

1.7.3 Utilisation des composites dans les travaux de réhabilitation.....	44
1.7.4 Les composites fibres/ciment.....	45
1.7.4.1 Composites fibres végétales/ciment.....	45
1.7.4.2 Les composites amiante/ciment.....	47
1.7.4.3 Les composites fibres de verre/ciment.....	48
1.8 CONCLUSION ET CHOIX DE LA MATRICE.....	49
Chapitre 2.....	52

Matériaux et techniques expérimentales

2.1 INTRODUCTION.....	52
2.2 MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LA CONSTRUCTION DES MURETS.....	52
2.2.1 Eléments de maçonnerie.....	53
2.2.1.1 Masse volumique apparente [45]	54
2.2.1.2 Masse volumique absolue [46]	54
2.2.1.3 Capacité d'absorption d'eau pondérale.....	55
2.2.1.4 Capacité d'absorption d'eau volumique.....	55
2.2.1.5 Capacité d'absorption d'eau par capillarité [47]	56
2.2.1.6 Résistance à la compression des unités de brique.....	56
2.2.2 Mortier utilisé dans la construction des murets	58
2.2.2.1 Sable.....	58
2.2.2.1.1 Echantillonnage du sable.....	58
2.2.2.1.2 Analyse Granulométrique	58
2.2.2.1.3 Module de finesse (MF).....	59
2.2.2.1.4 Equivalent de sable (E_s).....	59
2.2.2.1.5 Masse volumique.....	60
2.2.2.2 Ciment.....	61
2.2.2.3 Eau.....	61
2.2.2.4 Composition du mortier.....	61
2.2.2.5 Caractéristiques physiques du mortier.....	62
2.2.2.6 Résistances mécaniques du mortier.....	62
2.3 ETUDE DES MURETS EN MAÇONNERIE.....	64
2.3.1 Mode de fabrication des murets.....	65
2.3.2 Dispositif expérimental de compression.....	65
2.4 MATERIAUX COMPOSITES.....	67
2.4.1 Fibres de jute.....	67
2.4.1.1 Mesure du coefficient d'absorption d'eau des fibres végétales.....	68
2.4.1.2 Caractéristiques physique et chimiques de la fibre de jute.....	69

2.4.1.3 Caractérisation mécanique de la fibre de jute.....	69
2.4.2 Ciment.....	71
2.4.3 Chaux hydraulique.....	72
2.4.3.1 Propriétés chimiques de la chaux.....	72
2.4.3.2 Propriétés physiques de la chaux.....	73
2.4.3.3 Propriétés mécaniques de la chaux.....	73
2.4.4 Sable.....	73
2.4.4.1 Analyse granulométrique du sable (R.Lanchon) [67]	74
2.4.5 Eau.....	74
2.4.6 Fluidifiant.....	75
2.5 TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....	75
2.5.1 Matériau à l'état frais.....	75
2.5.1.1 Compatibilité chimique.....	75
2.5.1.1.1 Hydratation des silicates [70]	75
2.5.1.1.2 Hydratation des aluminates.....	76
2.5.1.1.3 Mécanismes d'hydratation d'un ciment Portland.....	77
2.5.1.1.4 Inhibition de l'hydratation du ciment.....	78
2.5.1.1.5 Maniabilité.....	82
2.5.1.1.6 Procédure de fabrication des composites.....	82
2.5.1.1.7 Mesure de la teneur en air occlus.....	83
2.5.1.1.8 Essai de prise.....	84
2.5.2 Matériau à l'état durci.....	85
2.5.2.1 Propriétés physico-mécaniques.....	85
2.5.2.1.1 Masse volumique apparente sèche.....	85
2.5.2.1.2 Module d'élasticité dynamique.....	85
2.5.2.1.3 Résistances mécaniques.....	87
2.6 CARACTERISATION DE LA MATRICE.....	88
2.6.1 Propriétés hydriques.....	88
2.6.1.1 Etude des variations dimensionnelles.....	88
2.6.1.2 Domaine capillaire.....	90
2.6.1.3 Détermination de la sorptivité.....	91
2.6.2 Propriétés thermiques des matériaux : conductivité thermique.....	92
2.6.3 Etude de la déformabilité du composite ciment-fibres de jute.....	92

Chapitre 3.....	95
Résultats expérimentaux et analyse	
Cas de la maçonnerie	
3.1 INTRODUCTION.....	95
3.2 MODES DE RUPTURE DES MURS EN MAÇONNERIE.....	96
3.3 COMPORTEMENT DES MURETS EN BRIQUES CREUSES.....	98
3.3.1 Mesure des déformations.....	98
3.3.2 Principe de fonctionnement des capteurs à jauge.....	99
3.3.2.1 Montage en quart de pont.....	100
3.3.2.2 Montage en demi-pont.....	100
3.3.2.3 Montage en pont complet.....	100
3.3.3 Calcul des contraintes.....	100
3.3.3.1 Murets construits en briques de 12 trous.....	101
3.3.3.1.1 Murets Non Enduit de mortier (notés $M_{12t}NE$).....	101
3.3.3.1.1.1 Cas 1: Utilisation de deux jauges horizontales (J_1, J_2)	101
3.3.3.1.1.2 Cas 2: Utilisation de deux jauges verticales (J_1, J_2) et une jauge horizontale (J_3).....	102
3.3.3.1.1.3 Cas 3 : Utilisation d'une jauge horizontale (J_1) et une jauge verticale (J_2).....	102
3.3.3.1.2 Murets Avec Enduit de mortier de ciment ($M_{12t}AE$).....	103
3.3.3.1.2.1 Cas1: Utilisation d'une jauge horizontale (J_1) et une jauge verticale (J_2).....	103
3.3.3.1.2.2 Cas 2: Utilisation de deux jauges verticales (J_1, J_2) et une jauge horizontale (J_3).....	103
3.3.3.1.2.3 Cas3: Utilisation de deux jauges verticales (J_1, J_2).....	104
3.3.3.1.3 Murets Avec Enduit de ciment renforcé d'une nappe de toile de Jute ($M_{12t}AEJ$).....	104
3.3.3.1.3.1 Cas1: Utilisation de deux jauges verticales (J_1, J_2) et une jauge horizontale (J_3).....	104
3.3.3.1.3.2 Cas2: Utilisation d'une jauge verticale (J_1) et deux jauges horizontales (J_2, J_3).....	105
3.3.3.2 Murets construits en briques de 8 trous.....	106
3.3.3.2.1 Muret Non Enduit ($M_{8t}NE$)	106
3.3.3.2.1.1 Cas1: Utilisation de deux jauges horizontales (J_1, J_2)	106
3.3.3.2.1.2 Cas 2: Utilisation de deux jauges verticales (J_1, J_2) et une jauge horizontale (J_3).....	106
3.3.3.2.1.3 Cas3: Utilisation d'une jauge horizontale (J_1) et une jauge verticale (J_2).....	107
3.3.3.2.2 Muret Avec Enduit ($M_{8t}AE$)	107

3.3.3.2.2.1 Cas1: Utilisation de deux jauges horizontales (J_1, J_2)	107
3.3.3.2.2.2 Cas2: Utilisation d'une jauge horizontale (J_1) et deux jauges verticales (J_2, J_3).....	108
3.3.3.2.2.3 Cas3: Utilisation d'une jauge horizontale (J_1) et une jauge verticale (J_2).....	108
3.3.3.2.3 Murets en briques à 8 trous renforcés d'une nappe de toile de jute.....	109
3.3.3.2.3.1 Cas1: Utilisation de deux jauges horizontales (J_1, J_2) et une jauge verticale (J_3).....	109
3.3.3.2.3.2 Cas2: Utilisation de deux jauges verticales (J_1, J_2) et une jauge horizontale (J_3)	109
3.4 CONCLUSION.....	111

Chapitre 4.....	112
-----------------	-----

Résultats expérimentaux et analyse

Cas des matériaux composites renforcés de fibres de jute

4.1 INTRODUCTION.....	112
4.2 ETUDE PRELIMINAIRE.....	113
4.2.1 Compatibilité chimique de la pate de ciment avec les fibres de jute.....	113
4.2.2 Compatibilité chimique de la pate de ciment/chaux avec les fibres de jute.....	115
4.3 ELABORATION DES COMPOSITES CIMENT/CHAUX/FIBRES DE JUTE (JFC).....	116
4.3.1 Détermination du pourcentage d'air occlus	118
4.3.2 Porosité.....	119
4.4 ETUDE DU MATERIAU A L'ETAT DURCI.....	121
4.4.1 Propriétés physico-mécaniques.....	121
4.4.1.1 Masse volumique.....	122
4.4.1.2 Interface fibre / pâte de ciment.....	123
4.4.1.3 Module d'élasticité dynamique.....	126
4.4.1.4 Résistances mécaniques.....	127
4.4.1.4.1 Résistance à la compression.....	128
4.4.1.4.1.1 Mode de rupture des éprouvettes.....	128
4.4.1.4.2 Résistance à la flexion.....	130
4.4.2 Comportement en déformation du matériau.....	132
4.4.2.1 Composites sollicités en flexion trois points.....	132
4.4.2.2 Composites sollicités en compression simple.....	137
4.4.2.3 Synthèse du comportement en déformation.....	139

4.4.3 Comportement hydrique.....	140
4.4.3.1 Retrait de séchage.....	140
4.4.3.2 Sensibilité à la reprise d'eau (Sorptivité).....	142
4.4.4 Comportement thermique.....	146
4.4.4.1 Composite JFC2.....	146
4.4.4.2 Composite JFC1.5.....	147
4.5 CONCLUSION.....	148
Conclusion générale.....	149
Références bibliographiques.....	151

عناصر الطابوق الجوفاء المحلية الإنتاج تمكن من تحقيق، في مجال البناء المدني و الصناعي حلا مهما اقتصاديا و اجتماعيا و بيئيا و معماليا. لكن الطابوق يمثل ثغرة أمنية مهمة عند استعماله كمادة لملء هياكل البناءات في المناطق الزلزالية.

لهذا أجريت دراسة سلوك جدران مساحتها 1م^2 تحت تأثير قوة الضغط.

الحل الأول كان تعزيز جدران الطابوق بإضافة نسيج من ألياف الجوت و نسيج من ألياف البوليمر (الأنسجة مأخوذة من الأكياس المستعملة للتعبئة و التغليف).

النتيجة :

- صعوبات في تحقيق تلبس للجدران مكون من الملاط الإسمنتي و نسيج ألياف الجوت.
- تحسين مقاومة الجدران.
- زيادة معامل المرونة الثابتة للجدران.
- استحالة الالتصاق بين مونة الإسمنت و شبكة ألياف البوليمر.

لذلك تم تجاهل كلا النوعين من التلبس.

الحل الثاني يتمثل في صياغة ملاط إسمنتي معزز بألياف الجوت يمكن استخدامه كتلبس للجدران المبنية من الطابوق. الهدف من ذلك هو تحسين استجابة جدران البناء مع متطلبات معينة تتعلق بوظيفة المبنى. لهذا الغرض، يتم استخدام ألياف الجوت كبديل جزئي لكتلة الرمل، بنسب تتراوح بين 0% لملاط المراقبة، 0.5%؛ 1%؛ 1.5% و 2%. متوسط طول الألياف هو 15 ملم. تم تقييم مدى التوافق الكيميائي لألياف الجوت مع الاسمنت باستخدام اختبارات التوافق.

النتائج أدت إلى تأكيد التوافق في وجود ألياف الجوت المنظفة. وقد أجريت اختبارات تجريبية لتصنيف هذه المواد المركبة فيزيائيا، ميكانيكيا وحراريا. من الناحية الميكانيكية، تتميز المواد المختارة بسلوك مرن-بلاستيكي. أدت النتائج إلى استنتاجات مرضية فيما يتعلق بالمعايير المطلوبة. و من ضمنها قابلية التشوه، والعزل الحراري و التهوين من الموجات فوق الصوتية عن طريق تخميد الاهتزازات.

الكلمات المفتاحية: ألياف الجوت، مركب إسمنتي، ملاط بالألياف، التوافق الكيميائي، الخصائص الميكانيكية.

Résumé

Les éléments de maçonnerie en Briques creuses de production locale permettent de réaliser pour la construction de bâtiments civils et industriels une importante solution socioéconomique, environnementale et architecturale. Cependant, la maçonnerie présente une importante vulnérabilité dans le remplissage des structures en portiques auto-stables en zones sismiques. Pour cela une étude du comportement en compression de murets en maçonnerie, de l'ordre de 1 m² de surface a été réalisée.

Cette thèse s'inscrit dans un contexte de formalisation d'une solution pour l'amélioration de la vulnérabilité de la maçonnerie sollicitée en compression.

Une première solution consistait au renforcement des murs en maçonnerie par l'ajout de nappe de fibre de jute et de nappe en nattes polymères (provenant de sacs usés d'emballages).

Il en résulte:

- Difficultés de la réalisation du revêtement composé par le mortier de ciment et la nappe de jute.
- Amélioration de la résistance des murets.
- Augmentation du module d'élasticité statique des murets.
- Impossibilité de l'adhérence entre le mortier de ciment et la nappe en natte polymère.

Par conséquent, ces deux types de revêtements renforcés par nappes ont été écartés.

Une deuxième solution consiste à l'élaboration d'un mortier renforcé de fibres de jute pouvant être utilisé comme revêtement des murs en maçonnerie. L'objectif visé est l'amélioration de la réponse des murs en maçonnerie à certaines exigences liées aux fonctions de la construction. Pour cet effet, la fibre de jute est utilisée comme substitution partielle en masse du sable à des taux, variant de 0% pour le mortier de control, à 0,5%; 1%; 1,5% et 2%. La taille moyenne des fibres étant de 15 mm. La compatibilité chimique des fibres de jute avec le liant a été évaluée en utilisant les tests d'hydratation dont les résultats ont montré un classement de faible inhibition pour la fibre propre. Un protocole d'essais expérimentaux a été mené pour la caractérisation physico-mécanique et thermique de ces composites. Du point de vue mécanique, les matériaux sélectionnés se caractérisent par un comportement élastoplastique. Les résultats ont abouti à une conclusion satisfaisante vis à vis des critères recherchés. Entre autre, la déformabilité, l'isolation thermique et l'atténuation des ondes ultrasonores par l'amortissement des vibrations.

Mots clé: fibres de jute, composite cimentaire, mortier fibré, compatibilité chimique, propriétés mécaniques.

Abstract

The elements of hollow brickwork of local production make it possible to realize for the construction of civil and industrial construction an important socio-economic, environmental and architectural solution. However, masonry presents an important vulnerability in the filling of the structures self stabilizing gantries in seismic zones. For this purpose a study of behavior in compression of low walls in masonry, about 1m^2 of surface was carried out. This thesis falls under a context of formalization of a solution for the improvement of the vulnerability of the masonry solicited in compression.

A first solution consisted with the reinforcement of the masonry walls by the addition of fiber tablecloth of jute and tablecloths of polymeric plaits (coming from worn bags of packing).

It results from it:

- Difficulties in achieving of the coating composed by the cement and the jute fabric.
- Improvement of the resistance of the walls.
- Increase of the static modulus of elasticity of the walls.
- Failure of adhesion between the cement mortar and the ply polymer matting.

Therefore, the two types of coatings reinforced by ply matting were discarded.

A second solution consists to develop a mortar reinforced by jute fiber. This material could be used as a coating for masonry walls. The pursued aim is the improvement of the response of the masonry walls to certain requirements related to the functions of the construction. For this effect, the jute fiber is used as partial substitution in mass of sand at rates, varying from 0% for the control mortar, to 0,5% ; 1% ; 1,5% and 2%. The mean size of fibers being of 15mm. the chemical compatibility of jute fibers with binder was evaluated by using the tests of hydration whose results showed a ranking of weak inhibition for clean fiber. A protocol of experimental tests was carried out for the physic mechanical and thermal characterization of these composites.

From the mechanical point of view, the selected materials are characterized by an elastoplastic behavior.

The results led to a satisfactory conclusion with respect to the required criteria (deformability, thermal isolation and attenuation of the ultrasonic waves by the damping of the vibrations).

Key words: jute fibers, cementitious composite, fiber mortar, chemical compatibility, mechanical properties.

Liste des figures

Chapitre	Figure	Titre
1	1.1	Ruine de la maçonnerie de remplissage à la suite des séismes, a: d'El-Asnam 1980, b: de Boumerdès 2003, c: de Port-au-Prince, Haiti 2010, d: de Turquie 1999.
	1.2	Action du séisme sur les structures d'un bâtiment [1]
	1.3	Endommagement au niveau des Coins
	1.4	Ecrasement en compression localisé au niveau central de la diagonale [4]
	1.5	Endommagement par cisaillement
	1.6	Fissuration en diagonale
	1.7	Endommagement du cadre
	1.8	La plante de jute
	1.9	Photo de la fibre de jute après son extraction
	1.10	Photo de la toile de jute.
	1.11	Organigramme de la transformation de la fibre de jute
	1.12	schéma de structure de la fibre de jute [13]
	1.13	Structure de la cellulose telle qu'elle se présente dans une paroi cellulaire végétale [15]
	1.14	Imageries au MEB des fibres de jute non traité et fibres de jute traité d'après Prosenjit Saha et al [16].
	1.15	Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats [17]
	1.16	Structures souples [20]
	1.17	Quelques exemples de structures souples [20].
	1.18	Structures rigides [20]
	1.19	Quelques exemples de structures rigides [20]
	1.20	Composites rigides à matrice minérale [20]
	1.21	Quelques exemples de structures rigides à matrice minérale [20]
	1.22	Utilisation des composites dans le domaine de réhabilitation
	1.23	Réparation et renforcement par matériaux composites [25].
	1.24	Organigramme de classification des fibres naturelles
	1.25	Tôles ondulées et tuyaux en amiante/ciment
	1.26	Relation entre la composition du mortier, la résistance à la compression et le pouvoir de rétention d'eau [41].

Chapitre	Figure	Titre
2	2.1	Types de briques utilisées, a: Brique 8 trous, b: Brique 12 trous
	2.2	Dimensions normalisées des éléments de maçonnerie utilisés, exemple de la brique à 12 trous.
	2.3	Machine d'essai de compression (Presse hydraulique LGC. UBMA)
	2.4	Essais de compression, a: centrage des éprouvettes, b: rupture des briques à 8 trous, c: rupture des briques à 12 trous
	2.5	Ensemble agitateur et tamis normalisés pour l'analyse granulométrique
	2.6	Éprouvette de mortier utilisé pour la construction des murets.
	2.7	Essais mécaniques, a: flexion 3 points, b: compression sur les demis éprouvettes résultant de l'essai de flexion.
	2.8	a: Rupture en flexion des éprouvettes, b: dispositif d'essai en compression des demis éprouvettes résultant de l'essai de flexion.
	2.9	Photo des murets sans enduit
	2.10	Exemple d'emplacement des jauges au niveau de la zone centrale du muret, b: connexion des jauges au Pont de Wheastone.
	2.11	Machine utilisée: portique d'essai d'éléments de structure en grandeur réelle.
	2.12	Mise en place du Muret et vérification des jauges de déformation sur un muret à briques de 8 trous enduit par mortier de ciment renforcé de nappe de fibre de jute.
	2.13	Aspects du jute, a: Plante, b: Tissu, c: Fibres utilisées
	2.14	Essai de traction sur un fil de tissu de jute.
	2.15	Relation Force-Déplacement en traction, de la fibre de jute utilisée
	2.16	Courbe charge/allongement dans le domaine élastique
	2.17	Courbe de l'analyse granulométrique du sable utilisé.
	2.18	Courbe caractéristique d'hydratation du ciment d'après Vincent Waller [71].
	2.19	Effet de quelques types de bois sur l'hydratation d'un ciment portland, d'après A.A. Moslemi [72]
	2.20	Dispositif expérimental pour l'essai d'inhibition
	2.21	Photo Dispositif expérimental pour l'essai d'inhibition
	2.22	Exemple type de courbe température/temps lors de l'hydratation [75]
	2.23	Photo du maniabilimètre à mortier

Chapitre	Figure	Titre
2	2.24	Malaxeur ayant servi à l'élaboration des échantillons.
	2.25	Photo de l'aéromètre à mortier
	2.26	Photo de l'appareil Vicat pour l'essai de prise
	2.27	Photo de l'appareil Ultrasonic Tester PUNDIT 7
	2.28	Photo de la presse pour essai de flexion
	2.29	Photo de la presse pour essai de compression
	2.30	Photo du Microscope Leica Microsystems M80
	2.31	a, Photo de la chambre climatique BiA. b, photo des éprouvettes à l'intérieur de la chambre climatique.
	2.32	Photo du rétractomètre et de la balance utilisés
	2.33	Schéma du dispositif expérimental pour l'essai d'imbibition capillaire
	2.34	Montage expérimental pour l'essai d'imbibition capillaire
	2.35	Exemple de profil type $\theta(b)$
	2.36	Découpe des échantillons à différentes hauteurs pour la détermination des profils hydriques par la méthode gravimétrique, d'après M. S Goual [95]
	2.37	Machine d'essai de conductivité thermique
	2.38	Machine utilisée pour l'essai de flexion charge-déplacement
	2.39	Presse hydraulique utilisée pour l'essai de contrainte-déformation
	2.40	Evaluation de l'Indice de Fragilité (IF) [96]
3	3.1	Modes de rupture de murs en briques de terre cuite [97]
	3.2	Les différents modes de rupture observés, a: endommagement au niveau des coins, b: et c: rupture verticale dans le plan des murets respectivement cas des murets enduits de mortier de ciment et cas des murets renforcés de nappe de fibre de jute, d) rupture parallèle aux lits de mortier.
	3.3	Relation Contrainte/Déformation (M_{12tNE}) cas 1
	3.4	Relation Contrainte-Déformation (M_{12tNE}) cas 2.
	3.5	Relation Contrainte-Déformation (M_{12tNE}) cas 3
	3.6	Relation Contrainte/Déformation (M_{12tAE}) cas 1

Chapitre	Figure	Titre
3	3.7	Relation Contrainte-Déformation (M_{12tAE}) cas 2
	3.8	Relation Contrainte-Déformation (M_{12tAE}) cas 3
	3.9	Relation Contrainte-Déformation (M_{12tAEJ}) cas 1
	3.10	Relation Contrainte-Déformation (M_{12tAEJ}) cas2
	3.11	Relation Contrainte-Déformation (M_{8tNE}) cas1
	3.12	Relation Contrainte-Déformation (M_{8tNE}) cas 2
	3.13	Relation Contrainte-Déformation (M_{8tNE}) cas 3
	3.14	Relation Contrainte-Déformation (M_{8tAE}) cas 1
	3.15	Relation Contrainte-Déformation (M_{8tAE}) cas 2
	3.16	Relation Contrainte-Déformation (M_{8tAE}) cas 3
	3.17	Relation Contrainte-Déformation (M_{8tAEJ}) cas 1
	3.18	Relation Contrainte-Déformation (M_{8tAEJ}) cas 2
4	4.1	Variation de la température en fonction de la teneur en fibres de jute des composites sans ajout de chaux ni de fluidifiant.
	4.2	Variation de la température en fonction de la teneur en fibres de jute des composites sans ajout de chaux ni de fluidifiant
	4.3	Composite fibré (JFC2) à l'état frais pendant le malaxage.
	4.4	Evolution de la quantité d'eau de gâchage en fonction de la quantité de fibres dans les composites
	4.5	Photos au stéréo-microscope type Leica S8AP0, du composite JFC2, a: section transversale, b: section longitudinale
	4.6	Photos au stéréo-microscope type Leica S8AP0, du composite JFC1.5, a: section transversale, b: section longitudinale.
	4.7	Photos au stéréo-microscope type Leica S8AP0, du composite JFC1, a: section transversale, b: section longitudinale.
	4.8	Photos au stéréo-microscope type Leica S8AP0, du composite JFC0.5, a: section transversale, b: section longitudinale.
	4.9	Photos au stéréo-microscope type Leica S8AP0 du composite non fibré JFC0, a: section transversale, b: section longitudinale.
	4.10	Variation de la porosité en fonction du taux de fibres.
	4.11	Evolution de la masse volumique sèche des composites en fonction de la teneur en fibres

Chapitre	Figure	Titre
4	4.12	Adhérence des fibres de jute à la matrice ciment-chaux composite (JFC2) a: section transversale, b: section longitudinale.
	4.13	Adhérence des fibres de jute à la matrice ciment-chaux composite (JFC1.5), a: section transversale, b: section longitudinale.
	4.14	Adhérence des fibres de jute à la matrice ciment-chaux composite (JFC1), a: section transversale, b: section longitudinale.
	4.15	Adhérence des fibres de jute à la matrice ciment-chaux composite (JFC0.5), a: section transversale, b: section longitudinale
	4.16	Variation du module dynamique en fonction du taux de fibres
	4.17	Modes de rupture en compression des différents composites étudiés
	4.18	Effet de l'ajout de fibres de jute sur la perte de résistance des composites
	4.19	Evolution de la résistance à la compression pour les différents composites
	4.20	Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la masse volumique
	4.21	Variation de la résistance à la flexion du composite pour différentes teneurs en fibres
	4.22	Influence du taux de fibres sur la résistance à la flexion à 28 jours
	4.23	Influence du taux de fibres sur la résistance à la compression et à la flexion à 28 jours
	4.24	Relation contrainte/déformation et photographie de l'éprouvette rompue en flexion 3 points du composite JFC0 après 2 cycles d'hystérésis.
	4.25	Relation contrainte/déformation et photographie de l'éprouvette rompue en flexion 3 points du composite JFC0.5 après 2 cycles de charge-décharge.
	4.26	Relation contrainte/déformation et photographie de l'éprouvette rompue en flexion 3 points du composite JFC1 après 2 cycles de charge-décharge.
	4.27	Relation contrainte/déformation et photographie de l'éprouvette rompue en flexion 3 points du composite JFC1.5 après 2 cycles de charge-décharge.
4.28	Relation contrainte/déformation et photographie de l'éprouvette rompue en flexion 3 points du composite JFC2 après 2 cycles de charge-décharge.	

4	4.29	Photo de l'éprouvette en JFC2 rompue en flexion 3 points.
	4.30	Détail 1 de l'ouverture de fissure en flexion du composite JFC2.
	4.31	Courbes Contrainte/déformation après deux cycles de chargements en flexion 3 points des composites.
	4.32	Boucles d'hystérésis des composites étudiés.
	4.33	Variation du module de Young en fonction du taux de fibres.
	4.34	Photo de l'éprouvette en JFC2 rompue en compression simple.
	4.35	Evolution du retrait de séchage pour les différents composites.
	4.36	Evolution de la perte de masse en fonction de l'âge des composites.
	4.37	Evolution du retrait de séchage en fonction des pertes de masse
	4.38	Evolution de la hauteur d'absorption d'eau pour les différents composites. (MN désigne un mortier normal réalisé dans les mêmes conditions avec les mêmes matériaux).
	4.39	Evolution de la hauteur d'absorption d'eau dans le domaine de calcul de la sorptivité.
	4.40	Conductivité thermiques du composite JFC2.
	4.41	Conductivité thermiques du composite JFC1.5

Liste des tableaux

Chapitre	Tableau	Titre
1	1.1	Classification de la maçonnerie selon le module de Young [8].
	1.2	Production en tonnes de fibre de jute 2011-2012 (données de la FAO).
	1.3	Caractéristiques de la fibre de jute comparées à celles de la fibre de polypropylène
	1.4	Comportement de la fibre de jute en milieu alcalin [16].
	1.5	Classification fonctionnelle pour les bétons de granulats légers
	1.6	Classification fonctionnelle pour les bétons cellulaires autoclavés
2	2.1	Dimensions des éléments de remplissage (L,E et H à une précision de $\pm 0,5\text{cm}$ près)
	2.2	Série de tamis employés pour l'analyse granulométrique norme EN 933-2
	2.3	Série de tamis employés pour le calcul du module de finesse
	2.4	Caractéristiques du ciment utilisé dans la construction des murets
	2.5	Procédé de fabrication du mortier normal utilisé dans la construction des murets
	2.6	Caractéristiques mécaniques du mortier utilisé dans la construction des murets
	2.7	Dimensions des murets en cm.
	2.8	Caractéristiques physiques de la fibre de jute à l'état naturel [64].
	2.9	Caractéristiques chimiques de la fibre de jute à l'état naturel [64], pourcentage en poids
	2.10	Composition moyenne du ciment CPJ 32.5 [65].
	2.11	Propriétés chimiques de la chaux hydraulique NHL5 [66]
	2.12	Propriétés physiques de la chaux hydraulique NHL5 [66]
	2.13	Propriétés mécaniques de la chaux hydraulique NHL5 [66]
	2.14	Résultats de l'analyse granulométrique [67]
	2.15	Classification de l'effet inhibiteur des ajouts sur la réaction d'hydratation du ciment
3	3.1	Caractéristiques des murets
4	4.1	Valeurs des paramètres d'hydratation correspondant aux composites sans ajout de chaux ni de fluidifiant.

Chapitre	Tableau	Titre
4	4.2	Valeurs moyennes des paramètres de la réaction d'hydratation du ciment en présence des de fibres avec ajout de chaux et de fluidifiant
	4.3	Valeurs des résultats des tests de détermination des modules d'élasticité dynamiques majorés.
	4.4	Résultats expérimentaux de l'étude des matériaux à la sensibilité à l'eau.
	4.5	Comparaison des coefficients de sorptivité avec ceux d'autres matériaux
	3.6	Résultats de l'essai thermique du composite JFC2
	4.7	Résultats de l'essai thermique du composite JFC1.5
	4.8	Valeurs du coefficient de conductivité thermique de quelques matériaux

Introduction

L'évolution du marché de la construction, faisant intervenir le développement de la maison individuelle, la réhabilitation de l'habitat existant, l'économie d'énergie et le développement de filière de valorisation de déchets, fait appel à de nouveaux types de granulats légers tels que verre expansé, polystyrène, granulats de bois, schistes et argile expansés. Le choix de l'association matrice-granulats légers dépend donc des propriétés souhaitées. Les nouvelles possibilités d'association matrice-granulats légers, sont nombreuses et leur avantage est non négligeable tant en construction qu'en rénovation. En effet, il est possible de réaliser des bétons légers remplissant non seulement la fonction mécanique, mais aussi la fonction d'isolation thermique, phonique et atténuation des vibrations dispensant du recours à l'ajout d'un matériau isolant.

Les structures en portiques auto-stables adoptées en zones sismiques en Algérie, calculées suivant le règlement parasismique algérien (dimensionnement, ferrailage et exécution) ont montré un bon comportement lors des derniers séismes qu'avait connu le pays. Néanmoins, la vulnérabilité des remplissages en maçonnerie a été la cause de nombreux dégâts corporels et matériels. En effet, la maçonnerie non renforcées est l'un des matériaux de construction de bâtiment les plus utilisés. La plupart de ces bâtiments ont été construits avec peu ou pas du tout de considération sismique. Ce qui est plus grave encore, ce sont les modifications et les suppressions de certains éléments de structure, sans prise en considération des dangers sismiques dans les nouvelles constructions après leur finition. Libellés en maçonnerie, le mortier est un matériau composite anisotrope responsable de la création d'une distribution homogène des contraintes, de corriger les irrégularités des blocs et accommodant les déformations. Selon la littérature, son influence sur la résistance à la compression de la maçonnerie est réduite. Néanmoins, la meilleure manière de comprendre le comportement de la maçonnerie est l'expérimental. Dans ce thème, plusieurs thèses ont été réalisées et soutenues au laboratoire de Génie Civil de l'UBMA.

Cette recherche entre dans ce type de préoccupations. Il s'agit dans un premier temps de déterminer les caractéristiques intrinsèques des briques utilisées et par la suite d'étudier le comportement des murs en maçonnerie. Dans un deuxième temps, de valoriser les fibres issues de jute sous forme de renforts pour composites cimentaires dans le but de définir un mortier fibré servant d'enduit pour mur en maçonnerie en zone sismique et dont les caractéristiques sont particulièrement favorables pour réduire la vulnérabilité des remplissages en briques creuses. Cependant, la coexistence de matières lignocellulosiques et de liants cimentaires n'est pas toujours simple ; il est admis qu'il est nécessaire de vérifier leur compatibilité. Dans ce travail, il s'agira donc de vérifier la faisabilité de ce type de matériau.

Ce document qui rassemble les résultats obtenus est organisé en trois parties :

La première partie,

Consacrée à une synthèse bibliographique sur:

- ✓ Le comportement des remplissages en maçonnerie dans les structures en portiques auto-stables,
- ✓ La présentation de la fibre de jute.
- ✓ Les composites renforcés de fibres végétales,
- ✓ Les bétons de bois, ainsi que différents travaux réalisés dans ce sujet.

La seconde partie,

Dans cette partie ont été abordés l'ensemble des composants intervenant dans cette étude à savoir, les éléments de remplissages en briques creuses de terre cuite, les caractéristiques de la matière première ainsi que les techniques expérimentales de mesure et les procédés de construction des murets testés et de formulation des composites sélectionnés.

La troisième partie,

Rassemble les résultats expérimentaux, leur analyse et les conclusions qui découlent de l'étude expérimentale des caractéristiques intrinsèques des éléments de maçonnerie locale en briques creuses ainsi que leur comportement comme murs de remplissages.

La quatrième partie,

Rassemble les résultats expérimentaux, leur analyse et les conclusions concernant les propriétés à l'état frais et à l'état durci des composites élaborés et leur comportement en tenant compte des effets de l'ajout des fibres de jute. Ainsi que la confrontation de l'évolution des différentes propriétés afin de dégager des formulations répondant aux objectifs fixés.

Enfin, une conclusion générale,

Après avoir brièvement résumé les objectifs et les principaux résultats obtenus, des perspectives pour les études à venir sont dressées.

1.1 INTRODUCTION

La vulnérabilité des constructions dépend en général de leur nature, de leur localisation et des caractéristiques intrinsèques des matériaux de construction.

La maçonnerie non renforcée est l'un des matériaux de construction les plus anciens et les plus utilisés dans le bâtiment en Algérie et dans le monde entier. Toutefois, Les murs en maçonnerie demeurent vulnérables et présentent des anomalies et des dégradations dont les plus recensées sont les dégradations superficielles, les défauts structurelles, les déformations, les imperfections d'étanchéité et les fissurations. La majorité de ces défauts, sont en fait présents depuis le début des travaux de construction, car les éléments de maçonnerie eux même sont responsables de ces défauts qui sont multipliés dès le transport des éléments de remplissage et leur stockage sur chantier. Ceci sous l'effet des surcharges et des attaques chimiques. Néanmoins, la pire des déficiences qui puisse survenir lors de la vie de la structure est celle qui aurait lieu sous l'effet d'une sollicitation accidentelle de choc ou de séisme qui se manifeste par l'effondrement brutal des murs en maçonnerie et dont les conséquences sont néfastes pour l'être humain.

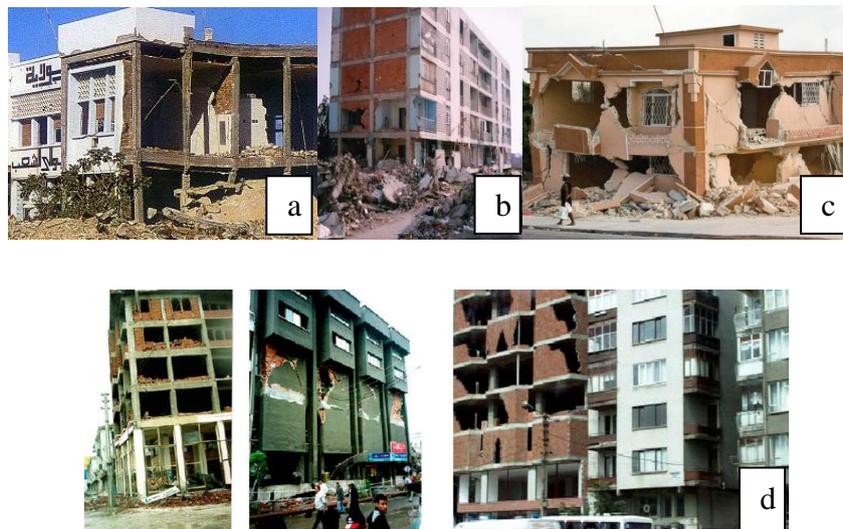


Figure 1.1 Ruine de la maçonnerie de remplissage à la suite des séismes, a: d'El-Asnam 1980, b: de Boumerdès 2003, c: de Port-au-Prince, Haiti 2010, d: de Turquie 1999.

D'importantes agglomérations dans le monde, sont touchées par le séisme presque chaque année. Le séisme ne met pas en danger la population d'une façon directe, mais ce sont les constructions qui les abritent et les édifices qui les entourent qui en sont responsables.

Comme il est impossible d'empêcher les risques naturels de se produire, il faut donc se concentrer sur la réduction de la vulnérabilité des constructions dans le but de la limitation des dommages corporels et matériels. D'où l'intérêt de la mise en œuvre de mesures destinées à réduire les dommages associés à certains risques naturels ou générés par des activités humaines. Beaucoup d'exemples concernant la ruine des murs en maçonnerie ont été observés à la suite des séismes. Dans la majorité des cas l'écroulement des murs en maçonnerie survient malgré la bonne tenue à la stabilité du système de contreventement. La figure 1.1 montre quelques exemples illustrant le comportement du remplissage en maçonnerie lors des séismes.

1.2 ACTIONS DU SEISME SUR LE BATIMENT

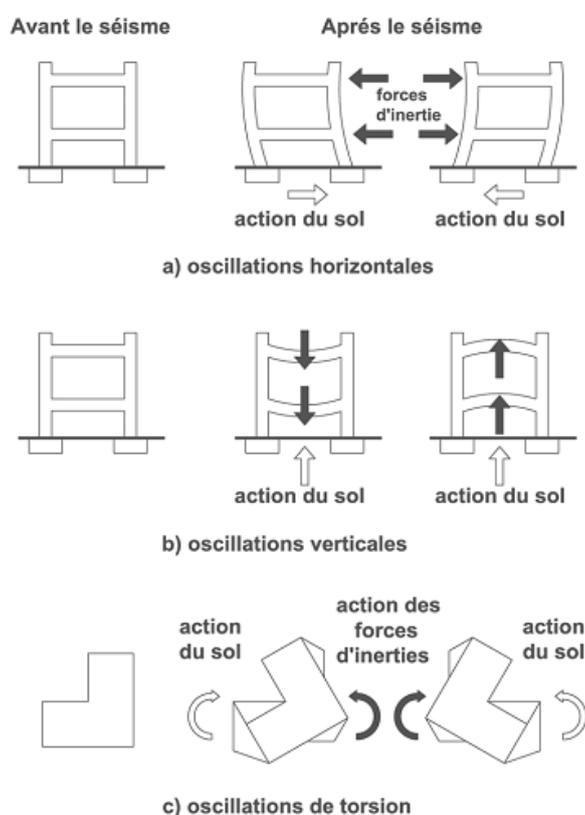


Figure 1.2 Action du séisme sur les structures d'un bâtiment [1]

Lorsqu'un tremblement de terre se produit, la structure d'un bâtiment subit un choc provoqué par trois actions différentes (figure 1.2) :

- Oscillation horizontale qui peut provoquer des déplacements relatifs des étages à l'origine de baies éclatées, des ruptures de cloison ou de chutes de plafonds. Le

cisaillement peut entraîner des glissements de la structure par rapport aux fondations (surtout pour les structures en bois), des fissures obliques dans les murs en maçonnerie ou en béton, des ruptures d'éléments porteurs (par traction d'un côté et compression de l'autre). La rigidité latérale des bâtiments est généralement plus faible que la rigidité verticale.

- Oscillation verticale qui peut provoquer une chute de corniches, des fissures des balcons et des encorbellements, des fissures des planchers sur lesquels il y a des poids importants isolés, une poussée horizontale des poutres des toits en pente lorsqu'elles ne sont pas correctement chaînées.
- Action de rotation ou de torsion qui peut provoquer des fissures verticales à la zone de jonction des murs entre eux. Les effets sont très importants dans le cas des bâtiments de forme irrégulière ou lorsque la répartition du poids de la structure ne coïncide pas avec la répartition de sa rigidité.

1.3 COMPORTEMENT DU REMPLISSAGE EN MAÇONNERIE DANS LES PORTIQUES AUTO-STABLES

La présence de remplissages à faible résistance au cisaillement est néfaste aux structures soumises aux efforts sismiques, étant donné que le poids propre de la maçonnerie augmente l'effort induit dans la structure, sans aucune contribution structurelle. En effet, dans le calcul sous charges horizontales des structures contreventées par portiques auto-stables, on néglige la rigidité des éléments de maçonnerie de remplissage. La participation du remplissage sous charges horizontales pose un problème à cause de la faible résistance au cisaillement des unités de maçonnerie liées par du mortier. Le remplissage en maçonnerie a une influence importante sur le comportement des structures [2]. Cependant, La défaillance en traction ou au cisaillement dans les colonnes ou poutres du cadre est également un problème fréquent. En effet, si le cadre a une résistance suffisante pour assurer l'équilibre statique, l'accroissement de la charge provoque la ruine du remplissage en maçonnerie.

Dans le cas des cadres en béton, la rupture du panneau de brique de maçonnerie est initiée par la fissuration le long de la diagonale sous compression et se termine par s'effondrer globalement ou par écrasement des coins chargés, en plus d'une autre possibilité de rupture par cisaillement le long des joints de mortier. En résumé, les différents modes de rupture peuvent être classés en cinq modes distincts [3]:

1. Ecrasement en coin: Ce type de défaillance fréquemment observé, est associée à l'écrasement de remplissage au moins dans un coin (figure 1.3). Ce mode de rupture se produit lorsque la maçonnerie de remplissage a une faible résistance à la compression.

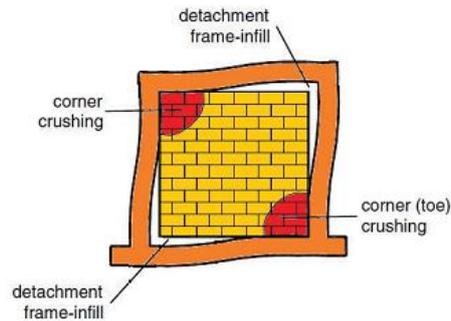


Figure 1.3 Endommagement au niveau des Coins.

2. Compression localisée au centre de la diagonale: Ce mode de rupture (figure 1.4) est manifesté par l'écrasement du remplissage localisé dans sa région centrale. dans les remplissages avec un rapport d'élanement élevé, la ruine peut avoir lieu suite à l'instabilité au flambement dans le plan de chargement. En fait, ce type de rupture se produit rarement en pratique dans les panneaux parce que l'épaisseur du remplissage, conçue pour satisfaire l'isolation acoustique et l'exigence de protection contre l'incendie réduit l'élanement des murs en maçonnerie. En outre, les forces d'inertie en dehors de la direction du plan de la paroi peuvent également provoquer ce type de défaillance. L'effet combiné dans le plan et hors du plan de chargement diminue la résistance de la paroi en augmentant la probabilité de défaillance du mur dans les deux sens [4].

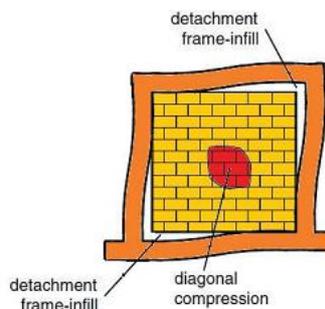


Figure 1.4 Ecrasement en compression localisé au niveau central de la diagonale [4].

3. Cisaillement par glissement (Figure 1.5) : Ce type de ruine se produit dans les panneaux où les joints de mortier sont plus faibles que les éléments de maçonnerie ou

bien dans les panneaux à faible élancement dont le cisaillement est plus dominant que la compression. Ce type d'endommagement est largement observé.

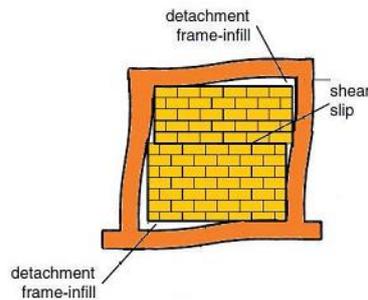


Figure 1.5 Endommagement par cisaillement.

4. Fissuration en diagonale (figure 1.6): se présente sous la forme d'une fissure en diagonale qui relie le coin chargé de haut au coin opposé du bas. Ce type de défaillance est connu dans des cadres avec joints faibles et remplissage à haute résistance à la compression ou dans des cadres faibles. Certaines recherches ne considèrent pas ce phénomène comme mode de défaillance, car le remplissage possède une charge supplémentaire après fissuration dans la direction diagonale.

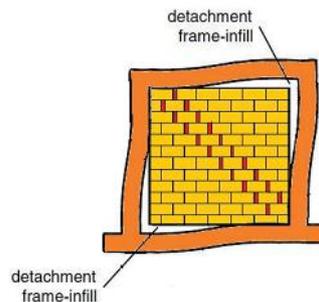


Figure 1.6 Fissuration en diagonale.

5. Défaillance par endommagement du cadre (figure 1.7): Lorsque le panneau de remplissage a une haute résistance à la compression, la charge appliquée est reprise par le remplissage et transférée au cadre qui l'entoure en provoquant la défaillance dans les colonnes. Si, dans le processus de conception l'effet de la résistance importante du remplissage sur le cadre environnant n'est pas pris en considération, ce type d'échec est inévitable. Il convient de noter que les modes 1 et 3, de défaillance respectivement par écrasement des angles et de glissement par cisaillement sont les plus importants au point de vue pratique.

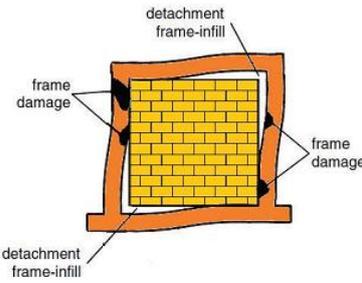


Figure 1.7 Endommagement du cadre.

En Algérie, la maçonnerie est négligée dans les calculs car elle n'est exploitée qu'en usage de remplissage dans les structures contreventées par portiques, elle n'a aucune fonction de portance, en l'absence de réglementation de calcul conforme. Sa fabrication produit des éléments hétérogènes, fissurés et de caractéristiques variables. Ceci rend son comportement dans la structure complexe et difficile à normaliser. Cependant, il existe certaines normes simplifiant le comportement de la maçonnerie par l'utilisation de modèles linéaires qui considèrent la maçonnerie comme un matériau homogène en se basant sur les propriétés mécaniques déterminées au moyens d'essais simple sur petits murs ou prismes [5]. Néanmoins, la validité de ces modèles reste insuffisante.

F.B Houti et al [6] ont étudié le comportement des murs en maçonnerie d'après des essais de compression avec orientations des joints à 0° , 45° et 90° en prenant en considération un mortier de ciment et un mortier bâtard. Le travail met en évidence l'importance des joints et de leur orientation qui sont souvent à l'origine des ruptures. D'une part, le mode de rupture dans le cas des joints à 90° est atteint par fissuration de traction s'initialisant dans le joint de mortier parallèle à l'axe de chargement, et d'autre part, la rigidité de la maçonnerie et sa résistance à la rupture augmentent lorsque l'orientation du plan de joint diminue de 90° à 0° . Les mêmes résultats sont confirmés par AW. Page [7].

Le module de Young est l'un des critères de l'évaluation de la qualité de la maçonnerie est [8].

Tableau 1.1 Classification de la maçonnerie selon le module de Young [8].

Qualité de la maçonnerie	Module de Young (MPa)
Bonne	10000
Moyenne	5000
Médiocre	3000

Pour ceci, nous déterminerons les propriétés de la maçonnerie ainsi que celles des murs en maçonnerie, sans enduit, avec enduit en mortier de ciment, avec enduit renforcé de nappe en

toile de jute, avec enduit renforcé de nappe en natte polymère. Le but de cette partie de travail est d'étudier la possibilité d'augmenter la résistance au cisaillement et diminuer la fragilité, caractéristiques mécaniques importantes de la tenue sous sollicitation accidentelle.

En effet, le comportement des matériaux aux chocs et au séisme ne peut être dissocié des critères de rigidité et de ductilité qui permettent des déformations plastiques lors d'efforts élevés sans diminution significative de la résistance pendant plusieurs cycles de chargement.

1.4 LA MAÇONNERIE DANS LE REGLEMENT PARASISMIQUE ALGERIEN

En effet, le Règlement Parasismique Algérien, (article 2.5.5) [9], exige que la structure et ses éléments aient une ductilité suffisante pour pouvoir dissiper une grande part de l'énergie induite par le mouvement sismique et conserver leur résistance de calcul sous déformation imposées ainsi le développement de rotules plastiques doit se faire en dehors des nœuds, de façon à ne remettre en cause ni le cheminement des forces verticales, ni la stabilité de la structure et de ses éléments porteurs. Quant aux éléments qui ne participent pas au contreventement, ils doivent pouvoir conserver leurs capacités portantes sous l'effet des déformations imposées.

L'emploi de matériaux fragiles dont les résistances en traction et au cisaillement sont faibles (béton non armé, maçonnerie non chaînées) est à proscrire pour la réalisation des éléments de contreventement. Le chapitre IX du règlement parasismique algérien donne les différents articles à appliquer pour la conception des structures en maçonnerie porteuse.

Par exemple, les éléments en maçonnerie (colonnes, murs extérieurs, balcons...) qui n'ont pas une fonction porteuse ou de contreventement (R.P.A article 6.2.2) peuvent modifier d'une façon considérable le comportement de la structure et donner lieu à des désordres importants lorsqu'ils subissent des secousses sismiques.

Lors d'un séisme d'une certaine importance, les éléments non structuraux peuvent être sollicités par l'ossature qui se déforme. Leur présence peut influencer le comportement de la structure en modifiant la période d'oscillation et en induisant éventuellement une torsion additionnelle d'ensemble. Donc les éléments non structuraux deviennent ainsi provisoirement porteurs d'où le risque de subir des dommages importants s'ils ne sont pas conçus pour résister aux sollicitations sismiques.

Quant à la maçonnerie liée au système de contreventement, l'R.P.A définit 17 types de systèmes de contreventement. L'objet de cette classification se traduit par l'attribution d'une valeur numérique qui est le coefficient de comportement R.

La classification des systèmes structuraux est faite en tenant compte de leur fiabilité et de leur capacité de dissipation de l'énergie vis-à-vis de l'action sismique et le coefficient de

comportement correspondant est fixé en fonction de la nature des matériaux constitutifs, du type de construction, des possibilités de redistribution d'efforts dans la structure et des capacités de déformation des éléments dans le domaine post-élastique.

Dans cette classification la maçonnerie intervient dans les catégories 1a, 1b et 12c article 3.4. Les structures en maçonnerie soumises au séisme nécessitent généralement des remplissages plus ou moins résistants pour participer à reprendre les efforts sismiques.

En Algérie, les éléments de remplissage utilisés ont des résistances très faibles, mais un poids important. Cela pose le problème d'augmenter l'effort sismique sans participer à la résistance. Nous avons alors pensé à renforcer le remplissage pour le faire participer à la résistance aux charges horizontales. Le renforcement des murs en maçonnerie par ajout de revêtement ductile en nappes de fibres de jute ou de composite fibré permettront peut être à notre remplissage d'avoir une meilleure résistance au cisaillement, qui est tant recherchée dans de telles structures.

1.5 LE JUTE [10]

1.5.1 La plante

"Jute" est le nom commun des plantes du genre *Corchorus*, plantes tropicales annuelles de la famille des Tiliaceae. Les deux principales espèces exploitées pour produire la fibre de jute sont *Corchorus Capsularis* et *Corchorus Olitorius*. Il s'agit d'une culture annuelle qui prend environ 120 jours pour arriver à maturité. Le jute prospère dans les terres tropicales situées à faible altitude et ayant un taux d'humidité compris entre 60 et 90 pour cent.



C'est une culture pluviale peu gourmande en engrais et pesticides. Son rendement est d'environ deux tonnes de fibre sèche par hectare.

C'est une plante de type herbacé dont la hauteur peut atteindre de 3 à 4m de hauteur et la tige fibreuse 1cm de diamètre. Les feuilles sont de 10 à 15cm de longueur et d'environ 5 cm de largeur les fleurs sont petites de couleur jaune.

Figure 1.8, La plante de jute

Le berceau de leur culture se situe en Inde et au Bangladesh, dans les vallées du Gange et du Brahmapoutre. Ces deux pays rassemblent 80% des surfaces consacrées à cette culture. Elle est aussi cultivée au sud de l'Europe comme plante textile.

En moyenne, l'Inde cultive 800 000 hectares le Bangladesh 650 000 hectares, et le reste du monde 260 000 hectares. La fibre représente environ 6% du poids de la masse verte. Les rendements sont en moyenne de 800 à 1600 kg/ha en Inde, avec des maximums de 2400kg/ha.

1.5.2 La fibre

Les vaisseaux de phloème situés sous l'écorce de la tige principale représentent la fibre de jute exploitable. Sa longueur va de 1 à 4 mètres et son diamètre de 17 à 20 microns. Elle est essentiellement composée de cellulose végétale et de lignine, qui sont respectivement les principaux composants de la fibre végétale et de la fibre de bois. Les méthodes de rouissage utilisées pour séparer l'écorce filamenteuse de la tige peuvent être biologiques ou chimiques, mais les premières sont plus répandues compte tenu du coût des produits chimiques. Le rouissage biologique englobe plusieurs techniques consistant à lier les tiges en faisceaux avant de les faire tremper afin de séparer plus facilement les fibres de la tige. Cette fibre naturelle d'aspect soyeux est surnommée « fibre d'or », en raison de ses reflets.



Le jute est une des fibres naturelles les moins chères, les plus longues et les plus utilisées. On le retrouve dans divers textiles. Il vient en deuxième position après le coton sur le plan de volumes produits comme de la diversité des usages.

Figure 1.9 Photo de la fibre de jute après son extraction

Le jute, en tant que fibre, n'est pas adapté à la production de tissus pour l'habillement, à cause de sa trop forte teneur en lignine bien que cela soit possible après traitement. Quantitativement, la teneur en lignine est de 3 à 5 % dans les feuilles, 5 à 20 % dans les tiges herbacées, 15 à 35 % dans les tiges ligneuses [11]. La lignine est le deuxième bio-polymère renouvelable le plus abondant sur la terre, après la cellulose. En effet, elles cumulent plus de 70% de la biomasse totale.

1.5.3 La toile de jute

Il existe plusieurs types de toiles de jute que l'on classe suivant leur grammage.

- Toile de jute forte : 400g
- Toile de jute claire : 300g
- Toile de jute très claire : 280g



Figure 1.10, Photo de la toile de jute.

L'utilisation principale du jute est longtemps restée la fabrication de sacs d'emballage et de transport et aussi à la fabrication de cordes. Si les sacs constituent encore de nos jours la majeure partie des produits manufacturés en jute, un grand nombre d'articles novateurs à haute valeur ajoutée ont vu le jour tels que revêtements pour sols, composants géotextiles, pâte à papier, textiles techniques, produits chimiques, tissus d'habillement, artisanat et accessoires.

1.5.4 Les statistiques économiques (FAO 2012)

1.5.4.1 Production

La production mondiale de jute et fibres apparentées a été de l'ordre de 3 millions de tonnes en 2012, dont l'Inde fournit 60 % et le Bangladesh 30 %. La plus grande partie de la fibre est transformée localement. Le tableau 1.2 représente la production de la fibre de jute entre 2011 et 2012 selon la FAO (Food and Agricultural Organization).

Tableau 1.2, Production en tonnes de fibre de jute 2011-2012 (données de la FAO).

Pays producteurs	Production en tonnes, données de la FAO STATISTIQUES			
	2011		2012	
Inde	1789000	65 %	1789000	65 %
Bangladesh	792000	29 %	800000	29 %
Chine	56000	2 %	68000	2 %
Birmanie	50000	2 %	50000	2 %
Autres pays	62747	2 %	66642	2 %
Total	2749747	100 %	2773642	100 %

1.5.4.2 Exportations

Le principal exportateur de fibre brute est le Bangladesh, qui exporte environ 300 000 tonnes de jute par an. C'est aussi le premier exportateur de fibre transformée (fils de jute, sacs, tissus), avec 400 000 t, suivi par l'Inde avec 95 852 t.

1.5.4.3 Importations

Les principaux pays importateurs de fibre brute sont l'Inde (73 000 t), le Pakistan (74 000 t) et la Chine (60 000 t), tandis que la fibre transformée est expédiée principalement vers l'Europe et le moyen orient, avec, respectivement 250 000 t et 20 000 t.

1.5.5 Transformation de la fibre de jute

Après l'arrachage, le jute subit un certain nombre d'opérations agroindustrielles depuis l'extraction des fibres jusqu'à la production du jute textile. Les principales opérations de transformation de la fibre de jute sont résumées dans l'organigramme représenté sur la figure1.11.

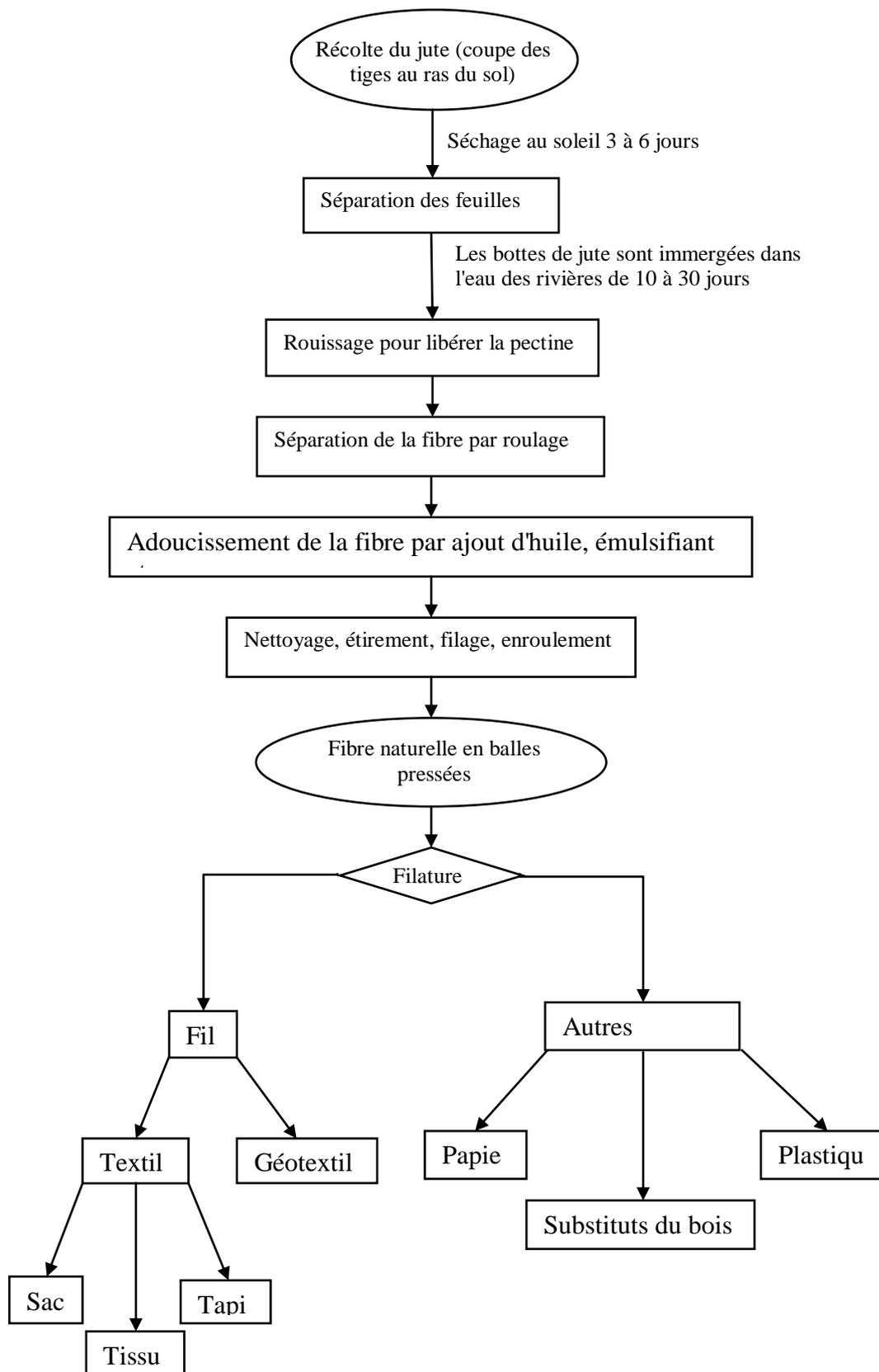


Figure 1.11, Organigramme de la transformation de la fibre de jute.

1.5.6 Avantages et inconvénients du jute

La fibre de jute rivalise la fibre de polypropylène dans plusieurs domaines d'utilisation. Le tableau 1.3 résume les qualités de la fibre de jute brute en comparaison avec la fibre de polypropylène.

Tableau 1.3, Caractéristiques de la fibre de jute comparées à celles de la fibre de polypropylène.

	jute	Polypropylène
Caractéristiques techniques	Perméabilité des sacs	Solidité
	Biodégradabilité	Légèreté
	Aspect naturel	Imperméabilité selon l'usage
	Fibre poussiéreuse	Inflammable et toxique
	Non compatible avec une automatisation du remplissage	
Qualité	Problèmes occasionnels	Qualité constante
Régularité de l'offre	Instabilité de l'offre du fait des risques climatiques et du transport irrégulier	Offre régulière et adaptation rapide avec la demande
Marché	Absence d'un système organisé	- Stratégie agressive - Possibilité d'arbitrage avec d'autres sous-produits pétroliers

Mieux valoriser les coproduits permettraient d'accroître le revenu des agriculteurs sans augmenter le prix de la matière noble et favoriserait le maintien de la production.

1.5.7 Structure de la fibre de jute

Le jute a une structure pluricellulaire (Figure 1.12). La paroi cellulaire d'une fibre est constituée d'un certain nombre de couches: la paroi primaire (P) (la première couche déposée pendant le développement de la cellule) et la paroi secondaire (S) qui est constituée de trois couches (S1, S2 et S3). Comme dans toutes les fibres lignocellulosiques, ces couches sont principalement constituées de cellulose, d'hémicellulose et de la lignine en quantité variable. Les fibres individuelles sont liées entre elles par la lamelle moyenne riche en lignine (environ 90%). La cellulose a une plus forte concentration dans la couche S2 (environ 50%). La couche S2 est généralement la couche la plus épaisse et domine les propriétés des fibres [12].

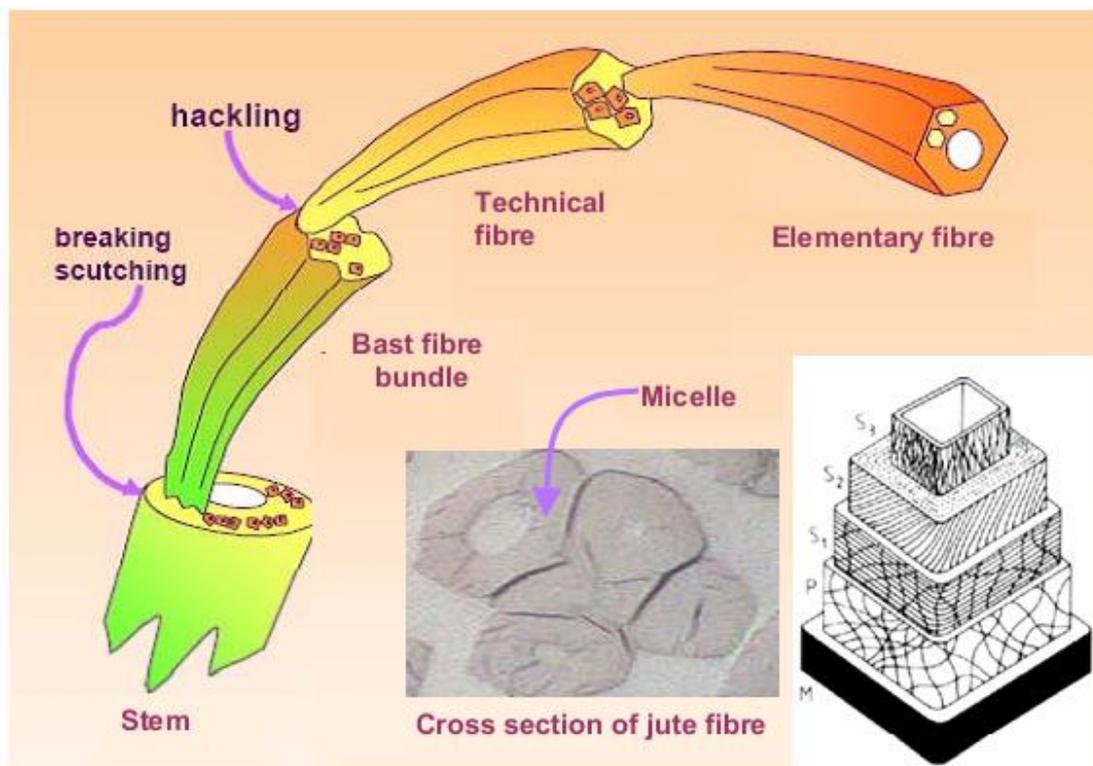


Figure 1.12, schéma de structure de la fibre de jute [13]

La cellulose est le composant principal de la fibre, c'est un polymère de condensation linéaire constitué de D-anhydro-glucopyranose reliées entre elles par 4 unités de liaisons glucosidiques β -1 [14].

Les longues chaînes de cellulose sont reliés en faisceaux appelés micro-fibrilles (figure 1.13).

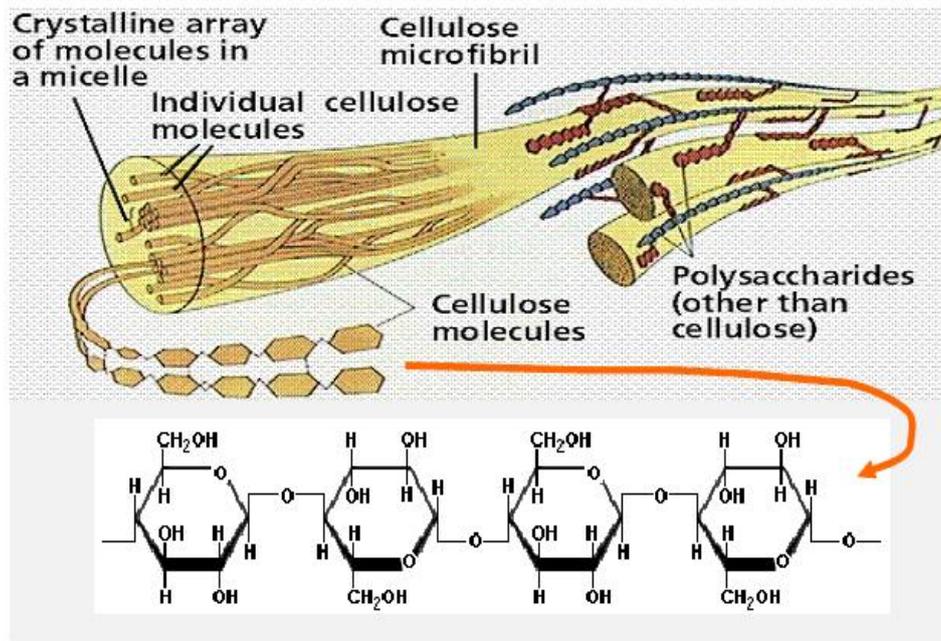


Figure 1.13, Structure de la cellulose telle qu'elle se présente dans une paroi cellulaire végétale [15]

1.5.8 Modification de la microstructure de la surface de la fibre de jute

L'influence des traitements alcalins à des températures ambiantes et en milieu à vapeur alcaline sur la résistance à la traction des fibres de jute indiquent que la résistance à la traction uni-axiale a augmenté jusqu'à 65% pour un traitement en milieu à vapeur alcaline. L'augmentation correspondante de 38% de l'allongement à la rupture indique que dans l'ensemble, les fibres traitées conservent leur flexibilité. Les traitements à la vapeur sont les plus efficaces. La caractérisation physico-chimique des fibres a montré que l'augmentation de la résistance à la traction était due à l'élimination des matières non cellulosiques telles que la lignine, la pectine et l'hémicellulose [16].

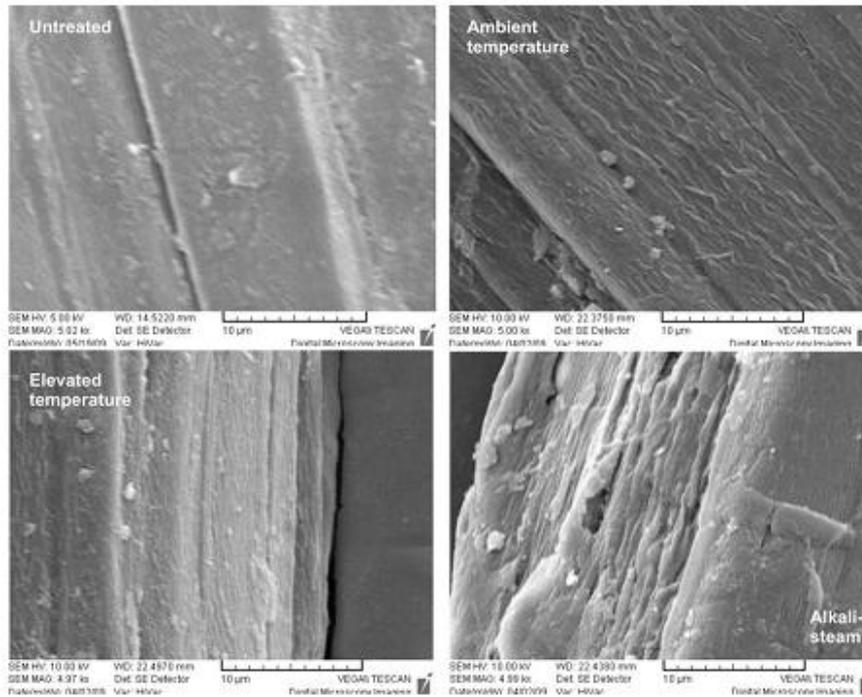


Figure 1.14, Imageries au MEB des fibres de jute non traité et fibres de jute traité d'après Prosenjit Saha et al [16].

Tableau 1.4 Comportement de la fibre de jute en milieu alcalin [16].

Epprouvete	Perte de masse, %	Cellulose	Hemicellulose	lignine
Non traitée		63	18	16
A	4	74	11	14
B	11	76	10	12
C	17	84	6	9

A: traitement alcalin à température ambiante, B: traitement alcalin à température élevée, C: traitement à la vapeur alcaline

1.6 LES BETONS LEGERS

La famille des bétons légers regroupe plusieurs types de composites dont la matrice peut être à base de liant hydraulique ou de résine synthétique. Leur masse volumique varie de 300 à 1900 kg/m³, alors que la masse volumique d'un béton classique varie de 2200 à 2500 kg/m³. Une classification donnée par Lafarge Bétons Granulats est donnée dans la figure 1.15 [17].

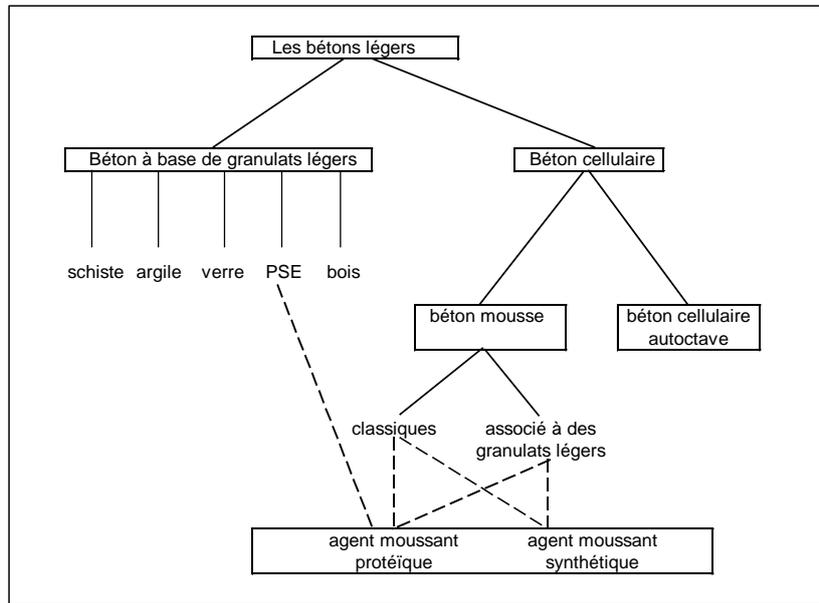


Figure 1.15, Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats [17]

Le béton léger possède des propriétés qui lui confèrent de nombreux avantages par rapport aux autres matériaux de construction traditionnels. Depuis plus de 50 ans, ce produit a été largement employé dans des travaux de construction et de rénovation, grâce à son poids très faible, sa bonne résistance, sa bonne isolation thermique et son incombustibilité. De nos jours, des recherches se multiplient afin de définir des bétons légers de structure susceptibles d'être utilisés pour la réalisation d'éléments de contreventement. Citons comme exemple l'étude de Geoffrey Promis [18] qui, dans son travail de recherche intitulé "Composites fibres/matrice minérale : du matériau à la structure", axé sur le développement de composites à liant phosphatique et fibres de renfort en verre E pour diverses applications structurales en Génie Civil. L'étude confirme qu'en raison de la bonne résistance en compression de ce type de composite, il accomplirait l'usage de matériau de structure quant au fonctionnement mécanique d'une telle ossature porteuse. Différentes études démontrent l'intérêt de ces matériaux dans la réalisation de panneaux sandwichs, lors de la réalisation de cloisonnements. Le gain en masse volumique permet en effet, la réduction de masse des éléments de structure et des éléments secondaires et ainsi, la réduction correspondante des fondations. Les bétons de masse volumique faible procurent également une meilleure isolation thermique qu'un béton ordinaire.

1.6.1 Fonctionnalisation des bétons légers

Trois catégories sont distinguées dans le cas des bétons de granulats légers : Béton léger de construction, béton léger pour la construction et l'isolation (isolant porteur) et béton léger

d'isolation (isolant) [19]. Dans le cas des bétons cellulaires, seules les dernières catégories sont définies. Cette classification a essentiellement pour objet d'orienter les essais de caractérisation.

Tableau 1.5, Classification fonctionnelle pour les bétons de granulats légers

Classe	I	II	III
Type de béton	Construction	Construction et isolant	Isolant
Masse volumique sèche ⁽¹⁾ (kg/m ³)	< 2000	Non précisée	Non précisée
Résistance à la compression ⁽²⁾ (MPa)	> 15,0	> 3,5	> 0,5
Coefficient de conductivité thermique (W/mK)	-	< 0,75	< 0,3

D'après les recommandations de la RILEM N°10-2 pour (1) et N°4 pour (2) de Novembre 1975.

En ce qui concerne la Classe I (tableau 1.5), dans certains pays, la résistance à la compression est inférieure à 15 MPa.

Les masses volumiques des classes II et III ne font pas l'objet de spécifications. Les critères pour ces catégories sont la résistance à la compression et le coefficient de conductivité thermique.

Tableau 1.6, Classification fonctionnelle pour les bétons cellulaires autoclavés.

Classe	II	III
Type de béton	Construction et isolant	Isolant
Masse volumique sèche (kg/m ³)	Non précisée	Non précisée
Résistance à la compression ⁽¹⁾	> 2,5 ⁽²⁾ [MPa]	> 0,5
Coefficient de conductivité thermique	< 0,75 [W/mK]	< 0,3

(1) Résistance mesurée sur cubes, suivant les spécifications de RILEM N°24

(2) Dans certains pays, la résistance à la compression peut être inférieure à 2,5 MPa.

La masse volumique peut donc être déterminée pour information ou calcul des charges, mais non comme critère de classification du pouvoir isolant du béton. A masse volumique égale, un béton peut être plus isolant qu'un autre. Les valeurs retenues pour différencier ces catégories sont données dans le tableau suivant.

1.7 LES MATERIAUX COMPOSITES

Les matériaux de construction doivent, de nos jours répondre à des exigences de plus en plus sévères vis à vis de performances mécaniques, de durabilité, d'ouvrabilité, d'environnement et d'aspect. En effet, la technologie du béton ne cesse de faire appel à des recherches illimitées dans les domaines de matériaux de construction et de structures.

Le développement des agro-industries augmente la quantité de déchets produite dont la plupart n'est pas correctement gérée. Peu de travaux ont été réalisés pour développer l'utilisation de ces déchets dans la production de matériaux de construction en substitution des matériaux traditionnels qui sont confrontés à l'épuisement. L'exploitation des déchets de ressources végétales dans des secteurs socioéconomiques fait partie des objectifs visés par le développement durable. Parmi ces ressources on peut particulièrement citer les quantités importantes de coproduits lignocellulosiques actuellement peu valorisés et dont la transformation en matière première ne peut avoir qu'un impact positif.

Différents types de déchets agricoles et végétaux, après avoir été traités ont été utilisées comme particules et fibres pour renforcer le béton et le mortier. Ces composites ont plusieurs applications potentielles telles que isolation acoustique et thermique, revêtement de résistance au feu et revêtement de résistance aux chocs.

Les composites sont des matériaux de créativité et de compétitivité. La matrice peut être métallique, élastomère, polymère ou céramique et le renfort peut être souple ou rigide sous forme de particules ou de fibres de différentes dimensions offrant ainsi aux industriels et aux concepteurs la possibilité d'associer fonction, forme et matériaux.

L'intérêt principal de l'utilisation des composites réside dans leurs excellentes caractéristiques spécifiques telles que modules d'élasticité, masse volumique, ductilité et résistances mécaniques.

Nous pouvons distinguer trois grandes familles de matériaux composites utilisés pour la réalisation de nouvelles structures en fonction de leurs formulations et de leurs applications :

- Composites souples
- Composites rigides
- Composites à matrice minérale

1.7.1 Composites à matrice polymère

Les ouvrages innovants mettant en œuvre des matériaux composites ont pour objectifs :

- De développer des multi-matériaux pour assurer des multifonctionnalités (confort, sécurité, durabilité).
- D'améliorer les performances des ouvrages pour ouvrir de nouveaux champs d'applications (physique, mécanique, tenue à l'environnement, comportement sous sollicitations extrêmes)
- De prévoir le cycle de vie pour s'intégrer dans le contexte du développement durable (durée de vie, aptitude au recyclage, coût énergétique) [20].

1.7.1.1 Composites souples

Les composites souples combinent une matrice polymère et un renfort textile. La figure 1.16 décrit quelques cas d'applications de composites à matrices thermoplastiques renforcées avec des fibres polymères (telles que PET, polyester, aramide...) ou fibres minérales (telles que fibres de verre). Ces structures se présentent sous la forme de géotextiles et géo-membranes ou membranes souples. Les deux secteurs d'application les plus concernés par ces matériaux composites sont les géotechniques (membranes étanches ou interfaces entre sol et structure) et l'architecture tensile (structures gonflables, structures tensiles).

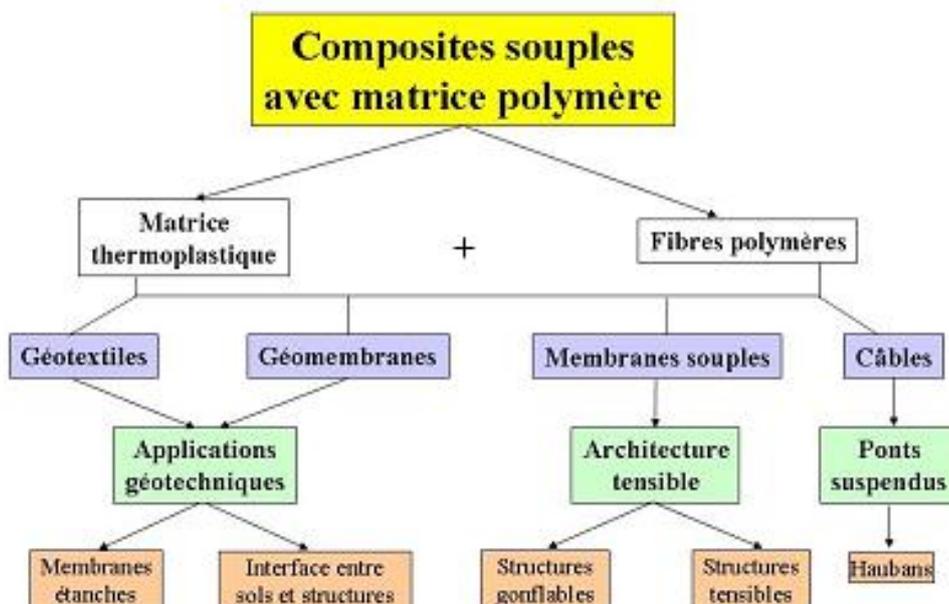


Figure 1.16, Structures souples [20]

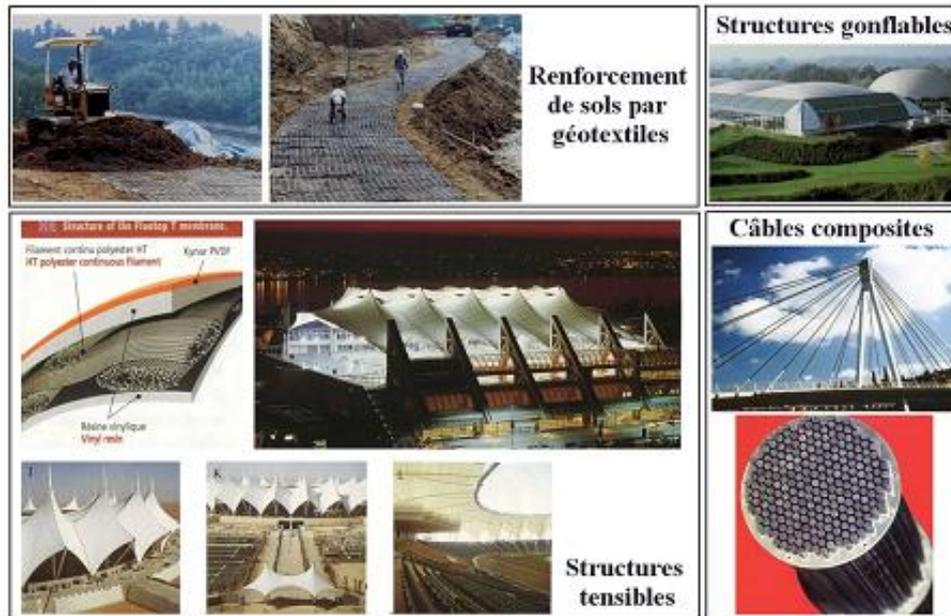


Figure 1.17, Quelques exemples de structures souples [20].

La figure 1.17 présente quelques exemples de structures souples. Ces systèmes composites présentent essentiellement des propriétés en traction (comportement de membrane) et en ténacité (tenue à la déchirure améliorée). Il faut également souligner une bonne stabilité physico-chimique (tenue à la corrosion, étanchéité, ou semi étanchéité contrôlée...).

Dans un environnement urbain, les principaux problèmes technologiques sont liés à la durabilité et aux propriétés autonettoyantes. Il est également nécessaire d'améliorer les propriétés acoustiques et thermiques ainsi que le comportement au feu.

1.7.1.2 Composites rigides

Ces composites rigides combinent des matrices polymères et charges minérales à des renforts textiles ou en association avec des polymères expansés dans le cas des structures sandwiches (figure 1.18). Les formulations de béton polymère peuvent être utilisées pour de nombreuses applications dans le domaine des revêtements routiers et des fondations spéciales (milieux agressifs). Aujourd'hui, l'un des marchés potentiels les plus intéressants se situe autour des nouveaux bâtiments avec un bilan énergétique positif où les objectifs techniques sont orientés vers la multifonctionnalité (une combinaison de performances structurelles et de propriétés physiques) et vers l'intégration de matériaux intelligents tels que les cellules et les capteurs dans les panneaux solaires.

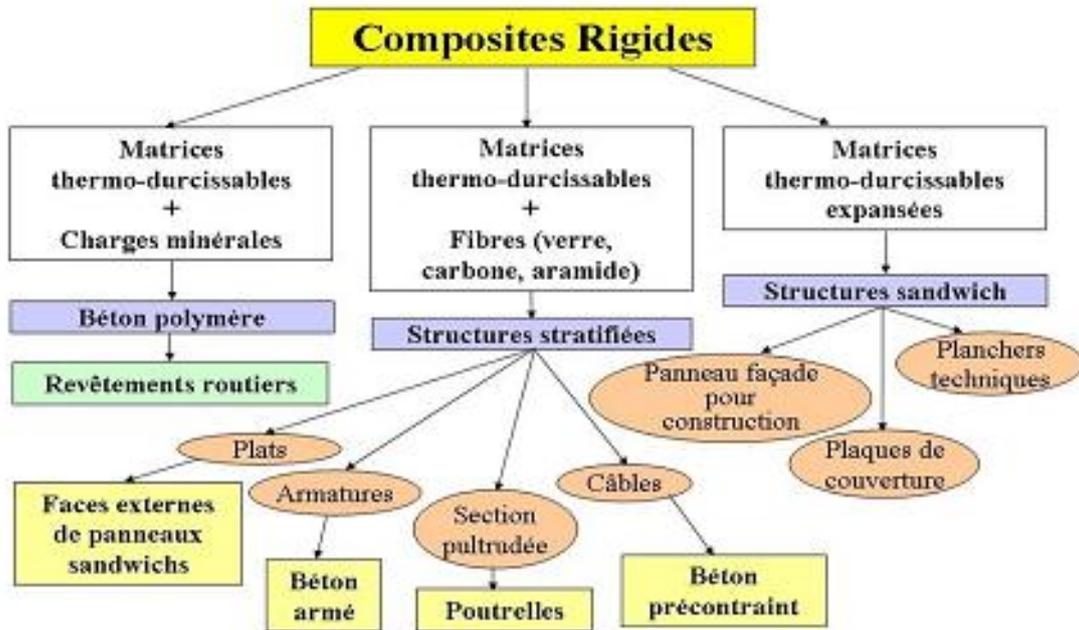


Figure 1.18, Structures rigides [20]

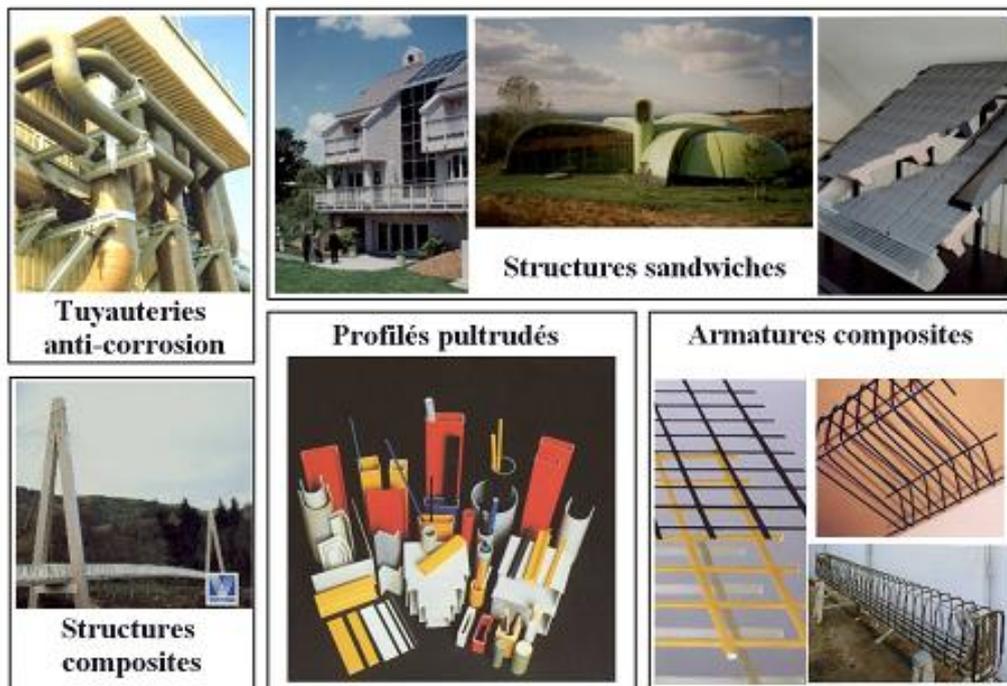


Figure 1.19, Quelques exemples de structures rigides [20]

L'étude de Abdallah Mir [21] est un exemple, partant d'une approche d'actualité basée sur une logique d'éco-conception et de mise en valeur de la gestion des ressources renouvelables dans les pays peu industrialisés, il s'est intéressé à la conception d'un nouveau matériau composite de type stratifié jute/époxy pouvant être utilisé dans le domaine de la construction

et du transport. Dans cette étude le renfort est constitué par du tissu de jute naturel et l'âme est constituée par le liège.

Quelques exemples de structures faisant intervenir des composites rigides sont illustrées dans la figure 1.19. La variété des structures montrent l'importance du rôle joué par ces composites dans la substitution des matériaux traditionnels et en particulier l'usage non économique du béton.

1.7.2 Composites à matrice minérale

La dernière famille de matériaux composites rigides concerne les composites fibres/ciment pour lesquels les matrices polymères sont remplacées par des matrices minérales (liants phosphatiques, liants sulfatiques, liants magnésiens). En effet, l'ajout de fibres dans le but de renforcer les matériaux de construction est une technique ancienne nos prédécesseurs ont utilisé la paille pour renforcer l'argile et le crin (poils de chevaux) pour renforcer différents mortiers et plâtres [22, 23] ces différents types de fibres ouvrent un grand intérêt pour la substitution de la fibre d'amiante qui présente un grand danger pour la santé humaine.

Le renforcement du béton par des fibres est devenue une pratique de plus en plus courante et leurs applications sont développées grâce à leur capacité prouvée par l'expérience, à limiter et à contrôler la fissuration tant au jeune âge que sous sollicitations mécaniques, à améliorer la résistance à la flexion, à la traction, au choc, aux vibrations ainsi que la résistance à la fragmentation et la ductilité.

Différents types de fibres ont été utilisées; dont les fibres d'amiante, les fibres de verre, les fibres d'acier, les fibres de polypropylène, les fibres de carbone et certaines fibres végétales.

La fabrication de demi-produits pultrudés (figure 1.20) se développe essentiellement aux Etats Unis et au Canada où le marché est adapté à l'investissement industriel. En continuité avec ces développements amorcés aux USA et au Japon, des armatures passives (treillis, barres, cadres...) réalisées à partir de combinaisons de fibres de verre, fibres de carbone et de matrices époxydiques et vinylesters ont fait leur apparition.

En Algérie les ressources forestières étant limitées, on se trouve dirigé vers l'utilisation de fibres de récupération et celles des plantes annuelles.

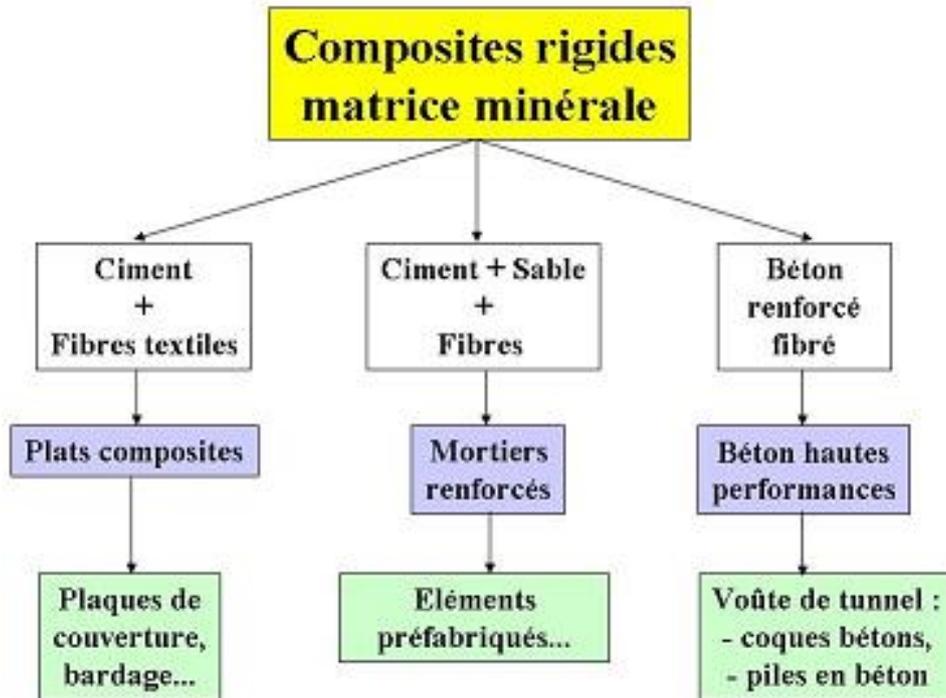


Figure 1.20, Composites rigides à matrice minérale [20]

Les performances des mortiers et des bétons de fibres sont bien connues et exploitées à ce jour, notamment dans le cas des bétons à très hautes performances. L'amélioration des propriétés en traction, la modification des mécanismes de fissuration, la compensation des comportements fragiles dus à la haute résistance par le contrôle du comportement non linéaire « post-pic » pour dissiper de l'énergie sont autant de points forts mis en avant. L'industrie textile fournit d'important effort de recherche dans le développement de renforts 2D et 3D adaptés à la réalisation de pièces industrielles. Ces produits qui représentent un tonnage important de composants du bâtiment (cloisons, gaines...) présentent des propriétés nettement améliorées vis-à-vis de conditions indispensables durant la vie des structures et leur mise en service, telles que l'incendie et sont nettement mieux adaptés aux conditions de recyclage.



Figure 1.21, Quelques exemples de structures rigides à matrice minérale [20]

1.7.3 Utilisation des composites dans les travaux de réhabilitation

Les pathologies des bâtiments et infrastructures existants, les modifications des conditions d'exploitation et de nouvelles conditions accidentelles exigent l'entretien, la protection, la réparation et le renforcement. Les matériaux composites sont bien adaptés à ces objectifs. Leurs performances mécaniques, en particulier en traction, leur légèreté (qui ne surcharge pas la structure en cours de réparation) et leur adhérence sur béton ou maçonnerie sont les principaux atouts de ces matériaux. L'objectif est donc d'exploiter les potentialités de ces systèmes composites dans le but de protéger, réparer, renforcer et contrôler les ouvrages existants. Différentes méthodes de réhabilitation de structures par matériaux composites permettent de pallier les inconvénients des méthodes conventionnelles (chemisage par béton armé, chemisage en acier, tôles collées, précontrainte additionnelle...), avec des performances mécaniques supérieures (figure 1.22). À titre d'exemple, les méthodes de renforcement les plus utilisées en France sont la mise en place de tissus stratifiés au contact ou le collage de plats pultrudés (figure 1.23). La stratification au contact est une technique manuelle qui consiste à placer le composite directement sur l'élément à renforcer. Le collage de plats pultrudés se caractérise par la pose de plaques de composite collées sur une surface en béton par des résines époxydiques à forte viscosité [24].

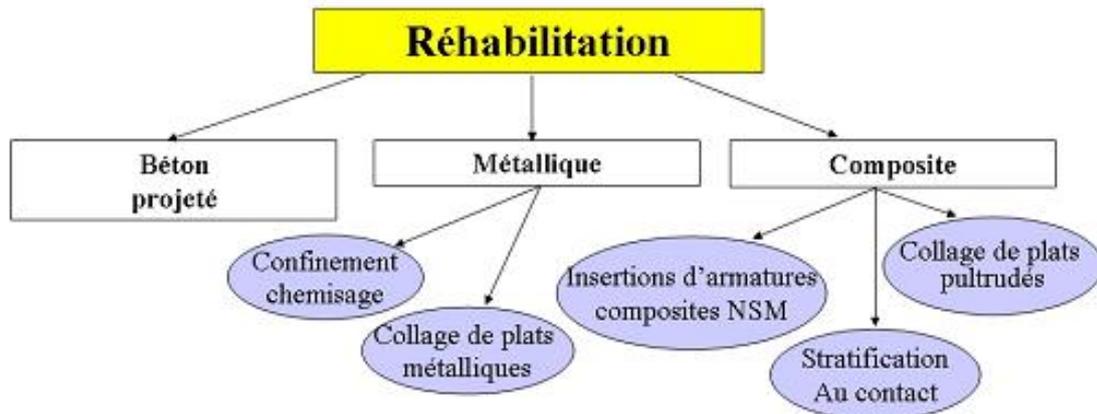


Figure 1.22, Utilisation des composites dans le domaine de réhabilitation.

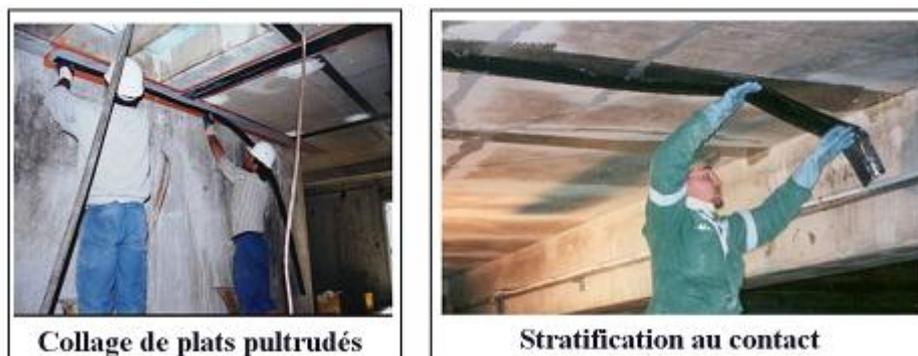


Figure 1.23, Réparation et renforcement par matériaux composites [25].

1.7.4 Les composites fibres/ciment

1.7.4.1 Composites fibres végétales/ciment

Les fibres naturelles ont déjà été utilisés pour la première fois il ya 3000 ans dans les systèmes composites par les anciens égyptiens, où la paille et l'argile ont été mélangés ensemble pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites cimentaires renforcés par des fibres naturelles ont connu une attention croissante, à la fois du monde académique et de diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être appliqués en tant que renfort ou que remplissage (figure 1.24).

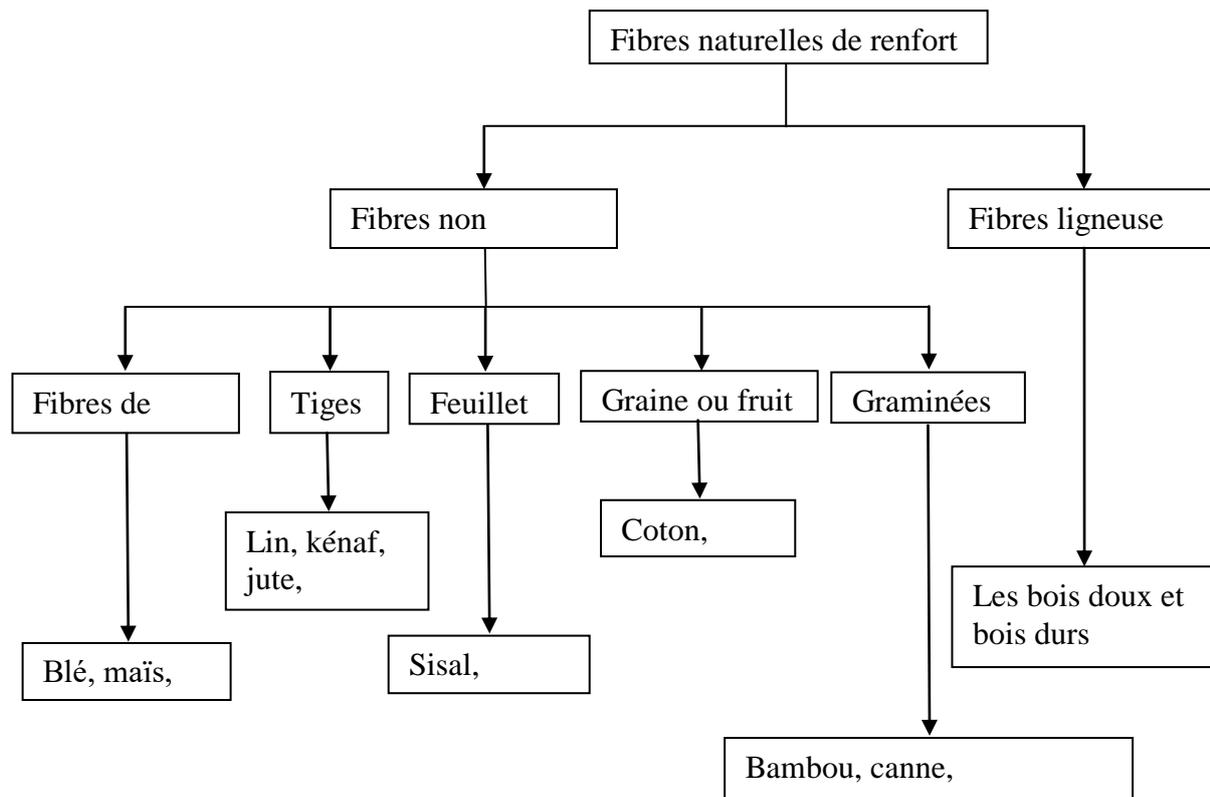


Figure 1.24, Organigramme de classification des fibres naturelles

Merzoud M. et Habita M.F [26] ont étudié la faisabilité d'un composite à matrice cimentaire renforcé de fibres de diss. Les résultats obtenus montrent qu'après traitement, la fibre de diss est favorable pour la confection d'un matériau composite ciment/fibre de diss pouvant être utilisé dans la fabrication d'éléments de remplissage.

A. Kriker et al [27,28] ont également étudié l'effet des fibres de palmier dattier sur les propriétés mécaniques des bétons renforcés par ces fibres à savoir la résistance à la flexion et à la compression dans différents milieux hygrométriques. Les résultats ont montré que la présence de fibres dans le béton favorise la diminution de degré global des vides et des fissures aux premiers âges et que dans le milieu atmosphérique, l'indice de continuité diminue avec le temps pour chaque type de béton. Cette perte est surtout importante pour les bétons fibrés entre 7 et 28 jours. Ainsi, le degré global des vides et des fissures augmente avec l'âge. Néanmoins, cet indice est inférieur dans le cas du durcissement dans l'eau. Dans le cas de durcissement dans l'eau, par rapport au béton sans fibres, l'augmentation de la proportion et de la longueur de fibres a un effet bénéfique sur le comportement ductile. Les résultats expérimentaux de la résistance à la flexion de ces bétons témoignent de la grande efficacité des fibres pour ce type de sollicitation. O. Bahloul et al [29] dont le travail porte sur l'analyse des propriétés mécaniques et physiques des mortiers de ciment CPJ 45 à base de fibres cellulosique d'alfa à différents pourcentages volumiques à savoir 0.5, 1, 1.5, 2% et 3% pour

mettre en évidence la fraction de fibre optimale qui donnera au mortier les meilleures caractéristiques mécaniques. Les résultats de leur recherche montrent, d'une part que la résistance à la compression diminue en fonction de l'augmentation du taux de fibres; quant à la résistance en traction par flexion, les éprouvettes conservées à l'air du labo ont les meilleures performances comparées aux éprouvettes conservées dans l'eau douce et l'eau de mer. D'autre part, ils notent que l'augmentation du pourcentage de fibre diminue la valeur de la conductivité thermique λ , pour le mortier à 3% (en masse de ciment) de fibres, $\lambda = 0.8W/m^{\circ}C$ qui est une valeur assez proche des performances d'un isolant. Valenciano et al [30] ont réalisé qu'il est possible de remplacer jusqu'à 20% de ciment Portland par des cendres de bagasse de canne à sucre, matière lignocellulosique pour la confection d'un composite terre/ciment/poudre de canne à sucre, sans causer d'inconvénients pour la résistance à la compression du mélange. En outre, l'âge de 28 jours est recommandé d'être remplies, car il assure les meilleurs résultats en termes de résistance à la compression. Les résultats de Mesa.V et al [31] ont montré que l'ajout de matière lignocellulosique au mortier de ciment a diminué en grande partie sa résistance à la compression, le pire étant la fibre de canne à sucre de bagasse, en raison de sa teneur en sucre résiduel qui interfère dans le temps de prise du ciment.

Parmi les composites lignocellulosiques, l'écorce de riz présente une meilleure résistance mécanique. Leur travail montre que la résistance à la compression augmente avec l'âge à la fois des échantillons composites et la composition de traitement chimique appliquée autorisée par les normes brésiliennes. Dans la totalité des travaux réalisés, l'âge de 28 jours est recommandé d'être remplies.

1.7.4.2 Les composites amiante/ciment

En raison des performances exceptionnelles de l'amiante vis-à-vis de la résistance au feu (résistance mécanique à très haute température, incombustibilité), les fibres d'amiante ont été ajoutées au ciment de manière à obtenir un matériau composite performant, peu onéreux, imputrescible et résistant au feu. L'amiante/ciment est obtenu en mélangeant 90% de ciment et 10% d'amiante avec de l'eau. Ce matériau, breveté dès 1901, a surtout été utilisé à partir des années 1960, par la France. De nombreux produits ont été commercialisés, notamment des plaques planes ou ondulées, tuiles et panneaux de toiture, plaques et panneaux de cloisons intérieures, conduits de cheminées, tuyaux et canalisations... (figure 1.25).



Figure 1.25, Tôles ondulées et tuyaux en amiante/ciment

Aujourd'hui, les risques liés à l'amiante sont bien connus et l'industrie des composites fibres/ciment s'est tournée vers l'utilisation de fibres de renfort en verre afin de pallier aux problèmes environnementaux. Dès les années 1930, certains chercheurs ont eu l'idée de tirer parti de la résistance exceptionnelle du verre étiré pour renforcer les bétons. Toutefois, la forte sensibilité des fibres de verre à l'alcali-réaction a conduit à l'abandon provisoire de cette technologie.

1.7.4.3 Les composites fibres de verre/ciment

Vers les années 1960, des recherches portent sur la possibilité de traiter le verre standard (verre E) afin de le rendre stable en milieu alcalin. La société Pilkington achète les droits de cette nouvelle fibre de verre Alkali Résistante (AR), développée par Madjumdar. En plus d'un traitement au zirconium, les fibres d'un diamètre de 10 à 12 μm sont réunies entre elles par centaines puis ensimées. Cette opération protège les fibres de l'abrasion durant le malaxage et contre le développement excessif de cristaux agressifs à leur surface.

Pilkington développe au début des années 1971 des procédés de fabrication pour ces produits ciment/fibres (GRC de l'anglais Glass Reinforced Cement) en s'inspirant de l'industrie des plastiques renforcés. La France est l'un des pays industrialisé qui a donné une grande importance aux composites, vu leurs atouts multiples. Ainsi, le développement rapide des GRC depuis les années 1970 a conduit à l'élaboration d'un nouveau système breveté système Vetrotex-Saint-Gobain, développé en partenariat par le Centre de Recherche de Pont-à-Mousson et Vetrotex. Ce matériau est composé de fibre de verre AR dans un mélange de ciment, de polymères, d'adjuvants et d'ajouts spécifiques [32].

Selon Grandhaie. F [33], les faibles performances (fragilité, résistance en traction) du liant hydraulique sont compensées par l'utilisation de fibres de renfort afin de reprendre l'effort après la rupture de la matrice cimentaire.

L'interaction entre ces deux matériaux est conditionnée par l'ensimage des fibres. L'interface régule les phénomènes de mouillage et de pénétration des fibres par la matrice, afin d'obtenir

un transfert de charge satisfaisant. La macro-fissure de la matrice est reprise par les fibres qui viennent ponter la fissure et répartir l'endommagement au travers de multiples microfissures. Une forte réserve de déformation est ainsi obtenue et les propriétés de matériau vont dépendre de plusieurs facteurs tels que la quantité et la longueur du renfort et la compacité de la matrice [34]. Les matériaux fibres de verre/ciment constituent une famille de composites qui combinent la haute résistance en compression des mortiers avec les propriétés des fibres de verre. Cette formulation entraîne une amélioration des caractéristiques mécaniques (choc, ténacité, flexion, traction, etc.), le maintien d'une excellente ductilité dans le temps et la disparition des problèmes de vieillissement.

1.8 CONCLUSION ET CHOIX DE LA MATRICE

En conclusion, plusieurs recherches [35-40] réalisées dans ce domaine convergent vers la confirmation des atouts apportés par les fibres en termes de ductilité, de déformabilité et de résistance aux chocs pour les matrices cimentaires. De plus, les fibres de renfort limitent le retrait de la matrice lors de la phase de durcissement.

Le mortier est l'un des matériaux composites importants en maçonnerie. Il est responsable de la distribution homogène des charges au mur en maçonnerie, de la correction des irrégularités de fabrication des blocs de remplissage et adaptant les déformations thermiques associées aux retraits et dilatations. Selon la bibliographie, l'influence du mortier sur le comportement vis à vis de la résistance à la compression des murs en maçonnerie est très faible. Néanmoins, le mortier a une grande influence sur la force de liaison et la déformabilité de la maçonnerie ainsi que celle du mur. Cependant, la qualité de la liaison dépend non seulement des propriétés du mortier, mais également de l'état de l'unité de brique et de sa teneur en humidité au moment de la pose.

Dans ce travail ont été étudiées les caractéristiques des mortiers renforcés de fibre de jute. Pour aboutir à une maniabilité favorable, nous avons substitué 30% en masse du liant (ciment) par la chaux hydraulique naturelle pure NHL 5 qui s'adapte très bien aux différents supports et tout particulièrement au bâti ancien. Elle favorise les échanges gazeux à l'intérieur des murs et régule l'humidité à l'intérieur des habitations. Elle contribue au confort des habitations en participant à l'isolation thermique et phonique et possède des propriétés désinfectantes. Grâce à la finesse de ses grains, elle donne des mortiers souples et onctueux et qui adhèrent bien au support. Ainsi, cette chaux permet la réalisation de mortiers traditionnels, recommandés dans la restauration et la réhabilitation de bâtiments anciens, montage de pierres et de briques, rejointoiement, pose de tuiles et enduits.

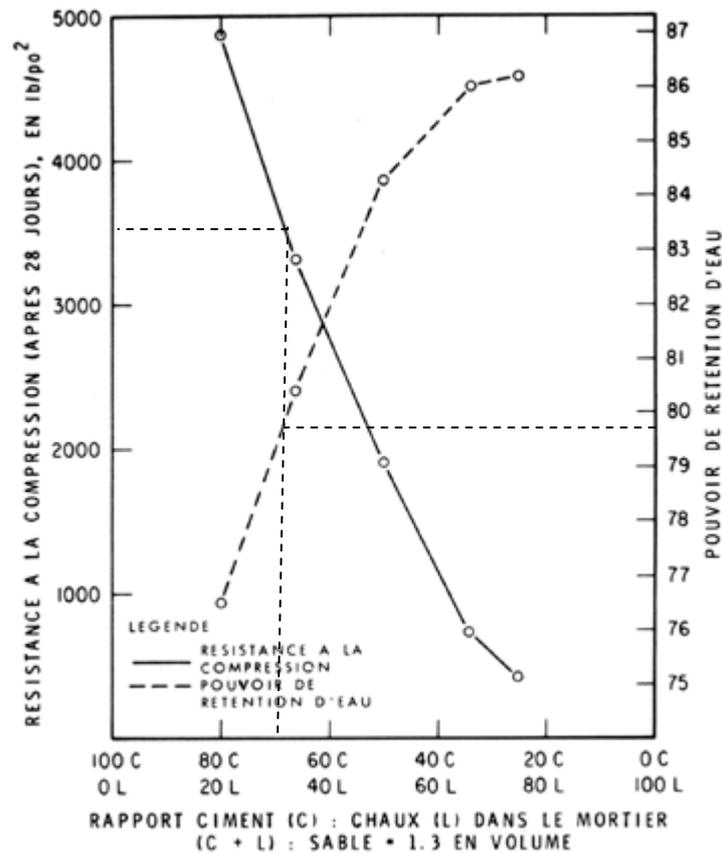


Figure 1.26, Relation entre la composition du mortier, la résistance à la compression et le pouvoir de rétention d'eau [41].

(En pointillé, est illustré la situation des composites élaborés dans cette étude d'après hyperbrick docu-004 [41]. Soit une résistance à la compression d'environ $3500 \text{ lb/po}^2 = 24.13 \text{ MPa}$ et un pouvoir de rétention d'eau de l'ordre de 79.7%).

La figure 1.26 est une référence recommandée par Hyperbrick [41] pour faciliter au concepteur qui sait exactement quelles qualités il veut obtenir, de trouver quel mortier il lui faut.

En effet, les éléments de maçonnerie ont un pouvoir absorbant, ce qui fait que l'eau est extraite du mortier dès que ces éléments et le mortier sont mis en contact. Le taux d'absorption cependant, et par conséquent la quantité d'eau extraite du mortier, varie considérablement. Comme la perte d'une quantité d'eau trop importante peut réduire l'ouvrabilité à tel point que le mortier ne peut plus former un rejointoiement complet avec l'élément suivant, l'ouvrabilité et le pouvoir de rétention d'eau devraient être adaptés aux caractéristiques d'absorption des éléments de maçonnerie.

Dans ces conditions, des mortiers ayant une ouvrabilité et un pouvoir de rétention d'eau importants sont exigés. Les conditions atmosphériques devraient aussi être prises en compte dans la composition du mortier. Au cours des périodes chaudes et sèches le mortier doit avoir

un bon pouvoir de rétention pour compenser en partie la perte d'eau par évaporation. En hiver, un pouvoir de rétention plus faible est souhaitable.

La durabilité des structures demeure un problème qui menace les matériaux de construction, en particulier la maçonnerie. Les normes européennes contemporaines de mortier de maçonnerie sont vagues et laissent des insuffisances pour la spécification des exigences qui doivent être remplies par le mortier de maçonnerie pour assurer la durabilité des murs dans certaines conditions de performance. Plusieurs études [42 - 44] confirment l'amélioration de l'ouvrabilité et de la structure des mortiers ciment-chaux comparés aux mortiers de ciment, mais entraînent une diminution des performances mécaniques.

P. Maravelaki-Kalaitzaki et al [44] ont proposé un mortier à base de chaux hydraulique pour la réparation et la restauration d'anciens bâtis historiques. Ce mortier de réparation présente une résistance à la compression inférieure à celle de la pierre, mais de valeur située dans des limites acceptables pour une telle application et un module d'élasticité similaire. De même, le mortier de réparation indique une distribution de taille de pores et un coefficient d'absorption capillaire similaires au mortier d'origine et de celui de la pierre. L'absence de sels solubles dans le mortier de réparation après une période d'application de trois ans, avec le développement des phases hydrauliques tels que des hydrates de silicate de calcium, et la cohérence observée entre la structure ancienne et la structure réparée favorisent en outre l'emploi des mortiers de chaux hydrauliques.

Dans cette étude, les critères recherchés pour le matériau élaboré sont la ductilité, une maniabilité convenable pour un enduit à maçonner et une bonne adhérence aux éléments de la maçonnerie. Cependant, les caractéristiques mécaniques élevées telles que résistance à la compression et résistance à la flexion ne sont pas indispensables. C'est pourquoi, nous avons substitué un taux de 30% du liant (ciment) par la chaux hydraulique afin de pallier aux inconvénients engendrés par la présence d'une fibre naturelle à caractère adsorbant.

2.1 INTRODUCTION

La maçonnerie produite et utilisée dans la région Est du pays fait partie de l'intérêt de ce travail. L'objectif visé est, d'une part la caractérisation intrinsèque du matériau qui est la brique en terre cuite ainsi que le comportement en compression des murets fabriqués avec ces éléments de remplissage, et d'autre part, l'élaboration de matériaux composites à matrice cimentaires renforcés de fibres de jute à usage d'enduit pour revêtement des murs en maçonnerie.

Dans ce chapitre sont déterminés les caractéristiques des matières premières, les procédés de fabrication des composites et les techniques expérimentales employées.

Elles concernent essentiellement les propriétés physico-chimiques, physico-mécaniques ainsi que les paramètres de transfert hydrique et thermique. Après la caractérisation des composites élaborés, on s'est intéressé à leur comportement mécanique.

2.2 MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LA CONSTRUCTION DES MURETS

Dans cette première partie, un protocole d'essai a été mené dans le but de la caractérisation de la maçonnerie. Il s'agit des tâches suivantes :

1. Essais de caractérisation des matériaux utilisés:
 - a) Eléments de maçonnerie: Briques creuses de la région d'Annaba produites par la "Briqueterie E'rym";
 - b) Ciment;
 - c) Sable;
 - d) mortier de ciment.
2. Essais de compression sur murets en briques creuses 8 trous sans enduit.
3. Essais de compression sur murets en briques creuses 8 trous avec enduit de ciment.
4. Essais de compression sur murets en briques creuses 8 trous avec enduit renforcés par une nappe en toile de jute.
5. Essais de compression sur murets en briques creuses 12 trous sans enduit.
6. Essais de compression sur murets en briques creuses 12 trous avec enduit de ciment.
7. Essais de compression sur murets en briques creuses 12 trous avec enduit renforcés par une nappe en toile de jute.

2.2.1 Eléments de maçonnerie

La brique en terre cuite est un produit naturel qui présente de bonnes propriétés techniques telles qu'une bonne résistance au feu et une bonne isolation thermique et acoustique.

La brique utilisée est un produit local, fabriqué à partir de matières premières naturelles issues directement du sol. En Algérie, les briqueteries sont réparties de sorte qu'il n'est pas nécessaire de transporter les produits sur de longues distances. Néanmoins, le souci de l'environnement, n'est pas seulement de limiter le transport, mais également de réduire l'influence du processus de production sur l'environnement (économie en matières premières, application des techniques de purification des fumées de gaz, économie d'énergie...). A l'heure actuelle, on parle beaucoup de durabilité. La brique est un atout pour la durabilité. En effet, un ouvrage durable doit être considéré comme un ensemble qui, durant sa construction, son usage et sa phase de démolition, engendre peu de perturbations environnementales.

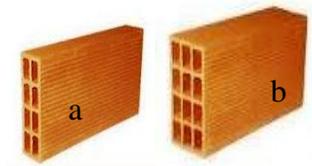


Figure 2.1 Types de briques utilisées, a: Brique 8 trous, b: Brique 12 trous.

La brique est un matériau qui dispose d'une durée de vie quasi illimitée. Elle ne requiert pas d'entretien. La maison en briques bénéficie d'un confort intérieur incomparable. La maçonnerie de terre cuite offre une isolation thermique inégalée, une bonne isolation acoustique, la plus haute résistance au feu, un climat intérieur sain, une construction inusable. La brique peut être réutilisée aussi bien en restauration que pour un usage dans des bâtiments neufs. Elle peut en outre être recyclée et affectée à des travaux de gros œuvres ou réintroduite dans le processus de fabrication de nouvelles briques.

Tableau 2.1 Dimensions des éléments de remplissage (longueur L, Largeur E, Hauteur H, et Epaisseur de paroi e, à une précision de $\pm 0,5$ cm près)

Type de brique	(L) cm	(E) cm	(H) cm	(e) cm
Brique 8 trous	30	10	20	0,5
Brique 12 trous	30	15	20	0,5

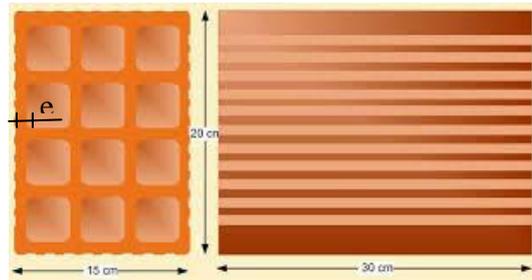


Figure 2.2 Dimensions normalisées des éléments de maçonnerie utilisés, exemple de la brique à 12 trous.

2.2.1.1 Masse volumique apparente [45]

L'essai est réalisé sur un échantillon extrait du matériau. La valeur considérée est le résultat de la moyenne de 6 manipulations, calculée par l'équation (2.1).

$$m_{app}^v = \frac{M}{V_{app}} \quad (2.1)$$

Chaque éprouvette est séchée par étuvage à 105°C jusqu'à masse constante (M), ensuite pesées à 0,1% près. Le volume apparent (V_{app}) est déterminé par immersion des échantillons dans la paraffine à l'état liquide, ensuite introduit dans d'un récipient gradué remplie d'un volume (V_1) d'eau, le volume de l'échantillon (V_{app}) est la différence ($V - V_1 - V_p$) où V est le volume total dans le récipient après introduction de l'échantillon couvert de paraffine et V_p le volume de la paraffine ayant adhéré à l'échantillon (Norme NBN B24.206). La valeur calculée de la masse volumique apparente des unités de briques est de l'ordre de 1000 kg/m³.

2.2.1.2 Masse volumique absolue [46]

La masse volumique absolue est définie comme étant la masse de l'unité de volume sans les vides et les pores. Le procédé de calcul est le suivant:

1. Séchage de l'échantillon par étuvage.
2. Broyage de l'échantillon.
3. Détermination de sa masse (M) à 0,1 % près.
4. Introduit dans un récipient en verre rempli d'eau jusqu'à un volume (V_1) connu, de la masse (M) et lecture de la 2^{ème} valeur du volume (V_2).
5. Détermination du volume absolue par la différence ($V_2 - V_1$) = V_{abs}
6. Calcul de la masse volumique absolue par la formule (2.2):

$$m_{abs}^v = \frac{M}{V_{abs}} \quad (2.2)$$

La valeur de la masse volumique des unités de briques creuse est de l'ordre de 1300 kg/m³.

2.2.1.3 Capacité d'absorption d'eau pondérale

L'essai consiste à déterminer le taux d'absorption d'eau pondéral (CAE_p) des unités de brique. Il est défini comme étant le rapport entre la masse d'eau absorbée par l'échantillon de brique séché et la masse sèche de l'échantillon. Il est exprimé en pourcentage à l'aide de l'équation (2.3), selon la norme NF P18- 555 [46].

$$CAE_p = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100(\%) \quad (2.3)$$

Où

M_1 : la masse de l'échantillon séché et stable à 105°C.

M_2 : la masse de l'échantillon immergé pendant 24 heures dans l'eau et séché à l'aide d'une éponge jusqu'à l'état imbibé.

La valeur expérimentale moyenne du CAE_p est de 12,2% pour les briques à 8 trous et de 13,6% pour les briques à 12 trous.

2.2.1.4 Capacité d'absorption d'eau volumique

Elle est définie comme le rapport entre la masse d'eau absorbée par l'échantillon de brique séché et son volume apparent. Il est exprimé en pourcentage à l'aide de l'équation (2.4), selon la norme [46].

$$CAE_v = \frac{M_2 - M_1}{V_{app}} \times 100(\%) \quad (2.4)$$

La valeur expérimentale moyenne du CAE_v est de 11,05% pour les briques à 8 trous et de 9,6% pour les briques à 12 trous.

2.2.1.5 Capacité d'absorption d'eau par capillarité [47]

L'essai a pour objectif la détermination d'un critère permettant d'apprécier le pouvoir de succion d'un matériau au contact du mortier d'assemblage. L'essai est exécuté dans un local à la température de 20°C sur 5 échantillons au minimum. Ces derniers sont séchés à l'étuve à la température de 105°C ± 5°C jusqu'à masse constante. La masse m_1 de chaque échantillon séché est déterminée à 0,02% près. Les échantillons sont ensuite introduits pendant 10 minutes suivant la face de pose dans un plan horizontal rempli d'eau de telle manière que la face se trouve en contact sur une hauteur de 5mm du niveau d'eau. Le matériau est pesé 0,02% près; soit m_2 la masse déterminée.

Le pouvoir de succion d'eau exprimé en g/cm² est caractérisé par le coefficient CAE_c donné par la formule (2.5).

$$CAE_c = \frac{(m_2 - m_1) \times 100}{S\sqrt{t}} \quad (2.5)$$

Où

S: est la surface horizontale mouillée en cm²

t: est le temps d'immersion en minutes

m_1, m_2 : les masses en g

La valeur expérimentale moyenne du CAE_c est de 1,14% pour les briques à 8 trous et de 1,6% pour les briques à 12 trous.

2.2.1.6 Résistance à la compression des unités de brique

Cet essai a pour objet la détermination de la résistance à la compression ou résistance d'écrasement d'un bloc entier ou de la superposition de 2 moitiés d'une brique ou bloc que l'on veut tester [48]. Les éprouvettes, après préparation, sont posées et centrées sur le plateau d'une machine d'essai de compression. Une charge uniformément répartie est appliquée et augmentée de façon continue jusqu'à la rupture. Le nombre minimal d'éprouvettes doit être de six. La résistance à la compression f_c est déterminée par la formule (2.6):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2.6)$$

Où

F: est la charge maximale atteinte (en N)

A_c : est la surface soumise à la charge (en mm^2) qui correspond à la surface brute des éléments pleins ou à la surface nette des éléments comportant des empreintes devant, en œuvre, être remplis de mortier, lorsque celle-ci représente 35% au minimum de la surface brute.



Figure 2.3 Machine d'essai de compression (Presse hydraulique LGC. UBMA)



Figure 2.4 Essais de compression, a: centrage des éprouvettes, b: rupture des briques à 8 trous, c: rupture des briques à 12 trous.

Les unités de briques à 8 trous présentent une surface moyenne brute sollicitée par l'effort de compression d'environ 79% de la surface apparente, tandis que les unités de brique à 12 trous en présentent 71% (après soustraction de la surface des rainures destinées à assurer la bonne liaison brique-mortier). Les valeurs moyennes des résistances sont respectivement de 2,44MPa pour la brique à 8 trous et 2,82MPa pour la brique à 12 trous.

2.2.2 Mortier utilisé dans la construction des murets

2.2.2.1 Sable :

2.2.2.1.1 Echantillonnage du sable:

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble.

Le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps [49]:

1. Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai proprement dit.
2. Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ. Le prélèvement sera effectué en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

2.2.2.1.2 Analyse Granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.



Elle s'applique à tous les granulats de dimensions nominales inférieures ou égales à 63 mm, à l'exclusion des fillers. L'essai [50] consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures normalisées sont décroissantes du haut vers le bas (figure 2.5).

Figure 2.5 Ensemble agitateur et tamis normalisés pour l'analyse granulométrique.

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Le tamisage électrique est réalisé par un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales.

Tableau 2.2 Série de tamis employés pour l'analyse granulométrique norme EN 933-2

Tamis [mm]	0	0,063	0,08	0,1	0,125	0,160	0,2	0,25	0,315
Tamis [mm]	0,4	0,5	0,63	0,8	1	1,25	1,6	2	2,5
Tamis [mm]	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	14	15
Tamis [mm]	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125

La norme actuelle [51] préconise, pour l'analyse granulométrique, la série de tamis représentée dans le tableau 2.2.

2.2.2.1.3 Module de finesse (MF):

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Il est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur une série de tamis. Le tableau 2.3 présente la série de tamis employés pour la caractérisation du module de finesse selon la norme prise en compte [52].

Tableau 2.3 : Série de tamis employés pour le calcul du module de finesse

Norme	Tamis (mm)					
NF P 18- 540	0,16	0,315	0, 63	1,25	2,5	5
EN 12620	0,125	0,25	0,5	1	2	4

Un bon sable pour béton doit avoir un module de finesse situé entre 2,2 et 2,8. Une valeur inférieure à 2,2 indique un sable à majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. Une valeur supérieure à 2,8 indique que le sable manque d'éléments fins et le béton y perd en ouvrabilité [52].

2.2.2.1.4 Equivalent de sable (E_s)

La teneur en fillers silico-calcaire ou argileux est un paramètre important pour la composition des mortiers.

La mesure de l'équivalent de sable (E_s) [53] qui quantifie la propreté de celui-ci consiste à séparer les particules fines argileuses contenues dans le sable des éléments grossiers.

$E_s < 60$ Sable argileux - Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité

$60 < E_s < 70$ Sable légèrement argileux - de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait

$70 \leq E_s < 80$ Sable propre - à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

$E_s > 80$ Sable très propre - l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Dans le cas du sable utilisé, $E_s = 68$

2.2.2.1.5 Masse volumique

La masse volumique apparente c'est la masse d'un volume connu de sable en vrac y compris les pores inter-granulaires.

La masse volumique absolue représente le rapport de la masse sèche au volume de la matière solide (sans pores). La méthode utilisée est celle de l'éprouvette graduée qui consiste à remplir une éprouvette graduée d'un volume $V_1 = 100 \text{ cm}^3$ d'eau, y introduire une masse sèche de sable $M = 50\text{g}$ en éliminant avec soin toutes les bulles d'air [46]. Après lecture du nouveau volume V_2 , on détermine la masse volumique absolue par la relation (2.7):

$$m_{abs}^v = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (2.7)$$

La masse volumique absolue du sable en question est de l'ordre de $2,6 \text{ g/cm}^3$.

La masse volumique apparente du sable en question est de l'ordre de $1,6 \text{ g/cm}^3$.

2.2.2.2 Ciment :

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé de type CPJ-CEMII/A 42.5 de H'djar-Essoud. Sa composition chimique et minéralogique sont données par la fiche technique du laboratoire de l'usine représenté au tableau 2.3.

Tableau 2.4 Caractéristiques du ciment utilisé dans la construction des murets

Composition chimique et minéralogique, % masse		Caractéristiques physiques et mécaniques			
		Masse volumique apparente [kg/m ³]	1020		
Cao	60,41	Masse volumique absolue [kg/m ³]	3000		
SiO ₂	21,91	Consistance normale [%]	27		
Al ₂ O ₃	5,19	Surface Spécifique Blaine [cm ² /g]	3480		
Fe ₂ O ₃	2,94	Début de prise	1h40mn		
SO ₃	1,60	Fin de prise	4h50mn		
MgO	2,19				
CaO _{libre}	1,01				
C ₃ S	58,2	Resistance mécanique [MPa]	2jours	7jours	28jours
C ₂ S	18,5		7,0	24,17	30,25
C ₃ A	9,3				
C ₄ AF	8,2	Flexion	2,97	5,3	8,12

2.2.2.3 Eau

L'eau utilisée est celle du robinet: une eau potable propre au PH neutre.

2.2.2.4 Composition du mortier

L'objectif visé est d'étudier le comportement de murets en maçonneries dont les caractéristiques sont les plus proches possible de ceux réellement construit dans les bâtiments de notre région, c'est pourquoi, nous avons adopté la même composition que celle utilisée sur les chantiers voisins (1 ciment (C) pour 3 sable (S) et 0,5 eau (E) en masse). Soit un mortier massique 1 : 3 : 0,5 (C : S : E). Un coulage à chaque gâchée de 3 éprouvettes prismatiques (40x40x160) mm de mortier est prévu afin de déterminer les caractéristiques mécaniques du mortier (figure 2.6).



Figure 2.6 éprouvette de mortier utilisé pour la construction des murets.

Le procédé de fabrication du mortier est résumé dans le tableau 2.4.

Tableau 2.5 Procédé de fabrication du mortier normal utilisé dans la construction des murets

Opération	1. Introduction de l'eau 2. Introduction du ciment		3. Introduction du sable		4. Raclage de la cuve		
Durée		30 s	30 s	30 s	15 s	1mn15s	60 s
Etat du malaxeur	Arrêt	Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide

2.2.2.5 Caractéristiques physiques du mortier

Le mortier utilisé pour la construction des murets correspond au dosage 1 : 3 : 0,5 respectivement Ciment : Sable : Eau. Le début de prise déterminé selon la norme NF P18-362 [54] est d'environ 60 minutes, sa masse volumique est de 2250 kg/m^3 [55].

2.2.2.6 Résistances mécaniques du mortier

L'essai normalisé [56] consiste à étudier les résistances à la traction par flexion 3 points d'éprouvettes de mortier $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ (Figure 2.7 a). Ensuite, les deux moitiés de chaque éprouvette rompue sont soumises à la compression (Figure 2.7 b). La valeur de la résistance du liant utilisé dans le mortier est significative de la résistance du mortier.

Les caractéristiques mécaniques sont résumées dans le tableau 2.5

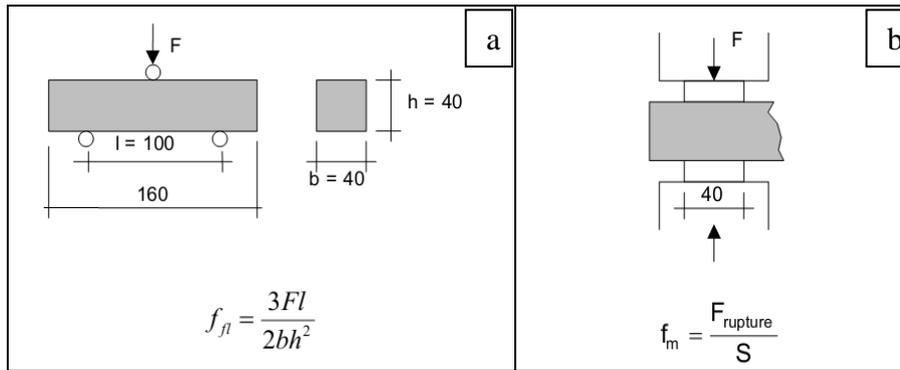


Figure 2.7 Essais mécaniques, a: flexion 3 points, b: compression sur les demis éprouvettes résultant de l'essai de flexion.

Où

F est la valeur de la force en N.

l, b et h respectivement la portée, la largeur et la hauteur de l'éprouvette testée en mm.

F_{fl} et f_m respectivement les résistances caractéristiques du mortier en flexion et en compression en MPa.

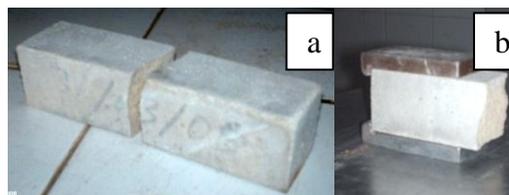


Figure 2.8 a: Rupture en flexion des éprouvettes de mortier, b: dispositif d'essai en compression des demi-éprouvettes résultant de l'essai de flexion.

La résistance à la traction par flexion est donnée par la formule (2.8):

$$f_l = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (2.8)$$

La résistance à la compression est donnée par la formule (2.9):

$$f_m = \frac{F}{S} \quad (2.9)$$

Tableau 2.6 Caractéristiques mécaniques du mortier utilisé dans la construction des murets

Age [jours]	Résistance à la flexion [MPa]	Résistance à la compression [MPa]
7	2,4	14,5
14	3,6	16,7
28	4,5	19

2.3 ETUDE DES MURETS EN MAÇONNERIE

Cette partie de l'étude est consacrée à l'analyse du comportement des murets en brique de terre cuite sollicités en compression; la surface de ces murets est de l'ordre de 1m^2 .

Plusieurs études concernant les briques de terre cuite se sont basées sur des murets de dimensions avoisinant 1m^2 de surface [57 - 60].



Figure 2.9 Photo des murets sans enduit.

Les travaux de Olivier. M [58] confirment que lorsque les murets sont soumis à la compression simple, les fissures s'initient au centre des murets et se propagent verticalement vers les bords inférieurs et supérieurs. La rupture est fragile sans phase plastique et la ruine des murets intervient d'une manière brutale. L'effort à la fissuration est d'environ 50% de l'effort de rupture.

Une simulation numérique par éléments finis en élasticité linéaire faite par El Gharbi [57] montre que le coefficient de Poisson des blocs et du mortier n'ont pas d'influence sur les résultats mais le module de Young intervient de façon significative. Les blocs subissent une contrainte de traction horizontale (responsable de la rupture) alors que le mortier se trouve dans un état de compression triaxiale la rupture est fragile et la contrainte de fissuration est de

l'ordre de 80 à 95% de celle de rupture il observe qu'en règle générale la résistance du mur est comprise entre celle des mortiers et celle des blocs.

2.3.1 Mode de fabrication des murets

Les éléments de maçonnerie sont préalablement plongés dans l'eau afin d'éviter une migration rapide de l'eau du mortier vers les blocs de maçonnerie (cette condition est nécessaire pour une bonne hydratation du ciment. On favorise ainsi la qualité de l'interface [61]. Les travaux effectués par Groot et al [62] montrent que la qualité de l'adhérence de l'interface bloc-mortier des maçonneries en terre cuite est améliorée par le phénomène de migration de l'eau des briques vers le mortier. Une bonne condition de cure est également nécessaire pour de bonnes qualités.

Les murets sont construits au laboratoire de structure du LGC Université Badji Mokhtar de Annaba. Les briques sont sélectionnées de façon à avoir des murets de dimensions comparables d'une surface de l'ordre de 1m^2 (figure 2.9).

Tableau 2.7 Dimensions des murets en cm.

Type de muret	Briques à 8 trous	Briques à 12 trous
Murets sans enduit de ciment	92 x 104 x 9	91 x 100,3 x 14,5
Murets avec enduit de ciment	92,5 x 107 x 10,5	92,3 x 102 x 15,3
Murets avec enduit de ciment renforcés de nappes de fibre de jute	92,5 x 106 x 11	92 x 100,5 x 15

Vingt quatre heures après leur construction les murets sont arrosés une à deux fois par jour d'eau pendant leur cure de 28 jours au laboratoire dans des conditions ambiantes à température et humidité non contrôlées et peu variables.

2.3.2 Dispositif expérimental de compression

Nous nous sommes limités dans la présente étude à des essais de compression simple pour les raisons suivantes:

- Ils sont simples à réaliser.
- La valeur expérimentale des résistances est la plus défavorable (dans la réalité, ce type de remplissage n'a pas un rôle porteur) ceci va donc dans le sens de la sécurité.

La mesure des déformations lors du chargement est assurée par des jauges extensométriques placées dans les deux directions, dans différents endroits susceptibles d'être les plus sollicités,

afin de permettre l'analyse du comportement des murets (zone centrale, au niveau de la partie supérieure, au niveau de la partie inférieure et verticalement près des bords gauche et droit). L'effet de l'excentricité des murets par rapport au chargement n'a pas été pris en compte dans l'interprétation des résultats. Un exemple de disposition des jauges est illustré dans la figure 2.10.

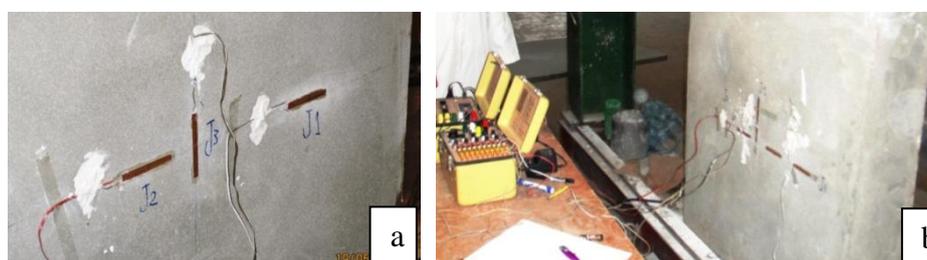


Figure 2.10 a: Exemple d'emplacement des jauges au niveau de la zone centrale du muret, b: connexion des jauges au Pont de Wheastone.

Les essais sont réalisés sur le portique d'essai (figure 2.11) d'une capacité de 200kN, la charge est appliquée à l'aide d'un vérin hydraulique en déplacement vertical. Les murets sont munis de jauge de déformation (décrites dans le chapitre 3 (§3.3). La contrainte appliquée à la maçonnerie est donnée par la formule (2.10):

$$\sigma = F/S \quad (2.10)$$

Où

F et S sont respectivement la force appliquée et la surface du muret recevant le chargement.



Figure 2.11 Machine utilisée: portique d'essai d'éléments de structure en grandeur réelle.



Figure 2.12 Mise en place du Muret et vérification des jauges de déformation sur un muret à briques de 8 trous enduit par mortier de ciment renforcé de nappe de fibre de jute.

2.4 MATERIAUX COMPOSITES

Cette deuxième partie, concernant l'élaboration de composites à matrice minérale, a été réalisée au Laboratoire des Technologies Innovante (LTI) de l'Université de Picardie Jules Verne, Amiens France. Il s'agit de l'étude de la faisabilité d'un composite cimentaire renforcé de fibres de jute. Les tâches réalisées se résument en:

1. Essais de caractérisation des matériaux utilisés:
 - a) fibres de jute;
 - b) ciment, chaux;
 - c) sable;
2. Formulation de composites à base de fibres de jute et matrice ciment-chaux.
3. Caractérisation physico-mécanique des composites sélectionnés.

2.4.1 Fibres de jute

La fibre utilisée de longueur moyenne d'environ 15 mm, a une masse volumique apparente de l'ordre de 35 kg/m^3 . La figure 1 montre la forme et la dimension de la fibre. Elle provient de toile de jute issue essentiellement de sacs de jute usés ayant servi d'emballage pour produits alimentaires et agricoles comme le café, le sucre, les fruits et légumes secs ou autres; donc une fibre déjà traitée pour la fabrication du tissu de jute.

Dans un premier temps, nous avons étudié la possibilité de l'utilisation de cette toile fibreuse et biodégradable dans la fabrication d'un composite à matrice cimentaire dont les critères recherchés sont l'augmentation de la ductilité et la diminution de la fissuration par rapport aux mortiers classiques. Dans la figure 2.13 est représentée la fibre de jute utilisée.

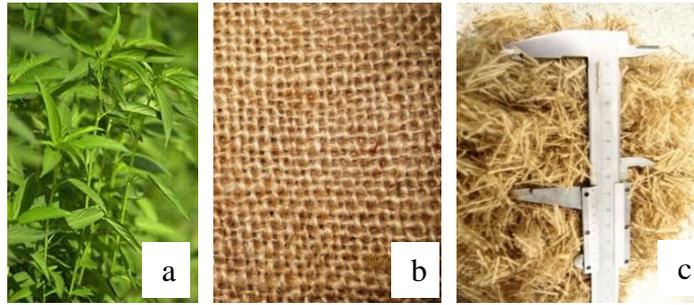


Figure 2.13 Aspects du jute, a: Plante, b: Tissu, c: Fibres utilisées.

2.4.1.1 Mesure du coefficient d'absorption d'eau des fibres végétales

Le coefficient d'absorption d'eau des fibres a été déterminé selon la méthode décrite par Juarez dans sa thèse sur le renforcement de matériaux cimentaires par des fibres d'agave [63]. Les mesures ont été réalisées sur des échantillons de fibres préalablement découpées de 10 à 15 mm. 5 échantillons d'environ 1 g ont été testés. Les pesées ont été réalisées à l'aide d'une balance précise à 0.001g près. Les échantillons ont initialement été séchés à l'étuve à 50°C jusqu'à stabilisation de la masse. Ils ont ensuite été immergés dans de l'eau distillée pendant 5 minutes, 15 minutes, 30 minutes et 24 heures. A l'issue de chacune de ces périodes d'immersion, les fibres ont été superficiellement séchées en utilisant du papier absorbant afin d'éliminer l'eau inter fibres ainsi que l'eau adsorbée à leur surface.

Le coefficient d'absorption d'eau des fibres est alors déterminé par l'équation (2.11) :

$$A\% = \frac{M_{SS} - M_S}{M_S} \cdot 100 \quad (2.11)$$

Où :

M_S : masse sèche des fibres (g)

M_{SS} : masse saturée superficiellement sèche des fibres après immersion (g)

Les résultats obtenus ont montré une valeur quasiment constante pour les différentes périodes d'immersion. Pour cette raison, nous avons laissé la fibre dans l'eau pendant 7 jours afin de voir l'influence de la période d'immersion.

Son coefficient d'absorption a été calculé par la procédure suivante :

1. Détermination de la masse de la fibre à l'état sec (après étuvage à 50°C).
2. Immersion continue de la fibre de jute dans l'eau pendant 7 jours.
3. Essorage de la fibre à l'aide d'une centrifugeuse.
4. Détermination de la masse de la fibre ainsi essorée.

5. Etuvage de la fibre jusqu'à masse constante à 50°C.
6. Détermination de la masse de la fibre sèche après étuvage.
7. Calcul du coefficient d'absorption A%.

L'essai effectué sur un nombre de 6 échantillons a donné un coefficient d'absorption A de l'ordre de 87%.

2.4.1.2 Caractéristiques physique et chimiques de la fibre de jute

Les caractéristiques physiques et chimiques du jute naturel d'après les études de Dितtember, D.B., Ganga Rao, H.V.S [64] sont données respectivement dans les tableaux 2.7 et 2.8.

Tableau 2.8 Caractéristiques physiques de la fibre de jute à l'état naturel [64].

Masse volumique (g/cm ³)	Longueur	Diamètre	Resistance à la traction	Module de traction	Module spécifique	Elongation	Angle microfibrillaire
1.3 - 1.49 (g/cm ³)	1.5 - 120 (mm)	20 - 200 (µm)	320 - 800 (MPa)	8 - 78(GPa)	30 N.m/kg	1-1,5 (%)	8 (degrés)

Tableau 2.9 Caractéristiques chimiques de la fibre de jute à l'état naturel [64], pourcentage en poids

Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Pectine	Cires	Eau
59 - 71.5	13.6 - 20.4	11.8 - 13	0.2 - 0.4	0.5	12.5 - 13.7

Dans ce travail la fibre utilisée est issue de la toile de jute une fibre qui a déjà été traitée pour être employée dans l'industrie du textile. La toile de jute est un produit textile de mauvais tissage malgré ses qualités mécaniques, car elle est riche en matière ligneuse

2.4.1.3 Caractérisation mécanique de la fibre de jute

La mesure de la résistance à la traction de la fibre de jute a été effectuée suivant la norme ASTM D 3822-07 à l'aide d'une machine Zwick/Roell, de capacité 20kN. L'essai consiste à

mesurer les efforts de traction en fonction de l'allongement pourcent. La résistance correspond à la force mesurée lors de la rupture du fil sous traction.

La force maximale enregistrée avant la rupture du fil en traction est de l'ordre de 50N et la valeur de l'allongement à la rupture est d'environ 2,85%.

Selon la courbe de variation Force/Allongement (figure 2.16), la valeur moyenne du module élastique est de $E = 137\text{MPa}$ (pour de très faibles allongements).



Figure 2.14 Essai de traction sur un fil de tissu de jute.

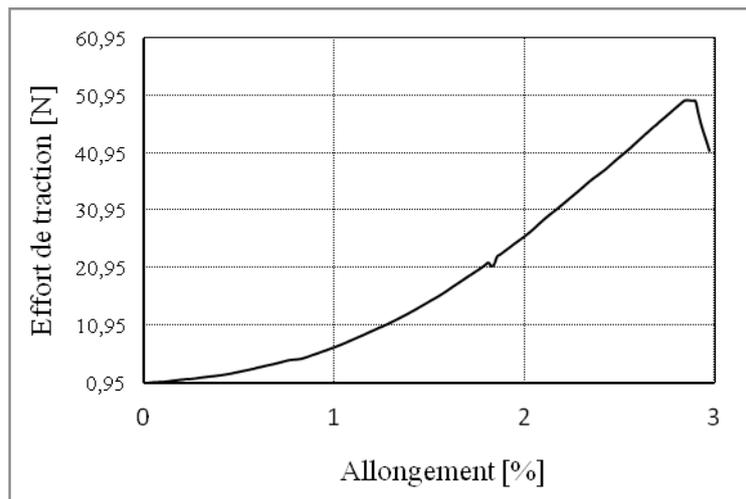


Figure 2.15 Relation Force-Déplacement en traction, de la fibre de jute utilisée

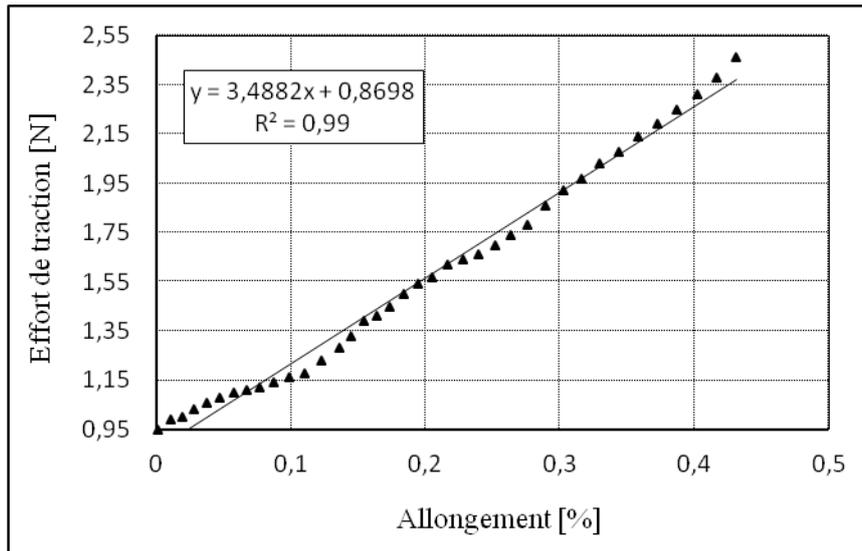


Figure 2.16 Courbe charge/allongement dans le domaine élastique.

2.4.2 Ciment

Le ciment utilisé dans cette partie de l'étude est du type CPJ 32.5R, conforme à la norme EN 197-1 [65]. Sa désignation CEM II/B – M (LL – S –V) 32.5 R CP1. Il s'agit d'un ciment Portland composé de classe B dont la composition moyenne est résumée dans le tableau 2.9

LL : calcaire dont le carbone organique total (TOC) < 0,20% en masse

S : laitier granulé de haut Fourneau

V : cendre volante siliceuse.

Sa résistance courante à 28 jours en compression est de 32,5MPa.

Sa résistance à court terme (2 ou 7 jours) est élevée : 32,5R.

CP1 : Ciment à teneur en sulfures limitée (Norme : NF P 15-318).

Masse volumique apparente calculée : 1097 [Kg/m³].

Tableau 2.10 Composition moyenne du ciment CPJ 32.5 [65].

Teneur en clinker	65 à 79 %
LL: Calcaire dont le carbone organique total	< 0,20%
S: Laitier granulé et V: cendre volante siliceuse	21 à 35%
Fumée de silice	≤ 10%

2.4.3 Chaux hydraulique

La matrice des composites étudiés dans ce travail est formé d'un liant composé par un mélange de ciment et de chaux hydraulique NHL5 conforme à la norme EN 459-1 [66].

Le taux de chaux aérienne hydratée présent dans NHL5 est de l'ordre de 30 %, Le début de prise est d'environ 2 heures, la finesse, très élevée, est de 8000 à 10 000 cm²/g de surface Blaine.

2.4.3.1 Propriétés chimiques de la chaux

La chaux naturelle pure NHL5 s'adapte très bien aux différents supports et tout particulièrement au bâti ancien. Elle favorise les échanges gazeux à l'intérieur des murs et régule l'humidité à l'intérieur des habitations. Elle contribue au confort des habitations en participant à l'isolation thermique et physique.

Tableau 2.11 Propriétés chimiques de la chaux hydraulique NHL5 [66]

SO ₃	≤ 3%	
Chaux libre	≥ 3%	
Eau libre	≤ 2%	
Argile	14 - 20%	
Résidus	12,8% (< 15)	
Temps de prise	Début de prise	> 1 heure
	Fin de prise	≤ 12 heures
Indice d'hydraulicité	0.3 - 0.4	
Finesse, pourcentage en masse	0.090mm ≤ 15	
	0.200mm ≤ 5	
Essais pour mortier	Pénétration, mm	> 10, < 50
	Teneur en air	≤ 20
Stabilité, mm	Méthode de référence ≤ 2	
	Variante ≤ 20	

Elle possède des propriétés désinfectantes; grâce à la finesse de ses grains, elle donne des mortiers souples et onctueux et qui adhèrent bien au support. Ainsi, cette chaux permet la réalisation de mortiers traditionnels, recommandés dans la restauration et la réhabilitation de

bâtiments anciens, montage de pierres et de briques, rejointoiement et pose de tuiles et enduits. Sa masse volumique apparente est de 830 Kg/m³.

2.4.3.2 Propriétés physiques de la chaux

Tableau 2.12 Propriétés physiques de la chaux hydraulique NHL5 [66]

Refus à 90μ	14.4 %
Surface spécifique Blaine	≥ 6500 cm ² /g,
	Valeur moyenne 7882 cm ² /g
Expansion (valeur moyenne)	0,8 mm
Masse volumique apparente	0,83 g/ cm ³
Masse volumique réelle	2,75 g/ cm ³

2.4.3.3 Propriétés mécaniques de la chaux

Tableau 2.13 Propriétés mécaniques de la chaux hydraulique NHL5 [66]

Résistance à la compression 7 jours	≥ 2 MPa
	Valeur moyenne, 5,1 MPa
Résistance à la compression 28 jours	≥ 5
	Valeur moyenne, 8,1 MPa
Résistance à la compression 90 jours	≥ 10
	Valeur moyenne, 11,5
Résistance à la compression 180 jours	≥ 12
	Valeur moyenne, 13,2
Résistance à la flexion 7 jours	≥ 0,9
Résistance à la flexion 28 jours	≥ 1,3
Résistance à la flexion 90 jours	≥ 2,5
Résistance à la flexion 180 jours	≥ 3,5

2.4.4 Sable

Le sable utilisé est un sable naturel de granularité 0/5 et de module de finesse de 2,33. Sa masse volumique apparente calculée : 1530 Kg/m³.

2.4.4.1 Analyse granulométrique du sable (R.Lanchon) [67]

Tableau 2.14 Résultats de l'analyse granulométrique [67]

Tamis	Masse du Refus	Masse cumulée	Refus cumulé	Tamisat cumulé
5,00	170,77	170,77	8,54	91,46
2,5	174,47	345,24	17,26	82,74
1,25	125,6	470,84	23,54	76,46
0,630	128,19	599,03	29,95	70,05
0,315	554	1153,03	57,65	42,35
0,160	775,01	1928,04	96,40	3,60
0,080	65,22	1993,26	99,66	0,34
Fines	5,17	1998,43	99,92	0,08
		MF	2,3335	

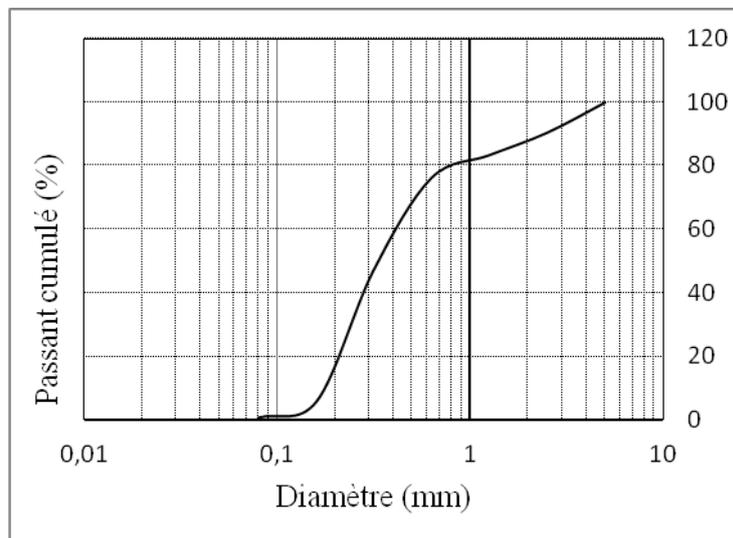


Figure 2.17 Courbe de l'analyse granulométrique du sable utilisé.

2.4.5 Eau

L'eau de gâchage utilisée au cours des essais est une eau potable à une température $20 \pm 2^\circ\text{C}$, conforme à la Norme NF EN 1008 [68]. Son pH est de l'ordre de 7,75.

2.4.6 Fluidifiant

L'utilisation d'un superplastifiant réducteur d'eau dans le but d'améliorer la maniabilité des matériaux a été nécessaire pour la confection des composites étudiés. Cette maniabilité, déterminée au maniabilimètre du LCPC est fixée entre 10 et 14 secondes. Le superplastifiant LANKOFLUID 314 conforme à la norme NF EN 934-2 [69], un adjuvant qui facilite la mise en place sans modification des caractéristiques mécanique des matériaux. Son aspect liquide brun, sa teneur en Chlore $\leq 0,1\%$, teneur en Na_2O équivalente ou égale 4,5%, sa densité de 1.16 à 20°C, son PH est de 11 ± 1 , son point de congélation est de -6°C et sa masse volumique calculée est de 1131 Kg/m^3 .

2.5 TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Après avoir caractérisé les matières premières, les différentes techniques de mesure employées pour la caractérisation des composites ciment-fibres de jute, à l'état frais et à l'état durci, sont développées dans cette partie. Elles concernent essentiellement les propriétés physico-chimiques, physico-mécaniques ainsi que les paramètres de transfert hydrique et thermique.

2.5.1 Matériau à l'état frais

2.5.1.1 Compatibilité chimique

Il est important de comprendre la structure de la pâte de ciment hydraté car la plupart des propriétés du béton, dont sa durabilité, dépendent des caractéristiques de la pâte de ciment durci. La prise du ciment est un ensemble de réactions chimiques simultanées d'hydratation permettant le passage de la pâte de ciment vers l'état solide.

En effet, la pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment C_3S , C_2S , C_3A , et C_4AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau.

2.5.1.1.1 Hydratation des silicates [70]

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (Ca_3SiO_5) et les silicates bicalciques (Ca_2SiO_4) se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium

hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C_2S , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible.

Les C-S-H sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et possèdent une composition variable, leur formule générale est la suivante :

$(\text{CaO})_x (\text{SiO}_4)_y (\text{H}_2\text{O})_z$ avec $0.6 < x/y < 2$ et $1 < z < 4$.

L'enchevêtrement du C-S-H donne sa solidité au ciment : les C-S-H se développent à la surface des grains de ciment non hydratés et comblent progressivement les interstices capillaires entre les grains. Au bout de quelques heures, la couche d'hydrates qui enrobe les grains de ciment devient assez épaisse pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau vers les composants anhydres du système. L'hydratation ralentit de plus en plus, mais peut se poursuivre pendant des mois voire des années.

2.5.1.1.2 Hydratation des aluminates

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. Les réactions avec les aluminates s'effectuent en plusieurs étapes :

Étape 1 : Formation d'ettringite (phase AFt)

Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite TSA (trisulfoaluminate de calcium hydraté) : $((\text{CaO})_6(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{SO}_3)_3, 32\text{H}_2\text{O})$. Cette réaction est fortement exothermique. Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment alors une couche protectrice autour du grain.

Étape 2 : Transformation de l'ettringite en monosulfate de calcium hydraté

Lorsque le gypse est épuisé, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté (appelé AFm) : $((\text{CaO})_3(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{CaSO}_4), 12\text{H}_2\text{O})$. Les réactions chimiques s'intensifient.

Étape 3 : Hydratation des aluminates résiduels

Au bout de quelques semaines, en général, l'ettringite se transforme totalement en monosulfoaluminate. Au-delà d'un mois, les réactions se poursuivent lentement avec l'aluminate (C_3A) et l'aluminoferrite (C_4AF) pour former de l'aluminoferrite de calcium hydraté. Même si les séquences réactionnelles sont proches du C_3A , l'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF) est nettement plus lent à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois que le gypse est totalement épuisé.

2.5.1.1.3 Mécanismes d'hydratation d'un ciment Portland

L'hydratation du ciment Portland implique la réaction des quatre phases minérales qui le composent. Comme le ciment est composé principalement de C_3S , c'est l'hydratation du C_3S qui contrôle la cinétique globale de l'hydratation. Il existe cependant une synergie entre les différentes réactions [71].

La Figure 2.18 présente la courbe caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment qui peut être découpée en quatre périodes :

Période 1 : réactions initiales

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment et dure quelques minutes. Le C_3S et le C_3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et des C-S-H (métastables) : les ions entrent en solution.

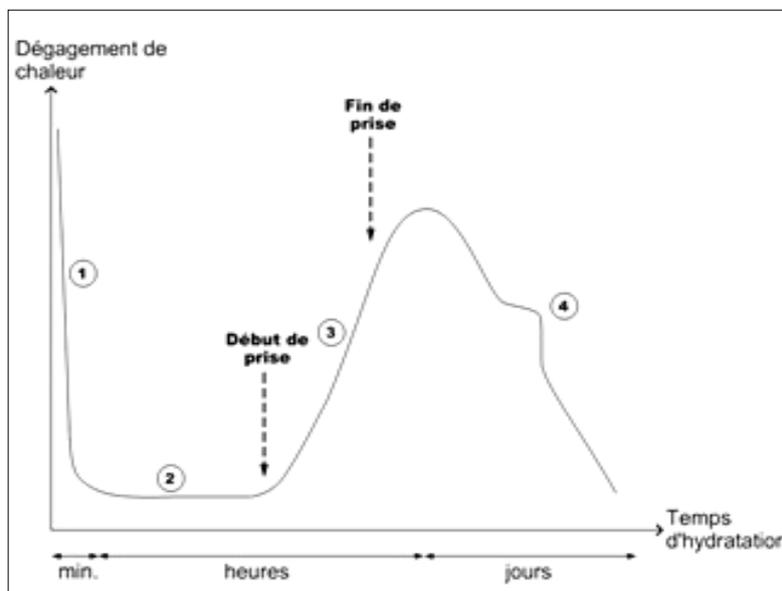


Figure 2.18 Courbe caractéristique d'hydratation du ciment d'après Vincent Waller [71].

Période 2 : période dormante

Le dégagement de chaleur est faible. Aucune évolution de la pâte ne semble se produire. Les réactions chimiques ont pourtant commencé : des ions passent en solution dans l'eau durant cette phase (ions calcium, silicates, hydroxydes et sulfates). Quand l'eau de gâchage est saturée en ions, le début de la prise se produit. Le PH de la solution augmente, ce qui ralentit la dissolution des constituants.

Période 3 : période d'accélération

Cette période débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devient critique, la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (ettringite, portlandite, C-S-H). Cette activité chimique dégage beaucoup de chaleur. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et créent donc un solide.

Période 4 : période de ralentissement

Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Pour que l'hydratation se poursuive, il faut que l'eau diffuse à travers les pores de gel. La chaleur dégagée diminue. Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment n'est jamais atteinte et donc ne sera jamais hydratée. C'est pendant cette période que l'ettringite de type AFt se dissout afin de se transformer en type AFm. Les mécanismes complexes à l'origine de la création des différents produits de l'hydratation que sont les silicates et les aluminates sont l'adsorption, l'hydrolyse, la dissolution, la solvataion et la cristallisation.

2.5.1.1.4 Inhibition de l'hydratation du ciment

Les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux cimentaires dépendent de l'état d'avancement des réactions d'hydratation. Dans certains cas, l'ajout de granulats dans une matrice cimentaire conduit à une inhibition de l'hydratation du liant, due au relargage de substances inhibitrices hydrosolubles, qui se manifeste par un retard dans la prise et le durcissement. Ces composites nécessitent une période de cure assez longue pour atteindre les résistances nécessaires. On parlera dans ce cas d'une incompatibilité chimique entre granulats et liant. Il est donc nécessaire d'évaluer l'action des ajouts dans la matrice par leur effet inhibiteur sur l'hydratation du ciment, de façon à ne pas provoquer de blocage dans la réaction et éviter de longues périodes de cure pour le durcissement. Un exemple type de ce phénomène, pour le composite à base de bois, est donnée par la figure 2.6.

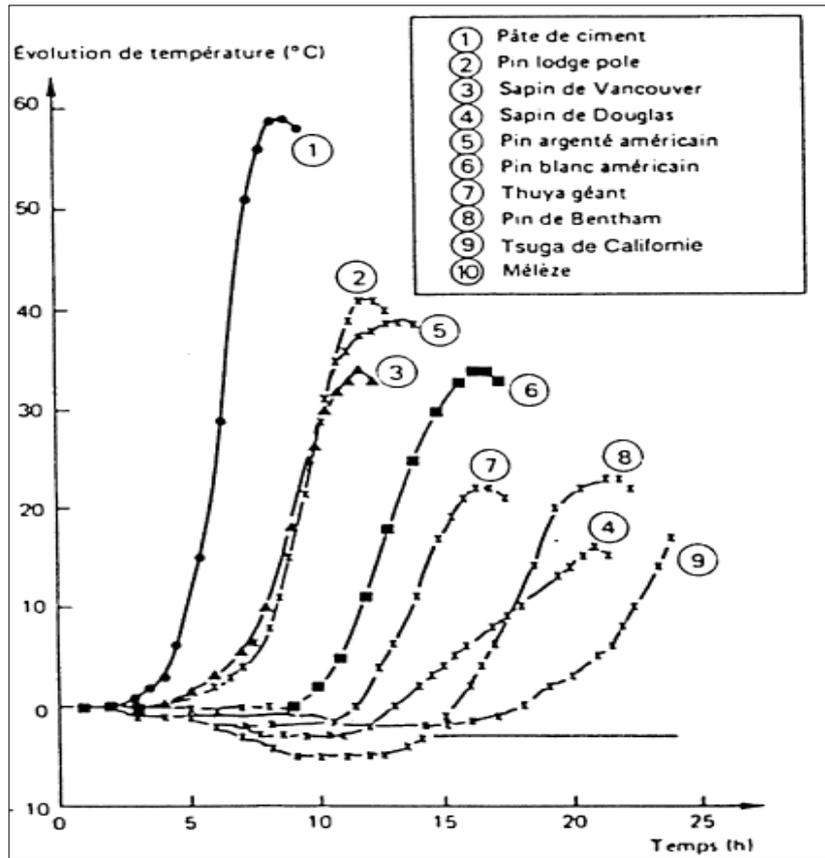


Figure 2.19 Effet de quelques types de bois sur l'hydratation d'un ciment portland, A.A Moslemi [72]

Une manière de quantifier cet effet inhibiteur sur la réaction d'hydratation du ciment, est d'évaluer l'indice d'inhibition (I), ou encore le facteur de compatibilité (C_F). Cette compatibilité chimique des fibres de jute avec le ciment a été examinée par le suivi de la température d'hydratation ainsi que celui du temps requis pour atteindre la température maximale en conditions adiabatiques, par comparaison au cas d'une pâte pure de ciment. Pour quantifier cet effet inhibiteur, A.A. Moslemi et al [72] ont proposé d'évaluer l'indice d'inhibition selon l'expression (2.12), dont les différents paramètres sont donnés par la figure 2.22.

$$I = 100 \cdot \left(\frac{t' - t}{t} \right) \left(\frac{T - T'}{T} \right) \left(\frac{a - a'}{a} \right) \quad (2.12)$$

Où :

T et T' sont les températures maximales à l'hydratation, respectivement de la pâte de ciment

et du composite [$^{\circ}\text{C}$] ;

t et t' sont les temps correspondants [h] ;

a et a' sont les pentes maximales des courbes température/temps, respectivement de la pâte de ciment et du composite.

L'effet inhibiteur des ajouts (granulats) sur la réaction d'hydratation du ciment est caractérisé par l'ordre de grandeur de (I), suivant la classification donnée par le tableau 2.14.

Tableau 2.15: Classification de l'effet inhibiteur des ajouts sur la réaction d'hydratation du ciment

Indice d'inhibition (I)	Effet inhibiteur
$I < 10$	Faible inhibition
$I = 10 - 50$	Inhibition modérée
$I = 50 - 100$	Grande inhibition
$I > 100$	Inhibition extrême

La compatibilité chimique, peut également être estimée, selon Hachmi et *al.* [73 - 74], par le facteur de compatibilité (C_F). Celui-ci est défini par le rapport entre l'aire sous la courbe température/temps obtenue pour le composite en présence de fibres, et celle obtenue pour la pâte pure de ciment après la réaction d'hydratation. L'effet plus ou moins inhibiteur des ajouts, est caractérisé par une valeur de (C_F) plus ou moins importante. Cet essai a été réalisé d'une part avec une pâte pure de ciment, prise comme référence, et d'autre part en ajoutant une quantité de fibres de jute variant de 0,5 à 3% massique, pour une même quantité de ciment. Le matériau frais est placé dans un récipient cylindrique muni de son couvercle. Afin d'éviter les échanges avec le milieu ambiant, celui-ci est mis dans une autre enceinte remplie de vermiculite. Pour assurer l'isolation totale du système, l'ensemble est placé dans un vase de Dewar. Sachant que l'hydratation du liant est une réaction exothermique caractérisée par une élévation de température, le suivi de l'évolution des températures est réalisé grâce à des thermocouples de type T reliés à une centrale d'acquisition. Le thermocouple est noyé dans la masse au centre de l'échantillon. Pour s'assurer de l'absence de déperdition de chaleur, un second thermocouple est placé dans le vase de Dewar. Le dispositif expérimental utilisé, mis au point au laboratoire LTI, est donné par la figure 2.5. Un exemple type de courbe d'hydratation température/temps est donné par la figure 2.20.

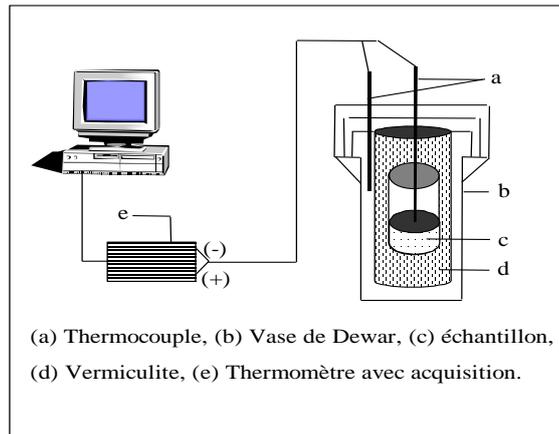
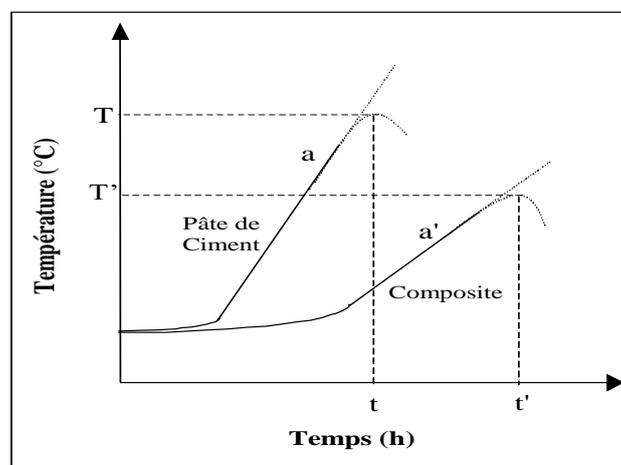


Figure 2.20 Dispositif expérimental pour l'essai d'inhibition



Figure 2.21 Photo Dispositif expérimental pour l'essai d'inhibition



2.5.1.1.5 Maniabilité

La maniabilité est une propriété intrinsèque du matériau frais. Elle détermine la facilité de sa mise en œuvre. Cette propriété affecte les caractéristiques mécaniques du matériau à l'état durci. La maniabilité dépend de la teneur en eau qui, elle-même dépend du dosage en ciment, de la nature des granulats, de leur granulométrie et de leur texture. Il existe plusieurs techniques pour évaluer la maniabilité du matériau frais. Dans cette étude, les mesures ont été effectuées à l'aide d'un maniabilimètre à mortier normalisé type B, suivant la norme NF P18-452 [76]. Le principe consiste à mesurer un temps d'écoulement, du matériau frais, entre deux repères sous l'action d'une vibration générée par un vibreur électrique fixé sur le bac à essai. Avant chaque essai, les compartiments sont soigneusement nettoyés et huilés. Après la mise en place du matériau frais, la trappe amovible est soulevée pour déclencher le vibreur. Le temps d'écoulement de l'échantillon dans le deuxième compartiment, jusqu'au repère se situant sur la cloison fixe, est déterminé à l'aide d'un chronomètre. Le dispositif expérimental utilisé est donné par la figure 2.23.

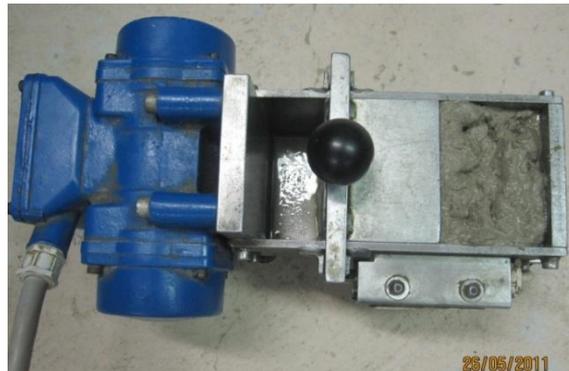


Figure 2.23 Photo du maniabilimètre à mortier

2.5.1.1.6 Procédure de fabrication des composites

Pour la fabrication des différents composites, la même procédure de fabrication qu'un mortier normal selon la norme EN 196.1 a été adoptée en respectant l'ordre suivant :

1. Introduction de l'eau dans le malaxeur de laboratoire (Perrier, type B0026/F, France d'une capacité de 10 litres (figure2.24).
2. Ajout du liant (le ciment et la chaux ont été mélangés à sec jusqu'à obtention d'un liant homogène).
3. Mise en marche du malaxeur à petite vitesse pendant 30 secondes (eau-liant).

4. Introduction du sable mélangé avec la fibre de jute et malaxage pendant environ 30 secondes (le sable et la fibre sont mélangés à sec afin de faciliter l'homogénéisation de la distribution des fibres pendant le malaxage).
5. Ajout du fluidifiant pendant le malaxage à petite vitesse.
6. Passage au malaxage à grande vitesse pendant 30 secondes.
7. Arrêt du malaxeur pendant 1mn30s : pendant les premières 15s, on enlève le matériau adhérant aux parois et au fond du malaxeur en le poussant vers le milieu.
8. Reprise du malaxage à grande vitesse pendant 2 mn au lieu de 1 mn pour le mortier normal, afin de permettre aux fibres une meilleure dispersion.

Quatre composites à base de ciment, chaux, sable et fibre de jute ont été élaborés à ouvrabilité quasiment identique à celle du mortier de référence JFC0 (sans fibres). Le pourcentage de substitution du sable par la fibre variant de 0,5 à 2% par pas de 0,5%, pour les composites nommés respectivement JFC0.5, JFC1, JFC1.5 et JFC2. Pour toutes les formulations le liant est composé de 70% de ciment et 30% de chaux hydraulique. Le rapport (sable+fibrés)/liant est de 3, le taux de fluidifiant ajouté est de 1,5% en masse de liant et la maniabilité mesurée selon la norme NF P 18 452 et NF P 15 437 est fixée entre 10 et 14 secondes.



Figure2.24 Malaxeur ayant servi à l'élaboration des échantillons.

2.5.1.1.7 Mesure de la teneur en air occlus

La teneur d'air dans la matrice est un paramètre important, qui conditionne les propriétés physico-mécaniques des matériaux de construction. C'est un réseau de bulles d'air, de formes sphériques, dont la teneur dépend de la nature des granulats et de leur capacité à entraîner l'air

dans la matrice. L'emploi d'un agent entraîneur d'air est devenu courant, et a, en général, pour but d'améliorer la durabilité des matériaux, notamment leur résistance aux effets de gel/dégel. La teneur en air dans le composite a été mesurée à l'aide d'un aéromètre à mortier. Le dispositif est donné par la figure 2.25. L'essai consiste à appliquer une pression sur l'échantillon frais par l'intermédiaire d'un fluide incompressible, en utilisant une pompe à air installée en partie supérieure du dispositif. Ce fluide occupe la place de l'air occlus dans le matériau. Le rapport du volume déplacé au volume total utilisé, permet de déterminer le pourcentage volumique d'air occlus.



Figure 2.25 Photo de l'aéromètre à mortier

2.5.1.1.8 Essai de prise

Le phénomène de prise, qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur, est un processus complexe. Cette complexité est propre au matériau lui-même ainsi qu'aux réactions physico-chimiques responsables de ce processus. Il varie suivant la composition chimique du ciment, de la nature des différents constituants, de la température et le cas échéant, des dosages en adjuvants. Lors de cette phase, essentielle dans la vie du matériau, des changements d'ordre rhéologique (passage d'un milieu pâteux à un milieu solide), chimique (hydratation) et physique (germination, cristallisation, croissance de phase) vont interagir et intervenir sur les propriétés mécaniques du matériau durci à court et long terme. L'évaluation du temps de prise est donc capitale, notamment en présence de granulats susceptibles de relarguer des substances inhibitrices qui affectent la prise des matériaux ainsi que leurs propriétés mécaniques, tout particulièrement au jeune âge mécaniques, tout particulièrement au jeune âge. L'essai de prise a été effectué à l'aide de l'appareil Vicat, suivant la norme EN 196-3 [77] illustré par la figure 2.26. Le principe de la mesure consiste à suivre l'évolution de la consistance du matériau au cours du temps, en laissant s'enfoncer une aiguille calibrée à

différents moments, sous l'effet d'une charge de 1000 g. Avec l'évolution de la réaction d'hydratation du ciment et de la consistance du matériau, l'aiguille s'enfonce de moins en moins. Lorsque l'aiguille s'arrête à une distance $d = 2 \pm 1 \text{ mm}$ du fond du moule, on parle alors de début de prise. Le temps correspondant est mesuré à l'aide d'un chronomètre.



Figure 2.26 Photo de l'appareil Vicat pour l'essai de prise

2.5.2 Matériau à l'état durci

2.5.2.1 Propriétés physico-mécaniques

2.5.2.1.1 Masse volumique apparente sèche

La masse volumique apparente sèche ρ est définie par le rapport de la masse de l'échantillon M à son volume apparent à l'état sec V . Après démoulage, l'échantillon est mis en étuve à $50 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante, conformément aux recommandations de la RILEM [78] qui stipule que celle-ci est atteinte lorsque la masse n'accusera qu'une diminution inférieure ou égale à 0.2% en l'espace de 4 heures. Les pesées sont effectuées à 0.01 g près. Les dimensions des échantillons sont déterminées à l'aide d'un pied à coulisse avec une précision de 0,01 mm. Pour chaque composition, la masse volumique sèche apparente représente la moyenne de trois mesures.

2.5.2.1.2 Module d'élasticité dynamique

La détermination du module d'élasticité dynamique des composites a été effectuée par auscultation ultrasonore. Le principe est basé sur la détermination de la vitesse de propagation

des ondes ultrasonores dans le matériau (célérité). Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent sous forme d'ondes, produisant un champ sinusoïdal de contraintes mécaniques. Pour un échantillon soumis à des oscillations forcées, il y a propagation d'ondes élastiques correspondant à des déformations de traction-compression. La déformation de la matière se produit dans le sens de la propagation. La détermination du module d'élasticité dynamique est effectuée à l'aide d'un appareil d'auscultation sonore des structures PUNDIT 7 (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester), (figure 2.12).



Figure 2.27 Photo de l'appareil Ultrasonic Tester PUNDIT 7

Le matériau est soumis à des oscillations longitudinales à l'aide d'un jeu de transducteurs électroacoustiques. Une impulsion de vibration longitudinale est produite par l'un des transducteurs, appliqué sur l'une des faces de l'élément. Après avoir parcouru une longueur L dans le matériau, cette onde est convertie en un signal électrique par un second transducteur électroacoustique. La célérité peut être reliée aux caractéristiques physico-mécaniques du matériau par l'expression (2.13).

$$C_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (2.13)$$

Avec :

C_L : célérité de l'onde (m/s) ;

E : module d'élasticité dynamique (MPa) ;

ρ : masse volumique apparente (kg/m^3) ;

ν : coefficient de Poisson.

Le module d'élasticité dynamique est obtenu à partir de l'expression (2.14).

$$E_d = \rho \cdot C_L^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (2.14)$$

Pour un coefficient de Poisson compris entre 0,2 et 0,3, on suppose le rapport $\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$ égal à 1, soit le module dynamique majoré :

$$E_d^* = \rho \cdot C_L^2 \quad (2.15)$$

2.5.2.1.3 Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques en compression et en flexion sont déterminées sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 40 x 40 x 160 mm. Après conservation en salle humide (20±2°C, HR=98%) avant et après démoulage pendant 28 jours, elles sont ensuite séchées en étuve ventilée à 50±2°C jusqu'à masse constante, avant d'être soumises aux essais. Pour la flexion, les mesures ont été réalisées suivant la norme EN 196-1 [79], à l'aide d'un appareil équipé d'un système d'acquisition, de type PERRIER 41.04 (figure 2.28). Pour l'essai de résistance en compression, la presse hydraulique utilisée est du type PERRIER 68.7, d'une capacité de 300 kN sous un asservissement en force de 10 ± 4 kN/s (figure 2.29). A la rupture, la charge maximale F_c est affichée sur le cadran de la presse. La résistance à la compression, calculée selon l'expression (2.16), est la moyenne de trois mesures pour chaque composition.

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad (2.16)$$

Où A est la surface de contact [mm²].



Figure 2.28 Photo de la presse pour essai de flexion



Figure 2.29 : Photo de la presse pour essai de compression

2.6 CARACTERISATION DE LA MATRICE

L'examen au Microscope a été réalisé dans l'objectif d'examiner l'effet des fibres de jute sur la réaction d'hydratation du ciment ainsi que l'influence sur les liaisons matrice/granulat. Le dispositif utilisé est un Microscope du type Leica Microsystems M80 couplé à un ordinateur, permettant de séparer les détails de l'image par grossissement et d'enregistrer des photographies de haute précision et faire des analyses élémentaires.



Figure 2. 30 Photo du Microscope Leica Microsystems M80

2.6.1 Propriétés hydriques

2.6.1.1 Etude des variations dimensionnelles

La stabilité dimensionnelle est un paramètre important susceptible d'affecter la durabilité des matériaux de construction. Les déformations de la matrice sont dues soit aux processus physico-chimiques lors de l'hydratation, soit au gradient hydrique entre le matériau et le

milieu extérieur.



Figure 2.31 a, Photo de la chambre climatique BiA. b, photo des éprouvettes à l'intérieur de la chambre climatique.

Les mesures des variations dimensionnelles dues au retrait ont été réalisées sur des éprouvettes de dimensions 40 x 40 x 160 mm, munies de plots à leurs extrémités. Dès leur décoffrage et jusqu'à l'âge de 28 jours, les éprouvettes sont conservées en cure dans la chambre climatique de conservation à $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=98\%$ (figure 2.31). Les variations des dimensions et de la masse des échantillons dans le temps, ont été déterminées à partir de la variation de leurs dimensions longitudinales et de leurs masses à l'aide d'un rétractomètre électronique à affichage digital, capable d'apprécier des variations de l'ordre de 10^{-3} mm (figure 2.32) et d'une balance électronique.



Figure 2.32 Photo du rétractomètre et de la balance utilisés

2.6.1.2 Domaine capillaire

Les propriétés hydriques des matériaux poreux, exposés aux variations d'humidité, sont des paramètres essentiels qui conditionnent leur durabilité. En effet, le mouvement de l'eau dans les capillaires affecte directement les propriétés mécaniques, notamment par le transfert des agents agressifs. Les propriétés thermiques sont également modifiées. Le comportement hydrique a été étudié à travers la détermination expérimentale de l'absorption d'eau par capillarité à partir de l'état sec, ainsi que la diffusivité hydrique en milieu non saturé, à température ambiante.

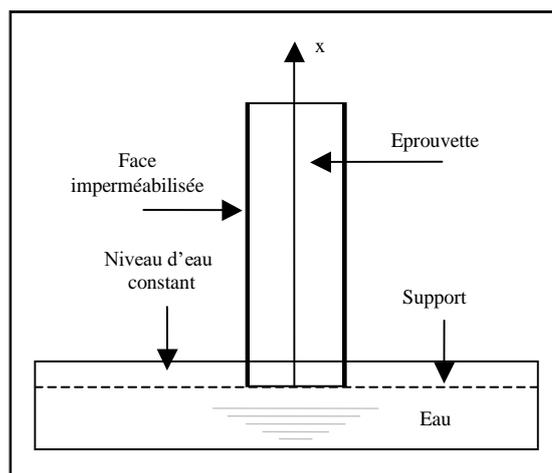


Figure 2.33 Schéma du dispositif expérimental pour l'essai d'imbibition capillaire

Les essais d'imbibition capillaire ont été réalisés, à température ambiante, sur des éprouvettes de dimensions 40 x 40 x 160 mm, préalablement séchées jusqu'à masse constante. Afin d'assurer un écoulement unidirectionnel et d'éviter tout échange d'humidité avec l'air environnant, les faces latérales ont été imperméabilisées à l'aide d'un film plastique thermo-rétractable. L'alimentation en eau liquide est assurée en mettant l'une des sections transversales en contact avec l'eau contenue dans un bac (figure 2.33). Le dispositif expérimental, conçu au laboratoire, utilisé dans l'essai d'imbibition capillaire, est donné par la figure 2.34.



Figure 2.34 : Montage expérimental pour l'essai d'imbibition capillaire

2.6.1.3 Détermination de la sorptivité

Ce paramètre représente une caractéristique macroscopique intrinsèque du matériau poreux, utilisé dans l'étude de la durabilité des matériaux de construction. Il traduit la capacité d'un matériau à absorber l'eau par capillarité. Il a été introduit pour la première fois par J. R. Philip [80 - 83] dans la théorie de l'infiltration et la terminologie a été adoptée par C. Hall au cours de nombreux travaux sur les matériaux poreux du bâtiment [84 - 90]. D'autres chercheurs [91-93] ont ensuite utilisé cette caractéristique pour analyser la qualité du béton. Le coefficient de sorptivité est déterminé à partir du suivi de l'évolution du volume d'eau absorbé par l'échantillon, rapporté à la surface de contact (40 x 40 mm) en fonction de la racine carrée du temps. La quantité d'eau absorbée est mesurée régulièrement dans le temps, par pesée à l'aide d'une balance précise au mg. La courbe d'évolution obtenue, qui est généralement une droite dans la première phase d'absorption, permet de calculer la sorptivité du matériau suivant l'expression (2.17) :

$$i = S \cdot \sqrt{t} + i_0 \quad (2.17)$$

Où :

i est le coefficient d'absorption capillaire (mm^3/mm^2). Il a la dimension d'une longueur et correspond, selon C. Hall [86], au volume cumulé absorbé par unité de surface absorbante ;

S est la sorptivité du matériau ($\text{m/s}^{1/2}$) ;

i_0 est un coefficient empirique dépendant de la surface de contact de l'échantillon avec l'eau (m^3/m^2). Il correspond au remplissage instantané de pores ouverts sur la surface de l'échantillon en contact avec l'eau.

2.6.2 Propriétés thermiques des matériaux : conductivité thermique

La machine utilisée pour la mesure de la conductivité thermique, est TAURUS TLP 500 X-1 représentée sur la figure 2.37 conforme aux normes ISO 8302 , ASTM C177 , DIN 52612 , DIN EN 1946-2 , EN 12664 , EN 12667 , EN 12939.

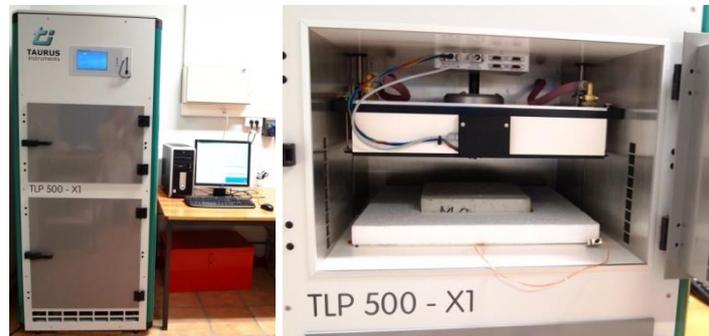


Figure 2.37 Machine d'essai de conductivité thermique

La conductivité thermique est mesurée selon la procédure de la plaque chaude gardée qui consiste à déterminer la conductivité thermique et la résistance à la transmission de chaleur du bâtiment, et d'autres matériaux isolants. Le dispositif est équipé d'une chambre de mesure isolée et tempérée pour éviter des influences thermiques extérieures, l'air refroidi par effet Peltier, dispositif électrique numérique de levage de la pression et de mesure de l'épaisseur de l'échantillon. L'échantillon de matériau d'une surface d'environ 250 mm x 250 mm est mis au contact de deux plaques, l'une chaude, l'autre froide d'une dimension d'environ 500 mm x 500 mm. L'échantillon à tester est entouré par une zone dite « anneau de garde » qui limite les pertes de flux thermique à sa périphérie. A l'équilibre, on mesure la différence des températures entre les 2 plaques.

2.6.3 Etude de la déformabilité du composite ciment-fibres de jute

Le comportement élastique du composite en flexion a été évalué d'une part, en mesurant l'indice de fragilité (*IF*), sur des éprouvettes 40 x 40 x 160 mm, à 28 jours, pour une teneur en substitution massique du sable par les fibres de jute allant de 0 à 2%. Les échantillons étant soumis à des cycles de charge-décharge avant de procéder à la rupture finale à l'aide d'une machine de type LLOYD LR50kN piloté par ordinateur (figure 2.38). La vitesse de chargement a été fixée à 5 kN/s.



Figure 2.38 : Machine utilisée pour l'essai de flexion charge-déplacement

D'autre part, ce comportement a été évalué par la mesure de l'indice de fragilité (IF), sur des cylindres de dimensions 110 x 220 mm, à 28 jours testées en compression. Les échantillons ont été soumis à des cycles de charge-décharge en compression avant de procéder à la rupture finale à l'aide d'un vérin alimenté par un groupe hydraulique et piloté par ordinateur. Pour cet essai, la presse hydraulique utilisée est du type SCHENCK TREBEL RBS160, avec une capacité de chargement de 600 kN (figure 2.39). La vitesse de chargement a été fixée pour une rampe à 10 kN/s. La montée en charge est de type rampe avec une fréquence des cycles de charge de 0.1 Hz.



Figure 2.39 : Presse hydraulique utilisée pour l'essai de contrainte-déformation

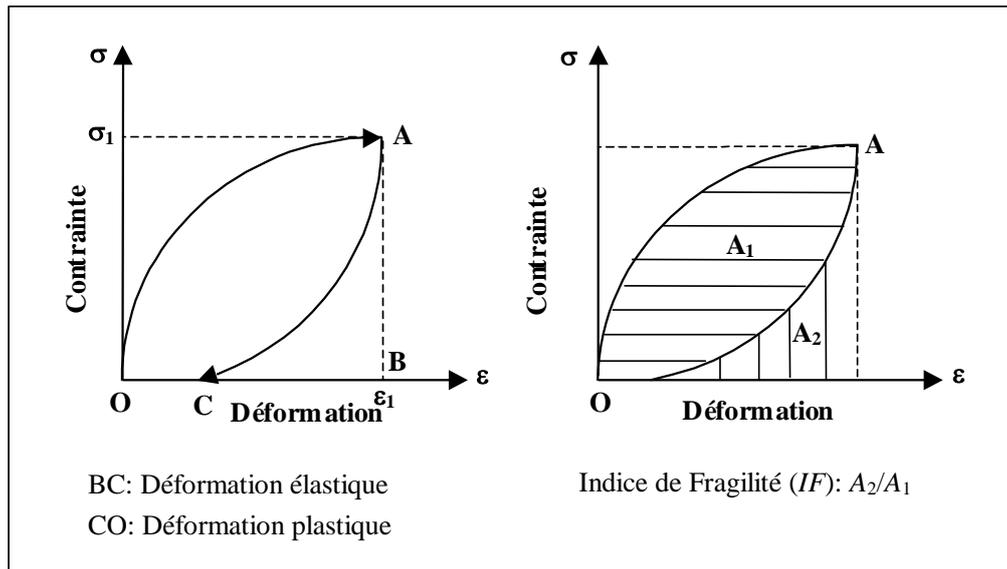


Figure 2.40 : Evaluation de l'Indice de Fragilité (IF) [96]

Les courbes d'hystérésis contrainte-déformation et celles relatives à la rupture finale sont enregistrées à raison de 50 points par mm grâce à un logiciel d'acquisition. L'Indice de Fragilité (IF) est définie par le rapport de l'énergie maximale élastique de déformation (A_2) à l'énergie plastique de déformation (A_1), mesurées à partir de l'aire sous la courbe $\sigma = f(\varepsilon)$ (figure 2.40). Si le rapport (A_2/A_1) est proche de zéro, toute l'énergie est irréversible et le matériau est ductile. Lorsque (A_2/A_1) tend vers l'infini, l'énergie est réversible et le matériau est fragile. En d'autres termes, pour un matériau fragile comme le béton, ayant une capacité d'énergie élastique plus importante que plastique, il existe une phase de transition entre l'état fragile et ductile, caractérisée par l'augmentation de l'indice de fragilité [96]. Celui-ci décroît au fur et à mesure que la déformation plastique devient prédominante.

3.1 INTRODUCTION

Généralement, la maçonnerie de remplissage est sollicitée par des efforts verticaux, bien qu'elle soit souvent susceptible de subir des efforts horizontaux ou transversaux. Néanmoins, pour assurer la sécurité et l'aptitude au service, la maçonnerie comme élément de construction, doit répondre à long terme, à certaines exigences liées d'une part à la fonction statique de la construction (qui représente la capacité des éléments de reprendre les actions directes et de résister aux actions indirectes ou déformations imposées) et d'autre part liées à la fonction d'enveloppe (qui représente la capacité d'un élément de protéger les utilisateurs contre les agressions et nuisances externes comme les intempéries, l'isolation acoustique, l'isolation thermique et la résistance au feu).

En Algérie, la maçonnerie non renforcées est l'un des matériaux de construction de bâtiment les plus utilisés. La plupart de ces bâtiments ont été construits avec peu ou pas du tout de considération sismique. Cependant, ce qui est plus grave encore, ce sont les modifications et les suppressions de certains éléments de structure après finalisation des bâtiments, sans prise en considération des dangers sismiques. Selon la littérature, le comportement de la maçonnerie dans la structure est complexe à cause de l'hétérogénéité des éléments de briques dont la fabrication produit souvent des pièces fissurées et de caractéristiques variables qui les rendent difficile à normaliser. Ainsi, plusieurs paramètres influent sur le comportement des murs en maçonnerie. Par exemple, l'orientation des joints à 0° (briques dans le sens vertical), provoque une rupture par décohéation entre les joints de mortier parallèles au chargement (joint longitudinal). L'orientation à 90° (briques dans le sens horizontal), provoque la rupture par fissuration de traction s'initialisant dans le joint de mortier parallèle à l'axe de chargement (joint brisé par la disposition des éléments). L'orientation des éléments à 45° entraîne une rupture par combinaison des deux cas précédents (dents de scie). La nature du mortier et son épaisseur ne présente aucune influence sur les modes de rupture des éléments en maçonnerie, mais influent sur leur résistance mécanique [97]. Selon F. Djaalali et al [98] l'épaisseur du joint de 1cm offre la résistance à la compression optimale. Un joint plus mince diminue la résistance de la maçonnerie ceci s'explique par une concentration des efforts de traction dans le mortier; de même, un mortier plus épais soumettrait la brique à une plus forte concentration

de traction. Pour ceci, l'utilisation rationnelle et optimale de la maçonnerie locale nécessite la détermination expérimentale de ses caractéristiques intrinsèques.

Ce chapitre est consacré aux essais de caractérisation des éléments de maçonnerie ainsi que le comportement en compression des murs en briques creuses locales.

3.2 MODES DE RUPTURE DES MURS EN MAÇONNERIE

La rupture d'un mur en maçonnerie soumis à la compression dans son plan est caractérisée par les trois modes suivants [97] (figure 3.1):

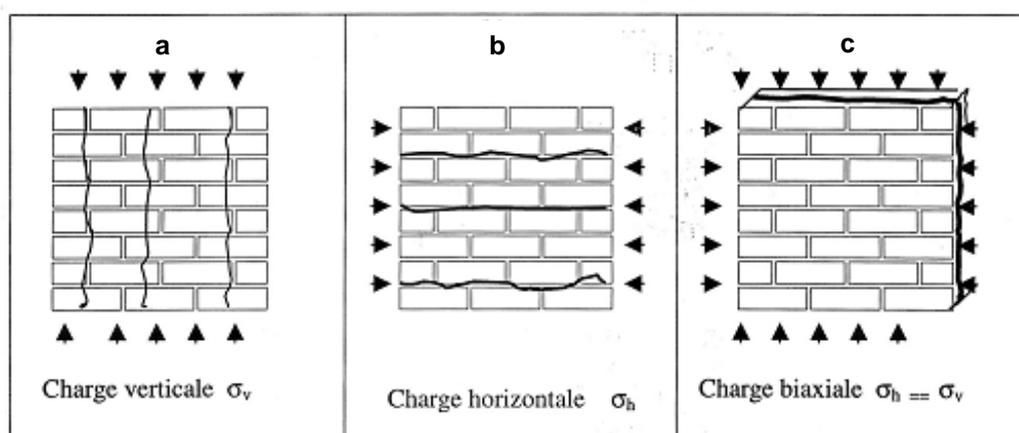


Figure 3.1 Modes de rupture de murs en briques de terre cuite [97]

1. Rupture dans la direction verticale lorsque la contrainte est perpendiculaire aux lits de mortier. Dans ce cas la contrainte verticale est plus importante que la contrainte horizontale; $\sigma_v \gg \sigma_h$ (figure 3.1a).
2. Rupture dans la direction horizontale lorsque la contrainte est parallèle aux lits de mortier. Dans ce cas la contrainte horizontale est plus importante que la contrainte verticale; $\sigma_v \ll \sigma_h$ (figure 3.1b).
3. Dans le cas de compression bi-axiale, la rupture de la maçonnerie dépend du rapport de l'intensité des contraintes verticales et horizontales. Si $\sigma_v = \sigma_h$, on observe une fissure verticale dans le plan du mur (figure 3.1c)

Lors du déroulement des essais de compression réalisés sur les murets, la force est notée dès l'apparition visuelle des premières fissures et l'essai est arrêté afin d'observer la direction et la localisation des fissurations. En général, elles se propagent verticalement à partir de la zone centrale du muret vers les bords inférieurs et supérieurs. On a pu observer que pour certains essais, les fissures sont initialisées au niveau des joints verticaux. Néanmoins, les défauts de

centrage et de fabrication conduisent à la fin de l'essai à une rupture localisée au niveau de l'un des coins supérieurs pour les murets non enduits de mortier de ciment (figure 3.2a).

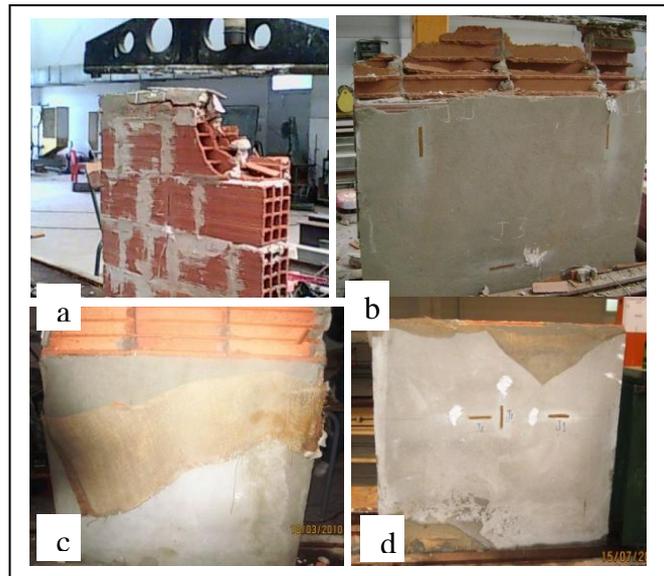


Figure 3.2 Les différents modes de rupture observés, a: endommagement au niveau des coins, b: et c: rupture verticale dans le plan des murets respectivement cas des murets enduits de mortier de ciment et cas des murets renforcés de nappe de fibre de jute, d) rupture parallèle aux lits de mortier.

Les modes de rupture (b) et (c) [97] ont également pu être observés dans la partie supérieure des murets sur une hauteur ne dépassant pas une à deux rangées de briques dans le cas des murets enduits de mortier de ciment (figure 3.2b) ainsi que les murets enduits de mortier de ciment et renforcés par nappes de fibres de jute (figure 3.2c et 3.2d).

Dans tous les essais, la rupture est fragile sans phase plastique et la ruine du muret intervient d'une manière brutale. La fissuration a lieu aux environs de 50% de l'effort de rupture pour les murets sans enduit de ciment. Quant aux murets enduit de mortier de ciment, l'effort à la première fissure est d'environ 30% de l'effort de rupture. Dans le cas des murets avec crépissage et renforcés par nappes de fibres de jute, on remarque nettement un arrachement de la nappe avant la rupture. Ceci explique la mauvaise adhérence de la nappe de fibre de jute au mortier de ciment.

Remarque: le renforcement par nappe en natte de fibre polymère a été éliminé à cause de l'impossibilité de l'adhérence entre celle-ci et le mortier de ciment.

3.3 COMPORTEMENT DES MURETS EN BRIQUES CREUSES

Un protocole d'essais a été conduit sur plusieurs murets réalisés avec deux types de briques creuses en terre cuite (briques à 8 trous et briques à 12 trous), produites par la briqueterie "El-Rym" de Treat dans la zone d'Annaba.

Dans le but d'étudier le comportement des murets, des jauges de déformation de type KC-70-120-A1-11 (figure 3.3) ont été collées à l'aide d'une colle de type ciment CC-33A, PC-6, à différents endroits critiques susceptibles d'être les plus sollicités. Ces jauges sont caractérisées par une longueur de 67 mm, une résistance à 24°C et 50% HR de $119,8 \pm 0,2 \Omega$ et un facteur de jauge de $2,11 \pm 1$.

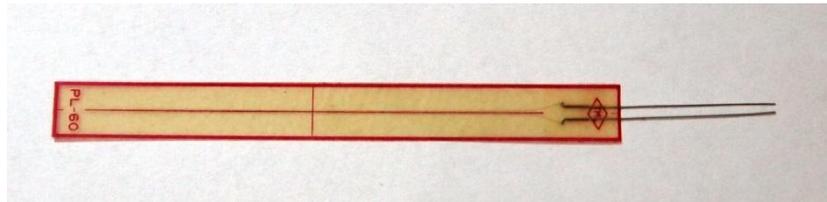


Figure 3.3 Jauge utilisée de type KYOWA.

3.3.1 Mesure des déformations

La mesure des déformations est réalisée à l'aide d'extensomètre à fil résistant appelé jauges de déformation (strain gage).

Les jauges de déformation permettent de mesurer de faibles déformations ; c'est pourquoi elles sont efficaces pour l'exploitation du domaine élastique. D'où la détermination des paramètres associés aux courbes contrainte-déformation. Cependant, la mesure ne peut s'effectuer directement car les variations de conductibilité de la jauge sont trop faibles pour être mesurées directement avec un ohmmètre. Il est donc nécessaire de faire un montage en pont de Wheatstone représenté sur la figure 3.4.

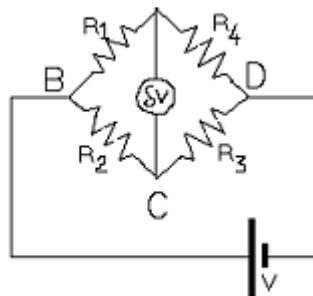


Figure 3.4, Montage du pont de Wheatstone

3.3.2 Principe de fonctionnement des capteurs à jauge

Soit un circuit constitué de quatre résistances R_1 , R_2 , R_3 et R_4 montées en pont (figure 3.4). On alimente par une source électromotrice (V) suivant la diagonale BD. À l'équilibre, la tension est nulle mais la variation de l'une des résistances fait apparaître une variation de tension entre A et C (cette variation est causée par la mise en chargement de l'éprouvette qui porte la jauge). Pour de très faibles variations, la tension est proportionnelle aux variations relatives $\Delta R/R$ de chacune des résistances. En négligeant les termes d'ordres supérieurs, elle vaut :

$$\delta V = \frac{V}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (3.1)$$

La résistance du fil : $R = \rho \frac{L}{S}$ (3.2)

ρ : la résistivité du fil de la résistance elle est constante.

L: longueur du fil ; sa variation est $\frac{\Delta L}{L}$

S: section du fil ; sa variation est $\frac{\Delta S}{S}$. Celle-ci dépend de $\frac{\Delta L}{L}$, étant donné que la déformation

transversale est liée à la déformation longitudinale $\frac{\Delta L}{L}$ par le coefficient de Poisson.

Le fonctionnement des jauges est par conséquent, basé sur la variation de la résistance électrique de la jauge qui est proportionnelle à sa déformation.

$$\frac{\Delta R}{R} = k * \frac{\Delta L}{L} \quad (3.3)$$

k est une constante qui dépend des matériaux considérés et de la température. Elle caractérise la sensibilité de la jauge.

Dans la pratique, ces résistances sont souvent d'autres jauges (une, deux ou quatre).

L'alternance des signes + et - caractérise la propriété fondamentale des ponts : deux résistances adjacentes agissent en sens opposé et deux résistances opposées agissent dans le même sens. On peut donc réduire les variations parasites (comme la température) et avoir une meilleure précision.

Un capteur à quatre jauges permet d'avoir une meilleure précision qu'un capteur à une jauge.

Dans la pratique, le nombre de jauges est souvent dicté par la géométrie de la pièce.

On distingue trois montages différents selon le nombre de jauges mis en place.

3.3.2.1 Montage en quart de pont

Dans le montage en quart de pont, on dispose d'une jauge et trois résistances complètent le pont de Wheatstone. Ce montage est le plus simple et le moins cher mais présente de nombreux inconvénients :

- La jauge étant éloignée des autres résistances, il faut prendre en compte la résistance induite par la longueur de câble.
- La tension alimentant la jauge diminue de la somme des variations de tension rencontrées sur les câbles de liaison. À l'entrée de la jauge, elle est largement inférieure à celle qui sort de l'amplificateur. La sensibilité du capteur (qui varie proportionnellement à la tension d'alimentation) s'en trouve alors amoindrie.
- La résistance du câblage ajoute également une atténuation du signal et donc une perte d'information. Par exemple, un câble de 100 m conduit à une variation de 10 %.

Des corrections sont indispensables à ce type de montage tel que l'étalonnage « shunt » du système de mesures.

3.3.2.2 Montage en demi-pont

Le montage demi-pont est utilisé lorsque l'on souhaite faire des corrections en température sur les matériaux à mesurer. Il est aussi utilisé pour supprimer la composante de traction (ou compression) lors de mesures de flexion.

3.3.2.3 Montage en pont complet

Ce montage est un peu plus coûteux que les deux montages précédents, mais il permet de donner des valeurs plus précises (sensible aux faibles déformations), et permet une meilleure correction de température et une suppression plus efficace des efforts qu'on veut éliminer.

3.3.3 Calcul des contraintes

Selon l'eurocode 6 [99], la résistance caractéristique de la maçonnerie peut être évaluée au moyen de la formule (3.4):

$$F_M = 0.5 * f_b^{0.65} * f_m^{0.25} \quad (3.4)$$

Selon le CNERIB la résistance caractéristique de la maçonnerie est évaluée par la formule (3.5):

$$F_M = 0,55 \sqrt[3]{f_m \cdot f_b^2} \quad (3.5)$$

Où

F_M = résistance à la compression de la maçonnerie.

f_b = résistance à la compression de l'élément (brique)

f_m : résistance à la compression du mortier

3.3.3.1 Murets construits en briques de 12 trous

3.3.3.1.1 Murets Non Enduits de mortier (notés M_{12tNE})

3.3.3.1.1.1 Cas 1: Utilisation de deux jauges horizontales (J_1, J_2)

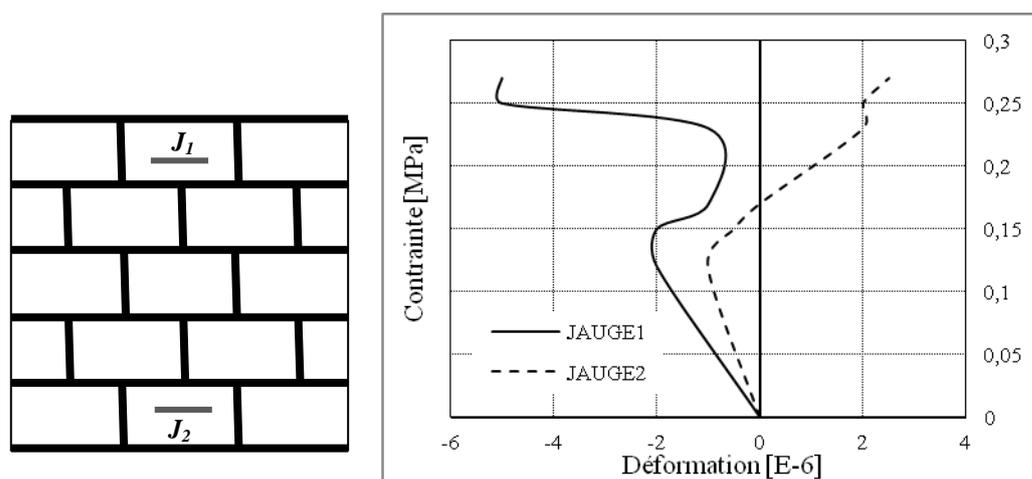


Figure 3.5 Relation Contrainte/Déformation (M_{12tNE}) cas 1.

La rupture est localisée au niveau du coin supérieur droit du muret (figure 3.2a) ce mode de rupture correspond au mode 1 (écrasement en coin) décrit dans le chapitre 1 (§1.2). La jauge J_1 est en compression jusqu'à rupture, tandis que pour la jauge J_2 , on note des déformations de compression (raccourcissement) jusqu'à une contrainte voisine de 0,17 MPa d'où commence une tension; ainsi la zone inférieure du muret est mise en traction c'est le début de fissuration dans la partie inférieure du mur (figure 3.5).

3.3.3.1.1.2 Cas 2: Utilisation de deux jauges verticales (J_1, J_2) et une jauge horizontale (J_3)

La jauge J_3 est en traction, alors que les jauges J_1 et J_2 sont en compression (figure 3.6).

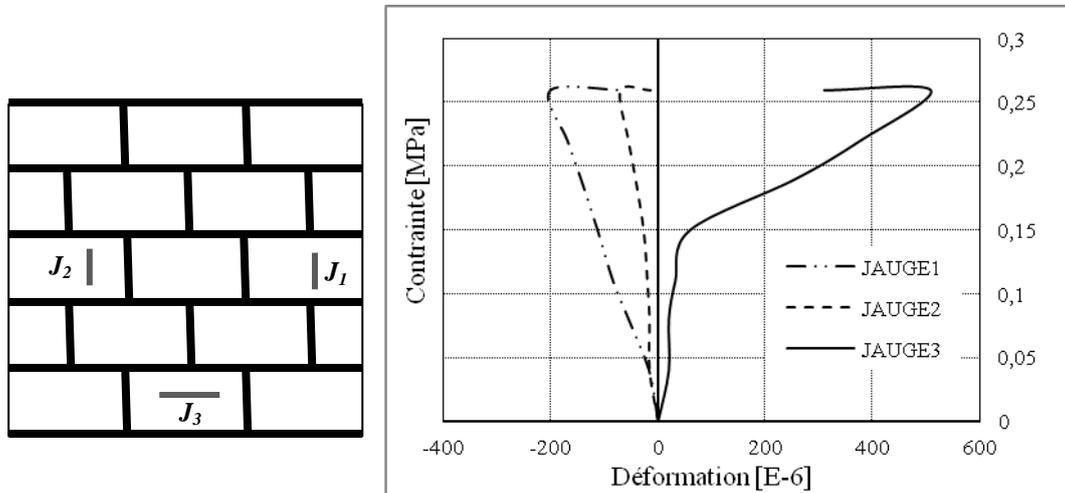


Figure 3.6 Relation Contrainte/Déformation ($M_{12t}NE$) cas 2.

3.3.3.1.1.3 Cas 3: Utilisation d'une jauge horizontale (J_1) et une jauge verticale (J_2)

Selon les déformations lues, la zone centrale est la plus sollicitée et donc la plus déformée. Le calcul a donné un module de déformation élastique $E = 2200$ MPa dans la zone médiane du muret.

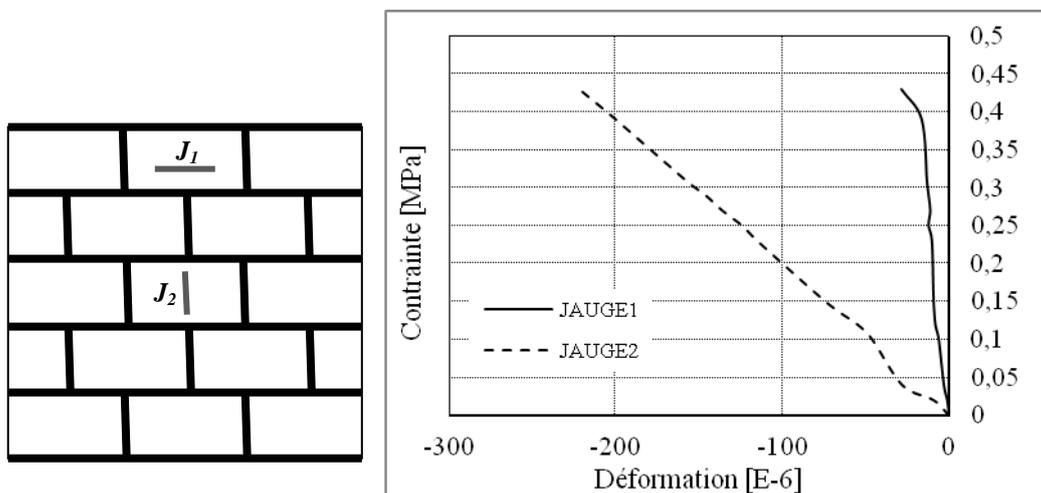


Figure 3.7 Relation Contrainte/Déformation ($M_{12t}NE$) cas 3

3.3.3.1.2 Murets Avec Enduit de mortier de ciment (M_{12tAE})

3.3.3.1.2.1 Cas1: Utilisation d'une jauge horizontale (J_1) et une jauge verticale (J_2)

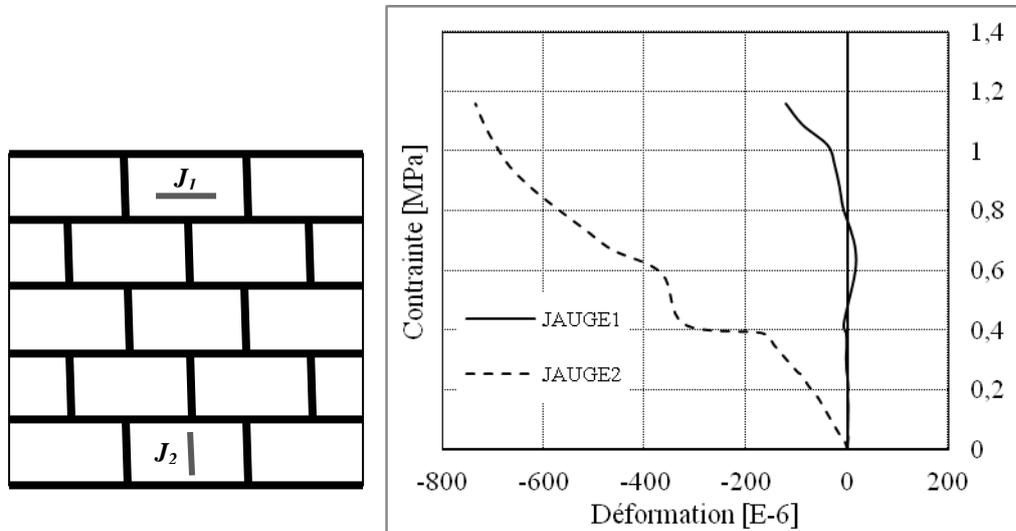


Figure 3.8 Relation Contrainte/Déformation (M_{12tAE}) cas 1

La jauge J_2 est en compression dès le début du chargement. On peut déduire de cette variation un module de déformation élastique $E = 2951$ MPa au niveau inférieur du muret (figure 3.8).

3.3.3.1.2.2 Cas 2: Utilisation de deux jauges verticales (J_1, J_2) et une jauge horizontale (J_3)

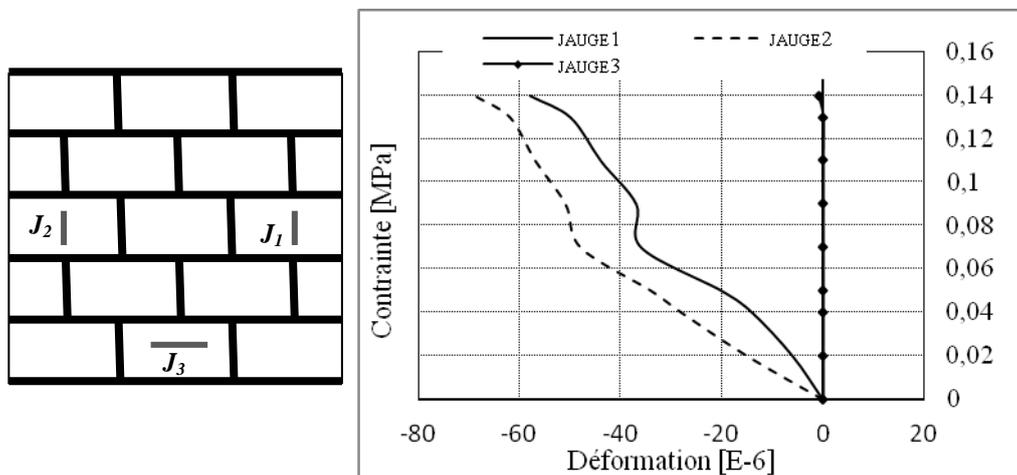


Figure 3.9 Relation Contrainte-Déformation (M_{12tAE}) cas 2.

Les courbes de la figure 3.9 mettent en évidence la différence du comportement des murets sans enduit (M_{12tNE}) cas 1 de la jauge J_2 (figure 3.3), le muret (M_{12tNE}) cas 2 de la jauge J_3 (figure 3.6) et le muret enduit de mortier de ciment cas de la jauge J_3 (figure 3.9). En effet, la jauge J_3 pour ce dernier ne se déforme quasiment pas. Le module de déformation longitudinal est d'une valeur voisine de 1333 MPa (jauge J_2) et de 3333 MPa dans le cas de la jauge J_1 .

3.3.3.1.2.3 Cas3: Utilisation de deux jauges verticales (J_1, J_2)

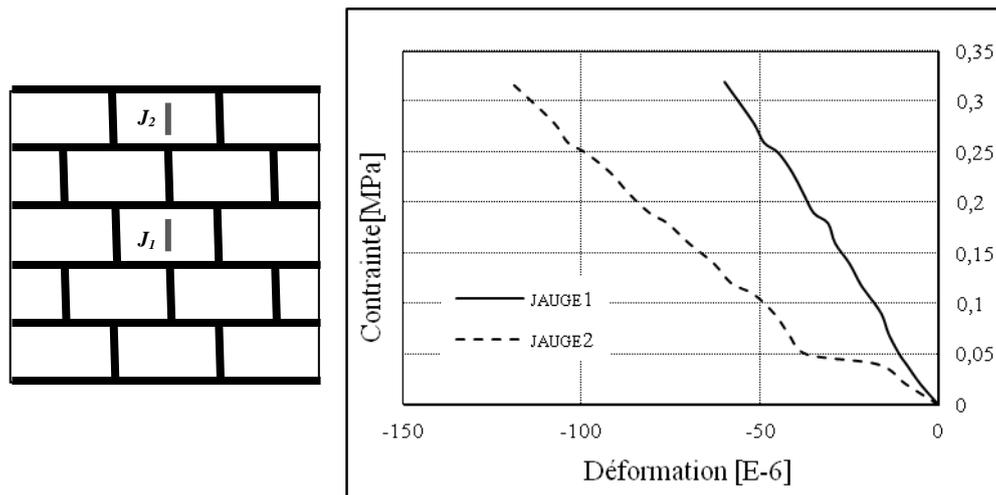


Figure 3.10 Relation Contrainte-Déformation (M_{12tAE}) cas 3

Le module de déformation élastique $E = 2222$ MPa

3.3.3.1.3 Murets Avec Enduit de ciment renforcé d'une nappe de toile de Jute (M_{12tAEJ})

3.3.3.1.3.1 Cas1: Utilisation de deux jauges verticales (J_1, J_2) et une jauge horizontale (J_3)

La rupture a lieu dans le plan, au niveau supérieur par destruction de la première rangée de briques à partir de la surface de chargement (figure 3.2c). Le décollement de l'enduit a eu lieu aux environs de 140 kN et la rupture a eu lieu à 200 kN.

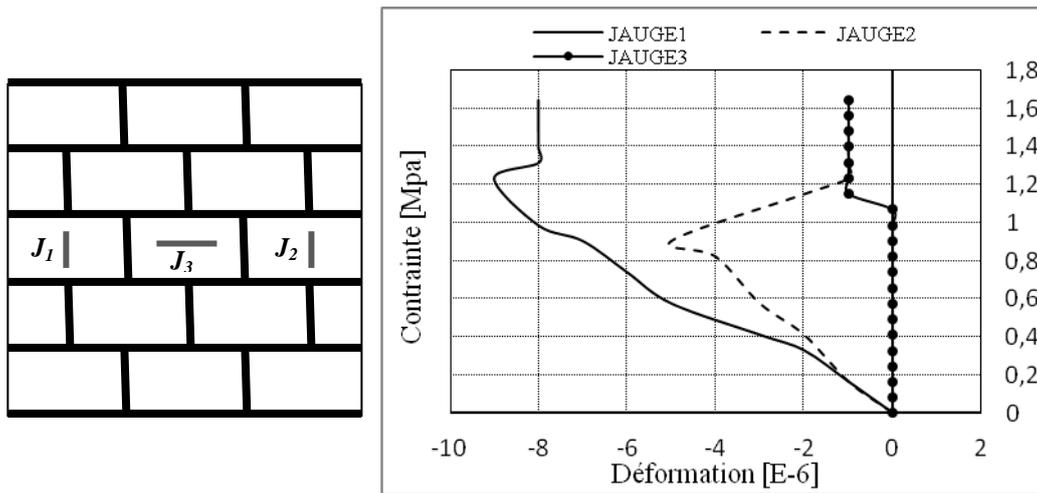


Figure 3.11 Relation Contraincte-Déformation ($M_{12t}AEJ$) cas 1

3.3.3.1.3.2 Cas2: Utilisation d'une jauge verticale (J_1) et deux jauges horizontales (J_2, J_3)

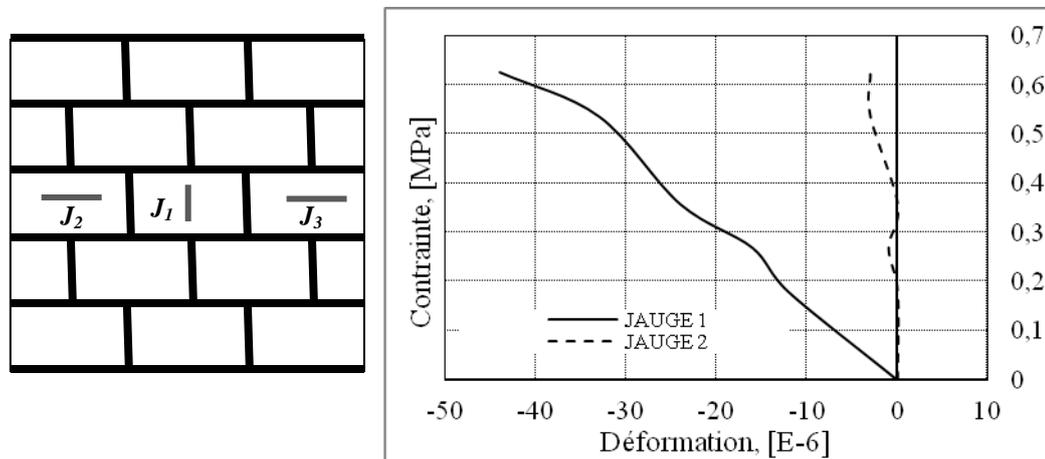


Figure 3.12 Relation Contraincte-Déformation ($M_{12t}AEJ$) cas2

La jauge J_3 fut défaillante après le lancement de l'essai. La rupture a eu lieu à un effort de 143,5 kN. Le module de déformation instantané est de l'ordre de 14000 MPa.

3.3.3.2 Murets construits en briques de 8 trous

3.3.3.2.1 Muret Non Enduit (M_{8tNE})

3.3.3.2.1.1 Cas1: Utilisation de deux jauges horizontales (J_1, J_2)

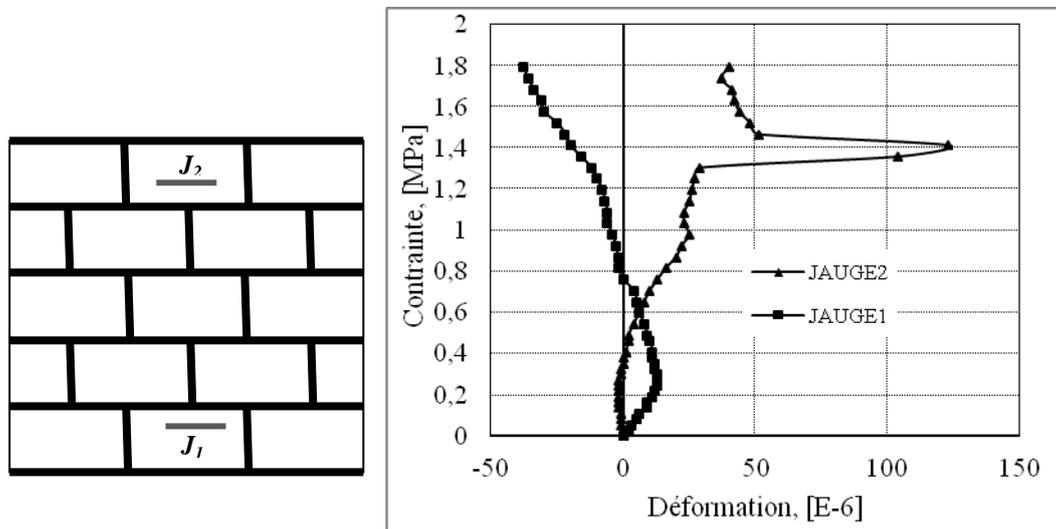


Figure 3.13 Relation Contrainte-Déformation (M_{8tNE}) cas 1

3.3.3.2.1.2 Cas 2: Utilisation de deux jauges verticales (J_1, J_2) et une jauge horizontale (J_3)

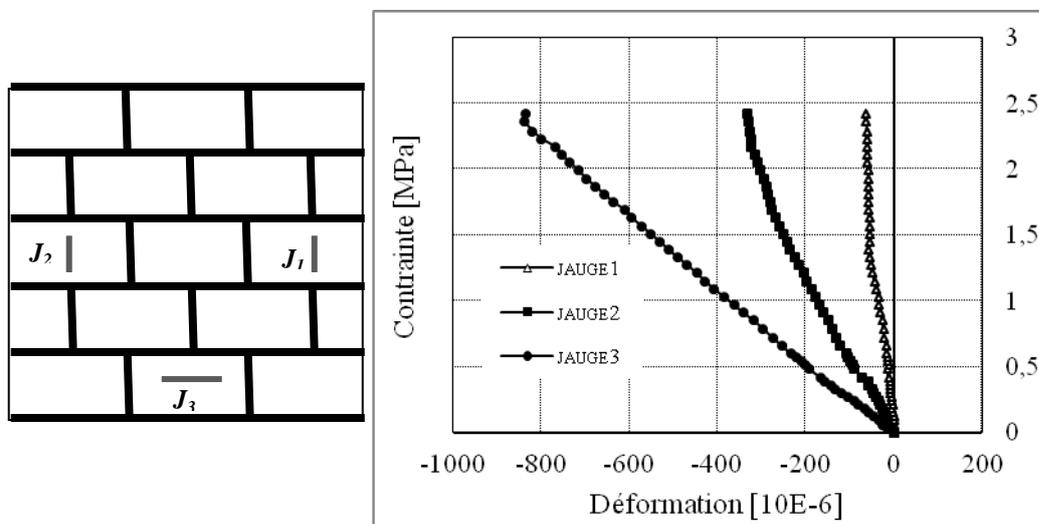


Figure 3.14 Relation Contrainte-Déformation (M_{8tNE}) cas 2

3.3.3.2.1.3 Cas3: Utilisation d'une jauge horizontale (J_1) et une jauge verticale (J_2)

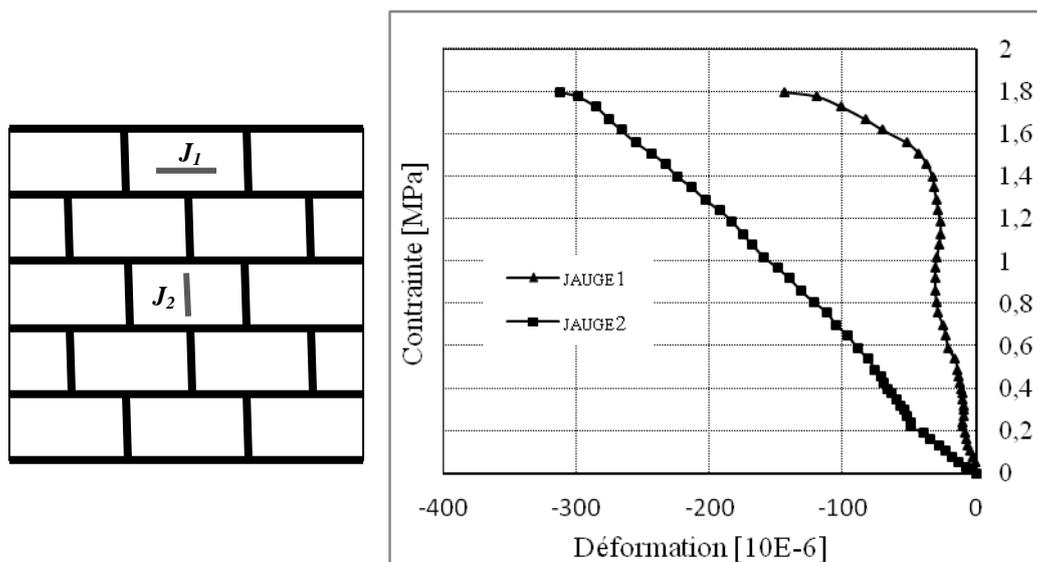


Figure 3.15 Relation Contrainte-Déformation (M_{8tNE}) cas 3

Le module de déformation longitudinale en zone médiane est de l'ordre de 4000 MPa.

3.3.3.2.2 Muret Avec Enduit (M_{8tAE})

3.3.3.2.2.1 Cas1: Utilisation de deux jauges horizontales (J_1, J_2)

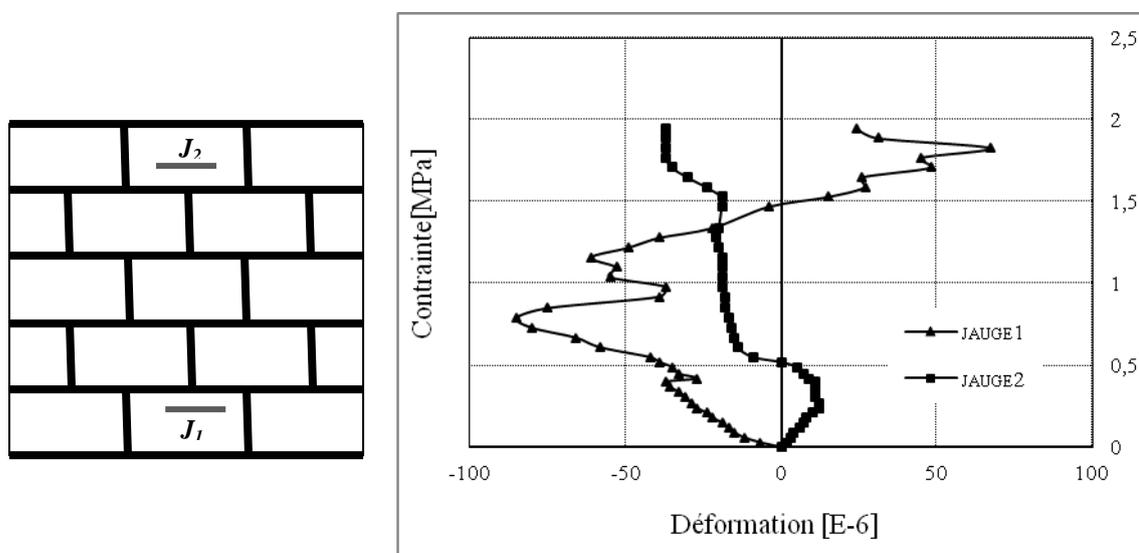


Figure 3.16 Relation Contrainte-Déformation (M_{8tAE}) cas 1

3.3.3.2.2 Cas2: Utilisation d'une jauge horizontale (J_1) et deux jauges verticales (J_2, J_3)

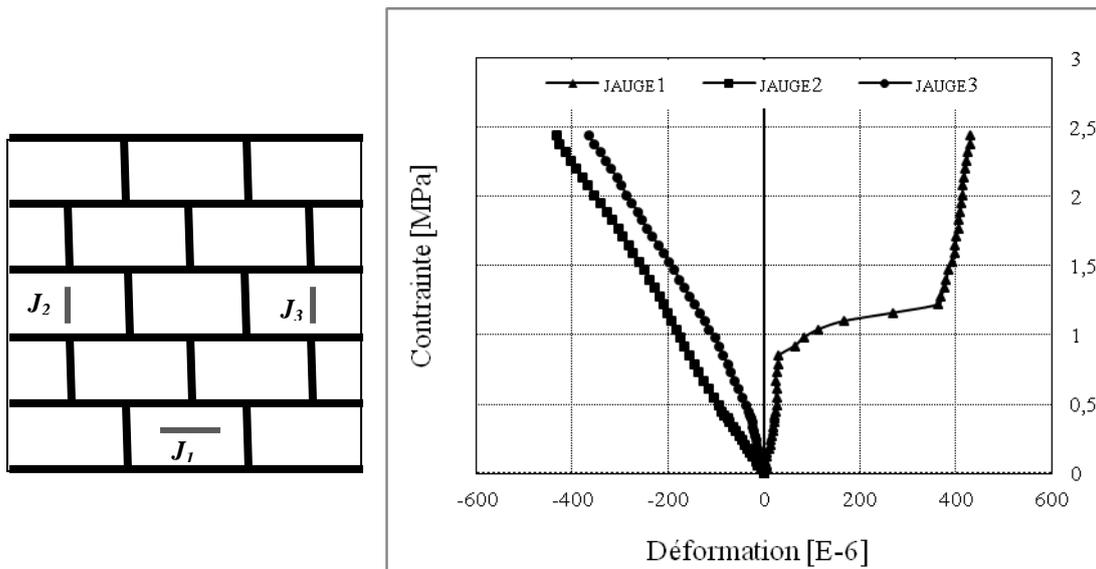


Figure 3.17 Relation Contrainte-Déformation (M_{8tAE}) cas 2

3.3.3.2.3 Cas3: Utilisation d'une jauge horizontale (J_1) et une jauge verticale (J_2)

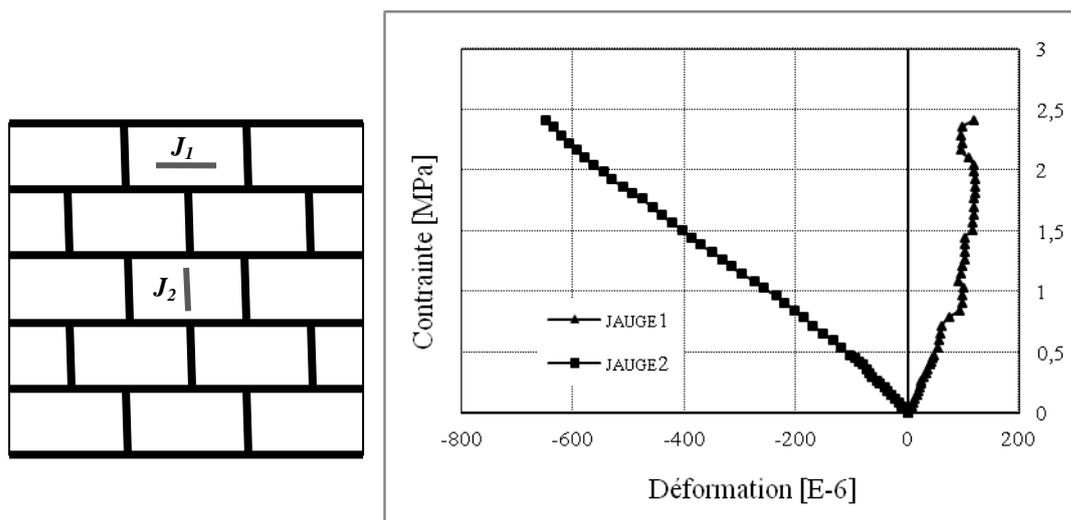


Figure 3.18 Relation Contrainte-Déformation (M_{8tAE}) cas 3

Le module de déformation longitudinale en zone médiane est de l'ordre de 5000 MPa.

En conclusion, on peut affirmer qu'à la suite des essais sur les murets avec et sans crépissage en mortier de ciment, les résultats liés au comportement de la maçonnerie utilisées dans la construction à la région Est du pays confirment ceux trouvés par Z. Douaissia [98] dans une

étude réalisée sur la caractérisation de la même maçonnerie au laboratoire de génie civil de l'université d'Annaba. On peut attribuer certaines différences dans les modes de ruptures et les valeurs de contraintes à l'excentricité dans la transmission de la charge lors des essais.

3.3.3.2.3 Murets en briques à 8 trous renforcés d'une nappe de toile de jute

3.3.3.2.3.1 Cas1: Utilisation de deux jauges horizontales (J_1 , J_2) et une jauge verticale (J_3)

La figure 3.19 permet de voir que les jauges (J_1 et J_2) enregistrent un effet de traction tandis que la jauge J_3 est en compression. La rupture se produit à un effort $N = 180$ kN sans atteinte des jauges.

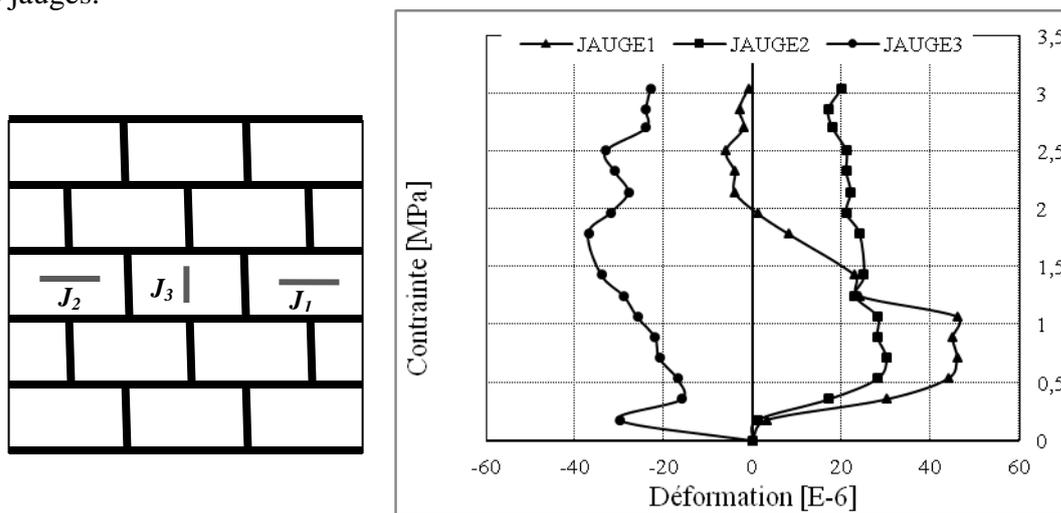


Figure 3.19 Relation Contrainte-Déformation (M_{gtAEJ}) cas 1

3.3.3.2.3.2 Cas2: Utilisation de deux jauges verticales (J_1 , J_2) et une jauge horizontale (J_3)

La jauge J_1 fut défaillante quelques minutes après le lancement de l'essai. La jauge longitudinale a montré un module d'élasticité de l'ordre de 4710 MPa.

Les valeurs moyennes des caractéristiques des murets (déformation longitudinale maximale: (ϵ_1), coefficient de Poisson (ν), contrainte de compression avant rupture (σ) et module d'élasticité statique en compression (E), déterminées expérimentalement à partir de ces essais, sont résumées dans le tableau 3.1.

Les résultats montrent que le renforcement des murets par l'ajout de nappes de fibres de jute a augmenté leur raideur, donc diminué leur déformabilité. Leur résistance en compression a également augmenté. Ces résultats ne satisfont pas les critères recherchés tels que ductilité et diminution de fragilité.

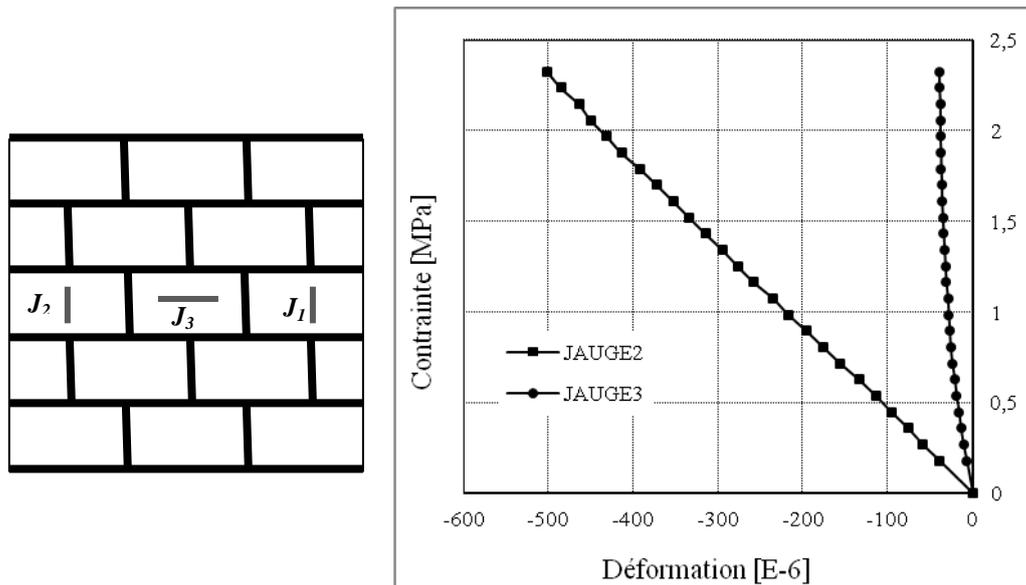


Figure 3.20 Relation Conainte-Déformation ($M_{st}AEJ$) cas 2.

Tableau 3.1 Caractéristiques mécaniques des murets.

Muret	avec éléments à 12 trous				avec éléments à 8 trous			
	ε_l [‰]	ν	σ [MPa]	E [MPa]	ε_l [‰]	ν	σ [MPa]	E [MPa]
N.E*	0,175	0,364	0,32	1776	0,322	0,214	1,85	4705
A.E*	0,208	0,164	0,54	2439	0,482	0,3	2,27	5038
A.E.J*	0,044	0,111	1,08	14916	0,030	0,033	3,05	8013
σ_{TE} [MPa]			2,04				1,86	
σ_{TC} [MPa]			2,9				2,65	

*N.E: Non Enduit, A.E: Avec Enduit de mortier de ciment, A.E.J: Avec Enduit renforcé de nappe de toile de Jute.

σ_{TE} désigne la résistance théorique calculée selon l'Eurocode 6.

σ_{TC} désigne la résistance théorique calculée selon le CNERIB.

3.4 CONCLUSION

Pour réduire les effets de concentration des contraintes dues aux défauts géométriques et aux excentricités de chargement, nous avons pris les soins de centrer les murets et de niveler les surfaces supérieures en posant une couche de mortier.

Cependant, les résultats expérimentaux concernant le comportement des murets en briques creuses révèlent la difficulté de normaliser la maçonnerie et par conséquent les murs en maçonnerie qui réunissent deux matériaux à caractères hétérogènes tels que le mortier et la brique creuse. Ceci est remarquable par la différence des valeurs théoriques préconisées par le règlement Eurocode 6 et le CNERIB.

En conclusion, nous pouvons affirmer que l'utilisation des nappes de toile de jute afin de renforcer les murets en maçonnerie a contribué à augmenter sa résistance à la compression sans améliorer sa déformabilité.

Tout ceci nous a fait penser à l'élaboration d'un composite renforcé de fibres de jute favorable pour le remplacement du mortier de revêtement.

Résultats expérimentaux et analyse

Cas des matériaux composites renforcés de fibres de jute

4.1 INTRODUCTION

Libellé en maçonnerie, le mortier est un matériau composite anisotrope responsable de la création d'une distribution homogène des contraintes, de corriger les irrégularités des blocs en maçonnerie et accommodant les déformations de retrait et de dilatation. Selon des recherches antérieures, l'influence du mortier sur la résistance à la compression de la maçonnerie n'est pas importante. En effet, Steil et al [102] ont observé une augmentation de 8,8% de la résistance à la compression des prismes de maçonnerie lorsque la résistance à la compression du mortier est augmentée de 78%. Dans une autre étude Cunha et al [103] ont augmenté la résistance du mortier à la compression de 400%, pour obtenir une augmentation de 20% dans la résistance à la compression de la maçonnerie. Néanmoins, le mortier a une grande influence sur la qualité et la force de la liaison ainsi que sur la déformabilité de la maçonnerie Edgell et Haseltine [104].

Mohamad et al [105] ont également étudié les propriétés de déformation de la maçonnerie grâce à des tests de compression sur prismes construit avec quatre types distincts de mortier. Les auteurs ont conclu que le mortier régit le comportement non-linéaire de la maçonnerie et a une grande influence sur la déformation axiale des prismes de maçonnerie. En outre, il a été prouvé que le mortier joue un rôle important dans les propriétés d'adhérence à l'interface unité de maçonnerie/mortier [106-109]

La maniabilité des mortiers joue également un rôle important dans le processus de construction des structures de maçonnerie. La maniabilité peut être considérée comme l'une des plus importantes propriétés du mortier, car elle influe directement sur le travail du maçon. Il est important de mentionner que la qualité du travail peut influencer considérablement les propriétés mécaniques de la maçonnerie. La maniabilité est un assemblage de plusieurs propriétés telles que la cohérence, la plasticité et la cohésion Panarese et al [110].

L'objectif de cette partie du travail est la formulation d'un mortier renforcé de fibres provenant de la valorisation des déchets de tissu de toile de jute, dans une matrice cimentaire. Selon la bibliographie, différents composés hydrosolubles sont susceptibles d'entraîner une incompatibilité de la fraction lignocellulosique et des composés cimentaires. C'est pourquoi il

a été procédé à une étude préliminaire permettant d'apprécier le degré de compatibilité avec le liant de la fibre utilisée qui est d'origine végétale. Dans un premier temps, nous avons étudié la compatibilité chimique en considérant des mélanges ciment-fibres de jute. Cependant, la confection de ces composites était difficile, à cause de la mauvaise ouvrabilité du mélange à l'état frais. Dans un deuxième temps, nous avons substitué une partie du liant par de la chaux afin d'améliorer l'ouvrabilité. L'ajout de chaux a amélioré la maniabilité en augmentant la teneur en eau. Néanmoins, les performances mécaniques ont diminué; nous avons alors, été amenés à ajouter un fluidifiant afin de limiter la quantité de chaux et d'eau nécessaires pour une maniabilité de l'ordre de celle d'un mortier normal.

4.2 ETUDE PRELIMINAIRE

Dans le but de mettre en évidence la compatibilité de la fibre de jute avec le liant, deux séries de tests d'hydratation ont été conduites. La première série concerne les mélanges sans ajout de chaux et de fluidifiant et la deuxième se rapporte sur les mélanges avec ajout de chaux et de fluidifiant.

4.2.1 Compatibilité chimique de la pâte de Ciment avec les fibres de jute

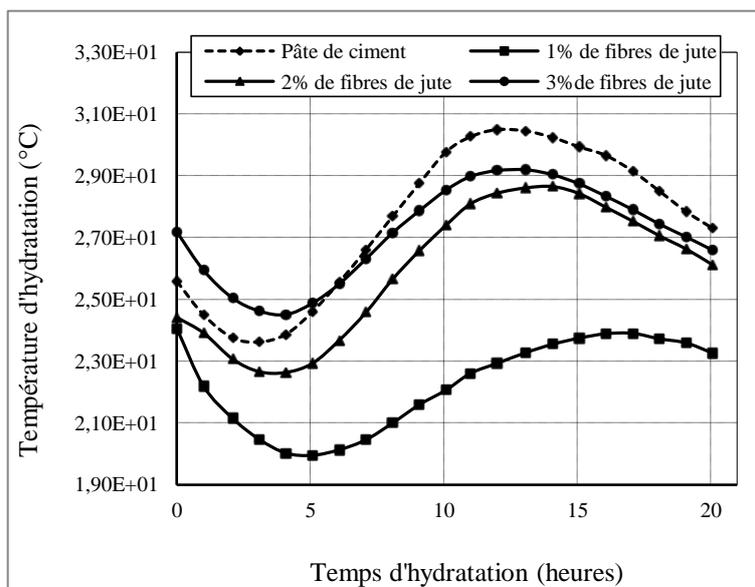


Figure 4.1 Variation de la température en fonction de la teneur en fibres de jute des composites sans ajout de chaux ni de fluidifiant.

La figure 4.1 montre la variation de la température d'hydratation du ciment en fonction du temps pour les composites contenant différents taux de fibres de jute propre sans ajout de chaux et de fluidifiant. Les valeurs des paramètres d'hydratation correspondant à ces tests sont résumées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Valeurs des paramètres d'hydratation correspondant aux composites sans ajout de chaux ni de fluidifiant.

Taux de fibres de jutes (%)	Pente maximale (°C/h)	Début de prise (h)	Température d'hydratation maximale (°C)	Temps de température maximale (h)	Indice d'inhibition (%)
0	1,1	3,41	30,6	12,0	-
1	0,6	4,66	26,4	17,08	2,64
2	1,0	4,16	28,7	14,08	0,1
3	1,2	4,66	29,2	12,00	0

On peut voir, d'une part, que pour le mélange contenant 3% de fibres de jute, le temps pris pour atteindre la température maximale est identique à celui pris par le mélange de référence sans fibres, mais la température maximale est inférieure. D'autre part, on constate que l'indice d'inhibition diminue avec l'augmentation du taux de fibres car la température maximale augmente et le temps d'atteinte de cette température diminue (pour les composites renforcés de fibres). Les indices d'inhibition ainsi calculés sont alors faibles, indiquant l'absence du caractère inhibiteur des fibres vis à vis de l'hydratation du ciment.

On peut attribuer cette diminution de l'indice d'inhibition et l'augmentation de la température maximale au fait que la fibre apporte au composite une certaine isolation thermique qui fait que la température dégagée pendant les réactions d'hydratation ne diminue pas rapidement.

Les températures maximales atteintes en utilisant la fibre bien propre sont inférieures à celles enregistrées dans le cas de la pâte de ciment sans ajout de fibres. Cependant, on peut remarquer que l'augmentation du taux de fibre entraîne une augmentation des températures maximales dégagées. On peut également voir que la vitesse d'hydratation ainsi que le temps de prise sont quasiment identiques et ne présentent aucun retard significatif.

Ceci confirme que:

1. L'absence de substance inhibitrice est certifiée.
2. Le composite ne nécessite pas une longue période de cure.
3. Les caractéristiques mécaniques ne seront pas affectées.

4.2.2 Compatibilité chimique de la pâte de Ciment/chaux avec les fibres de jute

D'après la figure 4.2, illustrant la variation de la température d'hydratation en fonction du temps, on voit que le temps de début de prise des composites contenant différents taux de fibres de jute lavées n'est pas trop influencé par l'ajout de fibres propres.

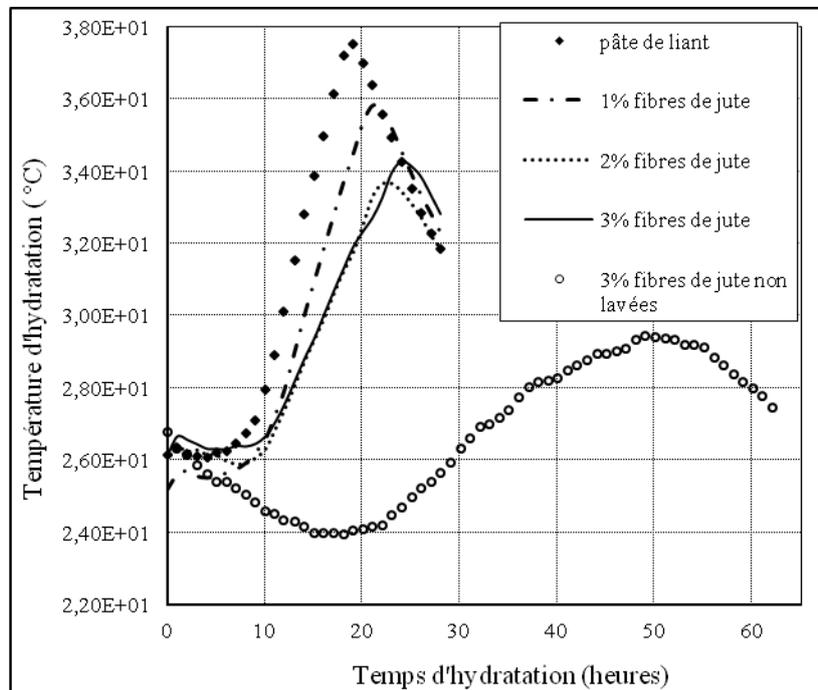


Figure 4.2 Variation de la température en fonction de la teneur en fibres de jute des composites sans ajout de chaux ni de fluidifiant.

Les résultats des tests d'hydratation des mélanges ciment/fibres de jute avec ajout de chaux et de fluidifiant sont représentés dans le tableau 4.2. Ils indiquent d'une part, que les composites à base de chaux nécessitent un temps de prise plus long, avec des valeurs de températures maximales d'hydratation supérieures à celles des composites sans chaux, et d'autre part, que les cinétiques d'hydratation sont inférieures.

Les résultats obtenus montrent également que la valeur correspondant au temps de début de dégagement de température est réduite de 21 heures pour le composite à 3% de jute non lavé à 7 heures pour le composite au même taux de fibres, mais bien lavées. La cinétique d'hydratation passant de 0,3°C/h à 0,64 °C/h.

Tableau 4.2 Valeurs moyennes des paramètres de la réaction d'hydratation du ciment en présence des de fibres avec ajout de chaux et de fluidifiant

Taux de fibres de jute (%)	Pente maximal e(C/h)	Temps de début de prise (h)	Température maximale (°C)	Temps de température maximale (h)	Indice d'inhibition, (%)
0	1,3	4	37,5	19	-
1	1	6	35,8	21,1	0,11
2	0,64	7	33,7	22,0	0,81
3	0,64	7	34,3	24,1	1,16
3 ^a	0,3	21	29,4	48,0	25,36

^a: fibres de Jute fibres provenant de sacs usés non lavés

Les faibles valeurs de l'indice d'inhibition pour chaque composition et l'absence de variation systématique avec la teneur en fibres, montrent que ces fibres sont inactives sur l'hydratation.

Ces résultats prouvent que la fibre issue de toile de jute est convenable pour la matrice cimentaire puisqu'elle n'entrave pas les réactions d'hydratation.

Les valeurs de l'indice d'inhibition pour tous les mélanges renforcés de fibres de jute propres sont inférieures à 10 caractérisant ainsi une faible inhibition. Ceci montre que le développement des résistances n'est pas affecté par la présence de fibres de jute.

4.3 ELABORATION DES COMPOSITES CIMENT/CHAUX/FIBRES DE JUTE (JFC)

Pour l'élaboration des composites, la fraction fibreuse est tout d'abord séchée jusqu'à masse constante. Elle est ensuite mélangée à sec avec le sable à vitesse lente dans un malaxeur à mortier normalisé jusqu'à l'obtention d'un mélange quasiment homogène. L'eau de gâchage est ensuite introduite dans le malaxeur vide. Le liant est ajouté à l'eau pendant le malaxage à vitesse lente durant 30 secondes. Par la suite, la quantité totale de sable et de fibre est introduite graduellement pendant le malaxage. Le fluidifiant est ajouté avant le passage à vitesse supérieure pendant 30 secondes, suivi d'un arrêt de 1 minute 30 secondes pendant lesquels le mortier adhérant aux parois est raclé vers le fond du malaxeur. A la fin, le malaxage est repris avec une grande vitesse pendant 2 minutes afin d'assurer une bonne répartition des fibres dans la matrice.

L'eau de gâchage a été ajustée pour avoir une maniabilité correspondant à celle d'un mortier classique (sable/ciment = 3, eau/ciment = 0,5). Cette maniabilité a été étudiée, en évaluant le temps d'écoulement du mortier à l'état frais, dans un maniabilimètre à mortier de type B

suivant la norme NF P18-452 [76]. Pour le mortier de référence, le temps moyen d'écoulement obtenu, pour trois essais successifs, est de 10 secondes.

Pour les composites fibrés, et suivant la quantité d'eau totale ajoutée, les résultats obtenus montrent une bonne corrélation entre la quantité de fibres ajoutée et la quantité d'eau nécessaire pour un temps d'écoulement proche de 10 secondes. La quantité d'eau de gâchage, exprimée en masse, est donnée par l'expression (4.1) ci-dessous :

$$W = 0,5L + kF \quad (4.1)$$

Où :

W , L et F sont respectivement les quantités, exprimées en masse, d'eau de gâchage, de liant (composé de 70% de ciment et 30% de chaux) et de fibres de jute. k est un coefficient qui tient compte de l'absorption d'eau (quantité d'eau rapportée à la quantité de fibres).

Donc:

$$W = 0,5(0,7C + 0,3L) + kF$$

D'où:

$$W = 0,35 C + 0,15 L + kF$$

Où C désigne le ciment, (L) désigne la chaux utilisée (initiale de son nom en anglais Lime) et (F) désigne la fibre de jute.



Figure 4.3 Composite fibré (JFC2) à l'état frais pendant le malaxage.

L'évolution de la quantité d'eau totale de gâchage en fonction de la quantité de fibres ajoutée, tout en gardant la quantité de liant constante est illustrée par la figure 4.4. Le coefficient k par identification est égal à 10.

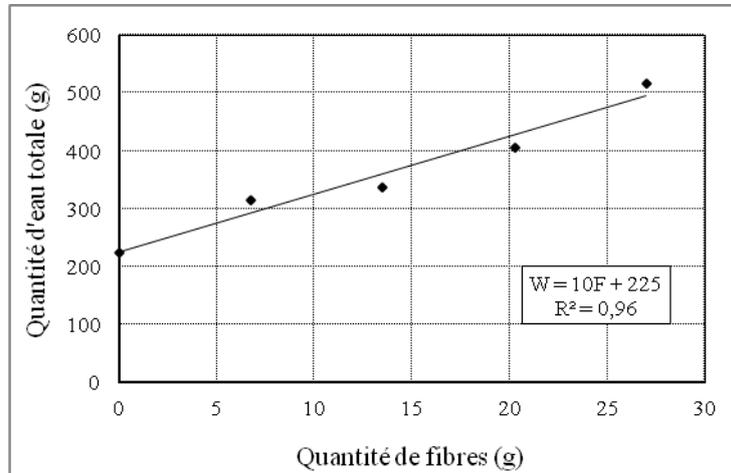


Figure 4.4 Evolution de la quantité d'eau de gâchage en fonction de la quantité de fibres dans les composites.

Après le malaxage, le mélange est mis en place dans des moules prismatiques de dimensions (40 x 40 x 160 mm) et des moules cylindriques de dimensions (110 / 220 mm), pour les différents types d'essais. Le remplissage se fait par coulage, piquage et vibration pour une bonne répartition du mélange dans les moules et pour éviter l'agglomération des fibres. Les échantillons sont conservés avant et après démoulage en salle à température et hygrométrie contrôlées ($20 \pm 2^\circ\text{C}$, HR=98%), pour une cure de 28 jours.

4.3.1 Détermination du pourcentage d'air occlus

Les composites ont été élaborés en faisant varier le pourcentage en fibres, de taille moyenne 15 mm. Le besoin en eau du matériau frais, pour atteindre une maniabilité convenable, est influencé par la texture superficielle et la longueur des fibres. Dans le cas des granulats légers notamment, la perte de maniabilité peut être due à une absorption plus ou moins importante d'eau en fonction de la porosité du granulat et de son degré de saturation. C'est pourquoi, la maniabilité du composite frais a été ajustée à la valeur souhaitée, en faisant varier le rapport eau/liant en fonction du taux de fibres. Le mélange ainsi obtenu n'est pas homogène. La mise en place nécessite un piquage alterné avec la vibration afin d'éviter la formation de paquet de fibres (figure 4.3).

Les résultats des essais sur composites à l'état frais pour la détermination du pourcentage d'air occlus ont montré que ce dernier ne dépend pas de la teneur en fibres. En effet, le taux d'air occlus est quasiment identique pour les 5 composites; il est d'une teneur de l'ordre de 3,5%. Ceci peut être relié à la morphologie des fibres issues du tissu de jute qui présente une texture lui permettant une bonne adhérence à la matrice pendant le malaxage, sans entrainement d'air.

4.3.2 Porosité

Les images au stéréo-microscope optique type Leica, réalisées sur les coupes transversales et longitudinales des composites à l'état durci montrent une structure de porosité variable pour les différents composites; contrairement à la teneur en air occlus qui était quasiment la même. Ceci est peut être dû au caractère adsorbant de la fibre de jute en ce qui concerne le matériau à l'état frais. Par ailleurs, on peut voir que, plus le matériau est fibré, moins il est poreux (figure 4.5 jusqu'à la figure 4.9). On peut attribuer ceci à la souplesse de la de la fibre qui lui permet de remplir les pores susceptibles de se former dans le composite.

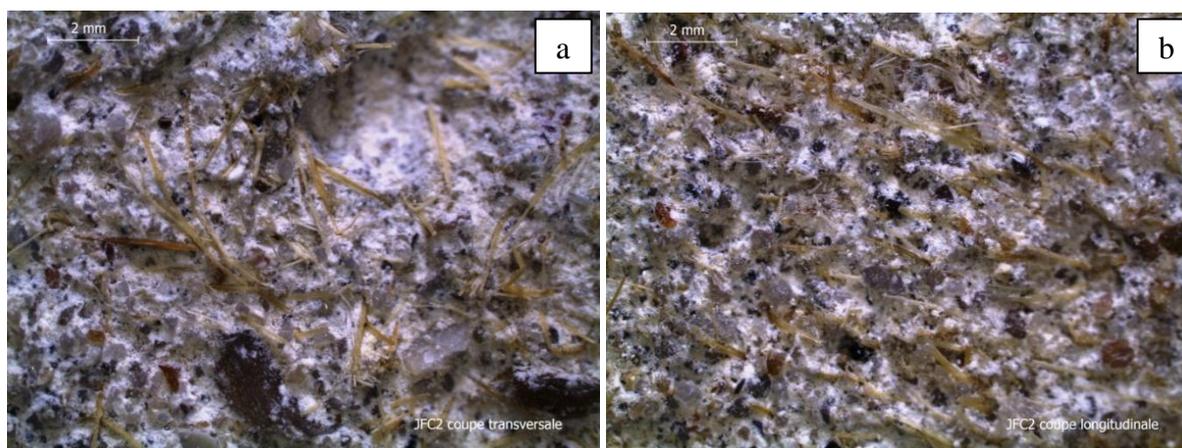


Figure 4.5 Photos au stéréo-microscope type Leica S8AP0, du composite JFC2, a: section transversale, b: section longitudinale.

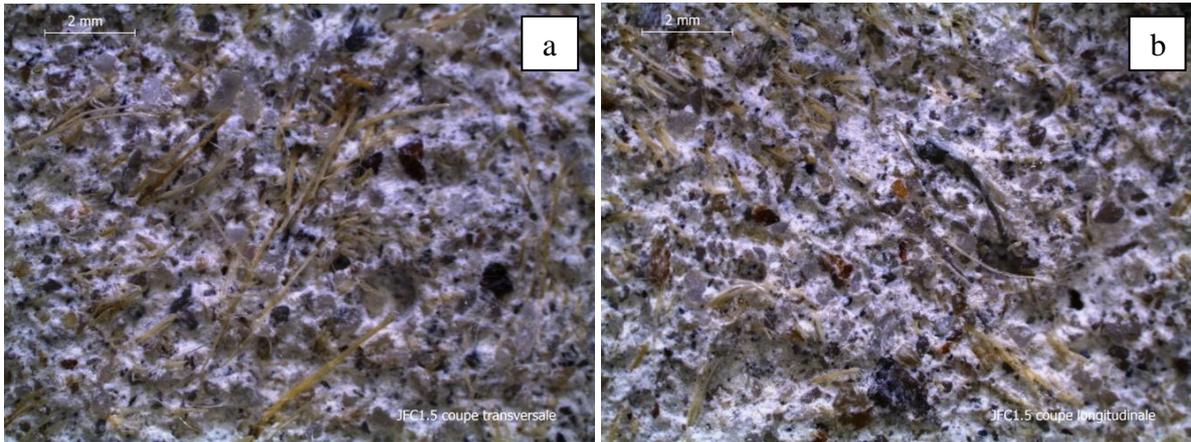


Figure 4.6 Photos au stéréo-microscope type Leica S8AP0, du composite JFC1.5, a: section transversale, b: section longitudinale.

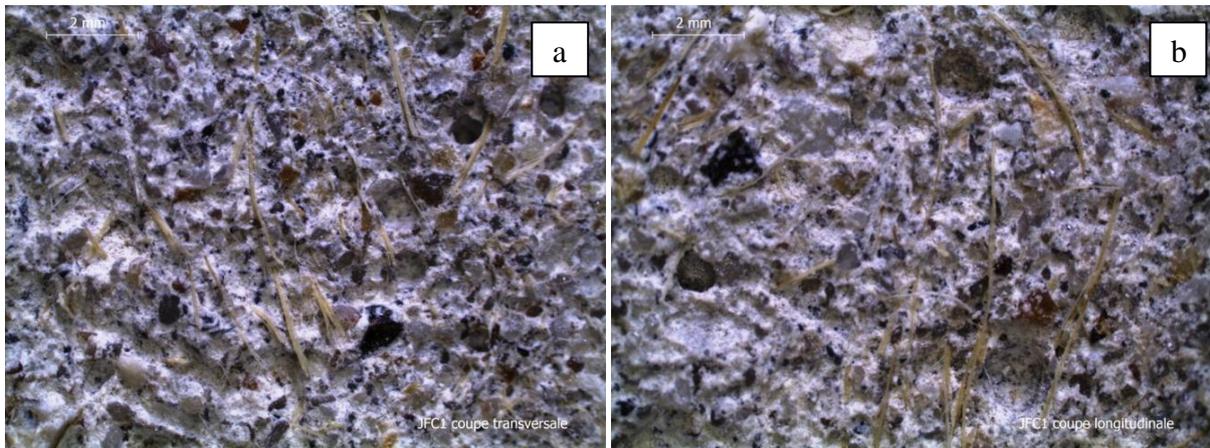


Figure 4.7 Photos au stéréo-microscope type Leica S8AP0, du composite JFC1, a: section transversale, b: section longitudinale.

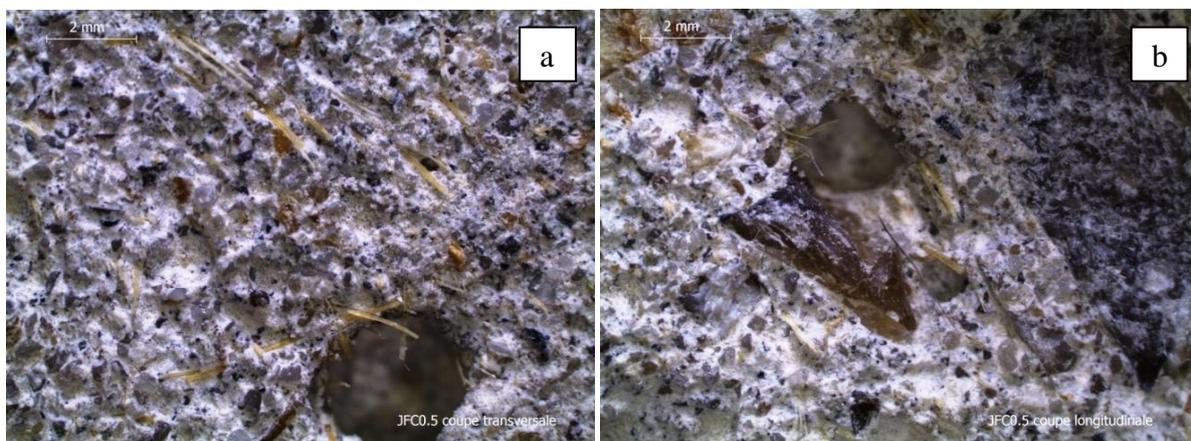


Figure 4.8 Photos au stéréo-microscope type Leica S8AP0, du composite JFC0.5, a: section transversale, b: section longitudinale.

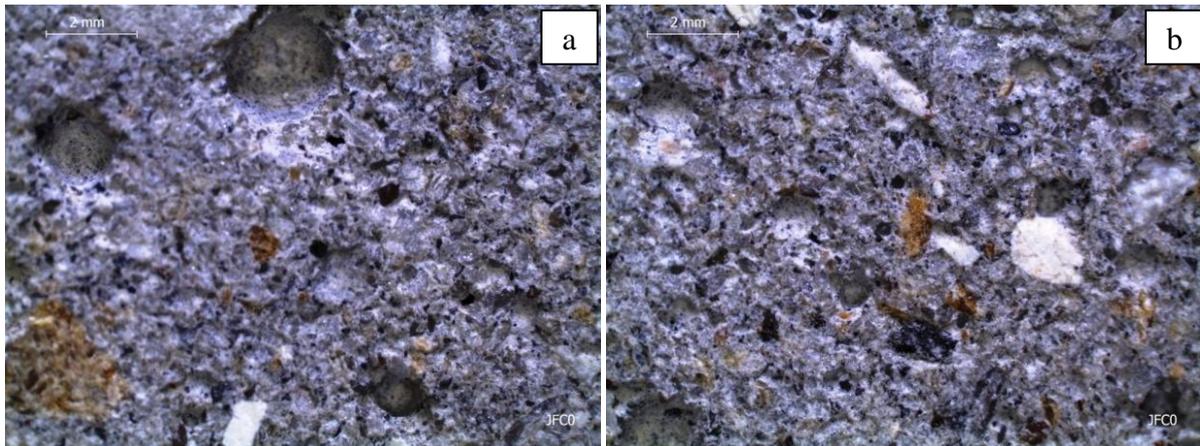


Figure 4.9 Photos au stéréo-microscope type Leica S8AP0 du composite non fibré JFC0, a: section transversale, b: section longitudinale.

La variation de la porosité en fonction du taux de fibres est illustrée par la figure 4.10 qui montre une décroissance exponentielle de la forme $y = 31,259e^{-0,285x}$ avec un coefficient de détermination d'environ 0,99. Où y représente le taux de porosité et x représente le taux de fibres

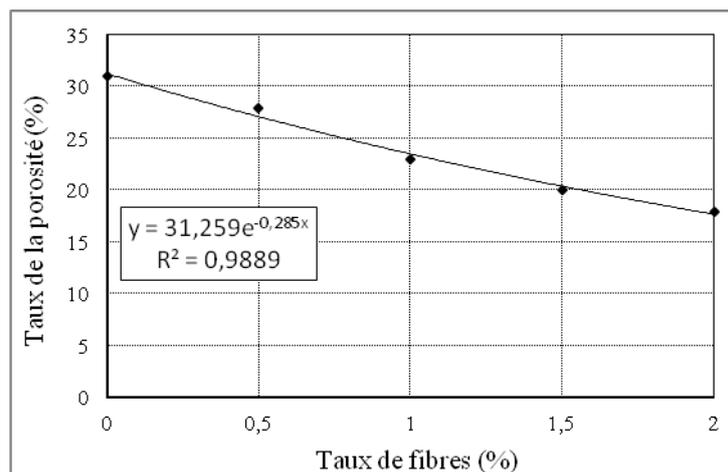


Figure 4.10 Variation de la porosité en fonction du taux de fibres.

4.4 ETUDE DU MATERIAU A L'ETAT DURCI

4.4.1 Propriétés physico-mécaniques

L'étude de l'état frais a montré que la substitution du sable par la fibre de jute propre jusqu'à 2% en masse de sable, n'entrave pas l'hydratation du ciment. Par conséquent, le travail s'est

poursuivi par l'étude du matériau à l'état durci; et notamment l'influence de la quantité de fibres sur les propriétés physicomécaniques de ces composites.

4.4.1.1 Masse volumique

La masse volumique sèche du composite a été déterminée par mesures géométriques et pesées sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 40 x 40 x 160 mm.

Compte tenu de la faible densité de la fibre, la masse volumique sèche du composite diminue avec l'augmentation de la teneur en jute. La figure 4.11 montre l'allure de cette variation pour les cinq types de composites à différents taux de substitution en fibres. Entre le JFC0 et le JFC2, nous remarquons un gain sur la masse volumique du matériau de l'ordre de 18,5%, alors que la substitution n'est que de 2% en masse de sable.

L'écart entre les différents composites peut s'expliquer par les différentes teneurs en eau ajoutée pour avoir une maniabilité d'ordre constant. Cette eau non nécessaire pour l'hydratation s'évapore lors du séchage et du durcissement en créant une perte de masse des échantillons.

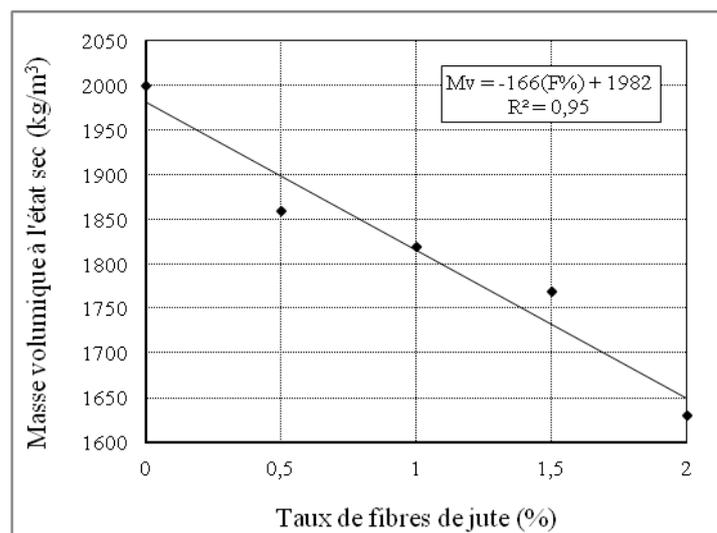


Figure 4.11 Evolution de la masse volumique sèche des composites en fonction de la teneur en fibres

4.4.1.2 Interface fibre / pâte de ciment

Un agrandissement par photographie au stéréo-microscope permet de mieux visualiser l'interface matrice-fibres. En effet, Les figures 4.12 jusqu'à 4.15 montrent en général l'aspect de la matrice des échantillons contenant respectivement 2%; 1,5%; 1% et 0,5% de fibres de jute. On peut observer une bonne adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire. Ceci peut s'expliquer par la répartition aléatoire et de la structure des fibres issues d'un produit de nature textile.

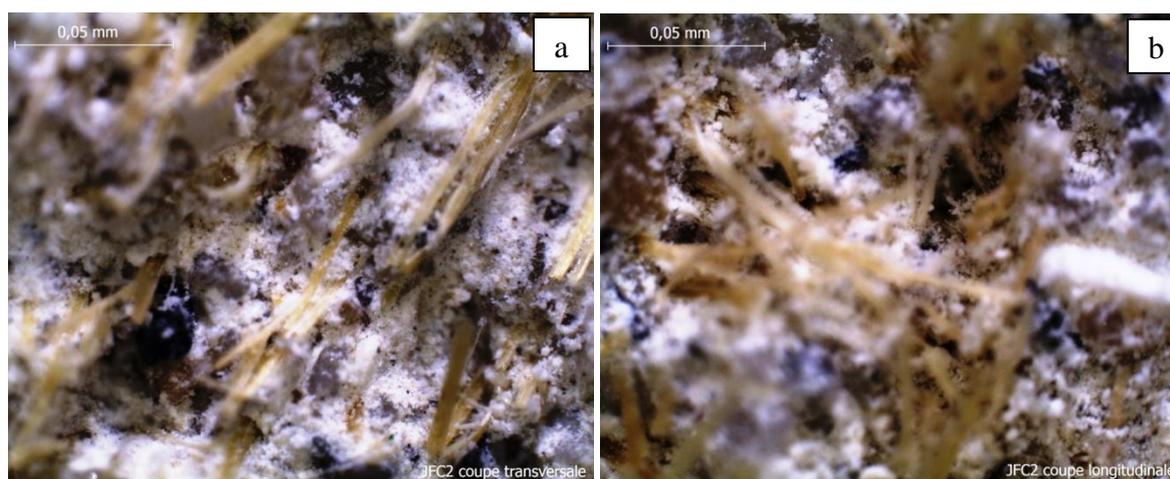


Figure 4.12 Adhérence des fibres de jute à la matrice ciment-chaux composite (JFC2)

a: section transversale, b: section longitudinale.

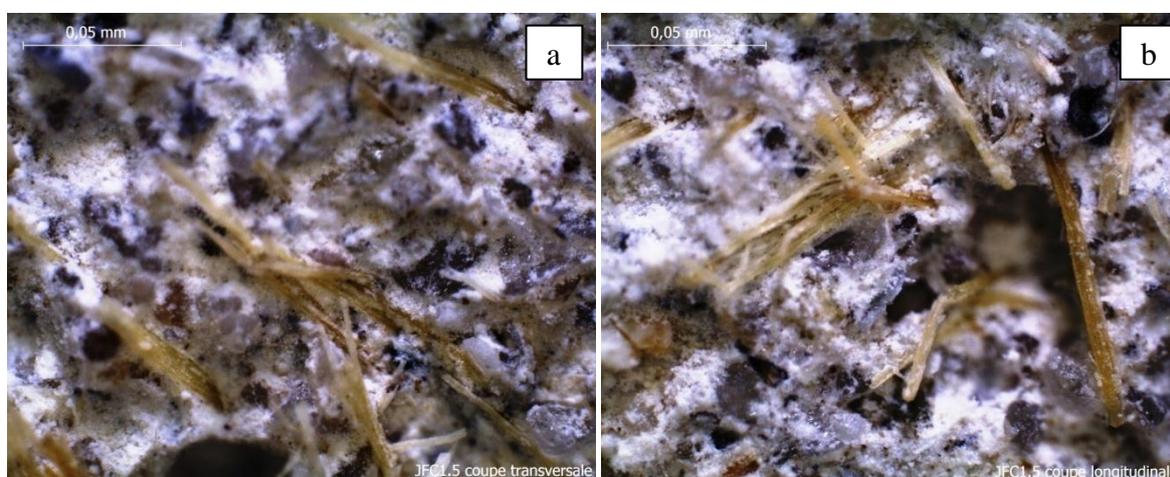


Figure 4.13 Adhérence des fibres de jute à la matrice ciment-chaux composite (JFC1.5),

a: section transversale, b: section longitudinale.

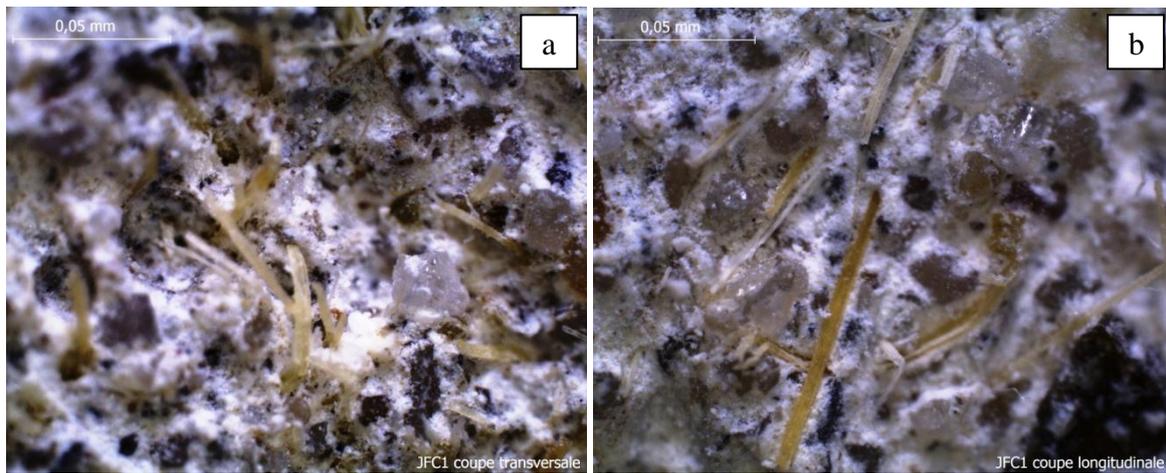


Figure 4.14 Adhérence des fibres de jute à la matrice ciment-chaux composite (JFC1),
a: section transversale, b: section longitudinale.

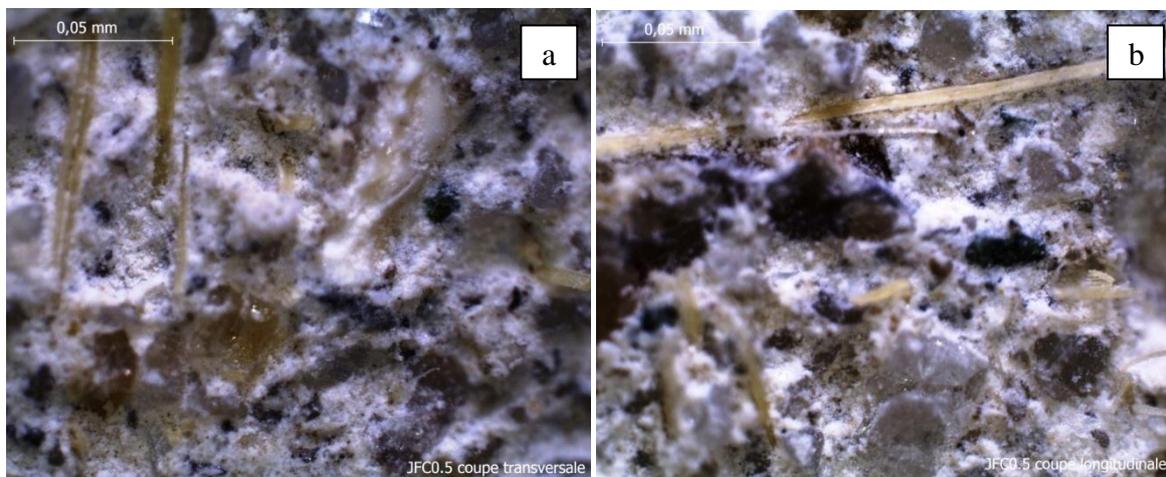
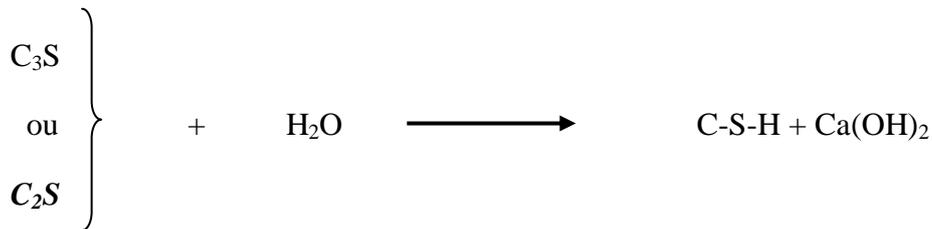


Figure 4.15 Adhérence des fibres de jute à la matrice ciment-chaux composite (JFC0.5),
a: section transversale, b: section longitudinale.

Des études au Microscope Electronique à Balayage de la fibre de jute élaborées par Leonard Y et al [99] ainsi que Prosenjit Saha et al [16] (Chapitre 1, figure 1.16) ont montré une surface relativement lisse pour les fibres non traitées mais après traitement dont l'alcalinisation, toutes les fibres ont montré une surface rugueuse et de sections inégales. Cette rugosité est favorable pour l'adhérence fibres-matrice. D'autres recherches montrent que les traitements subits par les fibres végétales entre autres la fibre de jute, pour les transformer en fibre favorable à la fabrication de produits textiles améliore leur stabilité thermique et mécanique. Selon Leonard Y et al [99], l'indice de cristallinité a aussi augmenté en comparaison avec le jute à l'état brut. Rappelons que la pâte de ciment hydraté est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et le ciment. Les réactions d'hydratation font partie d'un processus chimique complexe où les principaux composés du ciment C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF réagissent pour former de nouveaux

composés insolubles qui durcissent avec le temps. C'est surtout l'hydratation du C_3S et du C_2S qui participe le plus au développement de la résistance en produisant des C-S-H. Sommairement, la réaction d'hydratation du C_3S et du C_2S est la suivante :



Les hydrates les plus importants sont les C-S-H. Il s'agit d'un gel qui influence la plupart des propriétés de la pâte.

- La pâte de ciment hydraté est formée par :
 - des hydrates ;
 - des grains de ciment non-hydraté ;
 - des espaces capillaires ;
 - des bulles d'air.
- Les hydrates comprennent :
 - les silicates de calcium hydratés (C-S-H).
 - les aluminates de calcium hydratés.
 - la chaux hydratée (portlandite).
 - de l'eau adsorbée sur certains cristaux.
 - des impuretés.

L'objectif de cette étude est de vérifier l'état d'hydratation du ciment en présence de fibres de jute dans la matrice, particulièrement au niveau des zones de contact entre la matrice cimentaire et les fibres. L'interface pâte de ciment-fibre joue, en effet, un rôle de premier plan dans le comportement mécanique du matériau.

Les observations au microscope révèlent une bonne adhérence des C-S-H aux interfaces pâte de ciment-fibres pour les types de composites étudiés (Les figures 4.12 jusqu'à 4.15). Ceci caractérise une meilleure cohésion de la matrice. Cette observation est à relier au degré d'avancement de la réaction d'hydratation à l'interface pâte de ciment-fibres due probablement à la disponibilité de la quantité d'eau adsorbée par les fibres de jute. Cet excédent d'eau, qui devient disponible, assurerait une meilleure hydratation du ciment dans le temps. L'adhérence entre les fibres et la matrice s'en trouve ainsi renforcée.

4.4.1.3 Module d'élasticité dynamique

Le module d'élasticité dynamique a été déterminé par propagation d'ondes ultrasonores, conformément au mode opératoire donné au chapitre 2 (§2.5.2.1.2).

L'ensemble des résultats de la baisse de la célérité de l'onde ultrasonore dans le composite est donnée par le tableau 4.3. La célérité diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres. Ainsi, la célérité décroît de 3374 m/s pour le composite à 0% de fibres (JFC0) jusqu'à la valeur de 1486 m/s pour le composite à 2% de fibres (JFC2); soit une diminution de 56%. Le module d'élasticité est d'autant plus faible que le taux de fibres est important. Ceci correspond à une vitesse de propagation de l'onde ultrasonore plus faible dans les composites fibrés; c'est à dire une augmentation de la gêne à sa propagation en raison du caractère textile de la fibre de jute utilisée.

L'évolution du module d'élasticité dynamique des composites étudiés ciment-fibre de jute, en fonction de la teneur massique est donnée par la figure 4.16. On constate que, pour une teneur en fibres de 2%, le module dynamique diminue de 23 GPa à 3.6 GPa.

Tableau 4.3 Valeurs des résultats des tests de détermination des modules d'élasticité dynamiques majorés.

Composites	Temps de propagation des ondes (μ s)	Célérité (m/s)	Perte de célérité (%)	Module dynamique (GPa)
JFC0	74	3374	0	(23)
JFC0.5	85	2851	15	15
JFC1	91	2740	19	13,7
JFC1.5	109	2290	32	9
JFC2	142	1486	56	3,6

L'écart observé entre les types de composites, (tableau 4.3) peut être attribué à la structure et à la répartition aléatoire dans les matériaux des fibres textiles d'origine végétale.

Il semble évident que la structure textile des fibres traitées favorise l'absorption des ondes ultrasonores en augmentant la surface de contact pâte de ciment-fibre de jute puisque l'augmentation du taux de fibres diminue le module d'élasticité dynamique. Par ailleurs, les

mesures de la célérité des ondes ultrasonores dans les différents types de composites pris séparément, dans les mêmes conditions opératoires, ont donné des valeurs de 1486 m/s pour le composite à 2% et 3374 m/s pour le composite de référence JFC0 (meilleur conducteur des ondes). Cet écart est réduit en diminuant le taux de fibres; pour la pate de ciment qui est meilleur conducteur, la célérité est de 3723. En effet, le phénomène est diminué par la présence de chaux dans la matrice cimentaire dans le cas du JFC0.

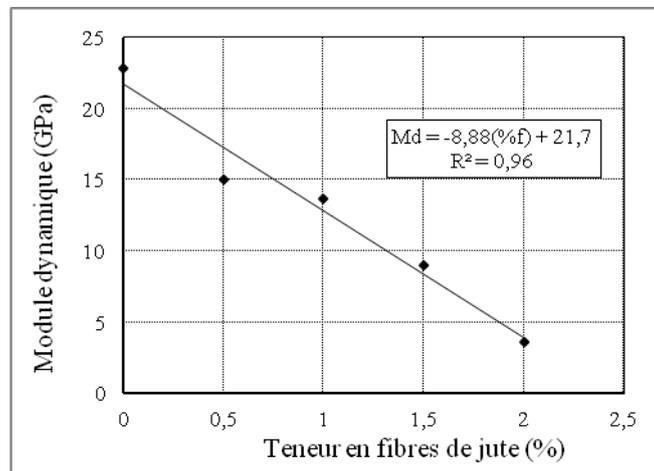


Figure 4.16 Variation du module dynamique en fonction du taux de fibres

La valeur de l'air occlus dans tous les composites est quasiment la même; c'est pourquoi on peut confirmer que la présence de fibres de jute est responsable de la diminution de la célérité et de celle du module d'élasticité dynamique.

Les ondes doivent contourner les fibres pour se propager dans la pâte de ciment et augmenter ainsi le temps de propagation. L'incorporation du jute dans une matrice cimentaire met ainsi en évidence leur capacité à atténuer les ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations, si l'on compare les résultats aux valeurs obtenues dans le cas d'un mortier normal pour lequel la célérité est de 3600 m/s.

4.4.1.4 Résistances mécaniques

Pour la détermination des résistances mécaniques en compression et en flexion, la technique expérimentale utilisée est celle présentée au Chapitre 2 (§2.5.2.1.3).

Pour voir l'évolution de la résistance avec l'âge, les essais ont été effectuées à l'âge de 3, 7, 14, et 28 jours sur des éprouvettes de dimensions 40 x 40 x 160 mm.

4.4.1.4.1 Résistance à la compression

4.4.1.4.1.1 Mode de rupture des éprouvettes

La figure 4.17 illustre les modes de rupture en compression sur éprouvettes normalisées 40x40x160 mm, des composites étudiés.

L'influence des fibres sur le mode de rupture des composites est évidente; les photos montrent bien que les mortiers renforcés de fibres de jute de 0,5% à 2% (JFC0.5, JFC01, JFC1.5 et JFC2) sont moins fragiles que le mortier non renforcé (JFC0) qui est complètement détruit à la suite d'une rupture brutale. Pour tous les composites fibrés, la rupture intervient sans destruction des éprouvettes.

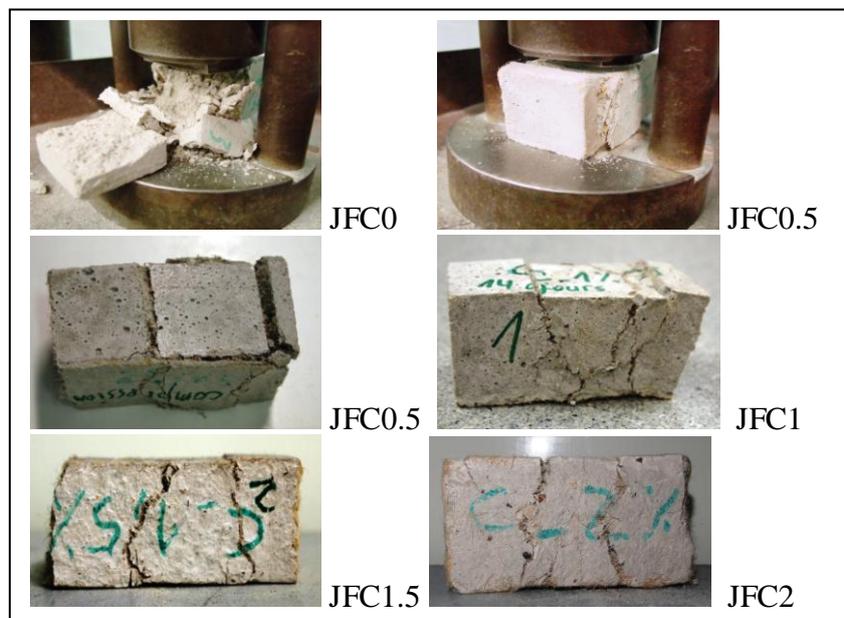


Figure 4.17 Modes de rupture en compression des différents composites étudiés.

Comme il était prévisible, les résistances à la compression diminuent avec l'augmentation de la teneur massique en fibres. L'effet de l'ajout de fibres sur la résistance à la compression des composites est mis en évidence par la figure 4.18. Celle-ci montre une perte de résistance de l'ordre de 64% à l'âge de 3 jours et une perte de 61% à l'âge de 28 jours, pour le composite le plus fibré (JFC2) par rapport au composite de référence (JFC0).

Cette diminution de résistance est attribuée aux propriétés physiques et géométriques des fibres qui engendrent des fragilités locales dans la matrice cimentaire. Ce phénomène confirme les résultats observés pour les masses volumiques des composites qui diminuent lorsque le taux de fibres augmente.

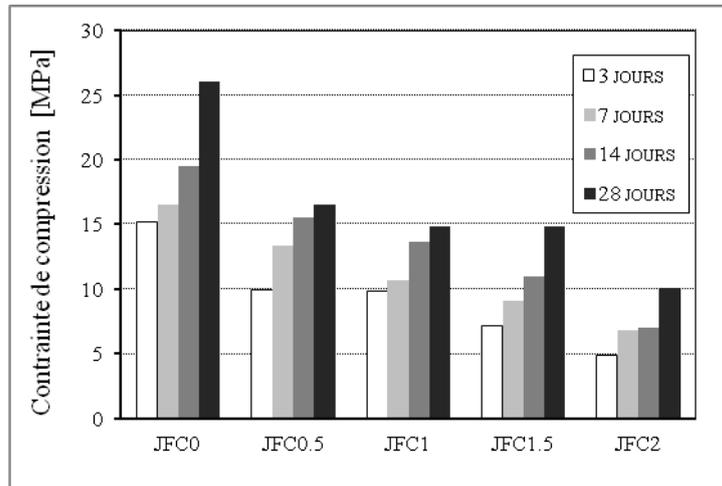


Figure 4.18 Effet de l'ajout de fibres de jute sur la perte de résistance à la compression des composites.

Un exemple d'évolution des résistances à la compression de 3 à 28 jours, pour l'ensemble des composites étudiés, est donnée par la figure 4.18 et la figure 4.19. Les contraintes de compression diminuent considérablement avec l'augmentation de la teneur massique en fibres, mais restent dans des valeurs compatibles avec l'utilisation en isolants porteurs pour des teneurs de fibres inférieures ou égales à 2% en masse de sable.

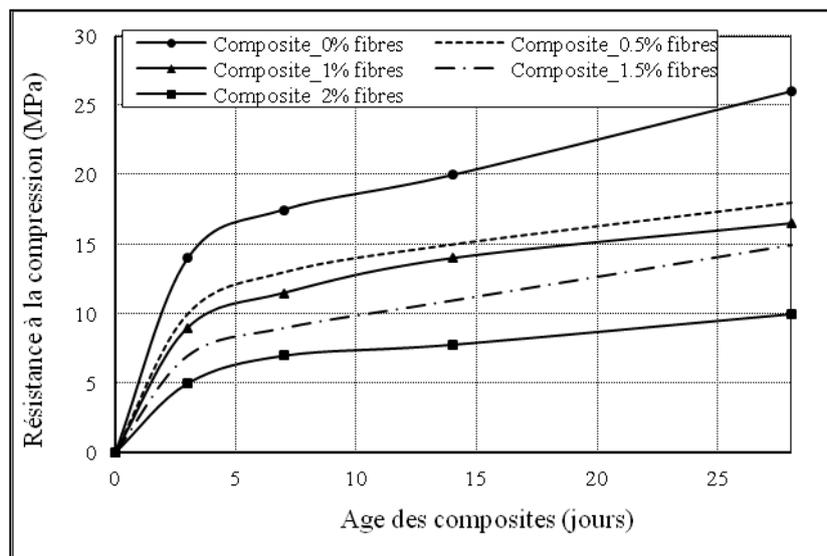


Figure 4.19 Evolution de la résistance à la compression pour les différents composites

La croissance de la résistance mécanique avec l'âge des composites est comparable avec celle du matériau de référence. Ceci confirme la compatibilité de la fibre avec la matrice cimentaire.

La figure 4.20 indiquant la correspondance entre la masse volumique et la résistance à la compression illustre une tendance exponentielle de la courbe. La diminution de la masse volumique se traduit bien par une baisse de la résistance mécanique.

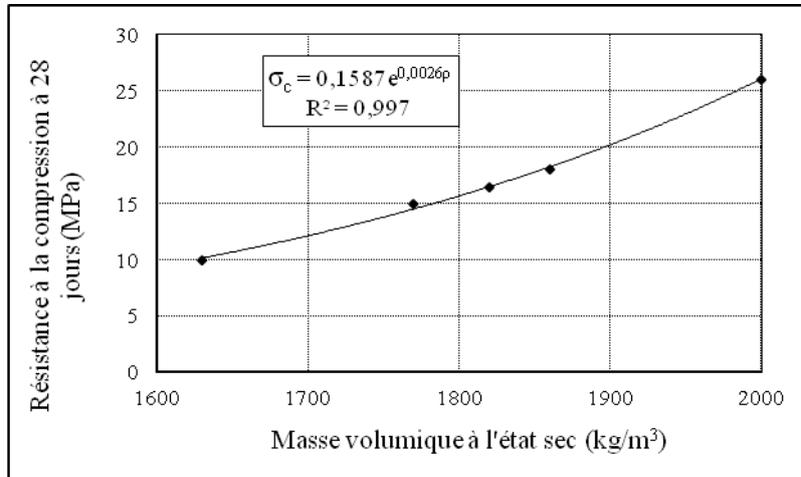


Figure 4.20 Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de la masse volumique.

Au vu des points expérimentaux, la relation la plus probable qui lie la résistance à la compression et la masse volumique sèche du matériau est une fonction du type exponentiel. On trouve l'expression:

$$\sigma_c = 0.1587 e^{(0.0026 \rho)}$$

Avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,997$.

Où σ_c désigne la contrainte de compression du composite à 28 jours et ρ désigne sa masse volumique à l'état sec.

Ce qui confirme les résultats de travaux antérieurs menés sur le béton léger de bois [112].

4.4.1.4.2 Résistance à la flexion

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes normalisées de type 40 x 40 x 160 mm. La figure 4.21 présente l'évolution de la résistance à la flexion avec l'âge de 3 à 28 jours, en fonction de la teneur massique en fibres.

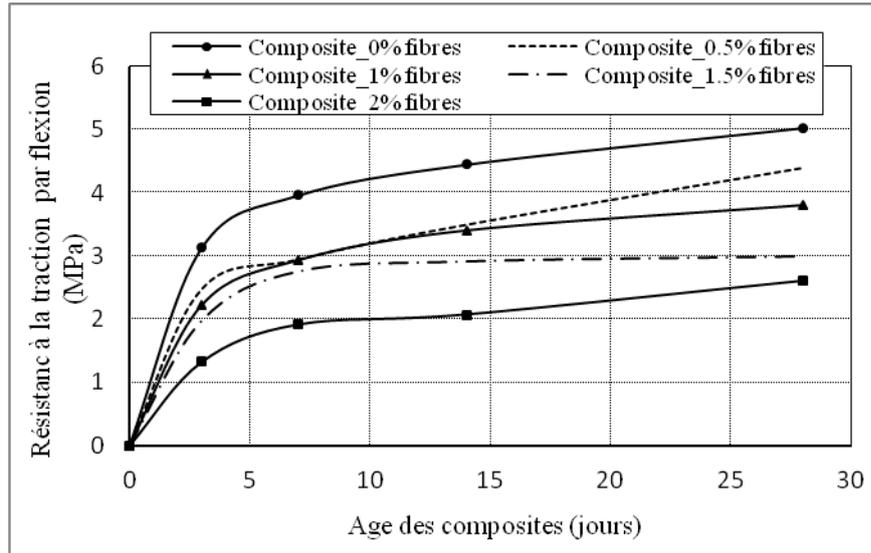


Figure 4.21 Variation de la résistance à la flexion du composite pour différents teneurs en fibres

On peut voir que l'ajout de fibres atténue la résistance du fait de la rupture des liaisons fibres-matrice. Ceci est corroboré par une décroissance d'autant plus importante que la teneur en fibres est plus grande; c'est à dire une interface pâte-fibres moins importante.

Une comparaison de la résistance à la flexion à 28 jours en fonction du pourcentage de fibres est illustrée par la figure 4.22. On peut constater que l'augmentation du taux de fibres provoque une diminution de la résistance à la flexion. Par rapport au mortier de référence JFC0 dont la valeur de la résistance est de 5 MPa, on constate une chute de résistance de 48% pour le composite JFC2 avec 2,6 MPa.

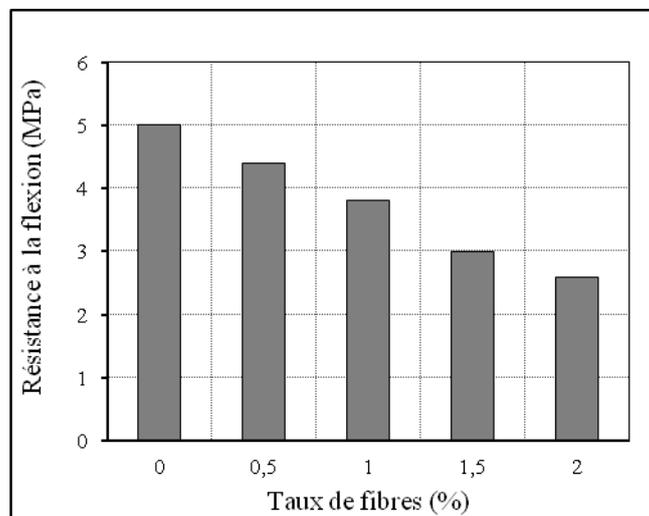


Figure 4.22 Influence du taux de fibres sur la résistance à la flexion à 28 jours

Comparativement à la compression, on remarque que les baisses de résistance à la flexion sont moins importantes. A titre d'exemple, pour le même âge du composite JFC0.5 contenant 0,5% de fibres, les baisses de résistances sont de 30% dans le cas de la compression et seulement de 12% en flexion. La figure 4.23 met en évidence ces variations comparatives en compression et en flexion pour l'ensemble des composites étudiés.

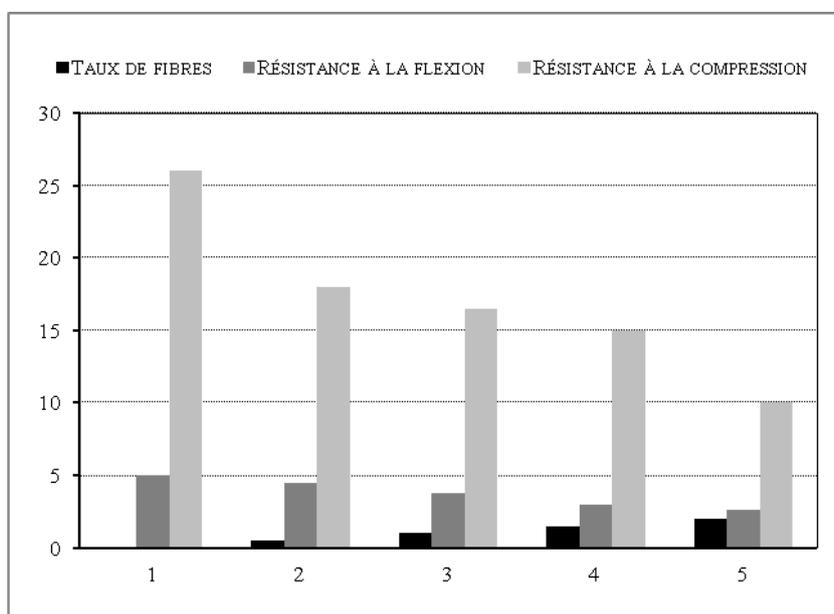


Figure 4.23 Influence du taux de fibres (%) sur la résistance à la compression à 28 jours (MPa) et à la flexion à 28 jours (MPa).

4.4.2 Comportement en déformation du matériau

4.4.2.1 Composites sollicités en flexion trois points

Le comportement élastique à la déformation des composites sollicités en flexion trois points a été analysé en fonction de la teneur en fibres de jute. Les figures 4.24 jusqu'à 4.28 représentent les courbes contrainte/déformation obtenues après deux cycles de charge-décharge, en fonction du pourcentage massique en fibres.

En ce qui concerne les composites fibrés, on peut conclure que la présence de fibres de jute atténue la fragilité de la rupture en faisant apparaître une phase plastique qui adoucit la partie descendante et retarde ainsi l'étape de fissuration. Malgré une incidence défavorable sur les résistances mécaniques, l'augmentation de la teneur en fibres améliore le comportement plastique.

La rupture des éprouvettes manifeste le même comportement que celui enregistré dans le cas de la compression. En effet, la rupture est brutale dans le cas du composite de référence (JFC0). Cependant, la ruine des autres composites a lieu par fissuration sans destruction des éprouvettes (figures 4.25 jusqu'à 4.28).

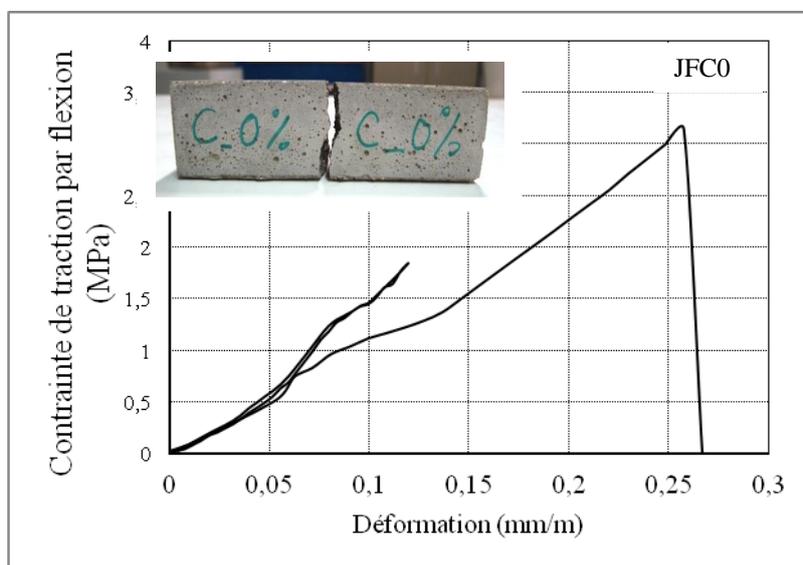


Figure 4.24 Relation contrainte/déformation et photographie de l'éprouvette rompue en flexion 3 points du composite JFC0 après 2 cycles d'hystérésis.

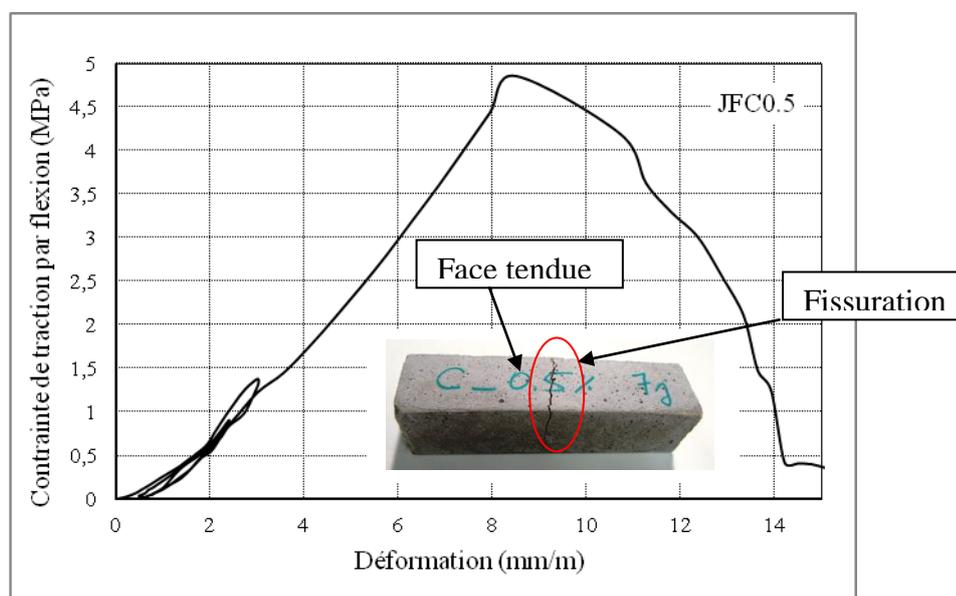


Figure 4.25 Relation contrainte/déformation et photographie de l'éprouvette rompue en flexion 3 points du composite JFC0.5 après 2 cycles de charge-décharge.

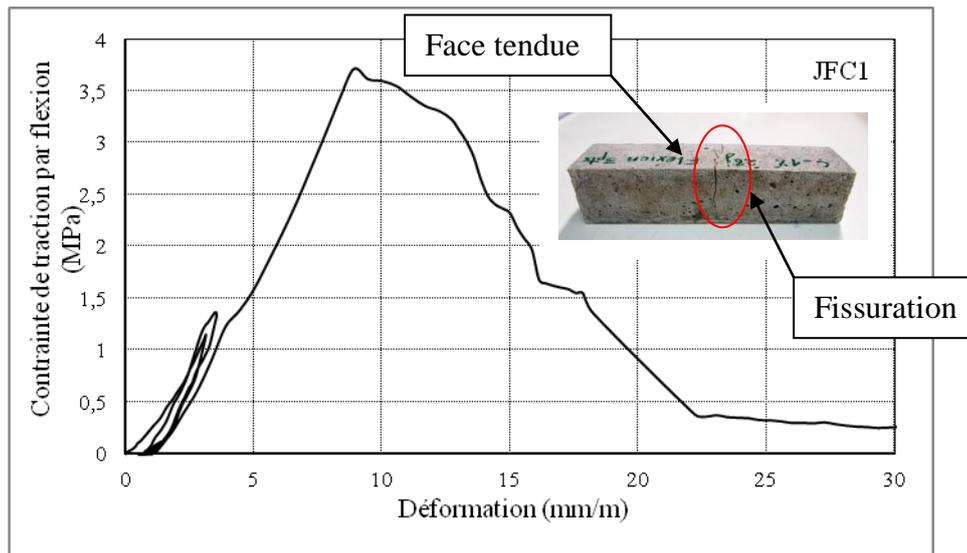


Figure 4.26 Relation contrainte/déformation et photographie de l'éprouvette rompue en flexion 3 points du composite JFC1 après 2 cycles de charge-décharge.

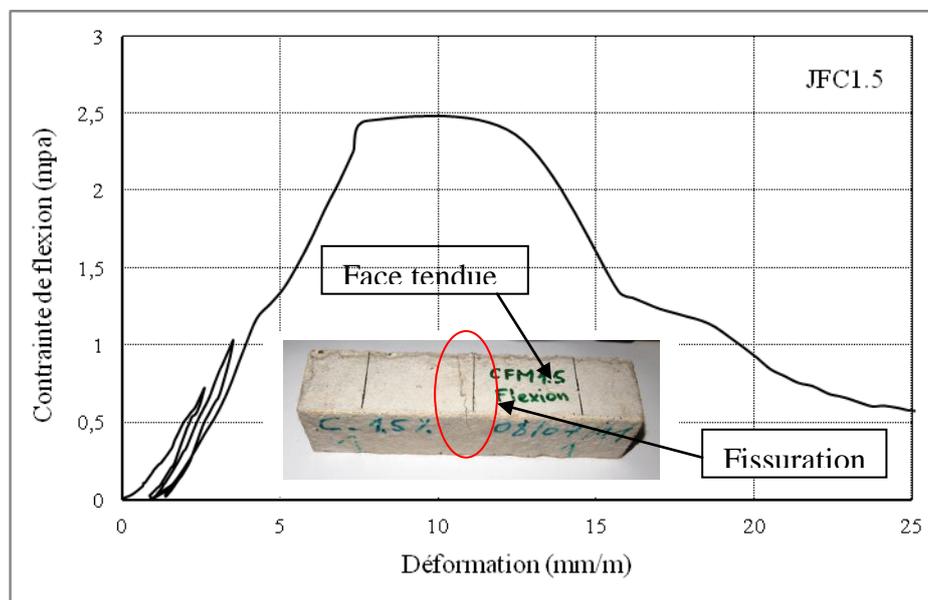


Figure 4.27 Relation contrainte/déformation et photographie de l'éprouvette rompue en flexion 3 points du composite JFC1.5 après 2 cycles de charge-décharge.

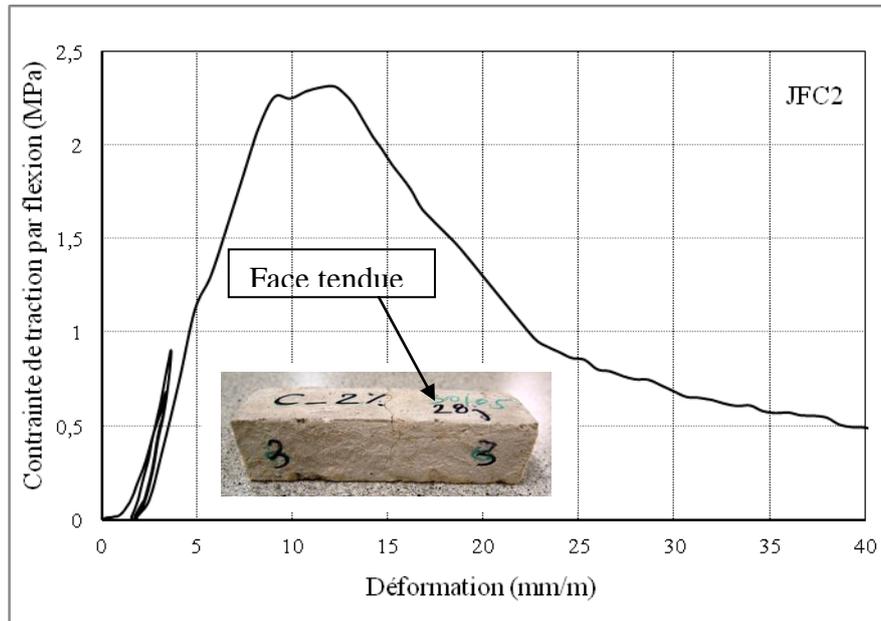


Figure 4.28 Relation contrainte/déformation et photographie de l'éprouvette rompue en flexion 3 points du composite JFC2 après 2 cycles de charge-décharge.

On voit nettement que dans le cas des éprouvettes en composite renforcés de fibres de jute, la propagation de la fissure n'atteint pas la zone comprimée. L'ouverture de la fissuration est d'autant plus faible que le taux de fibres est élevé. Les fibres de jute ont donc atténué la fragilité de la matrice en flexion et les composites renforcés de fibres montrent un comportement "ductiles".

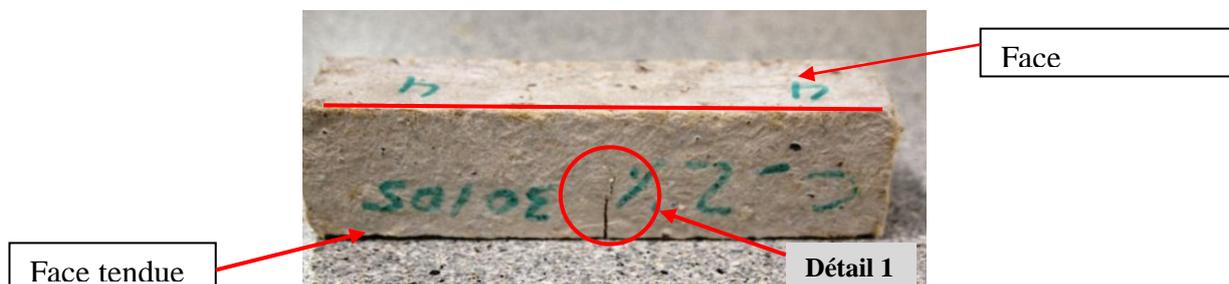


Figure 4.29 Photo de l'éprouvette en JFC2 rompue en flexion 3 points.

La figure 4.29 (détail 1), montre que la propagation de la fissure a changé de direction sous l'effet de l'obstacle constitué par les fibres de jute. Les fissures s'atténuent aux environs de la mi-hauteur de l'éprouvette.

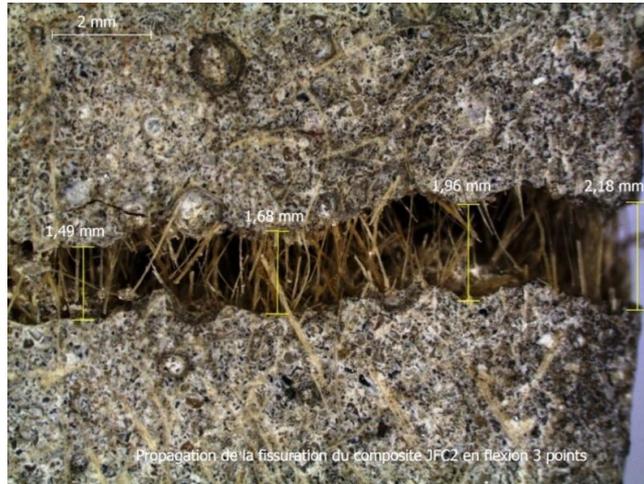


Figure 4.30 Détail 1 de l'ouverture de fissure en flexion du composite JFC2.

L'image au microscope de la fissure (figure 4.30) met en évidence le rôle de couture des fibres. Ceci contribue à augmenter la sécurité des structures.

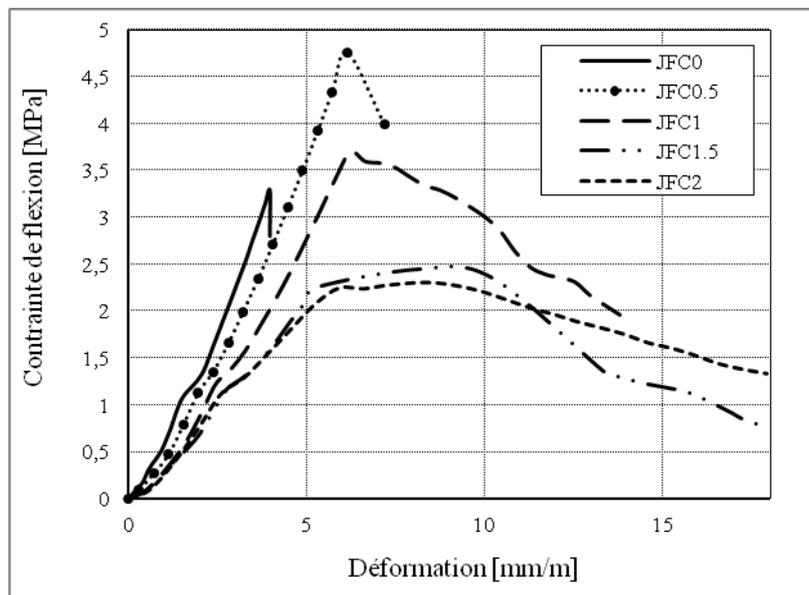


Figure 4.31 Courbes Contrainte/déformation après deux cycles de chargements en flexion 3 points des composites.

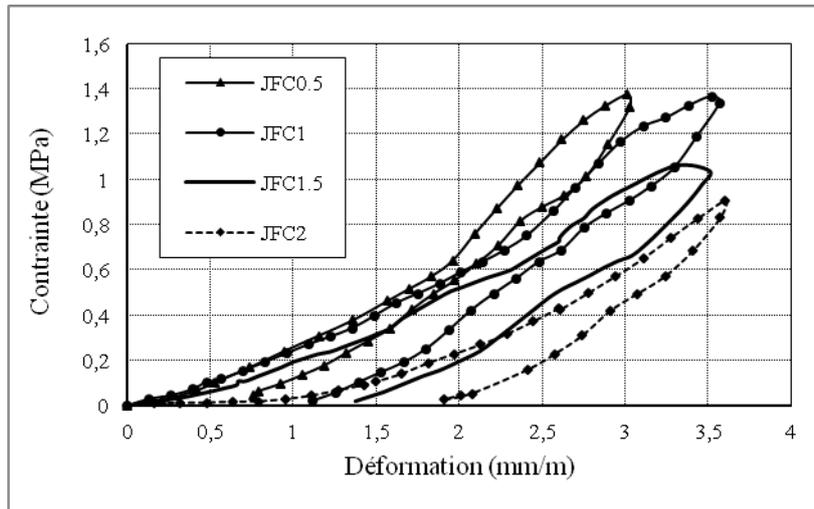


Figure 4.32 Boucles d'hystérésis des composites étudiés.

L'évolution de l'indice de fragilité (IF) en fonction de la teneur massique en fibres est donnée en figure 4.32. Celle-ci montre que la valeur la plus élevée de (IF) est obtenue pour une composition JFC0.5 contenant 0,5% de fibres. Ce maximum atteint au plus faible pourcentage en fibres caractérise la transition entre un matériau fragile et un matériau ductile. La diminution de (IF) signifie une augmentation de l'énergie de déformation plastique. Cette énergie est d'autant plus importante que le taux de fibres augmente. Les caractéristiques intrinsèques des fibres sont responsables de l'accroissement de la déformabilité des composites ciment-chaux-fibres de jute étudiés dans ce travail.

4.4.2.2 Composites sollicités en compression simple

Le comportement élastique des composites soumis à une contrainte normale de compression a été analysé dans le but de déterminer le module de déformation élastique (module de Young) ainsi que l'indice de fragilité en fonction de la teneur en fibres. En effet, les résultats de ces essais réalisés sur éprouvettes cylindriques 110/220 mm montrent un comportement élastique pour de faibles déformations. La variation du module de Young en fonction du taux de fibres est illustrée par la figure 4.33. La courbe montre une dépendance linéaire du module d'élasticité en fonction de la quantité de fibres ajoutée, de la forme:

$$E = -5,482F + 15,484$$

Avec un coefficient de corrélation de 0,99.

Où E désigne le module de déformation linéaire de Young et F désigne le pourcentage de fibres. Cette variation décroissante avec la croissance du taux de fibres est comparable à celle illustrée par la variation du module d'élasticité dynamique (figure 4.16).

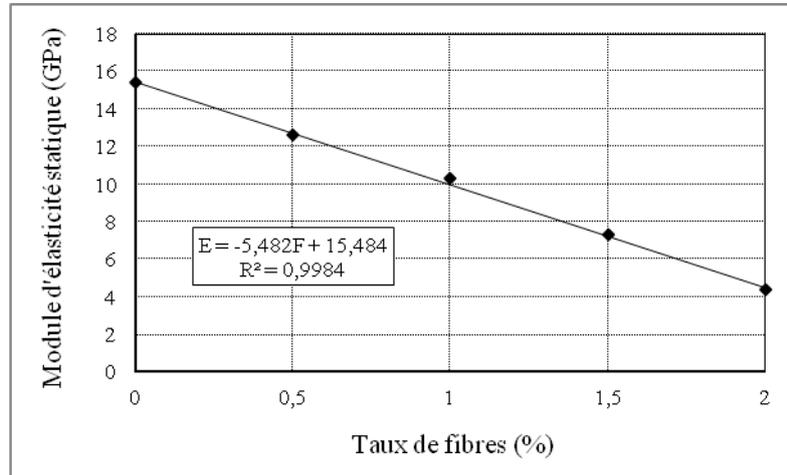


Figure 4.33 Variation du module de Young en fonction du taux de fibres.

Des essais de charge-décharge en compression sur éprouvettes cylindriques 110/220 mm du composite témoin (JFC0) ont été conduits à l'aide de 2 cycles charge-décharge jusqu'à la valeur de 90kN, suivis de 3 cycles à charge maximale de 130kN; le sixième chargement étant conduit jusqu'à rupture. Le comportement est caractérisé par une phase quasiment élastique pour les 5 cycles, dans le cas de faibles déformations, suivie d'une courte phase plastique conduisant à la rupture brutale pour le dernier chargement. Quant aux composites fibrés, la loi de comportement observée est similaire à celle manifesté en flexion 3 points par le diagramme représentant (figure 4.32) les boucles d'hystérésis et l'indice de fragilité.

Les modes de rupture en compression des éprouvettes cylindriques 110/220 mm sont quasiment identiques à ceux observés dans le cas des essais de caractérisation en compression, réalisés sur éprouvettes 40 x 40 x 160 mm décrits au paragraphe 4.4.1.2.1.1, (figure 4.17). Un exemple de rupture est représenté par la figure 4.34 pour le cas du composite le plus fibré (JFC2).



Figure 4.34 Photo de l'éprouvette en composite JFC2 rompue en compression simple.

4.4.2.3 Synthèse du comportement en déformation

L'étude faite sur les propriétés physico-mécaniques a indiqué une réduction significative de la résistance à la compression et une rupture non brutale ne causant pas la ruine des éprouvettes pour les différents composites contenant de 0,5 à 2% de fibres de jute.

Cette partie est concentrée sur l'analyse de la possibilité d'améliorer la déformabilité des composites à base de fibres de jute. Le comportement ductile a été mis en évidence par les essais à la flexion trois points sur éprouvettes 40x40x160mm et les essais à la compression sur éprouvettes cylindriques 110/220 mm. Selon l'analyse de la variation des courbes contrainte-déformation (figure 4.31) qui caractérisent le passage d'un matériau fragile à un matériau ductile, il convient de noter l'importance du rôle de la texture des fibres de jute dans le comportement en déformation dont témoignent les valeurs de l'indice de fragilité (IF) (figure 4.32). La diminution simultanée du poids et du module d'élasticité dynamique révèle la capacité de ces composites à réduire l'intensité sonore et amortir les vibrations. Ainsi, la cohésivité après rupture a été nettement améliorée. L'augmentation de la déformabilité, en collaboration avec des valeurs de la résistance à la flexion inchangées après deux cycles charge-décharge, suggère une gamme de nouvelles utilisations potentielles et contribue à améliorer la sécurité structurelle. Un matériau hautement déformable peut en effet prévoir une solution qui évite le risque de fissuration et, par conséquent, évite l'introduction d'un renforcement pour résister à la fissuration.

4.4.3 Comportement hydrique

4.4.3.1 Retrait de séchage

Le retrait de séchage représente la déformation libre que manifeste le matériau lors du séchage. Les mesures ont été réalisées à 20°C sur trois éprouvettes jusqu'à l'âge de 55 jours. La mesure de référence est prise à l'âge d'un jour, au moment du démoulage. Il est mesuré sur prismes 40 x 40 x 160 mm conservés à 20°C et à 50,5% d'humidité relative, il doit être à 28 jours inférieur à 2800 microns/mètre [113]. Selon la figure 4.35, la courbe montre, pour le composite JFC2 que la cinétique de retrait est rapide pendant les dix premiers jours et atteint 869 $\mu\text{m}/\text{m}$, pour tendre vers une valeur équivalente à celle du composite témoin à l'âge de quarante jours. On note que cette valeur de retrait devient inférieure à celle du composite de référence à partir de l'âge de cinquante cinq jours (1070 $\mu\text{m}/\text{m}$).

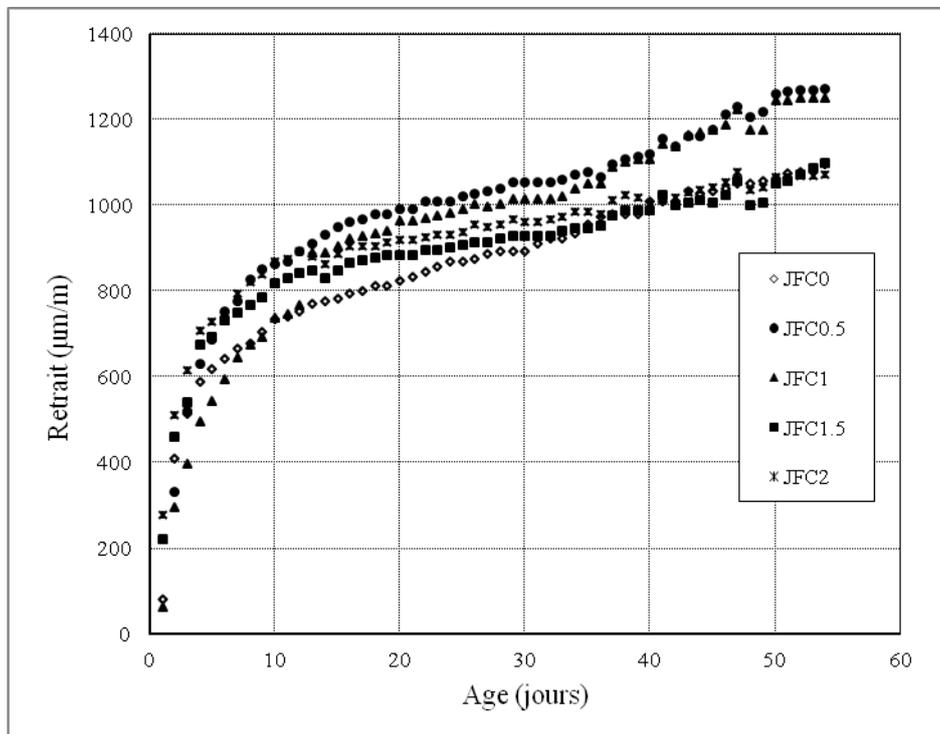


Figure 4.35 Evolution du retrait de séchage pour les différents composites.

L'observation de l'évolution du retrait de séchage en fonction du temps, pour les cinq types de composites, représentée par la figure 4.35, permet de constater que l'ajout de fibres de jute dans la matrice cimentaire réduit le retrait dû au séchage, avec l'âge. Ceci se voit pour les composites JFC1.5 et JFC2. On note également que la part la plus importante du retrait se produit les dix premiers jours, où on peut calculer une différence de 624 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le témoin

et une différence de 561 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le JFC2. Ceci est probablement dû aux réactions d'hydratation des composites qui se poursuit après le décoffrage. Pendant les dix derniers jours, la différence de retrait est de 54 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le témoin et de 40 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour le composite le plus fibré JFC2. Ceci est à relier, d'une part aux résultats observés pour la porosité qui est atténuée avec l'augmentation du taux de fibres, et d'autre part aux résultats des modules d'élasticité dynamique et statique.

Les pertes relatives de masse des échantillons sont calculées à partir du suivi de leur masse au cours de ces expériences de retrait (figure 4.36).

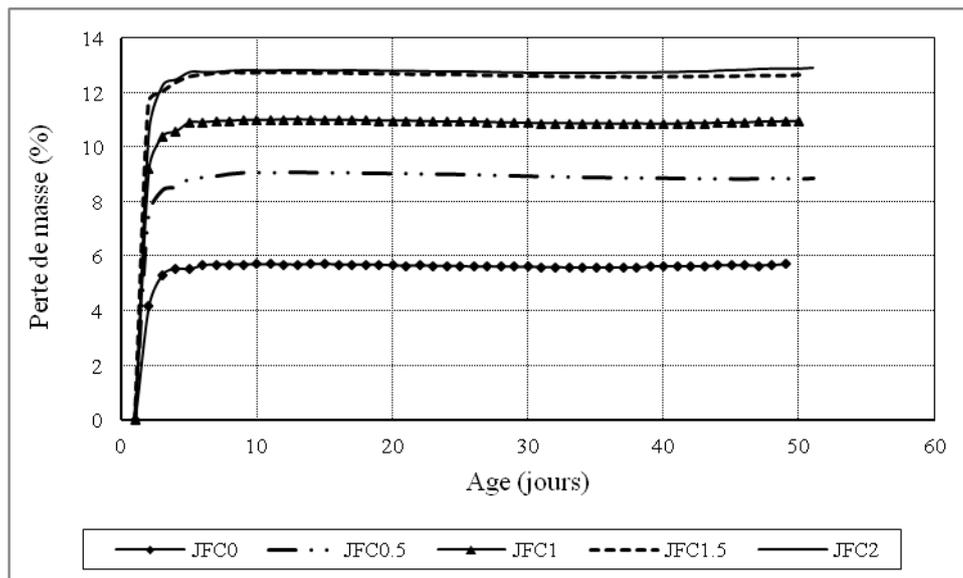


Figure 4.36 Evolution de la perte de masse en fonction de l'âge des composites.

La relation retrait/perte de masse est illustrée par la figure 4.37. La même relation retrait/perte de masse a été observée par Joachim Monge [114], la perte de masse tend à se stabiliser, mais le retrait est en progression.

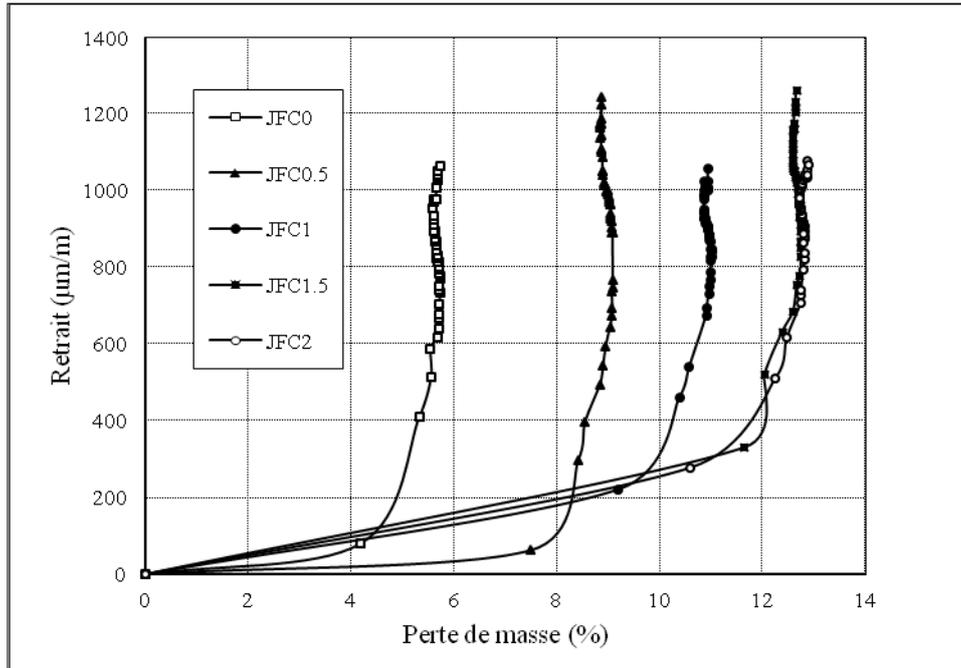


Figure 4.37 Evolution du retrait de séchage en fonction des pertes de masse

4.4.3.2 Sensibilité à la reprise d'eau (Sorptivité)

Nous nous sommes intéressés à la sensibilité à l'eau des composites, à travers l'évaluation de sa capacité d'absorption d'eau, suivant un test d'imbibition capillaire. La sorptivité ainsi évaluée représente l'un des paramètres essentiels qui conditionnent la durabilité des matériaux de construction, particulièrement leur résistance à la pénétration d'agents agressifs. Ces derniers sont généralement, véhiculés à l'état dissous, par le déplacement d'un fluide, sous l'effet d'une pression motrice ou encore d'un gradient de concentration. (Chapitre 2, paragraphe 2.6.1.3). La sorptivité est déterminée expérimentalement par un coefficient qui traduit la capacité du matériau à absorber de l'eau par capillarité.

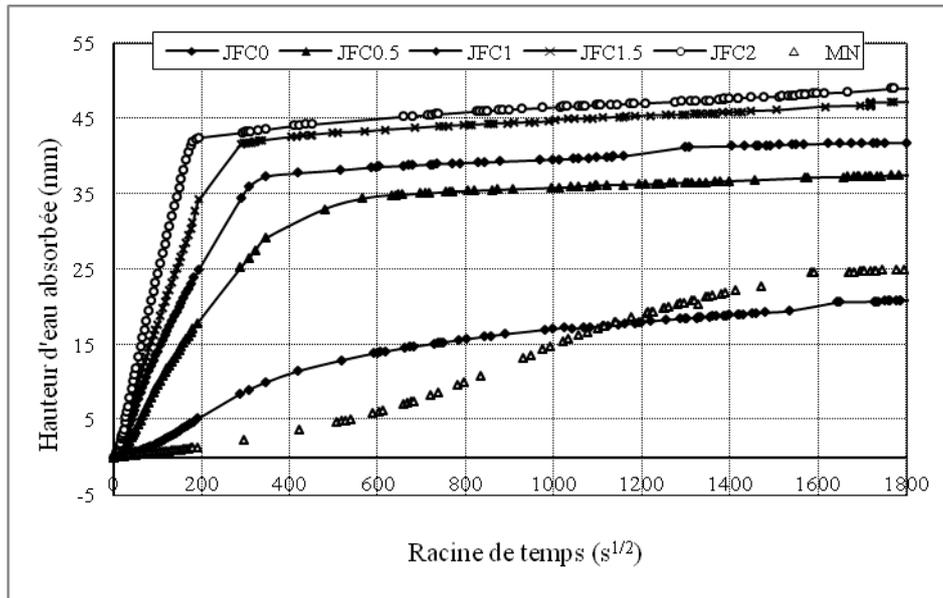


Figure 4.38 Evolution de la hauteur d'absorption d'eau pour les différents composites. (MN désigne un mortier normal réalisé dans les mêmes conditions avec les mêmes matériaux).

La variation de la hauteur d'ascension d'eau dans les composites, à différents taux de substitution en fibres de jute, est illustrée par la Figure 4.38. Celle-ci montre clairement que la présence de fibres tend à augmenter la capacité d'absorption d'eau du composite, avec une cinétique d'absorption de plus en plus grande. A saturation, le taux d'absorption des composites fibrés est plus important que celui du mortier de référence, en raison de l'absorption d'eau par les fibres et de l'accroissement du réseau capillaire dans la matrice. La faible adhérence des fibres à la matrice, crée un volume tampon accessible à l'eau, particulièrement à l'interface matrice/fibres. Outre la hauteur d'ascension, la vitesse d'ascension est également importante. Une ascension rapide révèle la présence de capillaires qui peuvent être dangereux en termes de gélivité, de résistance aux sels et à la pénétration d'agents agressifs à l'état dissous. Dans le souci d'amélioration de la durabilité des composites, il est donc important de réduire cette capillarité ouverte. L'une des techniques utilisées consiste à effectuer des traitements physiques d'imprégnation ou d'enrobage superficiel des fibres afin d'améliorer leur imbrication mécanique dans la matrice [115, 116]. Par ailleurs, l'ajout de fillers dans la composition peut également s'avérer utile pour augmenter la compacité du matériau; Ce qui permettra, par conséquent, à la fois de réduire l'absorption d'eau et d'améliorer le comportement mécanique.

On constate que la sorptivité augmente en fonction du taux de substitution en fibres de jute. Elle varie de $0,0254 \text{ mm/s}^{1/2}$, pour le composite de référence, à $0,2535 \text{ mm/s}^{1/2}$ pour le composite ayant un taux de substitution en fibres de 2%. La sorptivité du composite témoin JFC0 est de l'ordre du dixième de celle du composite le plus fibré JFC2.

L'équation des courbes de variation de la hauteur d'eau absorbée en fonction de la racine de temps est de la forme:

$$i = S. \sqrt{t} + i_0$$

Où :

i est le coefficient d'absorption capillaire (mm^3/mm^2). Il a la dimension d'une longueur et correspond, selon C. Hall [86], au volume cumulé absorbé par unité de surface absorbante.

S est la sorptivité du matériau ($\text{m/s}^{1/2}$) ;

i_0 est un coefficient empirique dépendant de la surface de contact de l'échantillon avec l'eau (m^3/m^2). Il correspond au remplissage instantané de pores ouverts sur la surface de l'échantillon en contact avec l'eau.

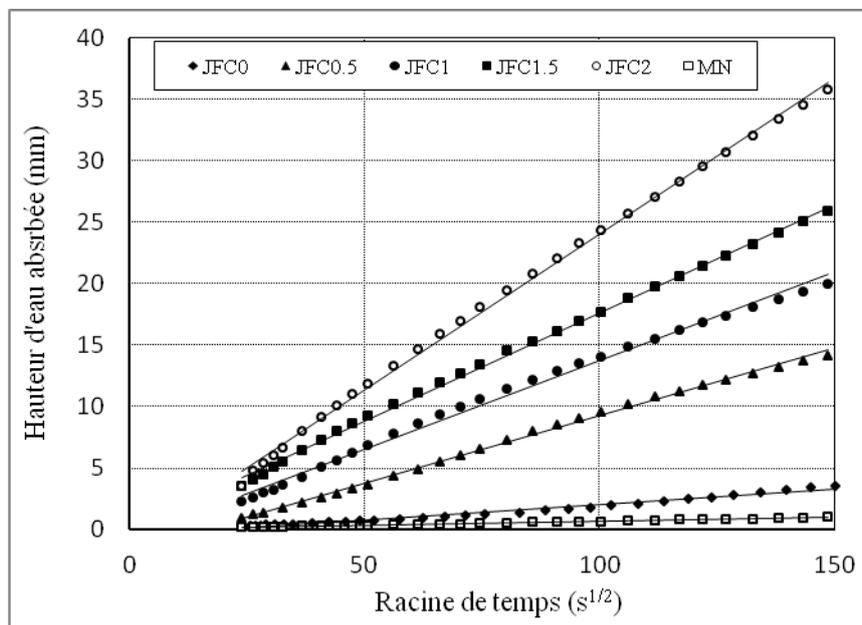


Figure 4.39 Evolution de la hauteur d'absorption d'eau dans le domaine de calcul de la sorptivité.

Les valeurs correspondantes de la sorptivité, déterminées à partir de la première phase d'absorption (Figure 4.39), sont données par le Tableau 4.4.

Tableau 4.4 Résultats expérimentaux de l'étude des matériaux à la sensibilité à l'eau.

Composite	Equation de la courbe de sorptivité	Sorptivité [mm/s ^{1/2}]
MN	$i = 0,0064 t^{1/2} + 0,0639$	0,0064
JFC0	$i = 0,0254 t^{1/2} + 0,4816$	0,0254
JFC0.5	$i = 0,1102 t^{1/2} - 1,7093$	0,1102
JFC1	$i = 0,1438 t^{1/2} - 0,6064$	0,1438
JFC1.5	$i = 0,1766 t^{1/2} + 0,0209$	0,1766
JFC2	$i = 0,2535 t^{1/2} - 1,2442$	0,2535

La différence de sorptivité entre le composite témoin et le mortier normal nous permet de distinguer l'influence de la substitution d'une partie du ciment par la chaux. Celle-ci contribue donc à l'augmentation du taux d'absorption capillaire.

Tableau 4.5 : Comparaison des coefficients de sorptivité avec ceux d'autres matériaux

Matériaux	Densité	S (10 ⁻³ m/s ^{1/2})
Plâtre	1,390	0,210
C. Hall et al. [117]	1,430	0,195
Brique argileuse J. Parzak et al [118]	1,700	0,160
Béton ordinaire J. Parzak et al [118]	2,300	0,012
JFC0	2,000	0,0254
JFC0.5	1,860	0,1102
JFC1	1,820	0,1438
JFC1.5	1,770	0,1766
JFC2	1,630	0,2535

Il est parfois intéressant de pouvoir comparer les propriétés du composite élaboré à celles de certains matériaux ordinaires. D'après le tableau 4.5 qui donne les valeurs des coefficients de sorptivité de certains matériaux, on constate qu'à densité voisine, les matériaux élaborés sont compétitifs.

4.4.4 Comportement thermique

Le transfert de chaleur est l'un des modes les plus connus d'échange d'énergies. Il intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'il existe entre eux une différence de température. De ce fait, les transferts thermiques ont un rôle déterminant. Ainsi, la connaissance des propriétés thermophysique d'un matériau permet de comprendre et de prévoir son comportement lorsqu'il est soumis à des différences de températures.

En Algérie, la consommation de l'énergie pour le chauffage en hiver et le refroidissement en été est importante. Afin de réduire cette consommation, il est nécessaire de penser à l'élaboration de matériaux isolants et au développement de techniques de construction favorisant l'isolation thermique et acoustiques des ouvrages. Les matériaux isolants sont généralement caractérisés par une masse réduite et des résistances mécaniques modérées. A cet effet, le rôle de matériaux isolant doit être attribué aux matériaux non porteurs tels que les revêtements et les éléments de remplissage.

4.4.4.1 Composite JFC2

Le coefficient de conductivité thermique " λ " décrit l'aptitude du matériau à conduire ou non la chaleur. Il est élevé pour les matériaux conducteurs et faibles pour les isolants.

La valeur moyenne de la conductivité thermique à $T = 10^{\circ}\text{C}$, du composite à base de 2% de fibres de jutes en substitution massique du sable (JFC2) est $\lambda = 0,673 \text{ W/mK}$

Tableau 4.6 : Résultats de l'essai thermique du composite JFC2

N° mesure	Flux (W/m ²)	Température plaque froide (°C)	Température plaque chaude (°C)	Gradient de température (°C)	température moyenne (°C)	Conductivité thermique (W/m.K)
1	5,059	8,2	16,6	8,4	12,4	0,674
2	5,099	18,0	26,4	8,4	22,2	0,680
3	5,129	27,9	36,3	8,4	32,1	0,684
4	5,174	37,9	46,3	8,4	42,1	0,691

4.4.4.2 Composite JFC1.5

La valeur moyenne de la conductivité thermique à $T = 10^{\circ}\text{C}$, du composite à base de 1,5% de fibres de jutes en substitution massique du sable est $\lambda = 0,839 \text{ W/mK}$

Tableau 4.7 : Résultats de l'essai thermique du composite JFC1.5

N° mesure	Flux [W/m ²]	Température plaque froide [°C]	Température plaque chaude [°C]	Gradient de température [°C]	Température moyenne [°C]	Conductivité thermique [W/m.K]
1	6,089	8,6	16,7	8,1	12,7	0,840
2	6,143	18,4	26,5	8,1	22,5	0,849
3	6,204	28,3	36,4	8,1	32,4	0,858
4	6,24	38,3	46,4	8,1	42,4	0,863

Tableau 4.8 : Valeurs du coefficient de conductivité thermique de quelques matériaux

Matériaux	Densité [kg/m ³]	Conductivité thermique λ [W/m.K]
Cuivre	8850	380
Aluminium	2700	230
Acier	7800	52
Plomb	11300	35
Béton ordinaire	2450	1,75
Terre cuite	2000 à 2500	1,15
Enduit de ciment	1500	1,15
JFC1.5	1770	0,839
Béton caverneux	1600 à 2000	0,7
JFC2	1630	0,673
Plâtre	1000	0,48
Bois	400 à 1000	0.052 à 0,29
PVC (polychlorure de vinyle)	1350	0,21
Béton de copeaux de bois	700	0.16
Air (le meilleur isolant)	1,204 à 20°C	0,024

4.5 CONCLUSION

Le travail présenté dans ce chapitre concernant la faisabilité de composites en vue d'une utilisation possible comme revêtement des murs en maçonnerie non porteur nous permet de conclure les points suivants:

1. L'examen des propriétés du composite à l'état frais a montré un besoin plus important en eau de gâchage, pour avoir une maniabilité comparable à celle du mortier de référence. Cette eau excédentaire est souvent préjudiciable au comportement mécanique des matériaux. L'étude des propriétés à l'état durci a montré que malgré un allègement modéré du composite, en fonction du taux de substitution massique en fibres, celui-ci présente des résistances mécaniques nettement plus faibles que celles du mortier de référence en particulier sous compression. Cette baisse de performances est liée à la faible adhérence des fibres à la matrice.
2. L'étude du comportement en déformation par analyse de l'indice de fragilité, le comportement thermique ainsi que la masse volumique du composite à 2% de fibres ont donné des résultats satisfaisants répondant aux critères recherchés (un matériau ductile, léger et isolant).
3. Les résultats des tests d'absorption capillaire ont montré un accroissement des capillaires, préjudiciable à la durabilité du composite en raison du risque de pénétration d'agents agressifs. Il est donc important de réduire cette porosité à travers des traitements physiques d'imprégnation ou d'enrobage superficiel des fibres permettant d'améliorer leur imbrication mécanique dans la matrice.

Par ailleurs, les résultats obtenus permettent une utilisation possible de ce matériau comme revêtement des murs en maçonnerie, étant donné que les résistances mécaniques requises pour ce type d'utilisation ne sont pas très élevées.

Conclusion générale

L'évaluation de la vulnérabilité des murs de remplissage, conçus en briques de terre cuite a été mise en évidence par les actions accidentelles dues au séisme qui ont eu lieu dans divers régions du monde.

Ce travail constitue une contribution à l'étude du comportement des murs en maçonnerie locale sous charge verticale et la réduction de leur vulnérabilité.

Les essais conduits sur des murets d'environ 1m^2 de surface construits dans les mêmes conditions que les chantiers voisins, ont affirmé que la rupture est fragile, sans phase plastique et la ruine intervient d'une manière brutale.

Une première solution était de renforcer les murets par l'ajout de nappes de fibres de jute. Celle-ci a augmenté la raideur des murets en améliorant leur contrainte de rupture par rapport aux murets avec revêtement en mortier classique. Néanmoins, la réalisation de ce type de revêtement composé a présenté des difficultés de mise en œuvre sans amélioration de leur comportement.

La seconde solution était l'élaboration d'un revêtement en mortier renforcé de fibre de jute. Une étude de la compatibilité chimique de la fibre avec le ciment a montré que la substitution massive du sable par la fibre de jute ne retarde que faiblement la prise du ciment pour des taux ne dépassant pas 2%. Cinq types de composite renforcé respectivement de 0%; 0,5%; 1%; 1,5% et 2% de fibres de jute ont été étudiés. L'optimisation de la composition a nécessité la substitution de 30% du ciment par la chaux hydraulique et l'ajout d'un fluidifiant réducteur d'eau.

Les conclusions suivantes ont été tirées en vertu de cette étude:

- ✓ L'examen des propriétés à l'état frais des composites sélectionnés a montré un besoin plus important en eau de gâchage pour avoir une maniabilité comparable à celle du mortier de référence. Cette eau excédentaire est préjudiciable au comportement mécanique des matériaux.
- ✓ Bien que les résistances en flexion et en compression sont inférieures à celles du composite de control, les mortiers renforcés de fibres de jute ont présenté un bon comportement en déformation et une atténuation favorable des ondes sonores.
- ✓ Contrairement au composite de référence (contenant 0% de fibres), les mortiers fibrés sont déformables et montrent une rupture ductile.
- ✓ L'étude des composites à l'état durci a montré un allègement modéré en fonction du taux de substitution en fibres qui entraîne une réduction des résistances mécaniques et une réduction du coefficient de conductivité thermique.

- ✓ Malgré la diminution de la porosité avec l'augmentation du taux de fibres, les tests d'absorption capillaires notent une augmentation de la cinétique d'absorption d'eau par capillarité. Cet accroissement de la sorptivité est préjudiciable à la durabilité des composites en raison du risque de pénétration d'agents agressifs.
- ✓ On peut attribuer les inconvénients liés à la chute des résistances mécaniques et à l'absorption d'eau par capillarité au défaut de liaison et d'interface fibre/matrice.

Les résultats des caractéristiques mécaniques obtenues en compression et en flexion montrent que la mise en œuvre de ces composites dans le domaine de la construction est tout à fait envisageable pour la réalisation d'éléments secondaires tels que panneaux d'isolation, chape flottante ou enduit de murs. La valeur du coefficient de conductivité thermique du composite contenant 2% de fibres de jute implique que ce dernier peut assurer un confort thermique sous conditions hivernales et l'atténuation des pics de température en été. Cependant, il est indispensable de réduire la reprise d'eau à travers des traitements physiques d'imprégnation ou d'enrobage superficiel des fibres, permettant d'améliorer leur imbrication mécanique dans la matrice.

Dans cette étude la fibre de jute a été récupérée à partir de tissus de toile de jute provenant des sacs usés d'emballage. A travers ce travail, nous contribuons donc au programme de recyclage des résidus végétaux issus des déchets de tissu de jute tout en réduisant la part vouée pour l'incinération.

Références bibliographiques

- [1] Fazia Fouchal. Contribution à la modélisation numérique des interfaces dans les structures maçonnées thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Reims Champagne-ardenne (2006).
- [2] Merzoud Mouloud, thèse de Maitre en ingénierie (avril 1987) université de Montréal "Evaluation de la résistance et des propriétés structurales de la maçonnerie".
- [3] Asteris P.G., Antoniou S.T., Sophianopoulos D.S., Chrysostomou C.Z., Mathematical macromodeling of infilled frames: State of the art, Journal of Structural Engineering, v 137, n 12, p. 1508-1517, December (2011).
- [4] Mosalam K.M., M.S. Gney, Chapter 23: Seismic Analysis and Design of Masonry-Infilled Frames, in Structural and Geotechnical Engineering, S.K. Kunnath, Editor, Encyclopedia of Life support Systems (EOLSS) Publishers, Oxford, UK, (2012).
- [5] Mezigheche Nawel, thèse de Magister (2010) université Badji Mokhtar de Annaba, "Comportement des remplissages dans les structures sous différentes sollicitations : cas de la maçonnerie".
- [6] F.B Houti, F. Ghomari, A.Megnounif, "Etude expérimentale des murs en briques creuses et en parpaings sous chargement de compression", Algerie équipement 2004, 16-19.
- [7] AW Page, The biaxial compressive strength of brick masonry. Institution of Civil Engineering. Proceedings, volume 71, issue 3, september 1981, 893-906.
- [8] Restructuration des collecteurs visitables ; Guide technique, Tome 1 et 2, projet national (France) RERAU, 2002 et 2004.
- [9] Règles Parasismique Algériennes RPA99/version 2003, Document technique réglementaire DTR B C 2 48.
- [10] CCP: JU/HF/ ST / 2012/1. FAO, Food and Agricultural Organization of United Nations economic and social department: statistical division.
(الجوت التيل الاباكا جوز الهند و الألياف المماثلة) Jute, Kenaf, Sisal, Abaca, Coir and Allied Fibres. Statistics of September 2012.
- [11] Catherine Lapiere, "Séance de l'Académie d'Agriculture de France", 17 Février 2010.
- [12] Per Ole Olesen. "Perspectives on the performance of natural plant fibres". The Royal Veterinary and Agricultural University, Taastrup, Denmark. Conference 27 – 28 May 1999, Copenhagen, Denmark.
- [13] Martin H B Snijder. "Reinforcement of commodity plastic by hemp and flax fibres- Extending the market opportunity". Canada, bio-based products mission, march-2004.

- [14] Eichhorn S J, Baillie C A, Zafeiropoulos N, Mwaikambo L Y, Ansell M P, Dufresne A, Entwistle K M, Herrera-Franco P J, Escamilla G C, Groom L, Hughes M, Hill C, Rials T G, Wild P M. Review current international research into cellulosic fibres and composites. *Journal of Material Science and technology* 2001, 36, 2107-2131.
- [15] Farabee M J. *The Online Biology Book*. Estrella Mountain Community College, in sunny Avondale, Arizona.
- [16] Prosenjit Saha, Suvendu Manna, Sougata Roy Chowdhury, Ramkrishna Sen, Debasis Roy, Basudam Adhikari. Enhancement of tensile strength of lignocellulosic jute fibers by alkali-steam treatment *Bioresource Technology* 101 (2010) 3182–3187
- [17] PIMENTA P., CHANDELLIER P., RUBAUD M., 1994, Etude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois. *Cahier du CSTB*, Janvier-Février 1994, N°2703, p45.
- [18] Geoffrey Promis, thèse de l'université Claude Bernard Lyon 1, école doctorale MEGA, février 2010, "Composites fibres/matrice minérale : du matériau à la structure".
- [19] RILEM, 1978. *Materiaux. Structure*, n°64 Volume 11, p 281-288.
- [20] IREX. 2005. Proposition d'étude de la faisabilité d'un projet national français de recherche et développement sur les matériaux composites en Génie Civil. *Projet COMAC (2005) piloté par l'IREX*.
- [21] Mir A, Zitouni R, Colombet F et Bezzazi B, 2010, Studie of jute/epoxy composite laminate *journal of reinforced plastics and composites*, 29 (11), 1669-1680.
- [22] Ayyar T.S.R et Mirihagalla P.K 1976, Elephant grass fibres as reinforcing fiber. *Magazine of concrete research*, Vol, 28, N°96, 162-167. september.
- [23] Toledo F et al, 2003 Development of vegetable fibre mortar composites of improved durability. *Cement and Concrete*.
- [24] Contamine, R., Larbi, A. Si, Ferrier, E., & Hamelin, P. "Experimental comparison of shear beam behavior strengthened with cement matrix composites and CFRP sheets". 9th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9), Sydney, Australia(2009).
- [25] Hamelin P 2009. State of the art and scientific problems for the development of high performance composite in construction. 2nd International Conference on Carbon composites, Arcachon, France.
- [26] Merzoud M, Habita M.F, "Elaboration de composite cimentaire à base de Diss *Ampelodesma Mauritanica*. *Afrique Science*, Vol. 4, N°2, 2008, 236-242.

- [27] A. Kriker, G. Debicki, A. Bali, M.M. Khenfer et M. Chabannet "Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate" *Cement & Concrete Composites* 27 (2005) 554–564.
- [28] A. Kriker, A. Bali, G. Debicki, M. Bouziane, M. Chabannet "Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates". *Cement & Concrete Composites* 30 (2008) 639–648.
- [29] O Bahloul, A Bourzem, A Bahloul, "Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de mortiers de ciment (cas de l'alfa)". SBEIDCO 1st international conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries. ENSET Oran (Algeria) October 12 - 14, 2009.
- [30] Valenciano, Martha Del C.Mesa and Freire, Wesley J. "Physical and mechanical characteristics of soil-cement-bagasse ash mixtures". *Eng. Agric.* [online]. 2004, vol.24, n.3, pp. 484-492. ISSN 0100-6916. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162004000300001>
- [31] Mesa Valenciano, Martha del Carmen and Freire Wesley Jorge. "Compressive strength of lignocellulosic-cement composites". NOCMAT/3- Vietnam 3rd International Conference on Non-Conventional Materials and technologies. Hanoi, Vietnam, March 2002.
- [32] Mohamadou, B. 1994. Contribution à la caractérisation mécaniques de composites à base de ciment renforcé par fibre de verre. Ph.D. thesis, Uni-versité Claude Bernard Lyon I.
- [33] Grandhaie, F. 1993. Le béton de fibres métalliques amorphes comme nouveau matériau de réparation. Ph.D. thesis, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [34] Cherubin-Grillo, D. 2001. Caractérisation et modélisation du comportement mécanique d'une plaque ondulée en composites ciment/verre. Ph.D. thesis, Université Blaise Pascal - Clermont II.
- [35] Babut, R., & Brandt, A.M. 1978. The method of testing and analysing of steel fibre reinforced concrete element in flexure. Proceeding of the RILEM symposium on Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites
- [36] Bentur, A., & Mindess, S. 1990. Fibre reinforced cementitious composites. Elsevier Science publishers ltd, London.
- [37] Brandt, A.M., & Marshall, I.H. 1986. Brittle matrix composites 1. Elsevier Science, London.
- [38] Glinicki, M.A., Vautrin, A., Soukatchoff, P., & Francois-Brazier, J. 1994. Plate impact testing method for GRC composites. *Cement and Concrete Composites*, 16, 241–251.

- [39] Brandt, A.M., & Glinicki, M.A. 1991. Flexural behaviour of concrete element reinforced with carbon fibres. Pre-proceedings International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Concrete, Germany.
- [40] Francois-Brazier, J. 1991. Caractérisation de la tolérance à l'endommagement et de la durabilité des composites ciment-verre par des essais de flexion avec des cycles de chargement - déchargement. Ph.D. thesis, Université Claude Bernard Lyon 1.
- [41] Document HYPERBRICK N° 0241-001.doc sur la page de téléchargement du site WEB hyperbrick DOCU-004.doc 25 juin 2002 bétons et mortiers
- [42] Y. Sébaïbi , R.M. Dheilily, B. Beaudoin, M. Quéneudec. The effect of various slaked limes on the microstructure of a lime–cement–sand mortar. *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 971–978]
- [43] Małgorzata Lenart. Impact Assessment of Lime Additive and Chemical Admixtures on Selected Properties of Mortars. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013 *Procedia Engineering* 57(2013) 687 – 696
- [44] P. Maravelaki-K alaitzaki, A. Bakolas, I. Karatasios, V. Kilikoglou. Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 1577 – 1586
- [45] *Mémento technique des Granulats* par R. Maillot, les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, (2001).
- [46] Norme Française NF P 18-555, "Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et de la teneur en eau des sables", Décembre 1990.
- [47] D.T.R.C.2-45: Règles de conception et de calcul des maçonneries. Centre National d'Etude et de Recherches Intégrées du Bâtiment 1997.
- [48] NBN EN 772-1:2011. Méthodes d'essai des éléments de maçonnerie – Partie 1: Détermination de la résistance à la compression.
- [49] NF EN 932-1 Décembre 1996 Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats - Partie 1 : méthodes d'échantillonnage.
- [50] NBN EN 933-1 Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1: détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage.
- [51] NF EN 933-2 Mai 1996. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2 : détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures.
- [52] Nouveau guide du béton et ses constituants par G. Dreux & J. Festa, Edition Eyrolles, (1998).

- [53] *Norme NF EN 933-8 - Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 8 : Évaluation des fines — Équivalent de sable*, Paris, Association Française de Normalisation (AFNOR), août 1999, 16 p, remplace les normes expérimentales françaises p. 18-597, de décembre 1990 et p. 18-598, d'octobre 1991.
- [54] NF P18-362 Juillet 1985 Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Coulis courants d'injection pour précontrainte - Détermination des temps de début et de fin de prise.
- [55] Masse volumique apparente sèche du mortier durci NBN EN 1015-10. Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – (1999) Partie 10 : détermination de la masse volumique + add1 (2007)
- [56] NF EN 196-1 Avril 2006 Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques -
- [57] Z. El Gharbi. Elaboration d'un dispositif expérimental pour l'étude d'un mur en terre. Mémoire de DEA, LGM-ENTPE (Ecole Nationale des Travaux Publics de l'état), 1991
- [58] Olivier M. Le matériau terre, compactage, comportement, application aux structures en blocs de terre. PhD thesis, INSA de Lyon 1994
- [59] Peter Walker Performance of stabilised soil block masonry under uniform and concentrated compression loading. Proceeding of the 4th International masonry conference, London 1995
- [60] Zinedine Khalid, Etude expérimentale du comportement mécanique des murs porteurs en maçonnerie de bloc de terre comprimée et stabilisée. PhD thesis, UFR de Mécanique et Energetique, Maroc, Casablanca, 125p., decembre 2000
- [61] M. Olivier, A. Mesbah, et Z. El Gharbi and J-C. Morel. Mode opératoire pour la réalisation d'essais de résistance sur blocs de terre comprimée. Matériaux et construction, vol 30: pp 515-517, Novembre 1997
- [62] C.I.W.P. Groot and J.A. Larbi. The influence of interfacial moisture exchange on mortar-brick bond strenght. 6th International seminar on structural masonry for developing countries, Bangalore-India, pages pp 148-156, 11-13 October 2000.
- [63] Juárez Alvarado. Concretos base cemento Portland reforzados con fibras naturales (Agave Lecheguilla), como materiales para construcción en México. Thèse de doctorat de l'Université Autonome de Nuevo León, Monterrey, Mexique, 2002..
- [64] Dittember, D.B., Ganga Rao, H.V.S., Critical Review of Recent Publications on Use of Natural composites in Infrastructure, Composites: Part A (2011), doi: 10.1016/j.composites.2011.11.019.

- [65] NF EN 197-1 (2001) Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants
- [66] European Standard EN 459-1. Building lime: part 1. Definition, specification and conformity criteria, 2001.
- [67] R.Lanchon cours de laboratoire GRANULAT, BETON, SOLS Paris, DESFORGES 1983.
- [68] NF EN 1008 Juillet 2003 Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton
- [69] NF EN 934-2 Août 2012 Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage -
- [70] Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux - Génie Civil Bâtiment - Environnement - Patrimoine Bâti. Le LERM : dossier technique.
- [71] Vincent Waller these Relation entre formulation d'un béton et propriétés méca, formulation et chaleur d'hydratation, cas de cendres volantes.
- [72] A.A. MOSLEMI, Y. T. Lim. Compatibility of southern hardwoods with Portland cement. Forest Products Research Society, 1984, Vol. 34, N°78, p. 22-26.
- [73] HACHMI, M., MOSLEMI, A.A., 1989. Correlation between wood cement compatibility and wood extractives, Forest Products Journal, 39, p. 55 58.
- [74] HACHMI, M., MOSLEMI, A.A., CAMPBELL, A.G., 1990. A new technique to classify the compatibility of wood with cement, Wood Sci Technol 24, p 345-354.
- [75] A.A. MOSLEMI, SOUZA, M., and GEIMER, R., Accelerated aging of cement-bonded particleboard. Proceedings, Inorganic-bonded wood and fibber composite material. Forest Products Society, Madison, 1994, WI.
- [76] Norme NF P18-452, Bétons-Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres, 1988, 13 p.
- [77] Norme AFNOR EN 196-3. Méthodes d'essai des ciments. Partie III: Détermination du temps de prise et de stabilité,1995
- [78] RILEM. Méthodes d'essais des bétons cellulaires. Matériaux et Construction, 1974, Vol. 8, N°45, P. 224.
- [79] AFNOR EN 196-1. Méthodes d'essai des ciments. Partie I: Détermination des résistances mécaniques,1995.
- [80] A. LEDHEM. Contribution à l'étude d'un béton de bois. Mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile – ciment - bois. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 1997, 161 p.

- [81] V. BAROGHEL-BOUNY, J. GODIN. Nouvelle approche expérimentale du retrait de dessiccation des pâtes et des bétons durcis ordinaires et à très hautes performances. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Nov-Déc. 1998, N°218, p. 39-48.
- [82] J. R. PHILIP. Numerical solutions of equations of the diffusion type with diffusivity concentration-dependent. Trans. Faraday Soc., 1955, Vol. 51, p. 885-892.
- [83] J. R. PHILIP. The theory of infiltration I. The infiltration equation and its solution. Soil Sci., 1957, Vol. 83, p. 845-857.
- [84] J. R. PHILIP. The dynamics of capillary rise. Water in the unsaturated zone. Proceedings of I.A.S.M. UNESCO Symposium Ritjema R. E. and Wassink H. Eds, 1966, Vol. 2, p. 559-564.
- [85] J. R. PHILIP. Theory of infiltration. Ard. Hydrosci., 1969, Vol. 5, p. 215-296.
- [86] C. HALL. Water movement in porous building materials-I. Unsaturated flow theory and its applications. Building and Environment, 1977, Vol. 12, p. 117-125.
- [87] R. J. GUMMERSON, C. HALL, W. D. HOFF. Water movement in porous building materials-II. Hydraulic suction and sorptivity of brick and other masonry materials. Building and Environment, 1980, Vol. 15, p. 101-108.
- [88] R. J. GUMMERSON, C. HALL, W. D. HOFF. Capillary transport in masonry structures. Building construction applications of Darcy's law. Construction Papers, 1980, Vol. 1, p. 17-27.
- [89] R. J. GUMMERSON, C. HALL and W. D. HOFF. Water movement in porous building materials-III. A sorptivity test procedure for chemical injection damp proofing. Building and Environment, 1981, Vol. 16, N° 3, p. 193-199.
- [90] C. HALL. Water movement in porous building materials-IV. The initial surface absorption and the sorptivity. Building and Environment, 1981, Vol. 16, N° 3, p. 201-207.
- [91] C. HALL, A. N. CALIMERIS. Water movement in porous building materials-IV. Absorption and shedding of rain by building surfaces. Building and Environment, 1982, Vol. 17, p. 257-262.
- [92] C. HALL, T. KAM-MING Tse. Water movement in porous building materials-VII. The sorptivity of mortars. Building and Environment, 1986, Vol. 21, N° 2, p. 113-118.
- [93] D. W. S HU, R. K. LEWIS. The water sorptivity of concrete: the influence of constituents under continuous curing. Durability of Building Materials, 1987, Vol. 4, p. 241-252.
- [94] P. CRAUSSE. Etude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieu poreux non saturé. Thèse de Doctorat d'état, I.N.P. de Toulouse, 1983, p. 21.

- [95] M.S. GOUAL M. S, F. BARQUIN, M. L. BENMALEK, M. Quéneudec. Estimation of the capillary transport coefficient of clayey aerated concrete using a gravimetric technique. *Cement and Concrete Research*, 2000, Vol. 30, pp. 1559-1563.
- [96] U. B. Topçu, N. Avcular. Analysis of rubberized concrete as a composite material. *Cement and Concrete Research*, 1997, Vol. 27, N°8, pp. 1135-1139.
- [97] R. Shaan, J.M. Torrenti. "Etude expérimentale de la maçonnerie sous sollicitations uni-axiales et bi-axiales ". *Annales de l'institut technique de bâtiment et des travaux publics N°486*. sept 1990.
- [98] F. Djaalali, H. Afra, M.K Berrah. "Influence des parametres macaniques et geometriques sur la résistance des structures en maçonneriesous sollicitations statiques et dynamiques par la méthode des éléments finis" 1er colloque national de genie parasismique. 4 - 7. pp 95-105 Alger juin 1996.
- [99] R. Shaan. Etude du comportement mécanique de la maçonnerie en brique. PhD thesis, Université des science]S et techniques de Lille Flandres artrois, 245p, 1987.
- [100] Eurocode 6, "calcul des ouvrages de maçonnerie partie 1 : regles generales pour la maçonnerie armée et non armée". ENV 1996- 1- 1. Belgique : CEN, 1996
- [101] Z. Douaïssia. Caractérisation des panneaux en briques creux en huit et douze trous, avec et sans l'enduit de ciment. Mémoire de Magister. Matériaux et Durabilité de l'université Badji Mokhtar de Annaba, 165p, juillet 2010.
- [102] Steil RO, Calçada LML, Oliveira AL, Martins VC, Prudêncio Jr LR. Influência do tipo de argamassa no fator de eficiência e na deformabilidade de alvenarias de blocos de concreto. In: *Anais do IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Brasília; 2001*, p. 423–34 (in portuguese).
- [103] Cunha EH, Guimarães GN, Carasek H. Influência do tipo de argamassa na resistência à compressão da alvenaria estrutural. In: *Anais do IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Brasília; 2001*. p.397–408 (in portuguese)]
- [104] Edgell G, Haseltine BA. Building mortar for low rise housing recommendations, problems and solutions. *British Masonry Society Publication; 2005*].
- [105] Mohamad G, Lourenço PB, Roman HR. Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: review and prospects. *Cem Concr Compos* 2007;29(3):181–92.
- [106] Atkinson RH, Amadei BP, Saeb S, Sture S. Response of masonry bed joints in direct shear. *J Struct Eng* 1989;115(9):2277–96.
- [107] Amadio C, Rajgelj S. Shear behavior of brick-mortar joints. *Masonry Int* 1999;5(1):19–22.

- [108] Roberti GM, Binda L, Cardani G. Numerical modeling of shear bond tests on small brick-masonry assemblages. *Computer methods in structural masonry – 4*: Florence, Italy; 1997. p. 145–52.
- [109] Binda L, Tiraboschi C, Abbaneo S. Experimental research to characterize masonry materials. *Masonry Int* 1997;10(3):592–601.
- [110] Panarese WC, Kosmatka SH, Randall FA. *Concrete masonry handbook for architects, engineers, builders*. Portland Cement Association, 5th ed. USA;1991.
- [111] Leonard Y. Mwaikambo, Martin P. Ansell, Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *Journal of Applied Polymer Science*, Volume 84, Issue 12 pages 2222–2234, 20 June 2002.
- [112] Pimienta, P, Chandellier, J, Rubaud, M, Dutruel, F, Nicole, H, Etude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois. *Cahier du CSTB*, Janvier-Février, N° 2703, 1994, p.45.
- [113] Le retrait (norme NF P 15-361) P18-361 Juillet 1985. Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Coulis courants d'injection pour précontrainte - Mesure du retrait.
- [114] Joachim Monge. Fissuration des Mortiers en Couches Minces - Effets de l'Hydratation, du séchage et de la Carbonatation. Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan en Mécanique-Génie Civil. 20/12/2007.
- [115] Romildo D., Filho T., Ghavami K., England GL., Scrivener K. Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. *Cem. Conc. Comp.*, 2003; 25(2): 185-196.
- [116] Balayssac J.P., Détriché C.H., Grandet J, (1993), Intérêt de l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation du béton d'enrobage, *Materials and Structures*, 1993;Vol. 26(158) : 226-230.
- [117] C. Hall, W. D. Hoff, M. A. Wilson. Effect of non-sorptive inclusions on capillary absorption by a porous material. *Journal of Physics D: Appl. Phys.*, 1993, Vol. 26, pp. 31-34.
- [118] J. Parzak, P. Lunk. Capillary suction of AAC, advances in Autoclaved Aerated Concrete. 1992, Wittman edition, Belkema, Rotterdam, pp. 119.