

Transformation du vieux bâti en terre vers les constructions en terre de haute performance

Pr. Haouine Abdelmadjid

Université de Béchar, Département de Génie-civil, Algérie

Keywords

Architecture de terre,
Ksour,
Adobe,
Chaux,
Fibres de dattier,
Performance
mécanique

Abstract

Le sud algérien dispose d'une très grande richesse en monuments historiques distingués par des constructions en terre à l'exemple des Ksour. Les villes sahariennes étaient à l'époque totalement bâties en terre et conservent une grande richesse culturelle et sociale. La technique de construction de ce type de bâti fait, actuellement, l'objet de recherche de plusieurs laboratoires à l'instar du laboratoire Archipel dans lequel a été effectuée cette étude. Les projets de restauration lancés par l'état algérien depuis 1998 peinent à se concrétiser sur le terrain, le défi étant une maîtrise du savoir-faire local en termes de construction en terre et une augmentation des performances des matériaux en terre et notamment l'adobe. A travers des essais normalisés en laboratoire que nous avons initiés dans l'unité de recherche Archipel, nous avons pu identifier les caractéristiques physico-chimiques de l'adobe et ses performances ainsi que les effets des stabilisants comme le liant chaux et les additifs naturels tels que la fibre du palmier dattier dans l'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques de l'adobe.

1. Introduction

Le sud algérien dispose d'une très grande richesse en monuments historiques distingués par des constructions en terre à l'instar des Ksour. Les villes sahariennes étaient à l'époque en quasi-totalité bâties en terre et conservent une grande richesse culturelle et sociale. La technique de construction de ce type de bâti fait, actuellement, l'objet de recherche de plusieurs entités de recherche.

L'état d'endommagement du site historique en état de ruine, malgré son importance patrimoniale, nécessite un entretien (restauration et rénovation des Ksour) opération lancée en 1998 par l'état algérien pour la restauration des Ksour du sud classés dans la liste générale des Biens Culturels Protégés (Ministère de la Culture, 2007).

Entre une intervention à caractère traditionnel nécessitant le traitement des fissures, la réparation de l'endommagement des éléments du bâti et la nécessité d'un entretien périodique, l'opération à l'heure actuelle s'avère difficile à réaliser.

Au niveau du laboratoire de recherche Archipel (Université de Béchar), nous avons prévu une campagne d'essais expérimentaux pour identifier les caractéristiques de l'adobe ainsi que ses propres performances physiques et mécaniques. Une démarche qui allie un savoir-faire traditionnel et des essais normalisés au niveau du laboratoire ou même in-situ.

2. La pathologie des constructions en terre crue

Suite à plusieurs visites sur les sites des Ksour au sud de l'Algérie, dont lesquels nous avons pu faire pour des diagnostics spéciaux ; je cite les Ksour du Nord de Bechar (Lahmar, Boukais et Mougheul), Béni-Ounif, Taghit, El Ouata, Beni Abbés, Kerzaz, Timimoun, etc..., ainsi qu'au niveau du centre Ain Madhi, et enfin au

niveau de l'Est : Biskra (M'chouneche), Ouargla, Temacine, Djanet (Eahil, Zelouaze, Mihane), les pathologies présentes dans le bâti en terre, peuvent être classées en plusieurs familles :

- -les dégradations superficielles;
- -les déformations;
- -les fissurations;
- -les dégradations d'ordre structurel.



Figure 1. Etat de dégradation du bâti dans les Ksour.

3. L'eau, composite indispensable et agressive

Bien que l'eau se trouve agent indispensable dans la composition des constructions et ceux dans toutes les catégories, elle reste aussi un facteur dangereusement agressif, car la majorité des dégradations sont issues de la variation du comportement physique et mécanique de l'eau. Notant que les précipitations forment le grand danger principal à ce type de construction. Les précipitations à long terme et successives, provoquent des fissures, ouvrent des creusements et fragilisent par conséquent les structures bâties.

4. Programme d'étude

Les essais d'analyse et de caractérisation des matériaux de construction, programmés dans cette étude, consistent en essais d'analyse physique :

- Granulométrie,
- Sédimentométrie
- Limites d'Atterberg
- Proctor et CBR
- Densité sèche et teneur en eau

Les essais d'analyse chimique sont aussi prévus dans ce programme mais seulement pour confirmer l'usage de la terre dans le domaine de construction sans qu'il y ait de risque ou agression chimique à son environnement.

Par la suite une série d'essais mécaniques a été programmée pour exprimer la résistance à la compression et la traction de l'adobe. Dans cette phase une série de compositions différentes a été réalisée afin d'optimiser la composition idéale pour une résistance mécanique maximale. Le paramétrage était sur le dosage, en stabilisant la chaux.

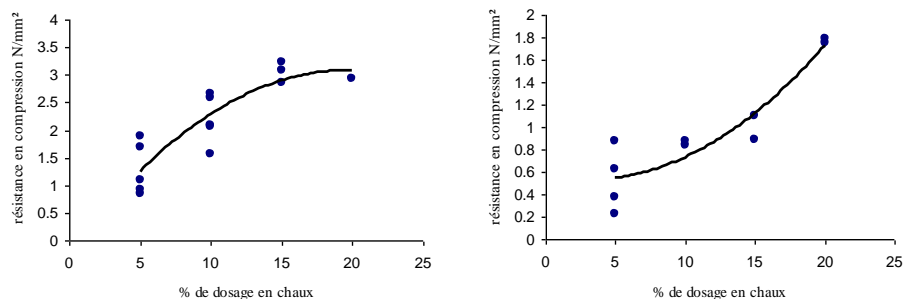


Figure 2. Evolution de la résistance mécanique selon le dosage en chaux

L'accroissement de la résistance mécanique en compression aussi en traction se manifeste par l'ajout d'un stabilisant principal, le liant destiné au préalable à stabiliser le matériau béton de terre. Cependant la grande résistance en compression n'a pas été du tout estimée car il s'agit d'une structure autoportante sans aucune élévation dépassant plus de 5m.

L'analyse des résultats obtenus, nous a permis de choisir les éprouvettes à un dosage de 15 % en chaux, ce choix est motivé par la comparaison des résultats de cette étude, de la tradition constructive de la région ainsi que du coût de l'opération de stabilisation qui peut être très onéreux en dépassant ce pourcentage. A noter que l'application de la chaux en forme liquide « en lait de chaux » est vivement recommandé.

5. Matériaux de construction et additifs disponibles sur site

Dans la perspective d'améliorer les qualités physiques et mécaniques de l'adobe, nous avons introduit des additifs à la composition standard en faisant varier leur dosage et effectuer des tests expérimentaux nous permettant d'opter pour une composition optimale satisfaisant à des critères importants dans l'usage des constructions en terre.

Les éléments suivants issus du périmètre local du KSAR, seront désormais considérés dans cet article comme matériau de construction. Nous citerons à titre d'exemple :

- Fibre végétale du Palmier dattier, copeaux de bois
- Matériau terre (argile, sable, calcaire, Gypse, etc...)
- Pouzzolane,
- Méta-kaolin, Etc

6. La fibre du palmier dattier : un MDC

Les fibres végétales sont classées en cinq groupes : Elles peuvent provenir des graines (poils séminaux), de la tige ou du tronc (fibres libériennes), des fruits (enveloppe), ou bien encore des feuilles (Fig. 3).

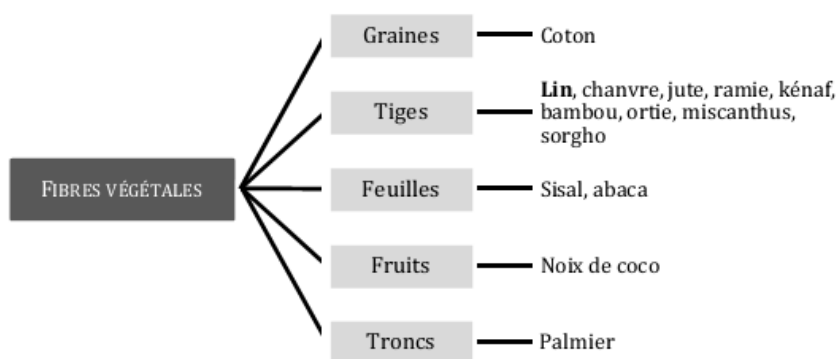


Figure 3. Classification des fibres végétales (Ngo, 2017) .

Le programme expérimental mené dans un début était sur l'usage directe de la fibre du palmier dattier, qui se caractérise par sa composition principale cellulosique. Néanmoins son utilisation nécessite un traitement spécial pour l'introduire dans une composition contenant le ciment ou la chaux.



Figure 4. La microstructure de la fibre de palmier dattier est illustrée d'après le microscope électronique (MEB).

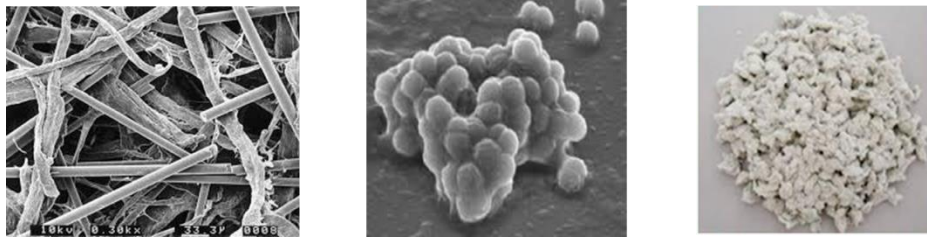


Figure 5. (a) fibres de cellulose, (b) hémicellulose et (c) lignine (Brahimi , 2016)

- La cellulose : C'est la principale composante des fibres végétales. C'est un polymère naturel du premier plan. Généralement, les fibres végétales sont constituées par une chaîne de fibres en cellulose.
- L'hémicellulose : L'hémicellulose présente dans toutes les parois de ces fibres, est un polysaccharide à chaîne courte ramifié et replié sur elle-même. Il s'agit du constituant responsable de l'élasticité des fibres et permet aux parois de s'allonger pendant la croissance.
- La lignine : Ayant une structure complexe à trois dimensions, formée d'unités de phénylethane liées de différentes manières, la lignine et l'hémicellulose, composés amorphes, assurent le maintien de la liaison entre les unités de cellulose, qui sont partiellement cristallisées.

Le tableau suivant présente la composition chimique de la fibre de palmier (Brahimi , 2016).

Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)	Graisses (%)
32-35,8	24,4-28,1	26,7- 28,7	7

Tableau 1. Composition chimique de la fibre

a. Comportement mécanique de la fibre

Afin d'assurer son adaptation mécanique dans le milieu sollicité par les différents types de chargement mécaniques, les fibres seules doivent subir des tests mécaniques pour définir leurs propres caractéristiques de résistance en traction.

b. L'essai de traction

L'essai expérimental destiné aux fibres, nécessite un appareillage spécial et différent à celui des barres d'aciers. Sur le même principe une presse universelle a été mise en place au niveau du laboratoire ARCHIPEL dont la capacité de charge de 6 tonnes et contrôle automatique de charge de traction et de compression avec une acquisition directe des mesures sur une base de données numériques. Ce test est indispensable pour les fibres afin d'assurer leurs fonction de continuité des charges avec la matrice dans laquelle elle est introduite.

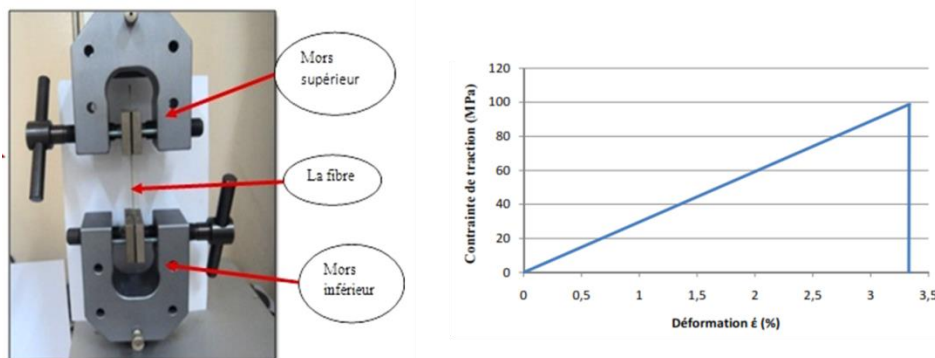


Figure 6. La forme de la presse et l'essai de traction sur une fibre.

c. Traitements des fibres

Nous avons bien précisé dans notre introduction à l'usage des fibres que le milieu dont la présence des stabilisant (chaux et ciment) serait directement agressif aux fibres vu leur nature cellulosique, et donc on procède à l'un des traitements pour éviter cette nature d'agressivité thermique et acide.

- Traitement par immersion dans l'eau
- Traitement par hornification
- Traitement par autoclave
- Traitement par Argile
- Traitement chimique

Ce dernier se fait par l'immersion de ces fibres dans des solutions d'hydroxyde de Sodium (NaOH) avec une variété de concentration durant une heure sous une source de température de 100°C, ensuite lavées pour éliminer l'excès de (NaOH). Ensuite les fibres sont séchées à l'air libre.

d. Essai d'arrachement direct (pull-out test)

Dans l'objectif de bon fonctionnement des fibres dans la matrice béton, on procède à des tests d'adhérence montrant jusqu'à quel niveau les fibres végétales peuvent assurer la continuité mécanique avec la matrice béton vis-à-vis des forces extérieures. Il s'agit de l'essai PULL-OUT qu'on avait adaptée sur la presse de 6T (Figure 7). En conséquence la liaison d'adhérence peut être exprimée mécaniquement selon la force maximale d'arrachement de la fibre.

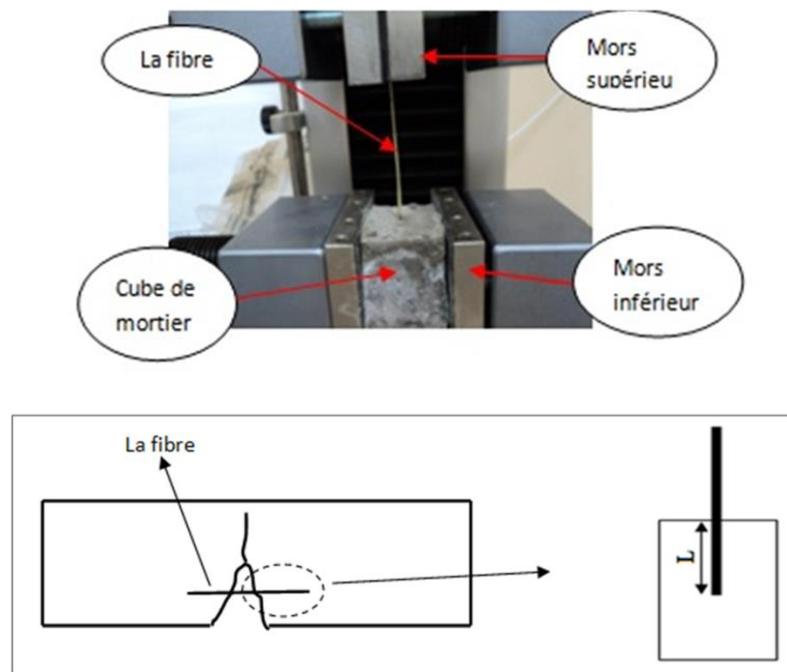


Figure 7. Essai d'arrachement direct dans les blocs de BTS

Les résultats des tests effectués, nous avons pu confirmer l'utilisation des fibres dans la composition du béton de terre sans obstruction. Par la suite, une série de composition à dosage en fibre variant pour définir le seuil de son utilisation dans la composition.

7. La fibre du palmier dattier : un MDC

Le béton de terre stabilisé a beaucoup besoin d'être traité en matière de durabilité qu'en résistance

a. La perméabilité et la porosité

La porosité et la perméabilité sont les deux indicateurs principaux de la durabilité les plus fréquents dans les programmes de recherche car, à partir de ces deux paramètres elles déterminent le degré de protection des matériaux contre les agressions externes en matière d'infiltration (Lafhaj 2006).

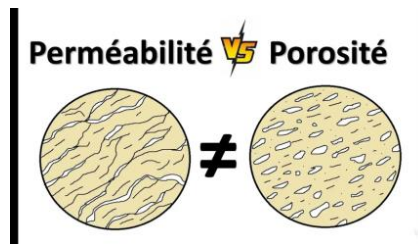


Figure 8. Perméabilité / porosité dans les BTS

b. L'essai de l'absorption d'eau

L'absorption est l'acteur principal dans la définition de la perméabilité, son influence est fortement considérée sur la résistance et à la durabilité des BTS, où plus le béton de terre est compact, plus sa capacité d'absorption est faible, plus il est imperméable à l'eau. Selon la norme (BS 3921 1985), la procédure nécessite de faire un séchage dans un four à température de 115 ° C jusqu' à une masse constante, ensuite l'échantillon est immergé dans un réservoir monocouche immédiatement afin que l'eau puisse circuler librement sur tous les côtés et au fond de l'échantillon. Après 24 heures, l'échantillon est essuyé de l'eau superficielle et pesé dans les 2 minutes suivant son retrait du réservoir d'eau.

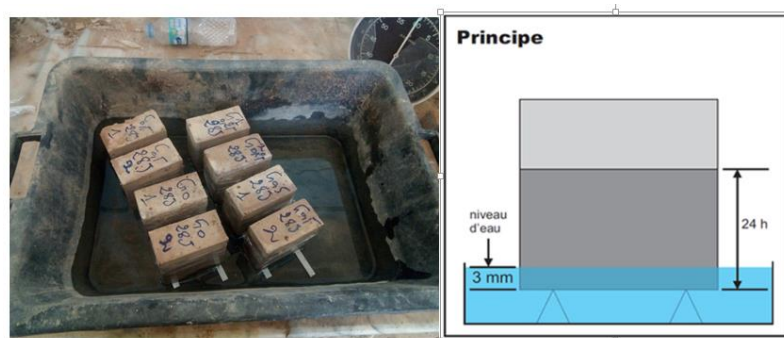


Figure 9. Essai de l'absorption de l'eau

L'expérience d'absorption d'eau est basée sur la loi suivante :

$$\text{Abs}(\%) = ((\text{Ph} - \text{Ps}) / \text{Ps}) \times 100$$

Où: Abs = absorption totale d'eau (%)

Ph = masse humide (g)

Ps = masse sèche (g)

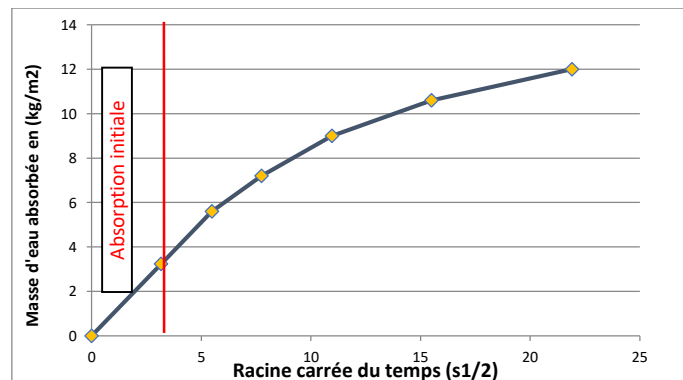


Figure 10. L'expérience d'absorption de l'eau dans les BTS

- L'ajout de fibres au béton provoque des vides dans la matrice du BTS.
 - L'addition de fibres dans BTS augmente l'évaporation de l'eau et donc plus d'absorption totale à l'eau, ce qui signifie l'augmentation de la porosité totale ouverte.
- Avec l'ajout des fibres, le pourcentage des pores connectés augmente et donc la valeur d'absorption initiale de l'eau aussi augmente.

c. Le phénomène d'érosion dans les BTS

L'érosion est le processus de dégradation superficielle et de transformation du matériau terre, et donc des sols, roches, qui est causé par tout agent externe. L'érosion agit à différents rythmes et peut, sur plusieurs dizaines de millions d'années, araser des montagnes,

La désagrégation mécanique se produit sous l'action d'une force physique qui arrache des morceaux de grains plus ou moins volumineux :

- Eclatement dû au gel ou à la chaleur ;
- Usure par frottement : glacier, écoulement d'eau

Elle est mécanique et chimique, avec comme principales altérations : l'hydroclastie, l'effet splash (impact des gouttes d'eau qui tombent sur le matériau).

Le phénomène d'érosion peut être défini expérimentalement sur le matériau terre par plusieurs essais. Nous citerons les plus développés et avancent des informations par des moyens simples et accessibles aux chercheurs.

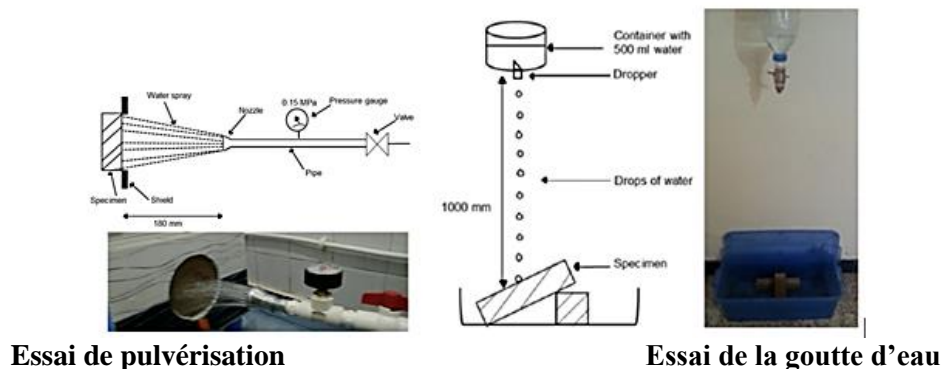


Figure 11. Phénomène d'érosion dans les BTS

L'ajout des stabilisants chaux et ciment dans les blocs de terre fait augmenter la densité apparente, alors que l'inclusion des fibres de palmier dattier a un effet indésirable et contribuent à la réduction aussi du poids de la structure,

d. Le phénomène de retrait et fluage du BTS:

- **essai fluage du BTS**

L'appareil œdomètre est destiné au chargement permettant la réalisation des charges de compression verticale sans qu'il y ait de déformations ou de développement de contraintes sur le reste des axe.



Figure 11. Essai Fluage du BTS

- essai retrait du BTS

Comme tout matériau poreux, le béton de terre peut subir un phénomène de retrait. En l'occurrence, ce phénomène se traduit par des variations dimensionnelles, pouvant dans certaines circonstances entraîner des fissures.

A savoir, il existe 4 types de retrait concernant le béton :

- Le retrait de séchage
- Le retrait plastique
- Le retrait endogène
- Le retrait thermique.

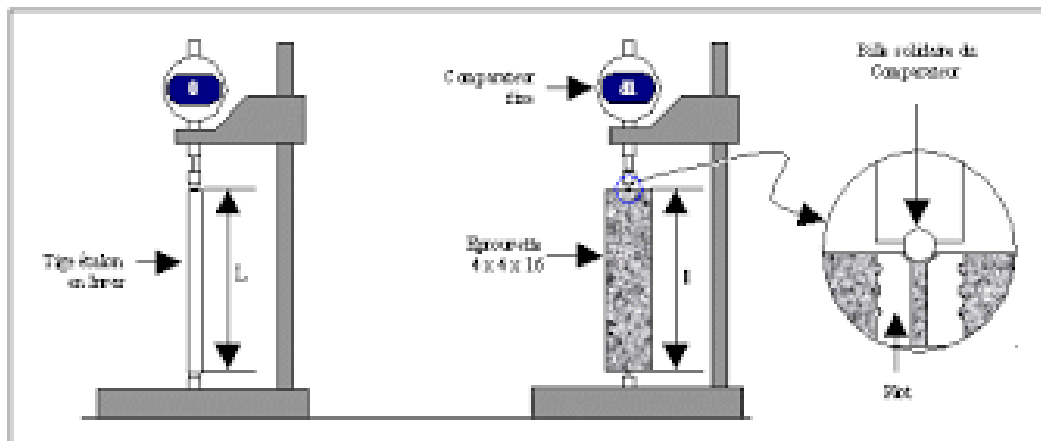


Figure 12. Essai de retrait du BTS

Les séries d'essai de retrait et fluage ont permis de conclure que :

- La présence des stabilisants chaux et ou ciment a réduit la capacité de déformation par fluage du béton de terre,
- En l'occurrence l'ajout des fibres de palmier dattier a aussi réduit le fluage de l'adobe non stabilisée, mais a supprimé l'effet positif des stabilisants
- L'ajout du stabilisant ciment de plus de 6% a fait augmenter les coefficients de fluage et ce pour tous les mélanges
- La présence de la chaux et le ciment avec une teneur de 6% a rendu les adobes plus résistants à l'eau en réduisant leur retrait linéaire

En revanche les fibres de palmier dattier ont montré un effet négatif sur ces caractéristiques et la chaux donnait la bonne performance en termes de gonflement.

8. Bibliographie

Bensalem S. (2018). *Principales pathologies des constructions*.

https://telum.umc.edu.dz/pluginfile.php/69376/mod_resource/content/2/Chapitre_2.pdf

Brahimi , H. (2016). *Contribution à l'étude du phénomène d'adhérence des fibres végétales à la matrice béton "cas des fibres du palmier dattier"*. Thèse de doctorat, Université de Béchar.

Djafar Henni (2021). *Pathologies et réhabilitation des structures*, Polycopié, Université de Chelef. <https://www.univ-chlef.dz/FGCA/wp-content/uploads/2024/06/Pathologies-et-Rehabilitation-des-Structures-GC-M2-Djafar-Henni-Imene.pdf>

Ghomari F. *Cours Structures et VOA* (en ligne), chapitre 6 : Pathologies des maçonneries, Département de Genie civil , Laboratoire EOLE, Université de Tlemcen.

Idder A. (2021). « *Etude expérimentale de la porosité et de la perméabilité du béton de terre stabilisé avec ajout des fibres végétales du palmier dattier* » ; thèse de doctorat, Université de Bechar

Ministère de la Culture. (2007). *Schéma Directeur des Zones Archéologiques et Historiques*.

Ngo, D. (2017). *Développement d'un nouveau éco-béton à base de sol et fibres végétales: étude du comportement mécanique et de la durabilité (Doctoral dissertation)*.

Techniques de l'Ingénieur ; Article de référence | Réf : RE286 v1. « *Caractérisation de la matière fibreuse du palmier-dattier : Valorisation du palmier-dattier* »