

UNIVERSITE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de génie civil

Laboratoire de Géo-matériaux et génie civil

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Structures et Matériaux

**VALORISATION DES FIBRES VEGETALES LOCALES
DANS LES MATERIAUX CIMENTAIRES**

Par

Chahrazad MOUHOUS

Devant le jury composé de :

ABDESSEMED MOULOUD	Prof.	U. de Blida-1	Président
HADJ SADOK AHMED	Prof.	ENSH	Examineur
SAFIDDINE SALIM	M.C. A	U. de Médéa	Examineur
KENAI SAID	Prof.	U. de Blida-1	Rapporteur
YAHIAOUI WALID	M.C. A	U. de Blida-1	Co-Rapporteur

Blida, 2024.

المخلص

الهيكل الخرسانية المسلحة لها عمر محدود. تعتمد فعالية عمليات الترميم على خصائص منتج الإصلاح وطريقة الترميم والالتصاق بين مادة الترميم والخرسانة. يتم الإصلاح باستخدام الملاط الجاهز على نطاق واسع، على الرغم من أن هذا الملاط باهظ الثمن وغالبًا ما يحتوي على كميات صغيرة من الألياف الاصطناعية.

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير ملاط ترميم ذو فعالية عالية، أقل عرضة للتشقق مع تأثير بيئي منخفض يعتمد على 1% من ألياف نخيل التمر بطول 10 و 30 ملم. تم استعمال ألياف نخيل التمر إما خاماً أو تمت معالجتها بمحلول قلوي بتركيز 3٪، أو تم إخضاعها للمعالجة الحرارية المائية بالماء المغلي لمدة ساعة واحدة. كما تم استبدال الأسمت بنسبة 15% (الخبث أو البوزولان الطبيعي). تم دراسة مقاومة الانضغاط، مقاومة الانثناء، قوة الارتباط بواسطة اختبارات القص المائل والشد، الانكماش الكلي والتوصيل الحراري. تم تقييم ديمومة الملاط من خلال قياس المسامية المتاحة للماء والامتصاص الشعري وقياس نفاذية الكلوريد ومقاومة دورات التجفيف والترطيب.

تظهر النتائج انخفاضاً كبيراً في الانكماش المسجل نتيجة لإضافة ألياف نخيل التمر المعالجة. إن استبدال الأسمت بالخبث والبوزولان الطبيعي يقلل بشكل كبير من نفاذية أيونات الكلوريد. يوضح قياس الالتصاق أن دمج ألياف نخيل التمر يحسن إجهاد الالتصاق ومقاومة القص المائل. مع ملاحظة يكون أفضل في حالة الألياف القصيرة (10 مم).

الكلمات المفتاحية: ملاط الترميم، البوزولان الطبيعي، الخبث، الالتصاق، ألياف نخيل التمر، المعالجة.

RESUME

Les ouvrages en béton armé ont une durée de vie limitée. L'efficacité de la réparation dépend des caractéristiques du produit de réparation, de la méthode de réparation et de l'adhérence entre le matériau de réparation et le béton. La réparation par mortier prêt à l'emploi est amplement utilisée bien que ces mortiers soient onéreux et incorporent souvent de petites quantités de fibres synthétiques.

Cette étude vise à développer un mortier de réparation durable, moins susceptible à la fissuration, à faible impact environnemental à base de 1% de fibres de palmier dattier (PD) de 10 et 30 mm de longueur. Les fibres de palmier dattier (PD) ont été utilisées soit brutes, soit traitées par une solution alcaline à une concentration de 3%, soit soumises à un traitement hydrothermique avec de l'eau bouillante pendant une heure. Des mortiers de réparation à base de 15% d'ajout cimentaire (laitier (L) et pouzzolane naturelle (PZ)) et 1% de fibres de palmier dattier brutes ont été fabriqués. La résistance à la compression, la résistance à la flexion, la résistance d'adhérence par des essais de cisaillement oblique et d'arrachement, retrait total et la conductivité thermique ont été étudiés. La durabilité du mortier a été évaluée par la mesure de la porosité accessible à l'eau, l'absorption capillaire, la mesure de la pénétration des ions chlorures et la résistance aux cycles séchage-mouillage.

Les résultats obtenus montrent une réduction importante du retrait, lorsque des fibres de PD traitées sont ajoutées. La substitution du ciment par du laitier et de la pouzzolane naturelle diminue significativement la perméabilité aux ions chlorures. La mesure d'adhérence montre que l'incorporation des fibres de PD améliore la contrainte d'adhérence et la résistance au cisaillement oblique, avec une meilleure adhérence pour le cas des fibres courtes (10 mm).

Mots clés : mortier de réparation, pouzzolane naturelle, laitier, adhérence, fibres de palmier dattier, traitement.

ABSTRACT

Reinforced concrete structures have a limited lifespan. Repair effectiveness depends on the characteristics of the repair product, the repair method and the adhesion between the repair material and the concrete. Repair using ready-mix mortar is widely used, although these mortars are expensive and often contains small amounts of synthetic fibres.

This study aims to develop a durable repair mortar, less susceptible to cracking, with low environmental impact based on 1% date palm fibers (DP) of 10 and 30 mm in length. Date palm fibers were used either raw, treated by an alkaline solution at a concentration of 3%, or subjected to hydrothermal treatment with boiling water for one hour. Repair mortars based on 15% cement addition (Slag (SL) and natural pozzolan (PZ)) and 1% raw date palm fibers were made. Compressive strength, flexural strength, pull-off and slant shear strengths, total shrinkage, and thermal conductivity were studied. The durability of the mortar was evaluated by measuring the porosity accessible to water, capillary absorption, measuring the penetration of chlorides and resistance to drying-wetting cycles.

The results obtained show a significant reduction in shrinkage when treated DP fibers are added. The substitution of cement by slag and natural pozzolan significantly reduces the permeability to chloride ions. The pull-off adhesion measurement shows that the incorporation of DP fibers improves the adhesion stress and the slant shear strength, with better adhesion for the case of short fibers (10 mm).

Keywords: repair mortar, slag, natural pozzolan, adhesion, date palm fibers, treatment.

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté afin d'achever ce travail.

J'exprime ma très sincère reconnaissance à mon encadreur, Monsieur Said Kenai, Professeur à l'université de Blida 1, pour son suivi, ses conseils pleins de sens, sa supervision, ses encouragements, ses suggestions, son aide et son encadrement efficace qui m'ont aidé à accomplir mes travaux de recherche.

Mes sincères remerciements vont également à mon Co-encadreur Monsieur Walid Yahiaoui Maître de Conférences à l'université de Blida 1, pour sa bienveillance disponibilité, la diversité des angles d'approches qu'il m'a suggérés aussi pour ses conseils toujours encourageants et motivants, et m'avoir donné les moyens de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

Un grand remerciement est destiné à Monsieur Belkacem Menadi, Professeur à l'université de Blida 1, et à Monsieur Khaled Grine Professeur à l'université de Blida 1, pour leur précieux conseils et leurs observations précises.

Je voudrais aussi remercier tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail :

Professeur Abdessemed Mouloud	Président du jury de thèse
Professeur Hadj Sadok Ahmed	Examineur de thèse
Docteur Safiddine Salim	Examineur de thèse

Je remercie vivement Madame Chahrazed Ferroukhi pour son énorme aide, sa grande disponibilité et ses encouragements.

Je tiens à remercier toute l'équipe du laboratoire de Génie civil et Géo-matériaux de l'université de Blida 1. Mes remerciements s'adressent aussi aux enseignants du département de génie civil. Pareillement je remercié l'équipe du laboratoire CRAPC de l'université de Laghouat, particulièrement Monsieur Djilali pour son excellent accueil.

Je remercie également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse.

Je suis reconnaissante envers ma famille qui m'a toujours soutenu et encouragé fortement durant des années pour conclure ce travail.

Enfin, ma dernière pensée est pour ma mère. Merci infiniment pour ta patience, pour ton aide, ton soutien continu, et en particulier tes prières, sans lesquelles je ne serais jamais arrivé là où je suis maintenant.

TABLE DES MATIÈRES

RESUME	1
REMERCIEMENTS	5
TABLE DES MATIÈRES.....	7
Liste des figures.....	11
Liste des tableaux.....	15
Liste des abréviations.....	17
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	19

CHAPITRE I :

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : PATHOLOGIE ET MORTIER DE REPARATION

1.1. Introduction	21
1.2. Facteurs de dégradation du béton armé.....	21
1.3. Corrosion des armatures.....	22
1.3.1. Carbonatation du béton.....	23
1.3.2. Pénétration des ions chlorures	24
1.4. Réparation des ouvrages en béton armée	24
1.5. Type de mortiers de réparation	26
1.5.1. Mortiers à base de liants hydrauliques avec ajouts (LHA) :.....	27
1.5.2. Mortiers à base de liants hydrauliques modifiés par des polymères organiques (LHM) :.....	27
1.5.3. Mortiers à base de résines synthétiques (LR) :.....	27
1.6. Méthode d'application du mortier de réparation.....	28
1.7. Interaction mortier de réparation et support.....	29
1.7.1. Compatibilité de perméabilité	30
1.7.2. Compatibilité chimique	31
1.7.3. Compatibilité électrochimique	31
1.7.4. Compatibilité déformationnelle.....	31
1.7.5. Synthèse sur les compatibilités.....	35
1.8. Adhésion ou adhérence de l'interface	36
1.9. Mesure d'adhérence	39
1.10. Conclusion.....	41

CHAPITRE II :
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : FIBRES NATURELLES ET LEURS IMPACTS
SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES

2.1. Introduction	42
2.2. Définition et origine des fibres naturelles	42
2.3. Fibres végétales	43
2.3.1. Définition.....	43
2.3.2. Classification des fibres végétales	43
2.3.3. Structure morphologique d'une fibre végétale	44
2.3.4. Composition chimique des fibres végétales	46
2.3.5. Propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales.....	49
2.3.6. Avantages et inconvénients des fibres végétales.....	50
2.3.7. Disponibilité des fibres végétales en Algérie	51
2.4. Fibres de palmier dattier.....	51
2.4.1. Généralité et définition	51
2.4.2. Constituants principaux du palmier dattier.....	52
2.4.3. Types de fibre de palmier dattier	54
2.4.4. Caractéristiques des fibres de palmier dattier.....	54
2.4.5. Répartition géographique du palmier dattier	58
2.5. Effet des fibres végétales sur les mortiers et bétons à l'état frais	59
2.6. Effet des fibres végétales sur les matériaux et bétons à l'état durci.....	62
2.7. Effet des fibres sur la durabilité des composites cimentaires	70
2.8. Méthodes d'amélioration de la durabilité des composites à base de fibres Végétales	72
2.8.1. Modification de la matrice.....	72
2.8.2. Traitement des fibres	73
2.9. Conclusion.....	77

CHAPITRE III :
MATERIAUX ET ESSAIS

3.1. Introduction	79
3.2. Caractéristiques des matériaux utilisés	79
3.2.1. Ciment	79
3.2.2. Granulats.....	80
3.2.3. Ajouts minéraux	80
3.2.4. Eau de gâchage	82

3.2.5. Superplastifiant.....	82
3.3. Caractéristiques des fibres végétales utilisés	82
3.1. Traitement des fibres.....	84
3.1.1. Traitement chimique (traitement alcalin T1).....	84
3.1.2. Traitements hydrothermique (l'eau bouillante T2)	85
3.2. Etude de l'effet du traitement sur les propriétés des fibres de palmier datier	86
3.2.1. Analyse thermogravimétrique	86
3.2.2. Analyse par diffraction des rayons X	86
3.2.3. Analyse microscopique par balayage	87
3.3. Essais réalisés sur mortier à l'état frais.....	88
3.3.1. Essai d'étalement à la table à secousse.....	88
3.3.2. Maniabilimètre LCPC	89
3.3.3. Masses volumiques apparentes et Teneur en air occlus	90
3.4. Formulation du mortier de réparation	91
3.5. Confection des éprouvettes de mortier.....	91
3.6. Essais réalisés sur mortier à l'état durci.....	94
3.6.1. Résistance à la compression et à la flexion sur mortier.....	94
3.6.2. Absorption capillaire	95
3.6.3. Porosité accessible à l'eau	97
3.6.4. Retrait total	99
3.6.5. Conductivité thermique	101
3.6.6. Résistance au cycles séchage-mouillage	101
3.7. Formulation du béton	102
3.8. Préparation des dalles et éprouvettes cylindrique	103
3.9. Essai d'adhérence par arrachement.....	107
3.10. Essai d'adhérence par cisaillement oblique	108
3.11. Pénétration aux ions chlores.....	109
3.12. Récapitulatif des essais réalisés	111

CHAPITRE IV :

RESULTATS ET DISCUSSION : EFFET DES FIBRES DE PALMIER DATTIER SUR LES PROPRIETES DU MORTIER DE REPARATION

4.1. Introduction	114
4.2. Effet des traitements sur les propriétés de fibres de palmier dattier	114
4.2.1. Analyse thermogravimétrique	114

4.2.2. Analyse par diffraction des rayons X	115
4.2.3. Analyse microscopique par balayage	117
4.3. Effet des fibres de palmier dattier sur les propriétés du mortier à l'état frais	119
4.3.1. Etalement	119
4.3.2. La maniabilité en LCPC	120
4.3.3. Masse volumique	122
4.3.4. Air occlus.....	123
4.4. Effet des fibres de palmier dattier sur les propriétés du mortier à l'état durci ...	124
4.4.1. Résistance à la compression	124
4.4.2. Résistance à la flexion	126
4.4.3. Porosité accessible à l'eau	128
4.4.4. Absorption capillaire	131
4.4.5. Retrait total	134
4.4.6. Conductivité thermique	136
4.4.7. Adhérence par cisaillement oblique	139
4.4.8. Adhérence par arrachement (Pull-off).....	143
4.4.9. Pénétration aux ions chlores	145
4.4.10. Résistance aux cycles séchage / mouillage.....	147
4.5. Conclusion.....	150
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	152
RÉFÉRENCES.....	155

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : PATHOLOGIE ET MORTIER DE REPARATION

Figure 1. 1: Sources des dégradations des bétons	21
Figure 1. 2 : Mécanisme de corrosion de l'acier dans le béton	23
Figure 1. 3 : Mécanisme de carbonatation au niveau interstitielle du béton	23
Figure 1. 4 : Concept d'une réparation.	24
Figure 1. 5 : Pourcentage de réussite ou d'échec de la réparation des ouvrages d'art en fonction du temps après la réparation	25
Figure 1. 6 : Principaux modes de défaillance de la réparation	26
Figure 1. 7 : Projection du mortier par voie sèche (à gauche), voie humide (à droite) ..	29
Figure 1. 8 : Critères de compatibilité entre le matériau de réparation et le support à réparer	30
Figure 1. 9 : Module élastique du rechargement et support	32
Figure 1. 10: Schéma des contraintes de retrait restreint dans les réparations	34
Figure 1. 11 : Schéma des concepts d'adhésion et d'adhérence	36
Figure 1. 12 : Principaux mécanismes d'adhésion	37
Figure 1. 13 : Représentation schématique des mécanismes contrôlant l'adhésion	38
Figure 1. 14 : Trois modes de rupture	39
Figure 1. 15 : Diverses méthodes d'essai pour évaluer la force d'adhérence	40

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : FIBRES NATURELLES ET LEURS IMPACTS SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES

Figure 2. 1 : Origine des fibres naturelles.....	42
Figure 2. 2 :Types de forme des fibres végétales	43
Figure 2. 3 : Classification des fibres végétales	44
Figure 2. 4 : Représentation schématique de la plante à la cellule fibreuse	44
Figure 2. 5 : Description schématique de la structure d'une fibre végétale et arrangement des microfibrilles autour du lumen	45
Figure 2. 6 : Structure schématique d'une fibre de biomasse lignocellulosique contenant de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine	46
Figure 2. 7 : Représentation schématique de la structure de la cellulose	47
Figure 2. 8: Structure d'une chaîne d'acide polygalacturonique	48
Figure 2. 9: Composition chimique des différents types des fibres végétales.....	49
Figure 2. 10 : Gisement de fibres végétales en Algérie	51

Figure 2. 11: Palmier dattier.	52
Figure 2. 12: Présentation schématique d'un palmier dattier	53
Figure 2. 13: Images MEB d'un échantillon de pétiole dans une direction transversale (a) 500 μm , (b) 100 μm et (c) 50 μm	54
Figure 2. 14: Micrographies MEB montrant la section transversale d'une fibre typique dans les pétioles de palmier dattier (a) 100 μm , (b) 100 μm et (c) 20 μm	55
Figure 2. 15: Micrographie d'une fibre de palmier dattier	55
Figure 2. 16: Résistance à la traction des différentes variétés de LDPF	57
Figure 2. 17 : Module d'Young des différentes variétés de LDPF	57
Figure 2. 18 : Résistance à la traction des différents types de fibres	58
Figure 2. 19 : Répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya en 2014	59
Figure 2. 20 : Temps d'écoulement de mortiers renforcés de fibres de lin	59
Figure 2. 21 : Etalement des différents mortiers de réparation.....	60
Figure 2. 22 : Effet de l'addition de fibres MDF sur le développement de la chaleur d'hydratation des composite bois-ciment	61
Figure 2. 23 : Résistances à la flexion en fonction de la teneur en fibres pour les composites renforcés avec : (a) fibres de riz et (b) fibres de bambou à 28 et 100 jours. 63	63
Figure 2. 24 : Propriétés mécaniques des composites renforcés avec les fibres de palmier à huile à l'âge de 90 jours	64
Figure 2. 25 : Résistance à la compression en fonction du pourcentage et longueurs des fibres	65
Figure 2. 26 : Résistance moyenne en compression des bétons à 28 jours.....	65
Figure 2. 27 : Influence du taux de fibres de lin sur la résistance en compression du mortier	66
Figure 2. 28 : Résistances à la flexion des composites renforcés avec 4% de fibres végétales comparativement aux échantillons de référence	66
Figure 2. 29 : Effet de la fraction volumique en microfibre sur les propriétés mécanique du mortier.....	67
Figure 2. 30 : Evolution de $\sigma_{rupture}$ et de E en fonction de la teneur en fibre	68
Figure 2. 31: Conductivité thermique des composites en fonction de la teneur en fibres du palmier dattier	68
Figure 2. 32: Conductivité thermique des mortiers renforcés avec les fibres végétales de la noix de coco (C(X)) et du palmier à huile (P(X)).....	69
Figure 2. 33: Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en fibres après 192 h de séchage.....	69
Figure 2. 34: Résistance à la compression avant séchage mouillage	70
Figure 2. 35: Résistance à la compression après séchage mouillage	70
Figure 2. 36: Variation de volume pendant les cycles de mouillage séchage.....	71
Figure 2. 37: Variation de la perméabilité aux ions chlorure	71
Figure 2. 38: Observations microscopiques de fibres de lin brutes (à gauche) et traitées au plasma atmosphérique (à droite)	74
Figure 2. 39: Structure typique d'une fibre cellulosique (i) avant traitement alcalin et (ii) après traitement.....	75

CHAPITRE III : MATERIAUX ET ESSAIS

Figure 3. 1: Courbe granulométrique des granulats utilisés.	80
Figure 3. 2 : Additions minérales : A) Laitier et B) Pouzzolane naturelle.	81
Figure 3. 3: Procédure de préparation des fibres de palmier dattier.	83
Figure 3. 4: Protocole du traitement alcalin.	85
Figure 3. 5: Protocole du traitement hydrothermique.	85
Figure 3. 6 : Analyseur thermogravimétrique Mettler Toledo.	86
Figure 3. 7: Diffractomètre à rayons X type Bruker AXS D8 Advance.	87
Figure 3. 8: Microscopie électronique à balayage FEI Quanta 200.	88
Figure 3. 9 : Etalement de mortier avec la table à secousse.	89
Figure 3. 10 : Ecoulement du mortier avec LCPC.	89
Figure 3. 11 : Mesure des masses volumiques apparentes des mortiers.	90
Figure 3. 12 : Mesure de l'air occlus à l'aide d'un aéromètre à mortier.	90
Figure 3. 13 : Malaxeur à mortier.	91
Figure 3. 14 : Table à chocs.	92
Figure 3. 15 : Moule pour essai sur mortier.	92
Figure 3. 16 : Essai de résistance à la flexion.	94
Figure 3. 17 : Essai de résistance à la compression.	95
Figure 3. 18 : Essai d'absorption capillaire.	96
Figure 3. 19 : Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes.	98
Figure 3. 20 : Balance hydrostatique.	98
Figure 3. 21: Plots collés sur l'éprouvette.	100
Figure 3. 22 : Comparateur de mesure de déformation (précision 1 μ).	100
Figure 3. 23 : Essai de la mesure de conductivité thermique.	101
Figure 3. 24 : Essai de séchage- mouillage : A) Séchage et B) Mouillage.	102
Figure 3. 25 : Carottage des dalles.	107
Figure 3. 26 : Appareil d'arrachement utilisé.	108
Figure 3. 27 : Essai d'adhérence par cisaillement oblique.	109
Figure 3. 28 : Appareil de mesure de la perméabilité aux ions chlorures.	110
Figure 3. 29 : Schéma d'ensemble de l'essai de perméabilité aux ions chlorures.	111
Figure 3. 30: Organigramme des différents essais réalisés.	113

CHAPITRE IV :

RESULTATS ET DISCUSSION : EFFET DES FIBRES DE PALMIER DATTIER SUR LES PROPRIETES DU MORTIER DE REPARATION

Figure 4. 1 : Courbes (a) ATG et (b) DTG des fibres de palmier dattier non traitées et traitées.	115
Figure 4. 2 : Diffractogrammes des fibres de palmier dattier brutes et traitées.	116
Figure 4. 3: Indice de cristallinité des fibres de palmier dattier brutes et traitées.	116

Figure 4. 4 : MEB de la surface de fibre de palmier dattier : (a) brute (b) traitée par NaOH (c) traitée par l'eau bouillante.....	117
Figure 4. 5 : MEB de la coupe transversale de la fibre de palmier dattier.....	118
Figure 4. 6: Etalements des différents mortiers de réparation.	120
Figure 4. 7: Ecoulement des différents mortiers de réparation.	121
Figure 4. 8: Masse volumique des différents mortiers de réparation.....	122
Figure 4. 9: Teneur en air des différents mortiers de réparation.....	123
Figure 4. 10: Résistance à la compression des différents mortiers de réparation à 28 jours.	125
Figure 4. 11: Résistance à la compression des différents mortiers de réparation à 90 jours.	125
Figure 4. 12: Résistance à la flexion des différents mortiers de réparation à 28 jours.	128
Figure 4. 13: Résistance à la flexion des différents mortiers de réparation à 90 jours.	128
Figure 4. 14: Porosité accessible des différents mortiers de réparation.....	130
Figure 4. 15: Corrélation entre la porosité et la résistance à la compression.....	130
Figure 4. 16: Corrélation entre la porosité et l'air occlus.	130
Figure 4. 17: Absorption capillaire des mortiers avec des fibres PD de 10 mm.....	132
Figure 4. 18: Absorption capillaire des mortiers avec des fibres PD de 30 mm.....	132
Figure 4. 19: Sorptivité initiale des différents mortiers de réparation.	134
Figure 4. 20: Sorptivité secondaire des différents mortiers de réparation.	134
Figure 4. 21: Retrait total des mortiers avec des fibres PD de 10 mm.	135
Figure 4. 22: Retrait total des mortiers avec des fibres PD de 30 mm.	136
Figure 4. 23: Conductivité thermique des différents mortiers de réparation.....	137
Figure 4. 24: Corrélation entre la conductivité thermique et la résistance à la compression.	138
Figure 4. 25: Corrélation entre la conductivité thermique et la teneur en air.	138
Figure 4. 26 : Corrélation entre la conductivité thermique et la porosité accessible à l'eau.	139
Figure 4. 27: Résistance au cisaillement oblique des différents mortiers de réparation.	140
Figure 4. 28: MEB d'interface fibre/matrice : (a) Brutes, (b) Traitées avec l'eau bouillante, (c) Traitées avec NaOH.	141
Figure 4. 29: Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance au cisaillement oblique.	142
Figure 4. 30: Modes de rupture observés après l'essai de cisaillement oblique.....	142
Figure 4. 31: Résistance d'adhérence par arrachement des différents mortiers.....	144
Figure 4. 32: Modes de rupture : (a) dans le substrat, (b) dans le mortier de réparation, (c) à l'interface béton/mortier de réparation, (d) à l'interface époxy/disque.....	144
Figure 4. 33: Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance d'adhérence par arrachement.....	145
Figure 4. 34: Perméabilité aux ions chlorés des différents mortiers.....	147
Figure 4. 35: Résistance à la compression du mortier avec des fibres PD de 10 mm après 26 cycles de séchage mouillage.	148

Figure 4. 36: Résistance à la compression du mortier avec des fibres PD de 30 mm après 26 cycles de séchage mouillage.	148
Figure 4. 37: Résistance à l'arrachement du mortier avec des fibres PD de 10 mm après 26 cycles de séchage mouillage.	149
Figure 4. 38: Résistance à l'arrachement du mortier avec des fibres PD de 30 mm après 26 cycles de séchage mouillage.	150

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : PATHOLOGIE ET MORTIER DE REPARATION

Tableau 1. 1: Propriétés des matériaux de réparation de béton typiques.....	28
Tableau 1. 2: Compatibilité rechargement-support souhaité	35

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : FIBRES NATURELLES ET LEURS IMPACTS SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES

Tableau 2. 1: Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales ..	50
Tableau 2. 2 : Avantages et inconvénients des fibres végétales	50
Tableau 2. 3 : Propriétés physiques de fibres de palmier dattier	56
Tableau 2. 4 : Proportions des fibres et des ajouts minéraux dans les mortiers	60
Tableau 2. 5 : Temps de prise des pâtes de ciment renforcés aux fibres de chanvre.....	61
Tableau 2. 6 : Paramètres influençant les propriétés des composites à matrice minérale renforcés par des fibres végétales	62
Tableau 2. 7 Propriétés physiques des composites renforcés de fibres végétales à 28 jours	63
Tableau 2. 8 : Bibliographie relative à l'effet du traitement alcalin sur les propriétés des fibres	76
Tableau 2. 9 : Propriétés mécaniques de la fibre de palmier après divers traitements ..	77

CHAPITRE III : MATERIAUX ET ESSAIS

Tableau 3. 1: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment	79
Tableau 3. 2: Composition chimique du ciment	79
Tableau 3. 3: Analyse chimique de laitier d'El Hadjar	81
Tableau 3. 4 : Composition chimique de la pouzzolane	81
Tableau 3. 5 : Caractéristiques du superplastifiant utilisé	82
Tableau 3. 6 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales	84
Tableau 3. 7 : Proportions des mélanges de mortiers de réparation à base de fibres de palmier dattier	93
Tableau 3. 8 : Proportions du mélange du béton de substrat	103
Tableau 3. 9 : protocole de la préparation des dalles.....	104
Tableau 3. 10 : Déroulement de réalisation des éprouvettes cylindriques.....	105
Tableau 3. 11 : Séquence de réalisation des éprouvettes cylindriques	106
Tableau 3. 12 : Valeurs limites pour l'essai de perméabilité aux ions chlorés.....	111

CHAPITRE IV :
RESULTATS ET DISCUSSION : EFFET DES FIBRES DE PALMIER DATTIER
SUR LES PROPRIETES DU MORTIER DE REPARATION

Tableau 4. 1: Etalements des différents mortiers de réparation étudiés	120
Tableau 4. 2: Ecoulement des différents mortiers de réparation étudiés	121
Tableau 4. 3: Masse volumique des différents mortiers de réparation étudiés.....	122
Tableau 4. 4: Teneur en air des différents mortiers de réparation étudiés.....	123
Tableau 4. 5: Résistance à la compression des différents mortiers de réparation étudiés	126
Tableau 4. 6: Résistance à la flexion des différents mortiers de réparation étudiés	127
Tableau 4. 7: Porosité accessible des différents mortiers de réparation étudiés.....	131
Tableau 4. 8: Conductivité thermique des différents mortiers de réparation étudiés ...	138
Tableau 4. 9: Résistance au cisaillement oblique des différents mortiers de réparation étudiés	140
Tableau 4. 10: Résistance d'adhérence par arrachement des différents mortiers.....	143
Tableau 4. 11: Résistance d'adhérence des différents mortiers de réparation étudiés	145
Tableau 4. 12: Résistance aux ions chlorés des différents mortiers de réparation étudiés	146

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ATG	Analyse thermogravimétrique
C ₃ A	Aluminate tri-calcique
C ₆ H ₁₀ O ₅	Formule moléculaire du glucides
Ca(OH) ₂	Portlandite
C _a CO ₃	Carbonate de calcium calcaire
CEM I 42,5	Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5
Cl ⁻	Ion de chlorure
CO ₂	Oxyde de carbone
CrI	Indice de cristallinité
C-S-H	Silicates de calcium hydratés
CT	Conductivité thermique
CTF	Fibres traitées chimiquement
DRX	Diffraction des rayons X
E/L	Eau/Lian
F _e	Fer
F _e ²⁺	Ion de fer
F _e (OH) ₂	Hydroxyde de fer
F _{f,max}	Charge maximale en flexion provoquant la rupture (N)
FP1	Fibre de palmier dattier de 1cm
FP3	Fibre palmier dattier de 3cm
H ₂ O	Eau
kN	Kilo Newton
MEB	Microscopie électronique à balayage
Mf	Module de finesse
MMF	Fibres modifiées mécaniquement
MR	Mortier de référence
NaOH	Hydroxyde de soude
O ₂	Oxygène

OH^-	Ion d'hydroxyle
pH	Potentiel d'hydrogène
PZ	Pouzzolane naturelle
R _c	Résistance à la compressions
R _f	Résistance en flexion, (MPa)
S	Coefficient de sorptivité du spécimen, (cm /s ^{1/2})
S _i	Coefficient de sorptivité initiale
S _s	Coefficient de sorptivité secondaire
S/C	Sable/Ciment
SP	Superplastifiant
T1	Traitement par NaOH
T2	Traitement par l'eau bouillante
ρ _{abs}	Masse volumique absolue, (kg/m ³)
ρ _{app}	Masse volumique apparente, (kg/m ³)
τ	Contrainte de cisaillement, (N/mm ²)
τ _a	Contrainte d'arrachement, (N/mm ²)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde en raison de son faible coût, ses propriétés mécaniques et sa facilité de mise en œuvre. Cependant, comme tout matériau, le béton vieillit. Au fil du temps, il subit des transformations et finit par se dégrader. Les dommages peuvent apparaître lors du chargement accidentel ou à cause des défauts de conception et de mise en œuvre, ou à des attaques externes (carbonatation, réaction alcali-granulats, attaques des sulfates...etc.). Par conséquent, des travaux de réparation sont indispensables.

Les réparations des dégradations des surfaces de béton souvent réalisé par un mortier de réparation prêt à emploi. Il est estimé que plusieurs projets de réparation sont caractérisés par leurs échecs après quelques années seulement. Dans ce cas de réparations qui ne sont pas durables, il est indispensable d'entamer un renouvellement de la réparation à des délais très courts et des coûts supplémentaires. Ceci est dû à un manque d'adhérence du mortier de réparation au support, à la fissuration du mortier de réparation et le manque de durabilité aux agressions externes à long terme.

Cette problématique représente un problème technologique et économique important et impose les maîtres d'ouvrages à chercher des solutions immédiates et efficaces afin d'augmenter la durée de vie de leurs ouvrages et d'optimiser les coûts de maintenance. De ce fait, le choix adéquat du mortier de réparation, la méthode de réparation de surface et la mise en œuvre assurent la réussite de l'opération de réparation. D'où, les attentions se concentrent vers le perfectionnement des caractéristiques du mortier de réparation par le changement de leur composition.

Le secteur du bâtiment produit de grandes quantités de déchets et émet beaucoup de gaz à effet de serre. De ce fait les ressources renouvelables prennent une grande importance dans l'utilisation comme matériaux de construction pour améliorer la durabilité de l'industrie de la construction. Le renforcement des matériaux cimentaires par les fibres végétales est nouveau en le comparant aux fibres d'amiantes, d'aciers ou synthétiques. Bien que, les fibres végétales se distinguent des autres types de fibres, par une faible densité, un faible coût et une large disponibilité.

Les travaux sur les mortiers de réparation traitent principalement les performances mécaniques et la durabilité. Peu de travaux existent sur les performances des mortiers de

réparation contenant des fibres naturelles traitées et non traitées dans des milieux agressifs.

L'objectif de ce travail est d'analyser les performances d'un mortier de réparation à base de fibres de palmier dattier traitées et non traitées, et avec l'utilisation de deux ajouts cimentaires, la pouzzolane naturelle et le laitier de hauts fourneaux.

Les propriétés étudiées sont la résistance à la compression et à la flexion, absorption capillaire, conductivité thermique, retrait total, résistance aux cycles séchage-mouillage, mesure de la pénétration des ions chlorures et la mesure d'adhérence par arrachement et par cisaillement oblique.

Ce manuscrit s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à un état de l'art relatif aux différents facteurs de dégradation du béton armé, la réhabilitation des ouvrages en béton armé, en se basant sur l'utilisation du mortier de réparation et finalement l'interaction mortier de réparation et support.

Le deuxième chapitre présente également une étude bibliographique sur les fibres naturelles, leurs propriétés et leurs effets sur les matériaux cimentaires.

Le troisième chapitre résume les propriétés des matériaux utilisés et les essais réalisés sur le mortier de réparation à l'état frais et durci à savoir, mesure de l'ouvrabilité et la teneur en air, résistance à la compression et à la flexion, absorption capillaire, retrait total, conductivité thermique, résistance aux cycles séchage-mouillage, mesure de la pénétration des ions chlorure et la mesure d'adhérence par arrachement et par cisaillement oblique.

Le quatrième chapitre englobe l'étude de l'impact des fibres de palmier dattier brutes et traitées sur les propriétés du mortier de réparation.

En fin, une conclusion générale de cette étude expérimentale est donnée. Des perspectives pour continuer ce travail sont proposés.

CHAPITRE I :
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE :
PATHOLOGIE ET MORTIER
DE REPARATION

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : PATHOLOGIE ET MORTIER DE REPARATION

1.1. Introduction

Après plusieurs années d'utilisation, il est courant d'apercevoir des structures en béton nécessitant des réparations, d'entretien, ou des reconstructions partielles, à la suite de plusieurs dégradations subis durant l'exploitation. Dans ce chapitre, nous présentons les différents facteurs de dégradation du béton armé et l'utilisation des mortiers de réparation, leurs méthodes d'application et leur interaction avec le support.

1.2. Facteurs de dégradation du béton armé

De nombreux ouvrages sont exposés aux diverses agressions à long terme. Généralement, les dégradations du béton sont classées selon leurs origines telles que des causes d'ordre chimique (carbonatation, corrosion...), d'ordre physique (cycle gel - dégel, action du retrait ...) et d'ordre mécanique (surcharge, séisme, explosion, incendie...) et d'autres défauts (Figure 1.1) [1].

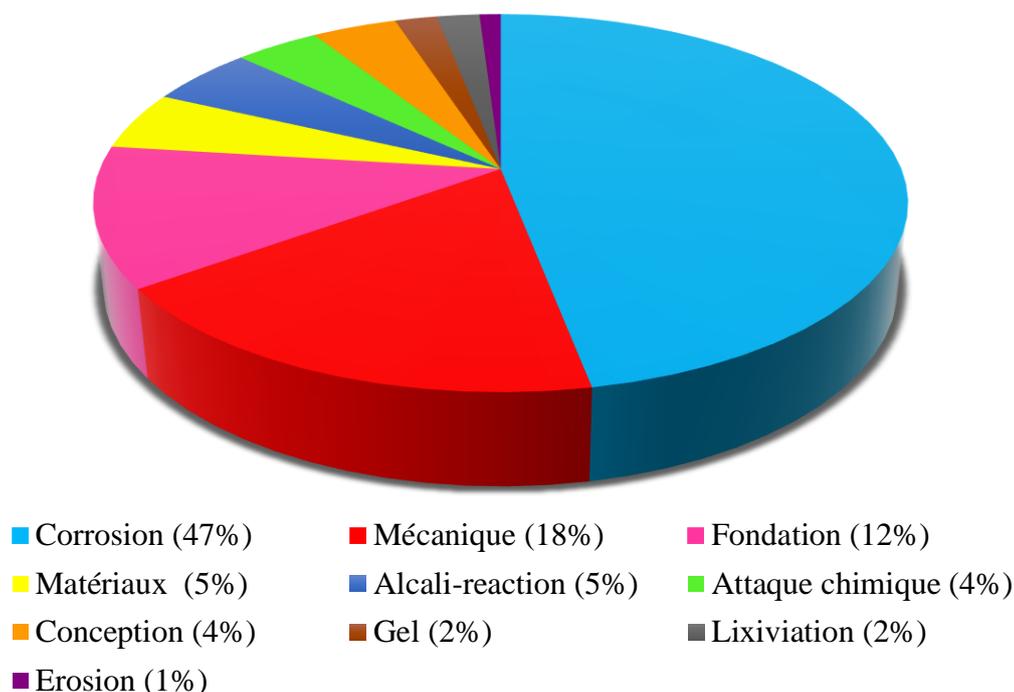


Figure 1. 1: Sources des dégradations des bétons [2].

Parmi les dégradations d'ordre chimique la corrosion des armatures est primordiale, elle est évaluée à 47 % des typologies relevées. Le coût engendré par la réparation des surfaces corrodées représente de grands enjeux économiques pour les maîtres d'ouvrages qui doivent trouver des solutions et des méthodes optimisées de réparation [3].

Nous développerons dans ce paragraphe spécifiquement les phénomènes qui peuvent être à l'origine de la corrosion du béton la plus couramment observée à noter la corrosion des armatures qui est causée par la carbonatation et la pénétration des ions chlorures.

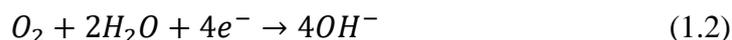
1.3. Corrosion des armatures

La corrosion est une réaction électrochimique entre l'acier du béton et son milieu environnant engendrant des changements dans les propriétés de l'acier. Le béton du fait de sa forte alcalinité grâce à l'hydratation du ciment qui produit une solution basique de pH élevé (environ 13) donne aux armatures une excellente protection face à la corrosion appelé « film passif » pouvant être constitué de divers oxydes. Alors la corrosion ne se développe pas tant que le béton assure une protection chimique des armatures [4]. En revanche, dès que le pH diminue la couche protectrice est perdue et la corrosion aura lieu pour donner en présence de l'oxygène et de l'humidité. La corrosion des armatures dans le béton est un phénomène électrochimique (Figure 1.2) se traduit par :

- i. Une réaction anodique en présence d'un électrolyte (solution interstitielle du béton), l'acier s'oxyde en ions ferreux (F_e^{2+}) selon la réaction suivante



- ii. Une réaction cathodique de réduction de l'oxygène dissous se produit sur la même électrode générant un courant égal (en valeur absolue) à celui de la réaction anodique :



En milieu fortement alcalin (béton sain), les ions hydroxyle (OH^-) dans la solution interstitielle se combinent aux ions ferreux (F_e^{2+}) et précipitent en hydroxyde ferreux à la surface de l'acier, lorsque la concentration en ions ferreux (F_e^{2+}) est assez élevée [5] :



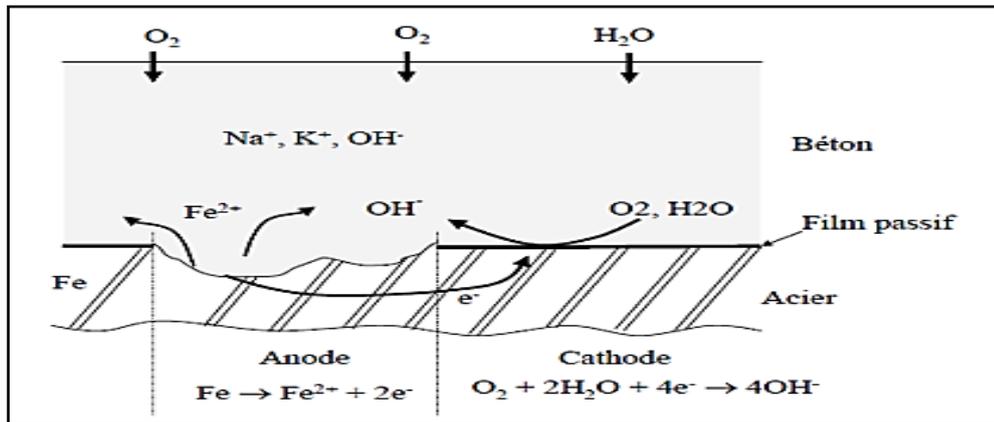


Figure 1. 2 : Mécanisme de corrosion de l'acier dans le béton [6].

La corrosion de l'acier du béton apparaît donc après la destruction de la couche passive due à la diffusion de certains agents dits de corrosion dans le béton. Cette dépassivation peut avoir deux origines :

1.3.1. Carbonatation du béton

La carbonatation (Figure 1.3), résulte de la réaction chimique entre les gaz de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et les constituants de la pâte de ciment hydratée capable de réagir telle que : la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, les silicates de calcium hydratés (C - S - H), les chloroaluminates et les sulfoaluminates [7].

Le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau pour former un acide faible (H_2CO_3) réagissant avec la majorité des hydrates du ciment :

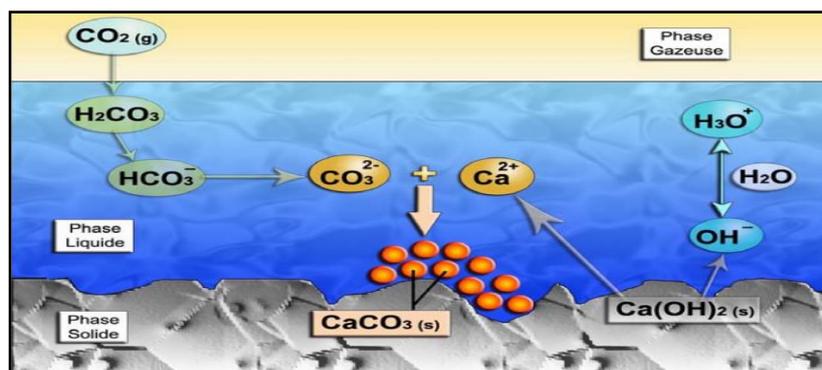
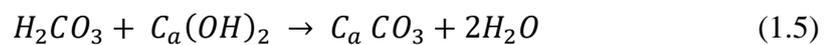


Figure 1. 3 : Mécanisme de carbonatation au niveau interstitielle du béton [8].

1.3.2. Pénétration des ions chlorures

Les ions chlorures Cl^- , de dimensions assez faibles, diffusent facilement dans le béton et progressent rapidement jusqu'aux armatures. Cette diffusion engendre des réactions d'échange avec les ions hydroxyles des sels alcalins. La concentration de ces ions hydroxyles, régulée par la réaction d'autoprotolyse de l'eau diminue, ce qui entraîne la chute du pH et la corrosion des armatures est favorisée [9].



1.4. Réparation des ouvrages en béton armé

La réparation d'un élément en béton est basée sur la liaison de deux matériaux. D'abord, il y a le support (l'ancien béton) qui date de plusieurs années et qui est considéré stable du point de vue volumétrique. Ensuite, il y aura le matériau de réparation qui subira d'importants changements volumétriques face aux différentes conditions climatiques au cours de ses premières années d'exploitation. La figure 1.4 illustre les trois types de réparation pouvant être appliqués.

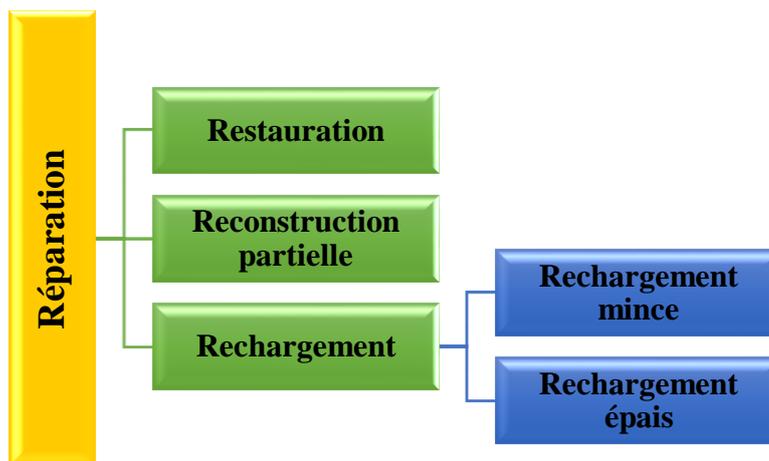


Figure 1. 4 : Concept d'une réparation.

Le terme réparation englobe différents autres termes dans le même contexte comme [10] :

La restauration, signifie la remise en place un état précédent qui a été altéré. C'est le fait de redonner à un ouvrage une apparence que l'on suppose proche de son état initial.

La reconstruction partielle, consiste à enlever une partie importante de béton dégradé et le remplacer par un nouveau matériau. Comme il peut y avoir un renforcement par des barres d'armatures en cas de nécessité.

Le rechargement (Resurfaçage), consiste à enlever la couche dégradée et la remplacer par une nouvelle couche de béton ou mortier. Cette méthode permet de réhabiliter, de renforcer ou d'augmenter la capacité structurale sans la reconstruction complète de l'élément. Il y a deux états de rechargement : le premier mince d'une épaisseur inférieure à 100 mm et le second épais d'une épaisseur supérieure à 100 mm [10, 11].

Il faut noter que les réparations ne sont pas toujours réussies. Un état des lieux des réparations réalisées sur des ouvrages d'art en Europe en 2004, a montré qu'après 10 ans la quasi-totalité des ouvrages réparés nécessitent un renouvellement de la réhabilitation (Figure 1.5).

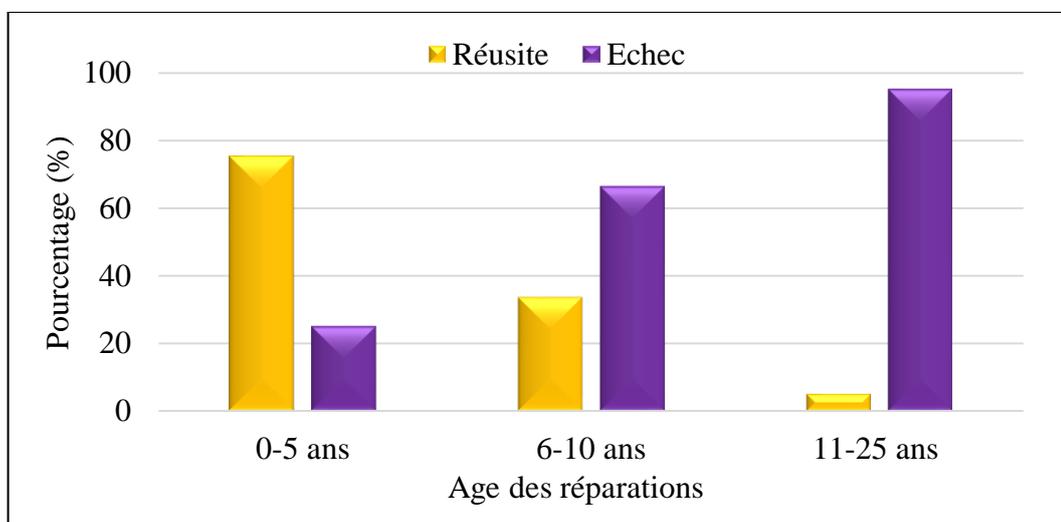


Figure 1. 5 : Pourcentage de réussite ou d'échec de la réparation des ouvrages d'art en fonction du temps après la réparation [12].

Deux facteurs sont à l'origine de ces détériorations prématurées : l'incompatibilité entre les matériaux de réparation et le support, le problème de résistance de ces réparations à la pénétration des agents agressifs tels que les chlorures [3].

Des défaillances des réparations sont aussi provoquées par la fissuration du mortier de réparation, à la réapparition de la corrosion des armatures ou au décollement du mortier de réparation (Figure 1.6).

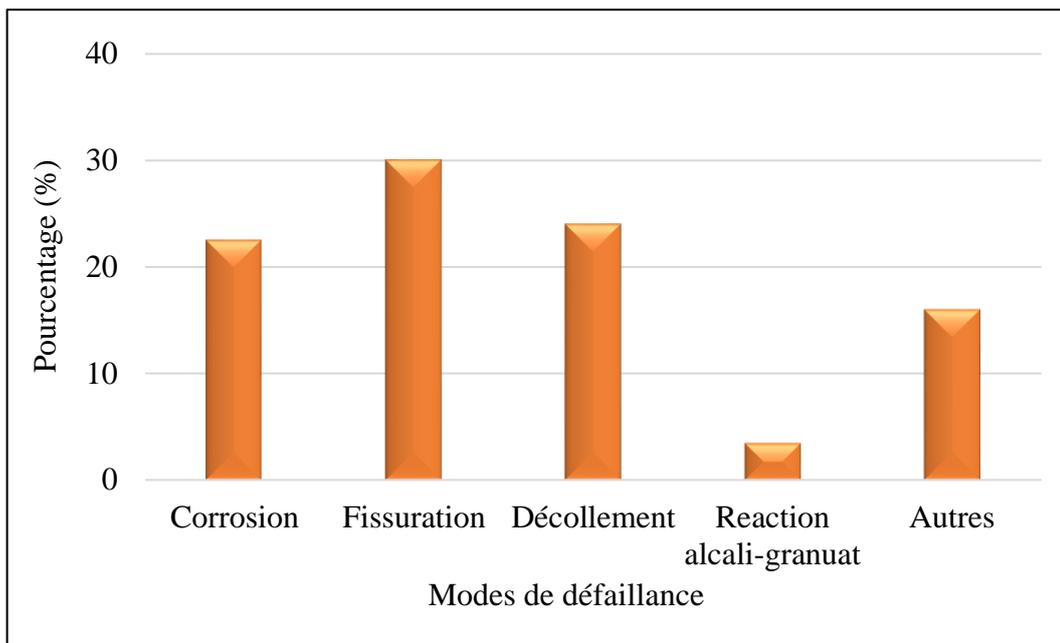


Figure 1. 6 : Principaux modes de défaillance de la réparation [12].

Cette problématique représente un enjeu technologique et économique important qui amène les maîtres d'ouvrages à chercher des solutions rapides et efficaces pour prolonger la durée de vie de leurs ouvrages, assurer la sécurité des usagers et optimiser les coûts de maintenance et de réparation [3].

La norme européenne **NF EN 1504** [13] définit les procédures et les caractéristiques des produits utilisés pour réparer, entretenir et protéger une structure en béton. Elle est composée de dix chapitres qui expliquent toutes les étapes de réparation structurale et non-structurale des structures en béton.

1.5. Type de mortiers de réparation

La réparation par mortier est une méthode largement utilisée pour des structures affectées par la corrosion, la ségrégation ou autre dégradation de surface. Elle est basée sur la reconstitution de l'enrobage dégradé.

Les mortiers utilisés pour la réparation des ouvrages en béton peuvent être classés en trois catégories, selon le liant qui assure la cohésion de l'ensemble est de nature hydraulique (ciment), organique réactif (résine synthétique) ou mixte, c'est-à-dire à la fois hydraulique et organique réactif [14] :

1.5.1. Mortiers à base de liants hydrauliques avec ajouts (LHA) :

Ces mortiers sont constitués principalement :

- D'un liant (ciment),
- De granulats (roulés ou concassés),
- D'ajouts (autres que des polymères organiques) éventuellement.

L'eau est ajoutée au moment de l'emploi.

1.5.2. Mortiers à base de liants hydrauliques modifiés par des polymères organiques (LHM) :

Ils se présentent sous l'une des deux formes suivantes :

- Mono composant : le polymère est sous forme de poudre mélangée au liant hydraulique. On ajoute sur le chantier l'eau nécessaire.
- Bi-composant : le composant A contient le polymère et l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment ; le composant B contient le ciment, le sable et les fines inertes, ainsi que les additifs éventuels : fibres, fumées de silice, ...etc.

Sur le chantier, le produit est obtenu uniquement à partir du mélange des composants A + B, sans aucun autre ajout.

1.5.3. Mortiers à base de résines synthétiques (LR) :

Les résines synthétiques considérées sont des polymères organiques réactifs qui peuvent être :

- Des systèmes polymériques mono composant, adjudantes ou chargés.
- Des systèmes polymériques bi-composant, présentés en emballages dosés antérieurement, les constituants, adjuvants ou chargés sont à mélanger au moment de l'emploi.
- Des systèmes polymériques tri composant : un accélérateur et un catalyseur doivent être ajoutés à la résine au moment de l'application.

Chaque catégorie possède des propriétés physiques spécifiques (tableau 1.1). De ce fait, la compréhension de ces propriétés conditionne le choix des matériaux de réparation qui doivent être accordables autant que possible, avec les propriétés du béton de substrat.

Tableau 1. 1: Propriétés des matériaux de réparation de béton typiques [15].

Type de matériau de réparation	Matériau à base de polymères	Matériau cimentaire modifié par des polymères	Matériau cimentaire
Résistance à la compression (MPa)	50-100	30-60	20-50
Résistance à la traction (MPa)	10-15	5-10	2-5
Module d'élasticité (GPa)	10-20	15-25	20-30
Coefficient de dilatation thermique (déformation par °C)	$25-30 \times 10^{-6}$	$10-20 \times 10^{-6}$	10×10^{-6}
Température maximale de service (°C)	40-80	100-300	>300

Les mortiers de réparation sont classés suivant la norme EN 1504 [13] qui définit deux classes de mortiers de réparation : mortier de réparation structurale et non structurale. Pour les mortiers non structuraux, ils sont appliqués sur une surface de béton afin de restituer l'aspect géométrique ou esthétique de la structure, tandis que les mortiers structuraux, ils sont appliqués à une structure en béton pour remplacer le béton défectueux et pour redonner à la structure son intégrité et sa durabilité [3].

1.6. Méthode d'application du mortier de réparation

Trois méthodes peuvent être utilisées pour l'application du mortier [3] : à la main, en mortier projeté ou en mortier coulé (coffrage).

➤ Mortier appliqué à la main

Le mortier de réparation doit être appliqué en le faisant pénétrer dans le support préparé et il doit être compacté en évitant l'inclusion de poches d'air, de manière à obtenir la résistance requise et protéger les armatures contre la corrosion. Le mortier peut être appliqué en plusieurs couches pour éviter le risque d'affaissement ou de glisse.

➤ Mortier projeté

On distingue deux techniques de projection, suivant le moment d'introduction de l'eau dans la chaîne : par voie sèche avec ou sans pré-mouillage où l'eau est introduite au niveau de la lance, et par voie humide où l'eau est introduite lors du malaxage du mortier (Figure 1.7).

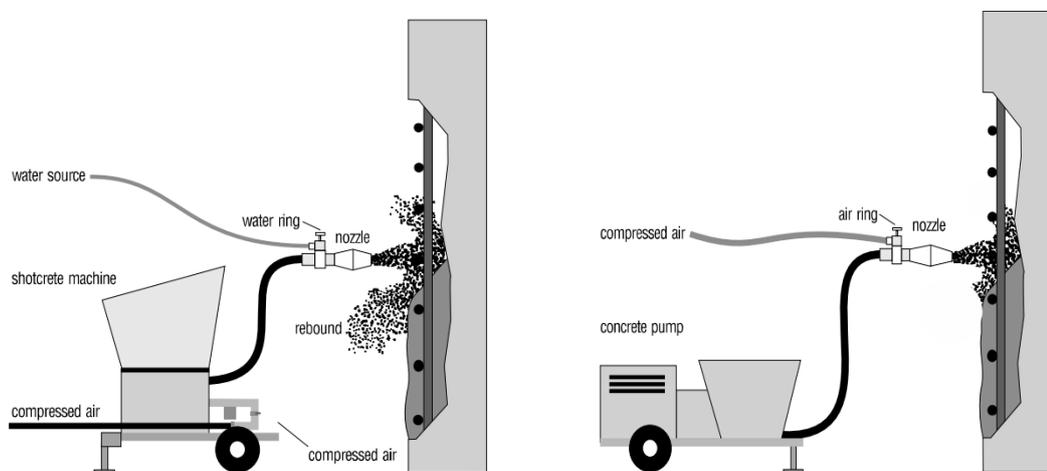


Figure 1. 7 : Projection du mortier par voie sèche (à gauche), voie humide (à droite) [16].

➤ Mortier coulé

Le mortier est mis en œuvre à l'aide d'un coffrage, l'application doit être réalisée tout en évitant les risques de ségrégation et de ressuage. Les ouvertures du coffrage doivent être protégées pour éviter la pénétration de débris ou de contaminants. La mise en place par vibration doit être effectuée en empêchant l'inclusion de poches d'air et de manière à obtenir la résistance requise.

1.7. Interaction mortier de réparation et support

La détermination des propriétés d'adhérence entre un mortier et un support est un appui primordial pour les industriels qui tentent au travers de formulations de plus en plus complexes de perfectionner les performances de leurs produits. La compatibilité d'un mortier avec un support (compatibilités chimiques et physiques de deux matériaux), c'est la durabilité du lien entre les matériaux qui est étudiée. Or les mortiers sont soumis durant leur service à des sollicitations extérieures parfois sévères (séchage, gel/dégel, carbonatation, etc.) qui engendre une perte d'adhérence [17].

Lorsqu'un matériau de réparation est mis en place sur un support de vieux béton, la difficulté demeure dans leur compatibilité qui est déterminée conformément à Emmons [18] comme étant l'équilibre des propriétés physiques, chimiques, électrochimiques de plus le dimensionnement entre le matériau de réparation et le support sans détérioration durant le temps de vie de l'ouvrage (Figure 1.8). Une meilleure durabilité de la réparation est garantie par une bonne compatibilité entre le matériau et le support.

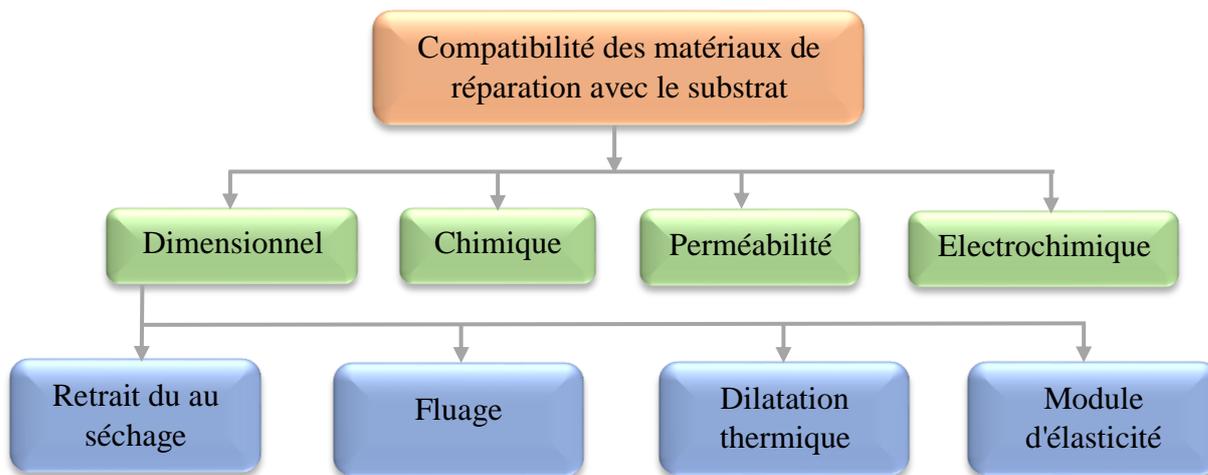


Figure 1. 8 : Critères de compatibilité entre le matériau de réparation et le support à réparer [18].

Généralement, on discerne quatre types de compatibilité : de perméabilité, chimique, électrochimique et déformationnelle.

1.7.1. Compatibilité de perméabilité

Un matériau de réparation offrant peu de perméabilité marque une référence souhaitable, d'une part afin d'inhiber la pénétration d'agents agressif dans la matrice et de l'autre part ce critère est un inconvénient pour la durabilité du système global qui sera réduit suite à l'emprisonnement de l'eau et les ions qui se trouvent dans la porosité du support au moment de la restauration, par conséquent cette contrainte est primordiale dans le cas des réparations puisque l'eau ne pouvant pas sortir du système, risque d'engendrer des pressions hydrauliques à l'interface et entraîner finalement la fissuration /décollement [19].

Selon Morgan [20], un matériau de réparation mince doit avoir une perméabilité à la vapeur d'eau semblable à celle du substrat, une couche de réparation à faible perméabilité

peut entraver les échanges hydriques en provoquant des pressions qui facilitent le décollement de la nouvelle couche de chargement.

1.7.2. Compatibilité chimique

De même la compatibilité chimique est d'une grande importance pour l'évaluation d'une réparation particulièrement pour les structures touchées par une réaction chimique sévère (réaction alcali-granat ou attaque sulfate par exemple) [19].

Les différents paramètres de composition ou propriétés des matériaux de réparation sélectionnées imposent une importance spéciale vis-à-vis de la compatibilité chimique, particulièrement la teneur en alcalins, la teneur en C_3A et la teneur en chlorures, ...etc.

Certainement, les paramètres critiques dépendent de la nature des dégradations supportés par le béton à réparer. Par ailleurs lorsque les sulfates sont à l'origine des problèmes, un matériau à faible teneur en C_3A et autres aluminates doivent être précisé, ainsi pour la réfection d'un ouvrage touché de réactions alcalis-granulats, le contenu en alcalins du matériau de réparation doit être contrôlé attentivement [21].

1.7.3. Compatibilité électrochimique

La compatibilité électrochimique concernant la majorité des bétons qui comportent des armatures est un critère primordial qui doit être bien étudié de façon à freiner ou arrêter la corrosion du béton d'origine, la corrosion qui est un phénomène électrochimique peut se produire suite à des différences de concentration en chlorures ou en oxygène et d'humidité ou de la température différentielle et à des différences de pH [21].

1.7.4. Compatibilité déformationnelle

De même la compatibilité déformationnelle est la composante cruciale de toute réparation de béton. Le béton du support est stable hydriquement, son hydratation est inerte, où les fluctuations volumiques du matériau de réparation seront limitées par le support. Effectivement, l'hydratation du vieux béton est terminée, ce qui engendre la croissance des propriétés mécaniques et de plus le module élastique proportionnellement au matériau de réparation [11], il s'avère que ces propriétés mécaniques confèrent des contractions qui peuvent finalement entraîner à la fissuration et/ou au décollement de la réhabilitation.

A cet effet, le matériau de réparation doit être compatible d'un point de vue déformationnelle avec le support et procurer une bonne qualité de l'interface afin d'atténuer le risque d'échec du système réparé.

Les propriétés capables d'avoir un effet sur l'équilibre déformationnel ou dimensionnel d'un système de réparation sont le module d'élasticité, le fluage, le retrait de séchage et le coefficient de dilatation thermique.

1.7.4.1. Module d'élasticité

Les matériaux à base cimentaire ont la caractéristique de passer d'un état liquide pendant leur mise en œuvre, à un état solide en service, le module élastique augmente durant leur maturation, sa valeur finale est un facteur considérable [22].

La figure 1.9 illustre l'influence de la rigidité relative des deux bétons sur le profil des contraintes normales de flexion tout en concevant une adhérence parfaite entre le rechargement et le support.

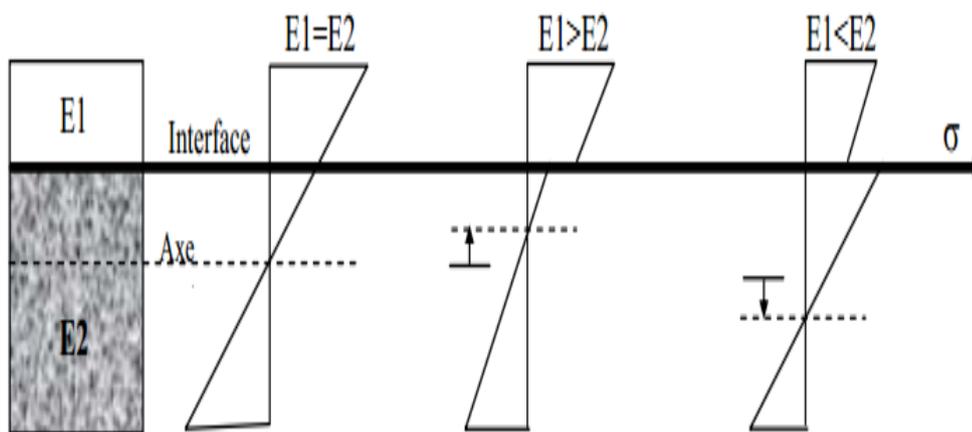


Figure 1. 9 : Module élastique du rechargement et support [23].

Si le module élastique du matériau de réparation est plus élevé que celui du support, le niveau de l'axe neutre sera rehaussé, et on note aussi une augmentation de la proportion des efforts en flexion transmis par la réparation. A l'opposé, un matériau de réparation moins rigide que le béton ordinaire mène une diminution de l'axe neutre et par la suite des contraintes moins élevées au niveau de l'interface [22]. Par conséquent l'utilisation d'un matériau de réparation moins rigide que le béton d'origine est préférable.

1.7.4.2. Retrait

Pour le matériau de réparation à base cimentaire, la teneur en eau est réduite quelques heures après la mise en place à la suite de l'hydratation du ciment. Ceci entraîne une contraction du matériau. De cette façon le matériau subit un phénomène de fluctuation volumique, désigné couramment par le retrait. Ce phénomène a lieu à l'état frais comme à l'état durci [22].

Alors, le matériau de réparation doit avoir un potentiel de retrait pondéré, car le substrat limite la croissance du retrait. Dans le cas contraire, des contraintes induites à l'interface pouvant largement excéder la résistance en traction du matériau de réparation [10].

Le retrait des matrices cimentaires est une procédure approximativement compliquée. Il se divise en cinq types différents : plastique, thermique, de carbonatation, endogène et de séchage.

✓ Retrait endogène

Le retrait endogène est l'abaissement qui intervient sans aucun échange avec le milieu extérieur, contrairement avec le retrait de séchage.

✓ Retrait plastique

Avant la prise, une partie d'eau du béton frais peut s'évaporer ou être absorbée par le support. Ce phénomène engendre des tensions capillaires dans le matériau qui l'expliquent par une diminution du volume occupé par la pâte, c'est le retrait plastique [18].

✓ Retrait thermique

Le retrait thermique est lié au retour à la température ambiante des pièces en béton ayant au préalable subi une augmentation de température par suite des réactions d'hydratation du ciment. Ce retour à la température ambiante est complété par une contraction qui engendre des déformations capables de mener à la création du phénomène de fissuration [22].

✓ Retrait de carbonatation

Durant la réaction de carbonatation, les composés calciques résultant de l'hydratation, particulièrement la portlandite Ca(OH)_2 , réagissent avec le gaz carbonique CO_2 de l'air pour former du carbonate de calcium CaCO_3 et de l'eau.

Cette réaction est fonction de l'humidité relative ; la transformation de la portlandite en calcite entraîne une faible baisse de volume.

✓ Retrait de séchage

Le retrait de séchage est un aspect très critique vis-à-vis de la compatibilité déformationnelle d'une réparation qui représente la contraction que subit le béton lorsque son contenu en eau s'évapore vers l'extérieur.

Du fait de sa limitation par le support et par l'épaisseur même de la couche de réparation, ce gradient va engendrer des contraintes de traction dans les couches superficielles et de compression dans les couches profondes (Figure 1.10). Avec l'avancement du séchage, toute l'épaisseur de la couche du mortier de réparation sera la zone de contraintes de traction. Ces contraintes vont rapidement atteindre la limite élastique du matériau et ainsi provoquer la fissuration. Avec l'avancement du séchage, les fissures vont s'ouvrir, se multiplier et se développer plus en profondeur dans la couche de réparation [11].

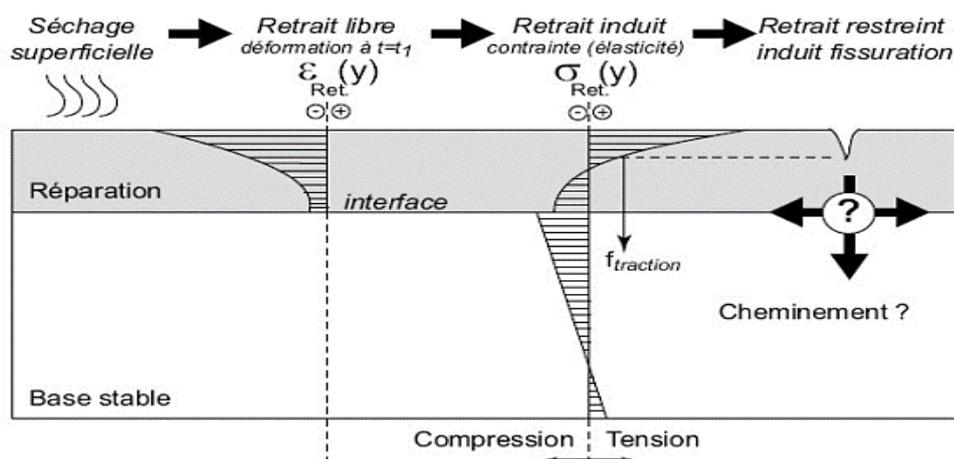


Figure 1. 10: Schéma des contraintes de retrait restreint dans les réparations [23].

1.7.4.3. Fluage

Les matériaux cimentaires présentent un comportement viscoélastique. Sous l'action d'une contrainte, ces matériaux subissent une déformation instantanée nommée déformation élastique. Si la contrainte est maintenue, la déformation augmente avec le temps. Le fluage est la déformation différée lorsque le matériau est sollicité sous charge constante au-delà de la déformation instantanée [22].

Le fluage du matériau de réparation induit la relaxation des contraintes provoquées par les chargements externes et par les déformations volumiques limitées. Effectivement, la capacité du béton à s'adapter en relaxant par fluage une partie des contraintes induites de tension permet d'acquérir des matériaux susceptibles de résister sans altérations aux diverses sollicitations causés par les changements volumétriques [24, 25]. Une réparation est durable lorsque le béton possédant une viscoélasticité importante lui permettant de se déformer sous l'effet des contraintes que de se fissurer [10].

1.7.4.4. Dilatation thermique

La compatibilité thermique des deux matériaux constituant le chargement et le support est une caractéristique qui influence la durabilité de la réparation, notamment quand la structure à réparer est présente dans un environnement qui subit de fluctuations importantes de température [23]. Lorsqu'il y aura une variation considérable entre les coefficients de dilatation thermique du béton de support et du matériau de réparation des déformations limitées seront engendrées et par suite des contraintes internes dans la réparation.

1.7.5. Synthèse sur les compatibilités

La compatibilité entre le rechargement et le support est primordiale pour la durabilité d'un ouvrage réparé. Finalement pour une meilleure compatibilité entre le mortier et le support une importance fondamentale est prise en considération des propriétés mentionnées dans le tableau 1.2.

Tableau 1. 2 : Compatibilité rechargement-support souhaité [26]

Propriétés du matériau de réparation	Rapport souhaitable avec la propriété du matériau du support
Résistance en compression	Identique ou inférieur
Fluage (en traction)	Supérieur
Dilatation thermique	Identique
Module élastique	Identique ou inférieur
Résistance en traction	Supérieur
Retrait	Aussi faible que possible

En conclusion, on peut dire qu'une bonne adhérence du système de réparation dépend des propriétés du matériau de réparation et de leur lien entre le béton d'origine (le substrat).

1.8. Adhésion ou adhérence de l'interface

Le système de réparation est composé de trois phases : réparation, interface et substrat. L'interface est considérée comme la zone la plus poreuse propice aux réactions physico-chimiques et à l'endommagement mécanique.

Il est toutefois important de distinguer entre les termes « adhésion » et « adhérence » qui porte à confusion pour pouvoir expliquer les problèmes concernant les détériorations des interfaces par décollement dans les structures en génie civil [27].

- ✓ L'adhésion est définie comme étant l'ensemble des phénomènes microscopiques, physico-chimiques qui se produisent lors d'un contact intime entre deux matériaux, afin d'engendrer une résistance mécanique à la séparation. D'après la figure 1.11, l'adhésion découle de l'ancrage mécanique et des forces d'interaction moléculaires qui sont à l'origine des efforts de contact.
- ✓ L'adhérence c'est un concept physique macroscopique qui représente la force ou l'énergie nécessaire pour séparer deux matériaux réunis par une surface de contact commune, elle accorde une interruption des forces d'adhésion microscopiques entre les deux couches.

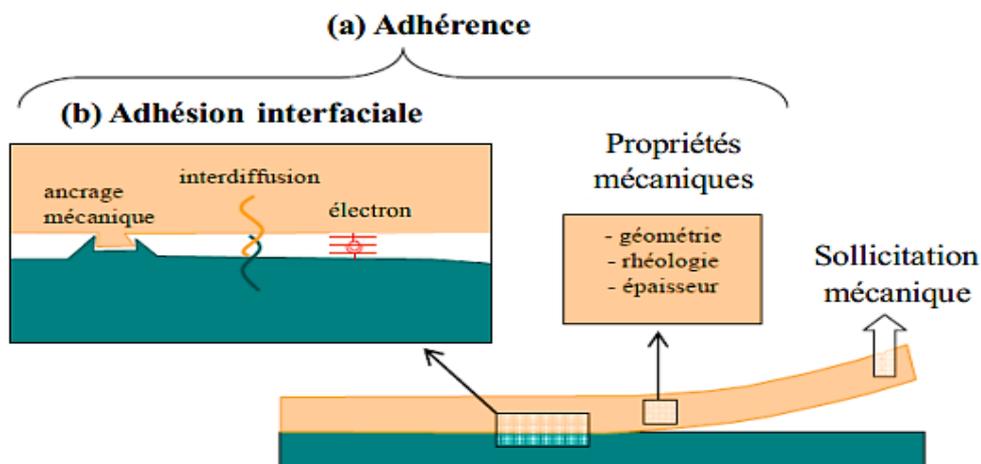


Figure 1. 11 : Schéma des concepts d'adhésion et d'adhérence [28].

Les mécanismes d'adhésion se relient sous deux principales catégories : l'adhésion mécanique et l'adhésion spécifique [10] représentées dans la figure 1.12. Toutefois, nul de ces théories n'interprètera distinctement le phénomène d'adhésion qui n'est autre que l'effet de la superposition de multiples mécanismes élémentaires.

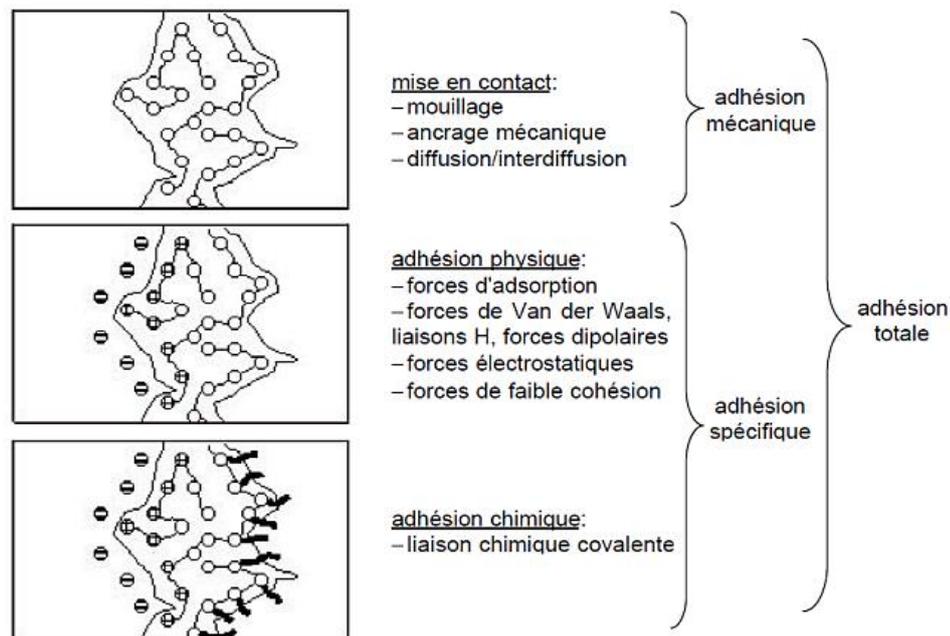


Figure 1. 12 : Principaux mécanismes d'adhésion [29].

L'adhésion mécanique s'explique comme étant la pénétration du matériau de réparation dans les aspérités ou les pores de taille suffisante du substrat et agit comme adhésif par la formation d'ancrage mécanique après maturation. Grâce aux irrégularités de la surface du substrat, la résistance aux efforts de traction et de cisaillement interfacial est favorisée (Figure 1.14). En outre, la qualité de l'adhésion mécanique dépend de la rugosité et de la porosité du substrat [18, 30].

L'adhésion spécifique (interaction physico-chimique) est la pénétration des cristaux d'hydrate dans la porosité superficielle du support implique des forces interatomiques et/ou intermoléculaires au plan de contact entre les deux matériaux (Figure 1.13). Les forces les plus fréquemment impliquées sont les forces de Van Der Waals : Les liaisons d'hydrogène et les liens chimiques [30], ces liaisons qui peuvent agir conjointement, dépendent fortement de la nature physico-chimique des matériaux mis en contact.

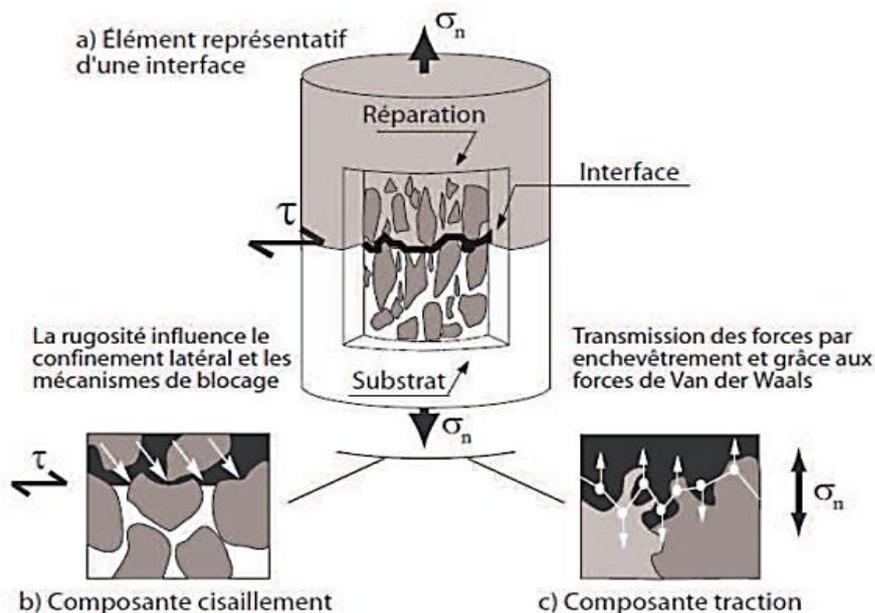


Figure 1. 13 : Représentation schématique des mécanismes contrôlant l'adhésion [18] (modifiée par [31]).

L'adhérence entre le mortier de réparation et le béton est influencée par différents paramètres. Qui sont pour le mortier de réparation, la nature, les modules de rigidité, la concentration du liant, et l'absorption capillaire. Pour le béton on cite la porosité, la cohésion superficielle, la rugosité et l'eau interstitielle qui sont les paramètres agissant sur l'adhésion de la future couche.

L'état hydrique du support (substrat) est une caractéristique cruciale pour l'évolution de l'adhérence. De ce fait le niveau d'humidité du substrat (avant l'application de la réparation) a fait l'objet d'étude depuis des années de nombreux chercheurs, (Austin et al. [32], Courard et al. [33], Bissonnette et al. [34], Beushausen et al. [35], Beushausen [36]).

Dans le cas où le substrat est extrêmement sec, l'eau contenue dans le mortier est pompée vers le substrat, ce qui défavorise l'hydratation du matériau de réparation et par conséquent, des contraintes de traction proches de l'interface seront engendrées. Or, d'un substrat encombré découlera un rapport E/C considérable responsable de la diminution locale de la résistance du matériau de réparation [11, 32]. Donc, le niveau d'humidité du substrat agit sur la résistance d'adhérence.

L'accroissement d'anomalies géométriques à la surface du support mène à l'augmentation de la surface virtuellement en contact avec le mortier liquide, de même la

croissance de l'aire de contact réelle et l'accroissement du nombre de liaisons interfaciales démontre bien l'extension de la résistance aux tests mécaniques.

Si la liaison mécanique participe à l'augmentation de l'adhésion à la suite de l'accroissement de la superficie de contact effective, elle deviendra donc aussi un inconvénient. Effectivement, il est essentiel que l'adhésif mouille absolument les surfaces en vue de ne pas piéger de bulles d'air dans les porosités. De ce fait, on opte pour une rugosité optimale des substrats à assembler car une rugosité considérable pourra être aussi source de bulles d'air [27].

1.9. Mesure d'adhérence

L'adhérence est déterminée par l'application d'une force sur une éprouvette en bicouche qui résulte la rupture suivant le mode de sollicitation. La rupture survient fréquemment à la suite d'un défaut qui amorce une fissuration. La vitesse de propagation dépend des propriétés des matériaux, des contraintes internes et de la géométrie des solides [27]. On discerne alors trois modes de fissuration (Figure 1.14)

Mode I : il s'agit d'un mode de division par ouverture, qui correspond à un écartement proportionnel entre les lèvres de fissure par ouverture angulaire. Dans ce genre de mode les joints collés indiquent la plus petite résistance. Ce mode est relié à la force de cohésion et l'état de l'adhésion physique assuré par un bon mouillage.

Mode II : mode de cisaillement plan il correspond au cisaillement longitudinal. Ce mode dépend de l'adhésion mécanique dominée par la rugosité de l'interface.

Mode III : mode de cisaillement anti-plan ou le cisaillement transversal. Il représente un glissement transversal entre les lèvres de fissure, par ailleurs dans la direction parallèle au front de la fissure.

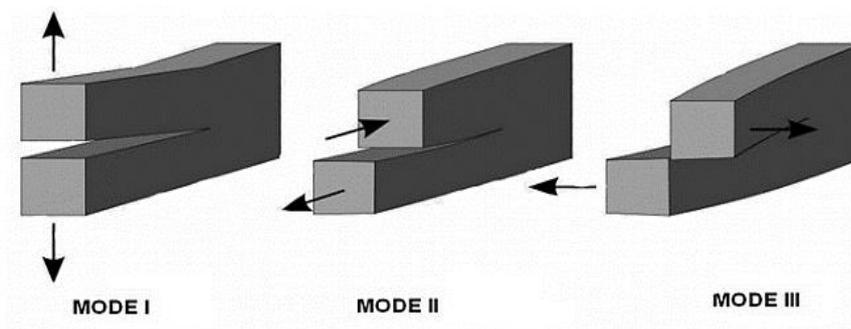


Figure 1. 14 : Trois modes de rupture [27].

Divers essais d'adhérence sont utilisés pour l'évaluation de la résistance d'une interface. Selon Espeche et León [37] il existe trois classes d'essais : la traction (directe et indirecte), le cisaillement direct et le cisaillement par compression (cisaillement indirect). En outre, une quatrième classe d'essai a été introduite par López-Carreño et al. [38] qui est le mode mixte en flexion (Figure 1.15).

Dans notre étude on applique les essais de traction directe (par arrachement) et cisaillement indirect.

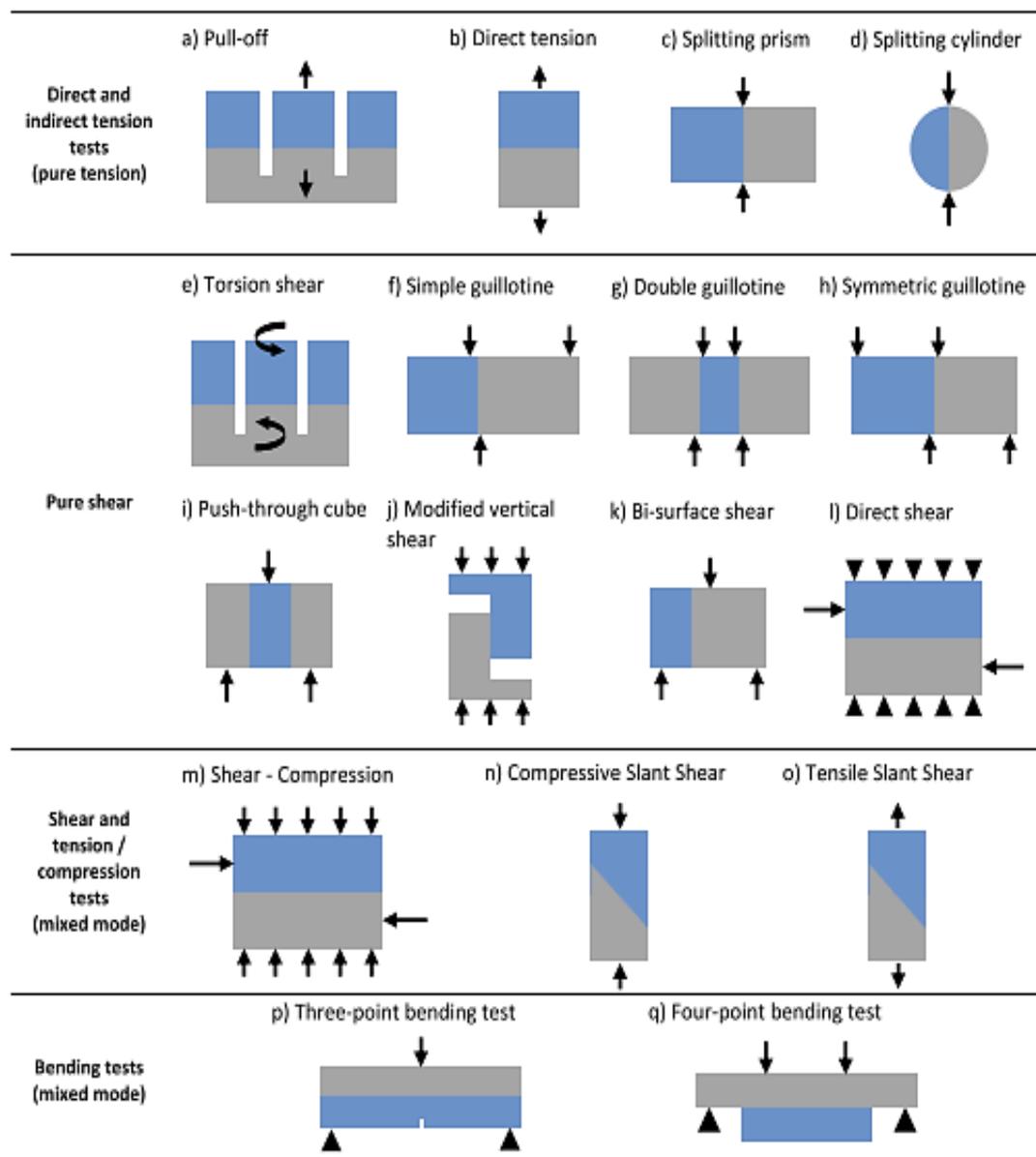


Figure 1. 15 : Diverses méthodes d'essai pour évaluer la force d'adhérence [38].

1.10. Conclusion

Les ouvrages sont exposés aux diverses sollicitations dû au durcissement du béton qui connaît comme tous les autres matériaux de multiples altérations, qui diminuent leurs caractéristiques à long terme. Par conséquent, il est impératif de réaliser des travaux de réparation pour rétablir les caractéristiques physiques et mécaniques de la structure.

La réparation du béton endommagé est liée intimement à un parfait diagnostique afin d'avoir une bonne connaissance sur le support à réparer, tout en respectant l'environnement dans lequel support- rechargement vont être mise en œuvre et procurer au rechargement des produits de réparation de haute qualité. Une bonne compatibilité entre le mortier et le support qui nous assure une meilleure adhérence du système de réparation est nécessaire.

La réussite de la réparation d'un élément en béton est basée sur la durabilité de la liaison de deux matériaux (mortier de réparation et support). Cette dernière représente un équilibre des propriétés physiques, chimiques, électrochimiques de plus le dimensionnement entre le matériau de réparation et le support sans détérioration durant le temps de vie de l'ouvrage. L'adhérence est influencée par différents paramètres tels que les modules de rigidité, la concentration du liant, la nature et l'absorption capillaire du mortier de réparation.

Les mortiers de réparation prêt à emploi sont généralement basés sur un liant cimentaire et des fibres industrielles. Dans cette étude, nous proposons de formuler et de caractériser un mortier économique, moins susceptible à la fissuration à faible impact environnemental, basé sur des ajouts cimentaires (pouzzolane naturelle et laitier) et des fibres naturelles renouvelables de palmier dattier.

CHAPITRE II :
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE :
FIBRES NATURELLES ET LEURS
IMPACTS SUR LES MATERIAUX
CIMENTAIRES

CHAPITRE II :

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : FIBRES NATURELLES ET LEURS IMPACTS SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES

2.1. Introduction

L'incorporation des fibres naturelles dans la composition des matériaux cimentaires dans le but d'améliorer leurs caractéristiques n'est pas récente, elle est largement utilisée dans le monde et en croissance constante. Dans ce chapitre nous montrons l'origine de quelques fibres naturelles, les spécificités des fibres végétales en général et particulièrement les fibres de palmier dattier qui sont utilisées dans cette étude. Nous discutons l'influence des fibres végétales sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et à l'état durci aussi les méthodes d'amélioration de la durabilité des composites à base de fibres végétales.

2.2. Définition et origine des fibres naturelles

Les fibres naturelles sont d'origine végétale ou animale. Elles sont utilisées dans l'industrie textile et la construction. Les fibres jouent un rôle très important dans la vie socio-économique de la population locale, elles sont récoltées en général par arrachage. Les fibres naturelles sont classées en deux catégories : les fibres d'origine animale et celles d'origine végétale (Figure 2.1).

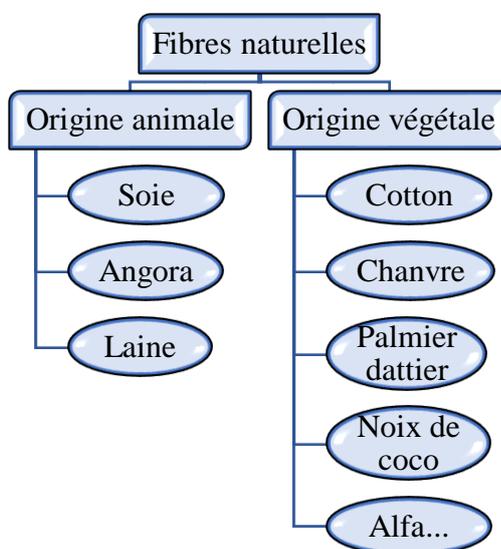


Figure 2. 1 : Origine des fibres naturelles.

2.3. Fibres végétales

2.3.1. Définition

Une fibre végétale est une expansion cellulaire filiforme, notamment composée de cellulose, d'hémicelluloses, de lignines, et de pectines. Elle est extraite des plantes et elle fait partie de la biomasse. Sa biodégradabilité constitue un intérêt important pour l'écologie. En outre, elle est caractérisée par une faible densité, un pouvoir d'isolation thermique et des résistances à la traction élevée. On la trouve sous deux formes : soit isolée, soit regroupée avec d'autres fibres.

Une fibre unitaire correspond à une cellule élémentaire fibreuse, et forme un faisceau de fibres lorsqu'elle est regroupée avec d'autres fibres (Figure 2.2). Dans ce faisceau, les fibres sont liées principalement par des pectines et des hémicelluloses [39]. La fibre végétale est qualifiée par sa grande longueur par rapport à son diamètre. Cet élancement est généralement compris entre 50 et 100 [40].

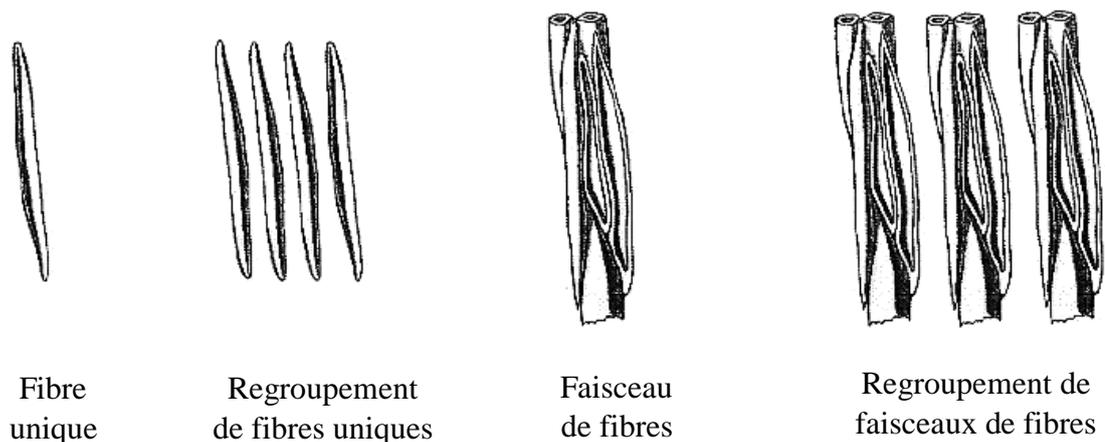


Figure 2. 2 :Types de forme des fibres végétales [41].

2.3.2. Classification des fibres végétales

Les fibres végétales peuvent être issues de différentes parties de la plante, comme les graines, les tiges, les feuilles, les fruits et le tronc (Figure 2.3).

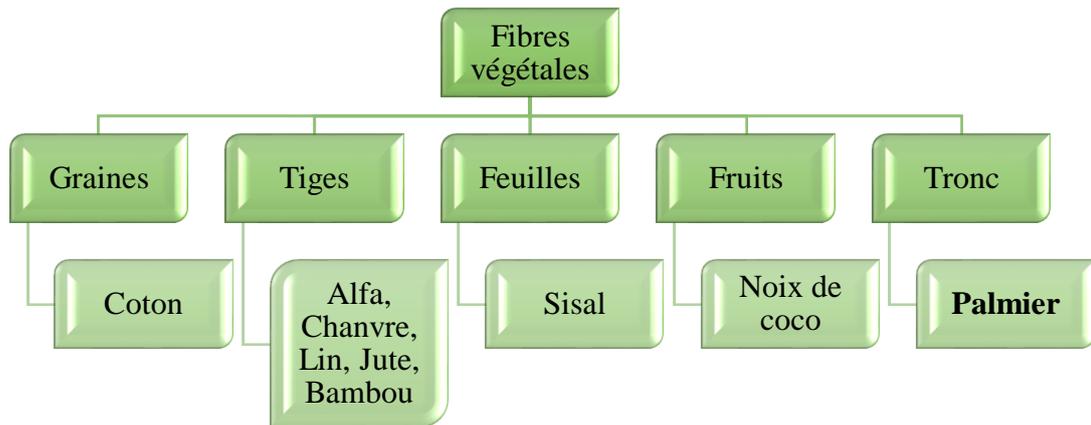


Figure 2. 3 : Classification des fibres végétales [42].

2.3.3. Structure morphologique d'une fibre végétale

Les fibres végétales sont considérés comme un matériau bio-composite, dans lequel la lignine ou la pectine jouent le rôle de matrice enrobant des faisceaux de fibres individuelles (Figure 2.4), chaque faisceau de fibres est composé de plusieurs cellules fibreuses (fibres élémentaire) liés entre elles par **la lamelle mitoyenne**. La cellule fibreuse est construite de l'extérieur vers l'intérieur par deux parois principales : **une paroi primaire** et **une paroi secondaire** (divisé en trois couches) tandis que dans le milieu on trouve **le lumen** [43, 44].

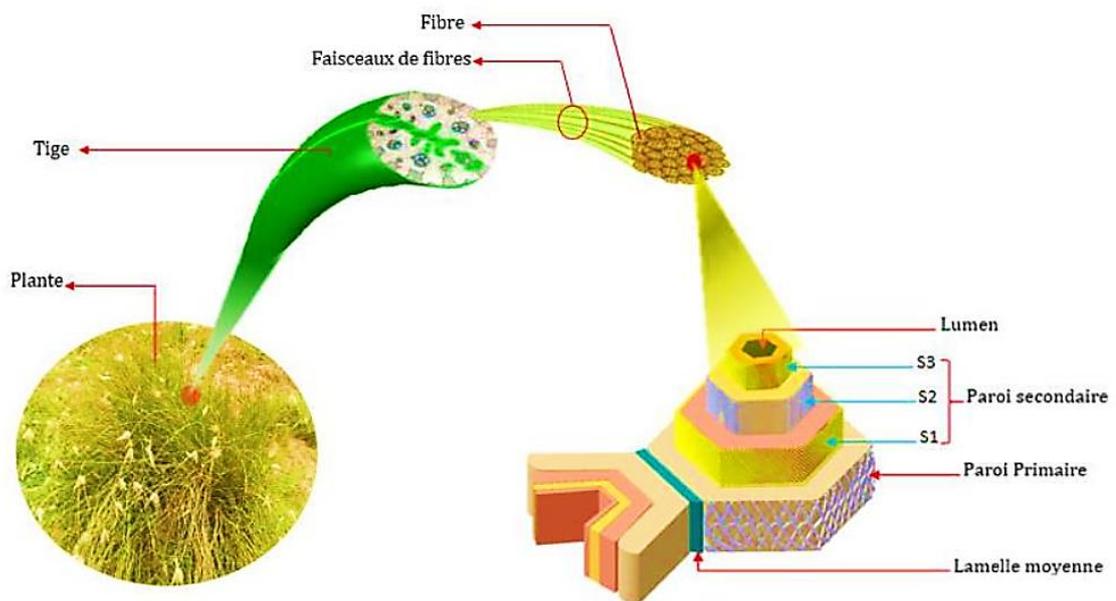


Figure 2. 4 : Représentation schématique de la plante à la cellule fibreuse [43].

La paroi primaire : c'est la couche la plus externe, très mince de 0,1 μm d'épaisseur, renferment une grande quantité de lignine, pectines, microfibrilles de la même manière que la couche intercellulaire mais peu de cellulose. De ce fait, il est pénible de différencier entre la paroi primaire et la couche intercellulaire [44, 45].

La paroi secondaire : c'est la partie la plus importante de la fibre d'épaisseur 5 à 15 μm . Cette dernière est ramifiée en trois couches, S1, S2 et S3 qui se différencient par leur composition, leur épaisseur aussi par leur angle de micro-fibrilles. Les deux couches S1 et S3 accomplissent à la fibre sa résistance à l'écrasement [46], alors que la couche S2 qui est la plus épaisse (0.5 à 8 μm) participe généralement aux performances mécaniques des fibres [47].

Dans la paroi externe S1 mince (0.1 à 0.2 μm) dans laquelle les fibrilles sont enroulées en hélices parallèles (Figure 2.5), de sens opposés (une couche dans un sens, l'autre couche croisée) [48] formant un angle compris entre 60 et 80% par rapport à l'axe de la cellule [49].

Dans la paroi centrale S2, les fibrilles sont disposées en hélices (Figure 2.5), formant un angle de 5 à 50 % par rapport à l'axe de la cellule. La rigidité de la fibre dépend de l'épaisseur de cette paroi qui représente 15 à 85 % de l'épaisseur totale de la couche [48, 49].

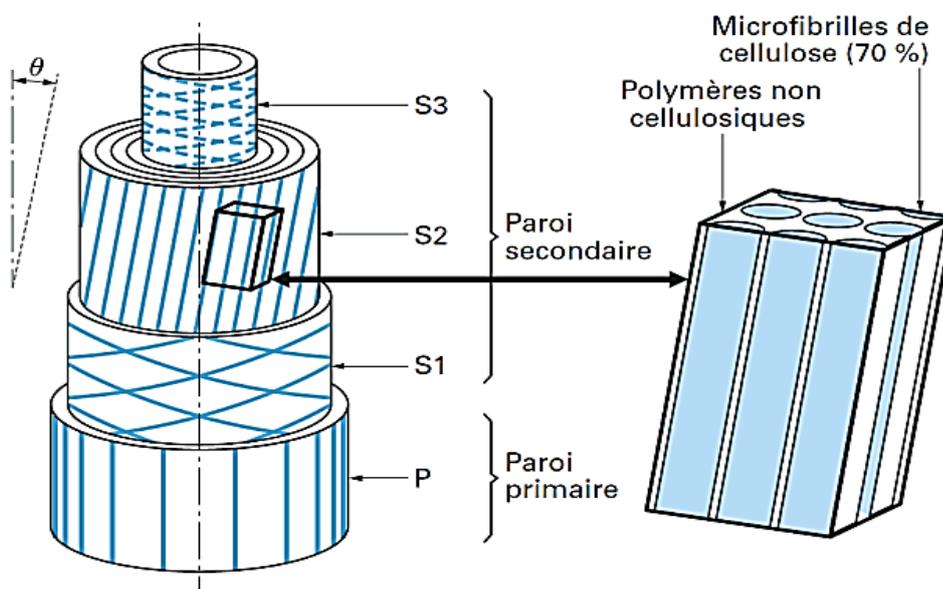


Figure 2. 5 : Description schématique de la structure d'une fibre végétale et arrangement des microfibrilles autour du lumen [42].

Dans la paroi interne S3 (appelée paroi tertiaire), mince (0.04 à 0.1 μm) voisine du lumen, les microfibrilles sont orientées suivant un angle variant entre 60 et 90° par rapport à l'axe de la cellule. Entre les fibres, il existe des espaces qui sont partiellement composés de lignine et d'hémicelluloses [48, 49]

Le lumen : nommé aussi « canal débouchant » est un vide dans le centre de la cellule fibreuse de forme circulaire, polygonale ou elliptique [44]. D'après Privas [50] les fibres immatures auront un lumen très gros par contre les fibres très matures auront un lumen qui tendra à disparaître.

Ce canal peut contenir de l'eau, les solutés, la vapeur d'eau, et d'autre gaz [51], la valeur importante de la surface du lumen qui engendre la porosité de la cellule fibreuse est l'une des causes de la faible densité des fibres végétales qui peut être bénéfiques dans des applications comme le renforcement des composites [43].

La lamelle mitoyenne : est une couche intercellulaire d'épaisseur de 0,5 à 2 μm joue le rôle de ciment entre les fibres, elle est généralement composée de lignines (70%) lui attribuant sa solidité [46, 48, 51]

2.3.4. Composition chimique des fibres végétales

La composition chimique varie d'une plante à une autre et dépend de l'espèce, de l'âge de la plante, des conditions climatiques, de la composition du sol et de la méthode d'extraction utilisée. Les fibres végétales se composent principalement de la cellulose, d'hémicellulose, de la lignine, de la pectine et des cires (Figure 2.6). Leurs proportions déterminent l'ensemble des propriétés de fibres [52].

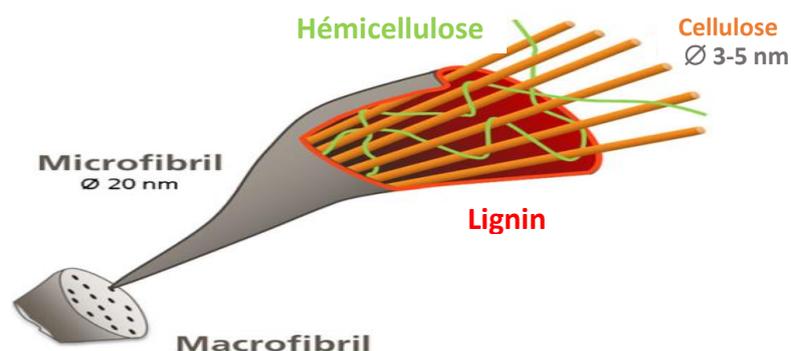


Figure 2. 6 : Structure schématique d'une fibre de biomasse lignocellulosique contenant de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine [53].

a) La cellulose

La cellulose est le composant majeur de la quasi-totalité des fibres végétales. Elle représente plus de 50% de la biomasse sur terre. C'est un glucide de formule moléculaire $(C_6H_{10}O_5)_n$ [54], reliées entre elles par une liaison glycosidique du type β 1-4 comme élargir dans la figure 2.7.

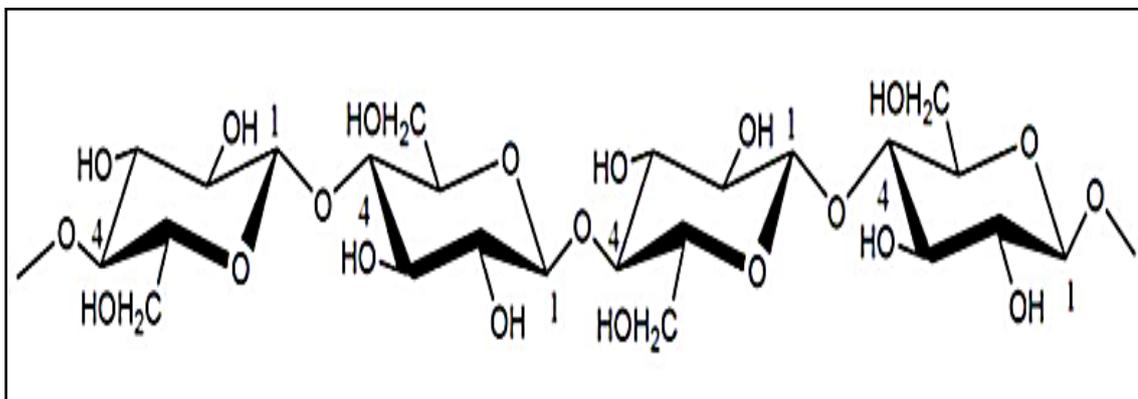


Figure 2. 7 : Représentation schématique de la structure de la cellulose [55].

La cellulose résiste aux fortes solutions alcalines (jusqu'à 17,5% en poids) ; mais elle est facilement hydrolysée par l'acide en sucres hydrosolubles. Elle est plutôt rigide aux agents oxydants [56], et elle est responsable de la résistance mécanique de la plante.

b) La lignine

La lignine représente le deuxième composant primordial après la cellulose dans la biomasse en termes d'abondance en poids sur la surface de la terre. Elle a une structure très hétérogène qui varie en fonction des différentes espèces végétales [57], parmi ses avantages c'est qu'elle participe à la rigidité structurale des parois cellulaires, protège les plantes contre l'attaque des organismes pathogènes [58], attribue à la plante une grande résistance à la décomposition. Elle stocke des phénoliques toxiques sous forme libre que la plante neutralise. En outre, elle a un rôle de stockage des déchets des plantes [59].

c) L'hémicellulose

Les hémicelluloses sont par définition les polysaccharides non cellulosiques présents dans les parois cellulaires des végétaux [60], forme la matrice de support des

microfibrilles de cellulose. Contrairement à la cellulose, elle est composée de sucres neutres et est très hydrophile, soluble en milieu alcalin et facilement hydrolysable dans les acides [58], elles représentent le 3ème composant principal juste après la cellulose et la lignine, avec une proportion en poids approximativement 25% de la biomasse. Elles constituent une famille très diversifiée de molécules qui ont en commun avec la cellulose, la liaison glycosidique $\beta(1,4)$ et la position équatoriale de chaque résidu par rapport à ses voisins [52].

d) La pectine

La pectine est un polymère de polysaccharides acide qui se compose essentiellement par un enchainement d'acide uronique lié en (1-4) (figure 2.8). Les pectines sont présentes en quantités moins importantes que la cellulose et la lignine mais restent un élément important dans la biomasse végétale. Elle joue le rôle de liant entre les différentes cellules. Les pectines peuvent être extraites de la fibre par une méthode chimique : soit à l'eau bouillante, soit par l'acide éthylène diamine tétracétique (EDTA) [41].

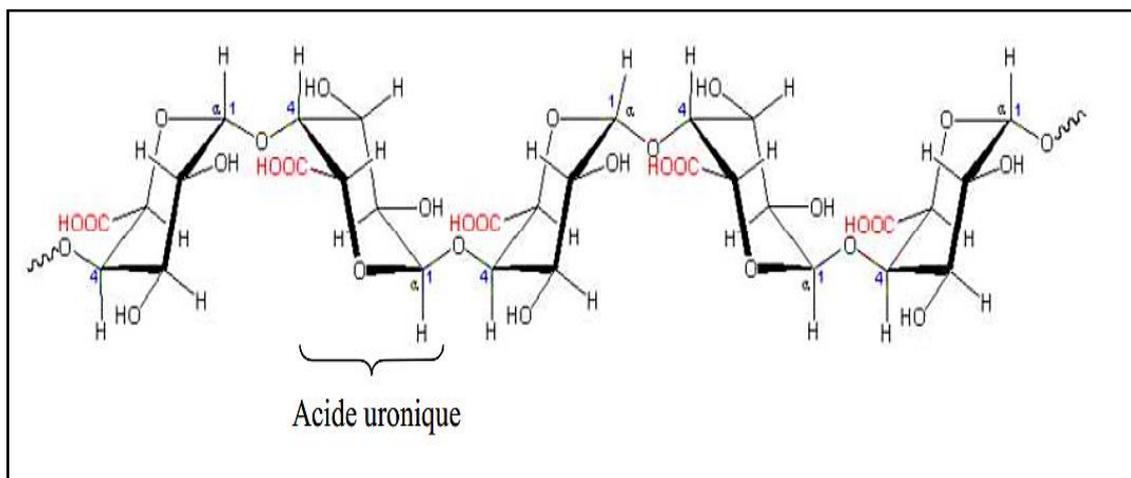


Figure 2. 8: Structure d'une chaîne d'acide polygalacturonique [61].

e) Les cires

Les cires sont des composantes des fibres végétales qui peuvent être extraites avec des solutions organiques. Elles sont constituées de différents types d'alcools insolubles

dans l'eau et de plusieurs acides comme l'acide palmitique, l'acide oléagineux et l'acide stéarique [56, 62]

La figure 2.9 résume la composition chimique des différents types de fibres végétales selon les travaux de différents chercheurs [63–70].

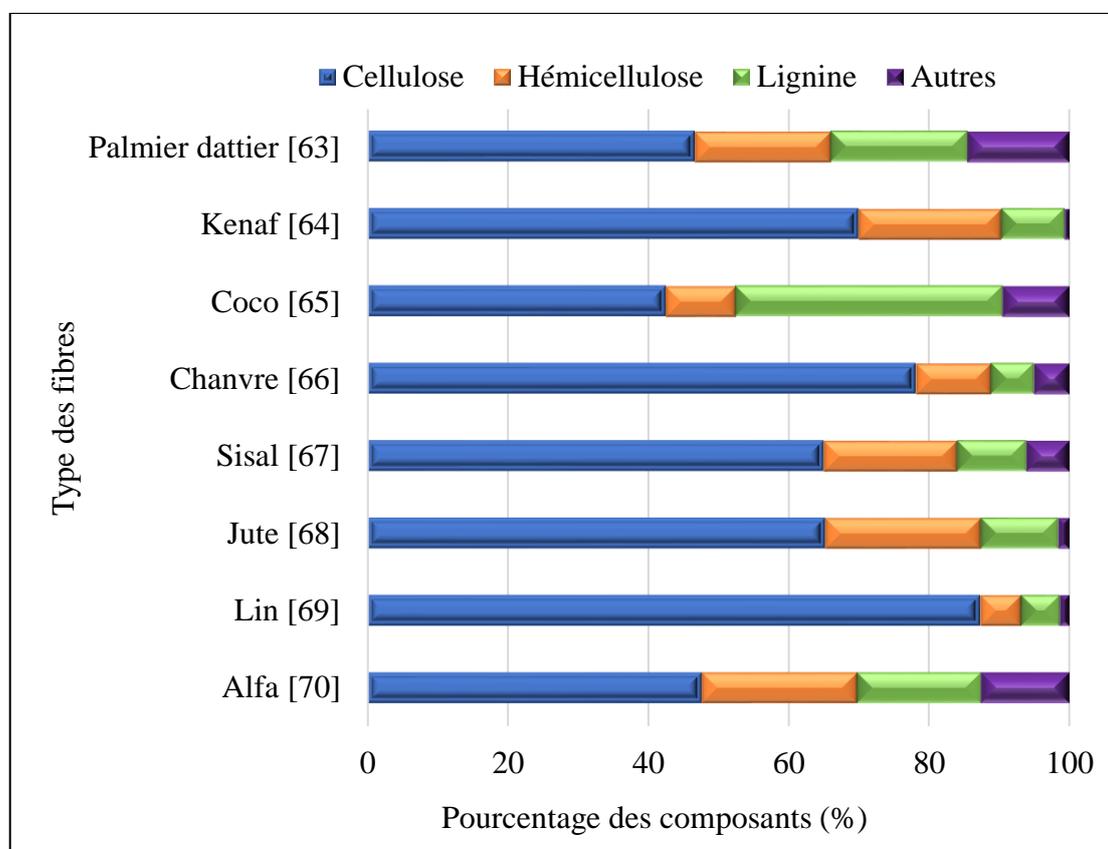


Figure 2. 9: Composition chimique des différents types des fibres végétales.

2.3.5. Propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales

Les propriétés physiques des fibres naturelles sont principalement déterminées par la composition chimique et physique telle que la structure des fibres, teneur en cellulose, l'angle microfibrillaire, la section et le degré de polymérisation. De plus, la résistance et la rigidité des fibres croissent avec l'augmentation de la teneur en cellulose et avec la diminution de l'angle microfibrillaire. La résistance à la traction est très élevée pour les fibres naturelles à teneur élevée en cellulose contrairement aux fibres possédant une faible teneur en cellulose et un grand angle spiral [71].

Tableau 2. 1: Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales [59, 72, 73]

Les fibres	Densité	Module d'Young E (GPa)	Contrainte à la traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)
Jute	1,46	10-30	400-800	1,8
Chanvre	1,48	70	550-900	1,6
Sisal	1,33	38	600-700	2-3
Alfa	0,9-1,3	12,7-22.3	75-154	1,6
Coco	1,25	6	220	15-25
Palmier dattier	0,51-1,08	2,1-5,25	170-290	5,7-17,4
Lin	1,4	60-80	800-1500	1,2-1,6

2.3.6. Avantages et inconvénients des fibres végétales

Les fibres végétales utilisées comme renfort dans les matériaux cimentaires présentent des avantages et des inconvénients. Le tableau 2.2 résume ces avantages et inconvénients.

Tableau 2. 2 : Avantages et inconvénients des fibres végétales

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Faible coût, ✓ Non décapant pour les outillages, ✓ Exige moins d'énergie pour être fabriquer, ✓ Pas de résidus après combustion, ✓ Bon isolant thermique et acoustique, ✓ Biodégradabilité, ✓ Anodin pour l'émission de CO₂, ✓ Ressource renouvelable. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Faible équilibre dimensionnelle, ✓ Faible tenue thermique (200 à 230°C max), ✓ Fibres anisotropes, ✓ Absorption d'eau, ✓ Biodégradabilité, ✓ Variation de qualité en fonction du lieu de croissance.

Le palmier dattier, plante symbolique du désert est cultivée depuis des millénaires dans les régions arides et semi-arides du monde. C'est une plante dioïque. Au tronc très élancé (Figure 2.11), haut jusqu'à 30 m, couvert de manière visible par des feuilles qui sont réunies en un nombre de 20 à 30 maximum, formant une couronne apicale. Il constitue la principale source de vie de la population saharienne [76], est un élément important de l'écosystème oasien; grâce à son adaptation aux conditions climatiques, la haute valeur nutritive de ses fruits et les multiples utilisations de ses produits [77]. Il présente également une importance écologique capitale en créant au milieu du désert, un microclimat favorable au développement de cultures sous-jacentes [78].

Il est à noter que dans le sud de notre pays, il y'a plus de 800 variétés de palmier dans les oasis dont les plus connus sont : Deglette Nour, Dokar, Elghers (appellation locale) [74].



Figure 2. 11: Palmier dattier.

2.4.2. Constituants principaux du palmier dattier

Le palmier dattier est composé de dix parties (Figure 2.12) [48, 78] :

- *Palmes* : Sont les feuilles, longues de plus de 6 m,
- *Jeune palme* : La jeune palme est enroulée pendant toute sa croissance,
- *Régime de dattes* : Est la partie qui supporte les fruits du palmier,

- *Dattes* : Ces fruits sont récoltés en automne, leur couleur varie du rouge lumineux au jaune lumineux selon les variétés,
- *Gourmand* : Branche secondaire qui se développe sur la branche principale d'une plante,
- *Stipe* : Il rappelle le tronc des arbres son diamètre peut varier légèrement selon les conditions climatiques,
- *Cicatrices annulaires* : Correspondent au point d'attache de la feuille ancienne une fois le pétiole (support de la feuille) chutée,
- *Rejet* : Le rejet est une jeune pousse du végétal, qu'il est possible de planter pour obtenir un nouveau palmier,
- *Bulbe* : Se situant à la base du stipe. De là part le système racinaire d'où émergent les racines,
- *Racines* : Profondes jusqu'à 20 mètres capables d'aspirer des centaines de litres d'eau par jour.

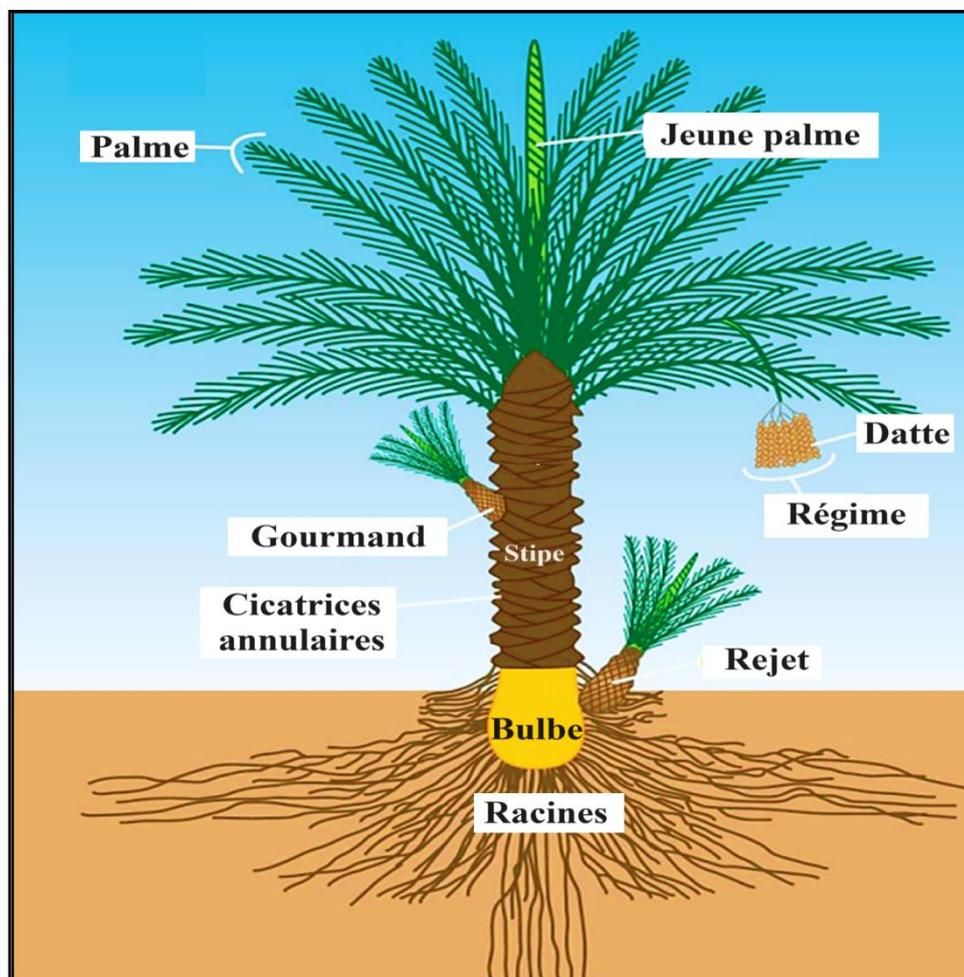


Figure 2. 12: Présentation schématique d'un palmier dattier [48].

2.4.3. Types de fibre de palmier dattier

Les types de fibre de palmier dattier sont [74] :

- ✓ 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).

2.4.4. Caractéristiques des fibres de palmier dattier

Une étude sur un échantillon typique de pétiole (Deglet-Nour) dans une direction transversale des fibres, a montré que la surface de l'échantillon est rude et inégale avec un excès de filaments, des impuretés, des cellules et des pores qui lui permettent une meilleure adhérence avec d'autre matériau (matrice) (Figure 2.13).

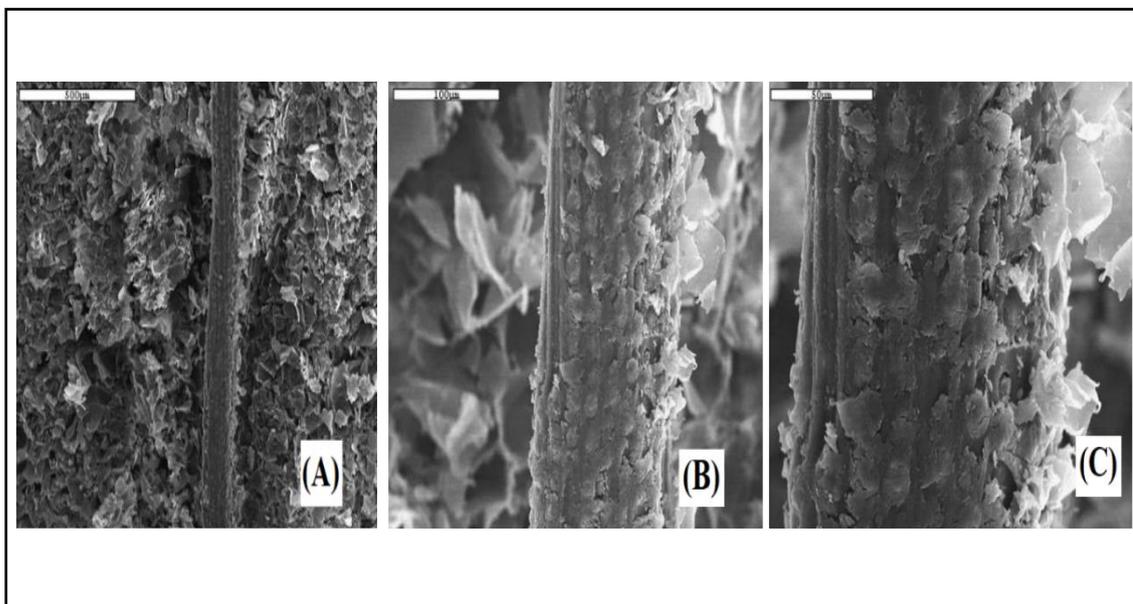


Figure 2. 13: Images MEB d'un échantillon de pétiole dans une direction transversale (a) 500 µm, (b) 100 µm et (c) 50 µm [79].

La figure 2.14 montre trois micrographies MEB sur le même échantillon. On remarque un grand nombre de fibres creuses individuelles collectées et collées par une couche montrant que la fibre a une section poreuse et par conséquent, une grande capacité hydrophile (absorption de l'eau).

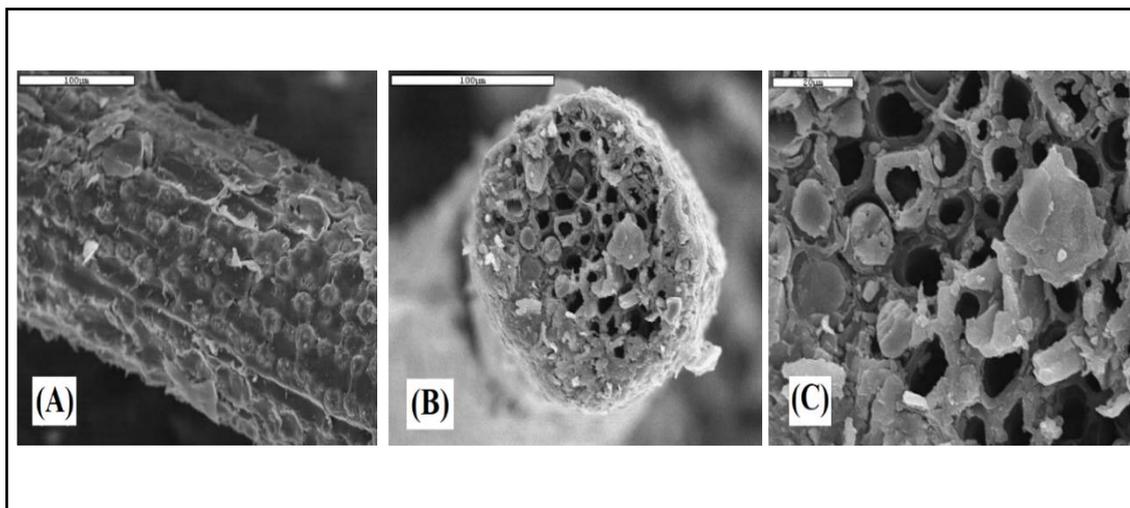


Figure 2. 14: Micrographies MEB montrant la section transversale d'une fibre typique dans les pétioles de palmier dattier (a) 100 μm , (b) 100 μm et (c) 20 μm [79].

La figure 2.15 montre que la fibre de palmier dattier se compose d'une couche externe nommée mur primaire, ce mur encercle une autre couche qui est le mur secondaire lui-même est composé de trois couches, ces dernières relient le mur secondaire au lumen. Chaque mur se constitue de micros-fibrilles cristallines à base de cellulose réunies entre elles par la lignine et l'hémicellulose qui sont amorphes.

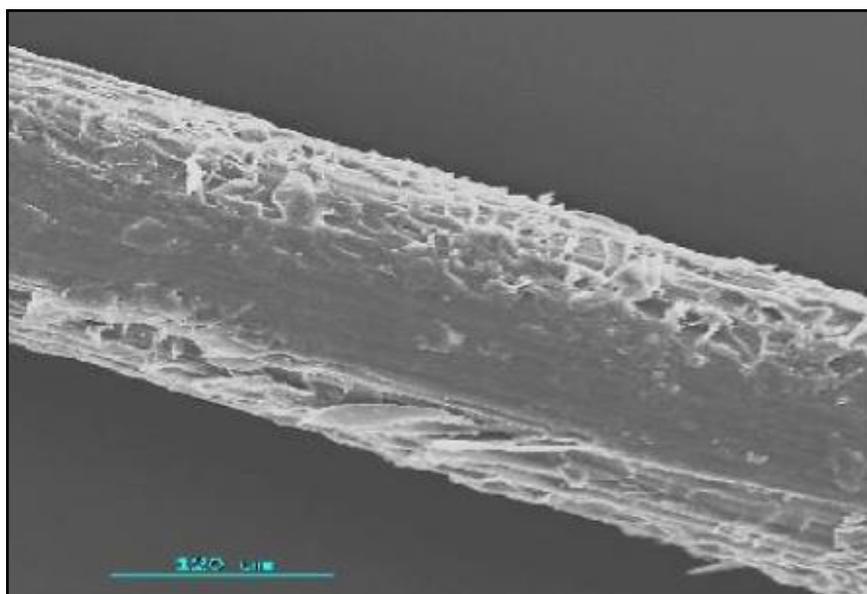


Figure 2. 15: Micrographie d'une fibre de palmier dattier [80].

Oushabi et al. [81] et Kriker et al. [82] ont mené aussi une étude sur la morphologie des fibres de palmier dattier, et ont confirmé que la surface des fibres contient de nombreuses impuretés de plus elle est irrégulière et granuleuse ce qui explique une bonne adhérence fibres matrice. De même la section de la fibre porte de nombreuses petites pores d'où la structure est poreuse et par suite les fibres ont un comportement hydrophile.

Tous ces types de fibres possèdent la forme cylindrique, chaque fibre est composée de fibres multicellulaires contenant chacune un vide central. La forme des fibres des palmiers dattiers ressemblent à celles des fibres de coco [83].

L'angle entre l'axe de fibre et les micros fibrilles s'appelle l'angle micro fibrillaire ou l'angle spiral et il commande la rigidité de la fibre selon la direction [84]. Si les micros-fibrilles sont orientées en spirale à l'axe de fibre, ce dernier est plus ductile. Cependant, si les micros-fibrilles sont parallèles à l'axe de la fibre, les fibres sont rigides, et ont une résistance à la traction élevée.

Les propriétés physiques principales de fibres de palmier dattier sont illustrées dans le tableau 2.3.

Tableau 2. 3 : Propriétés physiques de fibres de palmier dattier [74]

Propriété	Minimum –Maximum
Diamètre (mm)	0.1-1.00
Densité Absolue (kg/m ³)	1300-1450
Densité Apparente (kg/m ³)	512.21-1088.81
Teneur en eau naturelle	9.50-10.00

Une étude sur les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres de palmier dattier a été réalisée sur sept variétés d'une oasis au Maroc [81]. Cette étude a montré que la résistance à la traction varie entre 86,98 et 253,48 MPa avec un module de Young maximum d'environ 3,75 GPa (Figure 2.16 et 2.17).

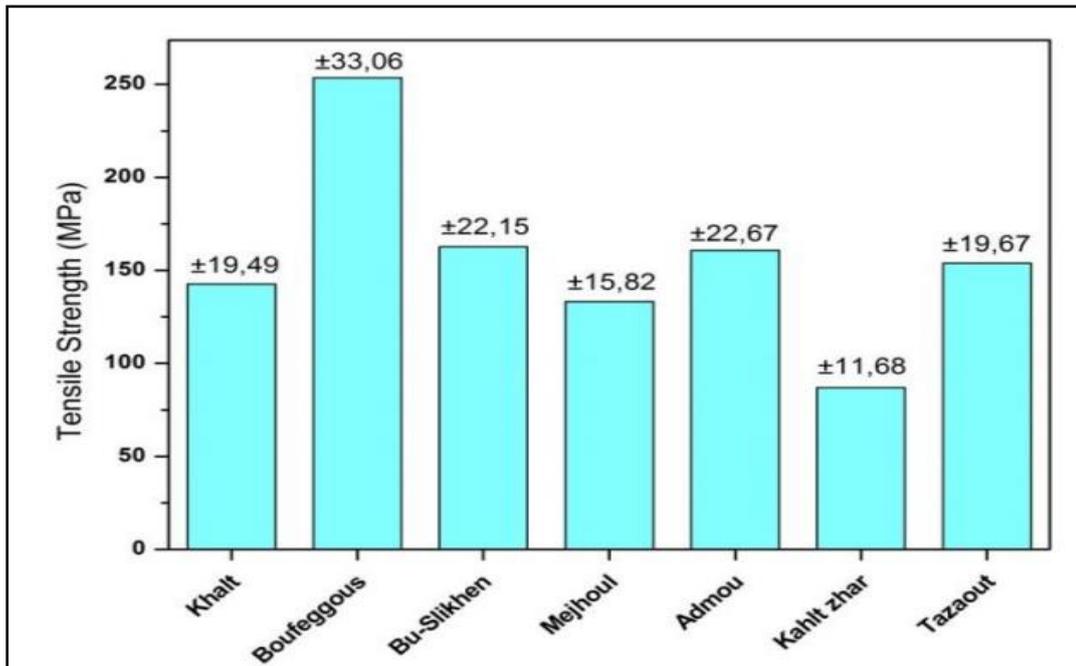


Figure 2. 16: Résistance à la traction des différentes variétés de LDPF [81].

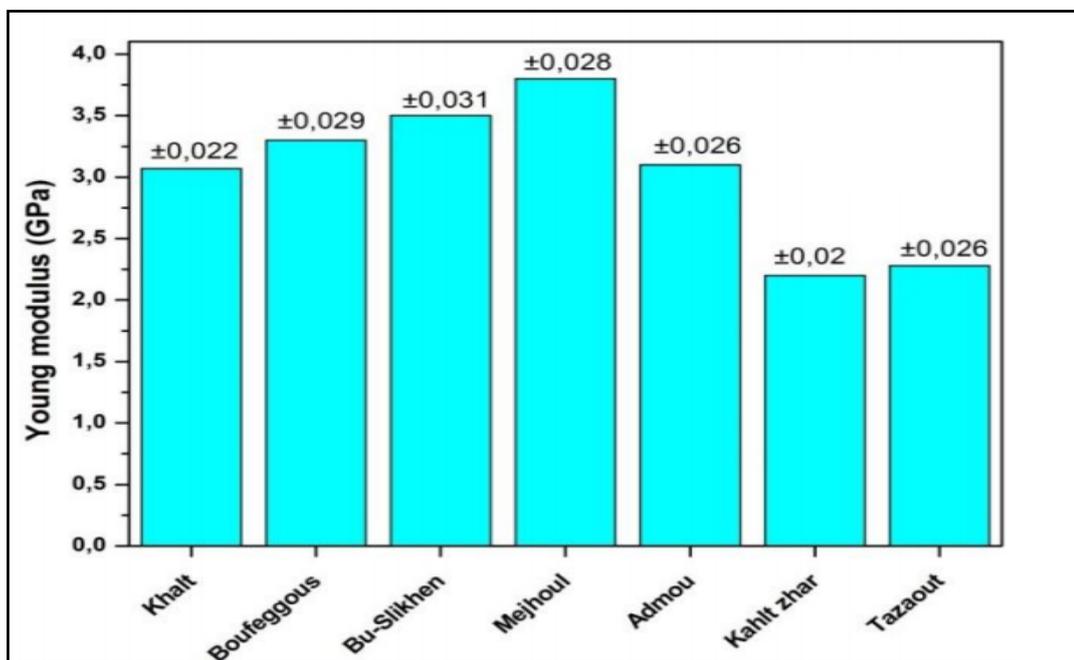


Figure 2. 17 : Module d'Young des différentes variétés de LDPF [81].

Une étude similaire sur quatre variétés de fibres de surface de palmier dattier de Deglette-Nour, mâle, Degla-Bida et Elghers en Algérie a montré que les fibres de surface de palmier dattier mâle représente une résistance à la traction mieux que celle des autres types de fibres étudiées (Figure 2.18) [82].

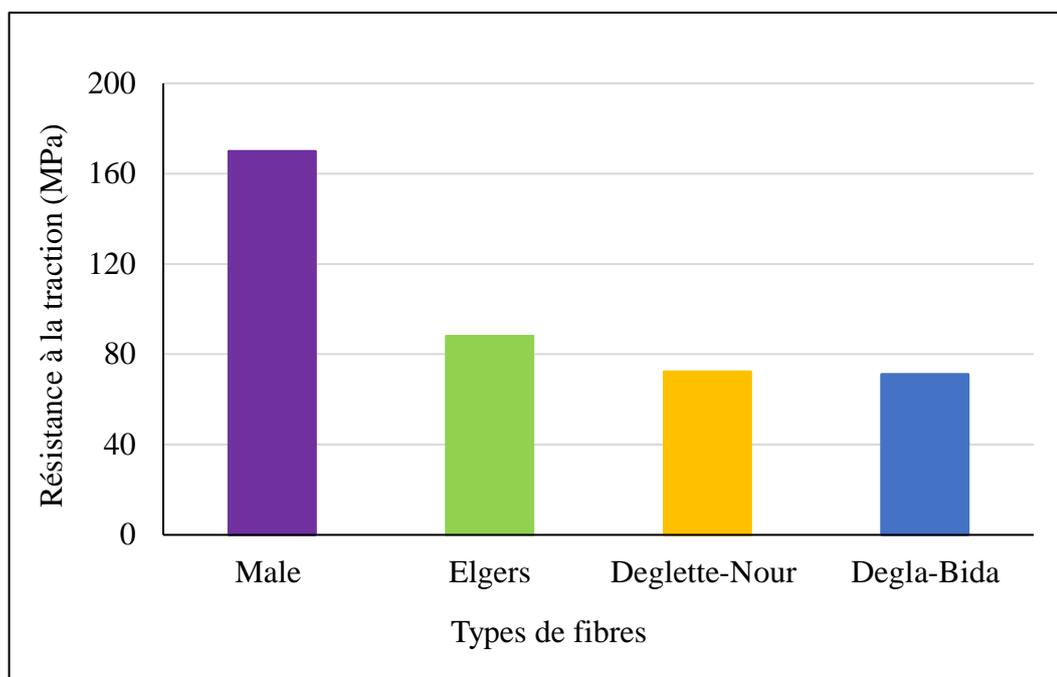


Figure 2. 18 : Résistance à la traction des différents types de fibres [82].

2.4.5. Répartition géographique du palmier dattier

La culture du palmier dattier est concentrée dans les oasis sahariennes. Celui originaire d’Afrique du Nord, est amplement cultivé de l’Arabie jusqu’au Golfe Persique, où il forme la végétation caractéristique des oasis. Il est cultivé de plus aux Canaries, dans la Méditerranée septentrionale et dans la partie méridionale des Etats-Unis [48].

L’effectif total mondial des palmiers dattiers est estimé à plus de 150 millions d’arbres répartis sur une surface estimée à environ 900 000 hectares dont 579 000 hectares (72%) est dans le monde arabo-musulman [76, 79, 82].

Le ministère de l’Agriculture et du développement rural de l’Algérie a affirmé qu’un nombre de 18.4 millions environ de palmier dattier est distribué sur une aire de plus de 160 milles hectares. Précisément cette culture est dispersée dans 17 wilayas et focalisée principalement dans les wilayas Sud- Est et Sud-Centre de l’Algérie [85].

La Figure 2.19 montre la répartition des palmiers dattiers de l’Algérie par wilaya en 2014, d’où on conclut que la wilaya de Biskra est la première région d’Algérie en termes de nombre de palmiers dattiers avec 4,3 millions de palmiers, représentant 23.27% du patrimoine national, et 20% de cette récolte est dans les wilayas d’El-Oued et d’Adrar.

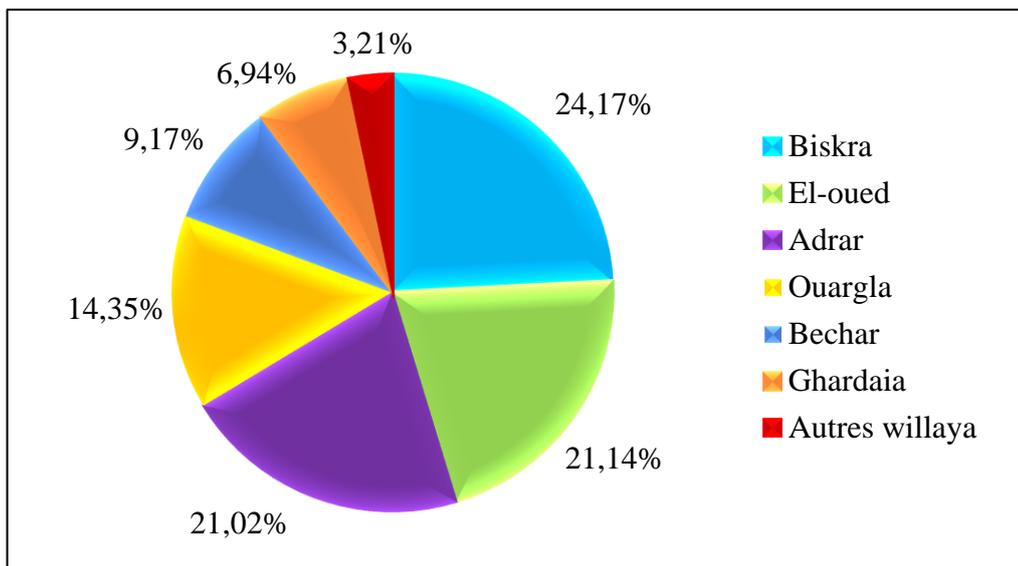


Figure 2. 19 : Répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya en 2014 [85].

2.5. Effet des fibres végétales sur les mortiers et bétons à l'état frais

L'incorporation des fibres dans les composites cimentaires réduit la maniabilité car les fibres absorbent l'eau du malaxage. Il est nécessaire d'augmenter la quantité d'eau pour avoir un mélange suffisamment maniable ni trop sec (diminution de la compacité) ni trop humide (diminution des résistances mécaniques).

La figure 2.20 montre l'augmentation du temps d'écoulement des mortiers avec l'augmentation du volume des fibres de lin [86].

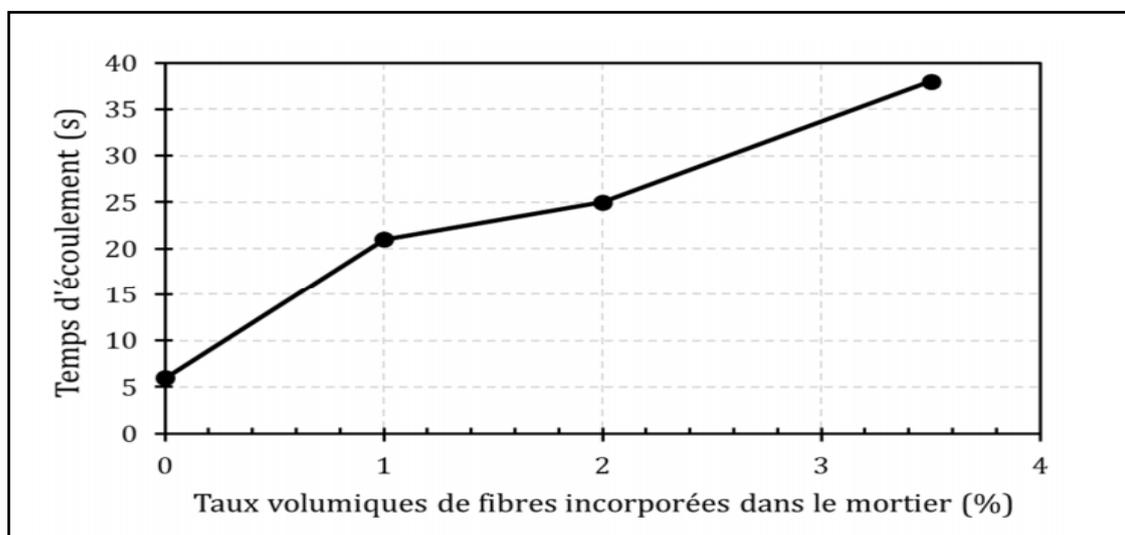


Figure 2. 20 : Temps d'écoulement de mortiers renforcés de fibres de lin [86].

Des résultats similaires ont été observés par la diminution de la maniabilité par la réduction d'étalement (Slump flow) des mortiers à base de fibres du palmier dattier et d'alfa donnés dans le tableau 2.4. On peut conclure que les fibres naturelles tendent à bloquer l'écoulement du mortier (Figure 2.21) [87].

Tableau 2. 4 : Proportions des fibres et des ajouts minéraux dans les mortiers [87]

Mortier	MR	MSL	MPN	MSL AL	MSL DP	MPN AL	MPN DP
Laitier (kg/m ³)	0	77	0	77	77	0	0
Pouzzolane naturelle (kg/m ³)	0	0	77	0	0	77	77
Fibres d'alfa (%)	0	0	0	0,75	0	0,75	0
Fibres de palmier dattier (%)	0	0	0	0	0,75	0	0,75

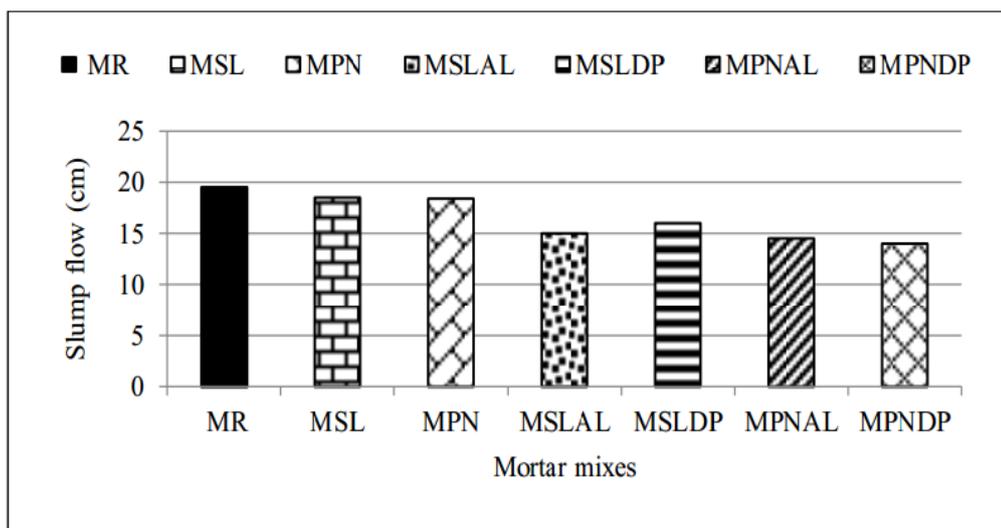


Figure 2. 21 : Etalement des différents mortiers de réparation [87].

Certaines composantes chimiques des fibres végétales comme la pectine, l'hémicellulose et la lignine peuvent empêcher l'hydratation du ciment, qui est un phénomène négatif sur le développement des résistances des composites fibrés, de ce fait plusieurs études ont été accomplies pour remédier ce problème.

Des études sur la pâte de ciment renforcée de fibres de chanvre a montré que le temps de prise est réduit de 45 minutes approximativement à la suite de l'introduction volumique de 2% de fibres de chanvre dans la pâte de ciment (Tableau 2.5) [88].

Tableau 2. 5 : Temps de prise des pâtes de ciment renforcés aux fibres de chanvre [88]

Temps de prise	Composant du mélange	
	Eau + ciment	Eau + ciment + 2% de fibres de chanvre
Début du temps de prise	265 min	340 min
Fin du temps de prise	308 min	380 min

La chaleur d'hydratation est réduite ainsi que la température maximale (Figure 2.22). Une étude menée sur les composites bois-ciment a montré que la température d'hydratation maximale est de 31- 33°C pour une durée approximative de 4h dans le cas des composites avec les fibres de bois (MDF) en comparaison à une température d'hydratation maximal de 60°C pour une durée de 8.5h [89]. Cette variation est commentée par l'existence du caractère de solubilité dans l'eau des composants chimiques comme la lignine et l'hémicellulose.

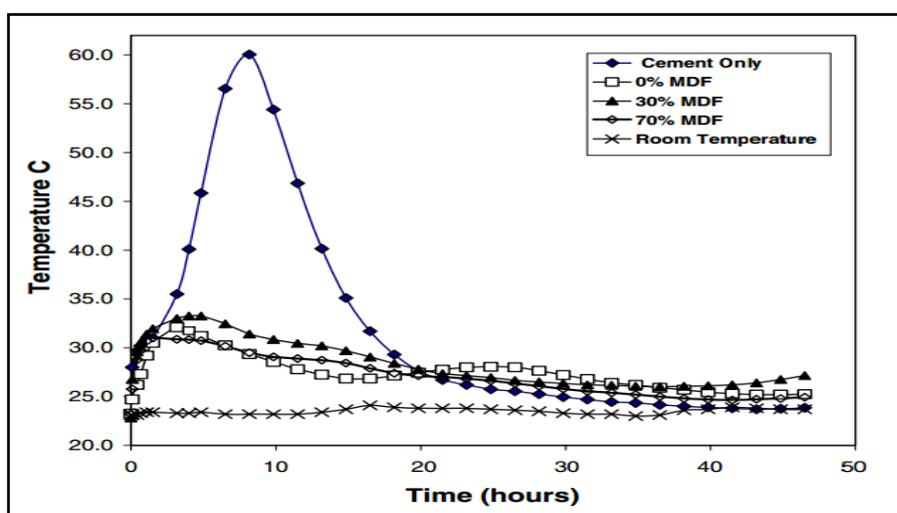


Figure 2. 22 : Effet de l'addition de fibres MDF sur le développement de la chaleur d'hydratation des composite bois-ciment [89].

2.6. Effet des fibres végétales sur les matériaux et bétons à l'état durci

Le tableau 2.6 résume les paramètres influent sur les propriétés mécaniques des matrices minérales renforcés par des fibres végétales.

Tableau 2. 6 : Paramètres influençant les propriétés des composites à matrice minérale renforcés par des fibres végétales [90]

Facteur	Variables
Types de fibres	Noix de coco, sisal, bagasse, bambou, jute, bois etc
Géométrie des fibres	Longueur, diamètre, section, morphologie (boucles, crochets etc.)
Morphologie des fibres	Mono filamenteuse, faisceaux, frisotis, nœuds
Surface des fibres	Rugosité, présence d'agents de surface
Propriétés de la matrice	Type de ciment, nature et taille des granulats, adjuvants
Formulation du composite	Rapport E/L, superplastifiant, antimoissant, dosage en fibres
Méthode de malaxage	Type de malaxeur, séquence d'introduction des constituants, méthodes d'ajout des fibres, temps et vitesse de malaxage
Méthode de mise en œuvre	Vibration conventionnelle, égouttage sous vide, extrusion, projection
Méthode de moulage	Pression de moulage
Cure	Température, humidité

L'effet de la substitution des fibres cellulosiques (de longueur moyenne de 2.5 mm et 0.9 mm respectivement pour les fibres de bambou et celle de la paille de riz) sur les propriétés physiques des pâtes cimentaires est donné dans le tableau 2.7.

On remarque que l'incorporation des fibres végétales augmente l'absorption d'eau et réduit la masse volumique.

Tableau 2. 7 : Propriétés physiques des composites renforcés de fibres végétales à 28 jours [91]

Teneur en fibres (%)	Densité apparente (g /cm ³)		Absorption d'eau (%)		Porosité apparente (%)	
	Fibres de riz	Fibres de bambou	Fibres de riz	Fibres de bambou	Fibres de riz	Fibres de bambou
0	2,01	2,01	13,6	13,6	26,8	26,8
2	1,75	1,76	16,9	17,8	29,6	31,5
4	1,70	1,71	18,5	18,4	31,4	31,4
6	1,56	1,59	20,8	20,3	32,4	31,8
8	1,49	1,50	22,7	21,1	34,0	32,2
10	1,39	1,40	27,1	24,5	37,4	34,8
12	1,38	1,36	28,8	26,3	37,9	35,7
14	1,31	1,31	28,9	26,7	39,7	35,9
16	1,26	1,30	32,6	27,5	41,1	36,6

L'incorporation des fibres végétales réduit la résistance à la flexion pour des volumes faibles (2 à 4%) et une légère augmentation est obtenue à des volumes plus élevés (4 à 10%) (figure 2.23).

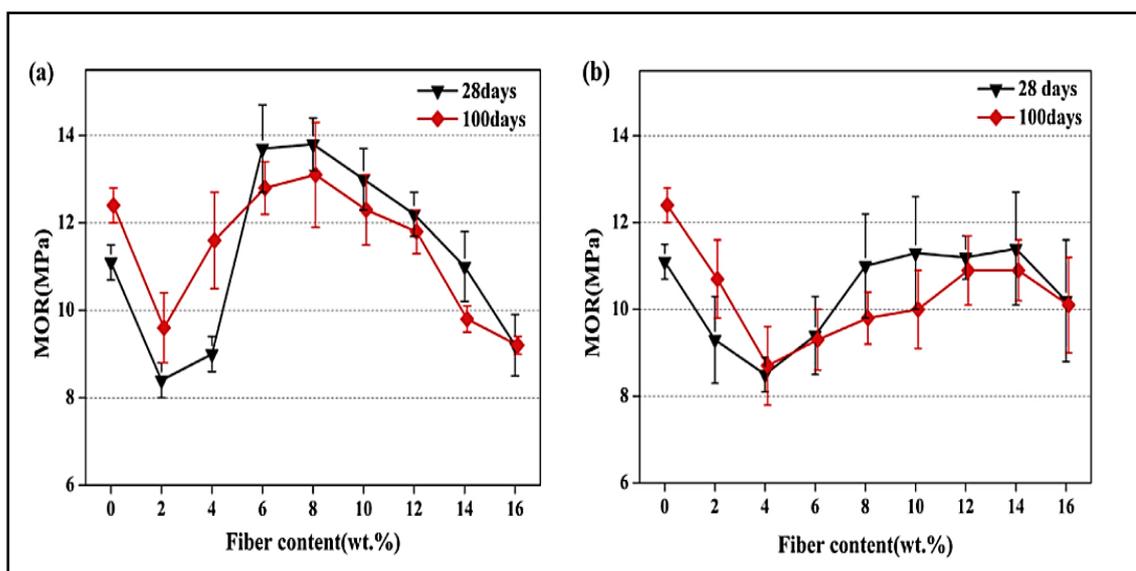


Figure 2. 23 : Résistances à la flexion en fonction de la teneur en fibres pour les composites renforcés avec : (a) fibres de riz et (b) fibres de bambou à 28 et 100 jours [91].

Des résultats similaires ont été rapportés sur les fibres de palmier à huile (Figure 2.24). L'incorporation de 0,25 à 1 % de fibres a un effet négligeable sur la résistance à la compression et la résistance à la flexion du composite.

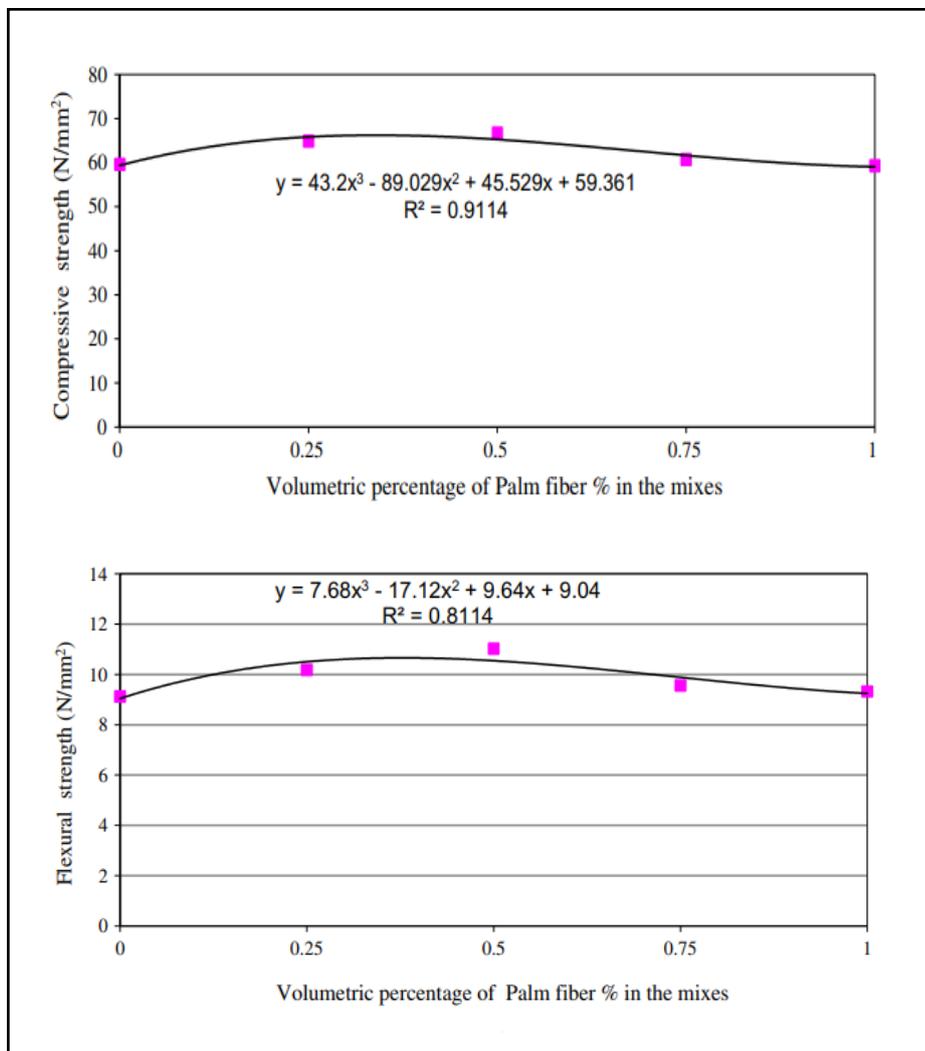


Figure 2. 24 : Propriétés mécaniques des composites renforcés avec les fibres de palmier à huile à l'âge de 90 jours [92].

Par contre, d'autres chercheurs [82] ont trouvé des réductions plus importantes de la résistance à la compression pour des composites à base de fibres de palmier dattier de longueur de 15 mm et 60 mm (Figure 2.25). Cette baisse de résistance est faible pour 2 % de fibres et atteint 55% pour 3% de fibres de 60 mm de longueur. Les auteurs attribuent cette réduction à la suite de l'élévation du nombre de défauts et à la non-uniformité de la distribution des fibres.

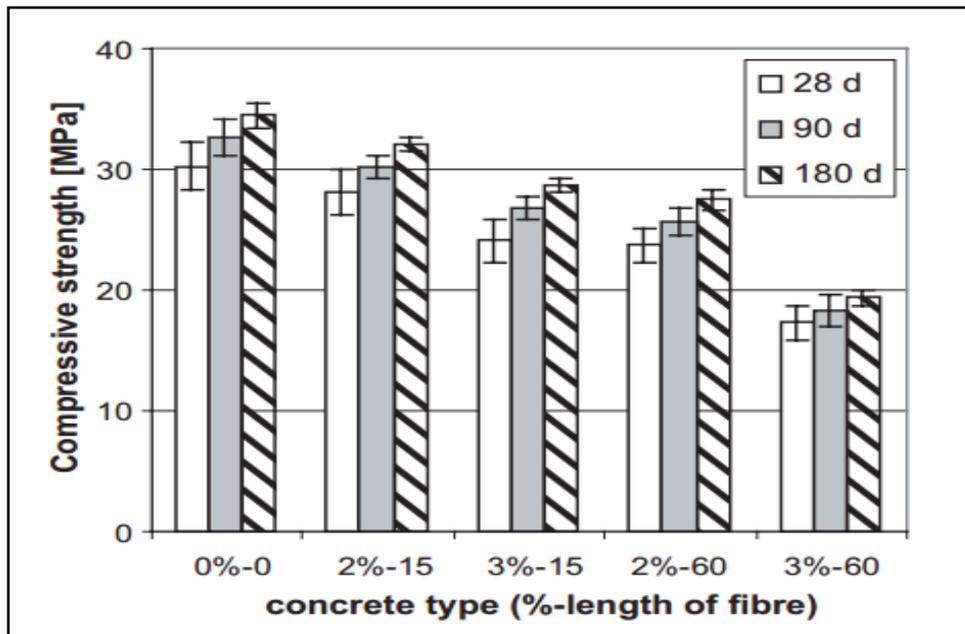


Figure 2. 25 : Résistance à la compression en fonction du pourcentage et longueurs des fibres [82].

Des résultats similaires ont été rapportés sur l'effet d'incorporation des fibres de lin sur la résistance à la compression. Une légère diminution est remarquée par des volumes de fibres de lin de 12 mm, 24 mm, et 36 mm de longueur à 28 jours d'âge (Figure 2.26). Par contre, une diminution plus importante a été trouvée pour des volumes de fibres de lin de 1 à 4% à différents âges (Figure 2.27) [41, 93].

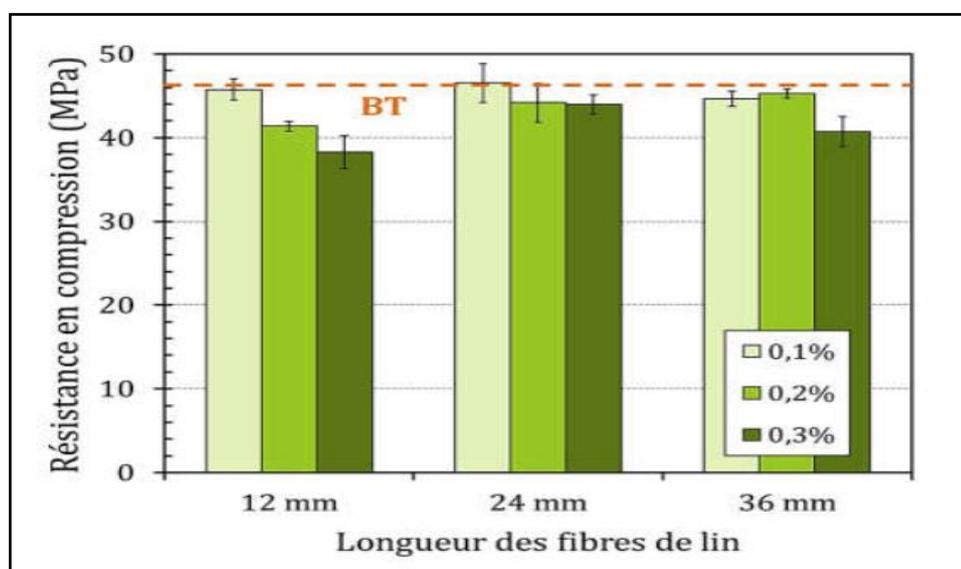


Figure 2. 26 : Résistance à la compression des bétons à base de fibres de lin à 28 jours [41].

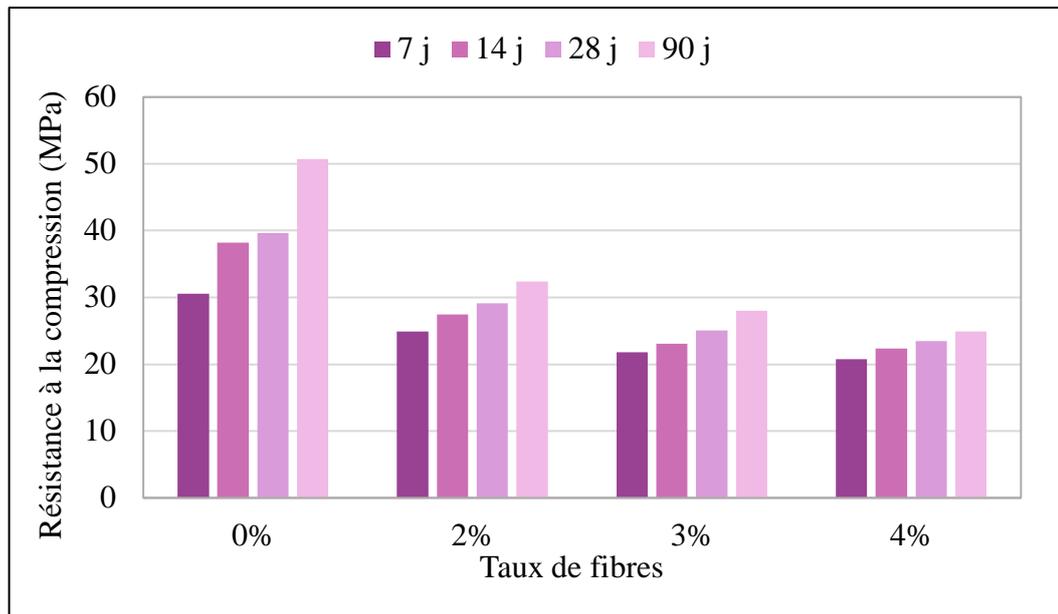


Figure 2. 27 : Influence du taux de fibres de lin sur la résistance en compression du mortier [93].

Khorami et al. [94] ont montré que les composites à base de fibres de bagasse ont une meilleure résistance à la flexion que ceux des fibres de blé d'eucalyptus (Figure 2.28), et ce en raison de leur résistance élevée à la traction et leur facteur de forme qui accroît l'adhérence entre la fibre et la matrice.

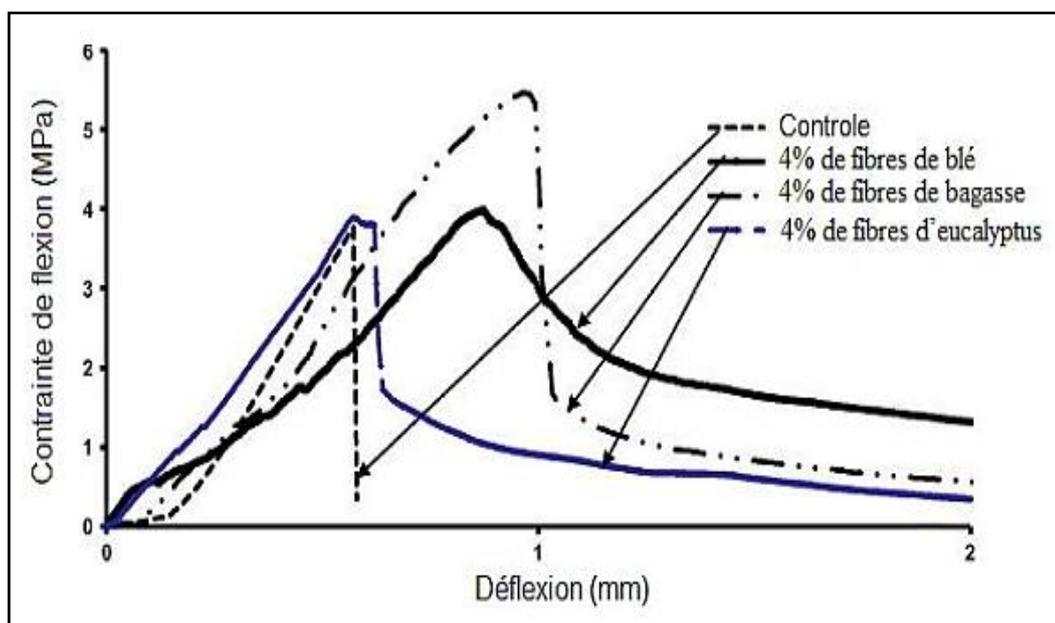


Figure 2. 28 : Résistances à la flexion des composites renforcés avec 4% de fibres végétales comparativement aux échantillons de référence [94].

L'incorporation de 1,8 % de fibre de noix de coco de longueur de 20 mm à 30 mm augment la résistance à la flexion est à 28 jours [95].

Reis [96] a aussi rapporté que la résistance à la flexion augmente de 25 % avec les fibres de coco. Ajouguim et al. [97] ont rapporté que l'utilisation de 1 à 3 % de fibres d'alfa broyées n'influent pas de manière significative sur les propriétés d'état frais du mortier renforcé de fibres par rapport au mortier témoin. En outre, une amélioration de la résistance à la flexion a été observée avec les trois rapports d'addition.

Krobba et al. [98] ont trouvé une résistance maximale à la compression de 31,6 MPa pour une teneur de 0,75 % en volume de fibres d'alfa (Figure 2.29). En outre, la résistance à la flexion varie linéairement avec l'ajout de l'alfa dans les mortiers avec une valeur maximale de 6,2 MPa pour un rapport volumique de fibres de 1,25 %.

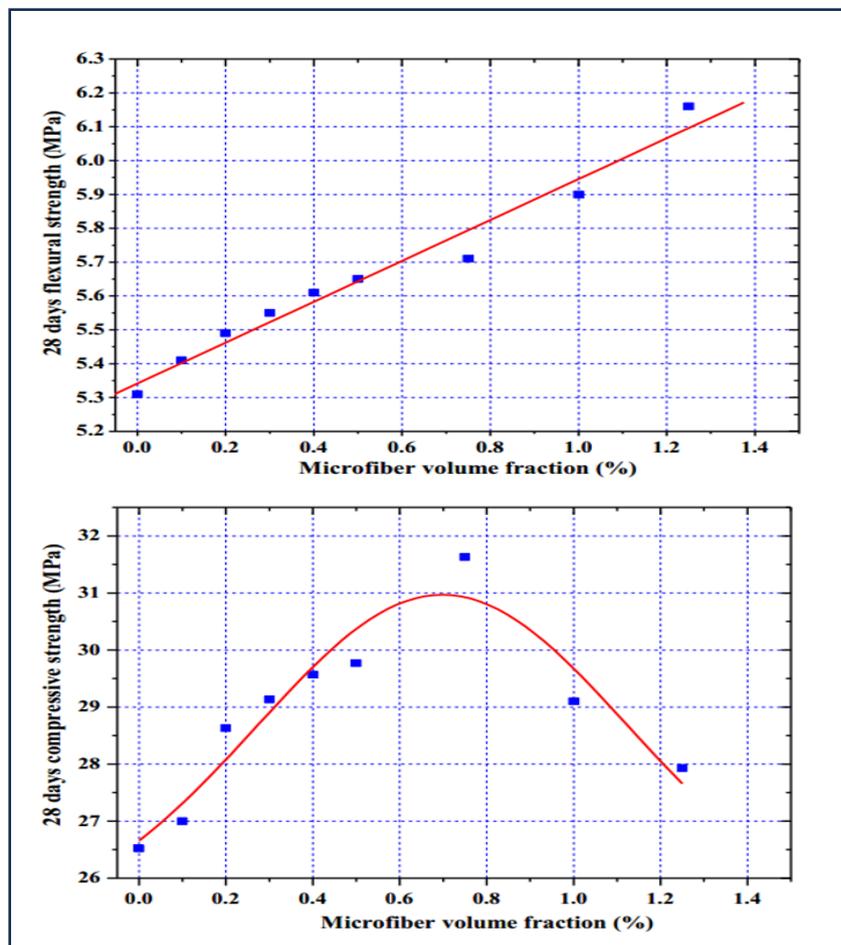


Figure 2. 29 : Effet de la fraction volumique en microfibre sur les propriétés mécaniques du mortier [98].

L'incorporation de 3 % de fibres de chanvre augmente la résistance à la flexion du mortier de 17 % [99]. Une teneur de 16 % en volume de fibres de chanvre de longueur de 10 et 20 mm semble donner la résistance optimale (Figure 2.30), Sedan [61] confirme un perfectionnement optimal sur la résistance à la flexion. Cependant, le module d'Young est réduit en raison de l'augmentation de la porosité suite à l'ajout des fibres.

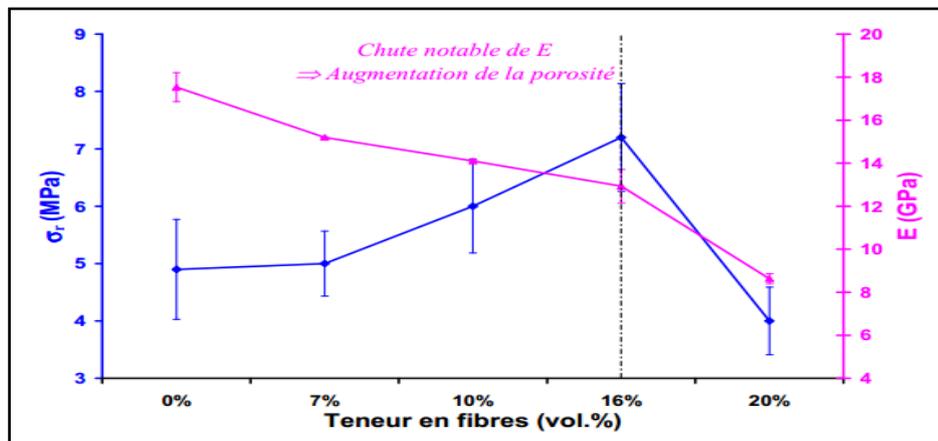


Figure 2. 30 : Evolution de $\sigma_{rupture}$ et de E en fonction de la teneur en fibre [61].

Les fibres végétales ont un effet bénéfique sur les propriétés thermiques des composites cimentaires en raison de l'augmentation de la porosité des mortiers provoqués par le caractère hydrophile des fibres qui gonflent en contact à l'eau. L'incorporation de 1 à 5 % de fibres de palmier dattier a réduit considérablement le coefficient de conductivité thermique (Figure 2.31) [73].

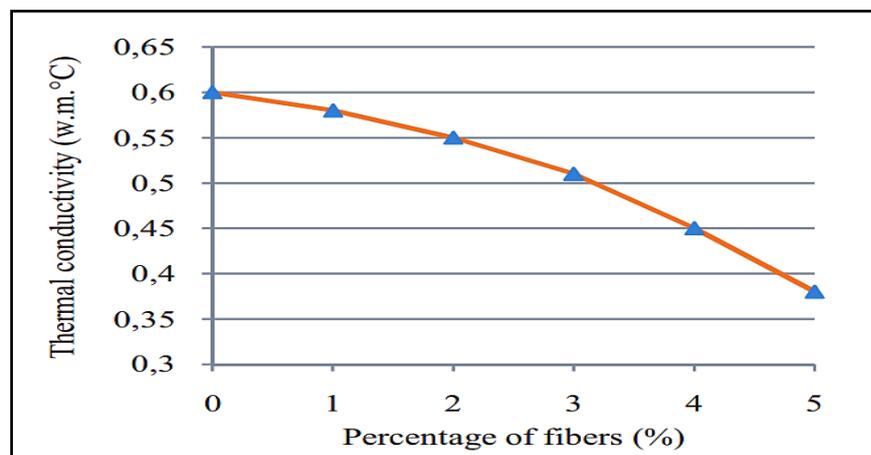


Figure 2. 31: Conductivité thermique des composites en fonction de la teneur en fibres du palmier dattier [73].

Les résultats Benmansour et al. [100] expliquent que la substitution des fibres de palmier diminue significativement la conductivité thermique des composite réalisés.

L'incorporation 0, 0,5 ; 1 ; 1,5 % de fibres d'alfa a aussi baissé la conductivité thermique du mortier [101]. Des résultats similaires ont aussi été reportés sur les fibres de noix de coco et du palmier à huile traitées à l'eau bouillante avec un pourcentages massiques de 5 ; 10 et 15 % (Figure 2.32) [102].

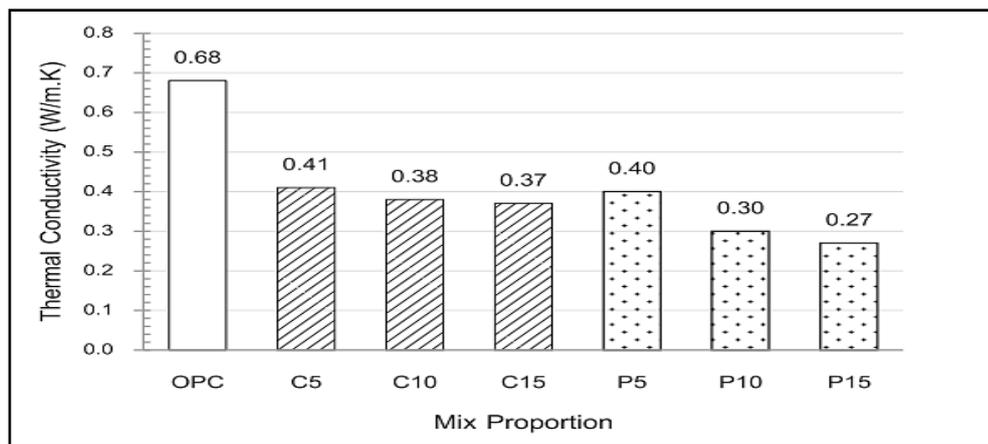


Figure 2. 32: Conductivité thermique des mortiers renforcés avec les fibres végétales de la noix de coco (C(X)) et du palmier à huile (P(X)) [102].

La conductivité thermique est inversement proportionnelle à la teneur en fibres traitées de diss et doum (Figure 2.33).

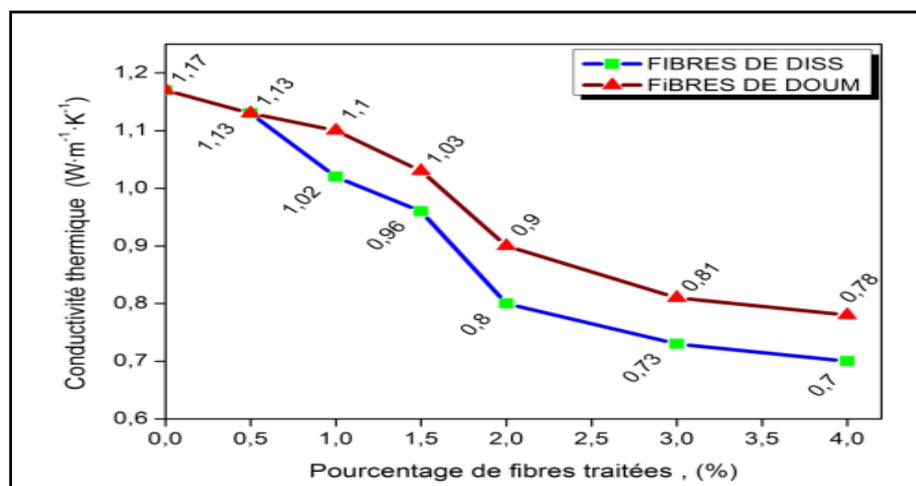


Figure 2. 33: Evolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en fibres après 192 h de séchage [71].

2.7. Effet des fibres sur la durabilité des composites cimentaires

La durabilité du composite cimentaire à base de fibres végétales est limitée en raison de la dégradation des fibres dans les milieux alcalins comme le milieu cimentaire ($\text{pH} > 12$) et à leur caractère hydrophile.

Une diminution de la résistance à la compression de 7,12 MPa à 5,35 MPa a été rapportée pour des mortiers contenant 1,5 % de fibre d'açaí traitées avec une solution de NaOH lorsque ils sont soumis à des cycles de mouillage-séchage (Figure 2.34 et 2.35) [103].

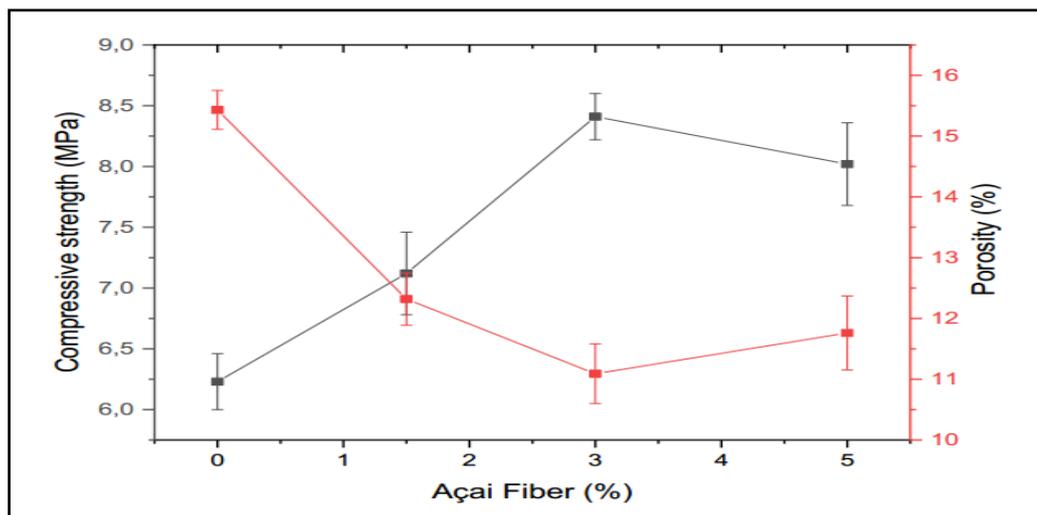


Figure 2. 34: Résistance à la compression avant séchage mouillage [103].

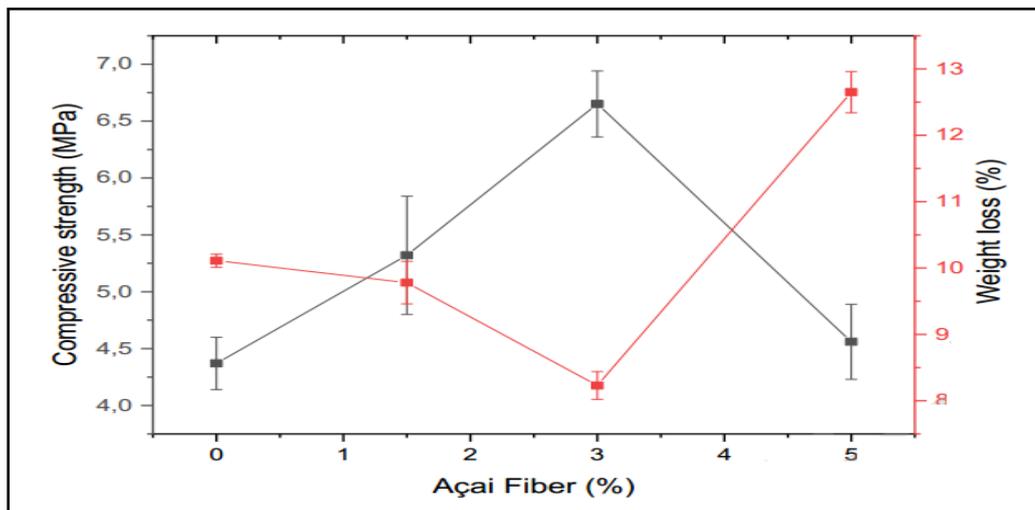


Figure 2. 35: Résistance à la compression après séchage mouillage [103].

L'exposition du mortier renforcé par des fibres de palmier dattier à quatre (4) cycles de séchage- mouillage (4 jours de mouillage à température ambiante et 3 jours de séchage à 60°C) ont provoqué une diminution de la variation volumique après les deux premiers cycles puis une stabilité est observé (Figure 2.36) [104].

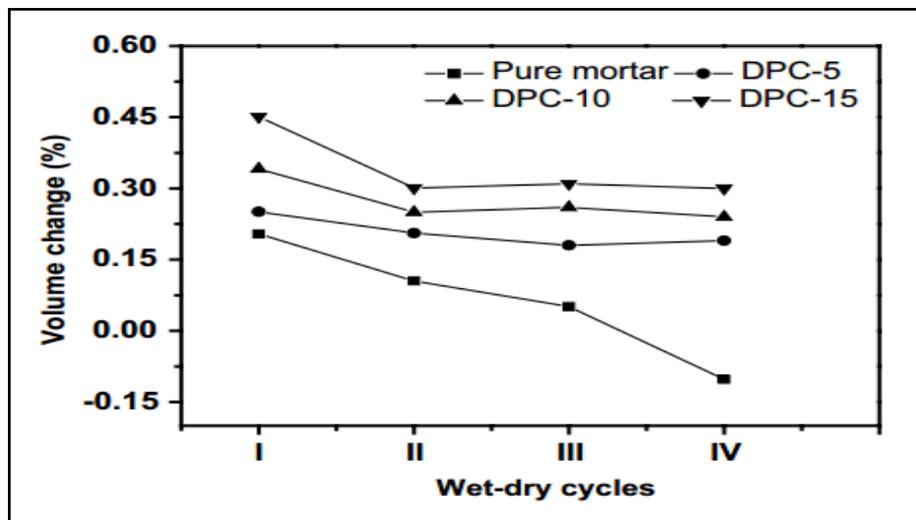


Figure 2. 36: Variation de volume pendant les cycles de mouillage séchage [104].

Booya et al. [105] ont constaté une augmentation de la perméabilité aux ions chlorures avec l'ajout de fibres de Kraft (sans traitement, traitées mécaniquement et traitées chimiquement). Par contre, ils ont reporté une réduction de la perméabilité aux ions chlorures avec l'ajout de fibres traitées en comparant avec les fibres non traitées (Figure 2.37).

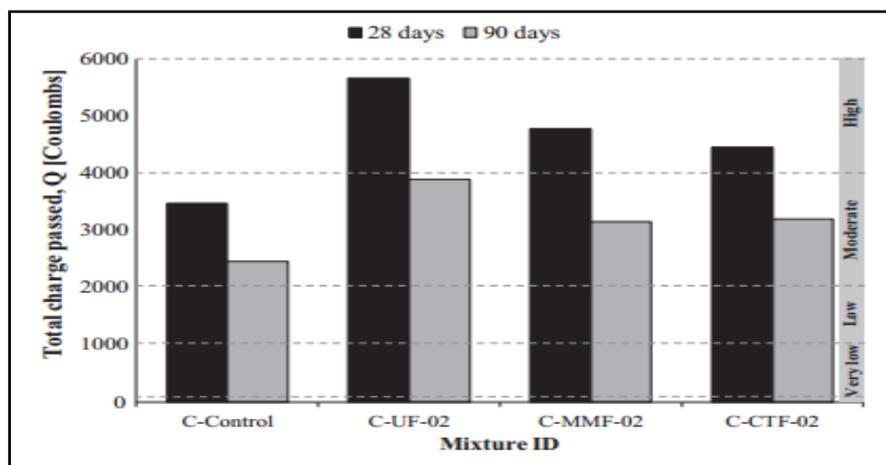


Figure 2. 37: Variation de la perméabilité aux ions chlorure [105].

Ramli et al. [106] ont exposé le béton renforcé par 0,6 % à 2,4% de fibres de coco à trois types d'environnements agressifs : environnement aérien en climat tropical (série A), environnements alternés air et eau de mer selon un cycle de 14 jours (4 jours d'humidification + 10 jours de séchage) (série N), et immersion continue dans l'eau de mer. Les résultats ont montré que la perméabilité aux ions chlorures est moins importante que celle du béton témoin.

2.8. Méthodes d'amélioration de la durabilité des composites à base de fibres Végétales

L'amélioration de la durabilité des matériaux cimentaires renforcés de fibres végétales est un défi réel pour l'obtention d'un matériau ayant une durée de vie longue. Il existe deux méthodes pour remédier à ce problème, soit par la modification des propriétés des fibres, soit par la réduction de l'agressivité de la matrice envers les fibres.

2.8.1. Modification de la matrice

Les composites cimentaires possèdent une solution interstitielle basique de pH élevé, entraînant la dissolution des composantes amorphes de la fibre végétale quand elle est utilisée en tant que renfort et la présence de la chaux dans la solution interstitielle provoquant la minéralisation et la fragilisation de la fibre naturelle.

Pour minimiser l'alcalinité de la matrice, des ajouts cimentaires pouzzolanique comme le laitier, la pouzzolane naturelle et la fumée de silice sont utilisés comme une substitution partielle au ciment.

Selon Mohr et al. [107], l'incorporation de 90% laitier, 30% de metakaolin et plus de 30% de fumée de silice permet de conserver des résistances correctes. Mais une forte diminution de la résistance en flexion des composites après les cycles de vieillissement, indépendamment du taux de substitution des cendres volantes.

Toledo et al. [108] ont conclu que la substitution de 10 % du ciment par de la fumée de silice permet le maintien des propriétés des composites soumis à différents cycles de vieillissement. Par contre, la substitution de 40 % du ciment par du laitier de hauts fourneaux n'a pas empêché complètement la dégradation des fibres. Cette inefficacité du laitier a été aussi montrée par Roma et al. [109] pour une matrice renforcée par des fibres

d'eucalyptus et sisal, avec une substitution du ciment par 36% du laitier et à 5% de la fumée de silice.

L'incorporation d'un matériau pouzzolanique ou de laitier de haut fourneau au mortier à base de fibres de figue, sisal ou coco a montré une compensation de la perte de résistance observée sur les matrices cimentaires fibrées [110].

2.8.2. Traitement des fibres

La deuxième solution du problème est la modification des propriétés des fibres, pour qu'il ait une absorption d'eau limitée par les fibres aussi une forte adhérence fibre – matrice. Plusieurs méthodes ont été utilisées, comme le traitement physique, le traitement thermique ou le traitement chimique.

2.8.2.1. Traitement physique

Le traitement physique consiste à provoquer un changement physique sur la surface de la fibre, sans changer leur composition chimique. Les méthodes physiques provoquent au changement des propriétés structurelles et surfaciques de la fibre cellulosique. Les techniques fréquentes concernant le traitement physique des fibres végétales sont :

Le traitement Corona, qui est un procédé largement utilisé dans le traitement des fibres de celluloses. Il mène à une augmentation de l'énergie de surface, de la basicité, de l'acidité, par une augmentation de la concentration des groupements aldéhyde lors de l'activation de la surface des fibres [111].

Le traitement plasma consiste à bombarder le substrat par des particules de haute énergie. Ainsi, les propriétés de la surface des fibres peuvent être modifiées sans avoir recours à des solvants et sans affecter les propriétés intrinsèques. La variété de modifications possibles avec les plasmas provient du choix du gaz impliqué dans le traitement. L'oxygène entraîne la formation de groupes plutôt acides (accepteurs d'électrons), alors que l'azote ou l'ammoniaque entraîne la formation de groupes plutôt basiques (donneurs d'électrons) [48, 111].

Jonathan [41] a étudié l'effet du traitement plasma sous atmosphère azote sur les fibres de lin (Figure 2.38). Il a observé à l'aide d'un microscope, la formation d'un léger dépôt minéral à la surface en comparaison avec les fibres brutes.

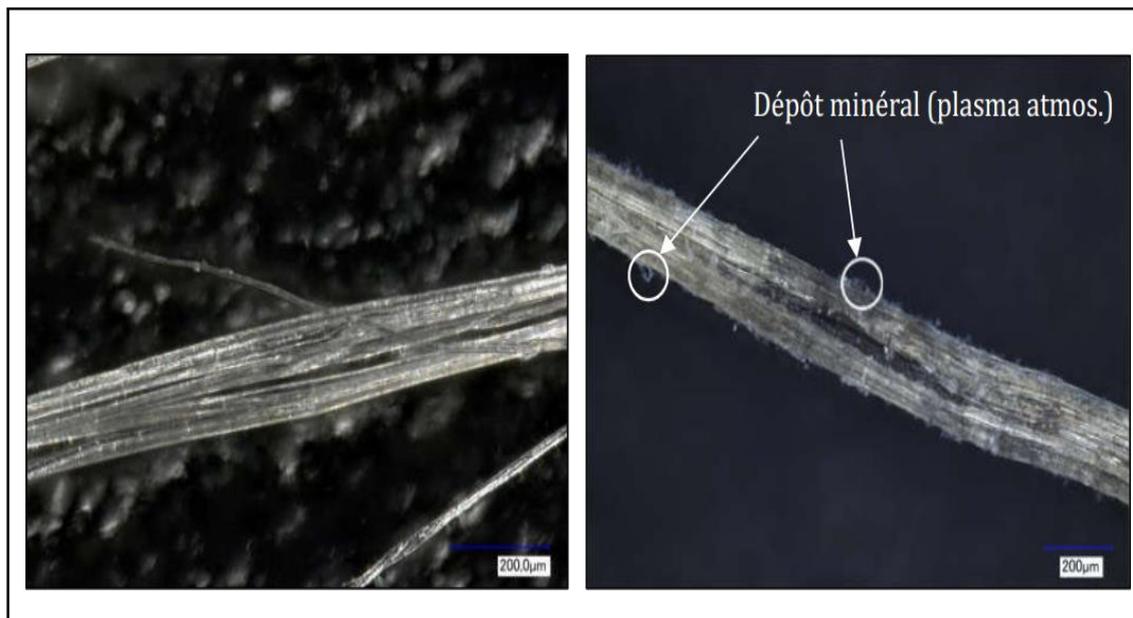


Figure 2. 38: Observations microscopiques de fibres de lin brutes (à gauche) et traitées au plasma atmosphérique (à droite) [41].

2.8.2.2. Traitement à l'eau bouillante

Ce traitement consiste à enlever les extractibles par distillation dans l'eau. Cette technique permet d'améliorer la résistance à la flexion du composite de fibres de diss, lin et palmier dattier traitées comparativement avec les fibres brutes [115–117].

2.8.2.3. Traitement chimique

Le traitement des fibres par les produits chimiques améliore les propriétés d'interface. La modification chimique des fibres végétales revient en réalité à changer la cellulose, le composant primordial des fibres. La constitution spatiale de la cellulose contrôle ses propriétés chimiques et physiques. Cependant, la zone amorphe est beaucoup plus accessible à l'attaque des réactifs que la zone cristalline [112].

Plusieurs techniques de traitement chimique des fibres naturelles sont rapportées dans la littérature telles que : la technique à la soude, du silane (alcoxyde de silicium fonctionnalisé), traitement au permanganate ...etc.

a) Traitement à l'hydroxyde de calcium

Plusieurs chercheurs ont étudiés l'effet du traitement des fibres à l'hydroxyde de calcium sur les propriétés des composites cimentaires [61, 113, 114]. La technique du

traitement consiste à immerger, pendant une certaine durée, les particules végétales dans une solution saturée de chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Ce traitement permet : d'extraire les polysaccharides, de minéraliser la surface, et de capturer les ions calcium dans la structure des pectines.

b) Traitement à l'hydroxyde de soude

Le traitement des fibres végétales le plus couramment utilisé est le traitement alcalin et en particulier à l'hydroxyde de soude (NaOH). La qualité et les performances des fibres après traitement dépendent de la durée du traitement, la concentration de la solution alcaline, et de la température de la réaction de l'ensemble solution-fibre [43, 112]. Ce traitement se fait suivant la réaction suivante.



Ce traitement permet d'éliminer les composants indésirables de la fibre comme l'hémicellulose, la lignine et la pectine, ce qui produit des modifications dimensionnelles, morphologiques et mécaniques des fibres [111] suite à l'apparition de micro fibrilles et une rugosité de la surface de la fibre. L'élimination de l'hémicellulose, entraîne une augmentation de l'indice de cristallisation de la fibre, ce qui augmente leur résistance, supprime les impuretés, cires et huiles recouvrant la surface de la fibre, de ce fait elle devient plus propre et plus rugueuse [118, 119]. La figure 2.39 montre l'effet de l'alcalinisation sur la surface des fibres avant et après le traitement.

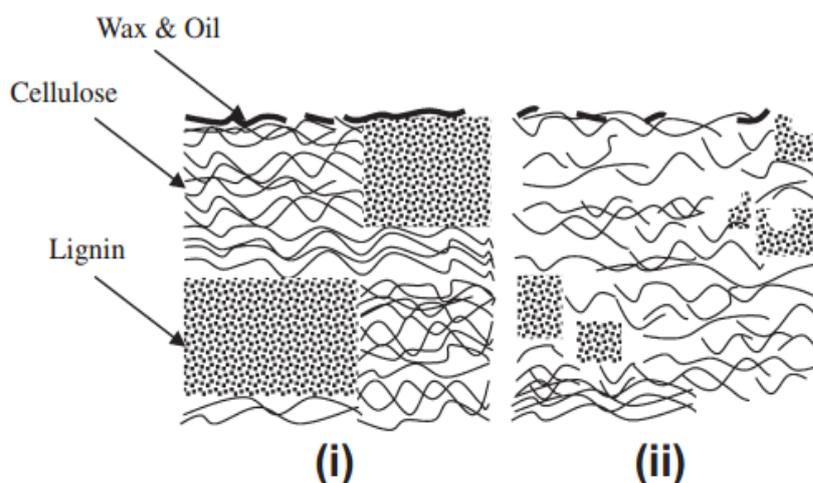


Figure 2. 39: Structure typique d'une fibre cellulosique (i) avant traitement alcalin et (ii) après traitement [118].

Le tableau 2.8 représente un résumé des résultats d'autres chercheurs sur des traitements alcalin dans différentes conditions sur des fibres distincts.

Tableau 2. 8 : Bibliographie relative à l'effet du traitement alcalin sur les propriétés des fibres

Référence	Fibres	Traitement	Resultats
Alawar et al. [120]	Palmier dattier	Traitement alcalin avec : 0.5, 1, 1.5, 2.5 et 5% de NaOH à 100°C, pendant 1h.	Résistance à la traction maximale obtenu avec une concentration de 1% de NaOH
Mouhoubi et al. [119]	Alfa	Traitement alcalin avec : 5% de NaOH à 30°C pendant 2, 4, 6, 8, 16, 24, 48, et 72 h	Une baisse du taux d'absorption d'humidité, qui atteint son maximal après 6 h de traitement
Saha et al. [121]	Jute	Traitement alcalin avec : 0.5, 1, 2, 4, 8 et 18% de NaOH à une température ambiante de 30°C et 90°C pendant 30 min, 1, 2, 4, 8, 16 et 24h.	À température ambiante et pour 4% de NaOH et une durée de 30 minutes, le traitement donne des résultats optimums
			Traitement optimum avec concentration de 1% de NaOH pendant 30 minutes à une température élevée
Shalwan et Yousif [122]	Palmier dattier	Traitement alcalin avec : 0, 3, 6 et 9% de NaOH pendant 24h à une température ambiante	Traitement alcalin des fibres avec 6% de NaOH donne une résistance maximale à la traction des fibres
Raj et al. [123]	Lin	Traitement alcalin avec: 1, 3, 5 et 10% de NaOH, à 23°C pendant 20 min	Les propriétés mécaniques optimales obtenues avec 1% de NaOH

c) Traitement à l'eau silanes

Le traitement par silane est une technique qui a été largement étudiée (Agrawal et al [124]; Pickering et al [125]; Li et al [126]).

Les silanes sont des composés chimiques de formule Si_nH_{2n+2} , comme les alcoxydes de silicium. Ce sont des composés hydrophiles avec différents groupements associés au silicium dont une extrémité va interagir avec la matrice et l'autre avec la fibre hydrophile, agissant comme un pont entre eux. Pour les composites renforcés de fibres naturelles, le traitement par silane diminue aussi les propriétés hydrophiles et augmente ses propriétés hydrophobes. Plusieurs paramètres affectent l'absorption du silane comme le temps d'hydrolyse, la fonctionnalité, la température et le pH [43, 112].

Le tableau 2.9 présente les valeurs de quelques propriétés mécaniques en fonction du traitement chimique de la fibre de palmier.

Tableau 2. 9 : Propriétés mécaniques de la fibre de palmier après divers traitements [127]

Type de traitement	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)	Allongement à la rupture (%)
Non traitée	248	6,7	14
Traitement alcalin	224	5	16
Traitement au permanganate	207	4	23
Traitement au silane	273	5,2	14

2.9. Conclusion

L'analyse bibliographique montre que l'incorporation des fibres végétales dans les composites à matrice cimentaire offre plusieurs avantages, comme l'amélioration de la résistance à la flexion et les propriétés d'isolation thermique. Par contre, la résistance à la compression des composites diminue suite à l'augmentation du pourcentage de fibres.

Nous avons vu que l'inconvénient principal des fibres végétales est leur faible durabilité dans les milieux cimentaires ($pH > 12$). Cette faiblesse de durabilité apparaît par la dégradation des propriétés mécaniques de la fibre et même du composite. La

décomposition de la cellulose et de l'hémicellulose sous l'effet de l'alcalinité de la matrice cimentaire empêche la formation de la structure de C-S-H qui est responsable de la résistance des matériaux cimentaires, pour cela le traitement des fibres est nécessaire en vue d'améliorer la durabilité des matériaux composites obtenus. Il existe deux méthodes pour remédier ce problème, soit par la modification de la matrice par l'utilisation des ajouts minéraux afin de diminuer l'alcalinité de la matrice, soit par la modification des propriétés des fibres par les traitements, pour diminuer leur forte capacité d'absorption d'eau et d'améliorer l'adhérence fibre-matrice.

CHAPITRE III :
MATERIAUX ET ESSAIS

CHAPITRE III : MATERIAUX ET ESSAIS

3.1. Introduction

Dans le but de mettre en évidence l'influence de la présence des fibres végétales sur les performances des mortiers de réparation, divers essais expérimentaux ont été effectués. Ce chapitre présente d'une part les caractéristiques des différents matériaux utilisés et d'autre part la mise en revue des traitements appliqués sur les fibres. Enfin, nous expliquerons les différentes méthodes ainsi que les modes opératoires des essais réalisés.

3.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

3.2.1. Ciment

Le ciment utilisé est le **CEM II/B-L 42.5** fabriqué par le groupe Lafarge (cimenterie de Msila), caractérisé avec une surface spécifique de 4123 cm²/g. Les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques de ce dernier, sont regroupés dans les tableaux 3.1 et 3.2.

Tableau 3. 1: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment

Ciment	ρ_{abs} (kg/m ³)	ρ_{app} (kg/m ³)	SSB (cm ² /g)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Rc minimale à 28j (MPa)
CEM II/A-L 42.5	3080	1103	4123	173	222	42.5

Tableau 3. 2: Composition chimique du ciment

Élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	SO ₃	Nn O	K ₂ O	TiO ₂	CO ₂
%	16.60	3.88	3.00	63.03	1.93	0.00	0.56	0.20	11.29

3.2.2. Granulats

Pour la confection du béton, deux types de gravier ont été utilisés, les graviers 3/8 et 8/15 prévenant de Sétif.

Pour la confection des mortiers et bétons, nous avons synthétisé un sable composé de deux types de sables à noter 50% de celui de Baghlia, grossier de granulométrie 0/5 et de module de finesse M_f de 3,7 et 50% de sable de Boughezoul fin de granulométrie 0/3 et de M_f de 1,56. De ce fait nous avons obtenu un sable de module de finesse de 2,85. Les courbes granulométriques sont illustrées par la figure 3.1.

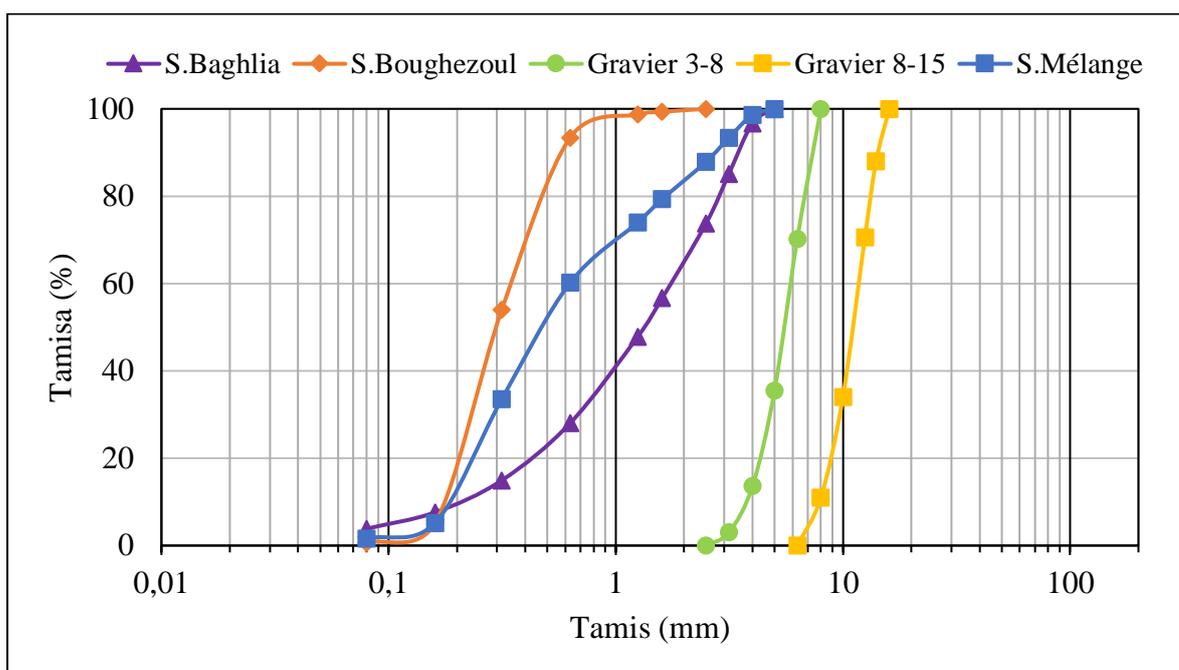


Figure 3. 1: Courbe granulométrique des granulats utilisés.

3.2.3. Ajouts minéraux

Afin d'augmenter la durabilité des mortiers à base de fibres végétales par la diminution de l'alcalinité du milieu cimentaire, nous avons opté à la substitution du ciment par deux ajouts minéraux à savoir le laitier et la pouzzolane naturelle.

➤ Le laitier de hauts fourneaux

Le laitier de hauts fourneaux est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par projection d'eau. Celui utilisé dans cette étude est le laitier granulé produit par le complexe sidérurgique d'El Hadjar. Il se présente sous forme de

grains sphériques, de couleur jaune clair (Figure 3.2), de masse volumique réelle (ρ_{abs}) de 2810 kg/m^3 , et a été broyé à l'aide d'un broyeur à boulets à une finesse de $4300 \text{ cm}^2/\text{g}$. Le tableau 3.3 présente les caractéristiques chimiques du laitier.

Tableau 3. 3: Analyse chimique de laitier d'El Hadjar

Élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	SO ₃	Nn O	K ₂ O	TiO ₂	CO ₂
%	40.82	9.18	0.19	38.86	1.44	0.31	0.54	0.72	1.75

➤ La pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes naturelles, sont généralement d'origine volcanique ou des roches sédimentaires. Dans notre étude nous avons utilisé la pouzzolane de Beni Saf de couleur grise (Figure 3.2) qui est caractérisée par une masse volumique absolue de 2824 kg/m^3 , et une surface spécifique de Blaine $4200 \text{ cm}^2/\text{g}$. les caractéristiques chimiques de la pouzzolane sont données par le tableau 3.4.

Tableau 3. 4 : Composition chimique de la pouzzolane

Élément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	SO ₃	Nn O	K ₂ O	TiO ₂	CO ₂
%	38.58	15.90	15.21	16.36	0.02	0.27	1.66	2.99	8.10



Figure 3. 2 : Additions minérales : A) Laitier et B) Pouzzolane naturelle.

3.2.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des éprouvettes est une eau potable de distribution, propre et exempte d'impuretés, disponible au niveau du laboratoire de génie civil à Blida.

3.2.5. Superplastifiant

Un superplastifiant, haut réducteur d'eau de la troisième génération à base de polycarboxylates a été exploité dans notre analyse. Ce dernier est confectionné par la société Granitex-NP et mis sur le marché par « MEDAFLOW 30 ». Les caractéristiques de ce superplastifiant sont mentionnées dans le tableau 3.5 :

Tableau 3. 5 : Caractéristiques du superplastifiant utilisé

Aspect	Liquide
Couleur	Marron
Extrait sec	30%
Densité	1.07 ± 0.01
PH	6 à 6.5
Teneur en chlorure	≤ 1g/l
Plage de dosage	De 0,5% à 2% en masse de poudre.

3.3. Caractéristiques des fibres végétales utilisés

Les fibres de palmier dattier utilisées dans cette recherche proviennent de la surface du tronc du palmier dattier de la région de Biskra. Elles sont naturellement tissées et sont extraites du tronc sous la forme d'un maillage presque rectangulaire (300-500 mm de longueur et 200-300 mm de largeur), formé de trois couches superposées. Les fibres de palmier dattier sont obtenue selon la procédure de la figure 3.3.

1

Détachement du
maillage
pararectangulaire



Les plaques de fibres sont
ensuite séparées en fibres
individuelles dans l'eau

2**3**

Séchage à température
ambiante pendant
deux jours.



Regroupage des fibres
pour le découpage

4**5**

Les fibres sont coupées à
des longueurs de 10 et
 30 ± 2 mm



Figure 3. 3: Procédure de préparation des fibres de palmier dattier.

Les fibres ont été saturées dans l'eau durant 24h avant d'être utilisées afin d'éviter le risque d'absorption de l'eau de gâchage par ces derniers, lors de la confection du mortier. Les principales propriétés physicomécaniques des fibres de palmier dattier sont données dans le tableau 3.6

Tableau 3. 6 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres de palmier dattier

Propriétés	Unité	Palmier dattier
Diamètre	mm	0.55 ± 0.2
Masse volumique absolue	g/cm^3	1.103 ± 0.01
Absorption d'eau à saturation	%	133 ± 2
Résistance à la traction	MPa	154.91
Module d'Young	GPa	4.653

3.1. Traitement des fibres

Pour pallier les imperfections et les incompatibilités, entre les matériaux de différentes natures entrant dans la fabrication du composite à base de fibres végétales à matrice cimentaire, différents traitements ont été appliqués aux fibres de palmier dattier.

3.1.1. Traitement chimique (traitement alcalin T1)

Ce traitement, consiste à immerger les fibres de palmier dattier pendant 2 h dans une solution de NaOH à une concentration de 3%. On procède ensuite à un rinçage avec de l'acide acétique concentré à 1 % et de l'eau distillée jusqu'à neutralité chimique de l'eau de rinçage, vérifiée par des mesures successives de pH à l'aide d'un pH-mètre. Enfin, les fibres sont étuvées à 60° C pendant 24 h (Figure 3.4).

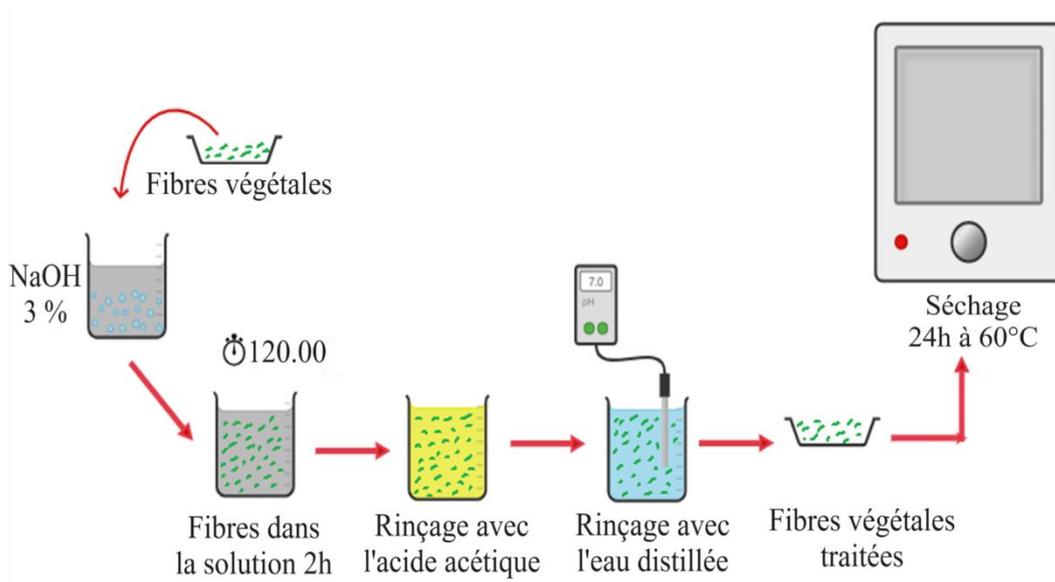


Figure 3. 4: Protocole du traitement alcalin.

3.1.2. Traitements hydrothermique (l'eau bouillante T2)

Ce traitement a été effectué par la mise en ébullition des fibres coupées de palmier dattier pendant 1 heure, puis égouttées et rincées à une grande quantité d'eau afin d'enlever les substances organiques, les fibres propres sont ensuite séchées à température ambiante pendant 48h (Figure 3.5).

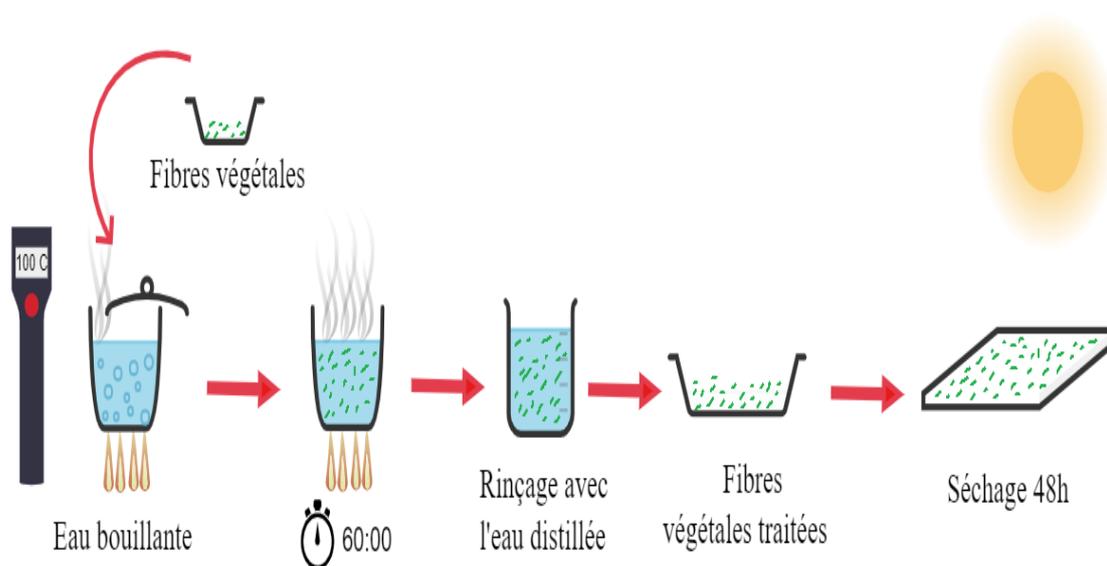


Figure 3. 5: Protocole du traitement hydrothermique.

3.2. Etude de l'effet du traitement sur les propriétés des fibres de palmier dattier

3.2.1. Analyse thermogravimétrique

L'analyse thermogravimétrique (ATG) est une technique d'analyse thermique qui permet la mesure de la quantité de variation de masse d'un échantillon en fonction de la température. Ces analyses thermogravimétriques ont été réalisées afin de comparer l'influence des traitements sur les constituants des fibres de palmier dattier. Ils ont été réalisés au sein de laboratoire CRAPC de l'université de Laghouat à l'aide d'un équipement Mettler Toledo (Figure 3.6). Toutes les caractérisations sont menées sur des échantillons avec une masse de 7-10 mg, une vitesse de montée en température de 10°C/min jusqu'à 700°C et sous un flux d'azote.

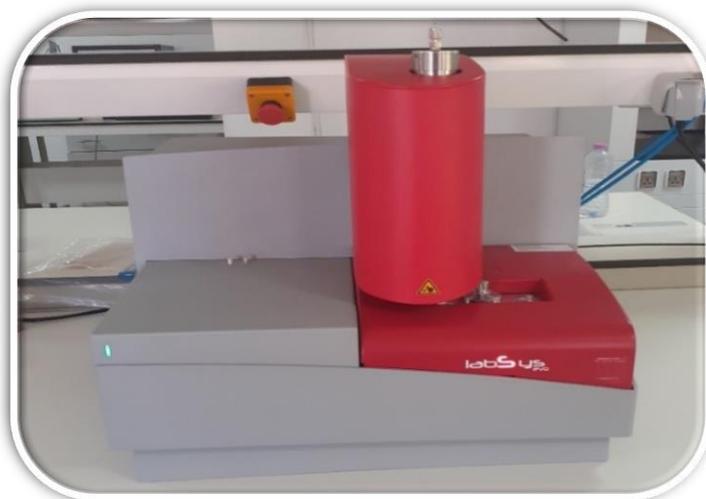


Figure 3. 6 : Analyseur thermogravimétrique Mettler Toledo.

3.2.2. Analyse par diffraction des rayons X

Afin d'analyser l'influence des différents traitements sur la cristallinité des fibres de palmier dattier, des analyses par diffraction des rayons X ont été réalisées.

L'appareil utilisé est de type Bruker D8 Advance au sein de laboratoire CRAPC de l'université de Laghouat (Figure 3.7). Cet appareil est équipé d'un tube à anticathode de cuivre émettant une onde lumineuse de longueur $K\alpha_1 = 0,15406$ nm. Les conditions d'excitation sont : $U = 45$ kV, $I = 40$ mA et l'angle 2θ passe de 10 à 50° avec un pas de 0,013°.



Figure 3. 7: Diffractomètre à rayons X type Bruker AXS D8 Advance.

De nombreuses études citent la méthode de Ségal [128], afin d'estimer l'indice de cristallinité (CrI), des fibres naturelles qui permettent d'apprécier la quantité de cellulose cristalline. Cet indice est déterminé d'après l'équation (3.1), en utilisant les intensités des raies 002 et 110. I_{002} représente à la fois le matériau amorphe et cristallin alors que I_{am} représente seulement la partie amorphe.

$$CrI = \frac{I_{(002)} - I_{(am)}}{I_{(200)}} \quad (3.1)$$

3.2.3. Analyse microscopique par balayage

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de microscopie électronique basée sur le principe des interactions entre les électrons et la matière. Cette technique d'analyse est capable de produire des images à haute résolution de la surface d'un échantillon.

Une étude microscopique a été effectuée sur les fibres de palmier dattier afin d'étudier l'influence de chaque traitement sur le changement de la morphologie de la surface des fibres végétales et observer les interfaces fibre-matrice

L'appareil utilisé dans ce travail est un Microscope Électronique à Balayage FEI Quanta 200 FEG au sein de laboratoire CRAPC de l'université de Laghouat (figure 3.8) avec une tension d'accélération de faisceau de 200 V à 30 kV. Les échantillons de fibres végétales ont été déposés et fixés sur le porte échantillon, puis l'ensemble est introduit dans la chambre du MEB afin d'analyser les échantillons microscopiquement.

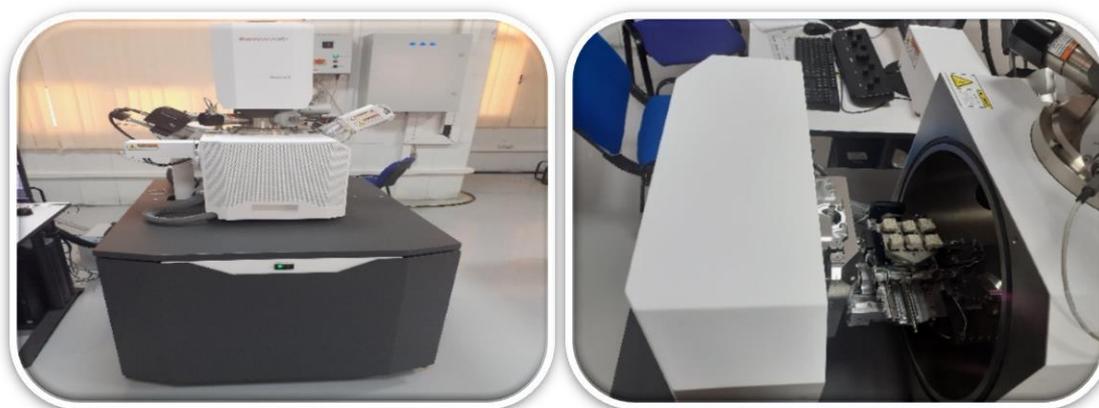


Figure 3. 8: Microscopie électronique à balayage FEI Quanta 200.

3.3. Essais réalisés sur mortier à l'état frais

3.3.1. Essai d'étalement à la table à secousse

La maniabilité du mortier se mesure sur la table à secousse. Selon la norme NF EN 1015-3 [129], cet essai sert à mesurer le diamètre d'étalement du mortier mis en place à l'aide d'un moule tronconique de diamètre de $D_i = 10$ cm sur le plateau de la table à chocs, appliquant 15 chocs correspondant chacun à une chute de 10 mm (Figure 3.9). L'étalement en % est donné par la formule :

$$E(\%) = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i} \quad (3.2)$$

Avec D_r = diamètre final et D_i = diamètre initial.



Figure 3. 9 : Etalement de mortier avec la table à secousse.

3.3.2. Maniabilimètre LCPC

Le maniabilimètre LCPC, permet de tester le mortier vis à vis de sa maniabilité dynamique, selon la norme NF P18-452 [130]. Il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur (Figure 3.10). Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.



Figure 3. 10 : Ecoulement du mortier avec LCPC.

3.3.3. Masses volumiques apparentes et Teneur en air occlus

Les masses volumiques apparentes des mortiers sont définie conformément à la norme NF EN 1015-6 [131].

L'air occlus est mesuré au moyen d'un aéromètre à mortier "Contrôlable" de 1 litre, selon la norme NF EN 413-2 [132].



Figure 3. 11 : Mesure des masses volumiques apparentes des mortiers.



Figure 3. 12 : Mesure de l'air occlus à l'aide d'un aéromètre à mortier.

3.4. Formulation du mortier de réparation

Pour la confection de nos mortiers, nous avons suivi la même démarche que celle du mortier classique, en utilisant un rapport E/L = 0,5. Deux types de sables (50% de Baghlia et 50% Bougezoul) sont utilisés. Avec un rapport de S/C = 3. Après quelques essais préliminaires (étalement à la table à secousse et maniabilimètre LCPC), le dosage en superplastifiant SP a été choisi pour 1.1% du poids de ciment.

On fixe la valeur de 1 % de fibres brutes ou traitées de palmier dattier, d'une longueur de 10 ou 30 mm, qui sont ajoutées au mélange. Le pourcentage des ajouts utilisés a été fixé à 15 %. Les granulats utilisés pour la confection ont été séchés jusqu'à l'obtention d'une variation de masse inférieure à 0,1 %. Les différentes compositions du mortier pour un volume de mélange qui est égale à 1litre, sont présentées dans le tableau 3.7.

3.5. Confection des éprouvettes de mortier.

Après malaxage des différents constituants dans un malaxeur capacité 5 l, comme illustré dans la figure 3.13, le mélange est ensuite coulé dans des moules en acier à trois alvéoles, pour réaliser des éprouvettes de dimensions 40×40×160 mm³, conformément à la norme NF EN 196-1 [133].



Figure 3. 13 : Malaxeur à mortier.

Le compactage des moules est réalisé à l'aide d'une table à chocs, comme représenté sur la figure 3.14, celui-ci permet d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15 mm à la fréquence d'une chute par seconde, durant 60 secondes.

Les moules remplis (Figure 3.15) sont ensuite couverts d'un plastique puis conservés dans une chambre humide pendant 24 heures jusqu'au démoulage. Une fois démoulés, ils sont conservés dans une enceinte humide à 100 % HR et $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à l'échéance de l'essai.



Figure 3. 14 : Table à chocs.



Figure 3. 15 : Moule pour essai sur mortier.

Tableau 3. 7 : Proportions des mélanges de mortiers de réparation à base de fibres de palmier dattier

Désignation	Mélange	Ciment (g)	Sable (g)	Eau (g)	Fibres (g)	SP (%)	Laitier (g)	Pouzzolane (g)
MR	Mortier de référence	450	1350	227	/	4,95	/	/
ML	Mortier avec 15 % laitier	382,50	1350	227	/	4,21	67,50	/
MPZ	Mortier avec 15 % pouzzolane	382,50	1350	227	/	4,21	/	67,50
MFP1	Mortier avec fibre de PD brutes de 10 mm	450	1350	227	10,24	4,95	/	/
MFP3	Mortier avec fibre de PD brutes de 30 mm	450	1350	227	10,24	4,95	/	/
MFP1L	Mortier avec fibre de PD brutes de 10 mm et 15 % laitier	382,50	1350	227	10,24	4,21	67,50	/
MFP1PZ	Mortier avec fibre de PD brutes de 10 mm et 15 % pouzzolane	382,50	1350	227	10,24	4,21	/	67,50
MFP3L	Mortier avec fibre de PD brutes de 30 mm et 15 % laitier	382,50	1350	227	10,24	4,21	67,50	/
MFP3PZ	Mortier avec fibre de PD brutes de 30 mm et 15 % pouzzolane	382,50	1350	227	10,24	4,21	/	67,50
MFP1T1	Mortier avec fibre de PD traitées de 10 mm par NaOH	450	1350	227	10,24	4,95	/	/
MFP3T1	Mortier avec fibre de PD traitées de 30 mm par NaOH	450	1350	227	10,24	4,95	/	/
MFP1T2	Mortier avec fibre de PD traitées de 10 mm par l'eau bouillante	450	1350	227	10,24	4,95	/	/
MFP3T2	Mortier avec fibre de PD traitées de 30 mm par l'eau bouillante	450	1350	227	10,24	4,95	/	/

3.6. Essais réalisés sur mortier à l'état durci

3.6.1. Résistance à la compression et à la flexion sur mortier

Les essais de flexion et de compression permettent de définir les propriétés mécaniques des matériaux, ces derniers ont été menés sur des éprouvettes de mortier prismatique de dimensions $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ selon la norme NF EN 196-1 [133].

Pour ce faire, on entame par une presse de flexion de trois points d'une capacité de 15 kN, ces essais de flexion sont appliqués à 28 et 90 jours après le gâchage, trois échantillons ont été testés par formulation.

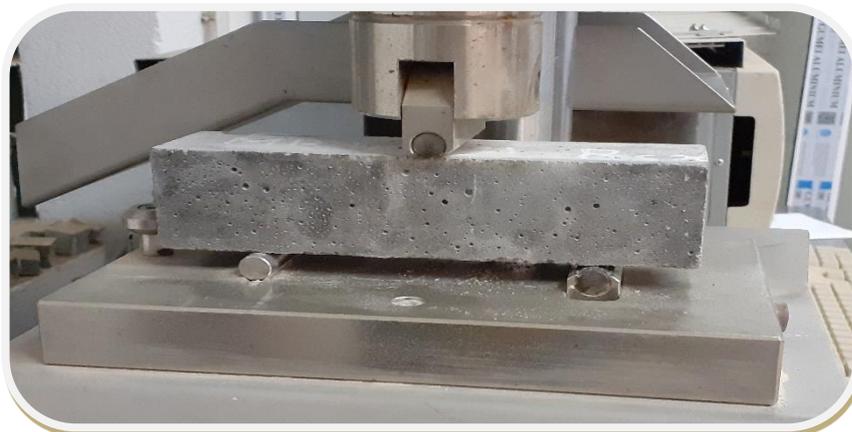


Figure 3. 16 : Essai de résistance à la flexion.

La résistance à la flexion est calculée à partir de l'équation. 3.3 :

$$R_f = \frac{3.F_{f,max}.L}{2.b.h^2} \quad (3.3)$$

Avec :

R_f : la résistance en flexion du mortier (MPa) ;

$F_{f,max}$: la charge maximale en flexion provoquant la rupture (N) ;

L : la distance entre les appuis (mm) ;

b, h : respectivement la largeur et la hauteur de l'éprouvette ($b = h = 40 \text{ mm}$).

Les six demi-prismes obtenus suite à cet essai de flexion sont testés en compression sur les faces latérales du moulage aux mêmes âges : 28 et 90 jours (Figure 3.17). La même presse a été utilisée, en remplaçant toutefois la cellule de charge de 15 kN par une autre, de capacité supérieure (250 kN), d'après la norme NF EN 196-1 [133].

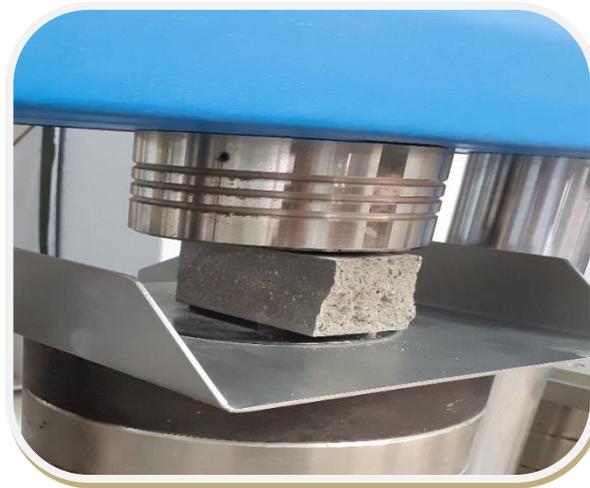


Figure 3. 17 : Essai de résistance à la compression.

La résistance à la compression est calculée selon l'équation 3.4 :

$$R_c = \frac{F_{c,max}}{b.h} \quad (3.4)$$

Avec :

R_c : la résistance en compression du mortier (MPa) ;

$F_{c,max}$: la charge maximale en compression provoquant la rupture (N);

b,h : respectivement la largeur et la hauteur de l'éprouvette ($b = h = 40\text{mm}$).

3.6.2. Absorption capillaire

L'essai d'absorption capillaire sert à caractériser la durabilité du mortier et connaître son comportement en présence d'eau. Il renseigne globalement sur la structure et sur l'importance du réseau capillaire, son principe est de déterminer la quantité d'eau absorbée par le mortier en fonction du temps.

L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une demi éprouvette $40 \times 40 \times 80 \text{ mm}^3$, obtenue par sciage d'éprouvette $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ de mortier préalablement conditionné par un étuvage à $(50 \pm 2) \text{ °C}$ dans une étuve ventilée et régulée, jusqu'à l'obtention d'une masse constante (Figure 3.18).

Les éprouvettes en question, après leur pré-conditionnement sont placées dans un bac contenant de l'eau sur des supports d'une hauteur de 5 mm du fond du bac et ce, afin de réaliser un contact direct du fond de l'éprouvette avec l'eau uniquement. Le reste des parois de l'éprouvette sont préalablement revêtus par une résine époxydique (MEDAPOXY colle) pour assurer l'absorption d'eau uniaxiale et éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée, suivant la norme NF EN 1305 [134].

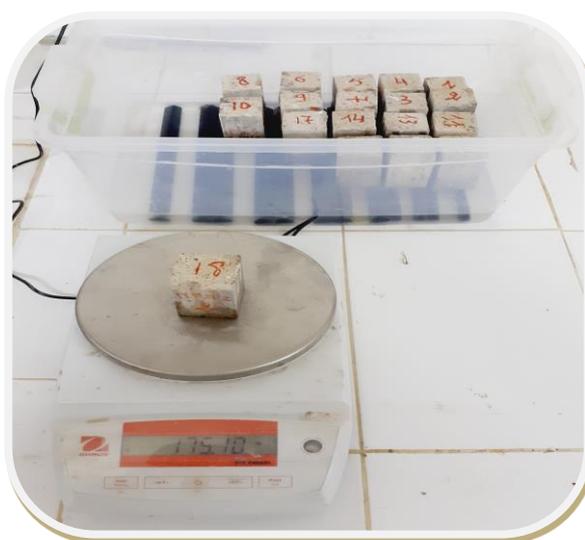


Figure 3. 18 : Essai d'absorption capillaire.

La masse d'eau absorbée a été déterminée par pesées successives des éprouvettes, aux échéances de 1mn, 5mn, 10 mn, 20mn, 30mn, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, de même qu'après 1jour, 2 jours jusqu'au 8ème jour. Après chaque échéance de submersion, la face de l'éprouvette en contact avec l'eau est essuyée avec un chiffon humide afin d'enlever l'excès d'eau. Les résultats obtenus à chaque échéance sur trois éprouvettes de chaque type de mortier sont exprimés sous la forme de la moyenne de trois valeurs mesurées. Le coefficient d'absorption capillaire est déterminé par l'équation suivante :

$$C = \frac{(M_x - M_0)}{A \times \rho} \quad (3.5)$$

M_x : Masse de l'éprouvette à une échéance donnée (g) ;

M_0 : Masse initiale de l'éprouvette (g);

A : Section de l'éprouvette (mm²) ;

ρ : Masse volumique d'eau (g/mm³).

Le coefficient de sorptivité est déterminé par l'équation suivante :

$$S = \frac{(Q/A)}{\sqrt{t}} \quad (3.6)$$

A : Surface du spécimen en contact avec l'eau en cm² ;

Q : Volume d'eau absorbé en cm³ ;

t : Temps écoulé en (s) ;

S : Coefficient de sorptivité du spécimen en cm /s^{1/2}.

On trace Q/A en fonction de $t^{1/2}$, puis on dessine la régression linéaire entre Q/A et $t^{1/2}$. Ensuite, on calcule les deux pentes des deux lignes droites qui donnent le coefficient de sorptivité (S) des gros et petits pores.

3.6.3. Porosité accessible à l'eau

La porosité ouverte, appelée, aussi la porosité accessible à l'eau est primordiale dans l'évaluation de la durabilité. C'est en effet un indicateur de la qualité du matériau. Cet essai repose sur la mesure par pesée de la masse apparente d'un échantillon du mortier après immersion dans l'eau avec lequel il a été saturé sous vide en accord avec la norme NF P-18-459 [135] (Figure 3.19).

Les éprouvettes 40×40×160 mm³, âgées de 90 jours sont sciées en deux, les demi-éprouvettes obtenues sont alors séchées dans une étuve à une température de (50 ± 2) °C jusqu'à ce que deux pesées successives, avant et après 24h à l'étuve ne dépasse pas 0.1%, ensuite on les pèse afin de déterminer la masse sèche M_{sec} (Figure 3.20). Par la suite les éprouvettes sont placées dans une enceinte fermée, sous une pression constante pendant 4 heures, sachant qu'au trois premières heures on remplit l'enceinte d'eau jusqu'à

l'immersion totale des éprouvettes. Elles sont par la suite immergées dans l'eau sous vide pendant une durée de 18 ± 2 h.

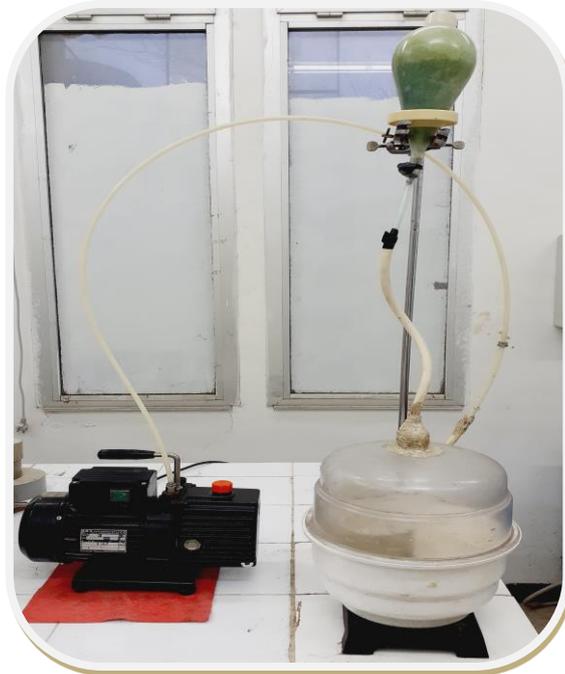


Figure 3. 19 : Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes.



Figure 3. 20 : Balance hydrostatique.

À la sortie de l'enceinte de saturation, les éprouvettes sont pesées dans l'eau et dans l'air avec une balance hydrostatique pour déterminer respectivement M_{eau} et M_{air} .

La porosité accessible à l'eau, ε (%) est déterminée par l'équation 3.7 :

$$\varepsilon (\%) = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \quad (3.7)$$

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

M_{sec} : Masse du spécimen à sec,

M_{air} : Masse du spécimen pesé dans l'air.

3.6.4. Retrait total

On définit le retrait, comme étant la différence entre la longueur de l'éprouvette aussitôt après démoulage et sa longueur après séchage consécutif dans des conditions spécifiées. Cet essai a pour but de mesurer, en fonction du temps, les variations dimensionnelles de retrait des éprouvettes prismatiques de dimensions $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, dues aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des matériaux cimentaires.

Après démoulage des plots ont été collés sur deux surfaces écartées entre eux de 100 mm (Figure 3. 21), Les éprouvettes sont conservées dans une salle à l'aire libre avec une ambiance contrôlée à 20°C . La variation de longueur entre les deux plots mesurés à l'aide d'un comparateur (Figure 3. 22),

Les mesures de retrait total sont effectuées à des échéances très courtes au début (toutes les 24 h pendant les trois premières semaines), le résultat obtenu est la moyenne de trois mesures.

Les retraits à chaque échéance sont exprimés suivant la relation :

$$R = \frac{dl}{L} \times 1000 \quad (3.8)$$

R : retrait relatif ($\mu\text{m}/\text{m}$)

dl : variation de la longueur de l'éprouvette calculée par différence entre la mesure initiale au démoulage et la mesure finale à chaque échéance (μm)

L : longueur de base prise égale à 160 mm



Figure 3. 21: Plots collés sur l'éprouvette.



Figure 3. 22 : Comparateur de mesure de déformation (précision 1μ).

3.6.5. Conductivité thermique

La conductivité thermique des échantillons de mortier a été déterminée à l'aide d'un CT-mètre selon la norme NF EN 993-15 [136].

Les échantillons utilisés sont de forme cubique $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$, ont été conservés dans l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et après 90 jours de durcissement, ils ont été séchés dans une étuve à $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ jusqu'à une masse constante. Puis en s'appuyant sur la méthode du fil chaud qui permet d'estimer la conductivité thermique et la chaleur spécifique d'un matériau à partir de l'évolution de la température mesurée par un thermocouple placé à proximité d'un fil résistif (Figure 3.23).



Figure 3. 23 : Essai de la mesure de la conductivité thermique.

3.6.6. Résistance au cycles séchage-mouillage

L'essai de séchage-mouillage consiste à soumettre des échantillons de mortier à 26 cycles de vieillissement accéléré pendant une période de 180 jours où chacun de ces cycles est caractérisé par 96 h (4 jours) d'immersion totale des échantillons dans l'eau, suivie par 72 h (3 jours) de séchage en étuve à 60°C . Les deux opérations sont séparées de 30 min à l'air afin d'éviter le choc thermique (Figure 3.24).

La résistance à la compression des échantillons de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ est mesurée. La mesure d'adhérence mortier de réparation – support par arrachement après vieillissement accéléré (26 cycles) a été aussi mesurée.



Figure 3. 24 : Essai de séchage- mouillage : A) Séchage et B) Mouillage.

3.7. Formulation du béton

Dans le cadre de la réalisation des essais d'adhérence et de durabilité, nous avons formulé des supports qui ont été fabriqués en béton ordinaire, de différentes formes et conformément à la géométrie utile pour chaque type d'essai.

La composition des bétons a été calculée sur la base de la méthode de Dreux Gorisse [137], en fixant une résistance à la compression du béton ordinaire de 30 MPa à 28 jours. Les granulats des bétons ont été séchés en étuves, jusqu'à l'obtention d'une variation de masse inférieure à 0,1 % en 24 heures et refroidis à température ambiante avant le malaxage dans un malaxeur de 50 litres à axe vertical. Après chaque malaxage, l'affaissement est mesuré par le cône d'Abrams en conformité de la norme NF EN 12350-2 [138]. Les différentes compositions des bétons sont présentées dans le tableau 3.8.

Tableau 3. 8 : Proportions du mélange du béton de substrat

Constituant		Quantité (kg/m ³)
Ciment		389,29
Gravier	3/8	140,92
	8/15	884,88
Sable	Boughezoul	307,12
	Baghlia	307,12
Eau		211,06
E/C		0,55

3.8. Préparation des dalles et éprouvettes cylindrique

Dans notre étude expérimentale nous avons utilisé trois types de substrat selon le besoin de chaque essai.

Le premier concerne des dalles qui ont été réalisées avec des moules en acier de 70×230×280 mm³, dont les surfaces supérieures ont été traitées avec brossage après 28 jours de maturation, ensuite nettoyées avec un pinceau et au jet d'eau, de façon à supprimer le maximum des défauts et des particules lâches. Puis placées dans des moules en bois de 90×235×285 mm³ pour appliquer le mortier de réparation avec une épaisseur de 20 mm uniformément sur toute la surface. Le tableau 3.9 résume le protocole de la préparation des dalles.

Le seconde, porte sur des éprouvettes cylindriques, qui ont été coulées dans des moules de (Φ100x 200 mm²) sur un dispositif pour garder une inclinaison de 30°. Après 28 jours, la surface inclinée a été traitée par brossage et nettoyée. Puis replacée dans les moules et remplies par le mortier de réparation. Le tableau 3.10 résume le déroulement de la réalisation des éprouvettes cylindriques.

Tableau 3. 9 : protocole de la préparation des dalles

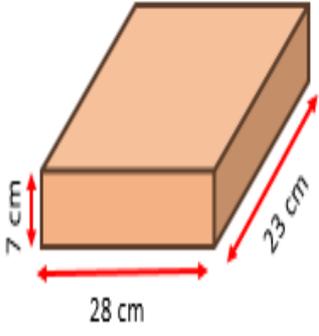
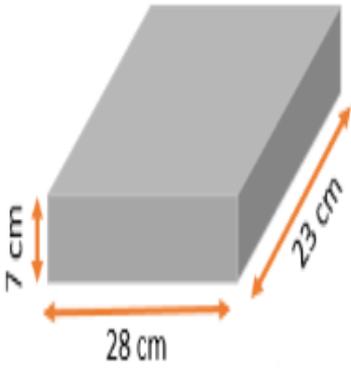
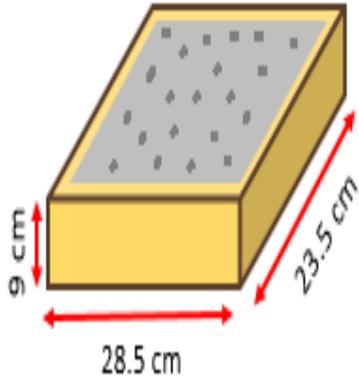
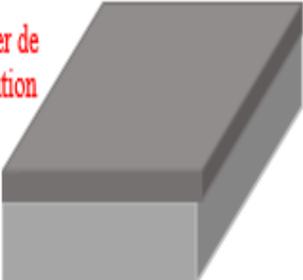
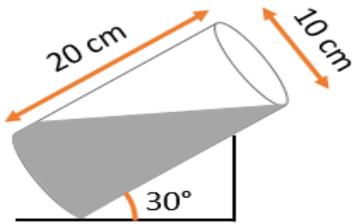
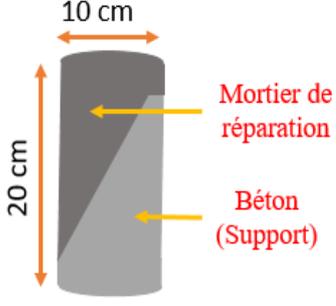
Le moule en acier		
Éprouvette en béton (support)		
Le support dans le moule après traitement de surface		
Éprouvette composite de dimension 9*28*23 cm ³	<p data-bbox="646 1668 758 1758">Mortier de réparation</p>  <p data-bbox="742 1948 901 1993">Béton (Support)</p>	

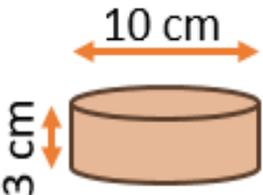
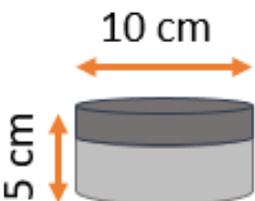
Tableau 3. 10 : Déroulement de réalisation des éprouvettes cylindriques

Le moule en acier		
Éprouvette en béton (support)		
Le support dans le moule après traitement de surface		
Éprouvette composite cylindrique de dimension 10*20 cm ²		

Le troisième concerne la préparation des éprouvettes pour l'essai de la résistance aux ions chlorés, dans des moules en PVC de dimensions de ($\Phi 100 \times 30 \text{ mm}^2$). À l'âge de 28 jours, le béton est placé dans des moules de dimensions ($\Phi 100 \times 50 \text{ mm}^2$), puis on a appliqué une couche de 20 mm de mortier de réparation afin d'obtenir des échantillons

composites de dimension de ($\Phi 100 \times 50 \text{ mm}^2$). La séquence de cette réalisation est illustrée par le tableau 3.11.

Tableau 3. 11 : Séquence de réalisation des éprouvettes cylindriques

Le moule en pvc		
Éprouvette en béton (support)		
Le support dans le moule après traitement de surface		
Éprouvette composite cylindrique de dimension 10*5		

3.9. Essai d'adhérence par arrachement

Le protocole commence initialement par perforer un noyau circulaire de 50 mm de diamètre dans le matériau de réparation à l'aide d'une carotteuse comme montrer dans la figure 3.25. Jusqu'à l'arrivée au béton du substrat et l'approfondissement sous la surface d'interface avec (15 ± 5) mm conformité de la norme NF EN 1542 [139], ensuite le collage d'une pastille métallique circulaire de diamètre 50 mm est effectué à l'aide d'une résine SIKADURE 31CF sur la surface où on a appliqué le mortier de réparation.



Figure 3. 25 : Carottage des dalles

Un dispositif est ensuite attaché à la pastille métallique, et une force de traction est appliquée et progressivement augmentée à une vitesse constante, jusqu'à atteindre une force maximale de rupture. La contrainte d'arrachement est calculée comme le rapport de la force maximale sur la surface de la pastille.

La contrainte d'arrachement est calculée suivant la relation :

$$\tau_a = \frac{F}{S} \quad (3.9)$$

F : Force maximale.

S : Surface de la pastille.



Figure 3. 26 : Appareil d'arrachement utilisé.

3.10. Essai d'adhérence par cisaillement oblique

Le cisaillement oblique est l'un des essais d'adhérence le plus fréquemment utilisé, vu son potentiel d'estimation de l'adhérence sous l'interface qui obéit à un état combiné de contraintes notamment la compression et le cisaillement, ce qui permet une répartition uniforme des contraintes à l'interface. L'essai a été effectué selon les recommandations de la norme ASTM C 882 [140]. La géométrie adoptée des éprouvettes est de type cylindrique d'une inclinaison de 30°, testé à l'âge de 90 jours après l'application du mortier de réparation (Figure 3.27).

Notons que la position correcte des éprouvettes entre les deux plateaux de la presse est très importante, d'où il est indispensable de porter une grande prudence à leur centrage, de sorte que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens de coulage. La résistance de la liaison au cisaillement est exprimée en N/mm².



Figure 3. 27 : Essai d'adhérence par cisaillement oblique.

La contrainte de cisaillement à l'interface est calculée suivant la relation :

$$\tau = \frac{F}{\pi D^2} \times 4 \times \sin 30 \quad (3.10)$$

F : Charge de rupture.

D : Diamètre du cylindre (100 mm).

3.11. Pénétration aux ions chlorures

L'essai de perméabilité aux ions chlorures a été réalisé sur des éprouvettes composites de ($\Phi 100 \times 30 \text{ mm}^2$) béton et ($\Phi 100 \times 20 \text{ mm}^2$) mortier de réparation, conformément à la norme ASTM C1202 – 12 [141], à l'âge de 90 jours (Figure 3.28).

Le principe consiste à abriter les côtés des éprouvettes par une résine afin d'entraver toute fuite pendant l'essai, en outre en s'aidant d'un dessiccateur sous vide. On supprime l'air à l'intérieur de ces éprouvettes avec une pompe à vide sous une pression constante pendant 3 heures, puis l'eau déminéralisée est introduite progressivement jusqu'à leur immersion totale.

Le fonctionnement de la pompe à vide est maintenu durant une heure supplémentaire avant son arrêt complet qui a été suivi par leur conservation sous vide pendant $18\text{h} \pm 2\text{h}$. Ensuite, l'échantillon est fixé entre deux compartiments respectivement la cellule 1

contenant la solution de NaOH 0,3 N (anode) et la cellule 2 qui contient la solution de NaCl 3% (cathode) d'où migration des chlorures par diffusion de la cellule 2 vers la cellule 1. Une différence de potentiel de 60 V est appliquée entre les deux faces de l'échantillon pendant 6 heures, l'intensité du courant qui traverse l'échantillon est mesurée toutes les 30 minutes (Figure 3.29).

La quantité d'électricité totale passante est calculée par la formule suivante :

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + 2I_{120} + \dots + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (3.11)$$

Avec :

I_n : Intensité du courant (Ampères) qui traverse l'échantillon à n minutes,

Q : Quantité d'électricité totale (Coulomb) qui traverse la cellule.

Les valeurs limites de la quantité d'électricité totale passante sont présentées dans le tableau 3.12 selon l'échelle de whiting [141].



Figure 3. 28 : Appareil de mesure de la perméabilité aux ions chlorés.

Tableau 3. 12 : Valeurs limites pour l'essai de perméabilité aux ions chlorures [141]

Quantité d'électricité passante (Coulombs)	Pénétration des chlorures
>4000	Élevée
2000-4000	Modérée
1000-2000	Faible
100-1000	Très faible
< 100	Négligeable

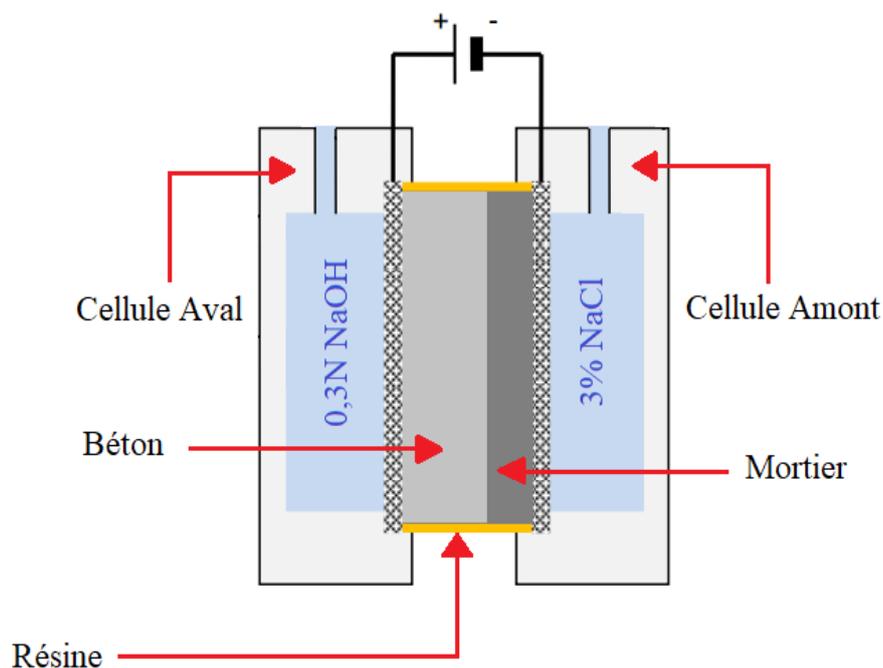


Figure 3. 29 : Schéma d'ensemble de l'essai de perméabilité aux ions chlorures.

3.12. Récapitulatif des essais réalisés

Ce chapitre présente les matériaux et les méthodes expérimentales utilisées dans cette étude. Par ailleurs, nous avons détaillé les différentes méthodes de traitement appliquées aux fibres de palmier dattier et les techniques de caractérisation (ATG, DRX et MEB)

que nous avons utilisé pour l'étude de l'effet des traitements sur les propriétés chimiques et morphologiques des fibres de palmier dattier. Afin d'analyser l'effet de l'incorporation de fibres de palmier dattier de 10 et 30 mm de longueur dans les matériaux cimentaires, un mortier à base de 1 % de fibres brutes a été réalisé. Pour améliorer la durabilité des fibres dans la matrice cimentaire, nous avons fabriqué des mortiers à base de 15% d'ajout cimentaire (Laitier et Pouzzolane naturelle) et 1% de fibres de palmier dattier non traités, des mortiers à base de 1 % de fibres traités par un traitement alcalin et par un traitement hydrothermique sont aussi réalisés.

De même nous avons montré les protocoles d'essais utilisés dans cette recherche pour la détermination des propriétés des mortiers à l'état frais (mesure de la maniabilité par le maniabilimètre LCPC et la table à secousse, mesure de la teneur en air occlus et la masse volumique). Aussi à l'état durci comme résistance à la compression et à la flexion, absorption capillaire, résistance au cycles séchage-mouillage, retrait total et conductivité thermique. Pour qualifier les performances d'adhérence du mortier des essais d'adhérence ont été réalisés (Essai d'adhérence par arrachement et par cisaillement oblique). Le programme expérimental réalisé dans cette étude est résumé sur la figure 3.30.

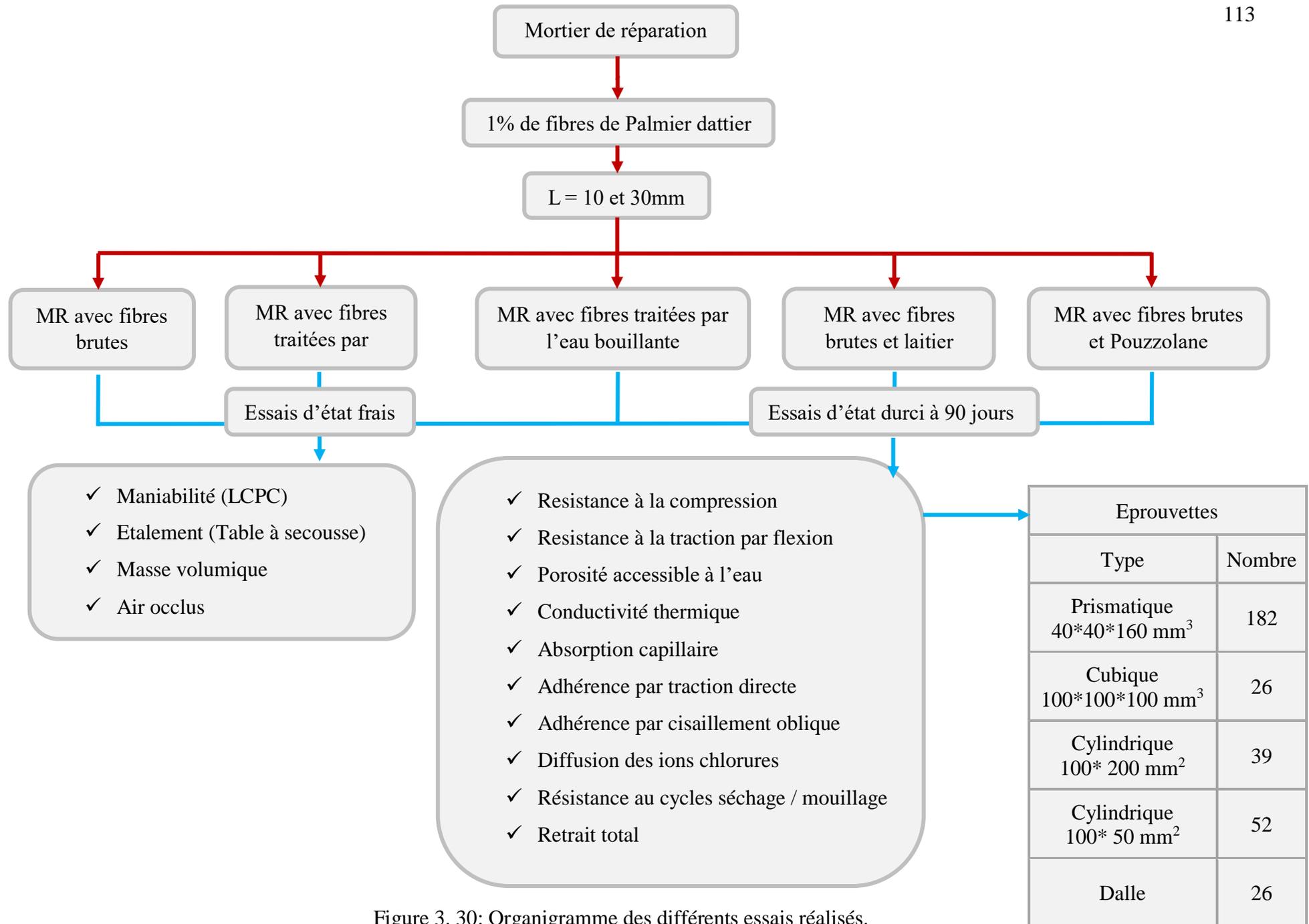


Figure 3. 30: Organigramme des différents essais réalisés.

CHAPITRE IV :

RESULTATS ET DISCUSSION :

EFFET DES FIBRES DE PALMIER

DATTIER SUR LES PROPRIETES

DU MORTIER DE REPARATION

CHAPITRE IV :

RESULTATS ET DISCUSSION : EFFET DES FIBRES DE PALMIER DATTIER SUR LES PROPRIETES DU MORTIER DE REPARATION

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'analyse sur l'effet du traitement sur les propriétés chimiques et morphologiques des fibres de palmier dattier, ainsi que les résultats des essais sur l'effet des fibres de palmier dattier (PD) brutes et traitées à deux longueurs 10 et 30 mm sur le mortier de réparation, à l'état frais (Ecoulement, étalement, air occlus, masses volumiques.), ainsi qu'à l'état durci (Résistance à la compression et à la flexion, adhérence par cisaillement oblique, adhérence par arrachement, porosité accessible à l'eau, absorption d'eau, retrait total, conductivité thermique, résistance aux cycles séchage-mouillage).

4.2. Effet des traitements sur les propriétés de fibres de palmier dattier

4.2.1. Analyse thermogravimétrique

La figure 4.1 montre les courbes d'analyse thermogravimétrique des fibres de palmier dattier brutes (FPB) et traitées par NaOH (FPT1) et par l'eau bouillante (FPT2). Les fibres de palmier dattier traitées et non traitées montrent une légère perte de masse marquée par le pic entre 50 et 150°C, due à l'évaporation de l'humidité qui est présente dans la plante, prouvée par Chowdhury et al. [142].

Les courbes de DTG obtenues, notamment pour les fibres brutes et traitées par l'eau bouillante témoignent la présence d'un pic, dans la zone de température 250-315°C, qui montre la décomposition de l'hémicellulose et la lignine. Dans le cas des fibres traitées par NaOH, ce pic n'existe pas, montrant l'élimination de l'hémicellulose et la lignine. Des résultats similaires ont été montrés par Indran et al. [143].

Un troisième pic majeur situé aux environs de 300-392°C, provoqué par la décomposition de la cellulose, qui représente une perte de masse de 7.24 ; 8.35 et 7.68 % pour les fibres brutes, ceux traitées par l'eau bouillante et par NaOH respectivement. D'où, on déduit que la quantité de cellulose dans les fibres traitées est importante par rapport aux fibres non traitées. Ceci est comparable à l'étude de Fiore et al. [144].

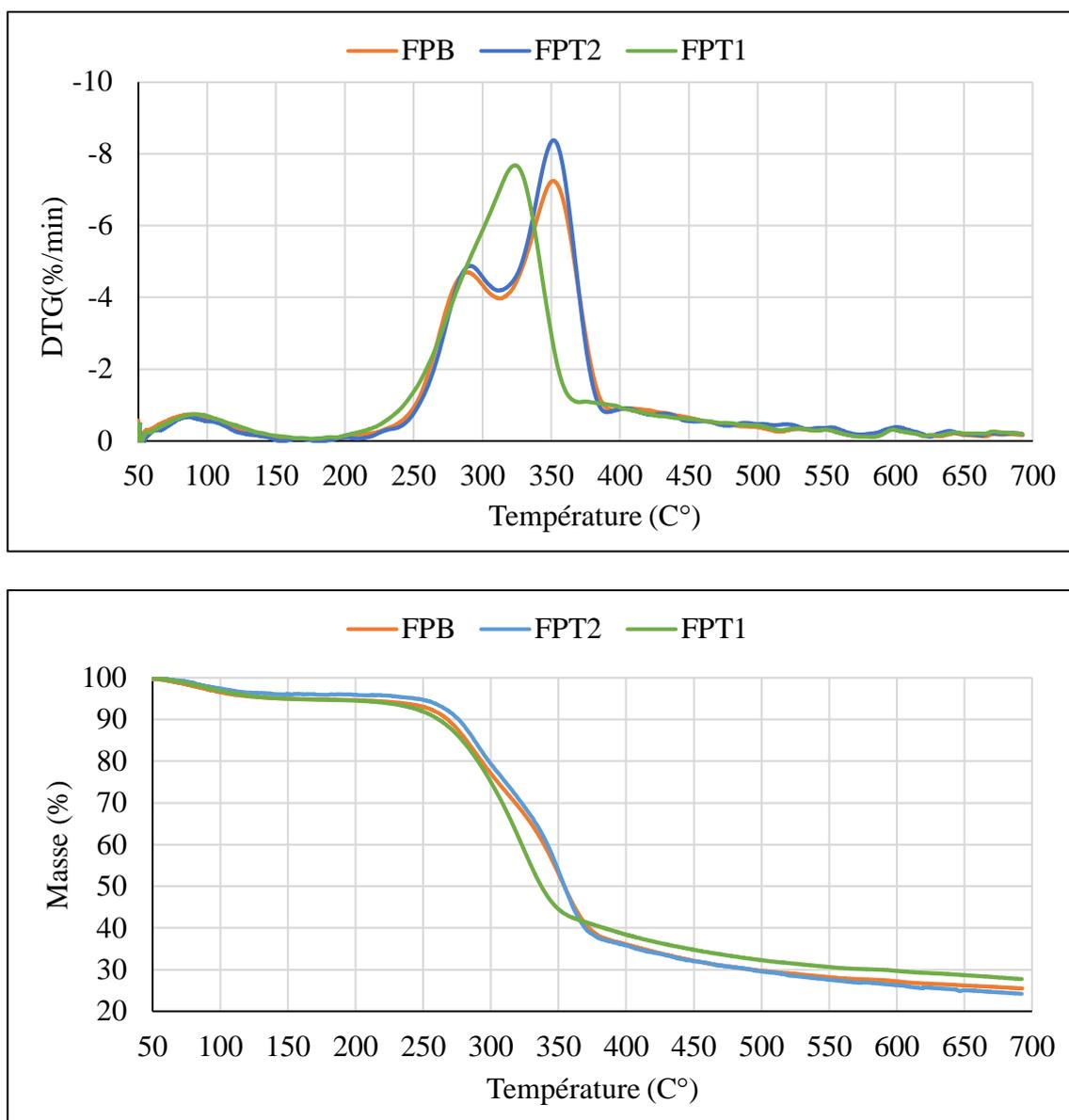


Figure 4. 1 : Courbes (a) ATG et (b) DTG des fibres de palmier dattier non traitées et traitées.

4.2.2. Analyse par diffraction des rayons X

Les diffractogrammes RX enregistrés pour les fibres de palmier dattier brutes et traitées sont représentés par la figure 4.2. Pour toutes les fibres de palmier dattier, on observe la présence d'un pic principale entre $2\theta=20^\circ$ et 25° . Ce dernier correspond au plan cristallographique (002) de la cellulose I. Un second pic se situe à $2\theta=15^\circ$ et 20° . Il correspond au plan cristallographique (101).

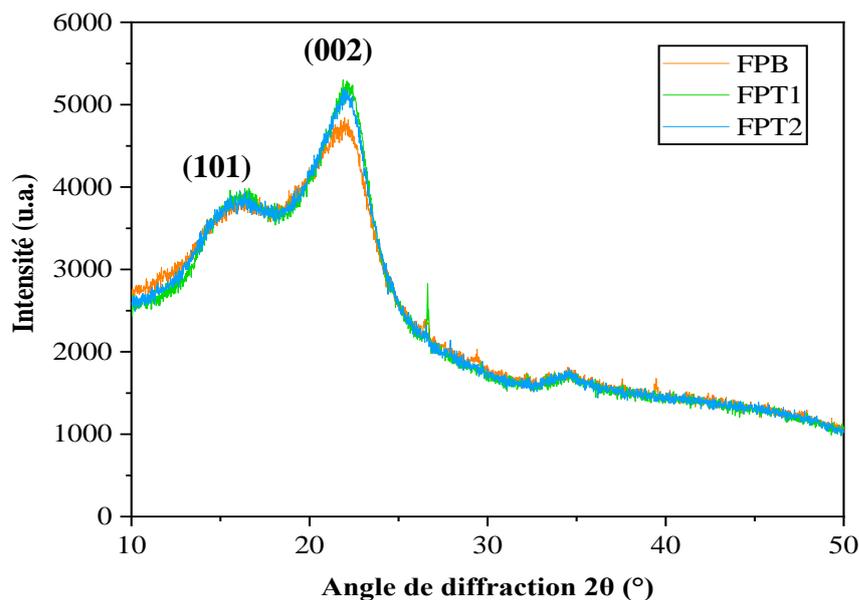


Figure 4. 2 : Diffractogrammes des fibres de palmier dattier brutes et traitées.

La figure 4.3 montre l'augmentation de l'indice de cristallinité (CrI) après chaque traitement, passant de 19,20% pour les fibres de palmier dattier brutes à 23,80% et 25,32% respectivement pour les fibres de palmier dattier traitées par l'eau bouillante et par NaOH. L'augmentation de cet indice est beaucoup plus importante dans le cas des fibres traitées par NaOH.

Le traitement par l'hydroxyde de sodium de la fibre végétale favorise l'hydratation de sa partie amorphe de la cellulose ce qui provoque l'augmentation de la quantité de la cellulose cristalline [145].

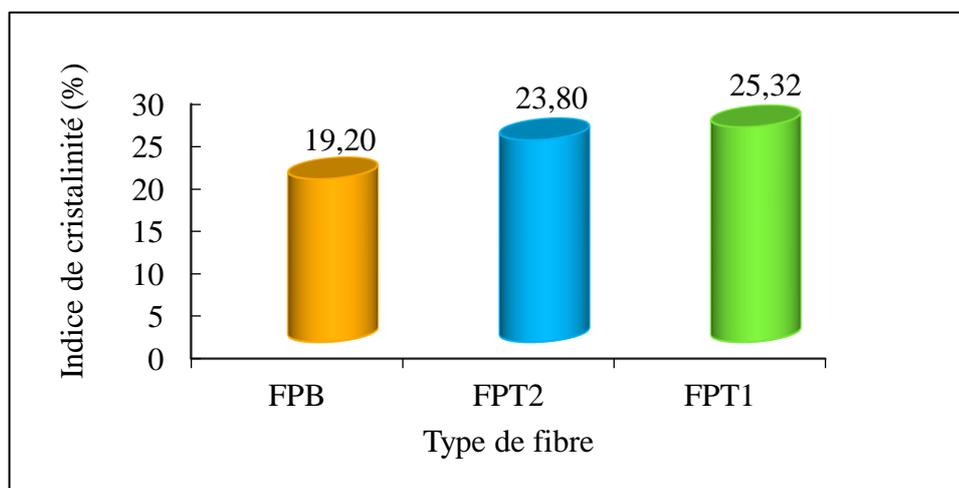


Figure 4. 3: Indice de cristallinité des fibres de palmier dattier brutes et traitées.

4.2.3. Analyse microscopique par balayage

Les micrographies sur la figure 4.4 illustrent la morphologie de la surface extérieure des fibres de palmier dattier brutes et traitées. On observe que la surface de la fibre non traitée est recouverte d'une couche de substances, composée de matériaux amorphes tandis que, celle des fibres traitées propres, montrent des rayures irrégulières importantes [146].

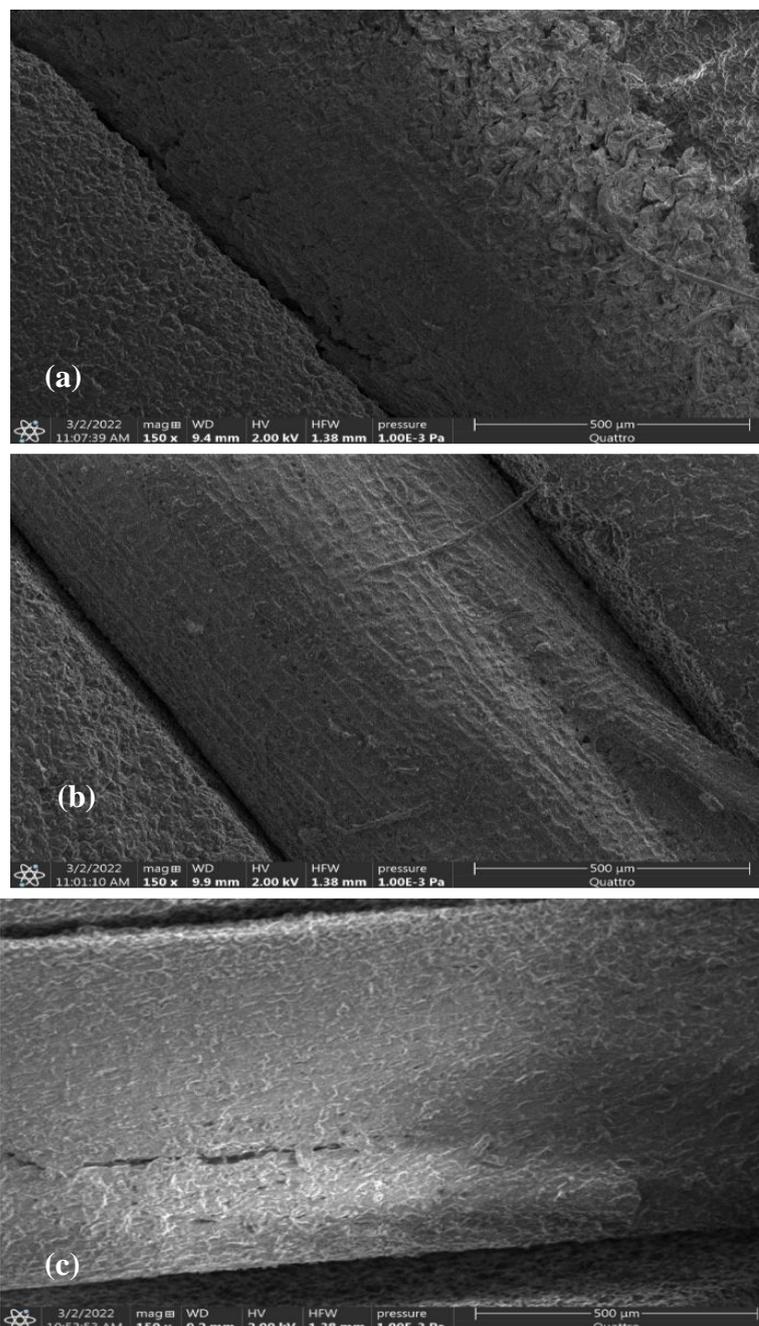


Figure 4. 4 : MEB de la surface de fibre de palmier dattier : (a) brute (b) traitée par NaOH (c) traitée par l'eau bouillante.

La rugosité de la surface des fibres traitées augmente avec l'élimination de matières non celluliques comme la lignine, l'hémicellulose et la cire. L'accroissement de la rugosité surfacique améliore l'adhérence interfaciale entre la matrice et les fibres naturelles.

Une coupe transversale d'une fibre de palmier dattier est aussi représentée sur la figure 4.5 révèle que les fibres sont également caractérisées par une section circulaire avec la présence de micropores.

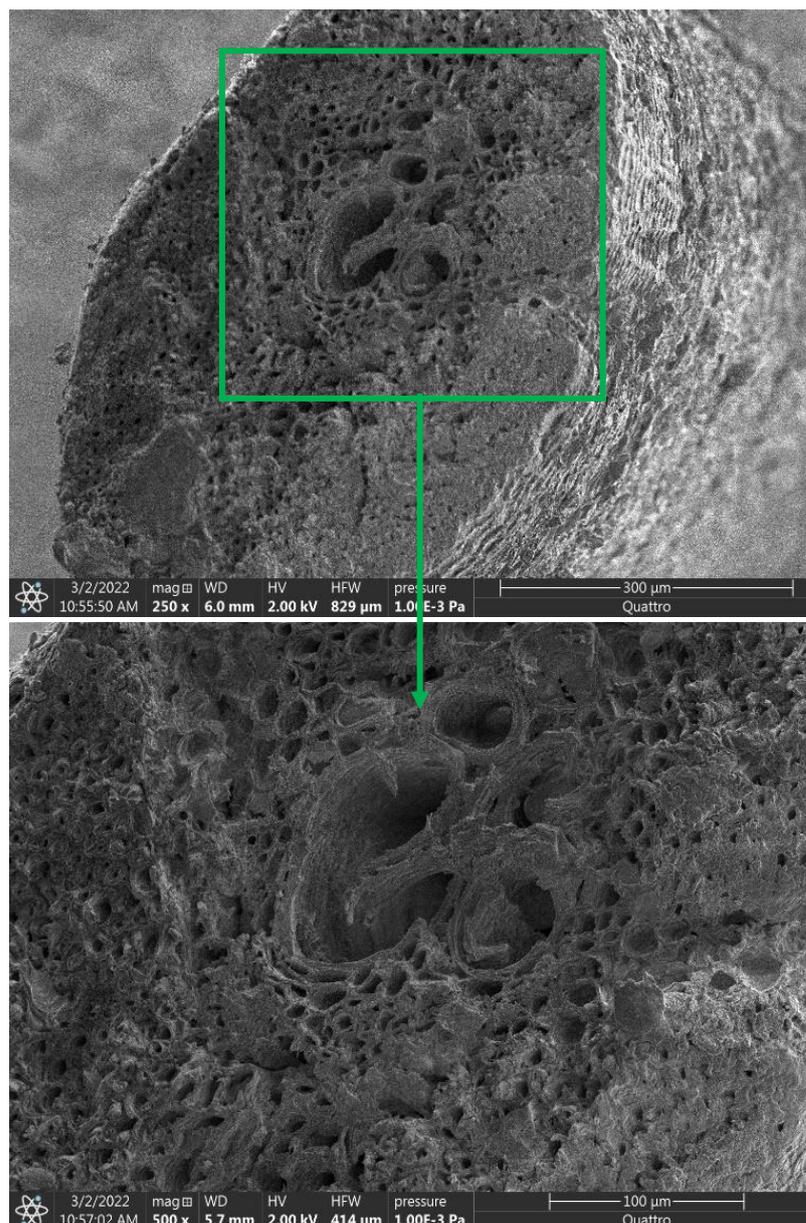


Figure 4. 5 : MEB de la coupe transversale de la fibre de palmier dattier.

4.3. Effet des fibres de palmier dattier sur les propriétés du mortier à l'état frais

4.3.1. Etalement

Les résultats de l'essai d'étalement des mortiers renforcés par les fibres de PD sont présentés par le tableau 4.1 et la figure 4.6. On remarque que l'ajout des fibres de PD a un effet négatif sur l'ouvrabilité des mortiers. On observe que l'étalement de mortier de référence qui est de 95,5% a été diminué jusqu'à 81,33% et 65,10% dans le cas de l'ajout des fibres brutes de PD pour les longueurs respectives de 10 mm et 30 mm. Cette réduction est probablement due à la nature hydrophile des composants de la fibre de palmier, le pouvoir d'absorption d'eau qui entraîne une diminution de la maniabilité et particulièrement l'hémicellulose [104].

Belkadi et al. [147], ont rapporté que l'introduction des fibres végétales dans le béton autoplaçant diminue leur ouvrabilité, et mène aussi à une réduction importante de la ségrégation des BAP. Ajouguim et al. [97], ont aussi montré une baisse de l'ouvrabilité du mélange dans le cas de l'incorporation des fibres à un taux inférieurs à 2% de l'ordre de 4%.

L'effet de l'ajout des fibres de PD dans les mortiers contenant 15 % de PZ est bien marqué par le décroissement de l'étalement de 32 % et 43% pour des longueurs de 10 et 30 mm. Cette diminution est moins considérable (13 % et 14 %) pour les mélanges à base de 15 % de laitier et 1% de fibres de PD pour des longueurs de 10 et 30 mm.

Une faible augmentation de l'étalement (5 % et 4 %) est observée en comparant le mélange à base des fibres traitées par NaOH (MFPT1) et le mélange à base de fibres non traitées (MFR), de même pour le mélange à base de fibres traitées par l'eau bouillante (MFPT2). Ceci est comparable à l'étude de Ali-Boucetta et al. [148] qui ont rapporté une importante réduction de la consistance des mortiers dans le cas des fibres brutes par rapport aux fibres traitées.

La diminution de la consistance des mortiers contenant des fibres de palmier dattier de 30 mm est plus importante que ceux des mélanges à base de fibres courtes (10 mm). Cette tendance a également été mise en évidence par Çomak et al. [99].

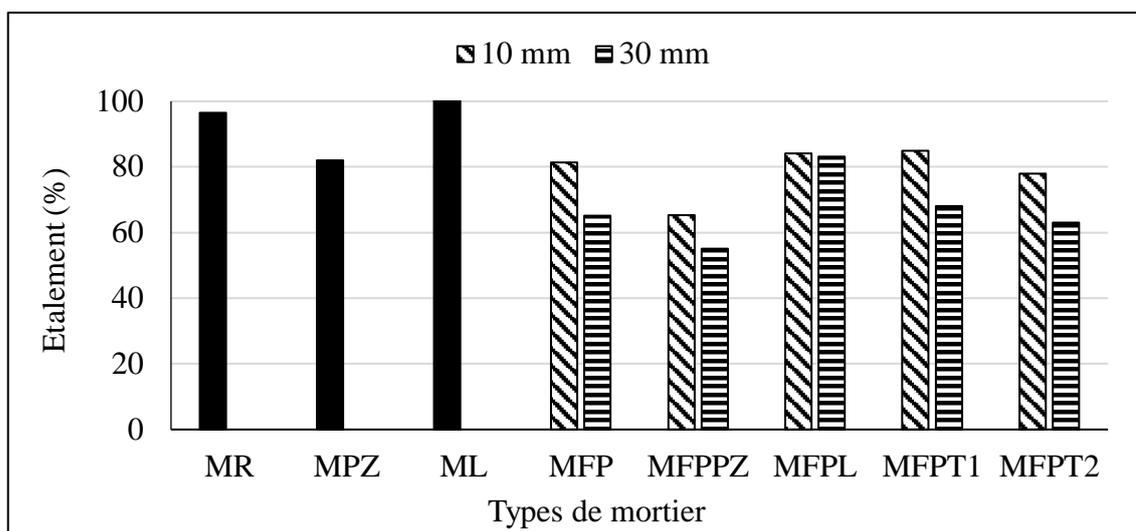


Figure 4. 6: Etalements des différents mortiers de réparation.

Tableau 4. 1: Etalements des différents mortiers de réparation étudiés

Longueur de fibre (mm)	Etalement (%)	
	10	30
MR	97	
MPZ	82	
ML	105	
MFP	81	65
MFPPZ	65	55
MFPL	84	83
MFPT1	85	68
MFPT2	78	63

4.3.2. Maniabilité en LCPC

L'essai de la maniabilité en LCPC a été également réalisé pour évaluer la consistance des mortiers fibrés. Les résultats de la variation du temps d'écoulement des mortiers sont indiqués par le tableau 4.2 et la figure 4.7. On remarque une consistance beaucoup plus ferme due à l'incorporation des fibres de PD non traitées et une augmentation de l'écoulement d'environ 110 % et 241 % pour les fibres de différentes longueurs (10 mm et 30 mm) comparé avec MR. Page et al. [149] ont rapporté la perturbation du comportement rhéologique des mortiers à base des fibres végétales brutes et traitées.

Le temps d'écoulement maximal (20.32s) est enregistré pour le mélange à base de 15 % de PZ et 1% de fibres de PD de 30 mm. Cette perte d'ouvrabilité est moins considérable dans le cas des mortiers à base de 15 % de laitier et 1% de fibres de PD avec un temps d'écoulement de 7 et 10 s pour 10 et 30 mm respectivement.

On remarque par ailleurs que l'écoulement des mortiers à base de fibres traitées par NaOH (MFPT1) et l'eau bouillante (MFPT2) donne des résultats comparables avec le mortier à base de fibres brutes (MFR). La longueur des fibres a un impact sur la maniabilité qui marque une perte importante pour des longueurs des fibres de (30 mm).

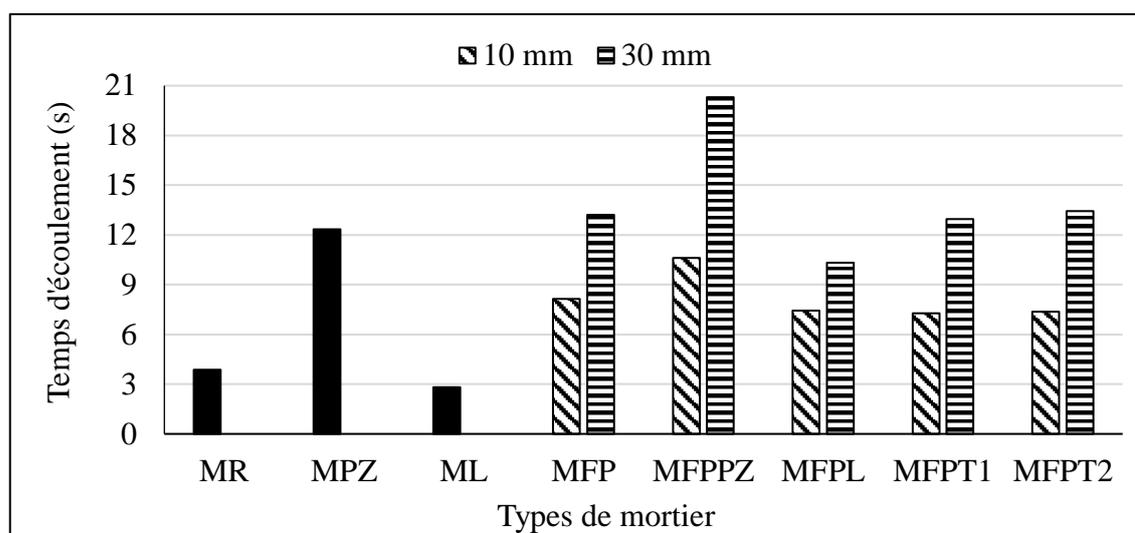


Figure 4. 7: Ecoulement des différents mortiers de réparation.

Tableau 4. 2: Ecoulement des différents mortiers de réparation étudiés

Longueur de fibre (mm)	Ecoulement (s)	
	10	30
MR	3,9	
MPZ	12,3	
ML	2,8	
MFP	8,1	13,2
MFPPZ	10,6	20,3
MFPL	7,4	10,3
MFPT1	7,3	13,0
MFPT2	7,4	13,4

4.3.3. Masse volumique

Les masses volumiques des mortiers à base de fibres de palmier dattier brutes et traitées sont présentées dans le tableau 4.3 et la figure 4.8. On constate que l'ajout de 1% des fibres de palmier dattier n'affecte pas significativement sur la masse volumique des mélanges à l'état frais, comparée à celle du mortier témoin (masse volumique de 2128 kg/m³). Une légère diminution de 1.6% et 0.2% est constatée dans le cas des mortiers renforcés avec les fibres de PD brutes pour des longueurs respectifs de 10 et 30 mm. Ajouguim et al. [97] ont aussi trouvé que l'ajout de fibres d'alfa avec des pourcentages inférieurs à 2 % n'influe pas significativement sur les masses volumiques fraîches des mortiers.

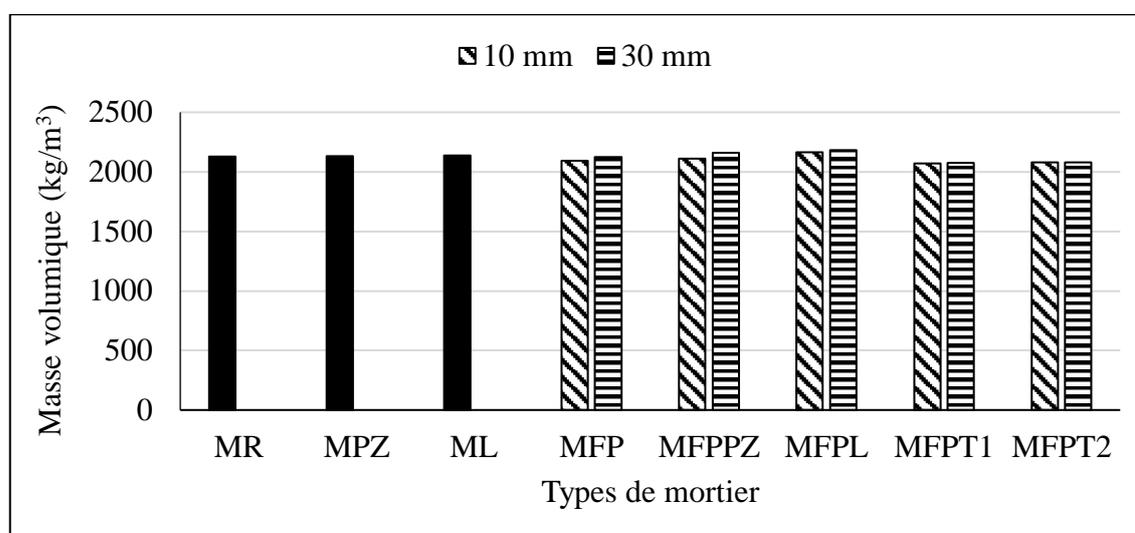


Figure 4. 8: Masse volumique des différents mortiers de réparation.

Tableau 4. 3: Masse volumique des différents mortiers de réparation étudiés

Longueur de fibre (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	
	10	30
MR	2128	
MPZ	2132	
ML	2137	
MFP	2095	2125
MFPPZ	2112	2158
MFPL	2166	2184
MFPT1	2069	2077
MFPT2	2079	2081

4.3.4. Air occlus

Le tableau 4.4 et la figure 4.9 présentent les différents pourcentages d'air occlus dans les mortiers fibrés et non fibrés. L'incorporation de fibres de PD dans les mortiers augmente d'une manière significative leur teneur en air, comparée à celle du mortier témoin (4%). De même, les mélanges qui contiennent les fibres de PD brutes ou bien traitées possèdent une teneur en air comprise entre 6 % et 7%, pour les deux cas de longueurs de fibres PD étudiés (10 mm et 30 mm). Les teneurs en air les plus élevées correspondent à la longueur de fibres de 30 mm, cela est dû probablement à la coïncidence des fibres qui engendre l'augmentation de la quantité d'air entraîné pendant le malaxage. Des résultats similaires ont été remarqués par Page et al. [150] qui ont obtenu une augmentation significative de la teneur en air suite à l'incorporation des fibres courtes de lin.

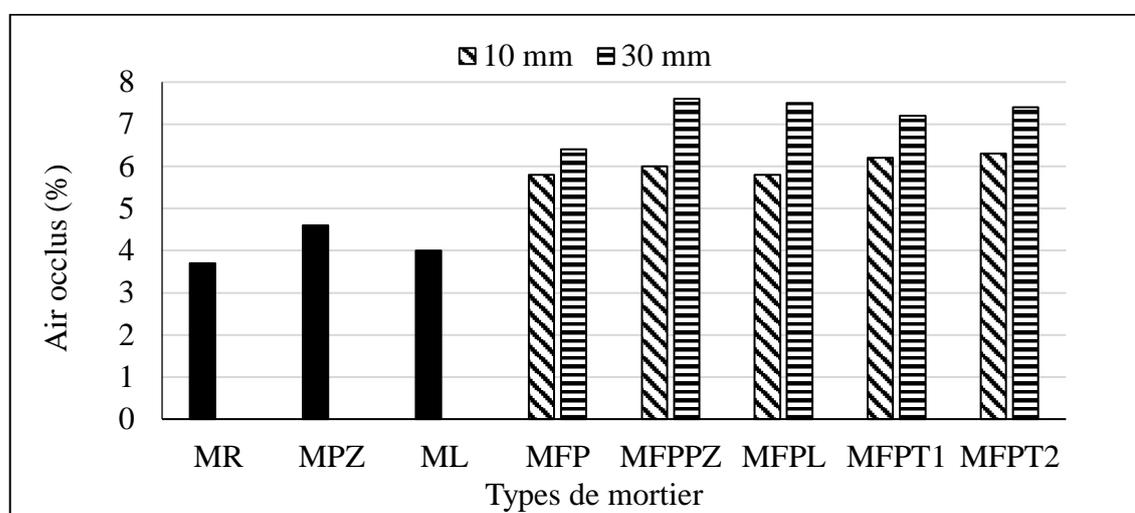


Figure 4. 9: Teneur en air des différents mortiers de réparation.

Tableau 4. 4: Teneur en air des différents mortiers de réparation étudiés

Longueur de fibre (mm)	Air occlus (%)	
	10	30
MR	3,7	
MPZ	4,6	
ML	4,0	
MFP	5,8	6,4
MFPPZ	6,0	7,6
MFPL	5,8	7,5
MFPT1	6,2	7,2
MFPT2	6,3	7,4

4.4. Effet des fibres de palmier dattier sur les propriétés du mortier à l'état durci

4.4.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression des mortiers renforcés par des fibres de PD après 28 et 90 jours de cure est présentée respectivement par les figures 4.10 et 4.11 et également le tableau 4.5. On remarque une réduction de la résistance en compression à 28 et 90 jours. Le mortier témoin (MR) enregistre une résistance en compression de 43,90 MPa obtenue à 28 jours de cure. L'incorporation de 1% de fibres de PD produit une diminution de la résistance à la compression de 18% et 15% pour des longueurs de 10 et 30 mm comparée au mortier témoin. Cela semble être due à la suspension du squelette minérale du mortier, et de l'incorporation des fibres qui engendrent des vides dans la matrice et accroissent sa porosité et sa résistance [100, 151, 152]. Par contre, Aljalawi et al. [153] ont trouvé que l'incorporation des fibres de palmier dattier dans une matrice cimentaire à un pourcentage inférieur ou égale à 2% augmente la résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours.

De faibles résistances 29 MPa et 30 MPa sont aussi obtenues dans le cas des échantillons contenant des fibres de PD brutes et ajouts cimentaires (Laitier et Pouzzolane naturelle, respectivement) comparé au mélange renforcé par les fibres de PD brutes, en raison du fait de la lenteur de la réaction d'hydratation des ajouts au jeune âge [154]. Le renforcement par des fibres de PD traitées par NaOH ou bien par l'eau bouillante réduit légèrement la résistance entre 10% et 7% en comparant avec les fibres brutes (Figure 4.10).

La figure 4.11 présente les résistances obtenues à 90 jours de cure. Les résultats montrent que l'incorporation de 1% de fibres de PD brutes de 10 et 30 mm diminue la résistance d'environ 16% et 12% respectivement, comparé au mortier témoin. Cette réduction est aussi présente pour les mélanges à base de fibres de PD et ajouts cimentaires. Kriker et al. [82] ont rapporté une diminution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de l'augmentation de la teneur en fibre. En revanche, la résistance à la compression croît en fonction de l'âge des échantillons. Boumhaouet et al. [155] ont montré que la résistance à la compression est inversement proportionnelle au taux de fibres de PD ajoutés.

Pour les mélanges MFPPZ et MFPL, on remarque que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la durée de durcissement mais reste toujours inférieure à la résistance du mortier de référence. Le MFPT1 est caractérisé par la résistance la plus élevée en comparant aux mélanges fibrés ce qui montre la nécessité du traitement par NaOH. En vertu des deux figures.

L'effet de la longueur des fibres est insignifiant sur la résistance à la compression à 28 jours et à 90 jours, Çomak et al. [99] ont aussi trouvé que la variation de la longueur des fibres de chanvres (6, 12 et 18 mm) n'influe pas significativement sur la résistance à la compression.

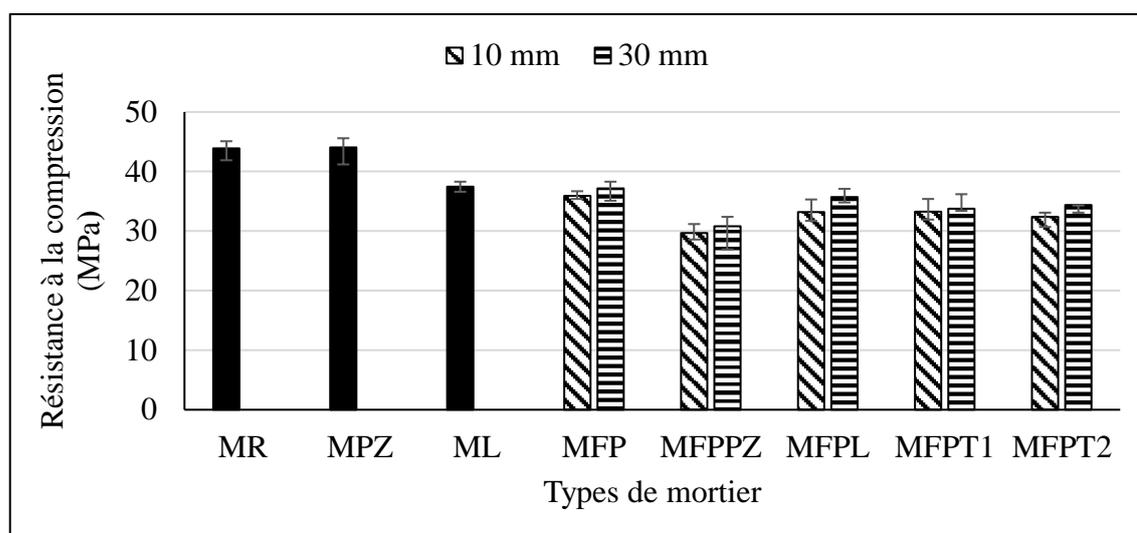


Figure 4. 10: Résistance à la compression des différents mortiers de réparation à 28 jours.

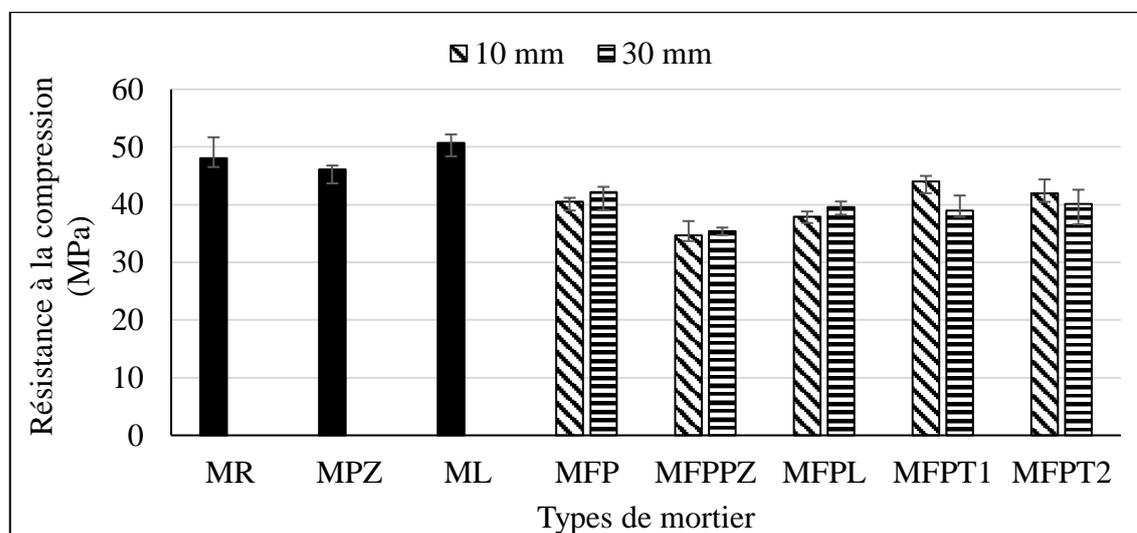


Figure 4. 11: Résistance à la compression des différents mortiers de réparation à 90 jours.

Tableau 4. 5: Résistance à la compression des différents mortiers de réparation étudiés

Résistance à la compression (MPa)				
Longueur de fibre (mm)	10	30	10	30
Âge	28 jrs		90 jrs	
MR	43,90		48,07	
MPZ	44,06		46,12	
ML	37,47		50,72	
MFP	35,92	37,18	40,52	42,20
MFPPZ	29,68	30,82	34,68	35,42
MFPL	33,20	35,72	37,92	39,58
MFPT1	33,27	33,77	44,03	38,98
MFPT2	32,40	34,38	41,98	40,13

4.4.2. Résistance à la flexion

Les figures 4.12 et 4.13 et le tableau 4.6 illustrent l'évolution de la résistance à la flexion des mortiers fibrés testés à 28 et 90 jours. On observe que l'addition de 1 % de fibres de PD brutes diminue la résistance à la flexion de l'ordre de 10 % et 5 % pour des longueurs respectives de 10 et 30 mm.

L'effet de l'ajout de la pouzzolane naturelle dans le mélange à base de fibres brutes est négligeable. Dans le cas du mélange MFPL, on remarque une diminution de la résistance à la flexion d'environ de 19% et 9% pour des longueurs de fibres de 10 et 30 mm respectivement par rapport au mortier de référence, cela semble être dû à la réaction pouzzolanique qui agit sur les longues périodes.

La résistance de tous les mélanges augmente pour une durée de cure de 90 jours, de même Aljalawi et al. [153] le confirme. Cependant, le mortier de référence marque une légère augmentation en passant de 28 jours à 90 jours, mais cette évolution est importante pour les mortiers à base de fibres traitées chimiquement (NaOH) et hydro-thermiquement (l'eau bouillante).

L'incorporation de 1% de fibres de palmier dattier brutes entraîne une légère augmentation de la résistance à la flexion des échantillons (3% et 7% pour les longueurs de 10 et 30 mm). Des résultats similaires ont été prouvés par Ibrahim et al. [156] qui ont

montré que l'ajout de 1% de fibres de PD provoque une amélioration de 5 % de la résistance à la flexion du béton.

On remarque que les résultats de la résistance à la flexion des mélanges à base des ajouts cimentaires (laitier ou bien de la pouzzolane naturelle) et 1 % de fibres de PD brutes sont comparable au mortier à base de fibres de PD brutes.

Les mélanges à base de fibres traitées par NaOH enregistrent les résistances les plus importantes avec un gain de l'ordre de 47% et 42% respectivement pour les longueurs de 10 et 30 mm par rapport au mélange à base de fibres non traitées. Les mortiers à base de fibres de PD traitées par l'eau bouillante donnent aussi des résistances assez importantes, avec une augmentation de l'ordre de 38% et 34% en comparant avec le mortier à base de fibres non traitées. Cette augmentation est dû à l'élimination des matériaux amorphes présents dans les fibres par le traitement alcalin et l'eau bouillante. De ce fait l'adhérence interfaciale entre la fibre et la matrice cimentaire est améliorée [157]. Ce qui a été démontré par l'analyse microscopique par balayage sur les fibres de palmier dattier traitées et non traitées (Figure 4.4).

L'effet de la longueur des fibres de palmier dattier qu'ils soient brutes ou traitées est bien marqué à 28 jours par une augmentation de la résistance en flexion à la suite de l'accroissement de la longueur de la fibre. En outre à 90 jours, aucune influence de la longueur n'est mentionnée du moment que pour la majorité des mélanges, les résistances obtenues sont comparables dans le cas des fibres de 10 et 30 mm.

Tableau 4. 6: Résistance à la flexion des différents mortiers de réparation étudiés

Résistance à la flexion (MPa)				
Longueur de fibre (mm)	10	30	10	30
Âge	28 jrs		90 jrs	
MR	5,69		6,10	
MPZ	5,66		6,58	
ML	5,05		6,56	
MFP	5,12	5,96	6,29	6,51
MFPPZ	5,38	6,07	6,66	6,43
MFPL	4,60	5,16	6,36	6,44
MFPT1	5,66	5,78	8,97	8,66
MFPT2	4,91	5,76	8,40	8,15

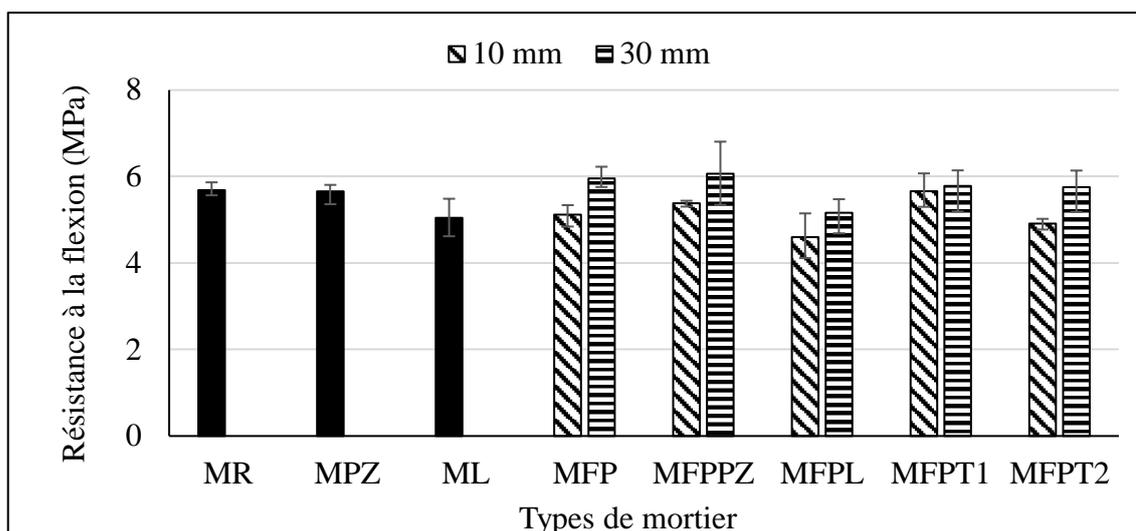


Figure 4. 12: Résistance à la flexion des différents mortiers de réparation à 28 jours.

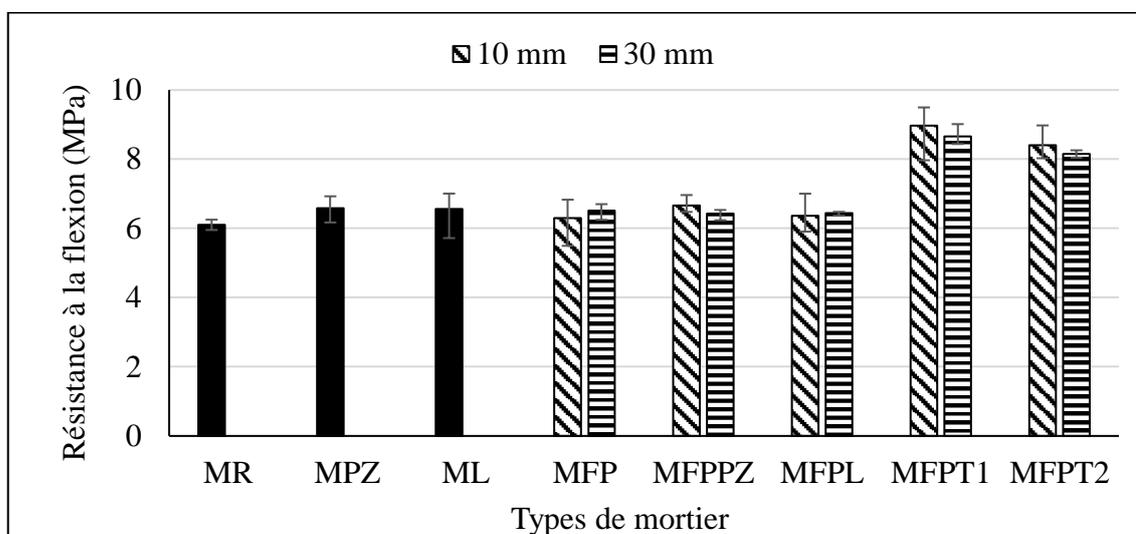


Figure 4. 13: Résistance à la flexion des différents mortiers de réparation à 90 jours.

4.4.3. Porosité accessible à l'eau

Les résultats des essais de la porosité accessible à l'eau après 90 jours de cure dans l'eau sont présentés par le tableau 4.7 et la figure 4.14. Ces derniers montrent une augmentation de la porosité lors de l'incorporation de fibres de PD.

Le mortier témoin présente une porosité de l'ordre de 23,3 %. L'addition de 1 % en volume de fibres de PD engendre une porosité qui est d'environ 26.05 % et 26.27 % respectivement pour des longueurs de 10 et 30 mm. Cette augmentation est probablement

due à la structure poreuse de la fibre de palmier dattier dont la coupe transversale est montrée par l'image MEB (Figure 4.5).

Kareche et al. [104] ont rapporté des porosités de 36 %, 49 % et 51 %, pour des mortiers avec 5 %, 10 % et 15 % de fibre de PD respectivement comparés à 27 % pour le mortier témoin. De même Haba et al.[158] ont révélé que le béton renforcé avec 15 % en poids des fibres courtes de PD a donné une porosité élevée de 58%.

La porosité accessible à l'eau est clairement plus faible de 5 % et 9 % pour les mortiers contenant de laitier et 1% de fibres de PD brutes de longueur de 10 et 30 mm respectivement par rapport à MFP. Les mélanges à base de 1 % de fibres de PD brutes et de pouzzolane naturelle présentent une diminution de la porosité de 10 % et 8 % en comparant avec MFP. Cette diminution de la porosité est expliquée par le raffinement des pores capillaires de la matrice cimentaire du mortier durci avec l'avancement d'hydratation.

On remarque une réduction de l'ordre de 4% et 12% pour les longueurs de 10 et 30 mm dans le cas des mortiers à base de 1% de fibres de PD traitées par NaOH comparée à celle du mortier à base de fibres de PD brutes. Les fibres traitées sont probablement moins sensibles à l'eau que les fibres non traitées, ce qui pourrait réduire le gonflement des fibres. Par conséquent, le changement de volume des fibres n'était pas similaire à celui des fibres non traitées, ce qui peut réduire la porosité à l'intérieur de la matrice [159].

On n'observe aucun effet du traitement des fibres de PD par l'eau bouillante. Aussi l'effet de la longueur des fibres de PD sur la porosité accessible à l'eau des composites est insignifiant.

Une faible corrélation a été observée entre la porosité et les valeurs de la résistance à la compression (Figure 4.15) dont les coefficients de corrélations sont $R^2 = 0.283$ et 0.327 pour une longueur de fibre de 10 et 30 mm respectivement.

Il existe une bonne corrélation ($R^2 = 0.812$) entre l'aire occlus et la porosité accessible à l'eau dans le cas des mortiers à base de fibres de PD de 10 mm et une moyenne corrélation est observée dans le cas de fibres de 30 mm dont le coefficient de corrélation est $R^2 = 0.545$ (Figure 4.16).

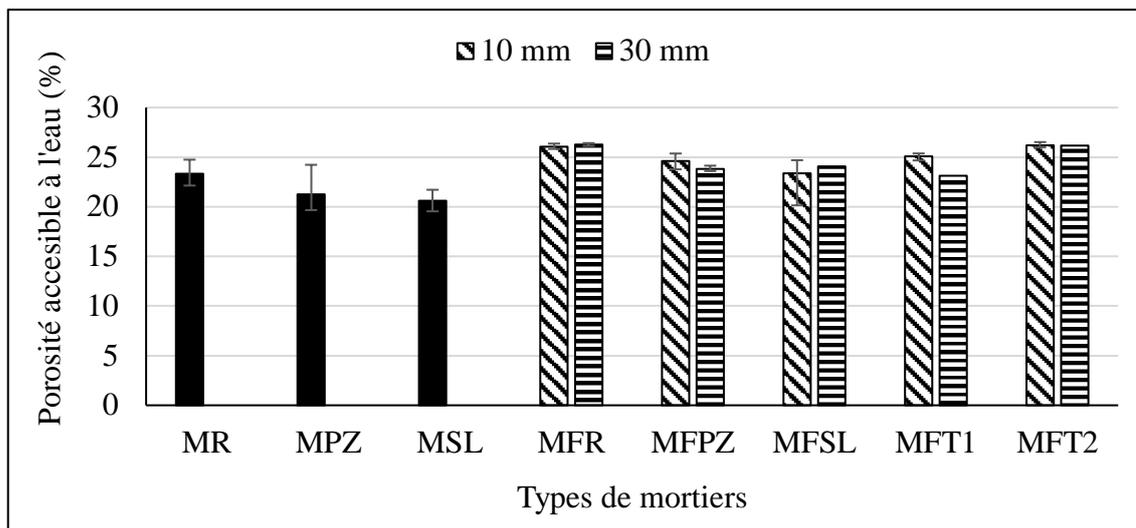


Figure 4. 14: Porosité accessible des différents mortiers de réparation.

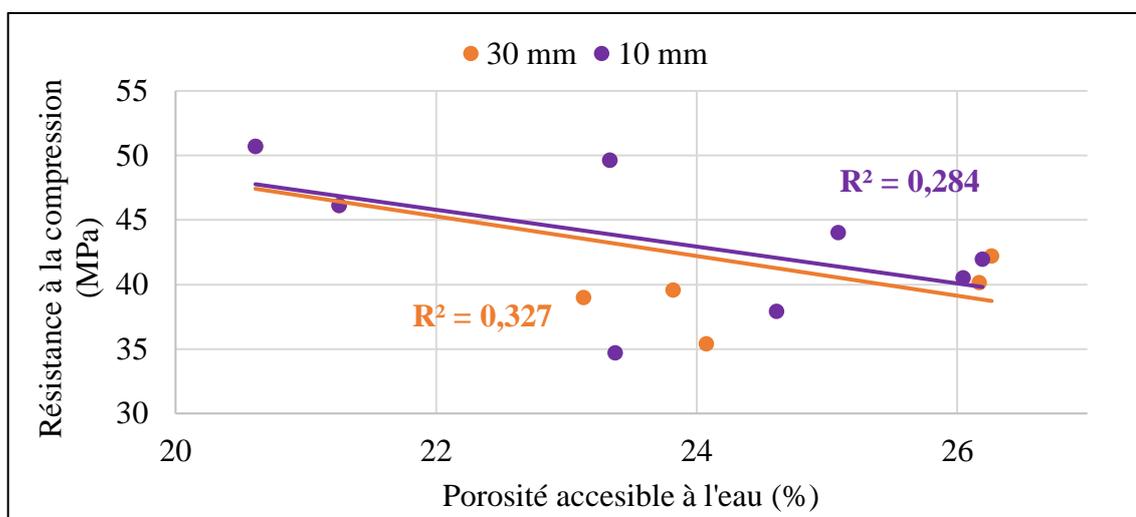


Figure 4. 15: Corrélation entre la porosité et la résistance à la compression.

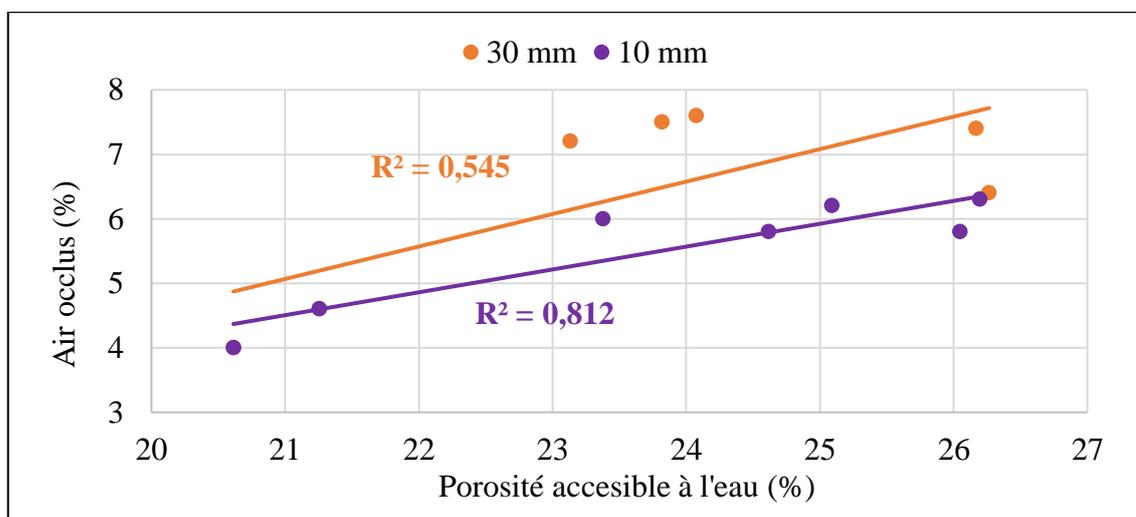


Figure 4. 16: Corrélation entre la porosité et l'air occlus.

Tableau 4. 7: Porosité accessible des différents mortiers de réparation étudiés

Porosité accessible à l'eau (%)		
Longueur de fibre (mm)	10	30
MR	23,33	
MPZ	21,26	
ML	20,61	
MFP	26,05	26,27
MFPPZ	24,62	23,82
MFPL	23,38	24,08
MFPT1	25,09	23,13
MFPT2	26,20	26,17

4.4.4. Absorption capillaire

Les figures 4.17 et 4.18 présentent respectivement les courbes de l'effet de l'ajout des fibres de PD brutes et traitées de 10 et 30 mm. Ces courbes montrent que les mélanges à base de 1% des fibres de PD brutes ou bien traitées présentent un coefficient d'absorption élevé, comparé aux mortiers sans fibres. L'incorporation de 1% des fibres de PD augmente le coefficient d'absorption de 2.53 mm pour le MR à 3.73 mm et 4.34 mm pour les mélanges à base de fibres brutes de 10 et 30 mm de longueur respectivement. Cela semble être due principalement à la structure microporeuse des fibres qui leur confère un caractère hydrophile. Ces résultats sont comparables à ceux de Benmansour et al. [100] et Benaniba et al. [152], qui ont rapporté que l'absorption du mortier augmente considérablement par l'ajout des fibres de PD.

L'addition de 15 % de pouzzolane et laitier réduisent l'absorption de l'ordre de 15% et 42% en comparaison aux mélanges incorporant seulement des fibres brutes. Cette réduction est due à une baisse de la porosité capillaire en raison de la formation de CSH secondaire issu de l'hydratation du laitier et aussi à une structure de pores très fines.

Le traitement à l'eau bouillante n'a pas d'influence significative sur l'absorption capillaire, puisque les mortiers MFP et MFT2 enregistrent le même coefficient d'absorption capillaire. En revanche, les fibres traitées par NaOH diminuent le coefficient d'absorption d'environ 10 % et 27 % pour les longueurs de 10 et 30 mm comparés aux

fibres brutes. De même on remarque que le coefficient d'absorption des mortiers fibrés a augmenté significativement dans le cas des fibres de longueur de 30 mm par rapport aux fibres de 10 mm de longueur.

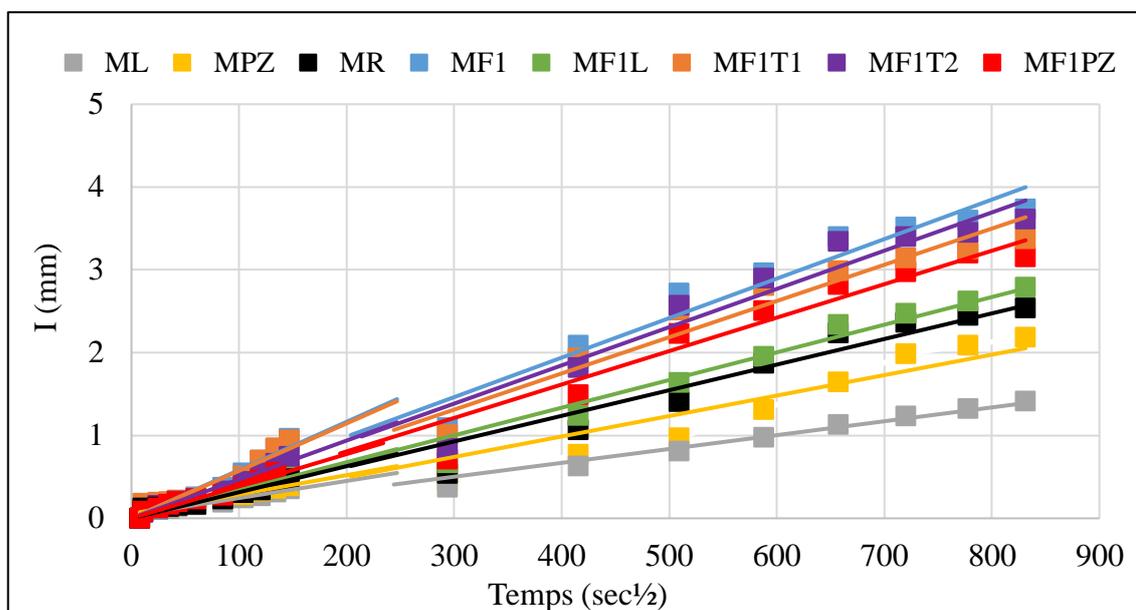


Figure 4. 17: Absorption capillaire des mortiers avec des fibres PD de 10 mm.

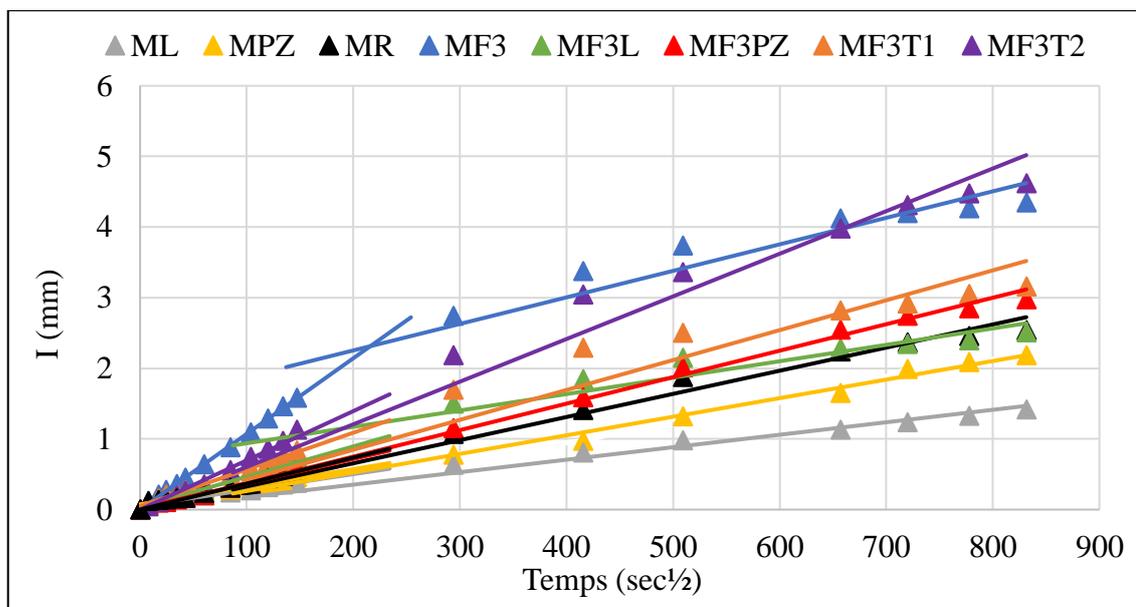


Figure 4. 18: Absorption capillaire des mortiers avec des fibres PD de 30 mm.

La cinétique d'absorption des matériaux est déterminée au moyen de la mesure de la sorptivité. Elle détaille le mouvement de l'eau causé par l'action des capillaires. Également c'est une qualité qui détermine la disposition des pores qui absorbent et transfèrent l'eau par capillarité [160].

La figure 4.19 présente les coefficients de sorptivité initiale (S_i). On remarque que l'ajout de 1 % de fibre de PD brutes augmente le coefficient de sorptivité initiale de 87 et 194 % pour les fibres de 10 et 30 mm respectivement en comparant avec le mortier témoin.

Les mélanges à base de fibres de PD brutes et pouzzolane naturelle montrent une forte diminution du coefficient de sorptivité. L'utilisation du laitier avec les fibres de PD brutes provoque une diminution du coefficient de sorptivité, Cette baisse est le résultat d'une structure de pores plus fines, causée par la formation de CSH secondaire provenant de l'hydratation du laitier. Les mélanges MFT1 et MFT2 caractérisés avec un coefficient de sorptivité diminué d'environ 19 et 47% en comparant avec le mortier à base de fibres de PD sans traitement.

Les coefficients de sorptivité des grands pores des mortiers (S_s) sont représentés dans la figure 4.20. L'incorporation de 1 % de fibre de PD brutes augmente le coefficient de sorptivité de 51 et 61 % pour des fibres de 10 et 30 mm de longueur respectivement.

Les éprouvettes contenant les ajouts cimentaires présentent une diminution du coefficient de sorptivité d'environ 38 et 20% pour le laitier et la pouzzolane naturelle respectivement. Les mélange à base de fibres de PD traitées chimiquement et hydrothermalement montrent aussi une baisse de sportivité de 20 et 14% en comparaison avec les mortiers à base de fibres de PD non traitées.

Une forte diminution de la sorptivité est remarqué dans le cas des mélanges incorporant les fibres de 30 mm en comparant avec celui à base de fibres de PD de 10 mm.

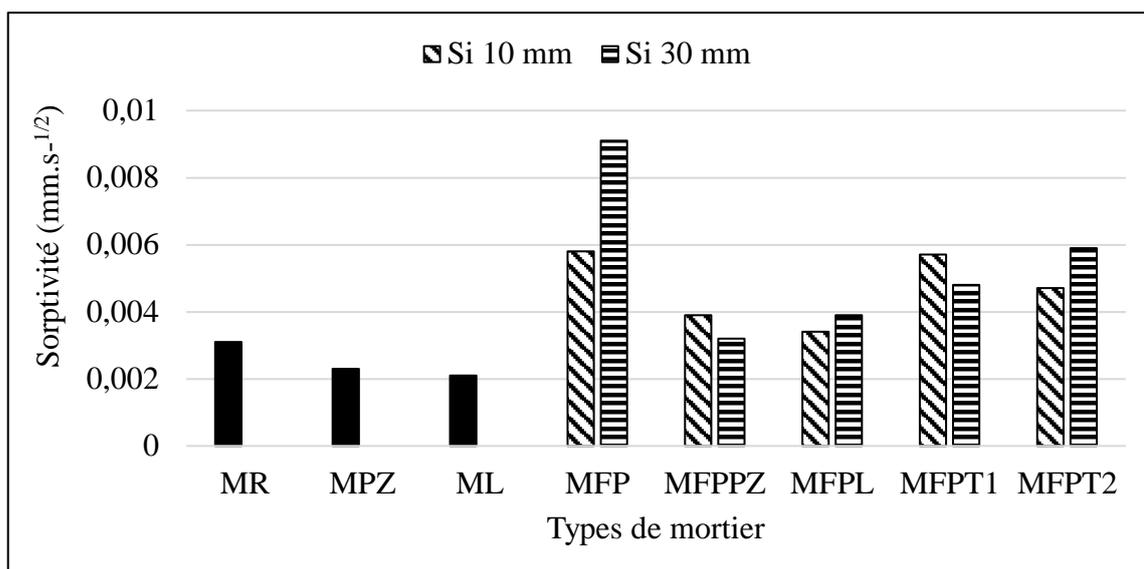


Figure 4. 19: Sorptivité initiale des différents mortiers de réparation.

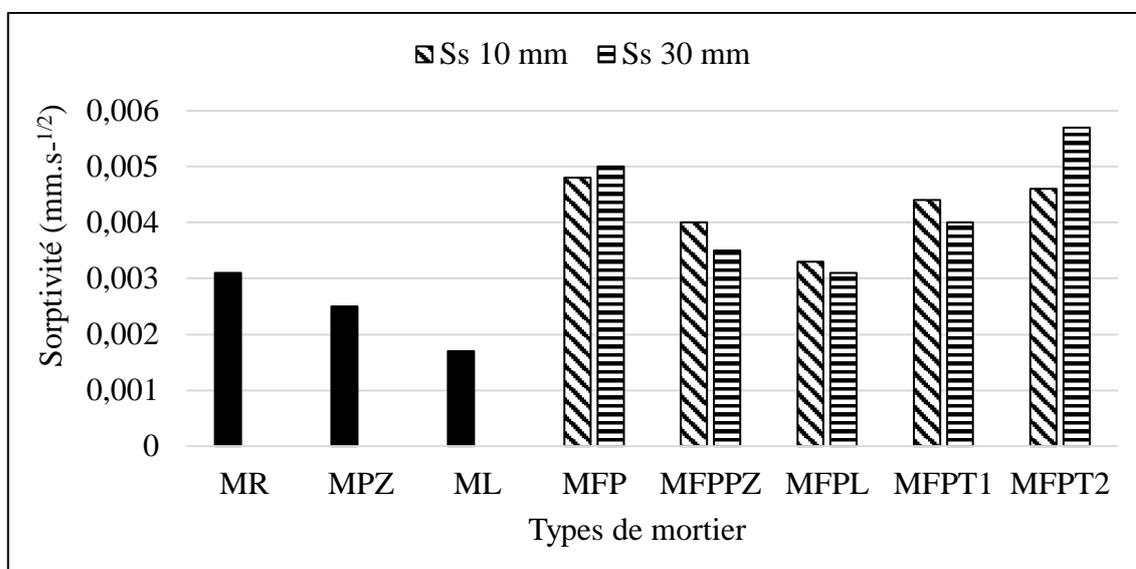


Figure 4. 20: Sorptivité secondaire des différents mortiers de réparation.

4.4.5. Retrait total

Les figures 4.21 et 4.22 résument l'influence des fibres de PD brutes et traitées de 10 et 30 mm de longueur sur le retrait total du mortier.

On remarque que les allures de chaque résultat se divise en deux phases, la première entre 0 et 14 jours caractérisée par une nette augmentation pour tous les mélanges, et une deuxième phase à long terme (plus de 14 jours) où le retrait se stabilise.

L'utilisation de 1 % de fibre de palmier dattier brutes de 10 et 30 mm entraîne une diminution de l'ordre de 21 et 16 % respectivement à l'âge de 14 jours par rapport au mortier de référence. Confirment les résultats d'autres études sur les mortiers renforcés par des fibres d'alfa, de palmier dattier et de diss [161].

Les mélanges à base de fibres de PD brutes et ajouts cimentaires (Laitier ou Pouzzolane naturelle) montrent une légère diminution (5 et 3 %). Une diminution de l'ordre de 10 et 12 % est obtenue par l'ajout des fibres traitées par l'eau bouillante ou par NaOH respectivement.

À l'âge de 90 jours, comparé au mélange de référence, la variation dimensionnelle de l'éprouvette contenant 1% de fibres de PD diminue de 25 % et 21% pour des longueurs de 10 et 30 mm respectivement. Une diminution du retrait de séchage des mortiers à base de fibres de PD a été aussi rapporté [104].

En outre, l'ajout des fibres de PD traitées par NaOH et les fibres traitées par l'eau bouillante présentent une diminution du retrait total de 27% et 29% respectivement. Néanmoins l'effet de la longueur des fibres sur l'évolution du retrait total est négligeable.

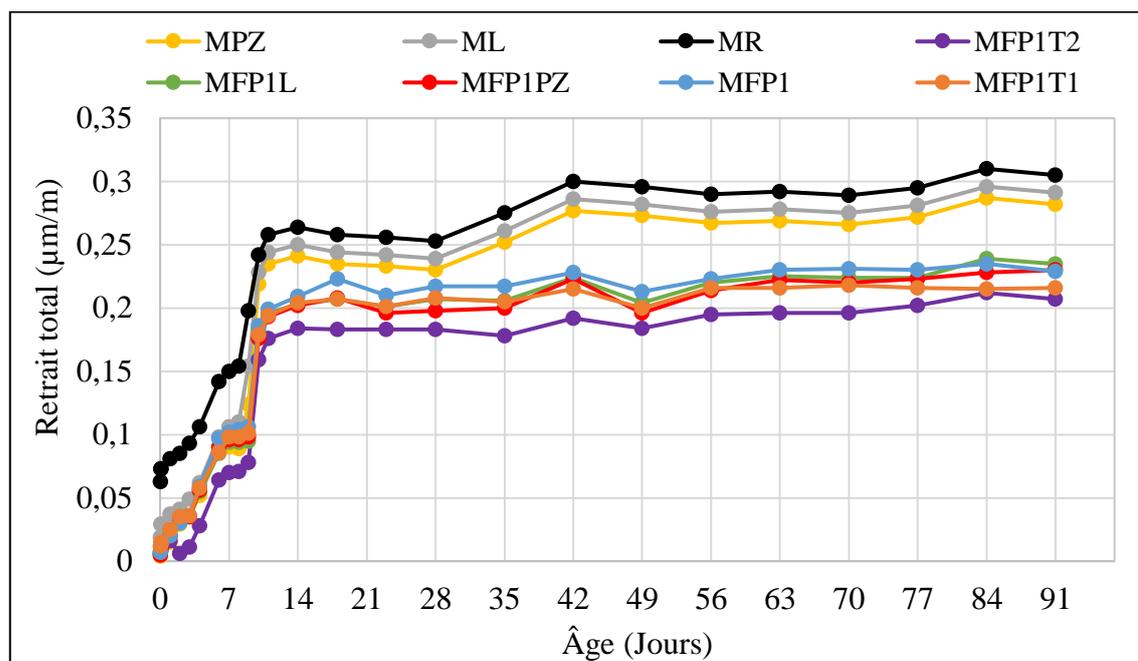


Figure 4. 21: Retrait total des mortiers avec des fibres PD de 10 mm.

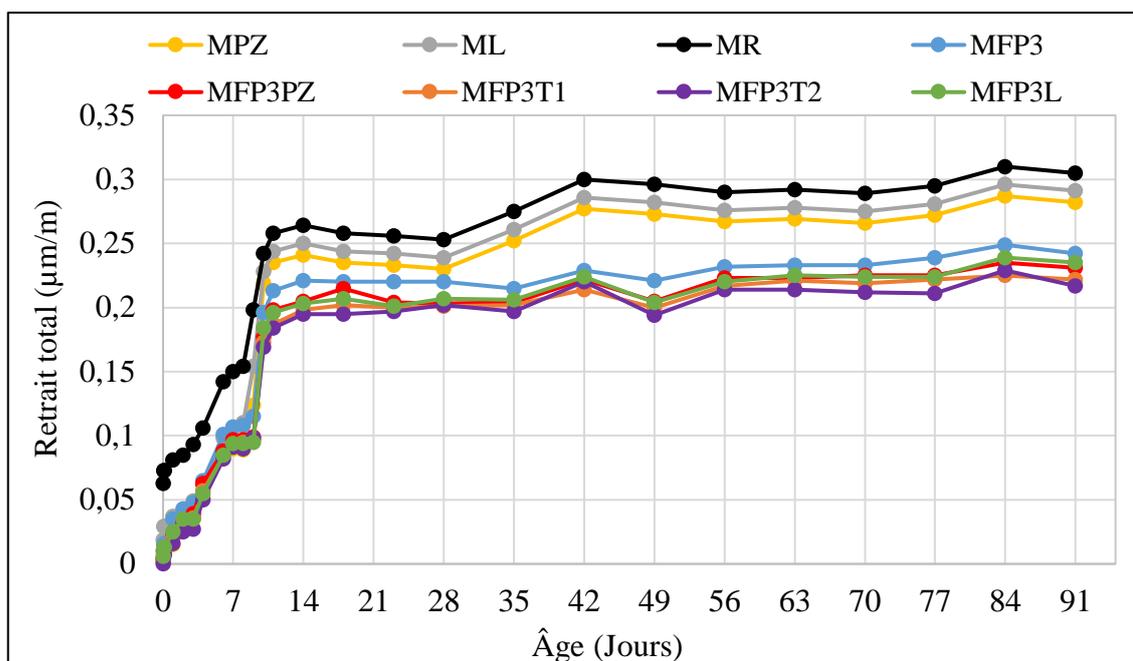


Figure 4. 22: Retrait total des mortiers avec des fibres PD de 30 mm.

4.4.6. Conductivité thermique

La figure 4.23 et le tableau 4.8 présentent l'évolution de la conductivité thermique des différents mortiers à base de 1% de fibres de PD brutes et traitées de 10 et 30 mm de longueurs. On peut noter que les mortiers à base de fibres de PD enregistrent une faible conductivité thermique par rapport aux mortiers sans fibres.

L'incorporation de 1% des fibres de PD réduit la conductivité de 36 % et 34 % pour des longueurs de 10 et 30 mm respectivement, en comparant avec le mortier témoin. Car l'incorporation de ces fibres dans la matrice cimentaire engendre une grande porosité d'où la présence d'air. Une réduction de 15 % de la conductivité thermique des mortiers avec 0,1 % de fibres de PD en raison de la faible conductivité thermique des fibres de PD de 0,083W/mK [162].

La conductivité thermique des mélanges à base du pouzzolane naturelle et 1% de fibres de PD est diminuée de 12 et 10 % pour les longueurs de fibres de 10 et 30 mm respectivement. On remarque que l'utilisation du laitier et 1% de fibres de PD non traitées de 10 et 30 mm de longueur engendre une diminution de 7 et 14 % respectivement.

L'effet du traitement chimique ou bien hydrothermique des fibres de PD marque une réduction de la conductivité d'environ 19 et 17 % par rapport au mortier à base de fibres de PD brutes.

La réduction de la conductivité thermique est plus importante avec les fibres longues (30 mm). Par contre, pour les fibres de PD de 7 mm de longueur et un pourcentage de fibres de 0 % à 30 % provoque une amélioration considérable de l'isolation thermique des composites, tout en réduisant la conductivité thermique effective [152].

Une corrélation moyenne ($R^2 = 0.519$ et 0.736) existe entre la résistance à la compression et la conductivité thermique des fibres de palmier dattier de 10 et 30 mm respectivement (Figure 4.24).

Une meilleure corrélation ($R^2 = 0.867$ et 0.912) est trouvée entre l'aire occlus et la conductivité thermique pour les mortiers à base de fibres de palmiers dattier de 10 et 30 mm respectivement (Figure 4.25).

On observe une moyenne corrélation entre la conductivité thermique et la porosité accessible à l'eau (Figure 4.26) notamment les coefficients de corrélations sont $R^2 = 0.687$ et 0.463 pour une longueur de fibre de 10 et 30 mm respectivement.

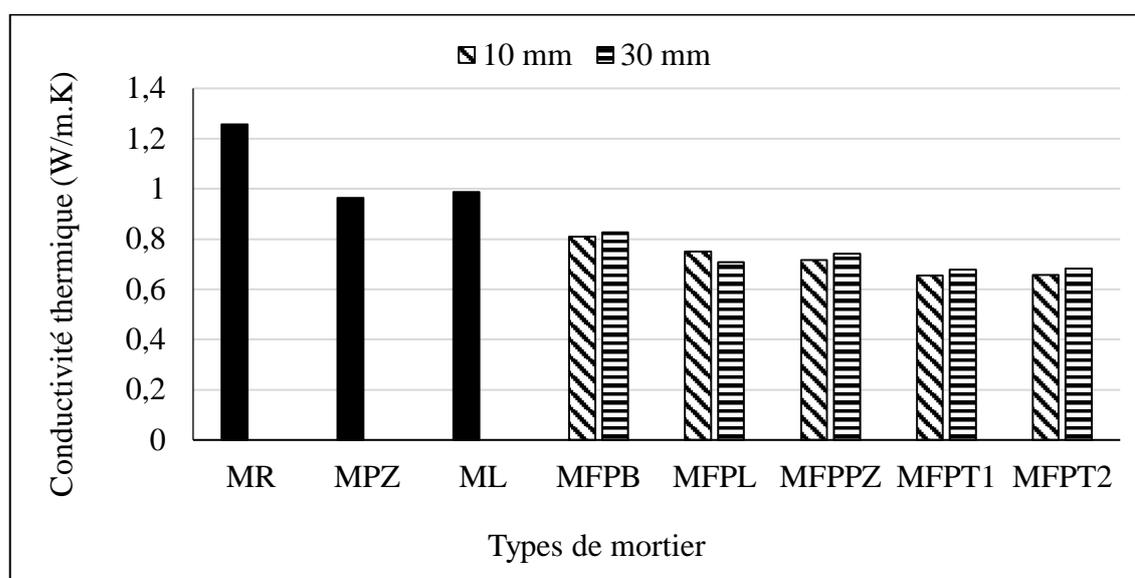


Figure 4. 23: Conductivité thermique des différents mortiers de réparation.

Tableau 4. 8: Conductivité thermique des différents mortiers de réparation étudiés

Conductivité thermique (W/m.K)		
Longueur de fibre (mm)	10	30
MR	1.257	
MPZ	0.964	
ML	0.988	
MFP	0.810	0.826
MFPPZ	0.716	0.742
MFPL	0.751	0.709
MFPT1	0.654	0.679
MFPT2	0.656	0.682

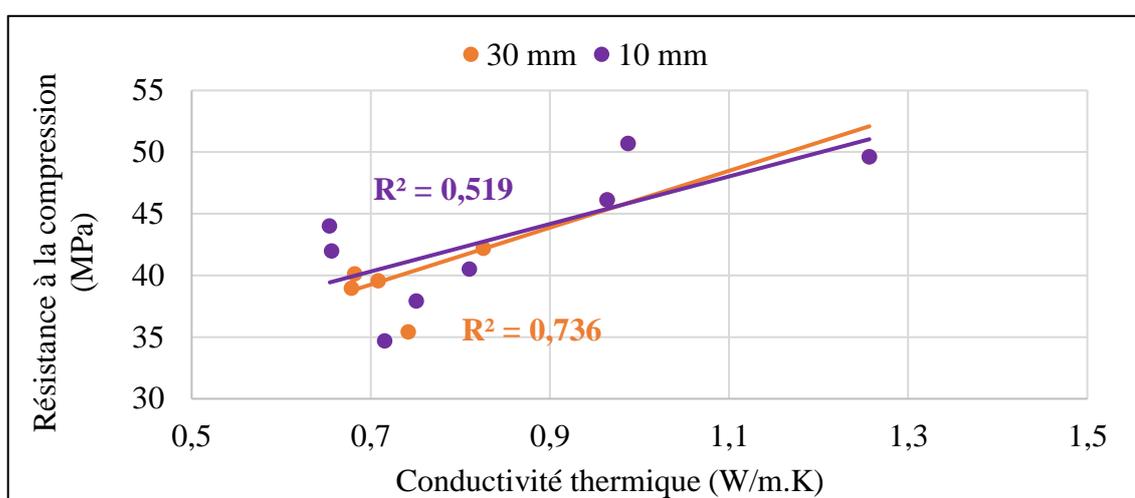


Figure 4. 24: Corrélation entre la conductivité thermique et la résistance à la compression.

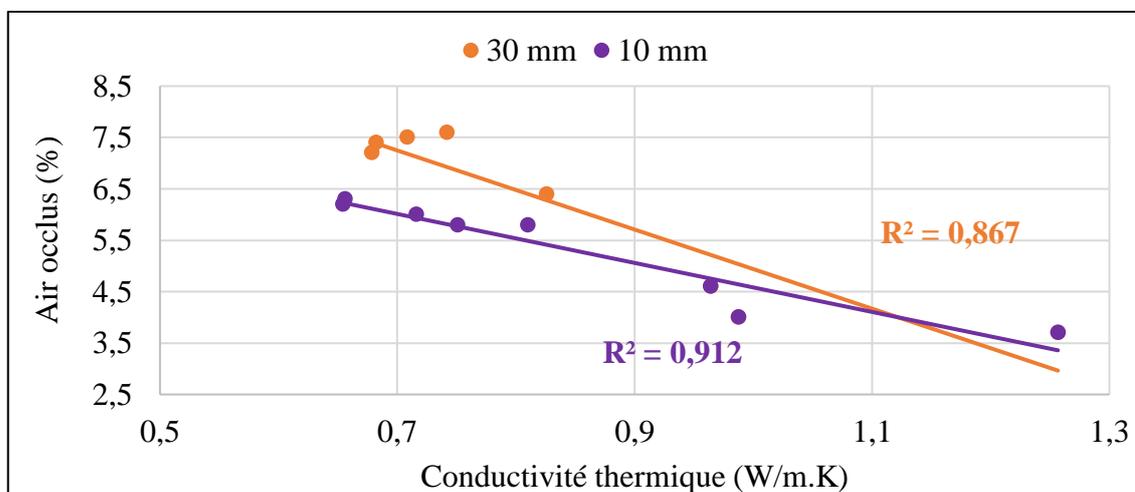


Figure 4. 25: Corrélation entre la conductivité thermique et la teneur en air.

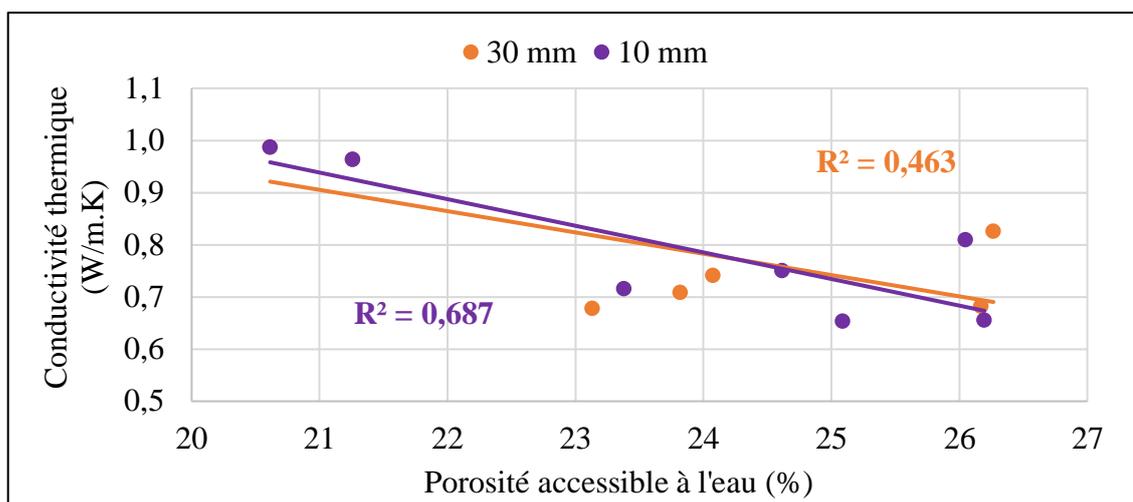


Figure 4. 26 : Corrélation entre la conductivité thermique et la porosité accessible à l'eau.

4.4.7. Adhérence par cisaillement oblique

Les résultats de la mesure d'adhérence par cisaillement oblique appliquée sur des éprouvettes composites de béton et mortier de réparation à base de fibres de PD de 10 et 30 mm sont présentés par le tableau 4.9 et la figure 4.27.

On constate une amélioration de la contrainte d'adhérence des mortiers de réparation à base de fibres de PD de 10 et 30 mm comparée à celle des échantillons sans fibres.

L'incorporation de 1% des fibres de PD brutes cause une légère augmentation de la résistance au cisaillement oblique de l'ordre de 9% pour les deux longueurs de fibres. Des résultats similaires ont été rapportés par des mortiers renforcés de 0,75 % de fibres d'alfa et de PD [87]. Et des fibres de basalte de 20 mm de longueur [163]. L'augmentation d'adhérence est liée à l'amélioration par les fibres de la zone de transition interfaciale entre l'ancien mortier et les nouveaux matériaux de réparation.

L'utilisation de 15 % de laitier et 1% de fibres de PD brutes augmente aussi la résistance de l'ordre de 11 % et 20 % comparés au mortier à base de fibres brutes. En revanche, l'ajout de 15 % de pouzzolane naturelle influe faiblement sur la résistance d'adhérence.

En outre les échantillons qui contiennent des fibres de PD traitées chimiquement par NaOH ou bien par l'eau bouillante ont amélioré l'adhérence par 27 % et 42 %

respectivement. Comme indiqué par la figure 4.28, on remarque que les fibres brutes sont encerclées par un nombre de vides important, qui diminue lorsque les fibres sont traitées par l'eau bouillante, et disparaissent complètement dans le cas des fibres qui ont subi le traitement alcalin.

Une moyenne corrélation existe entre la résistance à la compression et la résistance au cisaillement oblique ($R^2= 0.650$ par les fibres de 10 mm et $R^2= 0.734$ par les fibres de 30 mm) (Figure 4.29).

Tableau 4. 9: Résistance au cisaillement oblique des différents mortiers de réparation étudiés

Adhérence par cisaillement oblique (MPa)		
Longueur de fibre (mm)	10	30
MR	5,70	
MPZ	5,83	
ML	5,97	
MFP	6,19	6,22
MFPPZ	6,01	6,10
MFPL	6,35	6,82
MFPT1	8,25	7,90
MFPT2	8,78	8,37

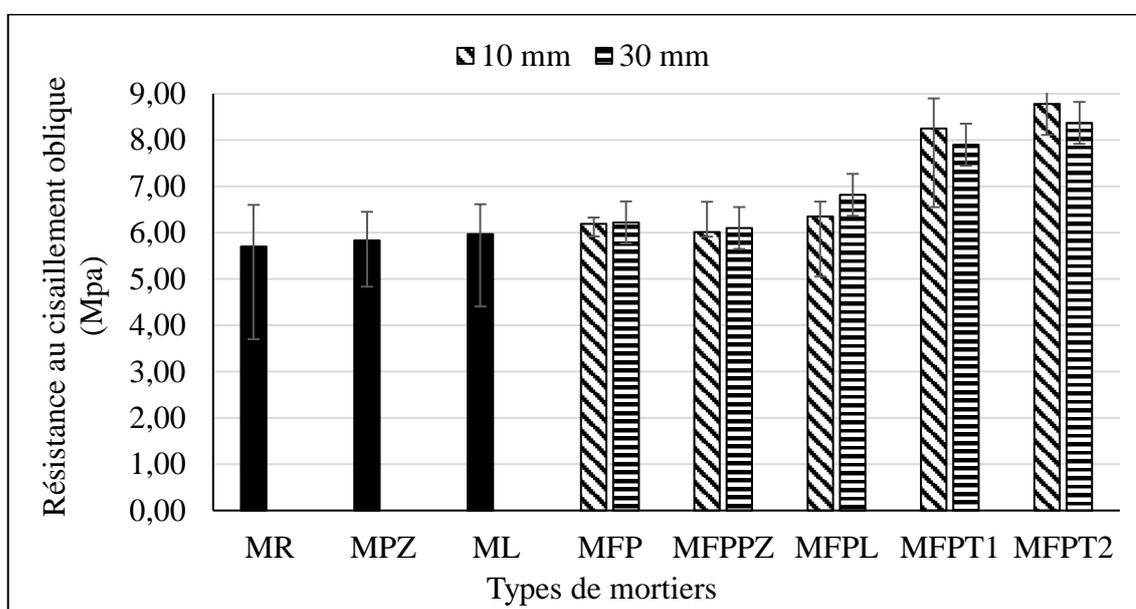


Figure 4. 27: Résistance au cisaillement oblique des différents mortiers de réparation.

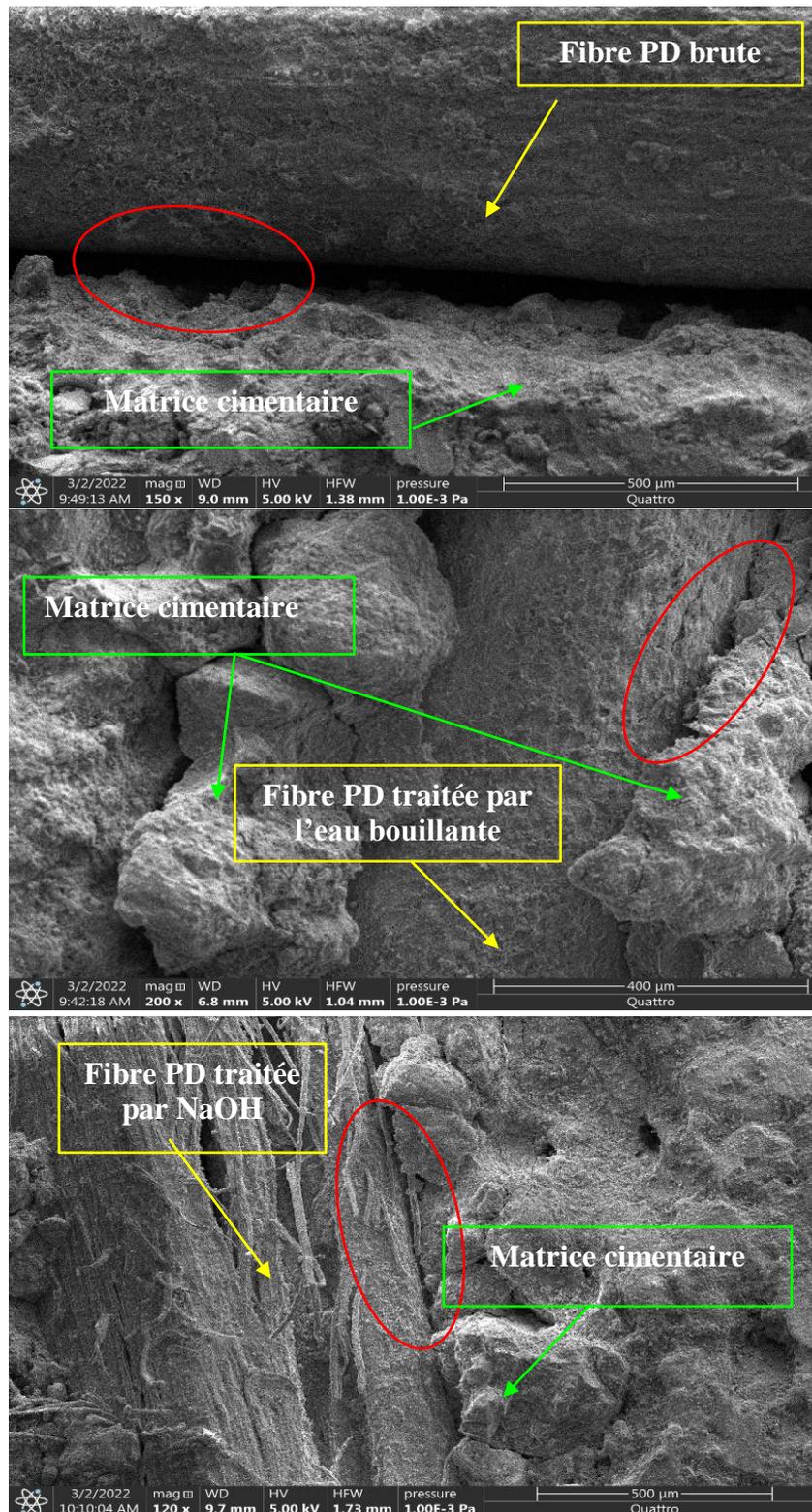


Figure 4. 28: MEB d'interface fibre/matrice : (a) Brutes, (b) Traitées avec l'eau bouillante, (c) Traitées avec NaOH.

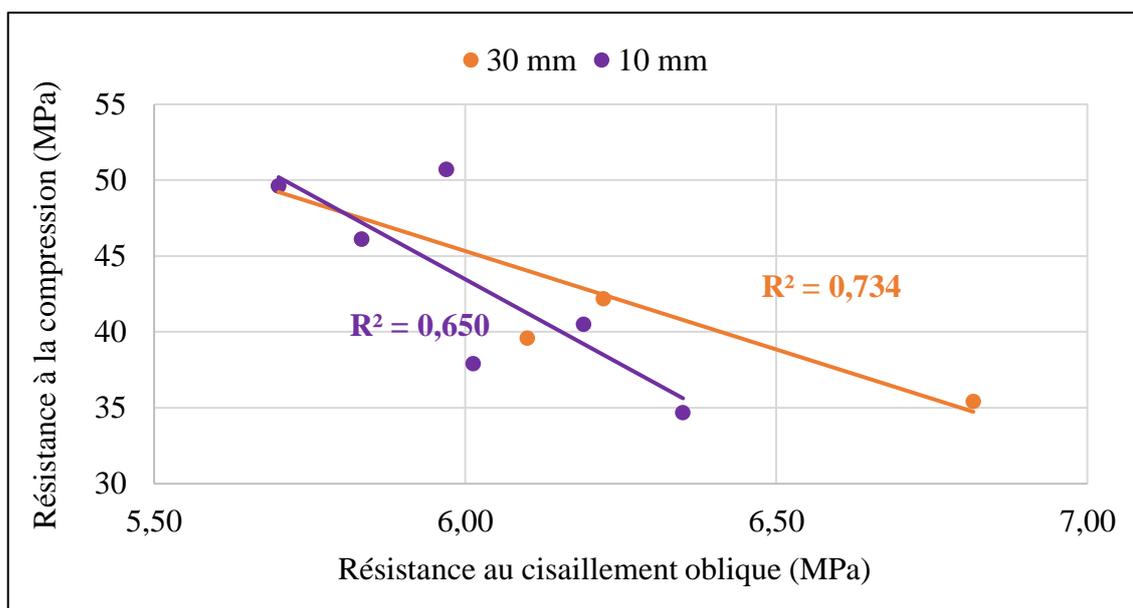


Figure 4. 29: Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance au cisaillement oblique.

Deux modes de rupture différents ont été observés lors de l'essai de cisaillement oblique, comme présenté par la figure 4.30. Le type de rupture pour tous les mortiers sans fibres était la séparation de l'interface (Figure 4.30 (a)). Les échantillons à base de fibres de PD brutes ou bien traitées ont montré une fissure, sans décollement du mortier de réparation (Figure 4.30 (b)), ce qui prouve nettement la forte adhérence du mortier de réparation fibré par rapport au non fibré.



Figure 4. 30: Modes de rupture observés après l'essai de cisaillement oblique.

4.4.8. Adhérence par arrachement (Pull-off)

Les résultats de la mesure d'adhérence par arrachement appliquée sur des éprouvettes composites de béton et mortier de réparation à base de fibres de PD de 10 mm et 30 mm sont présentés par le tableau 4.11 et la figure 4.31.

On remarque que la résistance d'adhérence de tous les échantillons a dépassé la valeur minimale (1,5 MPa) exigée par la norme NF EN 1766 [164]. L'incorporation de 1 % de fibres de PD engendre une amélioration de l'adhérence par arrachement de 15 % pour les deux longueurs de fibre. Confirmant des augmentations comparable rapporté sur des fibres végétales d'alfa [99].

L'effet de l'addition des ajouts cimentaires est négligeable comparé aux mortiers de réparation à base de fibres de PD brute sans ajouts. Yahiaoui et al. [165] ont affirmé que l'ajout du laitier ou de pouzzolane naturelle dans les mortiers à base de fibres de palmier dattier n'a pas apporté d'amélioration significative. Kenai et al. [87] ont rapporté que le mortier contenant du laitier et les fibres d'alfa a enregistré l'adhérence par arrachement la plus élevée.

En revanche, le traitement alcalin des fibres augmente d'adhérence par arrachement par 19 % et 27 % pour le traitement alcalin et le traitement hydrothermique, respectivement. Les fibres courtes (10 mm) ont montré une meilleure adhérence que celle des fibres longues (30 mm). Selon les résultats trouvés pour tous les mélanges fibrés prouvent qu'ils seront utilisés avec performance pour des couches d'épaisseur de 20 mm.

Tableau 4. 10: Résistance d'adhérence par arrachement des différents mortiers

Adhérence par arrachement (MPa)		
Longueur de fibre (mm)	10	30
MR	1,71	
MPZ	1,77	
ML	1,52	
MFP	1,99	1,97
MFPPZ	1,81	1,63
MFPL	1,95	1,76
MFPT1	2,03	2,04
MFPT2	2,17	2,01

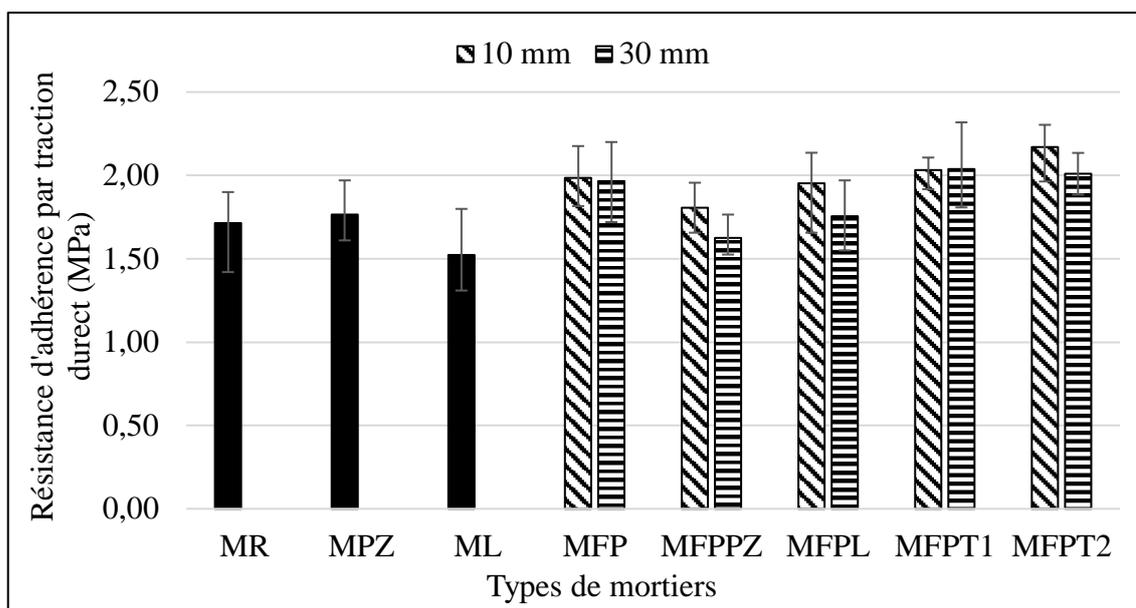


Figure 4. 31: Résistance d'adhérence par arrachement des différents mortiers.

Il existe quatre modes de ruptures [166]: (a) dans le substrat, (b) dans le mortier de réparation, (c) à l'interface béton/mortier de réparation, (d) à l'interface époxy/disque (Figure 4.32).



Figure 4. 32: Modes de rupture : (a) dans le substrat, (b) dans le mortier de réparation, (c) à l'interface béton/mortier de réparation, (d) à l'interface époxy/disque.

Le niveau d'adhérence interfaciale (mortier de réparation / support) mesuré des éprouvettes sans fibres est classé dans la catégorie d'adhérence « Bonne », proposée par Sprinkel et Ozyildirim [167] et indiqué dans le tableau 4.10, tandis que les échantillons à base 1% de fibres de palmier dattier peuvent être classées comme "Très bonne".

Tableau 4. 11: Résistance d'adhérence des différents mortiers de réparation étudiés [167]

Qualité d'adhérence	Excellente	Très bonne	Bonne	Moyenne	Faible
Résistance d'adhérence (MPa)	≥ 2.1	1.7–2.1	1.4–1.7	0.7–1.4	0–0.7

La relation entre la résistance à la compression et la résistance d'adhérence par arrachement est illustrée sur la figure 4.33. On observe une faible corrélation dont les coefficients de corrélations sont 0.363 et 0.250 avec une longueur de fibre de 10 et 30 mm, respectivement.

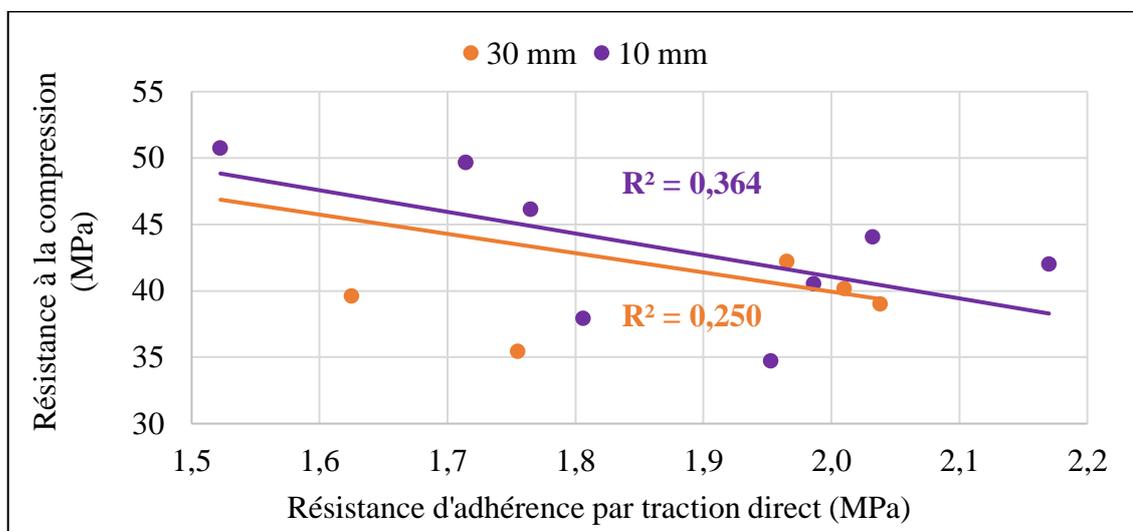


Figure 4. 33: Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance d'adhérence par arrachement.

4.4.9. Pénétration aux ions chlorures

La figure 4.34 et le tableau 4.12 présentent l'effet de la perméabilité aux ions chlorures. On peut noter que les mortiers renforcés par des fibres de PD brutes ou traitées favorisent la diffusion des ions chlorures dans le mortier. Les échantillons contenant des fibres de PD enregistrent des valeurs élevées de pénétration des ions chlorures de l'ordre de 3350 à 4560 coulombs comparés à 3843 coulombs pour les échantillons sans fibres. Il faut noter que ces valeurs montrent une perméabilité modérée et élevée selon la norme ASTM C 1202-94 [141].

L'incorporation de 1% de fibres de PD augmente la perméabilité aux ions chlorures de l'ordre de 12 % et 19 % pour des fibres de 10 et 30 mm respectivement. On attribue ce processus de diffusion des ions chlorures à la structure de la fibre qui favorise le déplacement des ions par ses pores. Ces résultats confirment ceux de Guo et al. [168] qui ont indiqué que la résistance à la pénétration des ions de chlorures du béton a été réduite par l'utilisation de fibres de basalte.

Une diminution significative de la charge passée a été observée pour les mélanges qui contiennent 15% des ajouts cimentaires (Laitier, Pouzzolane) de l'ordre de 17% et 11% respectivement pour les fibres de 10 et 30 mm. Yahiaoui et al. [169] rapportent que la perméabilité aux ions chlorures diminue avec l'augmentation de la teneur en laitier.

Le traitement alcalin et le traitement hydrothermique des fibres de PD influent légèrement sur la perméabilité en comparaison avec le mortier renforcé par les fibres brutes. Une nette augmentation de la pénétration des ions avec la teneur en fibres de coco a été rapportée après exposition de trois environnements différents : air, air alterné et eau de mer et eau de mer [106].

Tableau 4. 12: Résistance aux ions chlorures des différents mortiers de réparation étudiés

Charge passante (Coulombs)		
Longueur de fibre (mm)	10	30
MR	3843	
MPZ	3512	
ML	3351	
MFP	4306	4560
MFPPZ	3840	3800
MFPL	3558	3805
MFPT1	4231	4414
MFPT2	4313	4325

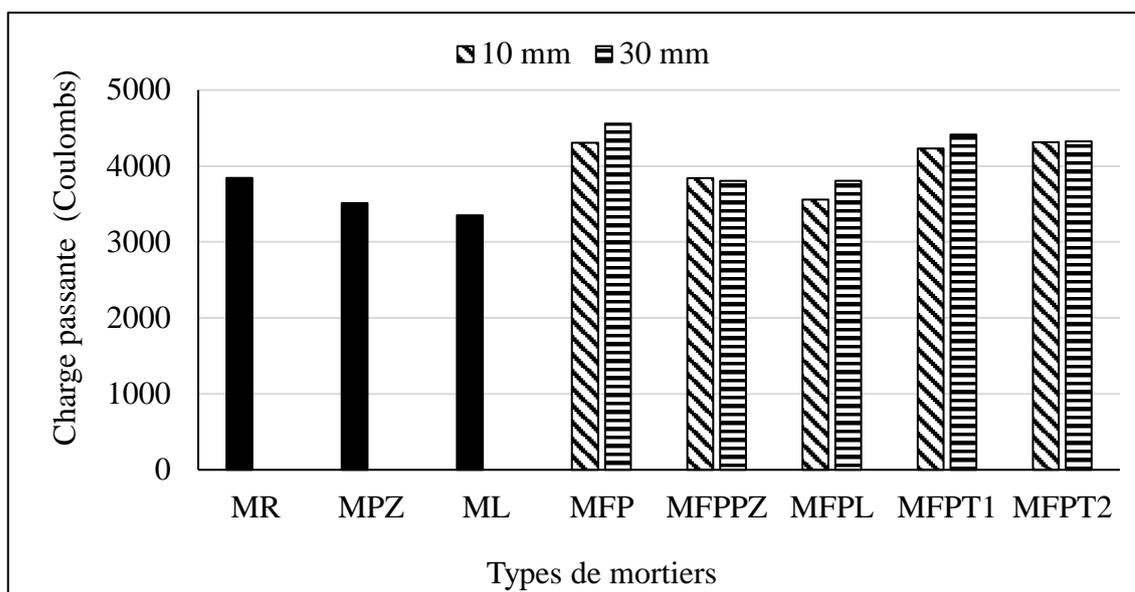


Figure 4. 34: Perméabilité aux ions chlores des différents mortiers.

4.4.10. Résistance aux cycles séchage / mouillage

4.4.10.1. Résistance à la compression après séchage mouillage

La résistance à la compression des différents échantillons à base de fibres de PD de 10 mm et 30 mm respectivement, soumis à 26 cycles de séchage mouillage montrent que la résistance à la compression de tous les échantillons diminue après 26 cycles de séchage mouillage (Figures 4.36 et 4.37).

Le mélange à base de fibres de PD brutes qu'ils soient de 10 mm ou 30 mm enregistre une réduction considérable de la résistance de l'ordre de 30%, Probablement en raison de la minéralisation des fibres suite au déplacement des produits d'hydratation, exceptionnellement de l'hydroxyde de calcium, vers le lumen, les parois et les vides de la fibre [170].

Des signes de dégradation ont été observé sur des échantillons de béton renforcés par des fibres de jute naturel après 180 jours de vieillissement par des cycles de séchage mouillage [171].

En outre, les mélanges à base de fibres brutes et ajouts cimentaires donne une perte de résistance à la compression moins considérable par rapport aux mélanges renforcés seulement par les fibres de PD brutes. Les mélanges à base de fibres traitées

chimiquement et hydrothermalement permettent de conserver des résistances appréciables dans le cas des fibres de 10 et 30 mm.

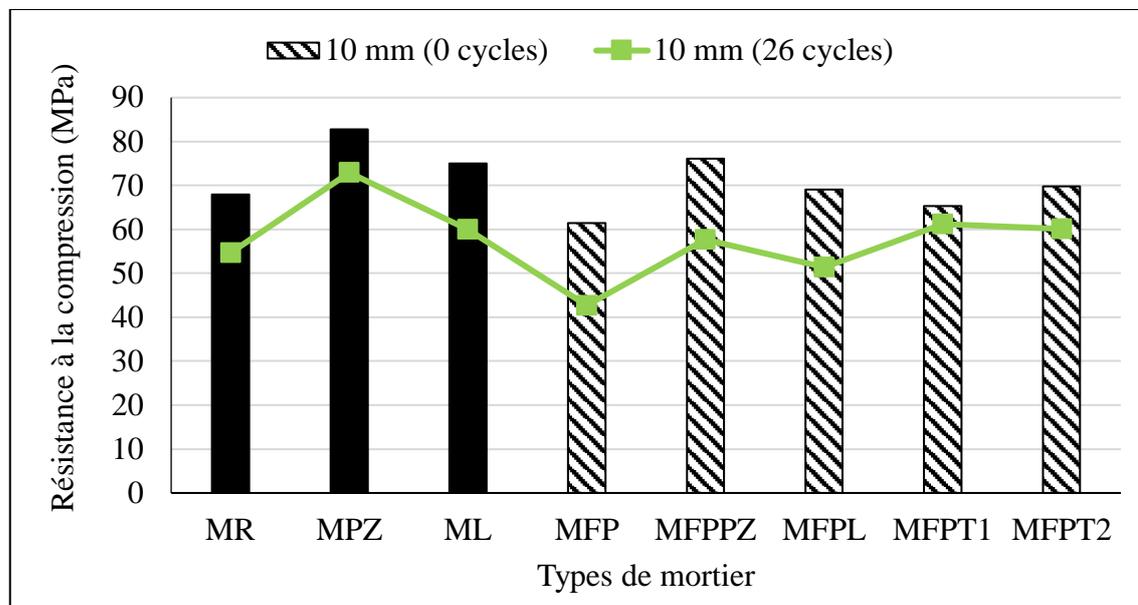


Figure 4. 35: Résistance à la compression du mortier avec des fibres PD de 10 mm après 26 cycles de séchage mouillage.

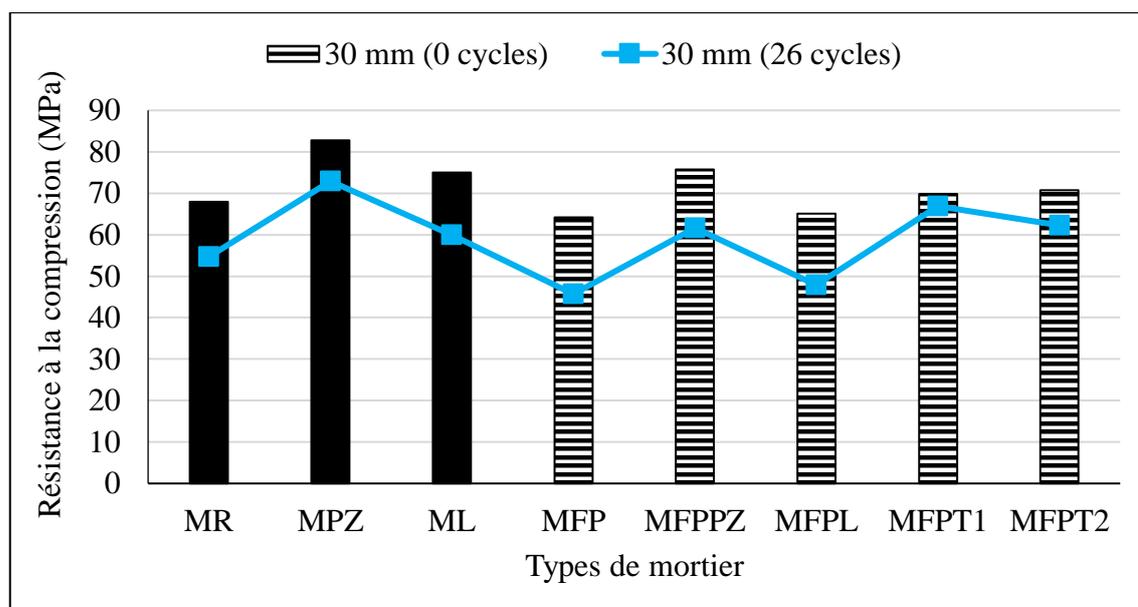


Figure 4. 36: Résistance à la compression du mortier avec des fibres PD de 30 mm après 26 cycles de séchage mouillage.

4.4.10.2. Résistance d'adhérence après séchage mouillage

L'effet du vieillissement accéléré sur la résistance d'adhérence du mortier de réparation et le support en béton est mesuré par l'application de l'essai d'arrachement sur des éprouvettes composites après 26 cycles de séchage mouillage. Les figures 4.38 et 4.39 représentent les résultats d'arrachement des échantillons à base de fibres de PD de 10 mm et 30 mm respectivement. Après 26 cycles séchage / mouillage, tous les composites ont montré des pertes significatives dans la résistance d'adhérence et cette dernière ne dépasse pas la valeur minimale (1,5 MPa) exigée par la norme NF EN 1766 [164].

Les mortiers à base de fibres de PD brutes sont caractérisés par une chute de 47 et 63 % pour des longueurs de fibres de 10 et 30 mm respectivement par rapport aux échantillons qui n'ont subi aucun cycle. Les mélanges à base des ajouts cimentaires et 1% de fibres de PD brutes présentent une diminution plus importante, particulièrement à base du laitier qui atteint une diminution de 74 %.

La résistance d'adhérence des mortiers à base de fibres traitées par NaOH et par l'eau bouillante est toujours la plus élevée par rapport aux mortiers à base de fibres brutes. La résistance d'adhérence après l'application du processus de vieillissement accéléré à tous les mortiers de réparation peut être classée comme "moyenne", excepté les mélanges à base de laitier caractérisés par une faible adhérence [167].

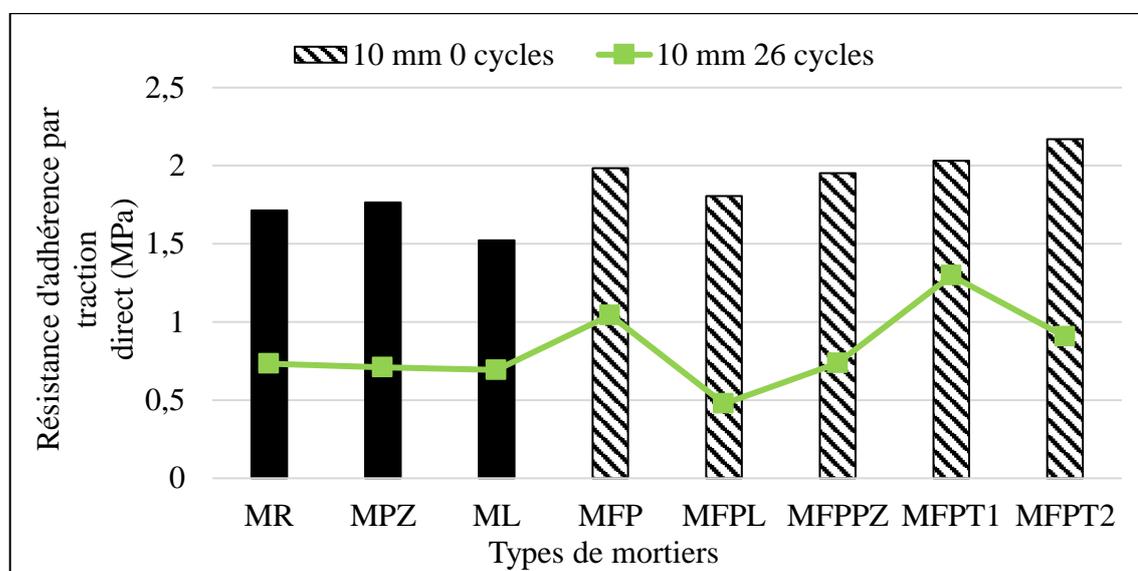


Figure 4. 37: Résistance à l'arrachement du mortier avec des fibres PD de 10 mm après 26 cycles de séchage mouillage.

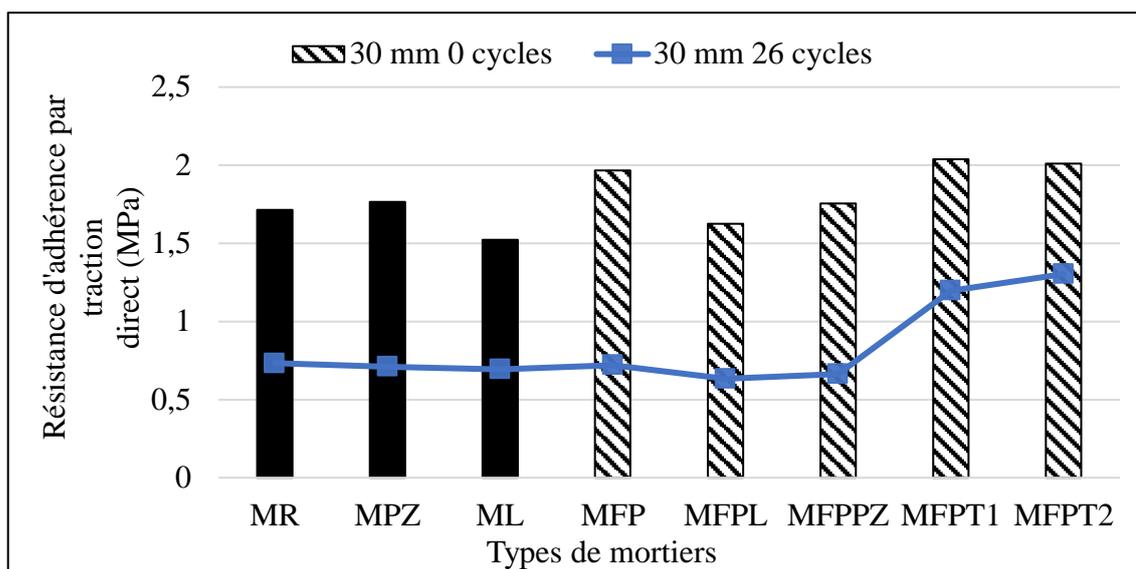


Figure 4. 38: Résistance à l'arrachement du mortier avec des fibres PD de 30 mm après 26 cycles de séchage mouillage.

4.5. Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre concernant l'effet des fibres de palmier dattier sur les propriétés du mortier de réparation nous permettent de conclure que :

- L'incorporation des fibres traitées a un effet significatif sur l'amélioration de la résistance à la flexion pour les deux longueurs des fibres (10 et 30 mm).
- La conductivité thermique des mortiers diminue avec l'ajout des fibres de PD et elle est plus faible par les fibres courtes (10 mm).
- Une réduction importante du retrait total est enregistrée dans le cas de l'ajout des fibres de PD traitées par NaOH et par de l'eau bouillante, mais l'effet de la longueur des fibres sur le retrait est négligeable.
- La caractérisation des fibres avant et après chaque traitement montre que le traitement par alcalin de la fibre de palmier dattier augmente la cristallinité de la fibre, élimine les matériaux amorphes et améliore l'adhérence fibres / matrice cimentaire.

- L'utilisation des fibres de PD brutes ou bien traitées dans le mortier affecte de façon négative sur la maniabilité, cette perte d'ouvrabilité est moins considérable dans le cas de l'ajout de laitier.
- La résistance à la perméabilité aux ions chlorures est réduite avec l'incorporation de 1% de fibres de PD en comparaison au mortier témoin.
- Une amélioration significative de la résistance d'adhérence par arrachement et par cisaillement oblique est remarquée dans le cas de l'ajout des fibres de palmier dattier traitées par un traitement alcalin ou bien hydrothermique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de cette étude est la valorisation des fibres de palmier dattier brutes et traitées dans le mortier de réparation, ainsi que l'analyse de l'effet de l'ajout des fibres de palmier dattier brutes et traitées sur les performances du mortier de réparation. L'étude expérimentale nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Les résultats des analyses par diffraction des rayons X (DRX), analyse thermogravimétrique et l'observation au microscope électronique à balayage révèlent que le traitement par NaOH de la fibre de palmier dattier est efficace pour éliminer les matériaux amorphes, augmenter la cristallinité de la fibre, conduisant à l'amélioration de l'adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire
- L'incorporation des fibres de PD brutes ou bien traitées dans le mortier conduit à la diminution de sa maniabilité à l'état frais, beaucoup plus pour les fibres de 30 mm que celles de 10 mm, cette réduction est rectifiée dans le cas de l'ajout de laitier.
- Une nette augmentation de la teneur en air des mortiers renforcés par des fibres de PD brutes et traitées a été signalée. En outre, les longueurs des fibres de 30 mm présentent les teneurs en air les plus élevées.
- Les fibres de PD entraînent une réduction de la résistance en compression à 28 et 90 jours. Le traitement par NaOH des fibres de PD de 10 mm de longueur enregistre la résistance à la compression la plus élevée par rapport aux mélanges fibrés.
- La résistance à la flexion des mélanges fibrés est nettement supérieure au mortier témoin. Le traitement chimique et hydrothermique a un effet significatif sur l'amélioration de la résistance à la flexion pour les deux longueurs des fibres.
- Le mortier renforcé par des fibres de PD présente une porosité accessible à l'eau ainsi qu'une absorption capillaire nettement supérieur à celle des mélanges sans

fibres. L'ajout de la pouzzolane naturelle et le laitier entraîne une diminution de l'absorption comparé aux mélanges incorporés seulement avec des fibres brutes.

- La conductivité thermique des mortiers diminue avec l'ajout des fibres de PD, mais elle augmente légèrement pour les fibres de 30 mm de longueur par rapport à celle de 10 mm.
- Les fibres de PD brutes et traitées diminuent le retrait total. Cette réduction est plus importante avec les fibres de PD traitées par NaOH et par de l'eau bouillante. Par contre, l'effet de la longueur des fibres sur le retrait est négligeable.
- La mesure de la résistance d'adhérence par arrachement indique que l'incorporation des fibres de PD engendre une amélioration de la contrainte d'adhérence. Le traitement alcalin et hydrothermique augmente la contrainte d'adhérence comparé au mortier renforcé par des fibres brutes. Les fibres courtes (10 mm) enregistrent une adhérence plus élevée que les fibres longues (30 mm).
- L'addition des fibres de PD brutes ou traitées au mortier de réparation améliore significativement la résistance au cisaillement oblique plus précisément dans le cas des fibres traitées par NaOH ou bien de l'eau bouillante.
- En comparaison avec le mortier témoin, l'incorporation de 1% des fibres de PD engendre une augmentation de la perméabilité aux ions chlorures.
- La résistance à la compression de tous les échantillons diminue après l'application de 26 cycles de séchage mouillage.
- L'ensemble de ce travail montre que les fibres de palmier dattier traitées et non traitées avec ajout cimentaire peuvent être utilisées avec succès comme renfort végétale dans une matrice cimentaire tout en réduisant l'empreinte carbone.
- Les résultats de cette étude indiquent que les fibres de palmier dattier traitées, peuvent constituer des renforts efficaces dans les mortiers de réparation et peuvent être utilisées avec performance pour une épaisseur de 20 mm.

- Cette thèse constitue un pas supplémentaire pour la conception de mortiers biosourcés à usage structurel et non structurel comme le traitement de fissures superficielles de béton ou d'enduit de ciment, de défauts superficiels comme les nids de gravier, les reprises de bétonnage, les fers apparents et la réparation de béton dégradé par corrosion des armatures.

PERSPECTIVES

Le programme expérimental a été limité par le temps et les moyens disponibles et pourrait être complété par les études suivantes :

- ✓ Etudier la durabilité à long terme (plus d'un an) des fibres végétales dans un milieu cimentaire.
- ✓ Analyser l'effet combiné des fibres traitées avec les différents ajouts cimentaires sur les caractéristiques mécaniques et durabilité du mortier de réparation.
- ✓ Poursuivre cette étude par une analyse technico-économique.
- ✓ Compléter cette recherche expérimentale par une étude numérique pour la prévision.

RÉFÉRENCES

- [1] R. Chabbi, F. Noureddine, and B. Fouzia, “Pathologies , diagnostic à l ’aide de CND et techniques de réparation et protection des ouvrages en béton armé : état de l ’ art,” 2018.
- [2] G. Fagerlund, “REHABCON- strategy for maintenance and rehabilitation in concrete structures- Final Report,” Lund University, 2004.
- [3] A. Soufi, “Etude de la durabilité des systèmes béton armé : mortiers de réparation en milieu marin,” Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, France, 2014.
- [4] J. Calgaro and M. Lacroix, Maintenance et réparation des ponts. Presse de l’école nationale des ponts et chaussées, France, 1997.
- [5] S. Chakri, “Compréhension des mécanismes d’inhibition de la corrosion des armatures métalliques des bétons par des molécules d’origine biologique,” Thèse de Doctorat, Université de Pierre et Marie Curie, France, 2016.
- [6] R. D. Walker, “Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in chloride contaminated reinforced concrete structures,” Doctoral Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 1996.
- [7] S. Hamlaoui, “Maintenance, entretien et réparation des ponts,” Mémoire de magistère, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2012.
- [8] M. Thiery, “Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques,” Thèse de Doctorat , Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, France, 2005.
- [9] I. Tchegnina Ngassam, “Durabilité des réparations des ouvrages d’art en béton,” Thèse de Doctorat, Université de Paris-Est, France, 2014.
- [10] K. Gadri, “Étude expérimentale sur la compatibilité déformationnelle des réparations en béton de sable,” Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2018.
- [11] L. Olivier, “La fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton: apports combinés de l’expérimentation et de la modélisation,” Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Université de Laval, Canada, 2001.
- [12] S. Matthews, “CONREPNET: Performance-based approach to the remediation of reinforced concrete structures: Achieving durable repaired concrete structures,” J. Build. Apprais., vol. 3, no. 1, pp. 6–20, Mar. 2007, doi: 10.1057/palgrave.jba.2950063.
- [13] AFNOR, NF EN 1504-1, Produits et systèmes pour la réparation et la protection du béton structures - définitions, exigences, contrôle qualité et évaluation de la conformité. (Décembre 2005).
- [14] A. Pallière, Guide technique, choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton. Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris, France, 1996.

- [15] L. Mailvaganam and N. Mitchell, "Réparations pour la remise en service des ouvrages en béton. Rapport n° 59 de l'Institut de recherche en construction, Publications du conseil national de recherches du Canada, ISSN 1206-1239," 2003.
- [16] J. Cleland and E. Long, "The Pull-off test for concrete patch repairs. *Engrs Structs & Bldgs*," 1997, vol. 122, no. 4, pp. 451-460.
- [17] T. Mauroux, "Impact du séchage sur les propriétés d'adhérence entre un mortier et un support," Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, France, 2011.
- [18] P. H. Emmons and A. M. Vaysburd, "Factors affecting the durability of concrete repair: the contractor's viewpoint," *Constr. Build. Mater.*, vol. 8, no. 1, pp. 5-16, 1994, doi: 10.1016/0950-0618(94)90003-5.
- [19] M. Thomassin, "Propriétés mécaniques et comportement des réparations structurales en béton," Thèse de Doctorat, Université de Laval. Canada, 2010.
- [20] D. . Morgan, "Compatibility of concret repair materials and systems," *Br. Med. Bull.*, vol. 21, no. 2, pp. 100-105, 1995, doi: 10.1093/oxfordjournals.bmb.a070375.
- [21] M. Benzerzour, "Etude expérimentale et numérique du renforcement des tabliers de ponts en béton armé par des rechargements adhérents," Thèse de Doctorat, Université d'Artois et Université de Sherbrooke, Canada, 2004.
- [22] T.-H. Nguen, "Durabilité des réparations à base cimentaire : analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation," Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III- Paul Sabatier, France, 2010.
- [23] B. Bissonnette, "Le fluage en traction : un aspect important de la problématique des réparations minces en béton," Thèse de Doctorat, Université de Laval, Canada, 1996.
- [24] D. Y. Yoo, K. H. Min, J. H. Lee, and Y. S. Yoon, "Shrinkage and cracking of restrained ultra-high-performance fiber-reinforced concrete slabs at early age," *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, no. 04, pp. 357-365, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.097.
- [25] H. Beushausen and M. G. Alexander, "Failure mechanisms and tensile relaxation of bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage," *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 10, pp. 1908-1914, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.05.027.
- [26] V. Sabathier, "Rechargement adhérent à base cimentaire renforcés de fibres métalliques. Condition de leur durabilité, modelisation et calcul.," Thèse de Doctorat, Université Laval et l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, France, 2004.
- [27] R. Ktari, "Mécanismes et modélisations de dégradation et décollement des interfaces de couches de chaussées," Thèse de Doctorat, Université de Limoge, France, 2016.
- [28] S. Roy, "Mesure de l'adhérence et des propriétés mécaniques de couches minces par des essais dérivés de la nanoindentation . Application à la microélectronique et au biomédical.," Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, France, 2008.

- [29] B. Schindel, *Pratique du collage industriel*, Lavoisier. 1992.
- [30] F. Modjabi-Sangnier, “Approche quantitative de la notion de compatibilité des bétons de réparation autoplaçants,” Thèse de Doctorat, Université de Laval, Canada, 2010.
- [31] F. Perez, “Contribution à l’étude du comportement mécanique des éléments bicouches sous sollicitation statiques et cycliques,” Thèse de Doctorat, Université de Laval, Canada, 2005.
- [32] S. Austin, P. Robins, and Y. Pan, “Tensile bond testing of concrete repairs,” *Mater. Struct.*, vol. 28, no. 5, pp. 249–259, 1995, doi: 10.1007/BF02473259.
- [33] L. Courard, J. F. Lenaers, F. Michel, and A. Garbacz, “Saturation level of the superficial zone of concrete and adhesion of repair systems,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 5, pp. 2488–2494, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.076.
- [34] B. Bissonnette, L. Courard, M. Jolin, M. Thomassin, A. Vaysburd, and A. G. Von Fay, “Adhérence des réparations en béton: évaluation et facteurs d’influence,” in *Quinzième édition des Journées Scientifiques adhérence des réparation en béton.*, 2014, p. 12.
- [35] H. Beushausen, B. Höhlig, and M. Talotti, “The influence of substrate moisture preparation on bond strength of concrete overlays and the microstructure of the overlay transition zone,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 92, pp. 84–91, 2017, doi: 10.1016/j.cemconres.2016.11.017.
- [36] H. Beushausen, “The influence of concrete substrate preparation on overlay bond strength,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 62, no. 11, pp. 845–852, 2010, doi: 10.1680/mac.2010.62.11.845.
- [37] A. Espeche and J. León, “Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 3, pp. 1222–1235, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.032.
- [38] D. López-Carreño, P. Pujadas, S. H. P. Cavalaro, and A. Aguado, “Bond strength of whitetoppings and bonded overlays constructed with self-compacting high-performance concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 153, pp. 835–845, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.136.
- [39] D. G. Hepworth, D. M. Bruce, J. F. V. Vincent, and G. Jeronimidis, “Manufacture and mechanical testing of thermosetting natural fibre composites,” *J. Mater. Sci.*, vol. 35, no. 2, pp. 293–298, 2000, doi: 10.1023/A:1004784931875.
- [40] P. O. Olesen and D. V. Plackett, “Perspectives on the performance of natural plant fibres,” in *Natural Fibres Performance Forum*, 1999, p. 7.
- [41] J. Page, “Formulation et caractérisation d’un composite cimentaire biofibré pour des procédés de construction préfabriquée,” Thèse de Doctorat, Université de Caen Normandie, France, 2018.
- [42] C. Baley, *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Techniques de l’ingénieur*, 2004.
- [43] Z. Belouadah, “Contribution à l’étude d’endommagement et du comportement mécanique des matériaux composites renforcés par des fibres végétales existantes

- dans la région du Hodna,” Thèse de Doctorat, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2017.
- [44] R. Ntenga, “Modélisation multi-échelles et caractérisation de l’anisotropie élastique de fibres végétales pour le renforcement de matériaux composites,” Thèse de Doctorat, Université De Blaise Pascal, Clermont, France, 2012.
- [45] T. Nilsson and P. J. Gustafsson, “Influence of dislocations and plasticity on the tensile behaviour of flax and hemp fibres,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 7, pp. 1722–1728, 2007, doi: 10.1016/j.compositesa.2007.01.018.
- [46] P. Faugeras, “Valorisation des fibres lignocellulosiques de la pâte à papier,” Thèse de Doctorat, Université de Limoges et Université du Quebec A Trois-Rivieres, 2012.
- [47] A. N. M. Michel, “Contribution à l’étude de paramètres influençant les propriétés mécaniques de fibres élémentaires de lin : Corrélation avec les propriétés de matériaux composites,” Thèse de Doctorat. Université de Bretagne Sud, France, 2015.
- [48] A. Sbiai, “Materiaux composites a matrice epoxyde chargee par des fibres de palmier dattier : effet de l’oxydation au tempo sur les fibres,” Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2011.
- [49] H. Saad, “Développement de bio-composites à base de fibres végétales et de colles écologiques,” Thèse de Doctorat. Université de Pau et des Pays de l’Adour, France, 2013.
- [50] E. Privas, “Matériaux ligno- cellulosiques «Élaboration et Caractérisation»,” Thèse de Doctorat. Ecole nationale supérieure des mines de Paris, France, 2014.
- [51] M. Karray, “Caractérisation des propriétés mécaniques et électriques des matériaux composites par méthode holographique numérique 3D et analyse diélectrique,” Thèse de Doctorat. Université du Mains, Academie de Nantes, France, 2012.
- [52] M. Dallel, “Evaluation du potentiel textile des fibres d’Alfa (*Stipa Tenacissima* L.) : caractérisation physico-chimique de la fibre au fil,” Thèse de Doctorat, Université de Haute Alsace, France, 2012.
- [53] C. Álvarez, F. M. Reyes-Sosa, and B. Díez, “Enzymatic hydrolysis of biomass from wood,” *Microb. Biotechnol.*, vol. 9, no. 2, pp. 149–156, 2016, doi: 10.1111/1751-7915.12346.
- [54] J. C. Arnold and S. M. Alston, “Life cycle assessment of the production and use of polypropylene tree shelters,” *J. Environ. Manage.*, vol. 94, no. 1, pp. 1–12, 2012, doi: 10.1016/j.jenvman.2011.09.005.
- [55] S. D. Sharma and G. Singh, “Enantioseparation of Efavirenz by Ultra Performance Liquid Chromatography,” *Adv. in Anal. Chem.*, vol. 3, no. 3, pp. 29–33, 2013, doi: 10.5923/j.aac.20130303.02.
- [56] M. J. John and S. Thomas, “Biofibres and biocomposites,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 71, no. 3, pp. 343–364, 2008, doi: 10.1016/j.carbpol.2007.05.040.
- [57] M. Ragoubi, “Contribution à l’amélioration de la compatibilité interfaciale fibres

- naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne,” Thèse de Doctorat. Université Henri Poincaré Nancy 1, France, 2010.
- [58] V. Vi and D. Thi, “Matériaux composites à fibres naturelles / polymère biodégradables ou non,” Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, France, 2011.
- [59] M. R. KHELIFA, “Formulation et caractérisation d'éco-bétons renforcés aux fibres d'alfa pour des bâtiments verts et durables Soutenue,” Thèse de Doctorat. Université Ferhat Abbas, Sétif 1 et Université de Cergy-Pontoise, France, 2017.
- [60] S. Thiebaud, “Valorisation chimique de composés lignocellulosiques : obtention de nouveaux matériaux,” Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse. France, 1995.
- [61] D. Sedan, “Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite,” Thèse de Doctorat, Université de Limoge, France, 2007.
- [62] A. Bledzki and J. Gassan, “Composites reinforced with cellulose,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 24, pp. 221–274, 1999.
- [63] R. Chaari, M. Khlif, H. Mallek, C. Bradai, C. Lacoste, and H. Belguith, “Enzymatic treatments effect on the poly (butylene succinate)/date palm fibers properties for bio-composite applications,” *Ind. Crop. Prod.*, vol. 148, pp. 112–270, 2020, doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112270.
- [64] P. Sai ShraavanKumar and K. Viswanath Allamraju, “A review of natural fiber composites [Jute, Sisal, Kenaf],” *Mater. Today Proc.*, vol. 18, pp. 2556–2562, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.113.
- [65] A. G. Adeniyi, D. V. Onifade, J. O. Ighalo, and A. S. Adeoye, “A review of coir fiber reinforced polymer composites,” *Compos. Part B*, vol. 176, no. August, p. 107305, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107305.
- [66] B. Pejic, M. Vukcevic, M. Kostic, and P. Skundric, “Biosorption of heavy metal ions from aqueous solutions by short hemp fibers: Effect of chemical composition,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 164, no. 1, pp. 146–153, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.07.139.
- [67] R. Badrinath and T. Senthilvelan, “Comparative Investigation on Mechanical Properties of Banana and Sisal Reinforced Polymer based Composites,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 5, pp. 2263–2272, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.444.
- [68] A. K. M. Nayab-Ul-Hossain, S. K. Sela, M. N. Hassan, and A. Sarkar, “Surface modification of ligno-cellulosic fiber (jute) to increase electrical conductivity,” *Mater. Lett. X*, vol. 5, p. 100036, 2020, doi: 10.1016/j.mlblux.2019.100036.
- [69] A. Thuault, “Approche multi-échelle de la structure et du comportement mécanique de la fibre de lin multiscale approach of the structure ...,” Thèse de Doctorat, Université de Caen Basse Normandie, France, 2015. doi: 10.13140/RG.2.1.1492.8085.
- [70] B. Bouiri and M. Amrani, “Elemental chlorine-free bleaching halfa pulp,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 16, no. 4, pp. 587–592, 2010, doi: 10.1016/j.jiec.2010.03.015.
- [71] A. Achour, “Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles :

- valorisation des plantes locales,” Thèse de Doctorat Université Aboubakr Belkaïd, AlgérieTlemcen, 2017.
- [72] A. Beukers, *The inevitable renaissance of minimum energy structures*, Lightness. 1999.
- [73] S. Abani, F. Hafsi, A. Kriker, and A. Bali, “Valorisation of Date Palm Fibres in Sahara Constructions,” *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 289–293, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.608.
- [74] A. Kriker, “Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec,” Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2005.
- [75] A. Sellami, “Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (le diss) : Caractérisation, Durabilité et Application au cas de la maçonnerie Préside,” Thèse de Doctorat, Université de Baji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2015.
- [76] A. Chehma, “Estimation du tonnage et valeur alimentaire des sous produits du palmier dattier chez les ovins,” *Rech. Agron.*, vol. 7, no. 10, pp. 7–15.
- [77] M. Tlijani, “Contribution à la caractérisation thermo physique de matériaux bio isolants : Valorisation des déchets de bois de palmier,” Thèse de Doctorat, Université de Paris-est, France, 2017.
- [78] A. D. Meraneh, “Détermination du sexe chez le palmier dattier : Approches histocytologiques et moléculaires,” Thèse de doctorat Université de Montpellier II, 2010.
- [79] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, and M. Fois, “Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 2–3, pp. 491–497, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.10.014.
- [80] A. Djoudi, M. Mouldi.Khenfer, and A. Bali, “Etude d’un nouveau composite en plâtre renforcé avec les fibres végétale du palmier dattier,” in *1st international conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries*, ENSET Oran, Algérie, 2009.
- [81] A. Oushabi, S. Sair, Y. Abboud, O. Tanane, and A. El Bouari, “Natural thermal-insulation materials composed of renewable resources: Characterization of local date palm fibers (LDPF),” *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 6, no. 12, pp. 3395–3402, 2015.
- [82] A. Kriker, G. Debicki, A. Bali, M. M. Khenfer, and M. Chabannet, “Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 5, pp. 554–564, 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.015.
- [83] S. Bouzouaid, “Contribution à la modélisation numérique des bétons de fibre en flexion,” Thèse de Doctorat , Université de Kasdi Merbah Ourgla, Algérie, 2018.
- [84] B. Rekha and B. NagarajaGanesh, “X-ray Diffraction: An Efficient Method to Determine Microfibrillar Angle of Dry and Matured Cellulosic Fibers,” *J. Nat. Fibers*, vol. 19, no. 10, pp. 3689–3696, 2022, doi: 10.1080/15440478.2020.1848720.

- [85] S. Fadlaoui, "Application de la technique de modélisation de l'architecture du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) pour la caractérisation des cultivars.," Thèse de Magister, Université de Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2016.
- [86] T. Le Hoang, "Etude de caractérisation du comportement de composites cimentaires incorporant des fibres courtes de lin," Thèse de Doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, Caen, France, 2013.
- [87] A. Kenai, M. Rezagui, W. Yahiaoui, B. Menadi, and S. Kenai, "Performance of Repair Mortar with Natural Fibers," *MRS Adv.*, vol. 5, no. 25, pp. 1295–1304, doi: 10.1557/adv.2020.178.
- [88] D. Sedan, C. Pagnoux, A. Smith, and T. Chotard, "Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 28, no. 1, pp. 183–192, 2008, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2007.05.019.
- [89] H. Qi, P. A. Cooper, and H. Wan, "Effect of carbon dioxide injection on production of wood cement composites from waste medium density fiberboard (MDF)," *Waste Manag.*, vol. 26, no. 5, pp. 509–515, 2006, doi: 10.1016/j.wasman.2005.04.010.
- [90] M. A. Aziz, P. Paramasivam, and S. L. Lee, "Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction," *Int. J. Cem. Compos. Light. Concr.*, vol. 3, no. 2, pp. 123–132, 1981, doi: 10.1016/0262-5075(81)90006-3.
- [91] X. Xie, Z. Zhou, M. Jiang, X. Xu, Z. Wang, and D. Hui, "Cellulosic fibers from rice straw and bamboo used as reinforcement of cement-based composites for remarkably improving mechanical properties," *Compos. Part B Eng.*, vol. 78, pp. 153–161, 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.03.086.
- [92] E. T. Dawood and M. Ramli, "Development of high strength flowable mortar with hybrid fiber," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 6, pp. 1043–1050, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.11.013.
- [93] S. Chafei, "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.
- [94] M. Khorami and E. Ganjian, "Comparing flexural behaviour of fibre-cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 9, pp. 3661–3667, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.052.
- [95] W. H. Kwan, M. Ramli, and C. B. Cheah, "Flexural strength and impact resistance study of fibre reinforced concrete in simulated aggressive environment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 63, pp. 62–71, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.004.
- [96] J. M. L. Reis, "Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 9, pp. 673–678, 2006, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.02.008.
- [97] S. Ajouguim, J. Page, C. Djelal, M. Waqif, and L. Saâdi, "Investigation on the use of grinded alfa fibres as reinforcement of cement mortars," *Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater.*, vol. 174, no. 3, pp. 161–171, 2021, doi: 10.1680/jcoma.20.00001.
- [98] B. Krobba, M. Bouhicha, S. Kenai, and L. Courard, "Formulation of low cost eco-repair mortar based on dune sand and *Stipa tenacissima* microfibers plant," *Constr.*

- Build. Mater., vol. 171, p. 10, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.200.
- [99] B. Çomak, A. Bideci, and Ö. Salli Bideci, “Effects of hemp fibers on characteristics of cement based mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 169, pp. 794–799, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.029.
- [100] 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, pp. 98–104, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.032.
- [101] S. Jaballi, I. Miraoui, and H. Hassis, “Optimization of flexural strength and thermal conductivity of mortar reinforced with alfa fibers,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 799–800, pp. 794–799, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.799-800.794.
- [102] P. Lertwattanakruk and A. Suntijitto, “Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 664–669, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.154.
- [103] M. T. Marvila, A. R. G. Azevedo, and Cecchin, “Durability of coating mortars containing açai fibers,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 13, 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00406.
- [104] A. Kareche, B. Agoudjil, B. Haba, and A. Boudenne, “Study on the durability of new construction materials based on mortar reinforced with date palm fibers wastes,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 11, no. 7, pp. 3801–3809, 2020, doi: 10.1007/s12649-019-00669-y.
- [105] E. Booya, H. Ghaednia, S. Das, and H. Pande, “Durability of cementitious materials reinforced with various Kraft pulp fibers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 191, pp. 1191–1200, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.139.
- [106] M. Ramli, W. H. Kwan, and N. F. Abas, “Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 554–566, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.002.
- [107] B. J. Mohr, J. J. Biernacki, and K. E. Kurtis, “Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 11, pp. 1531–1543, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.08.001.
- [108] R. Toledo Filho, K. Ghavami, G. L. England, and K. Scrivener, “Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability,” *Food Sci. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 185–196, 2003, doi: 10.1590/1678-457x.00717.
- [109] L. C. Roma, L. S. Martello, and H. Savastano, “Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 4, pp. 668–674, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.10.001.
- [110] R. M. De Gutiérrez, L. N. Díaz, and S. Delvasto, “Effect of pozzolans on the performance of fiber-reinforced mortars,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 5, pp. 593–598, 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.010.
- [111] S. Bouzouita, “Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites,” Thèse de

Doctorat, École Centrale de Lyon, France, 2011.

- [112] K. Borchani, “Développement d ’un composite à base d ’un polymère biodégradable et de fibres extraites de la plante d ’ Alfa,” Thèse de Doctorat, École Nationale d’Ingénieurs de Sfax, Tunisie, 2018.
- [113] M. Le Troedec, “Caractérisation des interactions physico-chimiques dans un matériau composite à base de phyllosilicates , de chaux et de fibres cellulosiques,” 2009.
- [114] V. Nozahic and S. Amziane, “Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, no. 11, pp. 1837–1849, 2012, doi: 10.1016/j.compositesa.2012.07.011.
- [115] A. Sellami, M. Merzoud, and S. Amziane, “Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1117–1124, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.073.
- [116] C. Sawsen, K. Fouzia, B. Mohamed, and G. Moussa, “Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 229–235, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.091.
- [117] T. Ali-Boucetta, A. Ayat, W. Laifa, and M. Behim, “Treatment of date palm fibres mesh: Influence on the rheological and mechanical properties of fibre-cement composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 273, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121056.
- [118] M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona, “Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 7, pp. 2883–2892, 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.04.053.
- [119] S. Mouhoubi, H. Osmani, T. Bali, and S. Abdeslam, “Elaboration et etude des proprietes des composites polyester/alfa traitee et non traitee,” *Verres, Céramiques Compos.*, vol. 2, no. 1, pp. 34–40, 2012.
- [120] A. Alawar, A. M. Hamed, and K. Al-Kaabi, “Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 40, no. 7, pp. 601–606, 2009, doi: 10.1016/j.compositesb.2009.04.018.
- [121] P. Saha, S. Manna, S. R. Chowdhury, R. Sen, D. Roy, and B. Adhikari, “Enhancement of tensile strength of lignocellulosic jute fibers by alkali-steam treatment,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 9, pp. 3182–3187, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.010.
- [122] A. Shalwan and B. F. Yousif, “Investigation on interfacial adhesion of date palm/epoxy using fragmentation technique,” *Mater. Des.*, vol. 53, no. July, pp. 928–937, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.07.083.
- [123] G. Raj, E. Balnois, C. Baley, and Y. Grohens, “Role of polysaccharides on mechanical and adhesion properties of flax fibres in flax/PLA biocomposite,” *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2011, p. 11, 2011, doi: 10.1155/2011/503940.
- [124] R. Agrawal, N. S. Saxena, K. B. Sharma, S. Thomas, and M. S. Sreekala, “Activation energy and crystallization kinetics of untreated and treated oil palm

- fibres reinforced phenol formaldehyde composites,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 277, no. 1–2, pp. 77–82, 2000, doi: 10.1016/S0921-5093(99)00556-0.
- [125] K. L. Pickering, A. Abdalla, C. Ji, A. G. McDonald, and R. A. Franich, “The effect of silane coupling agents on radiata pine fibre for use in thermoplastic matrix composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 10, pp. 915–926, 2003, doi: 10.1016/S1359-835X(03)00234-3.
- [126] X. Li, G. Tabil, and S. Panigrahi, “Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review,” *J. Polym. Environ.*, vol. 15, no. 1, pp. 25–33, 2007, doi: 10.1007/s10924-006-0042-3.
- [127] S. Kalia, B. S. Kaith, and N. Kaur, “Pretreatments of Natural Fibers and their Application as Reinforcing Material in Polymer Composites—A Review,” *Polym. Eng. Sci.*, p. 20, 2009, doi: 10.1002/pen.
- [128] L. Segal, J. J. Creely, A. E. Martin, and C. M. Conrad, “An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-Ray diffractometer,” *Text. Res. J.*, vol. 29, no. 10, pp. 786–794, 1959, doi: 10.1177/004051755902901003.
- [129] AFNOR, NF EN 1015-3, Méthodes d’essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses), (Octobre 1999).
- [130] AFNOR, NF P18-452, Mesure du temps d’écoulement des bétons et des mortiers au maniabilimètre, (Février 2017).
- [131] AFNOR, NF EN 1015-6, Méthodes d’essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 6 : Détermination de la masse volumique apparente du mortier frais, (Octobre 1999).
- [132] AFNOR, NF EN 413-2, Ciment à maçonner - Partie 2 : méthodes d’essai, (Mars 2017).
- [133] AFNOR, NF EN 196-1, Méthodes d’essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances, (septembre 2016).
- [134] ASTM C1585 – 11, Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic- cement concretes, (2012).
- [135] “AFNOR, NF P18-459, Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique, (Août 2022).”.
- [136] AFNOR, NF EN 993-15, Méthodes d’essai pour produits réfractaires façonnés denses - Partie 15 : détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle), (Octobre 2005).
- [137] Dreux G., Festa J., Nouveau guide du béton et de ses constituants, Huitième édition, Eyrolles, France, 1998.
- [138] AFNOR, NF EN 12350-2, Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d’affaissement, (Juin 2019).
- [139] AFNOR, NF EN 1542, Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d’essais - Mesurage de l’adhérence par traction directe. (juillet 1999).

- [140] ASTM C882, Standard test method for bond strength of Epoxy-Resin systems used with concrete by slant shear, (2020).
- [141] ASTM C1202 – 12, Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, (2017).
- [142] M. N. K. Chowdhury, M. D. H. Beg, M. R. Khan, and M. F. Mina, "Modification of oil palm empty fruit bunch fibers by nanoparticle impregnation and alkali treatment," *Cellulose*, vol. 20, no. 3, pp. 1477–1490, 2013, doi: 10.1007/s10570-013-9921-7.
- [143] S. Indran, R. Edwin Raj, and V. S. Sreenivasan, "Characterization of new natural cellulosic fiber from *Cissus quadrangularis* root," *Carbohydr. Polym.*, vol. 110, pp. 423–429, 2014, doi: 10.1016/j.carbpol.2014.04.051.
- [144] V. Fiore, T. Scalici, and A. Valenza, "Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax* L. as potential reinforcement of polymer composites," *Carbohydr. Polym.*, vol. 106, no. 1, pp. 77–83, 2014, doi: 10.1016/j.carbpol.2014.02.016.
- [145] K. R. J. Sheeba et al., "Physico-chemical and extraction properties on alkali-treated *Acacia pennata* fiber," *Environ. Res.*, vol. 233, p. 116415, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.116415.
- [146] S. Hemsri, K. Grieco, A. D. Asandei, and R. S. Parnas, "Wheat gluten composites reinforced with coconut fiber," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, no. 7, pp. 1160–1168, 2012, doi: 10.1016/j.compositesa.2012.02.011.
- [147] 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.
- [148] T. Ali-Boucetta, A. Ayat, W. Laifa, and M. Behim, "Treatment of date palm fibres mesh: Influence on the rheological and mechanical properties of fibre-cement composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 273, p. 121056, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121056.
- [149] J. Page, F. Khadraoui, M. Gomina, and M. Boutouil, "Influence of different surface treatments on the water absorption capacity of flax fibres: Rheology of fresh reinforced-mortars and mechanical properties in the hardened state," *Constr. Build. Mater.*, vol. 199, pp. 424–434, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.042.
- [150] J. Page, F. Khadraoui, M. Boutouil, and M. Gomina, "Multi-physical properties of a structural concrete incorporating short flax fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 140, pp. 344–353, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.124.
- [151] K. H. Mo, C. S. Bong, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat, and S. P. Yap, "Thermal conductivity, compressive and residual strength evaluation of polymer fibre-reinforced high volume palm oil fuel ash blended mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 130, pp. 113–121, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.005.
- [152] S. Benaniba, Z. Driss, M. Djendel, E. Raouache, and R. Boubaaya, "Thermo-mechanical characterization of a bio-composite mortar reinforced with date palm fiber," *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 15, p. 155892502094823, Jan. 2020, doi: 10.1177/1558925020948234.
- [153] N. M. F. Aljalawi, "Effect of sustainable palm fiber on high strength concrete

- properties,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 518, no. 2, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/518/2/022004.
- [154] S. Hammat, B. Menadi, S. Kenai, C. Thomas, M. S. Kirgiz, and A. G. de Sousa galdino, “The effect of content and fineness of natural pozzolana on the rheological, mechanical, and durability properties of self-compacting mortar,” *J. Build. Eng.*, vol. 44, no. 10, p. 103276, 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103276.
- [155] M. Boumhaout, L. Boukhattem, H. Hamdi, B. Benhamou, and F. Ait Nouh, “Thermo-mechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 135, pp. 241–250, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.217.
- [156] Y. Ibrahim, M. Adamu, M. Marouf, O. Shabbir Ahmed, Q. Dermosh, and M. Malik, “Mechanical Performance of Date-Palm-Fiber-Reinforced Concrete Containing Silica Fume,” *Prop. Concr.*, vol. 12, pp. 666–674, 2022.
- [157] M. N. Aziez and A. Achour, “Physical and mechanical properties of cement-based mortars reinforced with treated date palm fibres,” 2023, no. August.
- [158] B. Haba, B. Agoudjil, A. Boudenne, and K. Benzarti, “Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 963–971, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.025.
- [159] S. Ajouguim, M. Stefanidou, K. Abdelouahdi, M. Waqif, and L. Saâdi, “Influence of treated bio-fibers on the mechanical and physical properties of cement mortars,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 8, pp. 3120–3135, 2022, doi: 10.1080/19648189.2020.1782773.
- [160] O. Almuwbbber, R. Haldenwang, W. Mbasha, and I. Masalova, “The influence of variation in cement characteristics on workability and strength of SCC with fly ash and slag additions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 160, pp. 258–267, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.039.
- [161] M. Boutarfa, R. Belouettar, and A. Makradi, “Comparative Study of Cement Mortar Reinforced with Vegetable Fibers Alfa , Date Palm and Diss: Mechanical Properties and Shrinkage,” *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 9, no. 8, pp. 2304–2314, 2018.
- [162] F. M. Al oqla and S. M. Sapuan, “Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications : feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry,” *J. Clean. Prod.*, vol. 66, pp. 347–354, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.10.050.
- [163] C. Jiang, S. Huang, Y. Zhu, Y. Lin, and D. Chen, “Effect of polypropylene and basalt fiber on the behavior of mortars for repair applications,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2016, pp. 14–16, 2016, doi: 10.1155/2016/5927609.
- [164] AFNOR, NF EN 1766, Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d’essai - Bétons de référence pour essais, (avril 2017).
- [165] 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.

- [166] ASTM C1583M-13, Standard test method for tensile strength of concrete surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (Pull-off method), (2020).
- [167] C. Ozyildirim and M. Sprinkel, “Evaluation of high performance concrete overlays placed on route 60 over lynnhaven inlet in virginia,” Virginia Transp. Res. Council. Charlottesville, Virginia, 2000.
- [168] Y. Guo, X. Hu, and J. Lv, “Experimental study on the resistance of basalt fibre-reinforced concrete to chloride penetration,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 223, pp. 142–155, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.211.
- [169] W. Yahiaoui, S. Kenai, B. Menadi, and E. H. Kadri, “Durability of self compacted concrete containing slag in hot climate,” *Adv. Concr. Constr.*, vol. 5, no. 3, pp. 271–288, 2017, doi: 10.12989/acc.2017.5.3.271.
- [170] R. D. Toledo Filho, F. de A. Silva, E. M. R. Fairbairn, and J. de A. M. Filho, “Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 2409–2420, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.10.012.
- [171] M. E. A. Fidelis, R. D. Toledo Filho, F. de A. Silva, V. Mechtcherine, M. Butler, and S. Hempel, “The effect of accelerated aging on the interface of jute textile reinforced concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 74, pp. 7–15, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.09.002.