magniont, C. Contribution à la formulation et à la caractérisation d’un Écomatériau de construction à base d’agroressources (PhD thesis). Université Paul Sabatier - Toulouse III, Toulouse, France.2011

[28] Ramakrishna, G. et T. Sundararajan. Impact strength of a few natural fibre Reinforced cement mortar slabs: a comparative study. *Cement and Concrete Composites* 27, 547-553.2005.

[29] Toledo Filho, R. D., K. Ghavami, G. L. England, et K. Scrivener. Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. *Cement and Concrete Composites* 25, 185-196.2003.

[30] Savastano, H., V. M. John, V. Agopyan, et O. P. Ferreira. Weathering of Vegetable fibre-clinker free cement composites. *Materials and Structures* 35, 64-68.2002.

[31] S. P. Ribera, “Valorisation des fibres végétales dans des matériaux cimentaires : application dans les formulations de chapes fluides To cite this version : HAL Id : tel-04018330 2023.

[32] A.Slimani , S.Boudjemaa ,”caractérisation et quantification des déchets du palmier dattier dans la région d’adrar mémoire de master , université d’drar , 2019.

[33] M. Adamu, F. Alanazi, Y. E. Ibrahim, H. Alanazi, and V. C. Khed, “A Comprehensive Review on Sustainable Natural Fiber in Cementitious Composites: The Date Palm Fiber Case,” *Sustain.*, vol. 14, no. 11, 2022, doi: 10.3390/su14116691.

[34] L. B. Addis, Z. B. Sendekie, and N. Satheesh, “Degradation Kinetics and Durability Enhancement Strategies of Cellulosic Fiber-Reinforced Geopolymers and Cement Composites,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/1981755.

[35] A. Belkadi, S. Aggoun, C. Amouri, and A. Geuttala, “Effet de la nature des fibres végétales sur les performances mécaniques et les propriétés de transfert des mortiers à base de metakaolin,” *Ajce*, vol. 36, no. 1, pp. 550–553, 2018.

- [36] B. Wang, “Durability evolution of cement based repair materials used for corrosion-damaged steel reinforced concrete structures, Univeristy of vectoria pp. 1–23, 2018.
- [38] R. D. Toledo Filho, K. Ghavami, G. L. England, and K. Scrivener, “Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, no. 2, pp. 185–196, 2003.
- [37] H.-E. Gram, “Durability of natural fibres in concrete, Ce- ment- och betonginst,” CBI - Cement- Och Betonginstitutet, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP – Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, RISE, Munusamy Salai, K. K. Nagar, Chennai, 1983
- [39] J. Wei and C. Meyer, “Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites,” *Cement and Concrete Research*, vol. 73, pp. 1–16, 2015.
- [40] Taha, I., Steuernagel, L., Ziegmann, G. Optimization of the alkali treatment process of date palm fibres for polymeric composites. *Composite Interfaces*, 2007, v.14, n.7-9, p.669-684
- [41]] Balnois, E., Busnel, F., Baley, C., Grohens, Y. An AFM study of the effect of chemical treatments on the surface microstructure and adhesion properties of flax fibres. *Composite Interfaces*, 2007, v.14, n.7-9, p.715-731.
- [42] Joshy, M. K., Mathew, L., Joseph, R. Studies on interfacial adhesion in unidirectional isora fibre reinforced polyester composites. *Composite Interfaces*, 2007, v.14,
- [43] A. Soukaina, “Effet des traitements des fibres d ’ Alfa sur les propriétés mécaniques et d ’ adhésion dans un mortier de ciment,” no. April, 2023, doi: 10.26168/ajce.40.1.74.
- [44] M.L. Marques, F.H.M. Luzardo, F.G. Velasco, L.N. González, E.J. da Silva, W.G. de Lima, Compatibility of vegetable fibers with Portland cement and its relationship with the physical properties, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 20 (2016). <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n5p466-472>
- [45] M. Lahouioui, M. Fois, A. Ghorbal, L. Ibos, R. Ben, and A. B. E. N. Brahim, “Etude des performances thermiques et mécaniques de matériaux à matrice cimentaire renforcés par des fibres de bois de palmier,” vol. 2021, no. June 2021, pp. 10–13, 2016
- [46] S. Chafai, F. Khadraoui, M. Boutouil, M. Gomina, Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite, *Construction and Building Materials*. 79 (2015) p 229–235
- [47] A. Kareche, B. Agoudjil, B. Haba, A. Boudenne D. Palm and F. Wastes, Study on the Durability of New Construction Materials Based on Mortar Reinforced with Date Palm Fibers Wastes, vol. 11, no. 7, pp. 3801–3809, 2020, doi: 10.1007/s12649-019-00669-y.

- [48] B.Haba , Agoudjil, B., Boudenne, A., Benzarti, K.: Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm concrete. *Constr. Build. Mater.* 154, 963–971 ,2017.
- [49] Kriker, A., G. Debicki, A. Bali, M. M. Khenfer, et M. Chabannet. Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. *Cement and Concrete Composites* 27, 554-564.2005.
- [50] Ramli, M. and Dawood, Effects of palm fiber on the mechanical properties of lightweight concrete crushed brick. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*,
- [51] Ali, M.; Liu, A.; Sou, H. and Chouw,N.Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 30 (2012), pp. 814–825.
- [52] Boghossian, E. and Wegner, Use of flax fibres to reduce plastic shrinkage cracking in concrete *Cement and Concrete Composites*, 30 (2008), no. 10, pp. 929– 937.
- [53] Khelifa, M.R.; Leklou, N.; Bellal, T.; Hebert, R.L. and Ledesert, Is alfa a vegetal fiber suitable for making green reinforced structure concrete? , *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22 (2018), no. 6, pp. 686–706.
- [54] N. M. Amine and S. B. A. Khaled, “Effets du filler calcaire sur la durabilité de mortier auto-plaçant exposé aux attaques chimiques.pdf,” pp. 1–90, 2021.3 (2010), no. 2, pp. 489–493.
- [55] Menadi, Belkacem, Said Kenai, Sihem Hammat, and Jamal M. Khatib. “The Influence of the Fineness of Mineral Additions on Strength and Drying Shrinkage of Self-Compacting Mortars.” *Key Engineering Materials* 600 (March 2014): 367–374.
doi:10.4028/www.scientific.net/kem.600.367. *terfaces*, 2007, v.14.
- [56] M. Rachedi and A. Kriker, “THERMAL PROPERTIES OF PLASTER REINFORCED WITH DATE PALM FIBERS,” vol. 16, no. 2, pp. 259–266, 2020, doi: 10.2478/cee-2020-0025.
- [57]] W. Yahiaoui, A. Kenai, B. Menadi, and S. Kenai, “Mechanical Performance and Durability of Date Palm Fibers Repair Mortar,” *Open Civ. Eng. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 1– 16, 2022, doi: 10.2174/18741495-v16-e2207271.
- [58] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, and A. Boudenne, “Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building,” *Energy Build.*, vol. 81, no. October, pp. 98–104,
- [59] D. Taoukil, A. Albouardi, T. Ajzoul, A.H. Ezbakhe, Effect of the incorporation of wood wool on thermophysical properties of sand mortars, *KSCE Journal of Civil Engineering* 16 (2012) 1003–2010.

- [60] M. Chikhi, B. Agoudjila, A. Boudennec, A. Gherabliaa, Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation, *Energy and Buildings* 66 (2013) 267–273
- [61] Kriker, A., G. Debicki, A. Bali, M. M. Khenfer, et M. Chabannet. (2005). Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate. *Cement and Concrete Composites* 27, 554-564
- [62] Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Bétons de référence pour essais, 2000
- [63] BALÁZS, N, - SALEM, G. N. – DÓRA, S.: Thermal properties and modeling of fiber reinforced concretes. *Energy Procedia*, 78, 2015, pp. 2742-2747.
- [64] HOSPODAROVA, V. - STEVULOVA, N. - VACLAVIK, V. - DVORSKY, T.: Influence of Cellulosic Fibres on the Physical Properties of Fibre Cement Composites. *Materials Science and Engineering*, 251, 2017, pp. 1-9.
- [65]D. Riad, “Effet du dosage en superplastifiant sur les caractéristiques des mortiers élaborés à base d ’ additions minérales (à l ’ état frais et à l ’ état durci),” no. October 2012, 2012
- [69]D. Derdour and B. Mohammed, “Effect of date palm and polypropylene fibers on the characteristics of self- compacting concrete: comparative study,” no. January, 2023, doi: 10.3221/IGFESIS.64.03
- [70]F. De Technologie, S. Lachani, and C. Mouhous, “République Algérienne Démocratique Et Populaire Université de Blida 1
- [71] C. C. Test, T. Drilled, C. Ag-, C. Concrete, H. Concrete, and D. Mass, “ASTM C1585-13, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org,” vol. 41, no. 147, pp. 1–6, 2013, doi: 10.1520/C1585-11.2.
- [72] NBN EN 1015-6, “Méthodes d’essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 6: Détermination de la masse volumique apparente du mortier frais,” 1998.
- [73] “NF EN 24624(1542), Essai pour béton durci – Essai d’adhérence par arrachement.
- [74] A. Pl, “NF P 18-452 Mesure du temps d’écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres,” no. 1, 1988.
- [75] Domone PL, Jin J. Properties of mortar for self-compacting concrete. In: Skarendahl A, Petersson O, editors. *Proceedings of the 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete*; (1999). p. 109–20.

