



HAL
open science

Etude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales

Fabien Betene Ebanda

► **To cite this version:**

Fabien Betene Ebanda. Etude des propriétés mécaniques et thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales tropicales. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2012. Français. NNT : 2012CLF22298 . tel-01153478

HAL Id: tel-01153478

<https://theses.hal.science/tel-01153478>

Submitted on 19 May 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : D.U:2298
EDSPIC : 589

Université BLAISE PASCAL - Clermont II
École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur de Clermont-Ferrand

et

Université de DOUALA (UD)

École Doctorale des Sciences Fondamentales et Appliquées

Thèse en cotutelle

présentée

par

Fabien BETENE EBANDA

DEA. Mécanique-Energétique, EDFA - Université de Douala

pour obtenir le grade de

Docteur d'Université

Spécialité : Génie Mécanique

**ETUDE DES PROPRIETES MECANIQUES ET
THERMIQUES DU PLATRE RENFORCE DE FIBRES
VEGETALES TROPICALES**

soutenue publiquement le 30 Novembre 2012 devant le jury :

M. S. AMZIANE	Université Blaise Pascal, Clt-Fd	Président
M. C. BALEY	Université de Bretagne Sud, Lorient	Rapporteur
M. R. NZENGWA	Université de Douala, Cameroun	Rapporteur
M. ATANGANA ATEBA	Université de Douala, Cameroun	Examineur
M. L. M. AYINA OHANDJA	Université de Douala, Cameroun	Co-Directeur de Thèse
M. A. BEAKOU	Université Blaise Pascal, IFMA	Directeur de Thèse
M. E. NJEUGNA	Université de Douala, Cameroun	Invité

Institut Pascal, UMR 6602 Université Blaise Pascal/CNRS/IFMA
Laboratoire de Mécanique, Matériaux, Structures et Productique (L2MSP), Université
de Douala, Cameroun

Remerciements

Ce travail est l'aboutissement d'un projet initié depuis 1994 par Professeur ATANGANA ATEBA, il a été compris et soutenu par Professeur AYINA OHANDJA Louis Max. Par la suite Dr NTENGA Richard s'est impliqué en fin facilitateur. C'est alors que Professeur Alexis BEAKOU le prit en mains pour sa finalisation : ses lettres ont contribué à obtenir le financement auprès des services de l'Ambassade de France au Cameroun, son accord a permis mon inscription à l'UBP, ses initiatives m'ont permis d'obtenir une aide à la co-tutelle, ses démarches m'ont facilité l'accès à du matériel d'essais en dehors de l'IFMA et bénéficier du concours des personnes ressources en rapport avec mon travail et mes séjours français.

Au moment où ce travail se finalise, je voudrais exprimer ma reconnaissance infinie à Professeur Alexis BEAKOU pour tous ces bienfaits. Je garde en souvenir toute sa sympathie, son estime et son attention. Pendant les trois ans de ma formation, j'ai bénéficié de ses expérience et compétences. Je tiens à lui dire merci du fond du cœur.

Tous mes remerciements à Professeur AYINA OHANDJA Louis Max pour toutes ses implications à la réussite de ce projet depuis l'admission en DEA, pour ses conseils et astuces suggérées.

Que cette opportunité me permette de dire merci pour tout à Professeur ATANGANA ATEBA, des mots ne suffiront jamais pour exprimer ma gratitude pour ses œuvres à mon profit.

Mes remerciements sont adressés à Dr NTENGA Richard pour son implication à faciliter la mise en route de cette thèse. J'ai bénéficié de ses conseils et astuces pour mes premiers pas dans le milieu universitaire et culturel français.

Un remerciement tout particulier aux membres du jury qui ont accepté de ménager un espace dans leur agenda pour évaluer ce travail. Je pense notamment à Professeur Christophe BALEY, Professeur NZENGWA Robert, Professeur Sofiane AMZIANE et Professeur Ebénézer NJEUGNA.

Je saisis également cette opportunité pour dire ma gratitude au gouvernement français pour le financement apporté, dans un premier temps à travers le projet COMETES en année de DEA et à travers l'Ambassade de France au Cameroun pour le financement de ce

programme de recherches. Toute ma reconnaissance au Recteur de l'Université de Douala pour les accords d'aide à la formation des formateurs. Toute ma gratitude aux Institutions Université Blaise Pascal de Clermont Ferrand et Université de Douala pour avoir signé une convention afin que ma thèse soit effective. Tous mes remerciements à Professeur BEKOLO Claude, Directeur de l'ENSET pour les facilités accordées. Mes remerciements à M. MBEY LISSOUCK Aboubakar qui m'avait communiqué l'information sur l'offre de bourse de l'Ambassade de France.

Les expérimentations constituent l'ossature de ce travail. A l'intérieur de l'IFMA, Michel DREAN, Karine CHARLET, Nicolas BLANCHARD et ses collaborateurs ont joué un rôle inestimable dans la réussite des essais : les uns m'ont apporté leur expérience dans la manipulation des équipements, les autres m'ont accordé des facilités pour la fabrication des éléments utiles à mes manipulations expérimentales; une pensée particulière à Xavier BALANDRAUD qui a consacré son temps et son énergie à m'aider à faire les essais de transfert thermique et en exploiter les résultats. En dehors de l'IFMA, des personnes m'ont apporté leur soutien et expertise dans la conduite des essais que nous ne pouvions faire à l'IFMA : je pense particulièrement à Professeur AWITOR Oscar et son technicien Yves SIBAUD à l'IUT pour m'avoir accordé l'accès à leur laboratoire. Je pense à Jean-Pierre CHERRE, maître de conférences associé à Polytechnique pour sa disponibilité à me faire des images MEB. Je pense à Professeur S. AMZIANE pour sa disponibilité à chercher avec nous des solutions de mesure de la conductivité thermique des fibres. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Mon séjour à l'Université Blaise Pascal en général et à l'IFMA en particulier a été meublé par une ambiance chaleureuse avec le personnel en service ainsi que les camarades du labo et ceux avec qui nous partagions les laboratoires, salles et matériels, je citerais de manière non exhaustive, Eliane PASSEMARD, Jacqueline GORSE, Miguel CANO, Agnès ROUDIER, Florence SAULNIER, Hanh TRAN, Shengnan SUN,...

Mon initiation au travail sur le plâtre a commencé par un stage au sein d'une PME de fabrication et de pose de staff à Douala "KOLBERT STAFF", je voudrais ici remercier le promoteur KOLBERT ainsi que ses techniciens qui m'ont fait profiter de leurs compétences.

Des personnes se sont impliquées dans la réalisation des éprouvettes notamment l'extraction des fibres et leur tissage. Je pense particulièrement à mon épouse Marie Laure et toute son équipe devenues expertes en extraction des fibres de RC. Je pense aussi à NDI Hilaire Patrice et son équipe pour leurs disponibilité et dextérité au tissage des fibres. Qu'ils trouvent en ces mots l'expression de ma reconnaissance.

Un merci à ma famille qui a supporté mes multiples et longues absences. Tout particulièrement à mon épouse qui, par son amour a supporté mon indisponibilité récurrente

et assumé les responsabilités de tout ordre pendant mes absences.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de mes amis, collègues, étudiants et tout le personnel de l'ENSET pour leurs encouragements.

Que tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'aboutissement de ce travail de recherche trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Table des figures

1.1	Structure d'un tissu	35
1.2	Types d'armure de tissage d'un tissu	35
1.3	Types de tissages volumiques	36
1.4	Essais micro mécaniques de mesure de la résistance à l'interface fibre ma- trice: a- essai pull out, b- micro tension, c- micro compression, d- de frag- mentation, f- test d'indentation	38
1.5	Courbes représentatives des principaux types de comportement d'un maté- riau sollicité en traction uniaxiale: a- comportement fragile (fonte, verre), b- comportement ductile (acier doux), c- comportement élastique non li- néaire (élastomère).	41
1.6	Schéma de principe de l'essai de flexion 3 points	42
1.7	Schéma de principe de l'essai de compression et les phénomènes observables	43
1.8	Exemple de courbe de compression tracée à l'inverse par comparaison à celle de traction	43
1.9	Schéma de principe de la méthode Flash	44
1.10	Schéma de principe de la méthode du fil chaud	45
1.11	Image du CT-mètre	46
1.12	Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée	46
1.13	Images de gypses naturelles: (a, d) Gypse rose des sables, (b) gypse en fer de lance, (c, e) gypse.	47
1.14	Projection de la structure cristalline du gypse selon la direction 001	48
1.15	Structure atomique du semihydrate sur le plan (001)	50
1.16	Images MEB ($5m\mu$) des plâtres Prestia (usine Mériel du groupe Lafarge): a-semihydrate α ; b-semihydrate β	50
1.17	Enchevêtrement des cristaux du plâtre pris gâché à $E/P = 0,8$ (Image MEB d'un faciès de rupture - $20\mu m$)	53
1.18	Données expérimentales de reprise d'humidité d'une poutre de plâtre	55
1.19	Microstructure du mélange plâtre/fibres synthétiques: a-Fibres de poly- amide, b-Fibres de polypropylène non traitées, c-Fibres de polypropylène traitées corona.	61
2.1	Phases du plâtre: a-poudre de semihydrate β , b-solution plâtre-eau, c- plâtre solide	66
2.2	Image MEB d'une surface de rupture du plâtre gâché à E/P égale à 1	67
2.3	Plante du sisal et cordage à base de sisal	69

2.4	Le Recktophyllum camerunense a- plante b- racines à l'origine des fibres c- Fibres lavées	70
2.5	Section droite de la fibre de RC: a-vue au microscope SEM ($\times 210$), b – <i>image au microscope pi fluorescent analyse</i>	70
2.6	Mesure des masses volumiques des fibres: agitation vortex dans un dessiccateur pour évacuation des microbulles des fibres	72
2.7	Eprouvettes de plâtre métallisées et prêtes à l'observation au MEB	74
2.8	Image MEB du composite plâtre/sisal à des échelles de grossissements différents	75
2.9	Image MEB du composite plâtre/RC à des échelles de grossissement différents	76
2.10	Principe de la micro-tomographie a- Micro-tomographe SkyScan Model 1174 b- principe de prise d'images à reconstituer	77
3.1	Traction des fibres: a-Machine de traction INSTRON, b- Fibres montées sur des mors pneumatiques spéciales dédiées, c- Microscope électronique BRESSER CD MICRO	81
3.2	Comportement en traction: courbe contrainte/déformation de la fibre de sisal	82
3.3	Comportement en traction: graphiques des modules d'élasticité (E), résistances à la traction (Rm) et de l'allongement à la rupture de la fibre de sisal	83
3.4	Comportement en traction: courbe contraintes (MPa)/déformations de la fibre de RC	83
3.5	Comportement en traction: graphiques des modules d'élasticité (E), résistances à la traction (Rm) et de l'allongement à la rupture de la fibre de RC	84
3.6	Comportement en traction: définition de l'éprouvette de traction	85
3.7	Comportement en traction: machine de traction UTS20K TESTSYSTEM Zwick/ROELL ZmartPro	86
3.8	Comportement en traction: courbe contrainte/déformation du plâtre non renforcé	87
3.9	Comportement en traction: graphiques des modules d'élasticité (E), résistances à la traction (Rm) et de l'allongement à la rupture (A%) du plâtre non renforcé	88
3.10	Comportement en flexion: disposition de l'éprouvette pour l'essai	89
3.11	Comportement en flexion: courbe force (N)/déplacement (mm) du plâtre non renforcé à E/P=1	90
3.12	Comportement en flexion: graphiques des modules d'élasticité (E) et contrainte maximale du plâtre non renforcé E/P=1	91
3.13	Comportement à l'interface: schéma simplifié d'un essai de déchaussement de microgoutte	92
3.14	Comportement à l'interface: a- dessin d'ensemble du dispositif d'essai, b- schéma simplifié du principe de l'essai et c- photographie de l'essai de déchaussement en cours	93
3.15	Comportement à l'interface: machine de traction des fibres INSTRON	94

3.16	Comportement à l'interface: modèle à ressorts	94
3.17	Comportement à l'interface: courbe de contraintes/déformation de l'interface plâtre/sisal	95
3.18	Comportement à l'interface: caractéristiques mécaniques de l'interface plâtre/sisal	96
3.19	Comportement à l'interface: courbe de contrainte/déformation de l'interface plâtre/RC	96
3.20	Comportement à l'interface: caractéristiques mécaniques de l'interface Plâtre/RC	97
3.21	Comportement en traction: section droite de l'éprouvette en traction du composite a-théorique b-réelle	99
3.22	Comportement en traction: graphique statistique des fractions volumiques des fibres de Sisal dans les éprouvettes de traction	100
3.23	Comportement en traction: courbe contrainte/déformation caractéristique de la loi de comportement du composite plâtre/sisal	101
3.24	Comportement en traction: graphiques statistiques des caractéristiques mécaniques du composite plâtre/sisal	102
3.25	Comportement en flexion: Orientation des fibres dans la plaque F4D . . .	103
3.26	Comportement en flexion: Courbes forces (N)/déplacements (mm) du composite plâtre/sisal a-érouvette FNO, b-érouvette F4D, c-érouvette F1D	104
3.27	Comportement en flexion: graphiques des caractéristiques mécaniques des spécimens plâtre/sisal F1D, F4D et FNO	105
3.28	Comportement en traction: graphique statistique des fractions volumiques du RC dans les éprouvettes testées	106
3.29	Comportement en traction: courbe contraintes/déformations caractéristiques de la loi de comportement du composite plâtre/RC	107
3.30	Comportement en traction: graphiques des caractéristiques mécaniques du plâtre/RC en traction	108
3.31	Comportement en flexion: allure des courbes forces (N)/flèche (mm) des spécimens renforcés de RC disposées aléatoirement (FNO), en stratifié (F4D) et en unidirectionnel (F1D)	109
3.32	Comportement en flexion: graphiques des caractéristiques mécaniques en flexion pour des orientations différentes des fibres de RC	110
3.33	Influence de l'architecture du RC: a- fibres non orientées dans le moule b- éprouvette de traction	111
3.34	Courbe contrainte/déformation caractéristique du comportement des éprouvettes de RC (FNO)	112
3.35	Comportement en traction: rupture de la matrice pendant l'essai et maintien de la résistance par des fibres	112
3.36	Comportement en traction: graphiques statistiques des caractéristiques mécaniques des spécimens de composite plâtre/RC FNO	113
3.37	Influence de l'architecture des fibres: a- les fibres non orientées dans le moule b- éprouvette de flexion (FNO)	114
3.38	Influence de l'architecture des fibres: courbes forces (N)/flèche (mm) caractérisant le comportement en flexion des spécimens plâtre/RC (FNO) . .	114
3.39	Comportement en flexion: graphes des valeurs des caractéristiques mécaniques du composite plâtre/RC (FNO)	115

3.40	Eprouvette de traction du composite plâtre/RC (F1D)	116
3.41	Comportement en traction: courbe contraintes (MPa)/déformations d'un échantillon du composite plâtre/RC (F1D)	116
3.42	Comportement en traction: graphes des caractéristiques mécaniques en traction du composite plâtre/RC F1D	117
3.43	Comportement en flexion: courbe force (N)/flèche (mm) caractéristique du comportement du composite plâtre/RC F1D	118
3.44	Comportement en flexion: graphes des valeurs des caractéristiques mécaniques en flexion du composite plâtre/RC F1D	119
3.45	Fabrication du tissu de RC: a- métier à tisser b-opération de tissage en cours c- tissu de RC	120
3.46	Comportement en traction: éprouvette plâtre/RC renforcée du tissu de fibres (F1DT)	120
3.47	Comportement en traction: courbe contrainte/déformation du composite plâtre/RC Tissé (F1DT)	121
3.48	Comportement en traction: graphiques des valeurs moyennes des caractéristiques du composite plâtre/RC à renfort tissé (F1DT)	122
3.49	Comportement en flexion: éprouvette de flexion à renfort tissé a- configuration possible du tissu dans le matériau, b- éprouvette de flexion du composite plâtre/fibres	123
3.50	Comportement en flexion: courbe force/flèche caractérisant le comportement du composite plâtre/RC à renfort tissé.	123
3.51	Comportement en flexion: graphes statistiques des caractéristiques mécaniques du composite plâtre/RC à renfort tissé	124
3.52	Comparaison des caractéristiques mécaniques en traction	126
3.53	Comparaison des caractéristiques mécaniques en flexion 3 points	127
3.54	Comparaison de l'influence de l'architecture des fibres sur les caractéristiques mécaniques en Traction du composite plâtre/RC	128
3.55	comparaison de l'influence de l'architecture des fibres sur les caractéristiques mécaniques en Flexion du composite plâtre/RC	129
4.1	Thermographie infrarouge: a- éprouvette en configuration d'essai b- caméra infrarouge	140
4.2	Schéma de principe de la manipulation	140
4.3	Thermogramme de la plaque de plâtre non renforcée	141
4.4	Thermogramme de la plaque de composite plâtre/sisal F4D	141
4.5	Thermogramme de la plaque de composite plâtre/RC F4D	142
4.6	Thermogramme de la plaque du composite FNO	143
4.7	Thermogramme de la plaque du composite F1D	144
4.8	Tissus en fibres de RC	144
4.9	Thermogramme de la plaque du composite FT	145
4.10	Allure générale d'une isotherme de sorption	146
4.11	Description d'isothermes de sorption	147

4.12 Matériel d'essai d'hygrométrie a-,b-schéma et photo enceinte à humidité contrôlée c-capsule contenant les fibres d-balance électronique de précision (0,1 mg)	148
4.13 Cinétique d'absorption de la fibre de sisal à 98% HR à 20°C	149
4.14 Isotherme d'adsorption de la fibre de sisal	149
4.15 Cinétique d'absorption de la fibre RC	150
4.16 Isotherme d'adsorption de la fibre de RC	151
4.17 Cinétique d'absorption d'humidité du plâtre non renforcé	152
4.18 Isotherme d'adsorption du plâtre non renforcé	152
4.19 Cinétique d'absorption d'humidité du composite plâtre/sisal	153
4.20 Isotherme d'adsorption du composite plâtre/sial	154
4.21 Cinétique d'absorption d'humidité du composite plâtre/RC	155
4.23 Faciès d'une coupe au diamant du matériau plâtre/fibre: mise en évidence de l'influence du gonflement et retrait des constituants sur la qualité de l'interface	155
4.22 Isotherme d'adsorption du composite plâtre/RC	156
4.24 Cinétique d'absorption d'humidité des composites plâtre fibres et ses constituants	158
4.25 Isothermes de sorption des échantillons de composites plâtre/fibres et des constituants	159
5.1 Influence du volume d'air sur la microstructure du plâtre [1, 2]	163
5.2 Image MEB de la microstructure du plâtre renforcé de fibres longues de RC.163	
5.3 Description multiéchelle de la microstructure du plâtre renforcé [1]	164
5.4 Changement d'échelles et lois de comportement linéaire	167
5.5 Cellule élémentaire cylindrique d'un composite unidirectionnel	170
5.6 Cylindre soumis à une traction uniforme	170
5.7 Schéma simplifié d'une traction longitudinale	171

Liste des tableaux

1.1 Indicateurs d'impacts environnementaux du « CAROPLATRE STANDARD 5 » de Lafarge	33
1.2 Solubilité en grammes, du sulfate de calcium, par kg d'eau	48
1.3 Caractéristiques du système CaSO ₄ et ses hydrates	49
1.4 Propriétés mécaniques du plâtre pris en fonction des paramètres de mise en œuvre	54
1.5 Caractéristiques thermiques du plâtre	56
1.6 Propriétés mécaniques des panneaux de plâtre renforcé de fibres de sisal comparées à d'autres matériaux	59
2.1 Récapitulatif des principales données physiques obtenues	68
2.2 Caractéristiques chimiques et physiques des fibres de sisal	70
2.3 Caractéristiques chimiques et physiques des fibres de RC	71
2.4 Masses volumiques des fibres	72
2.5 Fraction volumique des fibres évaluées par destruction du composite après mise en forme	75
2.6 Fractions volumiques en (%) évaluées par pesée à la mise en œuvre	76
2.7 Fractions volumiques comparées en (%) obtenues par deux méthodes	78
3.1 Comportement en traction : tableau des valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques en traction de la fibre de sisal	82
3.2 Comportement en traction : tableau des valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques en traction de la fibre de RC	84
3.3 Tableau comparatif des propriétés mécaniques mesurées des fibres avec ceux disponibles dans la littérature	85
3.4 Comportement en traction : tableau des valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques en traction du plâtre non renforcé	87
3.5 Comportement en flexion : tableau des valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques du plâtre non renforcé	90
3.6 Comportement à l'interface : paramètres mécaniques de l'interface plâtre/sisal	95
3.7 Comportement à l'interface : paramètres mécaniques de l'interface RC/plâtre	97
3.8 Caractéristiques mécaniques de l'interface en fonction de la surface de l'interface.	98
3.9 Comportement en traction : valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques du composite plâtre/sisal	101

3.10	Comportement en flexion : tableaux des valeurs des caractéristiques mécaniques des spécimens plâtre/sisal	104
3.11	Comportement en traction : valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques du composite plâtre/RC	107
3.12	Comportement en flexion : caractéristiques mécaniques des trois types d'échantillons testés	109
3.13	Comportement en traction : caractéristiques mécaniques des spécimens de composite plâtre/RC FNO	113
3.14	Comportement en flexion : caractéristiques mécaniques des éprouvettes plâtre/Rc (FNO) testées	115
3.15	Comportement en traction : tableau des caractéristiques mécaniques du composite plâtre/RC (F1D)	117
3.16	Comportement en flexion : tableau des valeurs des caractéristiques mécaniques en flexion du composite plâtre/RC (F1D)	119
3.17	Comportement en traction : tableau des valeurs des caractéristiques mécaniques des éprouvettes plâtre/RC à renfort tissé (F1DT)	122
3.18	Comportement en flexion : graphes des valeurs des modules d'élasticité et des contraintes maximales du composite plâtre/RC à renfort tissé	124
3.19	Tableau comparatif des caractéristiques mécaniques en traction des composites plâtre/sisal et plâtre/RC	125
3.20	Tableau comparatif des caractéristiques mécaniques en flexion des composites plâtre/sisal et plâtre/RC	126
3.21	Tableau comparatif de l'influence de l'architecture des fibres sur les caractéristiques mécaniques en Traction du composite plâtre/RC	127
3.22	Tableau comparatif de l'influence de l'architecture des fibres sur les caractéristiques mécaniques en Flexion du composite plâtre/RC	128
4.1	Solutions de sel utilisées et leur taux d'humidité à saturation	148
4.2	Tableau comparatif des diffusivités thermiques des matériaux plâtre et composites/fibres	156
4.3	Diffusivité thermique du composite plâtre/RC en fonction de l'architecture des fibres	157
4.4	Valeurs comparées des résistances thermiques des panneaux de fibres et le composite Plâtre/RC unidirectionnel.	157
4.5	Temps nécessaires pour établir l'équilibre d'absorption des constituants et composites plâtre/fibres	157
4.6	Valeurs de taux d'humidité comparées aux valeurs de la littérature.	158
5.1	Valeurs limites de la conductivité thermique homogénéisée du plâtre	172
5.2	Valeurs limites de la diffusivité thermique déduite de la conductivité thermique homogénéisée du plâtre	173
5.3	Valeurs limites des conductivités thermiques des spécimens de composites testés	173
5.4	Conductivités thermiques déduites des diffusivités thermiques expérimentales des composites	174

5.5 Valeurs des modules d'élasticité et coefficient de Poisson homogénéisés du plâtre pris	174
5.6 Modules d'élasticité des fibres de sisal et de RC ainsi que du plâtre	175
5.7 Valeurs des modules d'élasticité des composites unidirectionnelles calculées à partir des expressions théoriques	175
5.8 Valeurs expérimentales des modules d'élasticités longitudinales	175

Table des matières

1	Chapitre 1 - Revue de la littérature	29
1.1	Introduction	29
1.2	Le plâtre dans le contexte du développement durable	30
1.2.1	Prise de conscience internationale pour la protection de l'environnement	30
1.2.2	Impact du plâtre sur l'environnement	31
1.2.3	Conclusion	33
1.3	Le composite à matrice plâtre : état de l'art	34
1.3.1	Généralités sur les matériaux composites	34
1.3.2	Composite à matrice plâtre	46
1.4	Conclusion	62
2	Chapitre 2 - Caractérisation physico-chimique des matériaux de l'étude	65
2.1	Le plâtre	66
2.1.1	Présentation physico-chimique	66
2.1.2	Les paramètres de gâchage	66
2.1.3	Microstructure du plâtre pris	67
2.1.4	Mesure de la porosité	67
2.2	Les renforts	68
2.2.1	Présentation physicochimique	68
2.2.2	Evaluation de la masse volumique	71
2.3	Le composite plâtre/fibres	72
2.3.1	Microstructure du mélange plâtre fibres	72
2.3.2	Evaluation de la fraction volumique	74
3	Chapitre 3 - Approche expérimentale du comportement mécanique	79
3.1	Caractérisation des constituants	80
3.1.1	Caractérisation en traction des fibres	80
3.1.2	Caractérisation du plâtre non renforcé	85
3.1.3	Caractérisation de l'interface	91
3.1.4	Conclusion sur la caractérisation des constituants	98
3.2	Caractérisation du composite plâtre/sisal	99
3.2.1	Essai de traction	99
3.2.2	Essai de flexion trois points	103
3.3	Caractérisation du composite plâtre/RC	106

3.3.1	Essai de traction	106
3.3.2	Essai de flexion trois points	108
3.4	Influence de l'architecture du RC	111
3.4.1	Fibres non orientées	111
3.4.2	Fibres unidirectionnelles libres	115
3.4.3	Fibres tissées	120
3.5	Etude comparative des résultats	125
3.5.1	Traction	125
3.5.2	Flexion	125
3.5.3	Influence de l'architecture du RC	126
3.5.4	Conclusion sur l'étude comparative	129
3.6	Conclusion	129
4	Chapitre 4 - Approche expérimentale du comportement thermique et hygrométrique	131
4.1	Aspects thermiques	132
4.1.1	Généralités sur le transfert thermique	132
4.1.2	Caractérisation d'un isolant thermique	138
4.1.3	Mesure de la diffusivité thermique du plâtre non renforcé	139
4.1.4	Mesure de la diffusivité thermique du plâtre renforcé de sisal	140
4.1.5	Mesure de la diffusivité thermique du plâtre renforcé de RC	142
4.1.6	Influence de l'architecture des fibres de RC	142
4.2	Aspect hygrométrique	146
4.2.1	Caractère hygrophile d'un matériau	146
4.2.2	Comportement hygrométrique des fibres	147
4.2.3	Comportement hygrométrique du plâtre non renforcé	151
4.2.4	Comportement hygrométrique du plâtre renforcé des fibres de sisal	153
4.2.5	Comportement hygrométrique du plâtre renforcé des fibres de RC	154
4.3	Etude comparative des résultats	156
4.3.1	Diffusivité thermique	156
4.3.2	Caractéristiques hygrométriques	157
5	Chapitre 5 - Approche multiéchelle du comportement du plâtre renforcé	161
5.1	Le plâtre renforcé : un matériau à microstructure hiérarchique	162
5.1.1	Observations	162
5.1.2	Description multiéchelle de la microstructure du plâtre renforcé	164
5.2	La modélisation multiéchelle	164
5.2.1	Rappel du principe de la méthode	164
5.2.2	Approche adoptée dans le cadre de ce travail	165
5.2.3	Rappels sur les méthodes d'homogénéisation	165
5.2.4	Modèles analytiques ou semi-analytiques	168
5.3	Application au plâtre renforcé de fibres unidirectionnelles	172
5.3.1	Comportement thermique	172
5.3.2	Comportement mécanique	174
5.4	Comparaison aux résultats expérimentaux	175

5.4.1	Comportement thermique	176
5.4.2	Comportement mécanique	176
5.5	Conclusion	176

Résumé

Le plâtre est un matériau de grande disponibilité et très connu pour ses qualités : il est favorable à la protection de l'environnement, assez malléable, de faible densité, aux propriétés fonctionnelles remarquables (coupe-feu, isolant thermique, régulateur de l'hygrométrie des enceintes), décoratif, ... Ce qui justifie l'intérêt accordé à ce matériau pour les constructions. Sa grande fragilité préoccupante est à l'origine des travaux de recherches dans le monde entier en vue de son renforcement. Les fibres de verre et de sisal sont les renforts les plus utilisés à ce jour. Le renforcement par des fibres végétales est de plus en plus recherché. La texture micro structurale poreuse du plâtre favorise son caractère d'isolant thermique. Les textures mises en œuvre jusqu'à présent sont limitées à des porosités comprises entre 30 et 55%. La réduction du coût de ce matériau pour une large utilisation est encore possible et souhaitée. Deux leviers sont exploités dans ce travail, notamment un allègement de la masse de plâtre pour augmenter le taux de porosité et un renforcement de la tenue mécanique par incorporation de fibres végétales produites localement.

L'objectif de ce travail est d'évaluer les caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques d'un matériau constitué de plâtre pris, à grande porosité, renforcé d'une nouvelle fibre végétale : le *Rhectophyllum Camerunense* (RC), une fibre des forêts humides équatoriales. La fibre de sisal, d'utilisation connue pour le renforcement du plâtre, sert de référence à des fins de comparaison. Une série d'expérimentations est menée à cet effet. Une caractérisation physico-chimique des constituants est effectuée, des essais mécaniques de traction et de flexion sont effectués sur les constituants et les matériaux composites plâtre/fibres résultants, la cinétique d'adsorption d'humidité par les constituants et le matériau fibreux est suivie. Le comportement thermique des matériaux plâtre et plâtre/fibres est aussi mesuré.

Les fibres utilisées, le sisal et le RC, sont à fort taux de cellulose (entre 49 et 78,8%), la fibre de RC est tubulaire avec 35,5% de porosité. Le plâtre est gâché à l'eau déminéralisée à un rapport massique E/P égal à 1 à partir de la poudre de semihydrate β . Sa microstructure cristalline est constituée de cristaux de gypse sous forme d'aiguilles enchevêtrées

avec des vides intercrystallins.

Sur le plan du comportement mécanique, les résultats obtenus révèlent que le plâtre se montre fragile et présente un module d'élasticité en traction de 1,72 GPa, une résistance à la traction de 0,86 MPa et un allongement à la rupture de 1,16%. En flexion trois points, son module d'élasticité est de 0,64 GPa et sa contrainte à la rupture, de 0,13 MPa. La fibre de sisal est raide et fragile. Son module d'élasticité est compris entre 9 et 21 GPa, elle admet un allongement à rupture de 3 à 7%. Par contre, la fibre de RC est assez ductile avec un module d'Young moyen de 0,7 GPa et un allongement à rupture de 24,2%. L'adhésion du plâtre sur les fibres est faible : il adhère plus sur le sisal que sur le RC. Le sisal renforce mieux le plâtre par une augmentation plus sensible du module d'élasticité de 42,5%, contre 16,3% pour le RC, ce dernier lui apportant plutôt une grande ductilité élastique. Les fibres de RC apportent le maximum de renforcement en traction au plâtre lorsqu'elles sont tissées en unidirectionnel et en flexion lorsqu'elles sont uniformément réparties dans le volume suivant la direction longitudinale de la structure.

Du point de vue du comportement thermique et hygrométrique, les fibres de RC mélangées au plâtre diminuent davantage la cinétique de propagation de la chaleur au sein du matériau en comparaison aux fibres de sisal. Cette caractéristique est mieux assurée lorsque les fibres de RC sont disposées aléatoirement sous la forme d'un mat de fibres. Les deux types de fibres se montrent plus absorbants d'humidité que la plâtre. Ceci entraîne conséquemment que le plâtre renforcé de fibres soit plus absorbant d'humidité que lorsqu'il est non renforcé.

Une étude analytique multi-échelle du comportement thermique et mécanique des spécimens de composites plâtre/RC unidirectionnels est menée à la fin et les résultats se montrent en accord avec les résultats expérimentaux pour ce qui concerne le comportement thermique alors que la faiblesse de l'interface fibres/plâtre entraîne un écart important avec les résultats mesurés dans le cas du comportement mécanique.

Mots clés: Plâtre; Fibre végétale tropicale; Propriétés mécaniques; Propriétés thermiques; Adsorption d'humidité; Modélisation multi-échelle.

Abstract

The plaster is a material of high availability and very known for its qualities: it is favourable to the protection of the environment, quite malleable, of low density, its functional properties are remarkable (firewall, thermal insulation, regulator of the hygroscoy of enclosures), decorative, ... What justifies the interest attached to this material for constructions. Its great alarming brittleness is at the origin of the research tasks in the whole world for its strengthening. The glass fibers and sisal are the more used reinforcements to this day. The strengthening by plant fibers is more and more researched. The microstructure of the plaster is porous; that promotes its heat insulation character. The textures implemented so far are limited to porosities ranging between 30 and 55%. The reduction of cost of this material for a wide use is still possible and desired. Two levers are exploited in this work, in particular a lightening of the plaster weight to increase the proportion of air voids and a reinforcement of the mechanical resistance with locally produced fibers.

The objective of this work is to evaluate the mechanical, thermal and hygrometrical characteristics of a material made up of harden plaster, with high porosity, strengthened by a new plant fiber: the *Rhectophyllum Camerunense* (RC), a fiber of humid equatorial forests. The sisal fiber, of known use for the strengthening of the plaster, serves as a reference for comparison purposes. A serie of experiments is conducted to this effect. A physicochemical characterization of constituents is performed. Mechanical tests of tensile and of bending are performed on the constituents and the resulting plaster/fiber composite materials. The kinetic adsorption of moisture by the constituents is followed. The thermal behaviour of plaster and plaster/fiber is also measured.

The fibers used, sisal and RC are with high rates of cellulose (between 49 and 78.8%), the fiber of RC is tubular with 35.5 % of porosity. The plaster is dissolved in demineralized water to a mass ratio W/P equals to 1 from the powder of semihydrate β . Its crystalline microstructure is composed of gypsum crystals in the form of needles tangled with the empty intercrystallins.

As far as the mechanical behavior is concerne, the result reveals that the plaster is

weak, its Young's modulus in tensile is 1.72 GPa, its tensile strength is 0.86 MPa and its elongation at break is 1.16 %. In three points bending test, its modulus of elasticity is 0.64 GPa and its constraint at break is 0.13 MPa. The sisal fiber is stiff and fragile. Its Young's modulus is between 9 and 21 GPa, it admits an elongation at break of 3 to 7 %. On the other side, the fiber of RC is quite ductile: the means of Young's module is 7 GPa and the elongation at break is 24.2 %. The adhesion of the plaster on the fiber surface is low: it adheres more on the sisal than on the RC. The sisal strengthened better the plaster with a sensitive increase of the Young's modulus of 42.5 %, against 16.3 % for the RC. But the RC fiber gives rather high elastic ductility. The fibers of RC deliver maximum capacity in tensile to the plaster when they are woven into unidirectional. They offer high capacity in bending when they are uniformly distributed inside the volume according to the longitudinal direction of the structure.

From the point of view of thermal behavior and relative humidity, the fibers of RC mixed with plaster decrease more the kinetics of propagation of heat within the material compare to fibers of sisal. This characteristic is best ensured when the fibers of RC are arranged randomly. The two fiber types are more moisture absorbent than the plaster. This causes consequently that the plaster reinforced with fibers will be more absorbent of moisture that when it is not reinforced.

A multi-scale analytical study of the thermal and mechanical behaviour of specimens of plaster/RC unidirectional composite is carried out at the end. The results are in agreement with the experimental results with respect to the thermal behaviour whereas the weakness of the fiber/plaster interface causes a significant gap with the results in the case of mechanical behaviour.

Key Words: Plaster ; Tropical plant fiber ; Mechanical properties ; Thermal properties ; Moisture absorption ; Multi-scale modeling.

Introduction

Le plâtre est un matériau de construction résultant de la cuisson du gypse, suivie de broyage. C'est aussi le même matériau gâché avec de l'eau et durci. Il est employé pour le moulage des formes ainsi que dans le bâtiment pour la confection d'éléments préfabriqués comme les carreaux, les panneaux, etc. En médecine, on désigne aussi par ce nom, l'appareil de contention et d'immobilisation moulé directement sur le patient : sur un membre, un segment de membre ou une articulation en cas de fracture osseuse ou de lésion ostéoarticulaire avec du plâtre à modeler et de la tarlatane. Dans le domaine des beaux arts, c'est un modèle en plâtre d'une œuvre qu'on prévoit d'exécuter dans un matériau plus noble [3]. C'est donc un matériau solide (plâtre pris), il est aussi la poudre (semihydrate) qui permet après gâchage d'obtenir le matériau.

Le plâtre a été découvert depuis l'antiquité, 9000 ans environ avant J.C. Il est alors utilisé comme enduit (extérieur et intérieur) [4, 5]. Par la suite, il est utilisé comme joints des blocs de pyramides en Egypte, dans l'ornement des palais et mosquées moyenâgeux. Louis XIV, en 1667, oblige son utilisation dans les maisons en intérieur comme en façade pour prévenir des incendies. Vers la fin du dix huitième siècle, la plaque de plâtre est mise sur pied. Depuis lors, son exploitation s'est développée. De nos jours, ce matériau est très utilisé dans les constructions pour ses qualités en décoration, de coupe feu, de légèreté, d'isolant thermique et phonique, pour sa disponibilité et pour son faible coût [6]. Le plâtre est donc un matériau connu et apprécié de longue date des humains.

Malgré cette bonne appréciation globale, il subsiste tout de même une insatisfaction par rapport aux envies qu'il suscite à ses utilisateurs : il ne garde pas ses qualités face aux intempéries (humidité notamment) [7], il est fragile et ne permet pas des sollicitations majeures en flexion ou en traction. Des recherches dans le sens de sa consolidation en vue de diminuer, voire annuler cette fragilité s'avèrent justifiées. Pour cela, des travaux de recherche ont déjà été menés et publiés et des études sont en cours. Ces travaux et études visent à améliorer la connaissance du plâtre du point de vue de son élaboration, de sa micro structure, de son comportement en rapport avec l'environnement ou de son comportement face à des sollicitations. Ils sont aussi menés du point de vue de l'amélio-

ration de ses caractéristiques mécaniques par incorporation de renforts. Les fibres sont les renforts dont les résultats sont appréciables quelque soit l'architecture utilisée. Les fibres de verre et de sisal sont les plus connues pour leur utilisation industrielle avec le plâtre. La fibre de verre présente une grande résistance mécanique (de 2500 à 4600 MPa de résistance à la rupture par traction [8]) et une bonne tenue à de hautes températures. Elle présente cependant quelques inconvénients : un coût élevé [9], une densité élevée (autour de 2,5), des démangeaisons cutanées ou irritations des voies respiratoires sont signalées aux premiers temps de manipulation [10]. Le sisal, une fibre végétale, donc biodégradable et renouvelable, apporte au plâtre le renforcement souhaité pour les applications courantes avec des coûts et risques réduits. Dans la perspective de promouvoir l'utilisation du composite plâtre entièrement écologique, une nécessaire diversification de la nature du renfort végétal est, à notre avis, à encourager. Une approche consisterait à chercher des solutions locales de renforcement de grande disponibilité ou d'accessibilité facile pour réduire voire annuler le coût de l'importation de la fibre de sisal. L'utilisation du plâtre renforcé deviendrait ainsi plus abordable.

Au Cameroun, l'utilisation du plâtre est connue dans le moulage des formes par les artistes, dans la confection et la pose des plafonds suspendus (staff) et dans le revêtement des murs intérieurs. Elle est limitée à des œuvres ou ouvrages de prestige, certainement à cause du coût de revient élevé : tous les constituants sont importés. Le plâtre est importé de France, d'Algérie alors que le sisal l'est du Mexique, du Brésil, d'Haïti, d'Inde, d'Indonésie, de Thaïlande et d'Afrique de l'Est [11]. Si le renfort pouvait être produit localement, il participerait à la réduction du coût du produit fini. Le plâtre renforcé pourrait alors se diversifier jusqu'à la construction des murs et avoir une nouvelle classe d'utilisateurs. Le premier impact évident attendu, du fait de ses qualités fonctionnelles, est la réduction de la consommation énergétique pour le confort des habitations qu'entraîne la climatisation artificielle. Un regard sur les us et coutumes des peuples anciens de ce pays d'Afrique centrale permet de découvrir que des fibres locales ont servi à tisser des nasses, des filets de pêche ou des cordages. C'est le cas des fibres d'une racine aérienne du *Rhectophyllum Camerunense* (RC), une plante grimpante (mais non parasite) des forêts tropicales humides. Cette fibre a été caractérisée en 2007 [12] et ses caractéristiques plaident en faveur de son utilisation industrielle. L'idée est de l'essayer au renforcement du plâtre de porosité élevée pour des applications fonctionnelles et structurelles dans les bâtiments : c'est l'objectif principal de ce travail de thèse qui s'appuie sur la fibre de sisal, d'utilisation connue avec le plâtre, comme référence en vue des comparaisons.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une revue de la littérature destinée à faire un état de l'art sur l'amélioration des performances du plâtre. Les caractéristiques physicochimiques des matériaux étudiés sont analysées dans le chapitre 2. A travers des

techniques appropriées, la micro structure du plâtre et du mélange plâtre/fibres est examinée, la porosité du plâtre utilisé est évaluée. Des informations sur les propriétés physicochimiques de la matrice, des fibres de sisal et de RC sont recherchées et présentées, la masse volumique des fibres est mesurée et la fraction volumique du renfort dans les échantillons du composite est évaluée en utilisant divers protocoles. Par la suite, les résultats de l'expérimentation mécanique effectuée sur les constituants individuellement et sur le composite sont présentés dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux du point de vue thermique et hygrométrique. L'influence de l'architecture des fibres de RC est, dans toutes les phases d'expérimentation, examinée. Enfin, une étude analytique du comportement du composite plâtre fibres par une approche multiéchelle est menée dans le cinquième chapitre. Une étude comparative est effectuée pour situer la contribution du RC par référence au sisal.

Chapitre 1

Revue de la littérature

Sommaire

1.1	Introduction	29
1.2	Le plâtre dans le contexte du développement durable	30
1.2.1	Prise de conscience internationale pour la protection de l'environnement	30
1.2.2	Impact du plâtre sur l'environnement	31
1.2.3	Conclusion	33
1.3	Le composite à matrice plâtre: état de l'art	34
1.3.1	Généralités sur les matériaux composites	34
1.3.2	Composite à matrice plâtre	46
1.4	Conclusion	62

1.1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter un bref bilan des connaissances sur le renforcement du plâtre et à en dégager les avancées restant à faire pour l'amélioration des performances de ce matériau. Un regard sur l'impact du plâtre sur l'environnement est fait en première approche suivi d'un rappel de quelques informations utiles à connaître sur les exigences liées à la conception des matériaux composites et leur caractérisation. Une présentation de la matrice plâtre (de l'historique de son utilisation jusqu'à ses caractéristiques mécaniques, hygroscopiques et thermiques) et les types de renforts utilisés pour son renforcement est faite par la suite. Enfin, les principaux résultats des travaux déjà menés sur le plâtre renforcé sont rappelés et l'objectif poursuivi par cette étude est défini dans le cadre des progrès à réaliser au delà de cet état de l'art.

1.2 Le plâtre dans le contexte du développement durable

1.2.1 Prise de conscience internationale pour la protection de l'environnement

On peut identifier une volonté d'action en vue de la protection de l'environnement dès 1951 avec la publication du premier rapport de l'Union Internationale de la Conservation de la Nature (UICN) sur l'état de l'environnement dans le monde suivi par la dénonciation, en 1970 du « Club de Rome », de la croissance économique et démographique exponentielle du point de vue de l'épuisement des ressources, de la pollution et de la surexploitation des systèmes naturels. En 1972, la conférence de Stockholm amène les Nations Unies (ONU) à créer un programme pour l'environnement intitulé « Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) » [13]. Il a conduit à la création de nombreux organismes nationaux de protection de l'environnement. Cette action engagée va engendrer plusieurs mots d'ordre et initiatives d'action. C'est ainsi qu'en 1980, l'Union Internationale de la Conservation de la Nature (UICN) publie un rapport dans lequel l'expression « sustainable development » ou bien « développement durable » en français voit le jour. Elle devient tout un concept qui sera explicité au cours de la conférence tenue à Brundtland en Allemagne en 1987 pour conjuguer développement et environnement. Le concept est alors défini comme étant « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la possibilité, pour les générations à venir, de pouvoir répondre à leurs propres besoins » [14].

Cinq années plus tard, le « sommet de la Planète Terre » se tient à Rio (Brésil) au cours duquel la « charte de la terre » est écrite, « l'homme au cœur du développement durable », en vingt sept principes ; le « Programme d'Action 21 » est lancé, une « Convention Climat » pour mettre le climat hors de danger est créée ; trente Etats signent la « Convention Biodiversité » pour assurer la conservation des espèces et le rôle vital de la forêt est reconnu par une « Déclaration Forêt ». La prise de conscience est visible : des protocoles, programmes, chartes et sommets voient le jour. D'abord le « Protocole de KYOTO » en 1997 pour la lutte contre les changements climatiques, consacre l'engagement de trente huit pays industrialisés à réduire leur émission des gaz à effet de serre de 5% environ par rapport au niveau de 1990 ; ensuite le Programme National français de Lutte contre les Changements Climatiques (PNLCC) en 2000 est lancé ; puis s'est tenu le sommet de Johannesburg en 2002 pour faire le bilan des actions menées ; la même année, un cadre réglementaire est créé au niveau européen fixant les exigences en ce qui concerne le secteur du bâtiment pour atteindre les engagements pris dans le cadre du même protocole

baptisé « Directive Européenne sur la Performance Energétique des Bâtiments (DPEB) » puis enfin en 2004, la « Charte de l'Environnement » est votée par le Parlement français reconnaissant le « droit pour chacun de vivre dans un environnement équilibré et favorable à la santé ». (Sources:[13])

Même si tous ces engagements ne sont pas entièrement concrétisés, une prise de conscience est avérée en faveur de la protection de l'environnement. Des actions palpables sont menées localement à l'intérieur des Etats.

La performance énergétique des bâtiments passe, entre autres, par l'utilisation de matériaux de construction à porosité élevée comme le plâtre qui fait l'objet d'étude dans cette thèse.

1.2.2 Impact du plâtre sur l'environnement

L'extraction du gypse naturel, matière première du plâtre, se fait dans une carrière, sa fabrication dégage des poussières et des gaz. Les déchets de production du plâtre sont entreposés, traités et écoulés dans la nature. Dès lors, nous pouvons nous interroger sur l'influence du plâtre sur l'environnement. La réponse à ce questionnement exige de suivre le matériau tout le long de son cycle de vie. Des auteurs, notamment les professionnels du plâtre donnent des informations relatives à ces aspects [4, 5, 15]. Nous en faisons un aperçu ci-dessous.

1.2.2.1 La fabrication du plâtre

Le gypse est extrait du sous-sol dans des carrières, les espaces occupés sont des espaces recouverts de boisement et des terres agricoles. Elles sont ensuite revégétalisées après exploitation. La principale ressource non renouvelable est le gaz naturel utilisé dans la production pour la calcination et le séchage. Son utilisation a l'avantage de réduire les émissions de gaz à effet de serre et les poussières. D'autres dispositions sont prises afin de réduire les rejets : les fours sont équipés de filtres pour limiter les émissions à des valeurs faibles. Le gypse lui-même n'est pas considéré comme une ressource non renouvelable, selon le bureau américain des mines, du fait de ses gisements presque inépuisables. Les réserves mondiales sont estimées à 2,6 milliards de tonnes [5]. Le gypse utilisé dans la fabrication du plâtre n'est pas exclusivement du gypse naturel. Le gypse synthétique et les produits de recyclage sont aussi une matière première qui réduit considérablement l'exploitation du gypse naturel. L'émission du gaz carbonique dans la fabrication du plâtre est le plus faible comparé à d'autres industries comme celles de chimie, d'acier, de verre, etc.

1.2.2.2 L'utilisation du plâtre

Le plâtre a des utilisations assez diversifiées. Employé dans la réalisation des cloisons de distribution ou de séparation entre les logements, comme plafonds ou doublage des murs, il participe à l'amortissement des bruits d'impact et aériens. Les salles de cinéma, les aéroports, les studios d'enregistrement et les hôpitaux sont des lieux qui bénéficient favorablement de cette caractéristique.

Le plâtre est très utilisé dans la décoration intérieure grâce à sa capacité de se mouler sur toutes les formes et à se prêter à tout type de finition.

Il laisse passer la vapeur d'eau, régule le degré d'hygrométrie dans le cas de fortes fluctuations : il absorbe l'humidité de l'air quand il fait chaud et la restitue quand il fait froid. Associé à des isolants (polystyrène expansé, laine minérale, film chauffant en plafond), il participe au confort thermique des enceintes.

Dans la sécurité des personnes, le semihydrate est classé A1 par décision de la Commission Européenne du 4 octobre 1996 établissant la liste des produits à aucune contribution à l'incendie [4].

1.2.2.3 La mise en décharge, le recyclage et le traitement des déchets

En fin de vie, le produit de plâtre est mis en décharge de classe III. On note une absence de pollution de la nappe phréatique causée par le dépôt des déchets de plâtre.

Les déchets de fabrication et de chantiers sont généralement recyclés et réintroduits dans la fabrication du plâtre, certains sont utilisés pour remblayer les carrières, d'autres sont mis en décharge. Un nécessaire tri est à faire cependant pour les déchets de démolition, les produits plâtres associés à d'autres matériaux comme le carton pour les plaques de plâtre, le polyester, etc.

Selon les résultats de la quantification FNB/ADEME, la quantité de plâtre présente dans les déchets de construction est en moyenne de 2,8% du tonnage des produits plâtre mis en œuvre annuellement à cet effet. C'est dire qu'avec le recyclage, la quasi-totalité des déchets de plâtre est recyclé. En d'autres termes, c'est un produit sans déchets.

1.2.2.4 Bilan d'impacts environnementaux d'un exemple de produit de plâtre

Le tableau 1.1 [16] présente des indicateurs d'impacts environnementaux d'un exemple de produit de plâtre de la société française Lafarge, le carreau de plâtre « CAROPLATRE STANDARD 5 », au terme d'une analyse de cycle de vie de l'Unité Fonctionnelle (UF) : réaliser une fonction de cloison de distribution sur $1m^2$ de mur, pendant une annuité, en assurant les performances prescrites du produit. La durée de vie typique (DVT) est de 50 ans.

		Unités	Valeur totale cycle de vie/UF par annuité	Valeur totale cycle de vie/UF pour toute la DVT
1	Consommation de ressources énergétiques			
	Energie primaire totale	(MJ)	3,540E+000	1,770E+002
	Energie renouvelable	(MJ)	1,486E-001	7,430E+000
	Energie primaire totale	(MJ)	3,540E+000	1,770E+002
	Energie renouvelable	(MJ)	1,486E-001	7,430E+000
	Energie non renouvelable	(MJ)	3,400E+000	1,700E+002
	Energie primaire procédé	(MJ)	3,160E-000	1,580E+002
2	Epuisement des ressources (ADP)	(kg eq. Antimoine)	1,238E-003	6,190E-002
3	Consommation d'eau totale	(L)	8,180E+001	4,090E+001
4	Déchets solides			
	Déchets valorisés (total)	(kg)	1,892E-002	9,460E+001
	Déchets éliminés			
	- Déchets dangereux	(kg)	6,620E-004	3,310E-002
	- Déchets non dangereux	(kg)	9,960E-001	9,980E+001
	- Déchets inertes	(kg)	1,725E-003	8,630E-002
	- Déchets radioactifs	(kg)	1,336E-005	6,680E-004
5	Changement climatique	(kg eq. CO2)	1,784E-001	8,920E+000
6	Acidification atmosphérique	(kg eq. SO2)	4,452E+004	2,226E-002
7	Pollution de l'air	(m ³ d'air)	1,915E+001	9,573E+002
8	Pollution de l'eau	(m ³ d'eau)	3,700E-001	1,850E+001
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	(kg eq. CFC)	0,000E+000	0,000E+000
10	Formation d'ozone photochimique	(kg eq. Ethylène)	9,060E-005	4,530E-003
	Indicateur optionnel			
	Eutrophisation	(kg eq. PO43-)	6,404-E002	3,202E+000

TAB. 1.1 – *Indicateurs d'impacts environnementaux du « CARO-PLATRE STANDARD 5 » de Lafarge*

Le résultat de cette analyse révèle que le plâtre, au cours de son cycle de vie, ne produit pas de radioactivité sensible, ne contribue pas à la destruction de la couche d'ozone, sa pollution est insignifiante et n'a presque pas de déchets dangereux.

1.2.3 Conclusion

En se basant sur une définition de l'éco-matériau rapportée par C. MAGNIONT [17] comme étant un matériau qui doit «limiter les impacts environnementaux durant son cycle de vie, procurer des conditions de confort aux occupants du bâtiment pendant son exploitation, ne pas présenter de danger pour la santé tant pendant la phase de mise en œuvre que d'utilisation du bâtiment», le plâtre serait le matériau de construction qui se rapprocherait le mieux de ce profil. Toutefois, le plâtre présente une importante faiblesse qui est la fragilité. C'est pourquoi, les recherches pour le renforcer afin de le rendre ductile sont pertinentes et justifiées.

1.3 Le composite à matrice plâtre : état de l'art

1.3.1 Généralités sur les matériaux composites

1.3.1.1 Aspect sémantique

L'expression « matériau composite » ici, il faut le préciser, désigne une matière solide résultant de la mise en commun de deux constituants au moins dont les performances mises ensemble rénovent celles du matériau obtenu. Les constituants sont un renfort fibreux ou des particules et une matrice physiquement identifiables. Le premier assure le renforcement mécanique et le deuxième, la matrice, se charge d'assurer le maintien et la cohésion des fibres ; c'est elle qui assure la transmission des efforts [18]. La définition suivante de NASLAIN [9] permet d'explicitier la contribution du matériau composite dans l'usage des matériaux : « *c'est un solide dans lequel plusieurs constituants sont associés en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions, un ensemble original de propriétés que les constituants pris isolément ne permettent pas d'obtenir* ».

1.3.1.2 Exigences pour la conception d'un matériau composite

Les performances d'un matériau composite résultent en général des propriétés des matériaux constituants, de leur distribution géométrique, de leurs interactions, etc. Un composite peut donc se caractériser par la nature et les propriétés de ses constituants [19], par la géométrie et la distribution du renfort ainsi que par la nature de l'interface matrice-renfort. Le renfort est caractérisé par sa forme, sa taille, sa concentration, sa disposition ou orientation, etc. Cette concentration se mesure en général par la fraction volumique ou par la fraction massique. La conception d'un matériau composite exige donc de prendre en considération ces caractéristiques en fonction du cahier des charges et, d'appréhender la nature du contact entre la matrice et la fibre.

1.3.1.2.1 Géométrie du renfort

1.3.1.2.1.1 Forme et taille du renfort Les renforts se présentent sous plusieurs formes :

- Forme linéique :

De diamètre égal à quelques micromètres, elles ne peuvent conséquemment pas être utilisées sous forme unitaire. On les réunit dans la pratique en fils continus ou discontinus, en mèches.

- Forme surfacique :

Les fils et les mèches peuvent être rassemblés pour former des mats, des tissus ou rubans. Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle. Les tissus (ou rubans) sont un ensemble surfacique de fils ou de mèches réalisés sur un métier à tisser. Il comprend une chaîne constituée d'un ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du tissu, et d'une trame constituée de l'ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne (figure 1.1 [19]). Le mode d'entrecroisement des fils de chaîne et des fils de trame (appelé armure (figure 1.2) [19]) peut être une toile ou taffetas, un satin ou bien un sergé. Il existe une armure unidirectionnelle chaîne ou trame : les fibres parallèles constituant soit la chaîne, soit la trame sont réunis par un fil fin n'intervenant pratiquement pas dans les performances mécaniques du tissu. Les performances mécaniques des tissus dépendent du type de fils constituant le tissu, de l'armure et de la contexture.

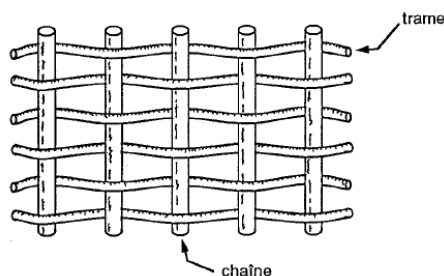


FIG. 1.1 – Structure d'un tissu

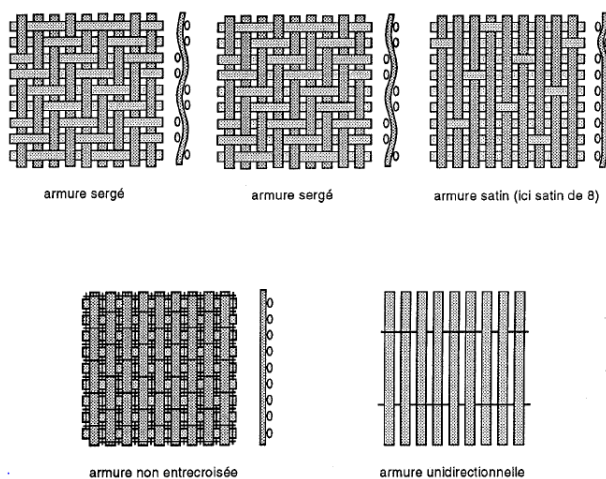


FIG. 1.2 – Types d'armure de tissage d'un tissu

– Formes tissées multidimensionnelles :

Des tissages volumiques sont également utilisés. Elles peuvent être de plusieurs directions : 3D, 4D, etc. (figures 1.3 [19])

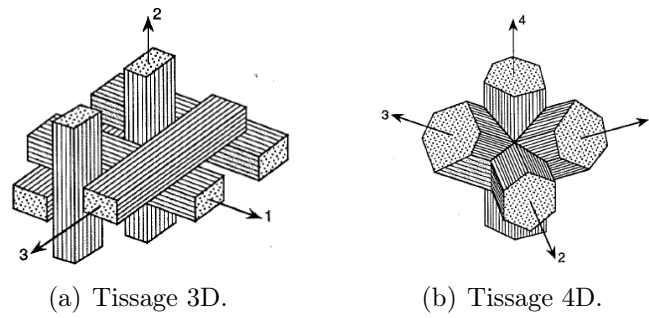


FIG. 1.3 – Types de tissages volumiques

1.3.1.2.1.2 Fraction volumique ou massique La fraction volumique ou massique représente la proportion relative de matrice et de renfort dans le composite. C'est un des facteurs importants qui déterminent les caractéristiques mécaniques d'un matériau composite. Elle est utilisée dans des modèles théoriques de description du comportement d'un matériau composite. La relation entre ces valeurs est établie par les expressions suivantes : pour un nombre n de constituants donné, la fraction massique du constituant i est [19] égale à

$$P_i = \frac{\rho_i V_i}{\rho_c} \quad (1.1)$$

avec P_i la fraction massique de l'élément i , ρ_i la masse volumique de l'élément i , ρ_c la masse volumique du composite et V_i la fraction volumique de l'élément i .

En général, la fraction volumique du renfort varie entre 0,3 et 0,7 [19].

Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le composite est aussi une donnée importante pour l'homogénéité du matériau.

1.3.1.2.1.3 Disposition des renforts Les fibres longues peuvent être disposées suivant une seule direction de manière libre dans le matériau ou dans un plan ; dans ce cas, elles sont généralement tissées suivant une armure toile avec une trame légère, on obtient un composite unidirectionnel. Elles peuvent être disposées suivant plusieurs directions dans un plan, elles sont alors sous forme de tissu d'armure satin, sergé ou de tissu tridimensionnel. Les plans de fibres peuvent être superposés en plusieurs couches, le composite est alors dit stratifié. Lorsqu'elles sont courtes, elles sont en général orientées de manière aléatoire. Des travaux [20] rapportent que cette dernière disposition induit une perte d'efficacité en terme d'effet du renforcement du composite.

1.3.1.2.2 Adhésion de la matrice sur la fibre

1.3.1.2.2.1 Importance de l'interface Pendant la mise en œuvre du composite, la matrice enrobe le renfort ; la liaison établie entre les deux constituants est constituée d'une zone de fine épaisseur (20 à 100 nanomètres) concentrique à la fibre. Elle est chimiquement formée d'un ou de plusieurs constituants du composite pendant la mise en œuvre. Cette zone est l'interphase. Les surfaces qui séparent l'interphase de la fibre ou de la matrice sont des interfaces. C'est cet ensemble qui est couramment appelé interface fibre/matrice. Les performances des composites dépendent en partie de la qualité de cette interface [21]. La nature de la liaison entre la fibre et la matrice est le siège d'une interaction entre les deux éléments ; elle peut être mécanique ou chimique. Ses caractéristiques peuvent être améliorées à partir d'une compatibilité naturelle des constituants ou bien à partir d'une préparation préalable bien précise des fibres. Les méthodes de préparation au renforcement sont exposées par R. NTENGA [12]. La mise en œuvre d'un composite exige de répondre à la question de l'intégrité de la liaison fibre/matrice sur les plans physico-chimique et mécanique. La réponse à cette question exige de procéder à la mesure de la force de liaison par des tests micro-mécaniques appropriés et à l'identification de l'origine physico-chimique de cette liaison. Seule la mesure de la force de liaison est abordée par cette étude.

1.3.1.2.2.2 Techniques de mesure de la contrainte de décohésion La mesure de la force de liaison fibre matrice se fait par des essais micro-mécaniques. On distingue les tests destructifs et les tests non destructifs (figure 1.4 [22, 21]). Parmi les tests destructifs, il y a les essais de déchaussement [22, 23, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31] : essais pull out (micro goutte, micro tension), essais d'indentation (push in, push through) ; des essais de mesure de la fissuration matricielle sur le composite et des essais de fragmentation. Il y a aussi des tests non destructifs comme la radiographie, l'émission acoustique, les méthodes thermiques NDE, la méthode optique, la technique d'amortissement vibratoire, l'écoulement corona, la spectroscopie chimique, etc [27].

1.3.1.2.2.3 Les modèles utilisés La détermination de la tenue mécanique à l'interface fibre/matrice est évaluée selon des auteurs par la théorie du shear-lag, la méthode de la Contrainte moyenne à la Rupture de l'Interface par Cisaillement (CRIC), le modèle de Greszczuk pour les critères de contraintes, les modèles de Piggot et de Penn & Lee pour des critères énergétiques et le modèle micro mécanique de Scheer & Nairn [26] ; l'évaluation de la contrainte apparente de cisaillement interfacial en fonction du rayon r de la fibre et de la longueur l enchâssée de la fibre est très communément employée lors

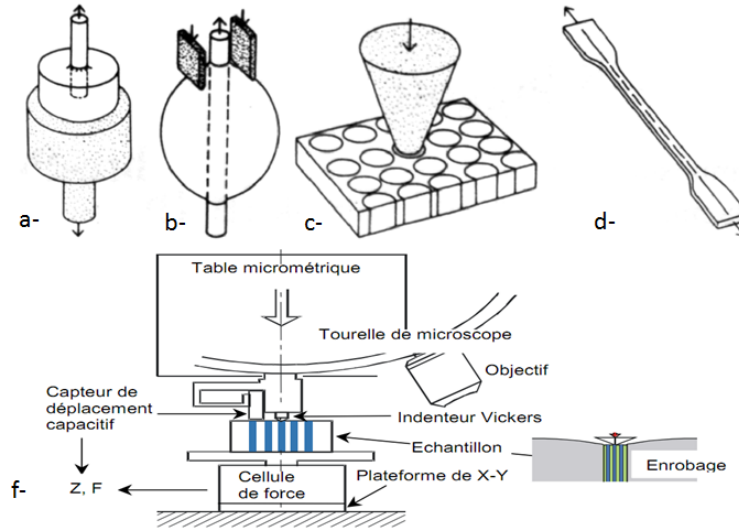


FIG. 1.4 – Essais micro mécaniques de mesure de la résistance à l'interface fibre matrice: a- essai pull out, b- micro tension, c- micro compression, d- de fragmentation, f- test d'indentation

des essais de déchaussement [23, 27, 30] soit :

$$\tau_{app} = \frac{F_{Max}}{2\pi rl} \quad (1.2)$$

avec F_{Max} , la force maximale atteinte pendant l'essai.

Lors de l'essai d'indentation, la contrainte de cisaillement est évaluée en fonction du déplacement U de l'extrémité de la fibre, du rayon r de la fibre, du module d'élasticité E_f de la fibre et de la force F appliquée [21]. On a :

$$\tau = \frac{F^2}{4\pi^2 r^2 E_f U} \quad (1.3)$$

Cette caractéristique est aussi évaluée avec l'essai de fragmentation en utilisant la contrainte critique σ_{crit} , la densité des fissures à la saturation δ_{sat} , l'épaisseur de l'éprouvette e_c et le module d'élasticité E_c du composite [31] comme il suit :

$$\tau = 1,337 e_c E_c \sigma_{crit} \delta_{sat} \quad (1.4)$$

Elle peut également s'exprimer en fonction de la longueur critique des fragments de fibre l_c , de la contrainte de la fibre σ_f et de son rayon r [27] :

$$\tau = \frac{3\sigma_f r}{4l_c} \quad (1.5)$$

Une approche en contrainte développée par KELLY-TYSON est utilisée par C. BONNAFOUS et autres [32]. Elle formule la contrainte apparente de cisaillement interfacial, IFSS (Interfacial Shear Strength), en fonction du diamètre ϕ de la fibre, la longueur critique l_c des fragments, la contrainte à rupture $\sigma_f(l_c)$ d'une fibre de longueur l_c de la manière suivante :

$$IFSS = \frac{\phi \sigma_f(l_c)}{2l_c} \quad (1.6)$$

1.3.1.2.2.4 Interaction entre constituants Tous les auteurs s'accordent sur le fait que la performance, surtout mécanique, du composite dépend grandement de l'accrochage entre la fibre et la matrice, le nombre de travaux basés sur l'interface fibres/matrice en témoigne. Cette liaison est le siège d'une interaction physico-chimique. Des travaux récents apportent des précisions sur le point. D. SEDAN et son équipe [33] trouvent en 2007 que le milieu alcalin du ciment dégrade les hémicelluloses des fibres de chanvre permettant d'augmenter la rugosité de leur surface, de plus, la fixation des ions calcium sur la surface de ces fibres conduit à une forte adhésion entre les constituants. C'est à la recherche de cette affinité particulière entre les deux constituants que certains chercheurs [12, 34] optent pour un traitement des fibres naturelles dans la préparation pour la mise en forme du composite. En étudiant la possibilité de renforcer le plâtre par du bois fragmenté, P. BOUSTINGORRY [20] montre qu'une surface de fibre présentant une rugosité est favorable à l'adhésion interfaciale et qu'un traitement de surface des fibres contribuerait à modifier la surface du renfort à cet effet.

1.3.1.3 Typologie des matériaux composites

1.3.1.3.1 Selon la nature des constituants Trois grandes classes de matériaux composites existent selon la nature de la matrice : les composites à matrice organique (CMO) de grande utilisation industrielle ; les composites à matrice minérale (céramique) (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire, le militaire, et le freinage (freins carbone), enfin les composites à matrice métallique (CMM) dont les applications sont les mêmes que les CMC.

1.3.1.3.2 Selon la forme des constituants En fonction de la forme des constituants, les matériaux composites se regroupent en deux grandes classes : les matériaux composites à particules ou à fibres.

1.3.1.3.2.1 Les matériaux composites à particules Cette catégorie renferme les composites dont le renfort est sous forme de particules. La rigidité, la tenue à la tempé-

rature, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait et autres sont les caractéristiques souvent recherchées lorsque les particules sont utilisées comme renfort réduisant ainsi le coût du matériau. Le choix du couple matrice/particules est fonction des propriétés recherchées : par exemple du plomb dans des alliages de cuivre améliore l'usinabilité, des particules de tungstène, de molybdène et de chrome introduites dans une matrice métallique ductile augmentent ses propriétés mécaniques à température élevée, l'élastomère en particules dans une matrice polymère fragile améliore ses propriétés à la rupture et au choc, etc.

1.3.1.3.2 Les matériaux composites à fibres Il s'agit des composites dont le renfort est sous forme de fibres. Elles peuvent être longues ou bien courtes. L'arrangement des fibres et leurs orientations permettent d'avoir des matériaux à la carte avec des propriétés mécaniques spécifiques. La nature des constituants, leurs proportions et orientations constituent des leviers pour varier à volonté les caractéristiques mécaniques et physiques en fonction des performances recherchées.

Cette flexibilité d'emploi donne une importance certaine aux matériaux composites à fibres. De nombreuses études y sont conséquemment consacrées [20, 35, 36, 37, 38, 39, 12, 40, 22, 41].

1.3.1.4 Caractérisation de matériaux composites

Les spécialistes de la langue française définissent la caractérisation comme l'«*action de marquer le caractère distinctif de quelqu'un, de quelque chose, en indiquer le caractère, mettre en relief leur trait dominant; définir*» [18]. Ils la définissent aussi comme une action permettant «*d'analyser les propriétés de cette chose*» [42] ou plus précisément un «*processus analytique aboutissant à une définition puis à une classification des éléments d'un ensemble*» [43]. Nous pouvons donc comprendre que la caractérisation d'un matériau est son examen en utilisant les méthodes et moyens requis pour cerner ses particularités, ses possibilités pour un usage donné. Nous exposons dans ce paragraphe, les principales méthodes utilisées pour connaître ou prévoir le comportement qu'un matériau composite pourrait avoir en service lorsqu'il est soumis à des sollicitations mécaniques et thermiques.

1.3.1.4.1 Caractérisation mécanique Le dimensionnement d'une structure exige la connaissance du matériau et ses caractéristiques mécaniques, elles sont déterminées à l'aide d'essais mécaniques. Les plus utilisés sont notamment, les essais de traction, de flexion et de compression.

1.3.1.4.1.1 Essai de traction Il consiste à tirer sur une éprouvette de forme normalisée jusqu'à la rupture donnant lieu, après traitement, à une courbe contrainte/déformation. Cette courbe décrit la loi de comportement du matériau testé. On peut alors tout de suite connaître le type de rupture du matériau. Les trois formes de courbe de la figure 1.5 [9] ci-dessous montrent les types de rupture.

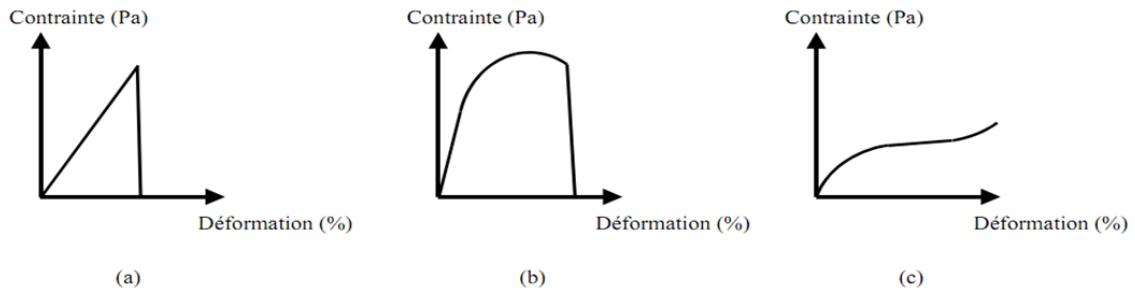


FIG. 1.5 – Courbes représentatives des principaux types de comportement d'un matériau sollicité en traction uniaxiale : a- comportement fragile (fonte, verre), b- comportement ductile (acier doux), c- comportement élastique non linéaire (élastomère).

Dans le premier cas, la rupture survient dans la zone élastique linéaire du matériau. Des matériaux comme la fonte, l'acier fortement allié, le verre, la céramique présentent ce type de comportement. Cette zone est décrite par la loi de HOOKE (éq. 1.7) en fonction de la contrainte σ , du module d'élasticité E et de la déformation ϵ :

$$\sigma = E\epsilon \quad (1.7)$$

Dans le second cas, le matériau présente d'abord un comportement élastique linéaire, la rupture survient après une zone de transition marquée par une déformation plastique irréversible du matériau délimitée par la limite élastique. C'est le cas par exemple des aciers faiblement alliés, des aciers inoxydables.

Dans le dernier cas, la déformation élastique n'est pas proportionnelle à la contrainte, c'est un comportement élastique non linéaire. Ce comportement caractérise par exemple l'élastomère et certains polymères.

La courbe de traction (contrainte/déformation) permet aussi de déterminer quatre grandeurs caractéristiques [44] :

- le module d'élasticité E qui correspond à la pente de la zone élastique de la courbe,
- la limite élastique R_e qui correspond à la contrainte à partir de laquelle se produit la déformation plastique,
- la résistance à la rupture ou résistance à la traction R_m qui correspond à la contrainte nominale maximale supportée par l'éprouvette,

- la déformation à la rupture ϵ_r qui correspond à la déformation nominale à la rupture en traction de l'éprouvette. C'est une grandeur caractéristique de la ductilité, elle se calcule en fonction de la longueur initiale l_0 de l'éprouvette et la longueur à la rupture l par la relation suivante :

$$\epsilon_r = 100 \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1.8)$$

1.3.1.4.1.2 Essai de flexion Très utilisé dans le cas des matériaux fragiles, le principe de cet essai est résumé par la figure 1.6 [9].

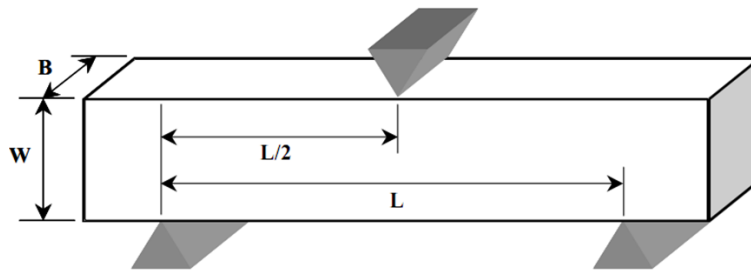


FIG. 1.6 – Schéma de principe de l'essai de flexion 3 points

La courbe force/déplacement qui résulte de cet essai permet de calculer la contrainte maximale à la rupture σ_{max} sur la face en tension en fonction de la charge P , soit :

$$\sigma_{max} = \frac{3PL}{2BW^2} \quad (1.9)$$

La relation 1.9 permet de calculer la déformation à la rupture puis, la flèche maximale V_c au centre de la poutre s'exprime par la relation suivante :

$$V_c = \frac{PL^3}{4EBW^3} \quad (1.10)$$

où E est le module d'Young du matériau.

1.3.1.4.1.3 Essai de compression Il consiste à soumettre une éprouvette à deux forces axiales opposées. Cet essai est très utilisé dans le cas des matériaux fragiles à la place de l'essai de traction pour déterminer la contrainte à rupture et le module d'élasticité du matériau. Des précautions sont cependant à prendre pour sa mise en œuvre pour éviter les perturbations du comportement du matériau par les phénomènes de flambage et de frottement sur les faces extrêmes de l'éprouvette. Le premier est obtenu par instabilité de l'éprouvette sous l'effet des efforts exercés ; le rapport $\frac{h}{d}$ doit être inférieur à 3. Le second

survient lorsque la déformation du matériau n'est pas homogène suite aux frottements sur les surfaces de contact éprouvette/plateaux de compression qui s'opposent localement aux déformations. Ce frottement doit être le plus faible possible à défaut d'être inexistant. La figure 1.7 [9, 8] suivante permet de visualiser le principe de cet essai ainsi que les phénomènes indésirables à éviter.

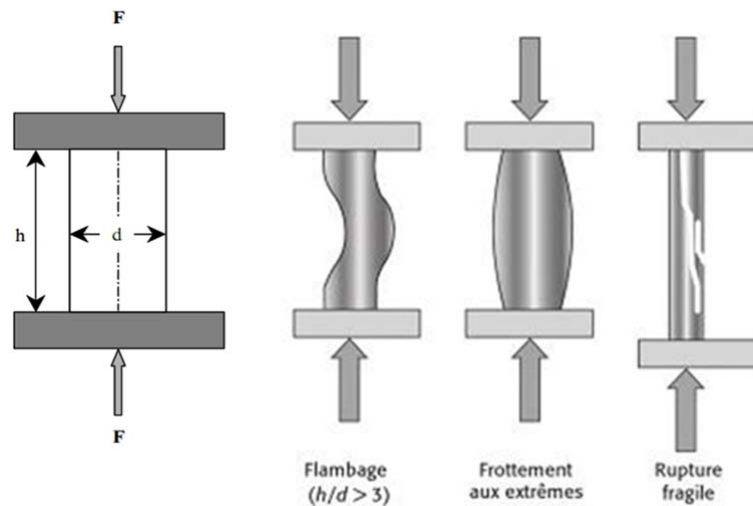


FIG. 1.7 – Schéma de principe de l'essai de compression et les phénomènes observables

Les courbes obtenues sont similaires à celles de la traction (Figure 1.8 [8]) et le mode de rupture est généralement fragile.

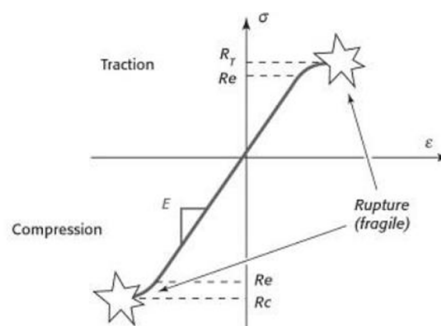


FIG. 1.8 – Exemple de courbe de compression tracée à l'inverse par comparaison à celle de traction

1.3.1.4.2 Caractérisation thermique La connaissance des caractéristiques thermiques d'un matériau de construction est indispensable pour permettre à l'ingénieur de juger de son application. Pour cela, dans les laboratoires, ingénieurs et chercheurs ont recours à diverses méthodes pour évaluer les propriétés thermiques d'un matériau en fonction de leurs besoins. Les plus classiques utilisent des capteurs de température de

contact [45] comme la méthode Flash, celle du fil chaud, de la plaque chaude gardée, des sondes thermiques. Les plus évoluées, sans contact, se servent de la radiométrie infrarouge. Une revue des principales méthodes employées par de nombreux auteurs [45, 46, 47] est ici brièvement présentée.

1.3.1.4.2.1 Méthode Flash Un échantillon à faces parallèles (figure 1.9 [46]), initialement isotherme, est soumis sur l'une de ses faces à une impulsion thermique de courte durée et uniforme. Un thermocouple en contact avec la face opposée au flash permet d'enregistrer l'élévation de sa température à partir de l'émission du flash sur la face avant. Une modélisation du transfert de chaleur permet d'estimer la diffusivité thermique du matériau.

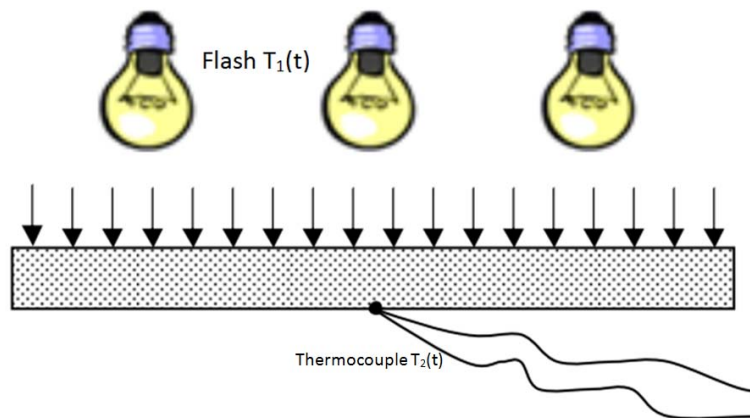


FIG. 1.9 – Schéma de principe de la méthode Flash

L'estimation de la diffusivité thermique a s'effectue : par la méthode de Parker, celle des temps partiels ou des moments temporels ou bien à partir d'un modèle complet. Ces modèles sont présentés en détail par Yves JANNOT [46]. Ils sont revisités par KOSSI [45], mettant en œuvre une méthode inverse.

Cette méthode est limitée à des matériaux peu légers et non poreux du fait qu'elle repose sur des exigences : le flux lumineux est absorbé par la face avant sans pénétrer dans la pièce et, la mesure effectuée sur la face arrière est une grandeur proportionnelle à l'élévation de la température.

Une variante est utilisée à l'Institut Pascal¹, avec comme moyen de mesure du champ de diffusivité thermique, une caméra thermique et un rayonnement lumineux de l'échantillon par une lampe. La température à la face arrière est suivie jusqu'à stabilisation. La résolution de l'équation de la chaleur permet d'estimer la diffusivité thermique en traçant un thermogramme qui s'ajuste à la courbe des valeurs expérimentales.

1. Unité Mixte de Recherche UMR 6602 CNRS/UBP/IFMA de CLERMONT FERRAND, France.

1.3.1.4.2.2 Méthodes à sondes Les méthodes du fil chaud, de la plaque chaude, du «hot disc» et du ruban chaud sont identifiées comme des méthodes à sondes. Elles ont pour objectif d'évaluer une caractéristique thermique : la conductivité thermique pour le fil chaud (Norme ISO 8894), l'effusivité thermique pour le plan chaud, etc, à partir de l'élévation en température de la sonde chaude. Elles consistent donc, à placer une sonde chauffante entre les surfaces de deux échantillons du matériau à caractériser, d'épaisseurs supposées infinies et initialement isothermes, à l'exemple de la méthode du fil chaud que montre la figure 1.10 [48]; ensuite on applique un flux de chaleur constant à la sonde chauffante et on relève l'évolution de la température de cette sonde. On considère que le transfert de chaleur autour de la sonde et au centre de l'échantillon est radial. Par une modélisation de l'évolution de la température à ce lieu, on estime la caractéristique thermique du matériau. Les méthodes à sonde sont très adaptées à des matériaux très diffusifs.

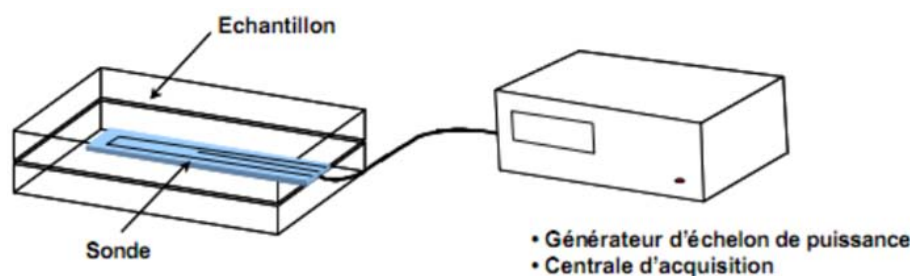


FIG. 1.10 – Schéma de principe de la méthode du fil chaud

Le CT-mètre (figure 1.11 [48]) est un appareillage développé par le CSTB Grenoble (Hébert Sallée) qui utilise ce principe de mesure conformément à la norme NF EN 99315 et donne directement la valeur de la conductivité thermique avec une précision de 5% au maximum.

1.3.1.4.2.3 Méthode de la plaque chaude gardée Elle est conforme aux normes ISO 8302 et NF EN19462 [46, 47]. La plaque chaude produisant par effet Joule une puissance de chauffe φ_0 uniforme et constante est placée entre deux échantillons identiques du matériau à tester (figure 1.12 [46]). Les faces extérieures des échantillons sont chacune en contact avec une plaque de refroidissement en matériau assez conducteur et maintenue à température inférieure à celle de la plaque chaude. Une température de garde φ_1 est entretenue autour de la plaque chaude pour garantir un transfert unidirectionnel vers les matériaux à mesurer. Les thermocouples placés sur les deux faces des échantillons détectent les variations de température ΔT_{\downarrow} et ΔT_{\uparrow} et la conductivité thermique peut être estimée par l'équation 1.11 pour un volume donné $e \times S$ de la plaque chauffante.



FIG. 1.11 – Image du CT-mètre

$$\lambda = \frac{e\varphi_0}{S(\Delta T_{\downarrow} + \Delta T_{\uparrow})} \quad (1.11)$$

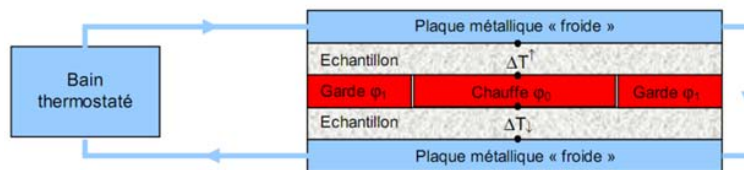


FIG. 1.12 – Schéma de principe de la méthode de la plaque chaude gardée

Cette méthode qui donne une précision de la mesure assez bonne ne s'applique qu'aux isolants dont on peut négliger les résistances de contact par rapport à la résistance du matériau.

1.3.2 Composite à matrice plâtre

1.3.2.1 La matrice plâtre

1.3.2.1.1 Evolution de l'utilisation du plâtre Le plâtre est un matériau découvert depuis l'antiquité, 9000 ans environ avant J.C. Il est utilisé comme support pour fresques murales (extérieur et intérieur) [4, 5, 7]. Par la suite, on s'en sert comme joints des blocs de pyramides en Egypte, dans toutes les constructions romaines, dans l'ornement des palais et mosquées moyenâgeux. A l'époque de LOUIS XIV, le plâtre est rendu obligatoire comme enduit intérieur et extérieur pour limiter les risques d'une propagation catastrophique d'incendie comme celui survenu à Londres en 1666. Des carrières d'extraction du gypse voient le jour. Vers la fin du dix huitième siècle, la plaque de plâtre est conçue. Depuis lors,

l'exploitation du plâtre s'est développée. De nos jours, ce matériau est très utilisé dans les constructions pour ses qualités décoratives, de coupe feu, de légèreté, d'isolant thermique et phonique et pour son faible coût [6]. De nombreux travaux de recherche ont été menés pour mieux comprendre ses propriétés, sa structure cristalline, son comportement vis-à-vis de l'environnement d'une part et, pour améliorer son comportement mécanique d'autre part.

1.3.2.1.2 Matière première La matière première désigne le matériau d'origine naturelle qui est l'objet d'une transformation artisanale ou industrielle. Des études récentes [4, 5, 6, 20, 49, 7] permettent d'avoir des connaissances assez larges sur le plâtre notamment sur sa matière première et son élaboration. En effet le plâtre est obtenu à partir du gypse. Il en existe deux types : le gypse naturel et le gypse de synthèse.

1.3.2.1.2.1 Le gypse naturel De la famille des roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau, il se trouve dans la nature en quantité importante et se présente sous forme de deux structures [4, 49, 7] :

- un hydraté de sulfate de calcium de formule chimique $(CaSO_4, 2H_2O)$, c'est le gypse,
- un anhydre de formule $CaSO_4$ qui est l'anhydrite.

Les images de la figure 1.13 [18] montrent ses multiples présentations physiques.

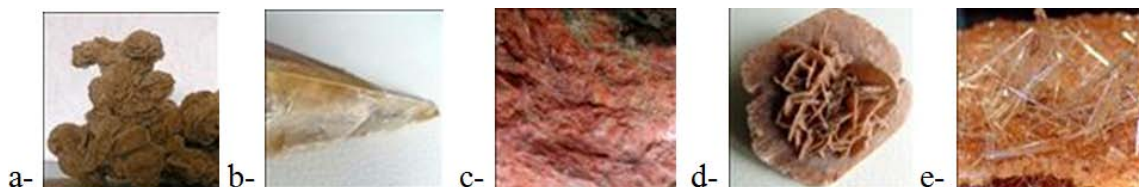


FIG. 1.13 – Images de gypses naturelles : (a, d) Gypse rose des sables, (b) gypse en fer de lance, (c, e) gypse.

En France, le gypse naturel est extrait principalement dans le Bassin parisien, le Vaucluse, les Alpes, le Jura, la Charente, les Pyrénées et les Landes. Il se caractérise par une masse volumique de $2,31.10^3 kg/m^3$, une dureté à l'échelle de Mohs de 1,5 à 2 suivant l'orientation de la face cristalline. La solubilité en grammes, par kilogramme d'eau de sulfate de calcium, est donnée dans le tableau 1.2 [4].

1.3.2.1.2.2 Le gypse de synthèse Il est le résultat d'une réaction chimique industrielle, principalement à partir de la fabrication des acides phosphorique, borique, fluorhydrique, citrique, tartrique et autres ; à partir de l'oxyde de titane et de la désulfuration des fumées dans les centrales thermiques.

N°	Température (°C)	Solubilité	Observation
1	3	1,81	
2	20	2,04	
3	38	2,10	Solubilité maximale
4	100	1,69	

TAB. 1.2 – Solubilité en grammes, du sulfate de calcium, par kg d'eau

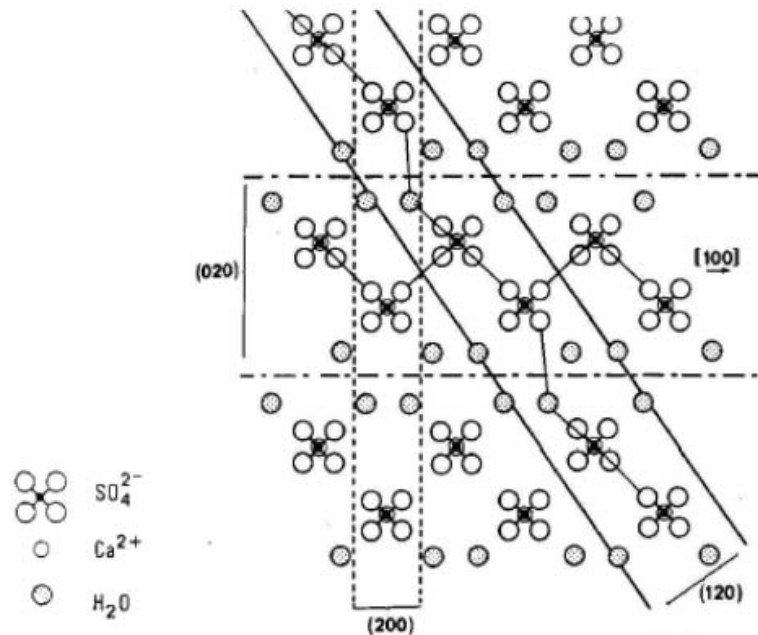


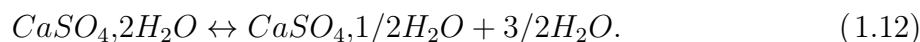
FIG. 1.14 – Projection de la structure cristalline du gypse selon la direction 001

1.3.2.1.3 Structure cristalline du gypse Les travaux de S. MEILLE en 2007 [49] permettent d'en avoir une idée bien précise. Le cristal de gypse est de symétrie monoclinique, il est composé d'un empilement de couches d'ions calcium Ca^{2+} et sulfate SO_4^{2-} de forme tétraédrique avec un atome de soufre au centre et des atomes d'oxygène aux sommets. Ils sont séparés par des doubles couches d'eau. Cet empilement est bien visible dans la direction 001 (figure 1.14 [49]).

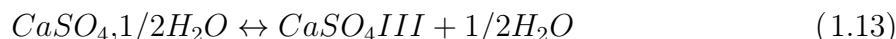
1.3.2.1.4 Fabrication du semihydrate Le terme plâtre est utilisé pour désigner un matériau solide que l'on appelle autrement plâtre pris, c'est aussi la poudre ou encore le semihydrate qui permet, après gâchage d'obtenir ledit matériau solide.

La fabrication de cette poudre consiste à éliminer partiellement de l'eau de constitution du gypse. Les phénomènes de cristallisation qui ont lieu sont décrits par plusieurs auteurs [4, 6, 20, 7, 50] et peuvent se résumer comme il suit : en procédant à la cuisson entre 100°C et 140°C, on obtient les semihydrates α et β selon que celle-ci est effectuée sous vapeur d'eau ou à l'air. Le semihydrate présente une structure cristalline monoclinique.

La transformation s'effectue suivant l'équation :



Si on poursuit la cuisson vers 200°C on a l'anhydrite III ou l'anhydrite soluble. Très instable, il se réhydrate assez rapidement en semihydrate au contact avec l'eau en phase vapeur. Sa structure cristalline est hexagonale. L'équation de la transformation est alors :



L'anhydrite III se transforme en anhydrite II, de structure cristalline orthorhombique, lorsqu'on est aux alentours de 250°C à partir du semihydrate α et vers 400°C à partir du semihydrate β :



Dans le cas où on cuit au delà de 1200°C, on obtient l'anhydre I, sa structure cristalline est cubique à faces centrées, la réaction se produit conformément à l'équation 1.15 :



Les semihydrates α et β sont les principaux produits utilisés : le premier par un gâchage avec peu d'eau permet d'obtenir de bonnes propriétés mécaniques. Il est utilisé pour les moulages spéciaux, la fabrication des prothèses dentaires, etc. Le second après gâchage conduit à un matériau moins dense et peu résistant. Il est utilisé dans de nombreuses applications comme les enduits, plafonds, etc.

Le tableau 1.3 ci-dessous dressé par EVE [9] en 2003 résume les principales caractéristiques du gypse et des produits ci-dessus décrits obtenus lors de sa cuisson. Ces informations sont aussi disponibles dans la référence [4].

Phase	Gypse	Semihydrate α	Semihydrate β	Anhydre III	Surcuit
Système cristallin	Monoclinique	rhomboédrique	rhomboédrique	hexagonal	orthorhombique
Teneur en eau	20,93%	6,21%	6,21%	$\epsilon\%$	0
Masse moléculaire	172,17 g	145,15 g	145,15 g	136,14g	136,14 g
Masse volumique	2,31 g/cm ³	2,76 g/cm ³	2,63 g/cm ³	2,95 g/cm ³	2,95 g/cm ³
Solubilité à 25°C	2,4 g/l d'eau	6,5 g/l d'eau	9,0 g/l d'eau	9,0 g/l d'eau	2,7 g/l d'eau
Préparation		Voie humide	Voie sèche		
Chaleur d'hydratation		-4100 cal/mol	-4600 cal/mol		
Cristallisation		compacte	spongieuse		
Surface spécifique		faible	élevée		

TAB. 1.3 – *Caractéristiques du système CaSO₄ et ses hydrates*

1.3.2.1.5 Structure cristalline du semihydrate La structure cristallographique du semihydrate α et β a été étudiée par plusieurs auteurs notamment Bershadskii F.G.

et Mchedlov-Petrosyan O.P. cités par S. EVE [9], elle est dite rhomboédrique (figure 1.15 [9]); la différence est que le premier a une structure non poreuse alors que le second est poreux comme on peut l'observer sur les images MEB de la figure 1.16 [6]. C'est ce qui justifie la différence dans leurs applications.

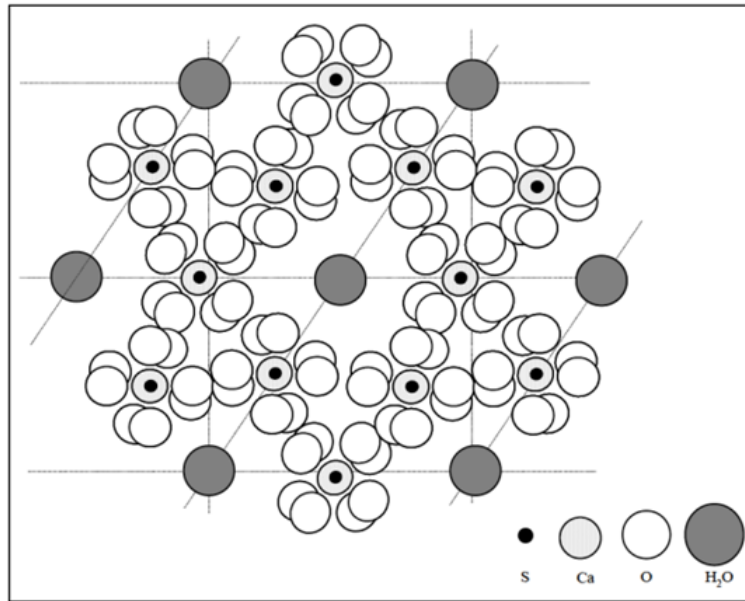


FIG. 1.15 – Structure atomique du semihydrate sur le plan (001)

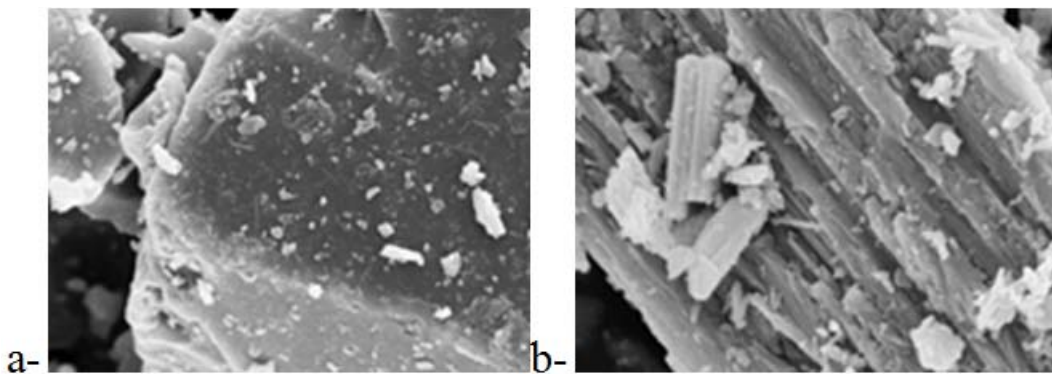
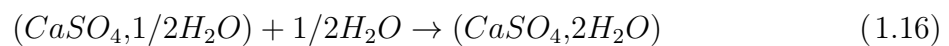


FIG. 1.16 – Images MEB (5mμ) des plâtres Prestia (usine Mériel du groupe Lafarge) : a-semihydrate α; b-semihydrate β

1.3.2.1.6 Fabrication du plâtre pris

1.3.2.1.6.1 Principe Le plâtre pris résulte de la réhydratation du semihydrate dans l'eau. Elle s'effectue selon l'équation :



Cette réaction est accompagnée d'un dégagement de chaleur, P. COQUARD [7] décrit le protocole de gâchage comme suit : la poudre de semihydrate est versée dans de l'eau pendant 30 secondes environ, laissée au repos pendant 30 secondes, une agitation du mélange est effectuée pendant la même durée, un autre repos de 30 secondes à nouveau et une dernière agitation de 30 secondes jusqu'à homogénéisation ; le mélange, d'abord liquide devient pâteux marquant le début de la prise ; il durcit par la suite et on obtient un matériau compact utilisable : le plâtre pris.

Le taux de gâchage E/P varie fréquemment entre 0,5 et 1,2 dans le cas des semihydrates β pour des utilisations courantes comme matériau de construction et entre 0,3 et 0,5 dans le cas du type α [9] utilisé dans la fabrication des céramiques ou bien dans l'industrie dentaire [7]. Sur une quantité d'eau utilisée pendant le gâchage, seule une faible fraction 18,6% [9] participe à la réaction chimique. La quantité d'eau en sus permet d'obtenir une bonne fluidité de la pâte. Elle détermine aussi la porosité du matériau après prise.

1.3.2.1.6.2 Mécanisme d'hydratation Lors du gâchage du plâtre, on peut observer une dissolution de la poudre dans l'eau obtenant un liquide blanc homogène ; par la suite, ce mélange commence à durcir renvoyant une quantité d'eau à la surface et un dégagement de chaleur s'en suit. Après un bout de temps, le mélange achève son durcissement : c'est la fin de la prise. Une fois séché, il devient solide mais fragile.

Depuis le 17e siècle, des chercheurs s'intéressent à expliquer ce mécanisme qui se produit pendant la prise du semihydrate. Des modèles sont alors proposés : certains se rassemblent autour de l'idée selon laquelle il s'agirait d'une cristallisation, d'autres parlent d'un phénomène colloïdal, de germination hétérogène ou topochemique. Les travaux de P. COQUARD en 1992, S. MEILLE en 2001, S. EVE en 2003 et H. JAFFEL en 2006 sont basés sur ces différentes idées [6, 49, 7, 9].

En 1988, AMATHIEU, partant de la théorie soutenue par Lavoisier en 1768 et LE CHATELIER au 19e siècle selon laquelle la prise du plâtre s'effectue selon le schéma suivant : dissolution - germination et croissance, montre qu'il y a dissolution et cristallisation simultanées et trouve que la dissolution s'effectue suivant une loi d'ordre 2 tenant compte de la surface présente à la dissolution :

$$\frac{d[Ca^{2+}]}{dt} = kS(t) ([Ca^{2+}] - [Ca^{2-}])^2 \quad (1.17)$$

avec $S(t)$ l'aire des graines d'hémihydrate au temps t et $k = 2,2g^{-1}m^{-2}ls^{-1}$, concluant à un processus d'interface limitant.

En 1989, J. BEREKA et autres, après avoir confronté les modèles proposés par SCHILLER, RIDGE, TAPLIN, COMBE et un modèle de produit, trouvent un modèle de disso-

lution :

$$\frac{d\alpha}{dt} = k\alpha(1 - \alpha) \quad (1.18)$$

avec $\alpha = \frac{T - T_0}{T_f - T_0}$: le degré d'avancement de la réaction,

T_f : la température finale quand tout le semihydrate est hydraté,

T_0 : la température initiale,

k : le coefficient cinétique dépendant de la température $k = k_0 \exp\left(\frac{-A}{T}\right)$

avec $A = 4500 \text{ cal/mol}$ et $k_0 = 4,3 \cdot 10^5 \cdot \text{S}^{-1}$.

Ce modèle rendrait le mieux compte de la réalité expérimentale.

Après analyse, en 2006, H. JAFFEL [6] explique que les étapes de l'hydratation du plâtre (dissolution initiale, période de latence, accélération et fin du processus) ne s'expliquent pas par la seule théorie de LE CHATELIER parce que des techniques expérimentales notamment la conductimétrie, la calorimétrie, etc, montrent bien l'existence de ces trois étapes de l'hydratation. Il propose alors un nouvel éclairage sur ce processus d'hydratation en effectuant la mesure par relaxation magnétique du proton à bas champ. Le résultat de son expérimentation est qu'il existe en permanence deux populations d'eau différentes tout au long de la réaction d'hydratation :

- la plus grande fraction servant à alimenter la réaction d'hydratation et à créer la porosité,
- la plus faible fraction amplifiée après la prise occupe les espaces poreux les plus confinés (eau dans les amas d'aiguilles, eau inter-cristalline, ...).

Au regard des investigations déjà effectuées sur le mécanisme d'hydratation du semihydrate et tenant compte des méthodes et techniques modernes mises en œuvre pour y apporter l'éclairage, l'explication de Hamouda JAFFEL complèterait bien la théorie de LE CHATELIER pour décrire le phénomène qui se produit pendant la prise du plâtre.

1.3.2.1.7 Microstructure du plâtre pris Très récemment, Sylvain MEILLE, Sophie EVE et Hamadou JAFFEL [49, 9, 6] ont étudié la microstructure du plâtre pris. Elle est très poreuse. Son taux de porosité est par exemple de 55% pour un taux de gâchage E/P égale à 0,8 ; sa microstructure est constituée de cristaux en forme d'aiguilles ou de plaquettes enchevêtrés. Leur liaison est de type feuilletée pour certains et de type tenon-mortaise pour d'autres. L'image MEB de la figure 1.17 [49] permet de visualiser cette présentation de la microstructure du plâtre.

1.3.2.1.8 Comportements du plâtre

1.3.2.1.8.1 Comportement mécanique Le plâtre est un matériau en général dur et fragile, ses caractéristiques mécaniques dépendent du type de semihydrate α ou β ,



FIG. 1.17 – *Enchevêtrement des cristaux du plâtre pris gâché à $E/P = 0,8$ (Image MEB d'un faciès de rupture - $20\mu m$)*

de la mise en œuvre principalement du taux de gâchage et de l'effet de masse. Les informations disponibles dans la littérature relatives à son comportement mécanique connaissent conséquemment une variation selon les paramètres utilisés. Philippe COQUARD [7] s'est intéressé en 1992 à caractériser sa résistance mécanique aux états sec et humide, il en ressort une grande dispersion des valeurs selon la taille de l'échantillon et la mise en œuvre du matériau. Une loi de variation du module d'Young à la flexion 3 points est établie pour une porosité p donnée comprise entre 25 et 75%.

$$E = 27(1 - 1,15p)^{1,84} \quad (1.19)$$

Le module d'Young du matériau est ainsi paramétré en fonction de sa mise en œuvre uniquement, la porosité en étant étroitement liée. Une grandeur $F_{rup} = W^\gamma$ est également établie qui permet désormais de classer les plâtres secs selon leurs résistances une fois la force à la rupture F_{rup} connue, la valeur $\gamma = 0,635$ étant indépendante du plâtre testé. La déformation aussi n'est pas à l'abri de ce phénomène dispersif, un paramètre $\epsilon_{rup}W^\delta$ est également proposé par l'auteur pour caractériser la déformation à la rupture du plâtre (avec $\delta = 0,55$). Les performances d'un plâtre pourraient alors être proprement évaluées avec une représentation graphique des caractéristiques $F_{rup} = f(W^\gamma, \epsilon_{rup}W^\delta)$. L'idée de l'influence de la porosité sur les caractéristiques mécaniques du semihydrate pris est démontrée en 2001 par Sylvain MEILLE [49] venant enrichir ces résultats. Il étudie le comportement mécanique en rapport avec sa microstructure. Il utilise, par une approche basée sur la propagation des ondes ultrasoniques, les formules suivantes pour calculer le

module d'élasticité E et le coefficient de Poisson ν du matériau :

$$E = \frac{\rho(1 + \nu(1 - 2\nu))}{1 - \nu} C_L^2 \quad (1.20)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{C_T^2 - C_L^2}{(C_T^2 - C_L^2)} \quad (1.21)$$

ρ étant la masse volumique du matériau et C_L et C_T , respectivement les vitesses longitudinale et transversale de propagation des ondes ultrasoniques dans le matériau.

On ne peut donc avancer des expressions que de manière paramétrée en précisant les paramètres de mise en œuvre utilisés. C'est ainsi que PERONNET en 1996 [51] détermine une contrainte à la rupture par traction de 2,3 MPa, de 3,7 MPa par flexion 4 points et de 3, 2 MPa par flexion 3 points pour un plâtre (semihydrate β) gâché au taux E/P=0,8.

A titre d'illustration, le tableau 1.4 [52] présente les valeurs des caractéristiques physiques et mécaniques (en compression) du plâtre pris en fonction des paramètres de mise en œuvre.

E/P	Plâtre α				Plâtre β			
	$\rho(gcm^{-3})$	$E(GPa)$	$\sigma_{Max}(MPa)$	$\epsilon_{Max}(\%)$	$\rho(gcm^{-3})$	$E(GPa)$	$\sigma_{Max}(MPa)$	$\epsilon_{Max}(\%)$
0,35	1,6±0,02	21±0,7	41±7	2,3±0,3	-	-	-	-
0,4	1,6±0,02	16±0,3	39±4	3,8±0,2	1,4	4,9±0,6	24±2	2,5±0,8
0,5	-	-	-	-	1,3	1,3±0,3	17±1	2,6±0,2
0,6	-	-	-	-	1,2	1,4±0,5	12±2	1,7±0,6

TAB. 1.4 – Propriétés mécaniques du plâtre pris en fonction des paramètres de mise en œuvre

1.3.2.1.8.2 Comportement hygrométrique Le plâtre est très sensible à l'eau. L'intérêt de l'étude de son comportement hygrométrique se trouve dans l'examen de son influence sur les performances structurelles par exemple. Suite à l'affirmation de SATTLE [3, 53] selon laquelle le plâtre pris mouillé est plastique, Philippe COQUARD [7] procède à une vérification en menant un essai de flexion sur une poutre de plâtre mouillée comparée à une poutre sèche et confirme cette affirmation. Il précise que cette plasticité s'explique par des glissements au niveau des interfaces inter cristallines et non au sens conventionnel du terme. M. Saâdaoui et autres [54] en 2004, montrent que l'accroissement du taux d'absorption de l'humidité augmente le glissement entre les cristaux justifiant le comportement viscoélastique du matériau mouillé. Trois ans plus tôt, S. MEILLE [49] étudiait le comportement du plâtre pris humide et faisait le même constat.

En 2002, P. BOUSTINGORRY [20] établit l'isotherme de reprise d'humidité d'une poutre de plâtre de $16 \times 4 \times 4cm^3$ à l'isotherme Nelson du gypse (figure 1.18 [20]).

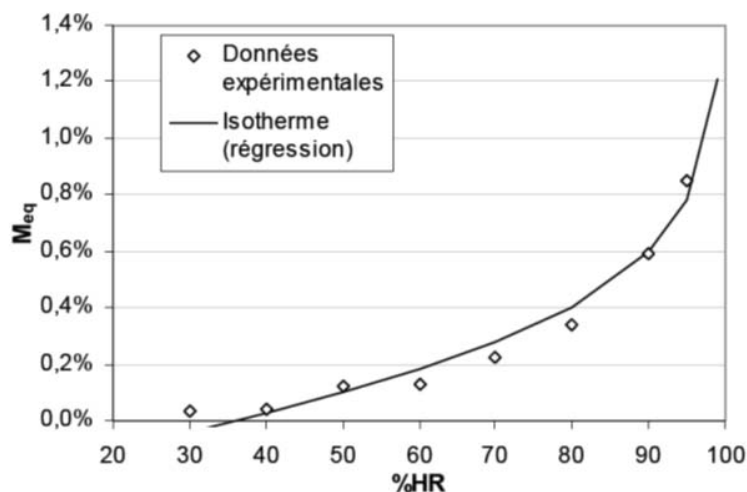


FIG. 1.18 – Données expérimentales de reprise d'humidité d'une poutre de plâtre

On en conclut que le plâtre absorbe davantage d'eau pour un taux d'humidité relative important.

L'étude du plâtre en présence de l'eau est aussi justifiée pour comprendre son comportement vis-à-vis de l'humidité dans des applications fonctionnelles. Des essais de laboratoire [4] permettent de découvrir que ce matériau de construction contribue à amortir les variations hygroscopiques de l'environnement dans lequel il est utilisé.

1.3.2.1.8.3 Comportement thermique et au feu Dès les premières utilisations du plâtre, sa tenue vis-à-vis du feu a été découverte. Cette découverte donnait lieu à une loi de Louis XIV en 1667 pour que toutes les maisons soient enduites de plâtre pour prévenir contre la propagation d'un éventuel incendie.

Des études [4, 5, 55] nous permettent à ce jour de montrer qu'il faudrait une énergie calorifique importante (environ 711 kJ par kg de plâtre) pour libérer les 20% en masse d'eau liées chimiquement ; pour faire évaporer cette eau par la suite, il faudrait encore dépenser 1255 kJ par kg de plâtre. Il est présentement connu que la température du plâtre reste inférieure à 140°C tant que toute l'eau n'est pas libérée et vaporisée, que sous l'action du feu sur le plâtre ne donne naissance à aucun gaz ou vapeur de caractère toxique, corrosif ou asphyxiant, aucune fumée ni de produit susceptible d'activer le feu. Il est donc classé comme coupe feu selon le critère d'isolation I .

La structure poreuse du plâtre qui résulte du départ d'eau lors du séchage et subsiste après déshydratation fait du plâtre un mauvais conducteur de la chaleur. Le tableau 1.5 [4] donne les caractéristiques thermiques du plâtre. Le plâtre présente une faible conductivité thermique. C'est un bon isolant thermique. Le pouvoir isolant thermique du plâtre est désormais connu : trois à quatre fois celui du béton et deux à trois fois celui de la terre

Masse volumique (kg/m^3)	Conductivité thermique utile λ ($w.m^{-1}k^{-1}$)	Capacité thermique massique c_p ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	Facteur de résistance à la vapeur d'eau μ	
			Sec	Humide
600	0,18	1000	10	4
900	0,30	1000	10	4
1200	0,43	1000	10	4
1500	0,56	1000	10	4

TAB. 1.5 – *Caractéristiques thermiques du plâtre*

cuite. Ceci conforte le bien fondé de la loi de Louis XIV.

1.3.2.1.8.4 Applications du plâtre Les rencontres régionales du Gypse et du Plâtre tenues le 23 mai 2008 à l'Europôle de l'Arbois à Aix-en-Provence en France sont révélatrices de l'importance du plâtre dans la communauté. Ses applications de nos jours sont nombreuses. Les produits de "*Les industries du Plâtre*", leader national dans le domaine, soit 95% du marché, sont illustratifs des nombreuses utilisations : le bâtiment en est le plus grand destinataire. Le plâtre s'intègre dans tous les types de bâtiment que ce soit dans les travaux neufs, de rénovation comme d'aménagement : revêtement des murs et du sol, cloisons de distribution, plafonds, décoration, protection contre l'incendie, régulation hygrométrique, isolation acoustique. Le domaine artistique s'en sert agréablement dans le moulage des formes, à l'occasion des restaurations d'œuvres d'art et la liste n'est pas exhaustive [15]. Le plâtre est donc avec nous dans le quotidien.

1.3.2.2 LES RENFORTS

Les matériaux composites, comme nous l'avons évoqué dans la définition constituent une mise en commun d'au moins deux constituants dont la matrice et le renfort. Le renfort peut être fibreux ou bien granulaire. Ci-dessous, nous présentons les différents renforts les plus souvent utilisés avec la matrice plâtre.

1.3.2.2.1 Les renforts à particules On va considérer qu'un matériau composite est à particules lorsque le renfort est sous forme de particules. D'après Larousse [18], une particule est "*une très petite partie de quelque chose*", cette définition fait allusion en fait à l'aspect dimension de l'objet. Nous devons donc comprendre une particule, par opposition aux fibres, comme un petit élément de matière n'ayant pas de dimension privilégiée.

Peu d'auteurs, à notre connaissance, ont essayé l'emploi des particules dans le plâtre avec pour objectif de le renforcer. Sophie EVE [9] rapporte une utilisation de particules se trouvant dans les fumées de silice, comme cela est largement fait avec le ciment, pour améliorer les caractéristiques mécaniques du plâtre.

1.3.2.2 Les renforts à fibres C'est ce type de renfort qui est très répandu dans le renforcement du plâtre. Sophie EVE [9] qui utilise les fibres de polymères en 2003 fait une revue des auteurs ayant utilisé différentes fibres pour renforcer le plâtre. On en retient donc que les fibres de verre, des tiges et fleurs de coton, de sisal, de polymères synthétiques et d'alliages à mémoire de forme ($Fe - Mn - Si - Cr$) ont été utilisés pour renforcer le semihydrate avec des résultats probants. S'ajoutent à cette liste les fibres de bois, de palmier dattier et de papier usagé [20, 40, 41]. MAGALY ARAÚJO C. et autres [56] ont étudié en 2008, le renforcement du plâtre par des fibres de cellulose de carton d'emballage du ciment.

1.3.2.3 COMPOSITES PLATRE/FIBRES

Nous l'avons déjà dit plus haut, le plâtre est un matériau extrêmement fragile. Sa disponibilité et ses vertus avérées permettent de s'y pencher pour chercher les possibilités de réduire l'effet de ce principal défaut. Il est avéré que renforcement par des fibres apporte une importante réduction de cette fragilité. Des études sont donc menées à travers le monde entier pour le renforcer avec des fibres prises localement. La fabrication du composite à matrice plâtre utilise la procédure que de mise en œuvre du plâtre : il est question en général d'avoir les fibres mélangées dans la pâte de plâtre, de verser le mélange dans un moule et de démouler après la prise. Le procédé de ce mélange varie avec les auteurs. Il faut noter qu'en général, l'ordre de mélange dépend de la morphologie des fibres (courtes ou longues), elle dépend aussi de l'orientation que l'on souhaite donner aux fibres dans le matériau. Dans la suite de ce paragraphe, les mélanges plâtre/fibres déjà étudiés dans la littérature seront présentés. Les protocoles de mise en œuvre utilisés par les uns et les autres et les caractéristiques obtenues seront précisés.

1.3.2.3.1 Plâtre renforcé de fibres de verre ALI et ses co-auteurs [9] ont étudié en 1969 le renforcement du plâtre par des fibres de verre de type E de longueur 5 mm, de diamètre de 8 à 10 μm regroupés en faisceau de 204 fibres et ensimées de polyacétate de vinyle, de caractéristiques mécaniques $\sigma_R = 2,06$ à 2,75 GPa, $E = 68,9$ à 75,8 GPa. Les plâtres α et β ont été utilisés comme matrice avec un retardateur : la kératine. Ils procèdent par projection du mélange plâtre fibres de verre dans des moules suivie d'un séchage pendant 72 heures à l'air libre et conservation dans une enceinte à 18°C avec un taux d'humidité relative de 40%. Des essais de flexion 4 points et de traction ont été menés sur des éprouvettes découpées sur des plaques obtenues dans des moules de 1,5 m par 1 m, d'épaisseur variant entre 11 et 13 mm. D'après les résultats, la contrainte à la rupture par traction ou par flexion des composites plâtre/fibres de verre est 2,5 à 3 fois supérieure à celle du plâtre non renforcé. Mais cette contrainte, en compression diminue

avec le taux de fibres.

Des plaques de plâtre renforcées de fibres de verre produites par Castina Designs [57] offre les caractéristiques suivantes : 9,4 MPa de résistance à la traction, 28,4 MPa de résistance à la flexion, 48,3 MPa de résistance à la compression et une résistance au choc de 43,7 KJ/m².

Malgré cette grande performance que la fibre de verre apporte au plâtre, ce renfort reste assez coûteux et de densité élevée, ce qui rend son application difficile dans des grands chantiers.

1.3.2.3.2 Plâtre renforcé de fibres de sisal D.A. St. John et J.M. Kelly [37] mentionnent au terme de leurs travaux qu'il existe une grande variation de la résistance ultime à la flexion lorsque le sisal est utilisé comme renfort du plâtre entraînant l'impossibilité de la prévoir avec précision.

Manjit [35] et ses coauteurs se sont penchés sur le renforcement des plaques de plâtre par des fibres de sisal pour remplacer les panneaux de bois sur des portes. Des plaques de dimensions $750 \times 560 \times 12\text{mm}^3$ sont fabriquées, pour cela, par un mélange sandwich d'une couche de fibres courtes de sisal de 5 cm de longueur, non orientées entre deux couches de plâtre gâché à 66%. Les produits démoulés sont placés, pour traitement, dans un environnement à humidité relative contrôlée au dessus de 90% pendant 28 jours. Ils sont ensuite séchés à 42°C dans un four puis testés à l'humidité, à la flexion, à la traction, au choc, au gonflement par absorption d'eau et à la dureté de la surface. Les résultats présentés par comparaison à d'autres matériaux dans le tableau 1.6 montrent que les panneaux présentent une bonne résistance au bout de 28 jours d'exposition à l'humidité, qu'ils tiennent dans l'eau pendant le même temps sans être érodés tandis que le plâtre non renforcé cède à l'érosion dès le 3^{ème} jour d'immersion. Le tableau 1.6 [38] montre également que la résistance au choc est similaire à celle qu'offre le panneau renforcé de fibres de verre et reste supérieur à celle des panneaux d'autres matériaux. La résistance à la flexion au bout des 28 jours d'exposition est plus élevée que celle des panneaux de plâtre, de panneaux de plâtre fibreux et comparable aux panneaux de ciment collés et autres panneaux de particules. Ces résultats révèlent aussi que le panneau en composite plâtre sisal absorbe moins d'eau et gonfle moins que les plaques de ciment d'amiante et de plâtre renforcé de fibres de verre. Une comparaison de prix révèle enfin que le panneau de plâtre renforcé de fibres de sisal peut être produit à un coût relativement bas.

Le sisal est l'une des fibres utilisées à grande échelle pour renforcer le plâtre. Nombre d'entreprises de pose des staffs au Cameroun utilisent principalement la fibre de sisal comme renfort dans la fabrication des produits de décoration et de confection des plafonds suspendus. La mise en œuvre des produits est effectuée selon le protocole utilisé dans les

Propriétés	PPS	PPV	PP	PPart	CA	PPF	PPartCC
Humidité (%)	1,5	1	1	0,8-1	2	1,5	1
Résistance à la flexion (N/mm^2)							
1 jour	3,5	17,30	4-5	14	-	4-6	9-15
3 jours	6,5	-	-	-	-	-	-
7 jours	8	-	-	-	-	-	-
28 jours	10	-	-	-	18-23	-	-
Résistance au choc (Nmm/mm^2)							
28 jours	16	14-18	8-10	4,5	2	10	-
Gonflement (24hrs) (%)	0,8	0,68	3	14	-	30	12
Absorption d'eau (24hrs) (%)	10	25-30	50	70	-	30	12
Dureté de surface (mm)	0,6	0,5	0,36	-	-	0,6	0,4
PPS: Panneau de Plâtre renforcé de Sisal; PPV: Panneau de Plâtre renforcé de fibres de Verre							
PP: Panneau de Plâtre; PPart: Panneau de particules; CA: Ciment d'Asbestos							
PPF: Panneau de Plâtre fibreux; PPartCC: Panneaux de Particules de Ciment Collées							

TAB. 1.6 – *Propriétés mécaniques des panneaux de plâtre renforcé de fibres de sisal comparées à d'autres matériaux*

ateliers de KOLBERT STAFF² à Douala au Cameroun. La poudre de semihydrate est gâchée puis versée dans le moule; les fibres de sisal sont alors étalées au dessus puis immergées pour les imprégner totalement de la pâte. Le démoulage s'effectue une fois la prise terminée. Le produit est séché à l'air libre. Les tirants utilisés pour la suspension des plaques de plafond sont aussi un mélange de plâtre et de fibres de sisal. La résistance des produits n'étant pas testée, seul le fait qu'aucun écroulement des plafonds posés n'est signalé permet de dire que leur mélange de plâtre aux fibres de sisal offre une résistance à la traction et à la flexion suffisante pour cette utilisation comparée à celle du plâtre non renforcé.

1.3.2.3.3 Plâtre renforcé de fibres de bois En 2007, Pascal BOUSTINGORRY [20] étudie la résistance au vissage des plaques de plâtre renforcées de fibres de bois. Il mélange les fragments de bois et la poudre de semihydrate manuellement dans de l'eau de gâchage et verse l'alliage obtenu dans le moule; le démoulage se fait après la prise. Ses travaux révèlent que le plâtre renforcé de fibres de bois réagit différemment à la sollicitation en flexion par rapport au plâtre non renforcé. La présence des fibres de bois lui offre une résistance appréciable à la propagation de la fissure. La plaque renforcée de bois défibré offre une bonne résistance à l'arrachement d'une vis que celle non renforcée.

La plaque de plâtre renforcée de fibres de papiers usagés [41] offre une grande robustesse et incombustibilité. Elle est utilisée comme plaque de construction, de protection incendie et d'isolation contre l'humidité.

MAGALY ARAÚJO C. et autres [56] étudient en 2008, le renforcement du plâtre par des fibres de cellulose de carton d'emballage du ciment. Des tests de flexion ont été effectués, les faciès de rupture ont été observés à l'imagerie SEM (Scanning Electron Microscopy). Les résultats sont probants: un bon accrochage des fibres à la matrice, une

2. Entreprise camerounaise de fabrication et de pose des plafonds suspendus en plâtre à Douala

résistance mécanique du composite améliorée sont notés.

FERMACELL [41] est fait de plâtre et de fibres de papiers récupérés dans le cadre d'un processus de recyclage du papier usagé. On comprime à haute pression le mélange homogène obtenu à partir de ces deux matières premières naturelles après adjonction d'eau (sans aucun autre liant) pour obtenir des plaques inodores et robustes, qui sont ensuite séchées, imprégnées d'une substance hydrofuge puis découpées aux formats voulus.

1.3.2.3.4 Plâtre renforcé des fibres de palmier dattier Pour résoudre des problèmes d'environnement en Algérie causés par l'abondance de fibres de palmier dattier ainsi que leur incinération, Amina Djoudi et autres [40] ont entrepris d'utiliser ces fibres au renforcement du plâtre, afin de valoriser ces ressources biologiques. Ils mélangent avec une pâte de plâtre gâchée à E/P=0,6 des fibres de palmier dattier préalablement immergées dans l'eau et séchées à l'air libre ; une proportion de 6% de chaux éteinte est ajoutée dans l'eau de gâchage comme retardateur et le mélange est rapidement versé dans le moule. Le démoulage est effectué 24 heures après. Les résultats rapportés révèlent un changement complet du comportement rhéologique du matériau, une augmentation considérable de sa résistance à la flexion et sa ductilité tout en améliorant son seuil de fissuration.

1.3.2.3.5 Plâtre renforcé de fibres synthétiques EVE [9] disperse d'abord soigneusement les fibres de polymères dans l'eau de gâchage juste avant l'ajout du plâtre, puis elle saupoudre en 30 secondes le plâtre à la surface de cette eau, elle laisse reposer une minute, le mélange est remué pendant une minute puis laissé reposé à nouveau et coulé ensuite dans le moule après deux à trois minutes. Les résultats rapportés par l'auteur révèlent que le mélange plâtre fibres de polymères (polyamide, polypropylène) confère un accroissement de la porosité du composite et conduit à une réduction des contraintes à la rupture en flexion et en compression. Toutefois, la morphologie des fibres peut apporter une amélioration, il en ressort que des fibres de longueur 6 à 9 mm conduisent à des valeurs les plus élevées des caractéristiques mécaniques.

1.3.2.3.6 Applications des composites de plâtre Toute la recherche sur le renforcement du plâtre a pour objectif de diminuer sa fragilité légendaire. Les applications des plâtres renforcés de fibres sont donc évidentes. Il s'agit de pouvoir les utiliser dans tous les domaines de construction où le plâtre est demandé avec des possibilités de sollicitations mécaniques élevées : les cloisons, les plafonds, etc.

1.3.2.3.7 Microstructure des matériaux plâtre fibreux La microstructure des mélanges plâtre/fibres a été observée par COUTTS et WARD [58] en 1987, Sophie EVE [9] en 2003 et MAGALY et autres [56] en 2008. Les premiers ont observé, au MEB, le faciès

de rupture du mélange de plâtre avec les fibres de bois d'orientations aléatoires (espèce " *Pinnus radiata* " de Nouvelle Zélande). Les observations montrent un bon accrochage des fibres sur la matrice, meilleur qu'entre les cristaux de la matrice. L'auteure suivante a mené une étude approfondie de la microstructure du mélange fibres de polymères/plâtre Lutèce 75. Elle a observé des modifications significatives de la microstructure du plâtre (figure 1.19 [9]) : une cristallisation plus grossière, la présence de grains de plâtre non hydraté dans les spécimens renforcés de polypropylène traité corona, la présence d'une cémentation dans ceux de polyamide et une interface peu liée. Les derniers auteurs ont utilisé des fibres de cellulose de carton usagé d'emballage de ciment. Ils ont observé une modification de la formation des cristaux de plâtre autour des fibres.

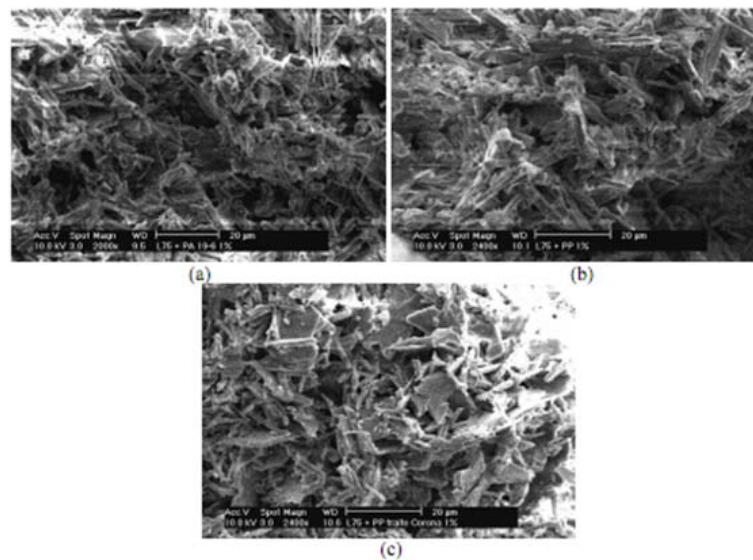


FIG. 1.19 – *Microstructure du mélange plâtre/fibres synthétiques*: a- *Fibres de polyamide*, b- *Fibres de polypropylène non traitées*, c- *Fibres de polypropylène traitées corona*.

Il apparaît, et c'est compréhensible, que la modification de la microstructure de la matrice plâtre peut survenir avec l'incorporation des fibres. Cette influence varie avec le type de fibre. Toutefois, cette modification de la microstructure ne semble pas modifier l'ampleur de la porosité. Ce qui fait que la matrice garde ses caractéristiques d'isolation puisqu'il est connu que c'est la porosité qui est le principal paramètre favorisant le caractère isolant d'un matériau. Le renforcement vient donc relever les lacunes structurelles du matériau composite plâtre fibres. C'est une autre approche du compromis nécessaire entre l'augmentation de la porosité et le maintien de la tenue mécanique que propose J. HENON dans les matériaux poreux géopolymères à porosité contrôlée [59]. Des fibres poreuses, et c'est le cas des fibres cellulosiques, non seulement renforcent le plâtre, elles augmenteraient aussi son aptitude à l'isolation. On trouve là un intérêt renouvelé à concevoir des

composites plâtre/fibres végétales.

1.4 Conclusion

La lecture qui vient d'être faite des informations disponibles dans la littérature concerne le plâtre, son élaboration, ses applications ainsi que son impact environnemental. Elle concerne les paramètres essentiels pour l'élaboration d'un matériau composite et les méthodes de sa caractérisation mécanique et thermique, et enfin, la nature des composites à matrice plâtre déjà étudiés. Cette revue nous permet de retenir que le plâtre est un matériau propre vis-à-vis de la nécessaire préservation de l'environnement : les ressources sont qualifiées d'inépuisables, la production de radioactivité est quasi nulle, il n'y a pas de dégagement de gaz à effets de serre, les déchets de fabrication et d'utilisation sont non toxiques et presque entièrement renouvelables, sa combustion ne dégage pas de gaz toxique. Avec ses ressources déclarées non épuisables, on serait amené à le considérer comme un éco-matériau mais le statut non renouvelable de cette ressource rendrait cette classification discutable. On apprend aussi que l'utilisation du plâtre est très adaptée pour le bâtiment, qu'il est même recommandable parce que, non seulement il est très léger et décoratif, il offre un confort d'habitation inestimable : c'est un bon isolant thermique et phonique, un matériau anti incendie de classe I et un bon régulateur de l'hygrométrie. Des qualités qui ont été confirmées par des analyses et essais en laboratoires. De plus, cette revue nous renseigne que les performances mécaniques des composites sont fortement influencées par l'adhésion de la matrice sur la fibre et la proportion volumique du renfort. Ces paramètres seront évalués dans ce travail : la méthode de déchaussement de la microgoutte testera l'accrochage des fibres sur la matrice, plusieurs techniques d'évaluation de la fraction volumique des fibres seront employées. On note après cette revue de la littérature que, des matériaux composites à base de plâtre étudiés à ce jour, aucune incompatibilité n'a été signalée avec les fibres végétales ou non. Le plâtre s'adapte plutôt à de multiples associations et se prête très bien aux exigences de conception des matériaux composites. On relève aussi que le renforcement de la tenue mécanique est la préoccupation principale de la majorité des auteurs. Il est avéré que le renforcement du plâtre par des fibres améliore sa tenue mécanique. La texture microstructurale utilisée se limite à des porosités comprises entre 30 et 55%.

Du moment où la solution pour la limitation de la propagation de la fissuration du matériau plâtre est obtenue par le biais du renforcement fibreux, il nous paraît intéressant de nous préoccuper de l'aspect fonctionnel, de ses propriétés d'isolation thermique précisément, de réduire le coût de revient du matériau et de l'alléger davantage. Une diminution de la quantité de matière de semihydrate utilisée dans la mise en œuvre est un

levier précieux à notre portée pour y arriver.

L'objectif de cette thèse est de concevoir un matériau de construction plâtre renforcé de fibres végétales à un coût relativement accessible. Il est question d'essayer le renforcement du plâtre de porosité élevée (taux de gâchage "masse d'eau sur la masse de plâtre E/P" égal à 1) par une fibre végétale locale, le RC, dont les caractéristiques physicochimiques et mécaniques ont été déterminées dans la référence [12] par référence à la fibre de sisal dont l'utilisation comme renfort du plâtre est connue.

Les chapitres deux et trois présentent les résultats expérimentaux de caractérisations physicochimique, mécanique et thermique respectivement. Le dernier chapitre traite de la modélisation multi-échelle de ces comportements.

Chapitre 2

Caractérisation physico-chimique des matériaux de l'étude

Sommaire

2.1	Le plâtre	66
2.1.1	Présentation physico-chimique	66
2.1.2	Les paramètres de gâchage	66
2.1.3	Microstructure du plâtre pris	67
2.1.4	Mesure de la porosité	67
2.2	Les renforts	68
2.2.1	Présentation physicochimique	68
2.2.2	Evaluation de la masse volumique	71
2.3	Le composite plâtre/fibres	72
2.3.1	Microstructure du mélange plâtre fibres	72
2.3.2	Evaluation de la fraction volumique	74

Introduction

Les composites objets de cette étude résultent de la mise en commun de plâtre pris et de fibres végétales de *Rhectophyllum Camerunense* (RC) d'une part et de sisal d'autre part. Ce chapitre est destiné à faire une bonne connaissance individuelle des constituants. Des informations disponibles dans la littérature sur ces produits sont présentées, certaines sont à nouveau déterminées et d'autres encore inconnues sont évaluées.

2.1 Le plâtre

2.1.1 Présentation physico-chimique

La matrice utilisée est le semihydrate β (plâtre à modeler) commercialisé par CASTORAMA de formule ($\text{CaSO}_4, 1/2 \text{H}_2\text{O}$). C'est une poudre blanche (figure 2.1-a) obtenue à partir de la cuisson du gypse selon les procédés chimiques présentés au paragraphe 1.1.3 du chapitre précédent, suivie de broyage. Mélangée avec de l'eau, on parle de gâchage, on obtient un liquide blanc (figure 2.1-b) qui, au bout de quelques minutes devient pâteux puis, durcit (figure 2.1-c). Ce processus s'effectue selon le principe décrit au paragraphe 1.3.2 du chapitre 1. Les principaux producteurs en France sont *Les Industries du Plâtre* et le groupe *Lafarge*. Il est employé dans le bâtiment, pour la confection d'éléments préfabriqués (carreaux, panneaux, corniches, etc.), des revêtements des surfaces intérieures et pour le moulage. Il est aussi utilisé dans la médecine comme appareil de contention et d'immobilisation moulé directement sur le patient avec de la tarlatane.



FIG. 2.1 – Phases du plâtre : a-poudre de semihydrate β , b-solution plâtre-eau, c-plâtre solide

2.1.2 Les paramètres de gâchage

Le semihydrate est obtenu par déshydratation du gypse ; en contact avec l'eau il récupère cette eau perdue pour former à nouveau le gypse une fois le niveau d'hydratation initial acquis. Ce comportement exceptionnel est la prise du plâtre. La fabrication du plâtre pris est effectuée selon le protocole de gâchage décrite dans le chapitre précédent au taux de gâchage à l'eau déminéralisée E/P égale à 1 sans additif ni retardateur ou accélérateur de prise quelconque. A ce taux de gâchage, la solution aqueuse de semi-hydrate est assez fluide et durcit moins vite ; ce qui permet une meilleure mouillabilité des fibres et offre un temps de manœuvre raisonnable pendant la mise en œuvre. Le choix de ce rapport est aussi effectué principalement pour avoir un produit de grande porosité afin de répondre à un objectif de confort thermique. Il faut dire que le rapport de masse eau/plâtre réel lorsqu'il est pris et séché est de 0,186. L'eau de gâchage en excès s'évapore et laisse des vides qui caractérisent la porosité que présente sa microstructure.

2.1.3 Microstructure du plâtre pris

2.1.3.1 Protocole de l'essai

Des éprouvettes de section $30 \times 40 \text{ mm}^2$ sont découpées à la scie diamantée sans polissage de la surface, la surface est alors observée au microscope électronique à balayage (MEB) JSM 820 muni d'un système d'analyse PGT AVALON de Polytech Clermont Ferrand.

2.1.3.2 Microstructure du plâtre pris

Le produit obtenu selon les paramètres que nous venons d'indiquer, observé au microscope à balayage (MEB), a la microstructure de la figure 2.2. Elle présente, comme décrit dans la littérature, une structure faite d'aiguilles enchevêtrées et accolées sans orientation privilégiée les unes aux autres.

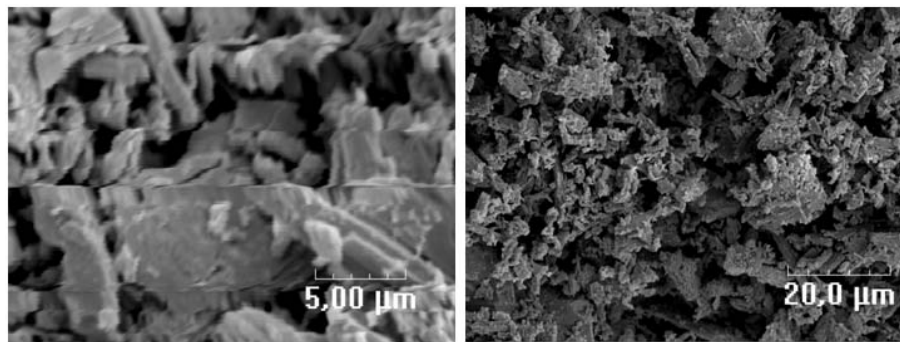


FIG. 2.2 – Image MEB d'une surface de rupture du plâtre gâché à E/P égale à 1

La présence des vides est observable sur cette image, témoin de sa grande porosité. Une évaluation de cette dernière est nécessaire. Une porosimétrie au mercure est donc effectuée. Le paragraphe suivant présente les résultats.

2.1.4 Mesure de la porosité

2.1.4.1 Protocole de l'essai

Le matériau examiné est le plâtre à modeler commercialisé par CASTORAMA ; il est gâché au taux E/P en masse égale à 1. La porosité est mesurée par un laboratoire spécialisé, Welience Pôle Matériaux à Dijon. La technique utilisée est l'analyse par porosimétrie à intrusion de mercure à l'aide de l'appareillage *Micrometrics Autopore III*. La porosimétrie au mercure repose sur l'envahissement du volume poreux d'un échantillon par du mercure. Le volume de mercure introduit donne le volume poreux de l'échantillon.

Les diamètres des pores sont calculés à partir de la pression appliquée pour introduire le mercure selon l'équation de WASHBURN [6, 9]. Elle se réalise en deux temps : premièrement l'ensemble 'pénétrömètre-échantillon' est en configuration *basse pression* (mesure jusqu'à 30 psia soit 2 bars) ; puis l'ensemble 'pénétrömètre-échantillon' est en configuration 'haute pression' (mesure jusqu'à 60000 psia soit 4000 bars). La taille minimale des pores accessibles est de 3 nanomètres (nm). Le taux de porosité total est le pourcentage total de *vide* analysé (porosité inter + intra particulaire).

2.1.4.2 Résultats et discussion

Les résultats sont présentés dans le tableau récapitulatif (tableau 2.1) des principales données physiques.

Echantillon	Masse volumique enveloppe (g/cm^3)	Masse volumique squelettique (g/cm^3)	Masse volumique théorique (g/cm^3)	Taux de porosité ouverte (%)	Taux de porosité <i>fermée</i> (%)	Taux de porosité totale (%)
Essai 1	0,88	1,36	2,30	20,8	40,9	61,7
Essai 2	0,88	1,75	2,30	23,9	37,8	61,7

TAB. 2.1 – Récapitulatif des principales données physiques obtenues

Le taux de porosité total mesuré du plâtre de cette étude avoisine 62%, une augmentation attendue par rapport aux taux de gâchage inférieurs parce qu'il est établi que la porosité du plâtre augmente avec le taux de gâchage [6]. Ce résultat est conforme aux valeurs de la littérature [6]. C'est cette valeur qui sera retenue comme porosité du plâtre pris dans la suite du travail. Procédons à une vérification théorique de cette valeur en utilisant la relation (2.1) établie dans la référence [60] qui calcule la porosité φ du plâtre pris connaissant le taux de gâchage. On obtient que la porosité du semihydrate pris, gâché au taux de gâchage E/P égale 1 est de 61,4%. Une valeur très proche de la valeur expérimentale obtenue. Nous espérons par cette texture, une augmentation de la capacité de réduction du transfert de chaleur du matériau utilisé. En revanche, les performances mécaniques s'affaiblissent. Nous en avons conscience, et c'est pour contrer cet affaiblissement que le renforcement est étudié dans les chapitres suivants.

$$\varphi = \frac{(E/P) - 0,186}{(E/P) + 0,326} \quad (2.1)$$

2.2 Les renforts

2.2.1 Présentation physicochimique

Les fibres de sisal et de Rhecktophyllum Camerunense (RC) ont fait l'objet d'une large présentation par R. NTENGA [12], d'autres travaux [59, 61, 21] se sont penchés sur le

sisal, nous en donnons un aperçu dans les paragraphes qui suivent.

2.2.1.1 Le sisal

La fibre de sisal est une fibre dure extraite des longues feuilles de la plante du même nom. La plante sisal (figure 2.3 [12]), de nom scientifique *Agave sisalana*, est d'origine mexicaine et cultivée au Brésil, en Afrique de l'est, en Haïti, en Inde, en Indonésie et en Thaïlande. Ces feuilles sont composées de 4% de fibres, 0,75% de cuticule, 8% de matière sèche et 87,25% d'eau. Une feuille contient 1000 à 1200 paquets de fibres et une plante produit environ 200 à 250 feuilles avant la floraison. Les fibres de sisal utilisées dans ces travaux sont celles commercialisées dans les magasins **FOKOU** au Cameroun.

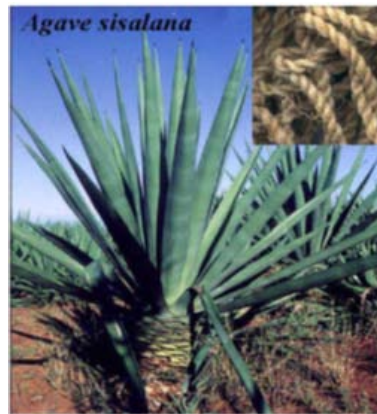


FIG. 2.3 – Plante du sisal et cordage à base de sisal

La fibre de sisal est d'utilisation ancienne pour la fabrication des ficelles, des nattes, des cordes, pour le rembourrage, le capitonnage. De nos jours, de nouvelles utilisations se sont développées compte tenu de l'intérêt croissant avéré pour l'utilisation des produits respectueux de l'environnement. Les fibres de sisal sont actuellement utilisées dans la confection des tapis, le revêtement mural, le macramé, les matelas, les sacs, les produits artisanaux, la fabrication de bourrellerie, de tissus de polissage, de filtres, de géotextiles, des matériaux pour l'industrie automobile, pour le renforcement des matériaux composites et bien plus.

Les caractéristiques chimiques et physiques de la fibre de sisal sont présentées dans le tableau 2.2 [59, 61, 12, 21].

2.2.1.2 Le Rhecktophyllum Camerunense

le Rhecktophyllum Camerunense (RC) (Figure 2.4) est une plante grimpante non parasite des forêts humides équatoriales, des fibres sont extraites de ses racines aériennes. Les fibres utilisées dans cette étude sont extraites dans les zones forestières de Zoétélé et

Caractéristiques chimiques		Caractéristiques physiques	
Cellulose (%)	49 à 78,8	Diamètre (μm)	30 à 215
Hémicellulose (%)	10 à 24	Densité	1,352 - 1,44 -1,45
Lignine (%)	8 à 11	Moisissures à 65% HR (%)	11
Pectine (%)	2	Angle micro-fibrilles ($^{\circ}$)	20 à 25
Pentosanes (%)	24		

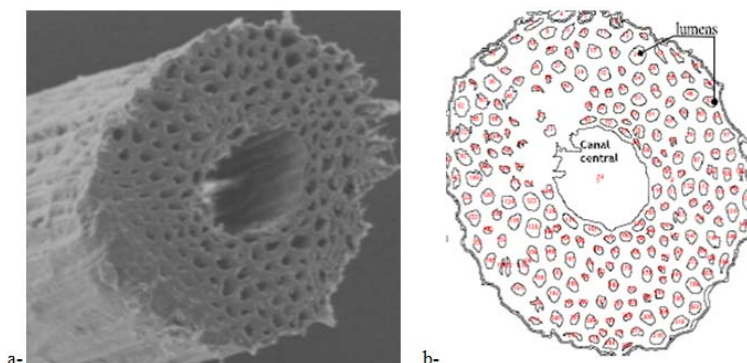
TAB. 2.2 – *Caractéristiques chimiques et physiques des fibres de sisal*

de Ngomedzap au centre et sud du Cameroun par nos soins. La fibre de RC peut atteindre une longueur de plus de six mètres dépendamment de la hauteur du sol à partir de laquelle la racine a germé de la plante. La première étude de cette fibre date de 2007 menée par R. NTENGA [12]. Ses travaux ont permis de connaître certaines de ses caractéristiques physiques, sa composition chimique et ses caractéristiques mécaniques. Nous savons de son utilisation primaire qu'elle a servi à la pêche artisanale comme fil à pêche et au tissage des nasses.



FIG. 2.4 – *Le Recktophyllum camerunense a- plante b- racines à l'origine des fibres c- Fibres lavées*

La section transversale est circulaire de 70 à 350 μm de diamètre extérieur et présente un canal central de 25 à 110 μm de diamètre. Une analyse de l'image de cette section au microscope épifluorescent (figure 2.5-b [12]) permet d'évaluer sa porosité de 28,31 à 35,5 %.



Les caractéristiques physiques et chimiques du RC sont regroupées dans le tableau 2.3 [12].

Caractéristiques chimiques		Caractéristiques physiques	
Cellulose (%)	68,2	Diamètre extérieur (μm)	70 - 350
Lignine (%)	15,6	Diamètre intérieur (μm)	25 - 110
Pentosanes (%)	16	Diamètre du lumen (μm)	2 - 29
		Circularité (%)	60,8 - 94,5
		Densité	0,947

TAB. 2.3 – Caractéristiques chimiques et physiques des fibres de RC

2.2.2 Evaluation de la masse volumique

2.2.2.1 Préparation de l'essai

On utilise un pycnomètre à solide, un dessiccateur et une balance électronique de type ABJ 120-4M (figure 2.6) de précision 0,1 mg ; les substances d'immersion sont : le toluène, l'éthanol et le xylène.

Les échantillons (morceaux de fibres découpées de longueurs 5 à 15 mm) sont d'abord séchés pendant 6 heures dans un dessiccateur contenant de la silice (préalablement régénérée). Le pycnomètre vide est pesé, notons m_1 sa masse, ensuite il est pesé plein d'eau soit m_2 la masse obtenue. Enfin notons m_3 , la masse du pycnomètre rempli de xylène (dibutyle phtalate). Ces pesées sont effectuées trois fois de suite pour évaluer l'incertitude sur la mesure Δ_m . On déduit alors la densité du dibutyle phtalate.

$$d_{dp} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \pm \Delta_m \quad (2.2)$$

Les morceaux de fibres sont introduits dans le pycnomètre propre et sec, soit m_4 la masse de l'ensemble, il est rempli par la suite à moitié de dibutyle phtalate et placé dans le dessiccateur. Le vide est fait jusqu'à dégazage total (absence de bulles). Une pesée est effectuée après dégazage, soit m_5 la masse obtenue.

La masse volumique ρ est alors évaluée par la relation (2.3) :

$$\rho = \frac{(m_4 - m_1)}{(m_3 - m_1) - (m_5 - m_4)} \quad (2.3)$$

2.2.2.2 Résultats et discussion

Les résultats obtenus au cours de cet essai sont donnés dans le tableau 2.4.



FIG. 2.6 – *Mesure des masses volumiques des fibres: agitation vortex dans un dessiccateur pour évacuation des microbulles des fibres*

	Densité Sisal	Densité RC
Série 1	1,60	0,63
Série 2	1,51	0,62
Série 3	1,63	0,64
Moyenne	1,58	0,63

TAB. 2.4 – *Masses volumiques des fibres*

Ces résultats sont légèrement différents des valeurs de la littérature [59, 61, 12]. Les valeurs de densité trouvées au cours de cet essai sont plus faibles. L'appréciation de la fin du dégazage étant visuelle et fonction de la patience de l'opérateur, on pourrait le qualifier de pas assez efficace. Ce qui peut expliquer cette différence de résultats. Toutefois, ils confirment le caractère peu dense du RC devant le sisal. Près de trois fois plus léger que le sisal.

2.3 Le composite plâtre/fibres

2.3.1 Microstructure du mélange plâtre fibres

2.3.1.1 Principe du microscope à balayage

Le microscope électronique à balayage (MEB) ou, en anglais scanning electron microscopy (SEM), utilise un fin faisceau d'électrons, émis par un canon à électrons. Des lentilles électromagnétiques permettent de focaliser le faisceau d'électrons sur l'échantillon. L'interaction entre les électrons et l'échantillon provoque la formation d'électrons secondaires de plus faible énergie. Ils sont amplifiés puis détectés et convertis en un signal électrique.

Ce processus est réalisé en chaque point de l'échantillon par un balayage du microscope. L'ensemble des signaux permet de reconstruire la topographie de l'échantillon et de fournir une image en relief. Grâce au microscope électronique à balayage, il est possible de voir la surface d'objets, de bactéries, de matériaux. . . La grande profondeur de champ est un atout de ce microscope. La résolution (1 nanomètre) est en revanche moins bonne que celle du microscope électronique en transmission (0,1 nanomètre).

2.3.1.2 Protocole de l'évaluation

L'observation est faite sur le MEB JSM 820 muni d'un système d'analyse PGT AVAILON. Un logiciel, SPIRIT, permet le traitement des images. La préparation des échantillons est contraignante. Ils doivent être déshydratés puis subir un traitement pour devenir conducteur (fixation des tissus, nettoyage). Les surfaces de nos éprouvettes ne sont pas polies à cause des risques de destruction du matériau. Elles ont été coupées après un séjour dans un congélateur ; malgré cela les fibres ne sont pas sectionnées comme souhaité. Les échantillons sont collés sur le porte-objet à l'aide d'un adhésif double face conducteur. Le plâtre n'étant pas conducteur, une bande de cet adhésif est mise en place reliant l'échantillon à la surface du support. L'ensemble est ensuite placé dans une enceinte à vide partiel pour métallisation à l'or (figure 2.7), puis placé dans le MEB pour observation après une mise sous vide d'une heure au minimum. Les photographies effectuées sont traitées par le logiciel de traitement d'image pour la finalisation. L'image est sauvegardée dans un format transportable.

2.3.1.3 Microstructure du mélange plâtre-sisal

La figure 2.8 présente les images observées.

On note que la surface des fibres comporte des débris de plâtre arrachés à la matrice lors du découpage du matériau. Compte tenu du fait qu'il n'y a pas vraiment de réaction chimique entre le plâtre et les fibres, mais juste un accrochage des cristaux de gypse, l'interface fibre/matrice autorise facilement un déplacement relatif entre les deux constituants sous l'effet d'un chargement mécanique : il s'agit d'une interface faible.

2.3.1.4 Microstructure du mélange plâtre-RC

Les images observées du composite plâtre/RC sont présentées dans la figure 2.9.

On note également des débris de plâtre sur la surface des fibres témoignant de la faiblesse de l'interface. Les fibres situées au cœur des faisceaux ne sont pas imprégnées de la matrice. Toutes les fibres ne peuvent conséquemment pas participer au renforcement.



FIG. 2.7 – *Eprouvettes de plâtre métallisées et prêtes à l'observation au MEB*

2.3.2 Evaluation de la fraction volumique

Le taux de fibres dans un composite est un paramètre majeur pour les performances du nouveau matériau. Il peut être nuisible [62] dans certaines matrices s'il est important et souhaité pour d'autres. Sa détermination est donc importante pour la connaissance du nouveau matériau et la prédiction de ses performances. Ceci justifie que des méthodes soient recherchées pour son évaluation précise. On distingue les méthodes destructives et les méthodes non destructives [63].

2.3.2.1 Evaluation par destruction du composite après mise en forme

2.3.2.1.1 Procédé A défaut d'observer les fibres dans la matrice et en évaluer la proportion, il est possible de détruire un échantillon et peser ses constituants. A partir des masses volumiques, les volumes des constituants sont évalués (V_f pour les fibres et V_m pour la matrice). Le volume de l'éprouvette V_c étant connu, le taux de fibres ν_f est évalué avec la formule ci-dessous.

$$\mu_f = \left(\frac{V_f}{V_c} \right) 100 \quad (2.4)$$

La précision du résultat dépend fortement du soin avec lequel sont effectuées les mesures.

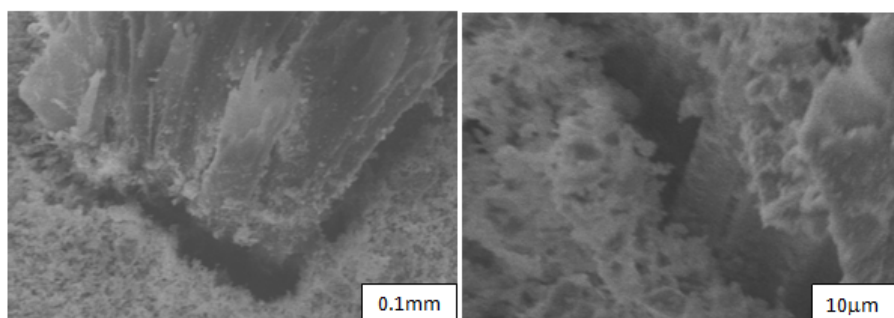


FIG. 2.8 – Image MEB du composite plâtre/sisal à des échelles de grossissements différents

2.3.2.1.2 Résultats La méthode est appliquée sur quatre éprouvettes : deux avec des fibres orientées suivant quatre directions (F4D) et deux autres avec des fibres non orientées (FNO). Les résultats sont présentés dans le tableau 2.5.

	Masse du composite (g)	Masse des fibres (g)	Fraction massique des fibres (%)	Volume du composite (cm^3)	Masse volumique des fibres (g/cm^3)	Volume des fibres (cm^3)	Fraction volumique des fibres (%)
Plâtre/RC F4D	84,93	3,44	4,05	156,35	0,95	3,63	2,32
PLâtre/Sisal F4D	84,5	2,22	2,63	151,47	1,35	1,64	1,08
Plâtre/RC FNO	79,95	3,17	3,96	161,41	0,95	3,35	2,07
Plâtre/Sisal FNO	80,47	1,67	2,07	125,59	1,35	1,23	0,98

TAB. 2.5 – Fraction volumique des fibres évaluées par destruction du composite après mise en forme

2.3.2.2 Evaluation par pesée des fibres à la mise en forme

Les fibres à utiliser pour la mise en forme de l'éprouvette sont pesées, soit m_f la masse obtenue. Le volume V de l'éprouvette est évalué ; à partir de la masse volumique ρ_f de la fibre, la fraction volumique V_f est calculée par la relation (2.4).

$$V_f = \frac{m_f}{\rho_f V} \quad (2.5)$$

Cette méthode est utilisée pour calculer la fraction volumique des fibres dans les éprouvettes destinées aux essais de traction et de flexion. Les valeurs obtenues sont récapitulées dans le tableau 2.6.

2.3.2.3 Evaluation par tomographie

2.3.2.3.1 Principe L'appareil utilisé est un micro-tomographe SkyScan Model 1174. L'objectif de la tomographie (Figure 2.10) est de reconstituer une image 3D d'un échantillon en le soumettant à une émission de rayons X. Chaque point de l'image projetée

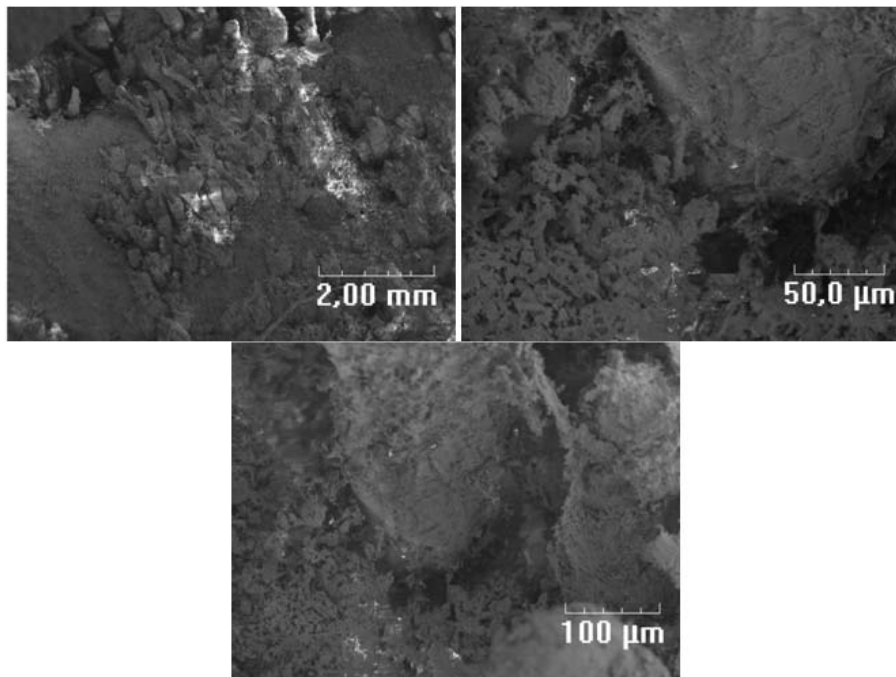


FIG. 2.9 – Image MEB du composite plâtre/RC à des échelles de grossissement différents

	Eprouvettes pour essais de traction	Eprouvettes pour essais de flexion
Plâtre/sisal unidirect.	27,5	1,12
Plâtre/RC unidirect.	18	1,60
Plâtre/RC architecture variée		
Fibres tissées	3,92	3,34
Fibres non orientées	3,92	3,37
Fibres unidirect. libres	3,92	3,34

TAB. 2.6 – Fractions volumiques en (%) évaluées par pesée à la mise en œuvre

contient les informations d'absorption (densité) des rayons X de l'échantillon analysé. Plusieurs projections radiographiques sont prises sous différents angles balayant une plage de 0 à 360°. Les images obtenues sont des cartes 2D de la distribution du coefficient d'atténuation des rayons X. A partir de l'intensité du rayonnement transmis pour une position angulaire, on peut reconstruire une image, puis différencier les matériaux présents en tenant compte de la variation du coefficient d'atténuation (cette atténuation du rayonnement est créée par la présence de l'objet) et de l'énergie initiale des rayons. Plus le nombre atomique de la matière est grand, plus l'absorption du rayonnement par celle-ci est grande. A partir des images 2D obtenues, on peut alors reconstituer des images 3D, en les empilant. Des logiciels spécifiques associés au système d'acquisition permettent de reconstruire numériquement l'échantillon à partir du signal (intensité de l'onde électroma-

gnétique) recueilli, et d'en extraire des données scientifiques caractéristiques du spécimen étudié (porosité, répartition surfacique des constituants, spectre d'absorption,...). Associé à un système informatique, la micro-tomographie permet en général une résolution spatiale très fine de 5 à 20 micromètres. La qualité de l'image est fonction du nombre de projections effectuées et le nombre de mesures faites par projection. Il faut noter que le temps d'analyse est proportionnel au nombre de projections. Cette technique est bien adaptée pour évaluer le taux de fibres dans un échantillon de matériau composite.



FIG. 2.10 – *Principe de la micro-tomographie a- Micro-tomographe SkyScan Model 1174 b- principe de prise d'images à reconstituer*

2.3.2.3.2 Résultats Un échantillon de plâtre renforcé de fibres de RC a été observé. Les images obtenues ne sont pas exploitables et l'évaluation de la distribution des fibres n'est pas obtenue par cette méthode.

2.3.2.4 Evaluation par Imagerie

La fraction volumique des fibres peut être également déterminée à partir de l'étude de la microstructure [64] des échantillons en utilisant des méthodes d'analyse d'image. Les échantillons sont observés au microscope électronique pour identifier la disposition des fibres. Des images micrographiques sont prises par portion sur toute la surface. A l'aide d'un logiciel de traitement d'images, elles sont superposées et ajustées pour reconstituer l'image de la surface. Il est alors possible de quantifier la proportion de fibres dans le matériau.

Cette méthode n'a pu être mise en œuvre en raison de la mauvaise qualité des images obtenues.

2.3.2.5 Comparaison des méthodes

L'évaluation de la fraction volumique suivant les deux premières méthodes a été effectuée sur un échantillon de plâtre/RC, les valeurs comparées sont indiquées dans le tableau 2.7.

	Par pesée à la mise en forme	Par destruction après la mise en forme	Ecart
Fraction volumique fibres	3,34	3,18	5%
Fraction massique fibres	4,15	3,91	6%

TAB. 2.7 – *Fractions volumiques comparées en (%) obtenues par deux méthodes*

Nous avons souhaité faire une comparaison des différentes méthodes et identifier la plus précise, mais les méthodes par tomographie et imagerie n'ayant pas donné les résultats escomptés, les résultats obtenus par pesées seront exploités. On enregistre un écart de 5 à 6 % entre elles. La méthode par pesée des fibres avant la mise en forme donne, à notre avis, des valeurs apparentes parce que le volume de l'éprouvette contient le volume de la porosité dont la masse est nulle.

Conclusion

Dans ce chapitre, les caractéristiques physicochimiques du plâtre, des fibres de sisal et de RC sont présentées. On retient que la texture du plâtre étudié est de grande porosité soit prêt de 62%. Sa microstructure est constituée d'aiguilles enchevêtrées et collées sans orientation privilégiée les unes aux autres. Les fibres de sisal et de RC sont à fort taux de cellulose (entre 49 et 78,8%). La fibre de RC est tubulaire et poreuse (28,31 à 35,5% de porosité). La microstructure du composite plâtre/fibres est également observée. Elle montre une interface faible.

Les fractions volumiques des fibres ont été évaluées en utilisant plusieurs méthodes. Seuls les résultats des méthodes par pesée des fibres avant la mise en œuvre sont exploitables. Les valeurs obtenues sont approximatives du fait que la porosité, qui est considérable, ne soit pas prise en compte.

Les caractéristiques mécaniques de ces mêmes matériaux sont mesurées dans le chapitre qui suit.

Chapitre 3

Approche expérimentale du comportement mécanique

Sommaire

3.1	Caractérisation des constituants	80
3.1.1	Caractérisation en traction des fibres	80
3.1.2	Caractérisation du plâtre non renforcé	85
3.1.3	Caractérisation de l'interface	91
3.1.4	Conclusion sur la caractérisation des constituants	98
3.2	Caractérisation du composite plâtre/sisal	99
3.2.1	Essai de traction	99
3.2.2	Essai de flexion trois points	103
3.3	Caractérisation du composite plâtre/RC	106
3.3.1	Essai de traction	106
3.3.2	Essai de flexion trois points	108
3.4	Influence de l'architecture du RC	111
3.4.1	Fibres non orientées	111
3.4.2	Fibres unidirectionnelles libres	115
3.4.3	Fibres tissées	120
3.5	Etude comparative des résultats	125
3.5.1	Traction	125
3.5.2	Flexion	125
3.5.3	Influence de l'architecture du RC	126
3.5.4	Conclusion sur l'étude comparative	129
3.6	Conclusion	129

Introduction

Le chapitre précédent a présenté les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux en étude : le plâtre, la fibre de sisal et la fibre de RC. Ce chapitre quant à lui se consacre à déterminer leurs caractéristiques mécaniques. La caractérisation des constituants est d'abord menée : la fibre de sisal, la fibre de RC, le plâtre pris gâché à E/P=1 non renforcé et l'interface plâtre/fibres. Par la suite, le matériau résultant du mélange plâtre/fibres est caractérisé en traction et en flexion trois points. Un examen de l'influence de l'architecture des fibres de RC est fait en traction et en flexion ainsi qu'une comparaison des performances du renforcement par le RC par référence au sisal.

3.1 Caractérisation des constituants

3.1.1 Caractérisation en traction des fibres

3.1.1.1 Matériel et méthodes

Les essais se déroulent sur une machine INSTRON Version IX 8.28.00, de type 4302 (figure 3.1-a) pilotée par un micro-ordinateur. Une centaine de fibres de sisal et de RC est testée en traction. La distance initiale entre les mors L_0 est de 20 millimètres. Le diamètre de chaque fibre à tester est tout d'abord évalué par conversion en millimètres des diamètres mesurés en pixels sur des images numériques des fibres. Ces images sont prises au moyen d'un microscope électronique BRESSER CD MICRO (Figure 3.1-c). Les éprouvettes de fibres sont montées dans des mors pneumatiques appropriés (Figure 3.1-b). L'éprouvette est chargée jusqu'à la rupture. Un graphique de la force en fonction du déplacement de la traverse se dessine à l'écran pendant l'essai. A la fin de l'essai, les données numériques sont récupérées sous un fichier EXCEL.

Les caractéristiques recherchées au terme de ces essais sont le type de rupture, le module d'Young, la résistance et l'allongement à rupture :

- le type de rupture est déterminé par une analyse qualitative de la courbe,
- le module d'élasticité est obtenu en déduisant la pente de la courbe contrainte/déformation dans la zone élastique,
- la résistance à la rupture est calculée par la relation (3.1),

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0}. \quad (3.1)$$

F_{max} étant la force maximale de traction en *Newtons* (N) et S_0 , la section initiale de l'éprouvette en millimètres carrés. Le chapitre précédent nous a permis de montrer à la faveur d'une analyse de la section de la fibre que le RC présente un taux

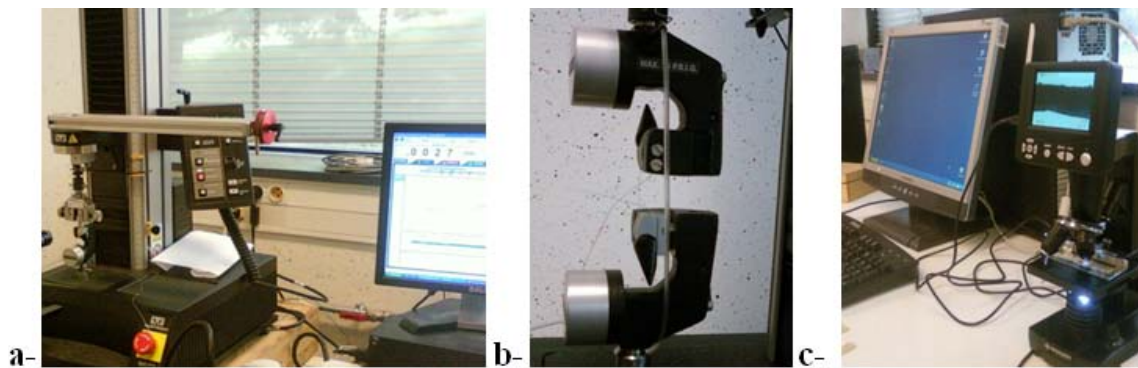


FIG. 3.1 – *Traction des fibres: a-Machine de traction INSTRON, b-Fibres montées sur des mors pneumatiques spéciales dédiées, c- Microscope électronique BRESSER CD MICRO*

de porosité de 32%. Cette réalité est prise en compte dans le calcul de sa section effective,

- l’allongement pour cent ($A\%$) à la rupture est obtenu par cent fois la différence entre la longueur de l’éprouvette à la rupture et sa longueur initiale divisée par cette dernière, soit la relation (3.2).

$$A\% = \left(\frac{L - L_0}{L_0} \right) 100 \quad (3.2)$$

3.1.1.1 Résultats pour le sisal

3.1.1.1.1 Le type de rupture Les courbes de contraintes en fonction des déformations permettent d’observer les caractéristiques de la loi de comportement et précisément le type de rupture du matériau. La figure 3.2 montre un exemple des courbes caractérisant le comportement de la fibre de sisal lorsqu’elle est soumise à un effort de traction.

Pour le sisal, on observe que la rupture se produit dans le domaine du comportement élastique linéaire du matériau. Il y a donc pas de plasticité macroscopique observable, il s’agit d’une rupture fragile.

3.1.1.1.2 Module d’élasticité, résistance à la traction et allongement à la rupture Une analyse des données numériques recueillies permet de calculer les caractéristiques mécaniques par traction de la fibre de sisal. Le tableau 3.1 rassemble les valeurs des modules d’élasticité (E), de résistance à la traction (R_m) et de l’allongement à la rupture (A) obtenues sur tous les échantillons testés.

Les graphiques de la figure 3.3 présentent une synthèse statistique de ces valeurs.

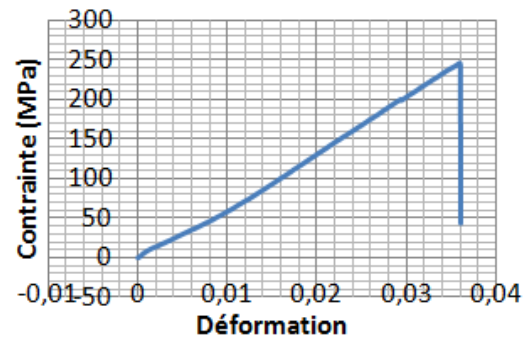


FIG. 3.2 – Comportement en traction : courbe contrainte/déformation de la fibre de sisal

Module d'élasticité E (GPa)					Résistance à la traction Rm (MPa)					Allongement à la rupture A (%)				
10,60	15,61	7,29	4,10	8,63	170	400	250	100	130	11,36	20,50	14,77	11,70	49,55
20,52	5,11	8,97	8,36	16,90	570	130	220	240	500	12,37	24,06	10,57	18,56	56,97
16,01	9,76	8,33	14,29	12,55	330	240	200	350	300	15,61	17,82	17,30	20,35	43,84
9,31	9,76	3,53	18,49	9,72	340	240	060	490	240	17,04	16,41	20,03	20,25	59,92
13,07	17,73	21,20	16,46	8,78	320	310	550	160	180	14,78	21,45	10,29	16,76	34,07
6,61	10,19	11,67	26,85	13,04	140	230	310	690	330	11,10	11,24	18,50	15,37	53,51
8,31	8,03	44,50	22,47	12,73	290	200	850	450	280	23,97	23,55	8,37	16,53	66,29
16,34	17,54	6,28	8,00	11,87	250	400	120	150	330	14,27	20,73	12,25	16,53	48,05
5,58	29,27	14,89	10,39	7,60	090	780	350	350	250	17,21	17,46	12,83	15,62	54,19
5,35	4,68	14,33	12,41	5,41	100	80	450	260	120	13,35	11,41	17,48	56,42	46,06
				16,09					360					40,30
				15,59					530					18,13

TAB. 3.1 – Comportement en traction : tableau des valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques en traction de la fibre de sisal

La fibre de sisal, soumise à la traction, possède un module moyen d'élasticité de 12,50 GPa, une résistance moyenne à la traction de 300 MPa et un allongement à la rupture moyen de 2,7%.

3.1.1.1.2 Résultats pour le RC

3.1.1.1.2.1 Le type de rupture Le comportement de la fibre de RC en traction est décrit par la courbe des contraintes en fonction des déformations de la figure 3.4. Elle permet d'observer les caractéristiques de la loi de comportement et d'apprécier le type de rupture du matériau.

Pour cette fibre, on note, après une courte zone de déformation élastique linéaire du matériau, une nouvelle zone de comportement linéaire avant la rupture. Ce type de rupture peut être classé dans la catégorie des ruptures ductiles. On peut noter que la déformation à rupture est très élevée (24%) comparée à celle du sisal (3,6%).

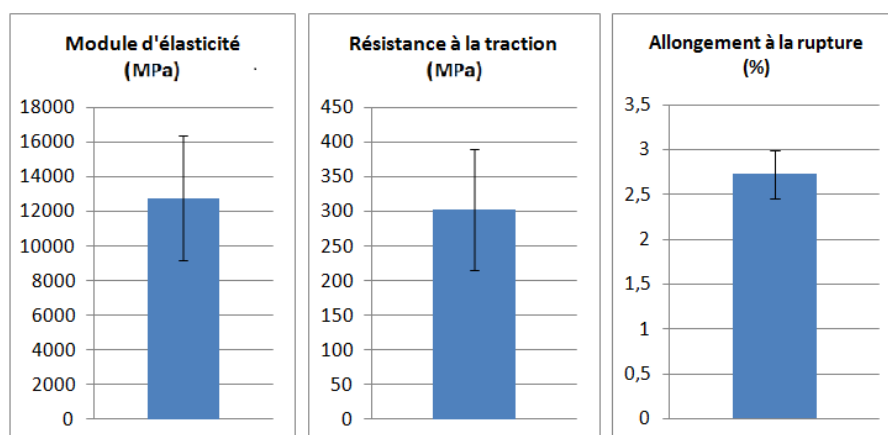


FIG. 3.3 – *Comportement en traction : graphiques des modules d'élasticité (E), résistances à la traction (R_m) et de l'allongement à la rupture de la fibre de sisal*

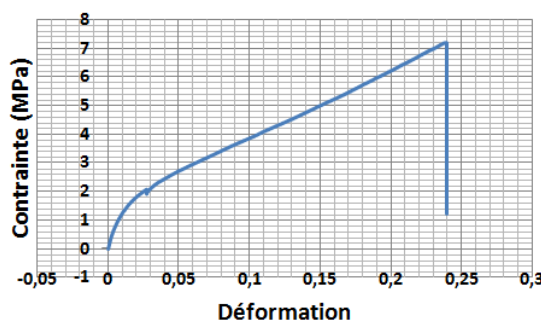


FIG. 3.4 – *Comportement en traction : courbe contraintes (MPa)/déformations de la fibre de RC*

3.1.1.1.2.2 Module d'élasticité, résistance à la traction et allongement à la rupture Une analyse des données numériques recueillies permet de calculer les caractéristiques mécaniques par traction de la fibre de sisal. Le tableau 3.2 rassemble les valeurs des modules d'élasticité (E), de résistance à la traction (R_m) et de l'allongement à la rupture (A) obtenues sur tous les échantillons testés.

Les graphiques de la figure 3.5 présentent les résultats synthétisés de l'analyse statistique de ces caractéristiques.

Il en ressort que la fibre de RC, soumise à la traction, présente un module d'élasticité moyen de 7 GPa, une résistance à la traction de 377 MPa et un allongement à la rupture moyen de 24,2%.

Les résultats obtenus pour les deux fibres sont du même ordre que celles disponibles dans la littérature [12, 65, 66]. Le tableau 3.3 les compare.

Module d'élasticité E (GPa)					Résistance à la traction Rm (MPa)					Allongement à la rupture A (%)				
3,91	5,56	6,38	3,15	2,68	90	290	220	340	270	1,61	3,17	3,61	3,10	2,04
25,00	14,42	13,89	5,48	1,22	830	320	190	550	770	2,82	3,18	2,56	3,03	3,09
29,30	6,81	7,81	1,92	3,13	970	300	250	360	280	2,34	2,32	2,88	2,76	3,05
10,42	6,81	18,38	1,72	1,39	270	300	240	810	190	4,02	2,59	2,52	2,90	2,74
6,25	11,21	6,79	4,08	3,02	200	540	190	280	300	2,59	1,83	2,70	1,11	2,65
3,13	6,13	22,32	3,13	3,41	70	170	690	840	410	2,55	2,29	3,06	2,78	2,75
6,25	12,26	13,59	2,27	3,13	220	590	220	570	480	3,63	2,76	2,86	2,11	2,33
5,32	6,31	3,47	1,68	2,78	220	270	190	140	360	1,68	2,43	2,86	2,61	2,84
9,38	11,03	26,04	1,56	2,40	340	470	150	1180	310	2,37	2,78	2,87	3,47	3,44
4,08	3,81	5,48	3,54	2,76	150	140	480	820	260	2,82	3,18	3,45	2,51	2,48
				3,21					340					2,25
				2,72					160					3,43

TAB. 3.2 – *Comportement en traction : tableau des valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques en traction de la fibre de RC*

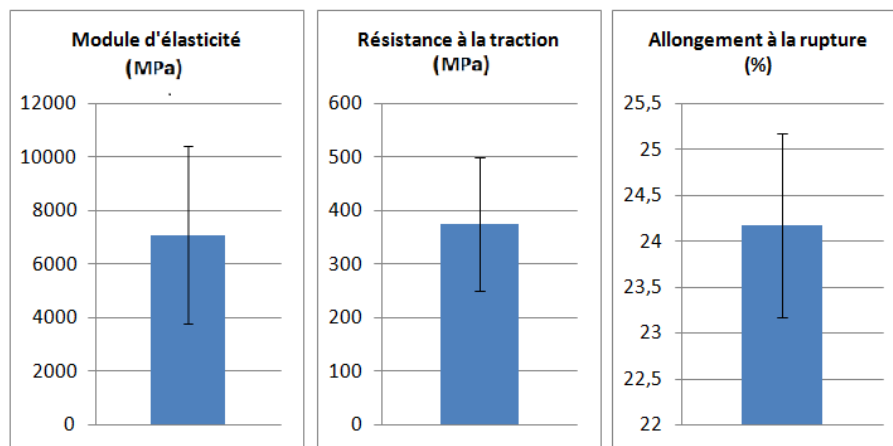


FIG. 3.5 – *Comportement en traction : graphiques des modules d'élasticité (E), résistances à la traction (Rm) et de l'allongement à la rupture de la fibre de RC*

3.1.1.1.3 Discussion et conclusion On note que les valeurs des caractéristiques mécaniques des deux fibres, aux termes des essais, sont dispersées. C'est un fait pas nouveau dans le comportement des fibres végétales. Cette dispersion est liée à la géométrie de la fibre (diamètre pas constant), à la récolte (méthode utilisée), à la culture (fertilité du sol), à la maturité de la plante et à la portion de provenance de la fibre sur la plante. Une sélection des racines ou feuilles est nécessaire dans des travaux à venir pour cerner de manière plus précise les propriétés de la fibre étudiée. Dans le cas des fibres de sisal et de RC étudiées, les plages similaires ont encadrées les valeurs des caractéristiques mécaniques des fibres dans des travaux récents [12]. Malgré cette dispersion, des informations pertinentes sont obtenues. On retient que le sisal est une fibre peu ductile. Son mode de rupture permet de la qualifier de fragile. Par contre, la fibre de reckthophyllum camerunense se révèle élastique ductile. Cette attitude lui permet d'accepter des déformations

Caractéristiques	Fibres de Sisal		Fibres de RC	
	Ref. [12, 65, 66]	Expérimentale	Ref. [12]	Expérimentale
R_m (MPa)	80-840	300	150-1738	377
E (GPa)	7-22	12,5	2,3-17	7
A (%)	1,6-2	2,7	10,9-53	24

TAB. 3.3 – *Tableau comparatif des propriétés mécaniques mesurées des fibres avec ceux disponibles dans la littérature*

jusqu'à plus de 40% sans rompre. En plus de l'inclinaison des microfibrilles de cellulose indiquée [12], sa forme tubulaire contribuerait aussi à sa grande déformation. Elle semble supporter un effort de traction plus important que le sisal ne supporterait avant rupture. Le renforcement du plâtre par cette fibre, envisagé par la présente étude, pourrait lui apporter une certaine ductilité. Son élasticité pourrait maintenir le matériau en place même si la matrice est déjà fragmentée.

Nous avons là, une idée précise du comportement mécanique des renforts qui seront utilisés pour la conception du nouveau matériau. Le comportement mécanique de la matrice à renforcer est l'objet de l'étude qui va suivre.

3.1.2 Caractérisation du plâtre non renforcé

3.1.2.1 Essai de traction

3.1.2.1.1 Matériel et Méthodes

3.1.2.1.1.1 Eprouvettes L'éprouvette de traction en plâtre n'étant pas régie par une norme, le matériau est considéré de la famille des céramiques. La forme utilisée est celle de type 1 définie par la norme NF EN658-1 de Novembre 1998 pour les matériaux composites en céramique (figure 3.6). Des talons en plastique sont collés aux extrémités des éprouvettes pour la prise dans les mors de la machine d'essai.

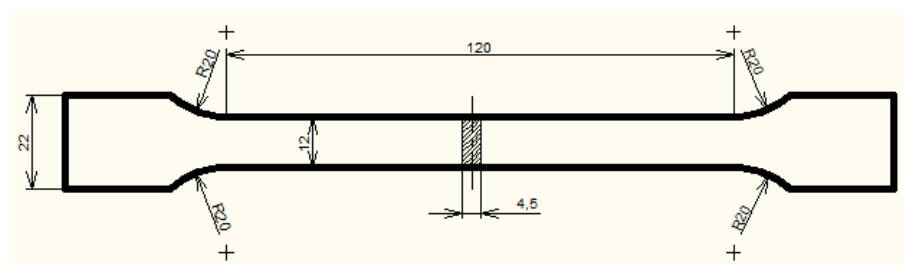


FIG. 3.6 – *Comportement en traction : définition de l'éprouvette de traction*

3.1.2.1.1.2 Méthodes Chaque éprouvette est chargée à une vitesse constante de 0,01 mm/s jusqu'à la rupture sur une machine d'essais de traction UTS20K TESTSYSTEM Zwick/ROELL ZmartPro équipée de mors autoserrants et contrôlée par un PC (figure 3.7). En même temps qu'une courbe d'effort en fonction du déplacement est tracée à l'écran de l'ordinateur, les données sont stockées dans un fichier exportable sur Excel pour traitement. Les essais se déroulent à température ambiante moyenne de 20°C dans une atmosphère de 30% d'humidité relative. Le traitement des données sur Excel permet d'évaluer le module d'Young (E), la résistance à la traction (R_m) et l'allongement ($A\%$) à la rupture pour chaque éprouvette.

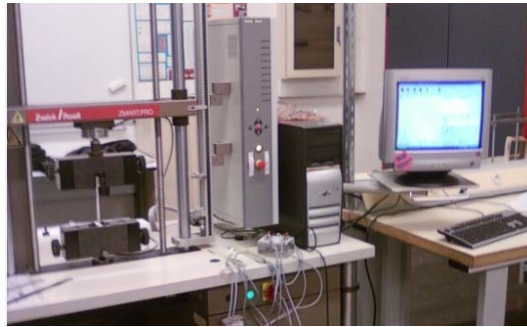


FIG. 3.7 – *Comportement en traction : machine de traction UTS20K TESTSYSTEM Zwick/ROELL ZmartPro*

Les valeurs caractéristiques sont évaluées comme indiqué plus haut (paragraphe 3.1.1).

3.1.2.1.2 Résultats

3.1.2.1.2.1 Mode de rupture La courbe contrainte/déformation caractéristique de la loi de comportement des éprouvettes de plâtre non renforcé est représentée (figure 3.8).

On observe sur la courbe qu'une fois la limite élastique atteinte, le processus de rupture se manifeste par un endommagement caractérisé par l'apparition de la fissuration instantanément suivie de sa propagation. La contrainte chute brutalement. Des liaisons résiduelles entre cristaux retardent la rupture par des tentatives de reprise des forces (brève remontée de la contrainte) accordant une légère déformation après endommagement jusqu'à ce que la rupture survienne. La véritable déformation à la rupture est considérée au moment de l'endommagement à la contrainte maximale. Ce comportement dévoile la principale faiblesse du matériau plâtre : l'allure des courbes témoigne de sa fragilité.

3.1.2.1.2.2 Module d'élasticité, résistance à la traction et allongement à la rupture En évaluant les pentes des courbes dans leurs zones linéaires, la résistance

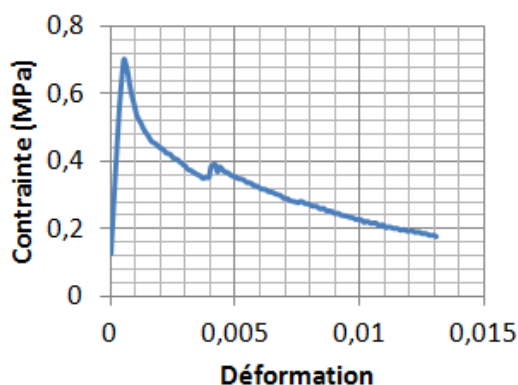


FIG. 3.8 – *Comportement en traction : courbe contrainte/déformation du plâtre non renforcé*

à la traction et l'allongement à la rupture des spécimens examinés sont déterminés, les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau 3.4.

Module d'élasticité E (GPa)	Résistance à la traction Rm (MPa)	Allongement à la rupture A (%)
1,20	0,70	2,39
1,51	0,81	0,66
1,52	0,81	0,58
1,62	0,88	1,45
1,98	0,93	1,25
2,50	1,05	0,63

TAB. 3.4 – *Comportement en traction : tableau des valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques en traction du plâtre non renforcé*

Les graphiques statistiques de ces valeurs sont représentés dans la figure 3.9.

On enregistre un module d'Young moyen du plâtre pris gâché à $E/P=1$ non renforcé de 1,72 GPa, une résistance à la traction moyenne de 0,86 MPa et un allongement à la rupture moyen de 1,16%.

3.1.2.1.2.3 Discussion et conclusion Des études menées par des auteurs [6, 49, 7] montrent une variation du module d'élasticité du plâtre pris en fonction du taux de gâchage. C'est ce paramètre de la mise en œuvre qui détermine la porosité du matériau. Une loi empirique de variation du module d'Young valable pour une porosité P comprise entre 25 et 75% est établie (équation 1.19). Le matériau étudié présente une porosité

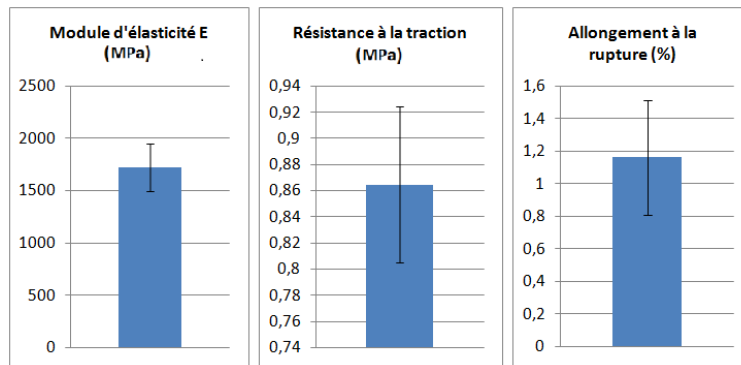


FIG. 3.9 – *Comportement en traction : graphiques des modules d'élasticité (E), résistances à la traction (R_m) et de l'allongement à la rupture ($A\%$) du plâtre non renforcé*

totale de 61,7% déterminée au chapitre 2. Une application de cette relation donne une valeur de $E=2,78$ GPa. La valeur expérimentale étant de 1,7 GPa. On note une grande dispersion des valeurs expérimentales du module d'Young (écart type 0,46 GPa) que l'on pourrait attribuer à la difficulté à réaliser un essai de traction sur le plâtre compte tenu de son extrême fragilité. Une éprouvette pouvant avoir une amorce de rupture lors de la manipulation de mise en place avant la mise en charge. Toutefois, un nombre important de valeurs se rapprochent de la valeur théorique 2,7 GPa ci-dessus calculée.

Le plâtre étudié présente une faible rigidité, il ne supporte par l'effort de traction. Sa résistance théorique à la traction $R_{th} \approx 0,27$ GPa de loin supérieure à la résistance expérimentale et son faible allongement à la rupture (1%) expriment sa fragilité. En général, les informations obtenues par l'essai de traction sont les mêmes en compression [8]. Il n'est donc pas nécessaire de réaliser un essai de compression. Par contre, le matériau que nous étudions trouve ses applications dans des domaines où des sollicitations en flexion sont immanquables. Les essais de flexion trois points sont réalisés. Les résultats sont présentés dans le paragraphe suivant.

3.1.2.2 Essai de flexion trois points

3.1.2.2.1 Matériel et méthodes Sept échantillons de plâtre non renforcés de section $40 \times 23\text{mm}^2$ et de longueur 210mm sont minutieusement découpés à la scie à ruban sur une plaque moulée de $210 \times 23 \times 297\text{mm}^3$. Elles sont sollicitées à la flexion 3 points sur la machine ZWICK-UTS 20K (figure 3.7) de pilotage et d'acquisition des données par ordinateur sous une température ambiante de 27° . La charge est appliquée à égale distance des appuis (figure 3.10) à une vitesse de $3\text{mm}/\text{mn}$ jusqu'à la rupture du matériau. La distance entre appuis L est de 155mm. La courbe effort/déplacement est tracée sur l'écran d'ordinateur et les données numériques enregistrées sont récupérables au format Excel.

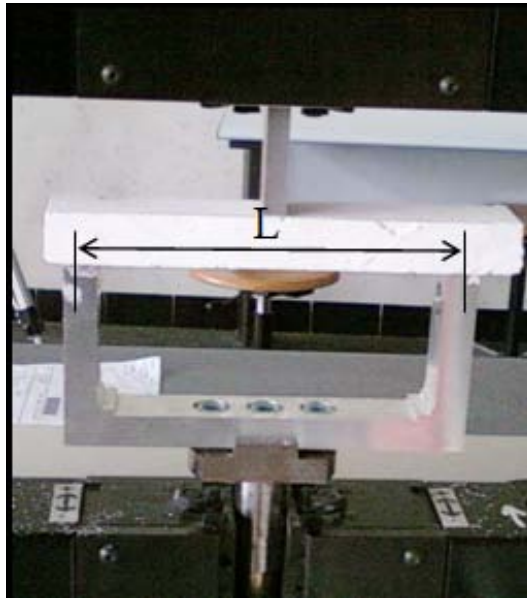


FIG. 3.10 – Comportement en flexion : disposition de l'éprouvette pour l'essai

Les données recueillies sont traitées sur EXCEL et MATLAB, le module d'élasticité et la contrainte maximale à la rupture sont déduits pour chaque éprouvette par les relations suivantes, avec l'hypothèse que le matériau est homogène et isotrope.

- Le module d'élasticité :

$$E = \frac{FL_0^3}{48fI_{GZ}} \quad (3.3)$$

avec F : l'effort limite élastique en Newtons, L_0 : la distance entre les appuis en mm , f : la flèche (déplacement enregistré) à l'effort F en mm et I_{GZ} : le moment d'inertie de la section de la poutre en mm^4 ,

- la contrainte à la rupture :

$$\sigma_{Rup} = \frac{M_{f_{max}} h}{I_{GZ}} = \frac{3 F_{Max} L_0}{2 bh^2} \quad (3.4)$$

avec F_{Max} : l'effort maximal enregistré pendant l'essai en Newtons, b , la largeur de l'éprouvette en mm et h , la hauteur de l'éprouvette en mm .

3.1.2.2.2 Résultats

3.1.2.2.2.1 Mode de rupture La courbe force/déplacement traduit le comportement de l'éprouvette pendant la sollicitation. Son allure renseigne sur le mode de rupture. La figure 3.11 présente la courbe relative au comportement d'une des éprouvettes testées.

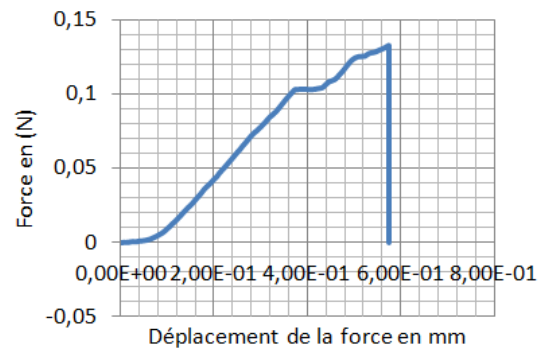


FIG. 3.11 – *Comportement en flexion: courbe force (N)/déplacement (mm) du plâtre non renforcé à $E/P=1$*

On peut y lire une rupture brutale de l'éprouvette à la sollicitation maximale. Elle confirme la remarque faite plus haut en traction : le plâtre non renforcé est fragile.

3.1.2.2.2 Module d'élasticité et contrainte à la rupture Un traitement quantitatif des résultats numériques force/déplacement sur EXCEL conduit à l'évaluation de ces caractéristiques. Le module d'élasticité et la contrainte maximale à la flexion sont calculés pour chaque échantillon testé. Les résultats numériques sont récapitulés dans le tableau 3.5.

Module d'élasticité E (GPa)		Contrainte maximale σ_{Max} (MPa)	
0,44	0,68	1,41	1,31
0,55	0,69	1,51	1,17
0,64	0,84	1,50	1,13
0,65		1,41	

TAB. 3.5 – *Comportement en flexion: tableau des valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques du plâtre non renforcé*

Un calcul statistique des moyennes et écarts types conduit aux graphiques de la figure 3.12 de l'ensemble des modules d'élasticité et des contraintes maximales obtenus.

Le plâtre étudié présente une certaine rigidité. Une fois sa limite élastique atteinte, il rompt. Non seulement il n'admet presque pas de déformation, il ne supporte pas non plus des efforts importants. La contrainte maximale enregistrée la plus élevée est de 1,38 MPa.

3.1.2.2.3 Discussion et conclusion Notons de prime abord que le plâtre non renforcé est sujet d'amorce de fissure pour la moindre erreur de manipulation. C'est donc avec délicatesse que les essais sont menés sur ce matériau. Les résultats qui en sont révélés

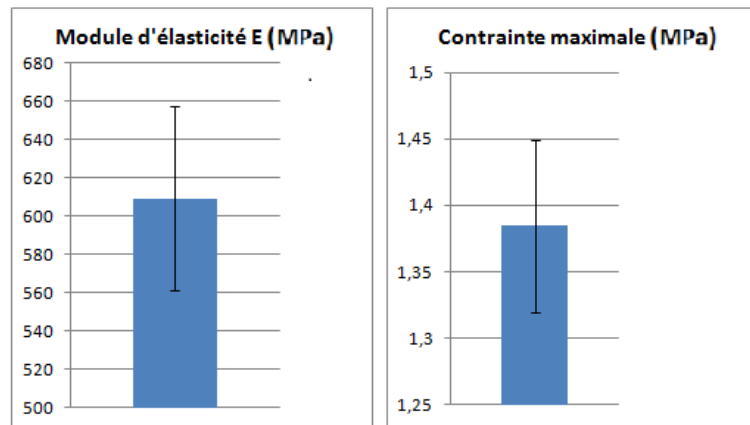


FIG. 3.12 – *Comportement en flexion : graphiques des modules d'élasticité (E) et contrainte maximale du plâtre non renforcé $E/P=1$*

le traduisent : il revient que le plâtre pris, lorsqu'il est non renforcé n'est pas ductile et est très fragile. Ces informations qui reprennent les conclusions de la caractérisation en traction viennent corroborer les résultats de nombreux travaux [6, 49, 7]. Elles confortent ainsi l'intérêt manifesté de plusieurs auteurs pour étudier son renforcement. Un des objectifs de notre travail s'inscrit dans cet axe de consolidation du plâtre.

3.1.3 Caractérisation de l'interface

3.1.3.1 Matériel et méthodes

3.1.3.1.1 Préparation des éprouvettes L'évaluation de la résistance au cisaillement de l'interface fibre/matrice est décrite dans la littérature [7, 22, 21] : elle s'effectue par le biais de plusieurs essais dont l'essai pull-out, l'essai de déchaussement de microgoutte. C'est ce dernier qui est employé dans cette étude. Elle consiste à déchausser une microgoutte de matrice préalablement déposée sur une fibre unitaire (figure 3.13 [30]).

Pour l'appliquer au composite à matrice gypse, un dispositif servant à mouler le plâtre autour d'une fibre et, pendant l'essai à tenir la matrice dans les mors de la machine est conçu et réalisé par nos soins. La figure 3.14 montre son principe d'utilisation.

Dix éprouvettes sont moulées dans le moule conçu à cet effet (figure 3.14). La longueur de fibre l_{int} dans la matrice est de 10mm, celle hors du plâtre l_{ext} , 5mm et le diamètre de la goutte, 10mm. Le diamètre de la fibre est préalablement évalué au Microscope électronique BRESSER CD MICRO (figure 3.15 c-) en pixels puis converti en *mm*.

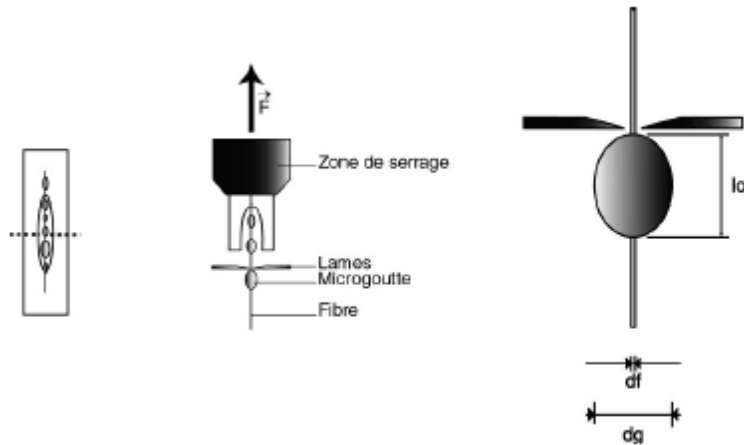


FIG. 3.13 – Comportement à l'interface : schéma simplifié d'un essai de déchaussement de microgoutte

3.1.3.1.2 Mesure et dépouillement des résultats Ce matériel (Figure 3.14) s'utilise d'abord au moulage de l'éprouvette : la fibre est introduite à travers les trous guides supérieur et inférieur. Le couvercle est fermé ; à l'aide d'une seringue, la solution de plâtre gâchée est injectée dans le moule au travers d'un orifice prévu sur le couvercle. Puis, une fois le plâtre séché, le même dispositif est utilisé tel que : le moule est tenu dans les mors de la machine d'essais par les méplats alors que le bout de fil libre est tiré par l'autre mors (spécial pour les fibres) comme le montrent le schéma et la photographie de la figure 3.14 b et c. L'ensemble est soumis à la traction à la vitesse constante de $1\text{mm}/\text{mn}$ sous une température ambiante de 27°C . La machine de traction INSTRON (figure 3.15) assistée par ordinateur est utilisée. Une courbe effort/déplacement est tracée sur l'écran d'ordinateur et les données numériques sont récupérables au format EXCEL.

La résistance au cisaillement de l'interface τ_{inf} et une caractéristique de raideur de l'interface E_{inf} , sont calculées pour chaque éprouvette testée à partir de deux modèles.

3.1.3.1.2.1 Modèle de Miller Couramment employé, ce modèle [23, 27, 30] consiste à calculer la contrainte de cisaillement apparente dans l'hypothèse de l'uniformité de la répartition des contraintes interfaciales :

$$\tau_{inf} = \tau_{app} = \frac{F_{Max}}{S_{inf}} \quad (3.5)$$

F_{Max} est la force maximale et S_{inf} l'aire de l'interface en mm^2 ; $S_{inf} = \pi \delta l_{int}$ avec δ , le diamètre de la fibre en mm et L_{inf} en mm, la longueur enchâssée de la fibre dans la matrice.

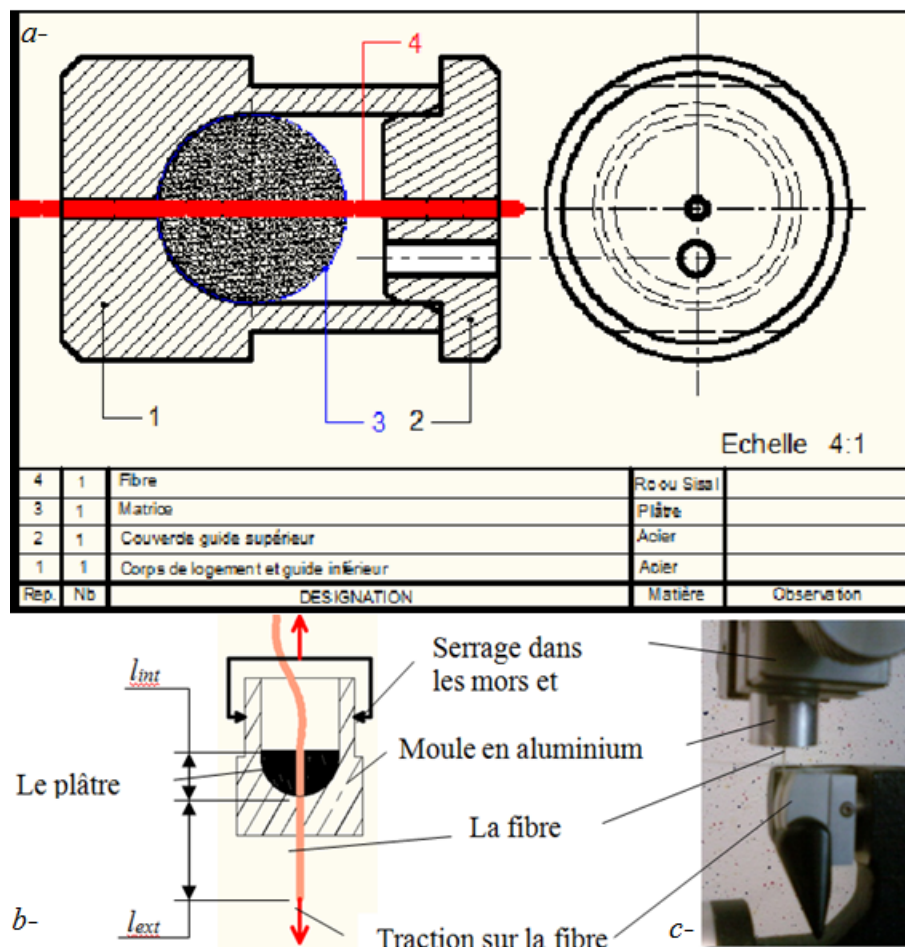


FIG. 3.14 – Comportement à l'interface : a- dessin d'ensemble du dispositif d'essai, b- schéma simplifié du principe de l'essai et c- photographie de l'essai de déchaussement en cours

3.1.3.1.2.2 Etude d'un autre modèle Dans la pratique de l'essai, la force sur la fibre est appliquée à une distance l_{ext} de la matrice (figure 3.14). Si on raisonne en termes de déformation, la déformation apparente induite par la contrainte du modèle ci-dessus équivaut à celle de la fibre seule avant le début du déchaussement additionnée de celle à l'interface fibre/matrice. Le souci est de quantifier de manière plus précise une caractéristique mécanique réelle de l'interface fibre/matrice. Le modèle de la figure 3.16 permet de mener la réflexion.

Assimilons la configuration qui vient d'être décrite ci-dessus à une série de deux ressorts :

Les ressorts sont soumis à la même contrainte, la déformation totale (équivalente) ϵ_{eq} est donc égale à la somme des déformations (équation 3.6) ϵ_{inf} déformation à l'interface (glissement de la fibre dans la matrice) et ϵ_{fibre} déformation de la fibre sur sa distance



FIG. 3.15 – Comportement à l'interface : machine de traction des fibres INSTRON

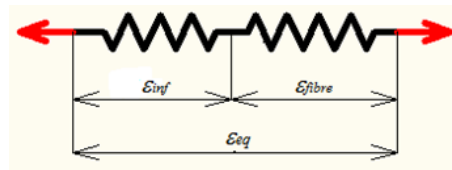


FIG. 3.16 – Comportement à l'interface : modèle à ressorts

l_{ext} (allongement).

$$\epsilon_{eq} = \epsilon_{inf} + \epsilon_{fibre} \quad (3.6)$$

La loi de Hooke permet d'écrire que l'inverse du module d'élasticité équivalent E_{eq} est la somme des inverses des modules d'élasticité, E_{inf} et E_{fibre} , respectivement de l'interface et de la fibre. Nous allons considérer que E_{inf} est un module d'élasticité.

$$\frac{1}{E_{eq}} = \frac{1}{E_{inf}} + \frac{1}{E_{fibre}} \quad (3.7)$$

Le module d'élasticité des fibres E_{fibre} est évalué sur chaque fibre déchaussée par un essai de traction identique à celui décrit au paragraphe 3.1.1.

3.1.3.2 Résultats pour le composite plâtre/sisal

3.1.3.2.1 Allure des courbes Le traitement des données numériques recueillies permet de tracer les courbes contrainte/déformation caractérisant le comportement de l'interface pendant l'essai. L'allure d'une courbe typique est montrée à la figure 3.17.

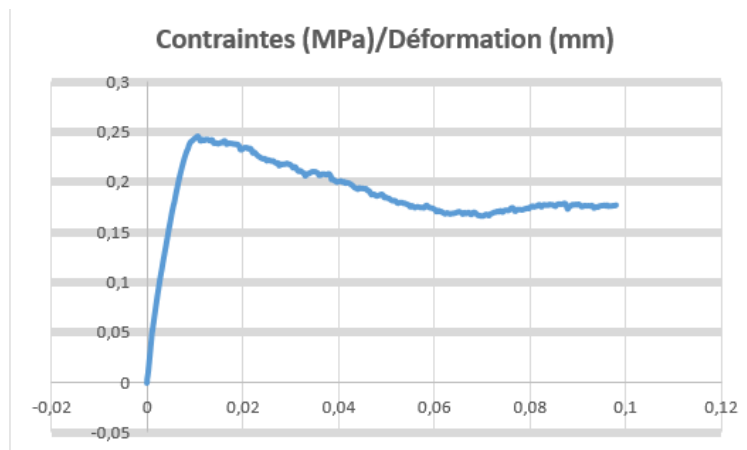


FIG. 3.17 – *Comportement à l'interface : courbe de contraintes/déformation de l'interface plâtre/sisal*

On note une zone linéaire du comportement jusqu'à la sollicitation maximale. Une chute progressive de la contrainte est suivie par l'interaction de frottement entre la fibre et la matrice. On observe que la fibre ne rompt pas avant le déchaussement c'est à dire que la contrainte de cisaillement est inférieure à la contrainte à la rupture de la fibre. L'adhésion des deux constituants ne peut donc être considérée comme étant forte.

3.1.3.2.2 Caractéristiques mécaniques de l'interface plâtre/sisal A partir des deux modèles présentés plus haut, les valeurs des caractéristiques de l'interface plâtre/fibres sont calculées et récapitulées dans le tableau 3.6.

Contrainte apparente τ_{app} (MPa)					Module d'élasticité E_{inf} (MPa)				
28,03	5,56	44,45	6,58	5,67	0,24	0,03	0,84	0,03	0,05
12,53	2,31	15,55	15,01	27,55	0,32	0,05	0,55	0,35	0,11

TAB. 3.6 – *Comportement à l'interface : paramètres mécaniques de l'interface plâtre/sisal*

La répartition statistique est donnée par les graphiques de la figure 3.18.

Il résulte de l'analyse statistique des données que la contrainte apparente moyenne de cisaillement à l'interface de la fibre de sisal et de la matrice plâtre est de 0,26 MPa avec un écart type de 0,27. Le facteur d'élasticité moyen E_{inf} est de 16,3 MPa pour un écart type de 13,3.

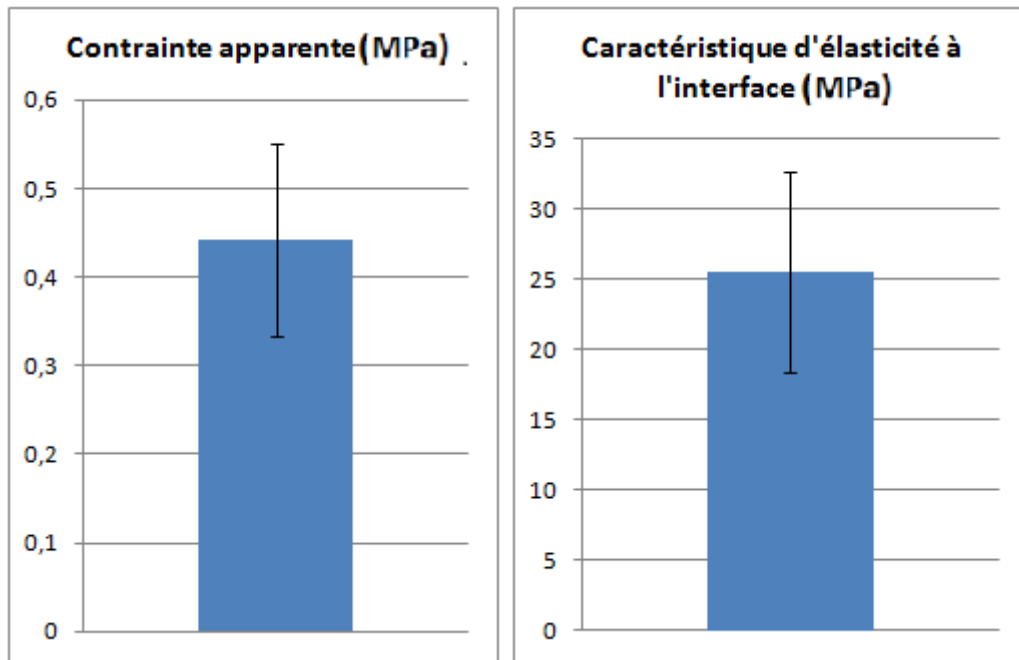


FIG. 3.18 – Comportement à l'interface : caractéristiques mécaniques de l'interface plâtre/sisal

3.1.3.3 Résultats pour composite plâtre/RC

3.1.3.3.1 Allure des courbes Le traitement des données numériques recueillies pendant l'essai s'effectue sur EXCEL et permet de tracer les courbes caractéristiques de la loi de comportement mécanique de l'interface plâtre/RC. La figure 3.19 présente la courbe d'un échantillon, elle a la forme de toutes les courbes obtenues.

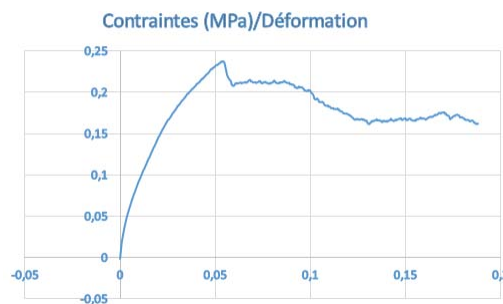


FIG. 3.19 – Comportement à l'interface : courbe de contrainte/déformation de l'interface plâtre/RC

On note une zone linéaire du comportement jusqu'à la sollicitation maximale. Une chute brutale de la contrainte survient avant que l'interaction de frottement entre la fibre

et la matrice n'apparaît. Cette décroissance brutale de la contrainte est caractéristique de la fibre. Il est à remarquer que la contrainte de cisaillement à l'interface est inférieure à la résistance en traction de la fibre, puisque la fibre ne rompt pas, ceci permet de dire que l'adhésion à cette interface est faible.

3.1.3.3.2 Caractéristiques mécaniques de l'interface plâtre/RC Les caractéristiques qui sont évaluées par la suite sont regroupées dans le tableau 3.7.

Contrainte apparente τ_{app} (MPa)					Module d'élasticité E_{inf} (MPa)				
4,38	3,62	3,33	3,57	5,00	0,14	0,18	0,08	0,16	0,20
6,31	5,93	12,68	9,34	7,10	0,42	0,24	0,81	0,20	0,39

TAB. 3.7 – Comportement à l'interface : paramètres mécaniques de l'interface RC/plâtre

Un calcul des caractéristiques statistiques de ces résultats numériques conduit aux graphes présentés dans la figure 3.20.

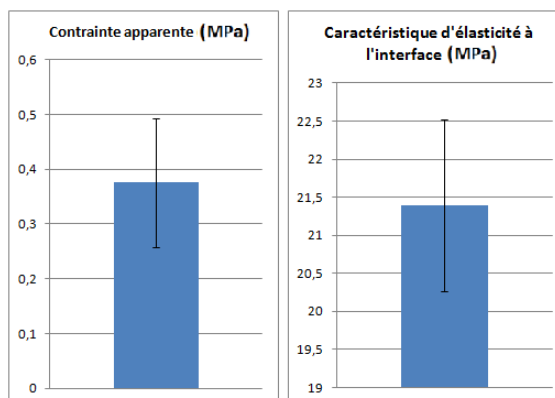


FIG. 3.20 – Comportement à l'interface : caractéristiques mécaniques de l'interface Plâtre/RC

La contrainte apparente moyenne de cisaillement à l'interface RC/plâtre est de 0,28 MPa avec un écart type de 0,21 MPa. Le facteur d'élasticité moyen est de 6,13 MPa pour un écart type de 2,97 MPa.

3.1.3.4 Discussion et conclusion

On peut observer que les valeurs des caractéristiques obtenues sont dispersées. Les valeurs trop faibles pourraient être le fait d'une amorce de décohésion lors du montage de l'échantillon dans les mors. La longueur enchâssée de la fibre ne peut pas être inférieure à

250 μm comme suggéré dans la référence [30]; toutefois, le risque de voir la fibre rompre qui inspire cette mesure de l'auteur est écarté car aucune fibre n'a rompu. La contrainte de cisaillement à l'interface fibre/plâtre apparaît faible devant les contraintes à la rupture de la matrice non renforcée (soit un quart). Les liaisons sisal/plâtre et RC/plâtre peuvent donc être classées comme faibles [21]. Il est à noter que l'essai se réalise à un taux de fibre faible (une seule fibre); les résultats apparus ici doivent être considérés comme sous estimés. Cette adhésion peu bien être plus forte avec la fraction volumique des fibres et en fonction de l'architecture du renforcement. Le composite à réaliser devrait donc présenter une adhésion interfaciale moyenne si on considère la classification faite dans la référence [21]. Le sisal offre une adhésion supérieure avec le plâtre comparativement au RC. Un traitement chimique des surfaces des fibres [53, 67, 68] pourrait améliorer cette adhésion à l'interface fibres/plâtre. Pour le RC particulièrement, le traitement devrait viser à boucher les porosités et le trou central en particulier afin de diminuer le rétrécissement de sa section lors de la traction sur la fibre.

Les caractéristiques mécaniques ont été observées en fonction de l'aire de l'interface (tableau 3.8) pour y déceler une possible linéarité. On observe plutôt une dispersion ne permettant pas d'en établir une proportionnalité. Ce fait est, à notre avis, le résultat des caractéristiques de la fibre difficiles à prédire.

Plâtre/RC			Plâtre/Sisal		
$E_{inf}(MPa)$	$\tau_{app}(MPa)$	S_{inf}	$E_{inf}(MPa)$	$\tau_{app}(MPa)$	S_{inf}
9,33	0,20	2,91	5,56	0,03	2,70
5,93	0,24	3,20	5,67	0,05	2,88
20,41	0,39	3,78	27,50	0,11	2,88
12,68	0,81	3,82	44,12	1,33	2,88
6,31	0,42	4,00	15,54	0,55	3,07
4,26	0,10	4,71	44,27	0,84	3,07
18,06	0,03	4,97	6,57	0,03	4,19
7,57	0,20	5,15	15,00	0,35	4,19
4,09	0,11	5,29	27,90	0,24	4,70
9,43	0,14	5,56	12,50	0,32	4,70

TAB. 3.8 – *Caractéristiques mécaniques de l'interface en fonction de la surface de l'interface.*

3.1.4 Conclusion sur la caractérisation des constituants

Cette première partie de la caractérisation permet de connaître les propriétés mécaniques moyennes des constituants: les fibres de sisal et de RC, la matrice plâtre et les interfaces fibre/plâtre. Les essais effectués permettent de savoir que la fibre de sisal est

raide et fragile avec 12,8 GPa de module d'Young, 300 MPa de résistance à la traction et 2,73% d'allongement à la rupture. La fibre de RC quand à elle est élastique et ductile : elle permet un allongement à la rupture de 24,2%, possède un module d'Young de 7,1 GPa et résiste à la traction jusqu'à 400 MPa. Ces résultats sont en phase avec ceux disponibles dans la littérature [12, 21, 59, 61]. Le plâtre, qui est à renforcer est raide et fragile. Ses caractéristiques révélées par les essais sont : 1,7 GPa de module d'Young, 0,90 MPa de résistance à la traction et un allongement de 1%. Les interfaces sont classées d'adhésion faible. L'étude se poursuit donc avec les composites proprement dits avec un résultat attendu des caractéristiques mécaniques améliorées du nouveau matériau par rapport à la matrice plâtre.

3.2 Caractérisation du composite plâtre/sisal

3.2.1 Essai de traction

3.2.1.1 Matériel et méthodes

Les formes et dimensions des éprouvettes utilisées sont identiques à celles indiquées au paragraphe 3.2.2.1 mais la mise en œuvre des éprouvettes est la suivante : les fibres sont d'abord disposées en cinq faisceaux de dix fibres, légèrement tendues, en unidirectionnel dans le moule et le fluide de plâtre fabriqué comme indiqué plus haut dans le paragraphe ci-dessus référencé y est versé en plus. Trente échantillons renforcés de sisal sont ainsi fabriqués.

3.2.1.1.1 Fraction volumique du renforcement Chaque éprouvette est renforcée de cinquante fibres regroupées en cinq faisceaux de dix fibres (figure 3.21), ce nombre ne correspond évidemment pas à la même fraction volumique mais notre souci est d'armer les éprouvettes de la même quantité de fibres d'autant plus que les caractéristiques des fibres sont évaluées sur chaque fibre prise individuellement.

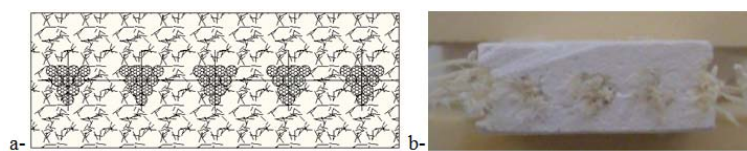


FIG. 3.21 – *Comportement en traction : section droite de l'éprouvette en traction du composite a-théorique b-réelle*

Cette proportion du renforcement est évaluée pour chaque type de fibre par déduction à partir de sa masse mesurée, sa masse volumique tirée de la littérature [12] et du volume de l'éprouvette. Les valeurs obtenues sont représentées par le graphique de la figure 3.22.

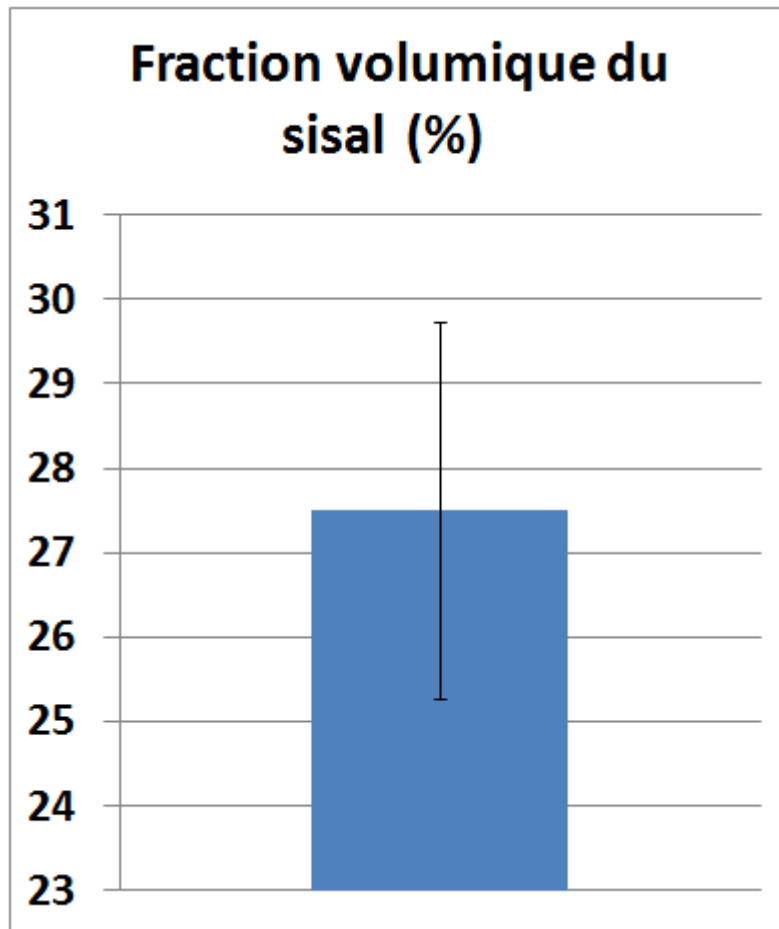


FIG. 3.22 – *Comportement en traction: graphique statistique des fractions volumiques des fibres de Sisal dans les éprouvettes de traction*

On a donc un renforcement moyen de 27,5% en volume de fibre sur les éprouvettes de composite plâtre/sisal avec un écart type de 4,46%.

3.2.1.2 Résultats

3.2.1.2.1 Mode de rupture La courbe contrainte/déformation caractéristique de la loi de comportement de ce matériau est représentée (figure 3.23).

Une zone de comportement élastique linéaire du composite est observée au début de la courbe suivie de la rupture de la matrice. Une nouvelle zone linéaire commence caractérisant le comportement des fibres jusqu'à leur rupture, à la contrainte maximale. Une diminution brusque de la contrainte survient dénotant d'une certaine fragilité du mélange plâtre/sisal, puis elle devient progressive.

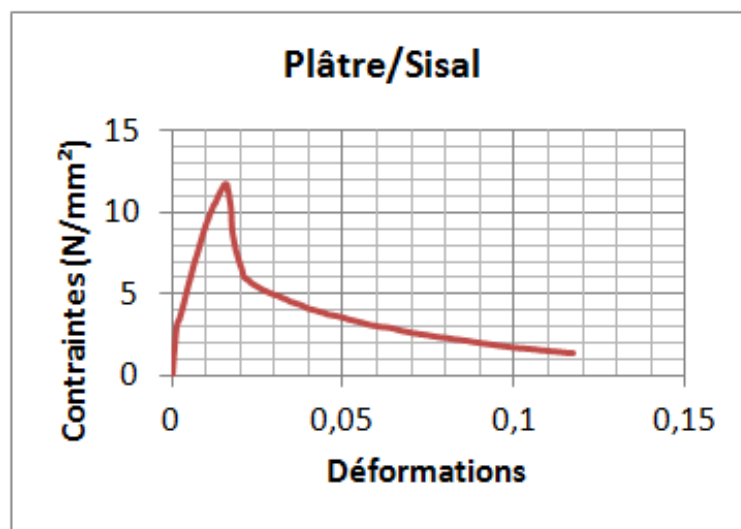


FIG. 3.23 – *Comportement en traction : courbe contrainte/déformation caractéristique de la loi de comportement du composite plâtre/sisal*

3.2.1.2.2 Module d'élasticité, résistance à la traction et allongement à la rupture L'évaluation des caractéristiques, module d'élasticité, résistance à la traction et allongement à la rupture des spécimens examinés donnent les valeurs présentées dans le tableau 3.9.

Module d'élasticité E (GPa)			Résistance à la traction Rm (MPa)			Allongement à la rupture A (%)		
1,76	2,27	2,56	4,37	7,27	8,97	23,37	8,97	0,19
1,81	2,36	2,59	5,29	7,43	9,56	20,65	10,14	15,29
1,95	2,38	2,69	5,86	7,55	10,00	53,34	7,79	9,37
1,98	2,38	2,90	5,94	7,85	10,85	24,44	12,17	7,39
2,00	2,40	3,00	6,10	7,87	11,13	53,39	19,80	9,24
2,08	2,40	3,00	6,39	7,98	11,76	26,94	9,37	12,22
2,08	2,40	3,11	6,87	8,46	11,97	61,26	8,29	13,02
2,08	2,50	3,13	7,00	8,63	12,53	119,47	8,56	11,49
2,08	2,50	3,13	7,27	8,70	12,77	46,02	10,80	9,49
2,22	2,50	3,20	7,27	8,78	13,30	15,16	1,46	9,87

TAB. 3.9 – *Comportement en traction : valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques du composite plâtre/sisal*

Une évaluation statistique de ces valeurs conduit à la construction des graphiques de moyennes et écarts types de la figure 3.24.

Il revient que les caractéristiques moyennes du composite plâtre/sisal sont de 2,5 GPa

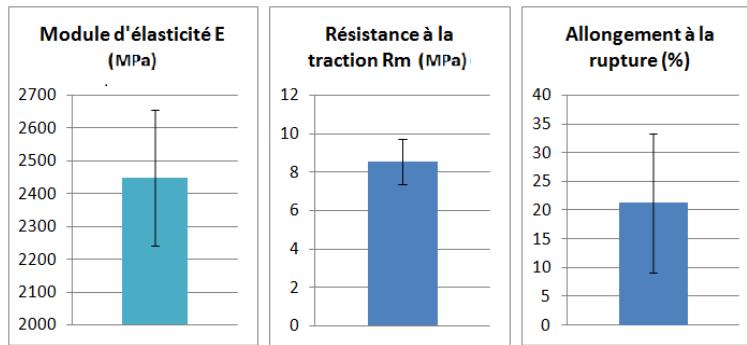


FIG. 3.24 – *Comportement en traction : graphiques statistiques des caractéristiques mécaniques du composite plâtre/sisal*

pour le module d'Young avec un écart type de 0,42 GPa ; $8,52 \cdot 10^{-3}$ GPa pour la résistance à la rupture avec un écart type de $2,35 \cdot 10^{-3}$ GPa et 21,3% pour l'allongement à la rupture avec un écart type de $24,2 \cdot 10^{-3}$ %.

3.2.1.3 Discussion et conclusion

La loi des mélanges permet d'évaluer avec une bonne approximation, le module d'Young longitudinal d'un composite unidirectionnel connaissant les caractéristiques des constituants et leur fraction volumique de fibres. Si E_f et E_m sont respectivement les modules de la fibre et de la matrice, V_f et V_m les fractions volumiques des deux constituants, on a :

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (3.8)$$

Une application de cette loi avec les valeurs expérimentales moyennes des constituants du composite plâtre/fibre, donne un module d'Young du composite plâtre/sisal égale à : $E_{pl/s} = 4,75$ GPa. Bien que les valeurs expérimentales montrent que le matériau de base a amélioré son module d'élasticité de 1,2 GPa pour le plâtre à 2,5 GPa après renforcement par le sisal, on observe une grande différence entre la valeur théorique et la valeur expérimentale 2,5 GPa. La loi de mélange considère que chaque fibre est ancrée dans la matrice, une hypothèse qui permet de comprendre cet écart de valeurs : dans la réalité, il existe des fibres qui ne participent pas au renforcement, celles situées au cœur du faisceau notamment. Lorsque les fibres sont en paquet comme c'est le cas dans les éprouvettes testées, il y en a bien qui ne participent pas au renforcement. De plus l'interface révélée faible participerait à ce faible renforcement. La résistance à la traction quant à elle est multipliée par huit et l'allongement à la rupture a également augmenté. Le plâtre se trouve être renforcé par le sisal.

3.2.2 Essai de flexion trois points

3.2.2.1 Matériel et méthodes

Les éprouvettes testées ont les mêmes formes et dimensions que celles décrites au paragraphe 3.1.2.2 et sont renforcées de fibres de sisal. Cinq spécimens sont découpés par sciage dans deux plaques de $210 \times 297 \times 23\text{mm}^3$ préalablement moulées et renforcées de la manière suivante : une plaque est renforcée par quatre couches de paquets de 20 fibres régulièrement espacées, superposées et orientées suivant quatre directions à 45° les unes par rapport aux autres $[0 / 90 / 45 / -45]$ (F4D) (figure 3.25) ; une autre plaque renforcée de fibres non orientées (FNO). Cinq autres sont moulées aux dimensions de l'éprouvette et renforcées de fibres d'orientation unidirectionnelle (F1D) suivant la longueur de l'échantillon. L'essai se déroule comme indiqué plus haut (paragraphe 3.1.2.2) sauf qu'ici, l'éprouvette est chargée jusqu'à la limite de déformation autorisée par les installations. La fraction volumique correspondante des fibres de sisal est évaluée à 1,1% en moyenne.



FIG. 3.25 – *Comportement en flexion : Orientation des fibres dans la plaque F4D*

3.2.2.2 Résultats

3.2.2.2.1 Mode de rupture Les courbes force/déplacement représentées à la figure 3.26 indiquent le comportement de chacun des trois types d'éprouvettes décrites ci-dessus pendant leur sollicitation.

Deux modes de comportement se dégagent sur les trois types d'éprouvettes :

- les courbes des éprouvettes F4D présentent deux phases : une première élastique linéaire jusqu'à la naissance de la fissuration de la matrice, une deuxième qui commence par la rupture de la matrice suivant le mode de cisaillement plan de la fissure présentée dans la référence [69], entraînant une chute de la contrainte. Cette dernière diminue progressivement par la suite, retenue par la friction du glissement des plans,

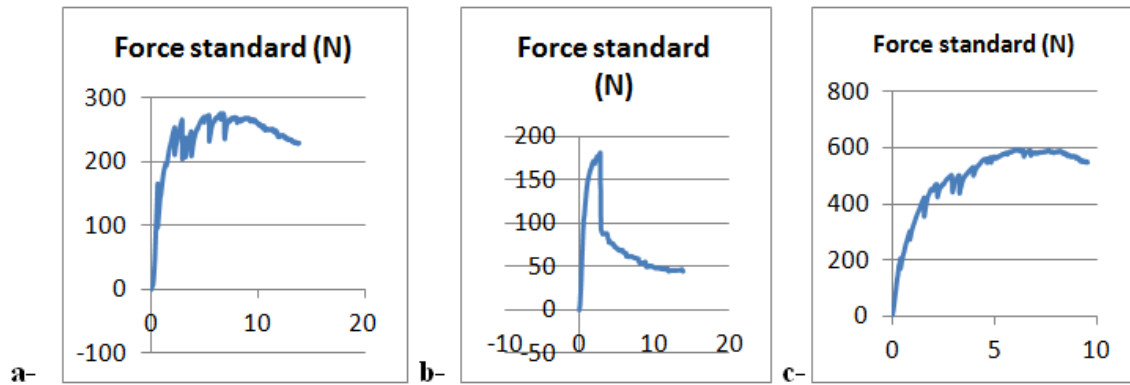


FIG. 3.26 – Comportement en flexion : Courbes forces (N)/déplacements (mm) du composite plâtre/sisal a-épreuve FNO, b-épreuve F4D, c-épreuve F1D

- les courbes des éprouvettes FNO et F1D quant à elles présentent, outre les deux phases élasticité linéaire et de rupture, une phase intermédiaire de multifissuration dans laquelle les fibres imposent une répartition homogène de la fissuration dans le composite. La résistance se poursuit jusqu'à la contrainte maximale.

3.2.2.2.2 Module d'élasticité et contrainte maximale La quantification de ce comportement conduit aux caractéristiques mécaniques de tous les spécimens testés. Le tableau 3.10 rassemble les valeurs obtenues.

Caractéristiques mécaniques	Plâtre/Sisal F4D	Plâtre/Sisal FNO	Plâtre/Sisal F1D
Module d'élasticité E (GPa)	0,42	0,50	0,57
	0,50	0,51	0,31
	0,56	0,64	0,73
	0,60	0,68	0,51
	0,65	0,69	0,46
Contrainte Maximale $R_{max}(MPa)$	1,99	2,57	3,31
	1,78	2,87	4,09
	2,12	1,96	3,75
	1,97	2,63	4,69
	1,69	2,88	4,48

TAB. 3.10 – Comportement en flexion : tableaux des valeurs des caractéristiques mécaniques des spécimens plâtre/sisal

Des calculs statistiques des moyennes et écart types permettent de construire les graphiques de la figure 3.27.

Les fibres non orientées offrent le plus grand module d'élasticité avec une moyenne

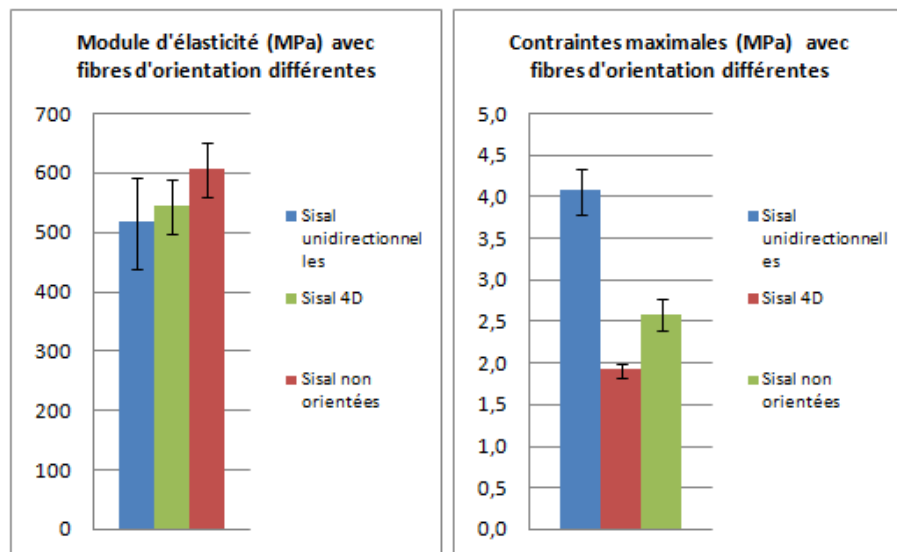


FIG. 3.27 – Comportement en flexion: graphiques des caractéristiques mécaniques des spécimens plâtre/sisal F1D, F4D et FNO

de 0,6 GPa tandis que celles d'orientation unidirectionnelle conduisent à la plus grande valeur moyenne de contrainte maximale 4,1 MPa. La structure F4D est rigide mais fragile.

3.2.2.3 Discussion et conclusion

Ce résultat révèle que la fibre de sisal n'a pas amélioré le module d'élasticité du plâtre. La faible adhésion à l'interface expliquerait ce fait. La répartition spatiale homogène des fibres dans une section droite non contrôlable pendant la mise en forme est une autre explication pertinente. Toutefois, le composite a gagné en contrainte maximale de 46% jusqu'à trois fois plus par rapport à la matrice non renforcée. Elle est améliorée de 46% par la configuration F4D des fibres, doublée par la disposition FNO des fibres et triplée par les fibres orientées unidirectionnellement. Il apparaît que les renforcements unidirectionnels et non orientés réduisent considérablement la fragilité du plâtre. Il faut noter que l'essai de flexion sur des poutres de plâtre renforcées de fibres longues ne peut pas rendre compte efficacement du niveau de renforcement des fibres tant que la répartition spatiale homogène des fibres dans le matériau n'est pas assurée.

3.3 Caractérisation du composite plâtre/RC

3.3.1 Essai de traction

3.3.1.1 Fraction volumique du renforcement

Le matériel et les méthodes utilisés ainsi que l'évaluation de la fraction volumique sont identiques à ceux indiquées au paragraphe 3.2.1.1. La fibre utilisée est le RC avec une fraction volumique moyenne de 18% (figure 3.28).

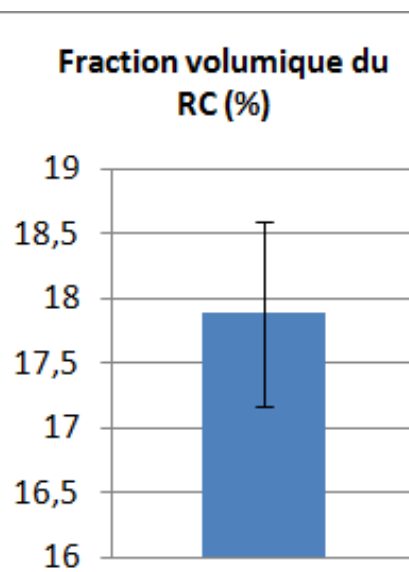


FIG. 3.28 – Comportement en traction: graphique statistique des fractions volumiques du RC dans les éprouvettes testées

3.3.1.2 Résultats

3.3.1.2.1 Mode de rupture La courbe conventionnelle contrainte/déformation caractéristique de la loi de comportement d'un échantillon de matériau plâtre/RC est représentée (figure 3.29).

Cette courbe est constituée d'une première zone de déformation élastique linéaire réversible jusqu'à l'amorce de rupture de la matrice, suivie d'une phase de reprise de charge par les fibres induisant une quasi-répartition homogène de la fissuration sur le composite jusqu'à la contrainte maximale et une dernière phase de perte de résistance progressive.

3.3.1.2.2 Module d'élasticité, résistance à la traction et allongement à la rupture Une évaluation des pentes de la zone linéaire des courbes, de la résistance à la trac-

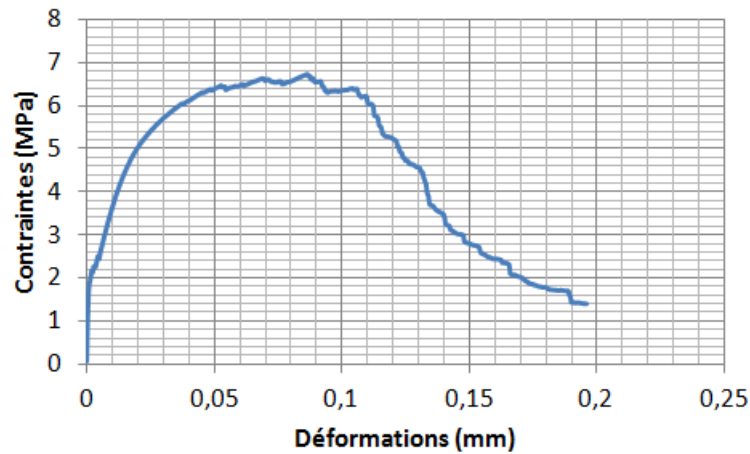


FIG. 3.29 – *Comportement en traction : courbe contraintes/déformations caractéristiques de la loi de comportement du composite plâtre/RC*

tion et de l'allongement à la rupture des spécimens testés conduit aux valeurs présentées dans le tableau 3.11.

Module d'élasticité E (GPa)			Résistance à la traction Rm (MPa)			Allongement à la rupture A (%)		
0,73	1,89	2,41	1,68	4,48	6,75	39,02	11,91	14,97
1,31	1,94	2,41	2,78	4,86	6,86	90,06	16,00	17,10
1,45	2,00	2,43	2,80	5,21	6,98	103,29	14,78	38,56
1,46	2,07	2,50	2,89	5,22	6,98	50,28	19,70	17,32
1,50	2,08	2,60	3,04	5,72	7,43	59,12	17,21	3,33
1,57	2,14	2,73	3,47	5,74	8,12	87,96	36,03	3,33
1,63	2,15	2,92	3,65	6,03	8,66	148,72	24,03	39,02
1,77	2,23		3,71	6,19		73,47	34,70	
1,77	2,25		3,90	6,32		15,89	16,35	
1,79	2,38		4,31	6,64		15,41	42,49	

TAB. 3.11 – *Comportement en traction : valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques du composite plâtre/RC*

Leurs distributions statistiques sont résumées dans les graphes de la figure 3.30.

Il en ressort que le module moyen d'élasticité est de 2 GPa, la résistance moyenne à la traction est de 5,2 MPa et l'allongement moyen à la rupture est de 39%.

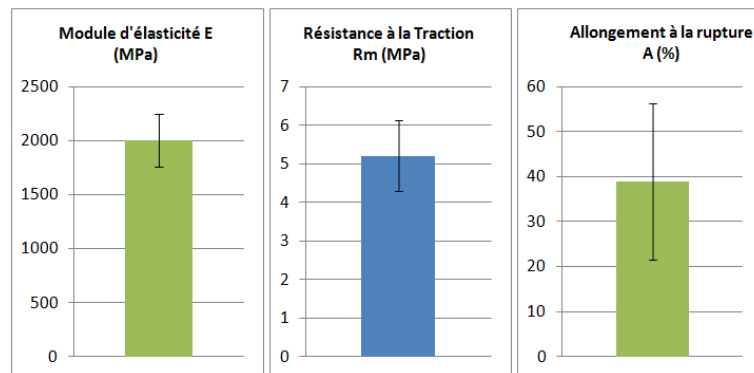


FIG. 3.30 – *Comportement en traction : graphiques des caractéristiques mécaniques du plâtre/RC en traction*

3.3.1.3 Discussion et conclusion

Ces résultats montrent que les caractéristiques mécaniques en traction du plâtre sont améliorées par les fibres de RC : en module d'élasticité, le matériau a évolué de 1,72 GPa à 2 GPa, la résistance à la traction est augmentée de cinq fois plus et l'allongement à la rupture s'est accru de près de 40%. Il faut noter qu'aucune fibre, à notre connaissance, n'a apporté au plâtre pris un tel allongement. Cependant, en comparant ces performances avec celles attendues d'après les calculs théoriques avec la loi des mélanges, on dirait qu'il n'y a pas eu de gain en module d'élasticité : 2 GPa pour une valeur attendue de 3,7 GPa. La faiblesse de l'adhésion à l'interface est une explication de ce fait ainsi que la non participation concrète et uniforme de toutes les fibres à la résistance [70], les fibres au cœur des faisceaux n'étant pas imprégnées par la matrice plâtre.

3.3.2 Essai de flexion trois points

3.3.2.1 Résultats

3.3.2.1.1 Allure des courbes Les échantillons sont renforcés de fibres de RC, comme indiqué au paragraphe 3.2.2.1 pour les fibres de sisal. Le taux de fibre moyen est de 2%. Après dépouillement, les courbes de force en fonction de la flèche sont tracées. La figure 3.31 présente l'allure typique des courbes obtenues.

Deux modes de comportement se dégagent sur les trois types d'éprouvettes :

- les courbes des éprouvettes F4D présentent deux phases : une première élastique linéaire jusqu'à la naissance de la fissuration de la matrice, une deuxième qui commence par la rupture localisée de la matrice par glissement des plans, entraînant une chute de la contrainte. Cette dernière diminue progressivement par la suite, retenue par la friction du glissement des plans.

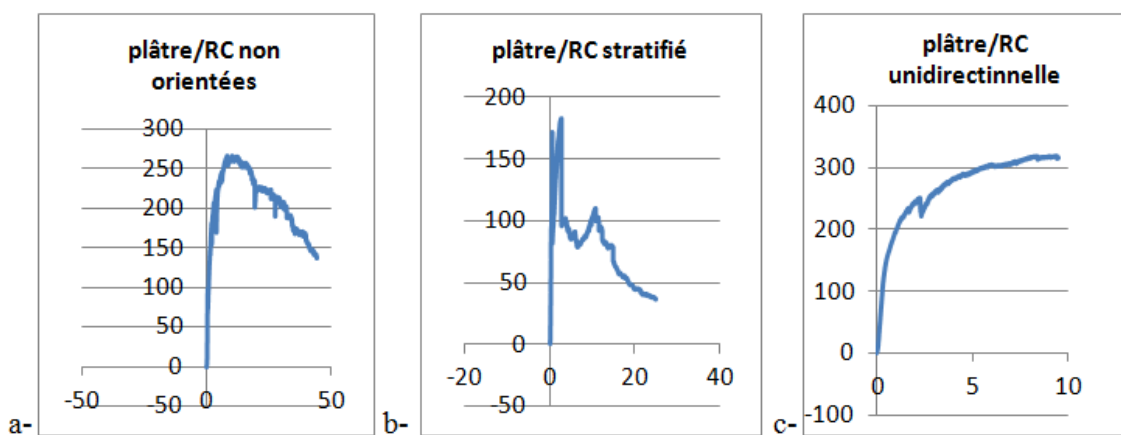


FIG. 3.31 – Comportement en flexion : allure des courbes forces (N)/flèche (mm) des spécimens renforcés de RC disposés aléatoirement (FNO), en stratifié (F4D) et en unidirectionnel (F1D)

- les courbes des éprouvettes FNO et F1D quant à elles présentent, outre les phases d'élasticité linéaire et de rupture, une phase intermédiaire de multifissuration dans laquelle les fibres imposent une répartition homogène de la fissuration dans le composite. La résistance se poursuit jusqu'à la contrainte maximale.

3.3.2.1.2 Caractéristiques mécaniques Du point de vue quantitatif, les modules d'élasticité et contraintes maximales sont calculées. Les valeurs obtenues sont rassemblées dans le tableau 3.12.

Caractéristique mécanique	Plâtre/RC F4D	Plâtre/RC FNO	Plâtre/RC F1D
Module d'élasticité E (GPa)	0,18	0,25	0,38
	0,68	0,36	0,77
	0,83	0,40	0,89
	1,00	0,80	0,67
	1,17	0,80	0,55
Contrainte Maximale à la flexion R_{max} (MPa)	1,55	3,53	2,22
	1,55	2,49	2,59
	1,23	2,94	2,93
	1,70	5,87	1,88
	1,60	2,49	3,31

TAB. 3.12 – Comportement en flexion : caractéristiques mécaniques des trois types d'échantillons testés

Les graphiques statistiques de ces caractéristiques sont représentés dans la figure 3.32.

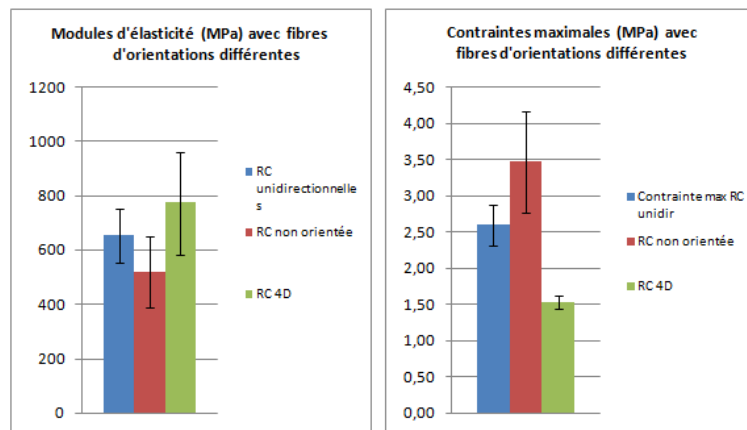


FIG. 3.32 – *Comportement en flexion : graphiques des caractéristiques mécaniques en flexion pour des orientations différentes des fibres de RC*

Le module d'élasticité le plus élevé est celui du composite F4D à 0,8 GPa avec un écart type de 0,4 GPa, suivi du composite F1D, 0,65 GPa avec un écart type de 0,2 GPa et du composite FNO à 0,5 GPa d'écart type 0,26. Par contre, c'est le composite FNO qui offre la plus grande contrainte maximale, 3,46 MPa. Le plus grand couple de valeurs (module d'élasticité/contrainte maximale) est donné par le composite F1D (0,65 GPa; 2,59 MPa). La configuration F4D ne supporte pas mieux l'effort de flexion (1,53GPa) de contrainte maximale.

3.3.2.2 Discussion et conclusion

Le composite configuré F4D augmente le module d'élasticité du plâtre de 20 %, celui noté F1D le fait de 1,5 % alors que le FNO n'atteint pas la performance de la matrice non renforcé. La faible adhésion à l'interface et la répartition non homogène des fibres dans une section sont, encore une fois, les principales causes. Toutefois, on enregistre une augmentation de la contrainte maximale de 11% pour le F4D, 150 % pour le FNO et 88% pour le F1D. On conclut que le RC apporte un renforcement sensible au plâtre quant à sa capacité à résister à une sollicitation en flexion. Il faut encore une fois noter que l'essai de flexion sur des poutres de plâtre renforcées de fibres longues ne peut pas rendre compte efficacement du niveau de renforcement des fibres tant que la répartition spatiale homogène des fibres dans le matériau n'est pas assurée.

3.4 Influence de l'architecture du RC

Les résultats de cette campagne d'essais révèlent que le RC renforce le plâtre, il devient justifiable d'examiner quelle pourrait être l'architecture des fibres qui offrirait un renforcement plus efficient. Trois géométries sont essayées à cet effet : unidirectionnelle libre (F1D) (les fibres ne sont pas retenues), unidirectionnelles tissées (F1DT) et non orientées (FNO).

3.4.1 Fibres non orientées

3.4.1.1 En traction

3.4.1.1.1 Préparation des éprouvettes Une plaque de plâtre armée de fibres de RC orientées aléatoirement (figure 3.33 -a) au taux de renforcement de 3,92% est fabriquée. Des éprouvettes y sont taillées à la scie à ruban. On obtient alors cinq éprouvettes plates de $30 \times 12 \times 210\text{mm}^3$. Des talons en matière plastique sont collés aux extrémités pour des besoins de prise dans les mors de la machine d'essai (figure 3.33-b).



FIG. 3.33 – Influence de l'architecture du RC : a- fibres non orientées dans le moule b- éprouvette de traction

3.4.1.1.2 Résultats et discussion

3.4.1.1.2.1 Allure des courbes Les données numériques recueillies permettent de construire les courbes contrainte/déformation caractérisant le comportement des échantillons testés. La figure 3.34 présente une courbe ayant l'allure des courbes obtenues.

Les courbes sont constituées d'une première partie caractérisant la phase d'élasticité linéaire du composite jusqu'à l'amorce de la fissuration de la matrice, une deuxième partie

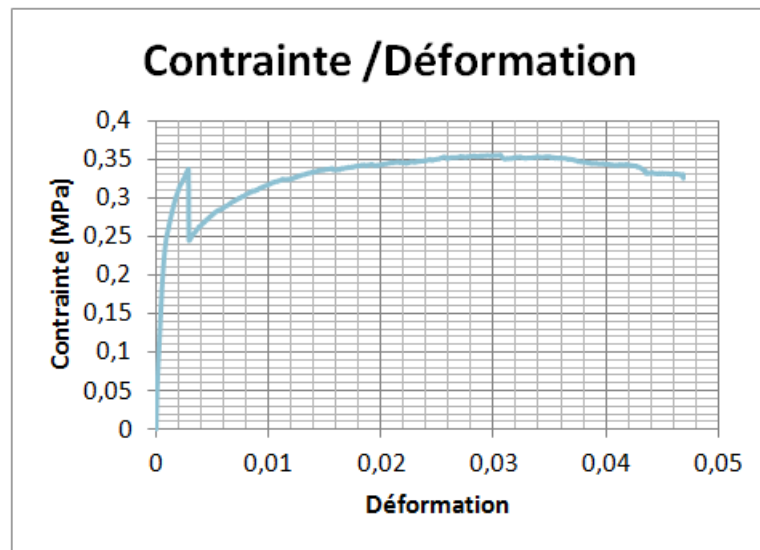


FIG. 3.34 – Courbe contrainte/déformation caractéristique du comportement des éprouvettes de RC (FNO)

caractérisée par la rupture de la matrice (figure 3.35) suivie par une reprise de charge par les fibres jusqu'à une valeur maximale de contrainte. Une dernière zone se caractérise par une diminution progressive de la contrainte justifiée par la friction du déchaussement des fibres.

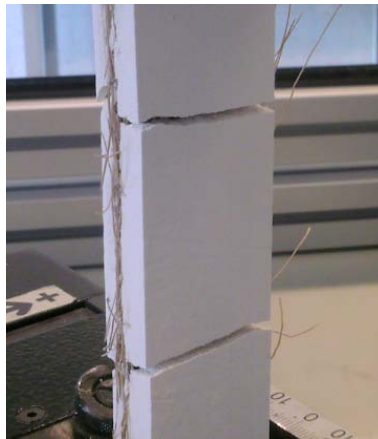


FIG. 3.35 – Comportement en traction : rupture de la matrice pendant l'essai et maintien de la résistance par des fibres

3.4.1.1.2.2 Caractéristiques mécaniques L'analyse quantitative de ces courbes conduit aux valeurs des caractéristiques mécaniques regroupées dans le tableau 3.13.

Les résultats statistiques sont synthétisés dans les graphiques de la figure 3.36.

Le composite plâtre/RC avec des fibres orientées de manière aléatoire a un module

Module d'élasticité E (GPa)	Résistance à la traction Rm (MPa)	Allongement à la rupture A%
0,60	0,35	3,06
0,68	0,38	0,19
0,64	0,42	2,04
0,69	0,51	0,83
0,60	0,40	2,25
0,66	0,40	0,09
0,69	0,41	3,77
0,50	0,23	2,83
0,67	0,56	2,28
0,64	0,73	3,31

TAB. 3.13 – *Comportement en traction: caractéristiques mécaniques des spécimens de composite plâtre/RC FNO*

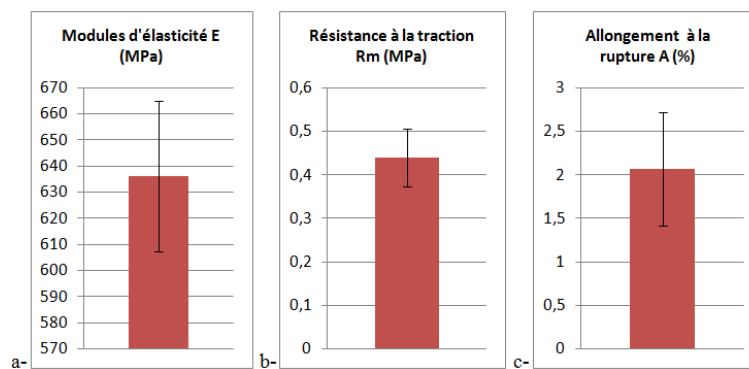


FIG. 3.36 – *Comportement en traction: graphiques statistiques des caractéristiques mécaniques des spécimens de composite plâtre/RC FNO*

d'élasticité de 0,64 GPa avec un écart type de 0,06 GPa, une résistance à la traction de 0,44 MPa d'écart type 0,13 MPa et un allongement à la rupture de 2,04% d'écart type 1,3%.

3.4.1.2 En flexion trois points

3.4.1.2.1 Préparation des éprouvettes Cinq éprouvettes de $40 \times 40 \times 29\text{mm}^3$ en plâtre renforcées de fibres de RC d'orientations aléatoires (figure 3.37) au taux de renforcement de 3,35% sont fabriquées par moulage au taux de gâchage E/P égale à 1.

3.4.1.2.2 Résultats et discussion

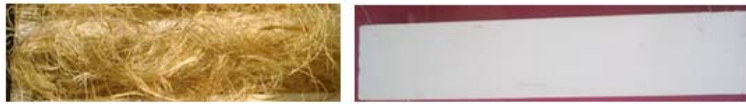


FIG. 3.37 – Influence de l'architecture des fibres : a- les fibres non orientées dans le moule b- éprouvette de flexion (FNO)

3.4.1.2.2.1 Allure des courbes Les courbes de la force appliquée en fonction de la flèche se présentent comme l'indique l'exemple de la figure 3.38.

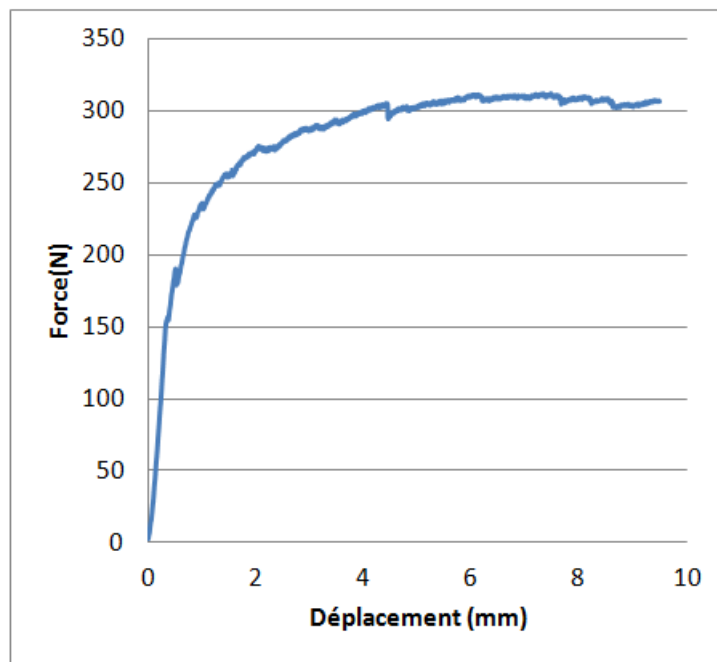


FIG. 3.38 – Influence de l'architecture des fibres : courbes forces (N)/flèche (mm) caractérisant le comportement en flexion des spécimens plâtre/RC (FNO)

L'allure des courbes révèle dans un premier temps, un comportement linéaire élastique, puis surviennent une succession de fissurations à peine visibles traduisant la dualité fissurations du plâtre et renforcement par des fibres. A la force maximale, la courbe reste constante admettant une grande déformation. Ce maintien témoigne du rôle particulier des fibres. Le plâtre, par ce renforcement devient assez ductile.

3.4.1.2.2.2 Caractéristiques mécaniques Le module d'élasticité et la contrainte à la rupture sont évalués. Les valeurs obtenues sont regroupées dans le tableau 3.14 et représentées par les graphiques de la figure 3.39.

On enregistre, pour ce matériau, un module d'élasticité de 0,36 GPa avec un écart type

Module d'élasticité (MPa)	Contrainte maximale (MPa)
0,31	2,60
0,11	2,20
0,48	2,76
0,54	2,15

TAB. 3.14 – *Comportement en flexion : caractéristiques mécaniques des éprouvettes plâtre/Rc (FNO) testées*

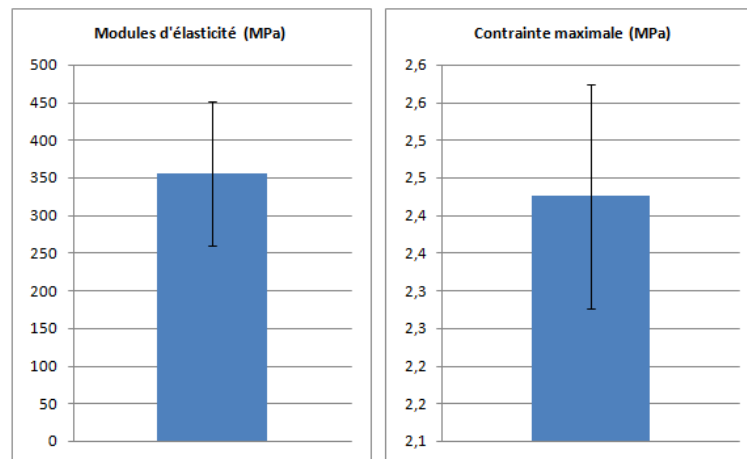


FIG. 3.39 – *Comportement en flexion : graphes des valeurs des caractéristiques mécaniques du composite plâtre/RC (FNO)*

de 0,19 GPa et une contrainte maximale de 0,3 MPa avec un écart-type de 0,04. Il revient que le module d'élasticité est de moitié celui du matériau de base alors qu'on observe plutôt une multiplication par 3 de la contrainte maximale. Notons que des auteurs [62] ont examiné l'influence du taux de fibres sur le module d'élasticité du béton en flexion et révèlent que celui-ci diminuait avec le taux de fibres. Le plâtre étant un matériau similaire, cette donnée est à considérer pour comprendre ces résultats puisque le taux de fibres est passé de 21% à 34% et le module a chuté de 0,52 GPa à 0,36 GPa. La difficulté à se garantir une répartition spatiale homogène des fibres dans le volume est une autre explication de ces résultats.

3.4.2 Fibres unidirectionnelles libres

3.4.2.1 En traction

Les éprouvettes plates (figure 3.40) de $30 \times 12 \times 210 \text{ mm}^3$ sont taillées à la scie électrique à ruban dans une plaque de plâtre de $12 \times 210 \times 297 \text{ mm}^3$ renforcée de fibres de RC à 3,92% de son volume. Les fibres sont orientées de manière à être parallèles à l'axe longitudinal

des éprouvettes finales.



FIG. 3.40 – *Éprouvette de traction du composite plâtre/RC (F1D)*

3.4.2.1.1 Résultats

3.4.2.1.1.1 Mode de rupture Les courbes représentatives de la loi de comportement en traction des éprouvettes testées sont tracées à partir des données numériques collectées pendant l'essai. La figure 3.41 montre l'allure de la courbe d'un échantillon.

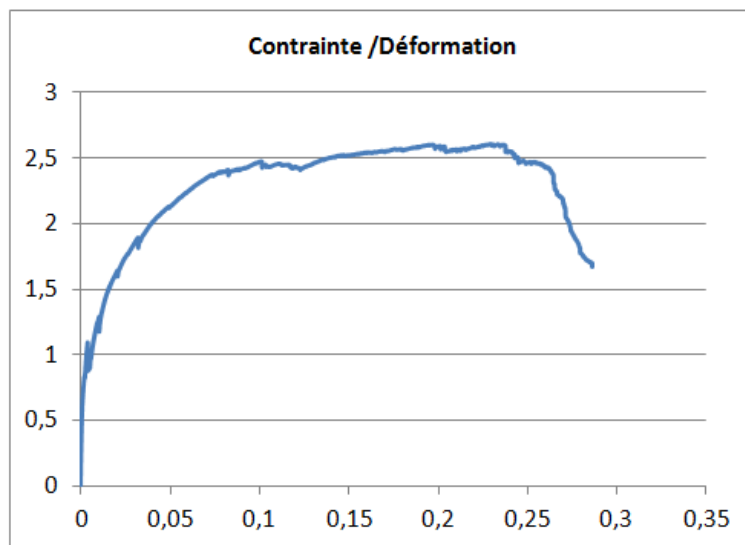


FIG. 3.41 – *Comportement en traction : courbe contraintes (MPa)/déformations d'un échantillon du composite plâtre/RC (F1D)*

On note dans un premier temps un comportement linéaire élastique, puis une zone de multifissuration de la matrice allant jusqu'à la contrainte maximale. Un quasi maintien est conservé à ce maximum admettant un grand allongement. La fonction régulatrice de la vitesse de propagation de la fissuration est encore manifestée par la présence des fibres conférant un mode de rupture ductile au matériau.

3.4.2.1.1.2 Caractéristiques mécaniques L'analyse quantitative de ce comportement donne lieu aux caractéristiques mécaniques des matériaux testés, leurs valeurs sont rassemblées dans le tableau 3.15.

Module d'élasticité E (GPa)	Résistance à la traction Rm (MPa)	Allongement à la rupture A%
0,88	0,59	1,92
0,82	2,60	22,89
0,68	0,86	2,62
0,95	3,19	22,28
0,85	2,46	16,48
1,00	1,58	5,65
0,87	3,01	24,22
0,81	0,81	3,12
0,88	1,26	3,34
0,94	0,56	0,24

TAB. 3.15 – *Comportement en traction: tableau des caractéristiques mécaniques du composite plâtre/RC (F1D)*

La distribution statistique de ces valeurs est représentée par les graphiques de la figure 3.42.

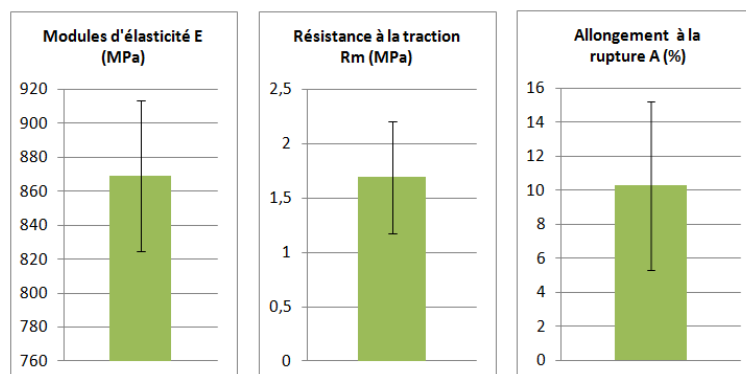


FIG. 3.42 – *Comportement en traction: graphes des caractéristiques mécaniques en traction du composite plâtre/RC F1D*

En ce qui concerne le module d'élasticité, il n'y a pas d'amélioration par l'incorporation des fibres; il connaît une baisse de 50% environ. La résistance à la traction a doublé, passant de 0,86 MPa à 1,9 MPa. L'allongement a considérablement augmenté, passant de 1,66% à 10,25%.

3.4.2.1.2 Discussion et conclusion Deux caractéristiques connaissent une augmentation par ce renforcement, il s'agit de la résistance à la traction et l'allongement à rupture. Elles confèrent au matériau, une certaine aptitude à résister à des efforts de plus en plus importants et à accepter une déformation importante sans se fragmenter. La faiblesse de l'adhésion à l'interface entre le RC et le plâtre, et le faible module d'Young de cette fibre par rapport au plâtre conduisent à la réduction du module d'élasticité du composite [71].

3.4.2.2 En flexion trois points

3.4.2.2.1 Résultats

3.4.2.2.1.1 Allure des courbes Les données numériques recueillies permettent de tracer des courbes caractéristiques du comportement du matériau pendant l'essai. Les spécimens de composite plâtre/RC avec des fibres unidirectionnelles soumis à la flexion trois points présentent un comportement décrit par la courbe force (N) en fonction de la flèche (mm) de la figure 3.43.

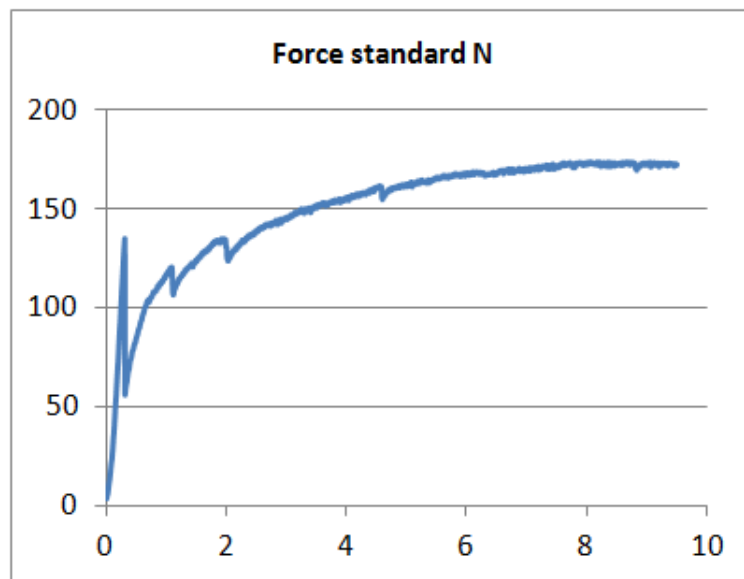


FIG. 3.43 – *Comportement en flexion : courbe force (N)/flèche (mm) caractéristique du comportement du composite plâtre/RC F1D*

Cette courbe comprend une première phase traduisant un comportement élastique linéaire, une seconde phase de microfissuration du plâtre suivie de la reprise de charge par les fibres jusqu'à la force maximale. Le nouveau matériau présente un comportement ductile.

3.4.2.2.1.2 Caractéristiques mécaniques L'analyse quantitative de ce comportement du composite permet d'identifier le module d'élasticité moyen et la contrainte maximale moyenne des échantillons testés. Les valeurs sont rassemblées dans le tableau 3.16 et les graphes de la figure 3.44 en font la synthèse de leur répartition statistique.

Module d'élasticité E (GPa)	Contrainte Maximale par flexion R_{max} (MPa)
0,73	2,56
0,52	2,77
0,39	3,46
0,70	2,84
0,701	3,09

TAB. 3.16 – *Comportement en flexion : tableau des valeurs des caractéristiques mécaniques en flexion du composite plâtre/RC (F1D)*

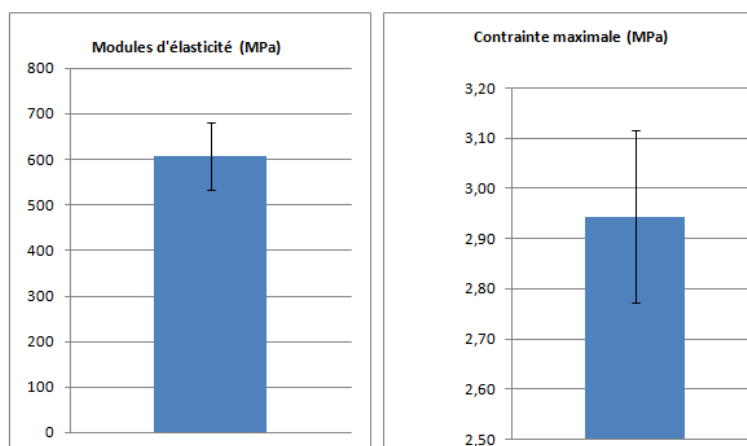


FIG. 3.44 – *Comportement en flexion : graphes des valeurs des caractéristiques mécaniques en flexion du composite plâtre/RC F1D*

Le module d'élasticité est de 0,61 GPa avec un écart-type de 0,15 GPa et la contrainte maximale de 2,94 MPa avec un écart-type de 0,34 MPa.

3.4.2.2.2 Discussion et conclusion La contrainte maximale est en augmentation alors que le module d'élasticité enregistre une légère baisse. En plus des raisons déjà évoquées qui expliquent ce type de résultat, il faut ajouter que la répartition spatiale des fibres dans le matériau pendant la mise en œuvre influence grandement le comportement du matériau en flexion. Une plus ou moins forte présence des fibres loin de la fibre moyenne

de la poutre devrait plus ou moins renforcer la tenue en flexion de l'éprouvette. La fragilité du matériau plâtre est atténuée par ce renforcement.

3.4.3 Fibres tissées

3.4.3.1 Fabrication du tissu

Un métier à tisser est conçu et fabriqué par nos soins (figure 3.45) ; les fibres de RC, fils de trame et de chaîne, utilisées pour tisser les renforts sont des multi-filaments (3 au maximum). Les fils de chaîne sont espacés de 12mm entre eux. Le tissu obtenu est de dimensions $600 \times 500 \text{mm}^2$ d'armure toile (un pris, un sauté). Cette configuration du tissu dans le composite est assimilée à l'unidirectionnel.



FIG. 3.45 – Fabrication du tissu de RC: a- métier à tisser b-opération de tissage en cours c- tissu de RC

3.4.3.2 Essai de traction

3.4.3.2.1 Préparation des éprouvettes Une plaque de plâtre de $12 \times 210 \times 297 \text{mm}^3$ armée d'une feuille du tissu de fibres de RC est fabriquée, le taux de fibres évalué est de 3,92%. Neuf éprouvettes de $30 \times 12 \times 210 \text{mm}^3$ sont, par la suite, découpées à la scie au diamant. Des talons en plastique sont collés aux extrémités des éprouvettes pour la prise dans les mors de la machine d'essais (figure 3.46).



FIG. 3.46 – Comportement en traction: éprouvette plâtre/RC renforcée du tissu de fibres (F1DT)

3.4.3.2.2 Résultats

3.4.3.2.2.1 Mode de rupture A partir des données numériques collectées pendant l'essai, les courbes représentatives caractéristiques de la loi de comportement en traction des spécimens de plâtre/RC à renfort tissé sont construites. La figure 3.47 montre l'allure d'une de ces courbes pour un échantillon.

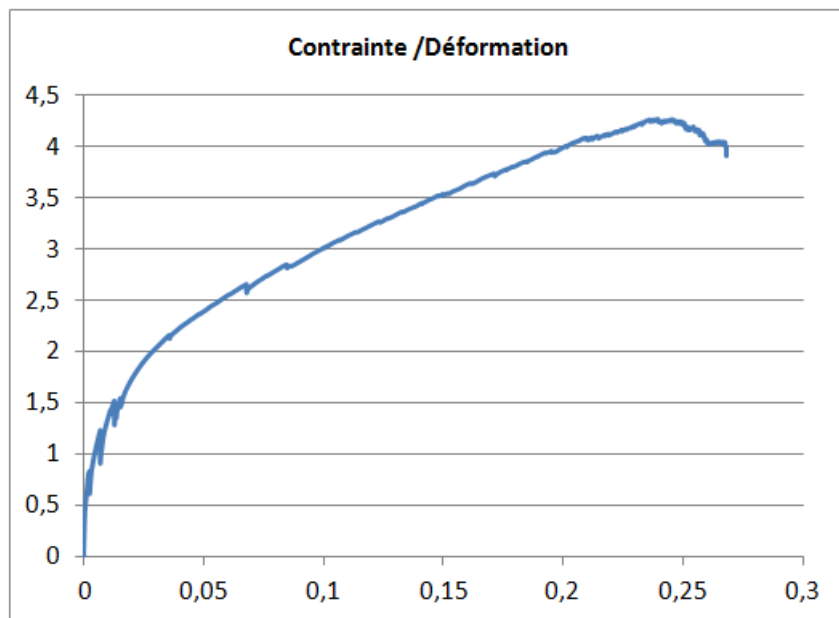


FIG. 3.47 – *Comportement en traction : courbe contrainte/déformation du composite plâtre/RC Tissé (F1DT)*

Les courbes présentent une allure caractéristique d'un matériau ductile. Trois phases sont identifiables : une première phase de comportement élastique linéaire, une seconde de microfissuration du plâtre suivie de la reprise de charge par les fibres jusqu'à la force maximale.

3.4.3.2.2.2 Caractéristiques mécaniques Des caractéristiques mécaniques sont déduites et calculées à partir de ces courbes. Le tableau 3.17 rassemble les valeurs trouvées et la figure 3.48, leur répartition statistique.

Les résultats révèlent que le module d'élasticité ne s'est pas amélioré par rapport à celui du plâtre. En revanche, la résistance à la traction et l'allongement à la rupture se sont améliorés.

3.4.3.2.3 Discussion et conclusion Cette architecture, par comparaison aux deux précédentes, présente des capacités à renforcer le plâtre en traction avec efficacité. Les mêmes caractéristiques que précédemment connaissent une augmentation par ce renforcement, il s'agit de la résistance à la traction et l'allongement. Elles confèrent au matériau,

Module d'élasticité E (GPa)	Résistance à la traction Rm (MPa)	Allongement à la rupture A%
0,77	3,28	20,66
0,60	3,89	24,47
1,18	4,28	23,91
1,15	4,41	27,66
1,13	4,06	23,60
1,20	3,45	17,89
1,27	3,76	23,37
1,08	3,95	23,01

TAB. 3.17 – *Comportement en traction : tableau des valeurs des caractéristiques mécaniques des éprouvettes plâtre/RC à renfort tissé (F1DT)*

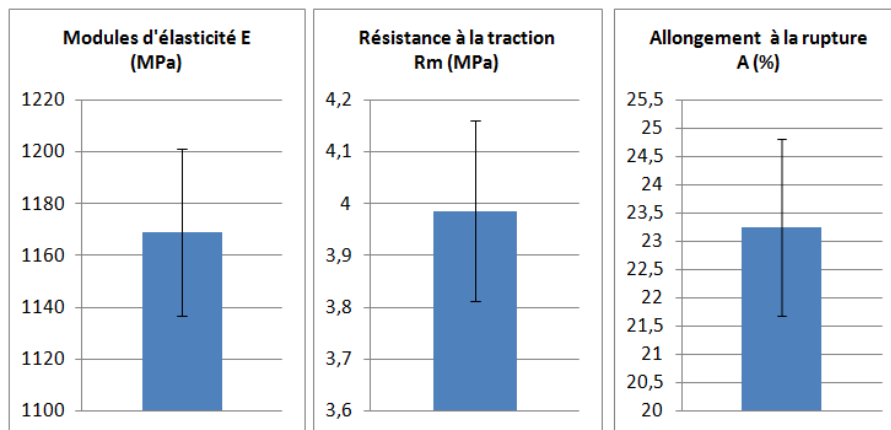


FIG. 3.48 – *Comportement en traction : graphiques des valeurs moyennes des caractéristiques du composite plâtre/RC à renfort tissé (F1DT)*

une grande aptitude à résister à des efforts de plus en plus importants et à accepter une déformation importante sans se fragmenter. Le module d'élasticité demeure faible. Les plus faibles valeurs seraient imputables à des possibles amorces de rupture de la matrice pendant la mise en position de l'éprouvette.

3.4.3.3 Essai de flexion trois points

3.4.3.3.1 Préparation des éprouvettes Cinq poutrelles de plâtre de $40 \times 40 \times 29\text{mm}^3$ sont moulées, renforcées du tissu de fibres de RC. Le morceau de tissu est disposé en deux plis dans le matériau (figure 3.49). Il est préalablement pesé pour le calcul de la fraction volumique. La fraction volumique de fibre est évaluée à 3,92%. La solution de

plâtre est préparée au taux de gâchage E/P égale à 1.



FIG. 3.49 – *Comportement en flexion: éprouvette de flexion à renfort tissé a- configuration possible du tissu dans le matériau, b- éprouvette de flexion du composite plâtre/fibres*

3.4.3.3.2 Résultats

3.4.3.3.2.1 Allure des courbes Les courbes force/flèche tracées à partir des données recueillies pendant l'essai présentent l'allure de celle de la figure 3.50.

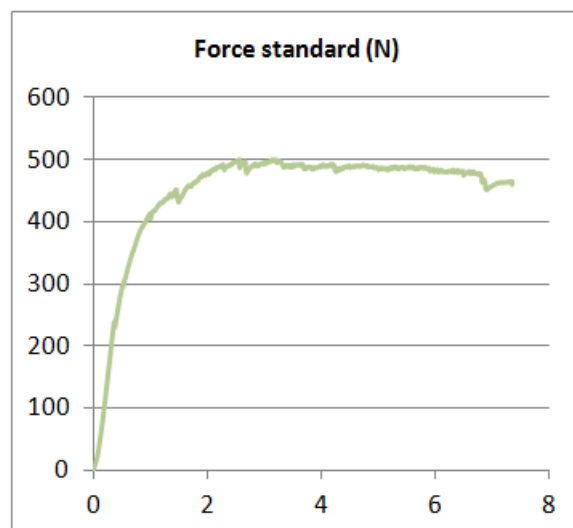


FIG. 3.50 – *Comportement en flexion: courbe force/flèche caractérisant le comportement du composite plâtre/RC à renfort tissé.*

Les courbes ont la même allure que celles de la configuration précédente présentant les mêmes phases notamment, un comportement linéaire élastique dans un premier temps, puis une zone de fissurations jusqu'à la force maximale et un maintien jusqu'à la baisse de la résistance des fibres. Une allure qui est loin d'être caractéristique d'un matériau fragile.

3.4.3.3.2.2 Caractéristiques mécaniques Une analyse quantitative de ces courbes conduit aux valeurs des caractéristiques mécaniques regroupées dans le tableau 3.18. Les

graphes représentatifs de la distribution statistique de ces valeurs sont présentés à la figure 3.51.

Module d'élasticité E (GPa)	Contrainte Maximale par flexion R_{max} (MPa)
0,31	2,45
0,11	2,57
0,48	1,20
0,53	1,90
0,31	1,90

TAB. 3.18 – *Comportement en flexion: graphes des valeurs des modules d'élasticité et des contraintes maximales du composite plâtre/RC à renfort tissé*

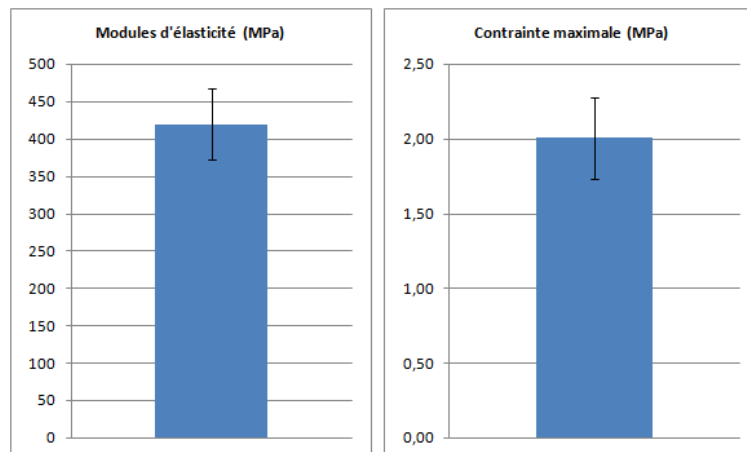


FIG. 3.51 – *Comportement en flexion: graphes statistiques des caractéristiques mécaniques du composite plâtre/RC à renfort tissé*

Le module d'élasticité enregistré est de 0,42 GPa avec un écart type de 0,09 GPa. La contrainte maximale est de 2 MPa pour un écart type de 0,54 MPa.

3.4.3.3.3 Discussion et conclusion Dans le cas de la flexion, cette configuration est propice à une rupture par glissement et ne réduit donc pas la fragilité de la matrice de manière sensible. Il faut ajouter que le tissu s'oppose à l'infiltration du plâtre entre les fibres, ce qui augmente son risque de céder au glissement. La contrainte maximale est toujours améliorée.

3.5 Etude comparative des résultats

Comme nous l'avons annoncé au premier chapitre, ce travail se préoccupe de caractériser le composite plâtre/RC avec pour référence le composite plâtre/sisal déjà connu et largement utilisé. Nous avons ci-dessus mené un ensemble de mesures expérimentales de caractérisation mécanique sur les deux matériaux. Nous présentons ci-dessous, une étude comparative des caractéristiques mécaniques des composites plâtre/sisal et plâtre/RC. Les caractéristiques du plâtre non renforcé permettent d'apprécier le degré de renforcement créé par les deux fibres.

3.5.1 Traction

Le tableau 3.19 récapitule les caractéristiques mécaniques expérimentales obtenues par traction sur les matériaux plâtre non renforcé et composites plâtre/fibres, à un taux de fibres moyen de 2%, ainsi que leurs valeurs théoriques calculées par la loi des mélanges. Des graphiques (figure 3.52) permettent de visualiser les performances des composites par comparaison au matériau de base non renforcé.

Matériau	Fraction volumique (%)	Module d'élasticité E			Résistance à la traction Rm			Allongement à la rupture	
		E (GPa)	Ecart type	Valeurs théoriques	Rm (MPa)	Ecart type	Valeurs théoriques	A%	Ecart type
Plâtre		1,72	0,46	2,78	0,86	0,12		1,16	0,70
Plâtre/Sisal	0,28	2,45	0,42	4,76	8,52	2,35	83,95	21,30	24,20
Plâtre/RC	0,18	2,00	0,49	2,69	5,20	1,83	68,10	38,89	34,82

TAB. 3.19 – *Tableau comparatif des caractéristiques mécaniques en traction des composites plâtre/sisal et plâtre/RC*

On observe que les composites présentent des caractéristiques mécaniques (module d'Young, résistance à la traction et allongement à la rupture) améliorées par rapport au plâtre de 16,5 à 42.3% pour le module d'élasticité, multipliées de 6 à près de 10 fois plus pour la résistance à la traction et de 20 à plus de 300 fois plus pour l'allongement à la rupture.

3.5.2 Flexion

Le tableau 3.20 récapitule, par analogie au tableau 3.19, les caractéristiques mécaniques expérimentales obtenues par essai de flexion sur les matériaux plâtre non renforcé et composites plâtre/fibres, à un taux de fibres moyen de 1,1% pour le sisal et 2% pour le RC, ainsi que leurs valeurs théoriques calculées par la loi des mélanges. Des graphiques (figure 3.53) permettent de visualiser les performances des nouveaux matériaux par comparaison au plâtre, matériau de base non renforcé.

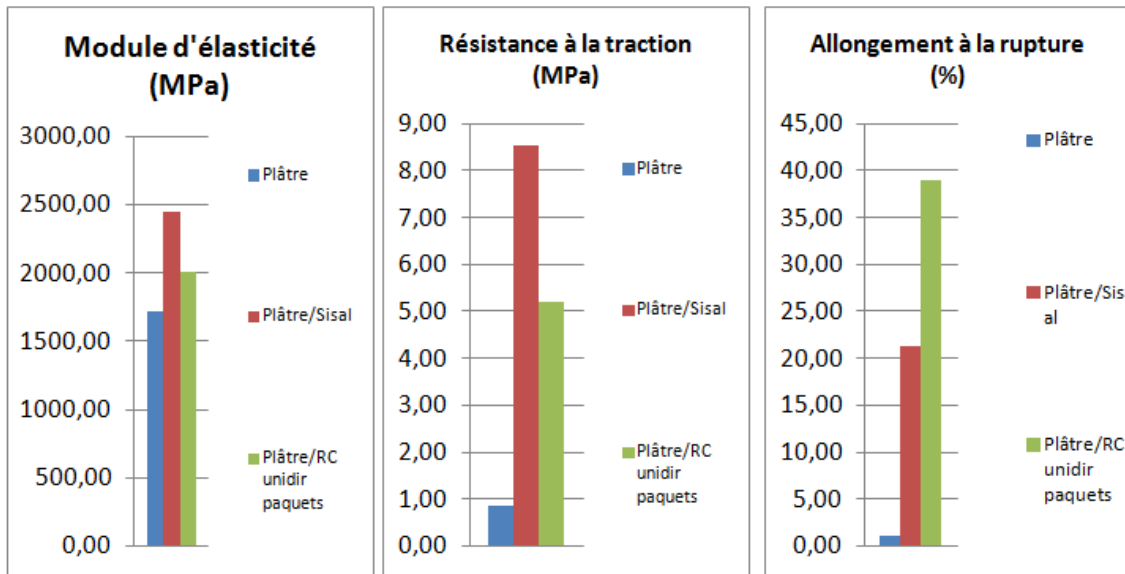


FIG. 3.52 – Comparaison des caractéristiques mécaniques en traction

Matériau	Fraction volumique(%)	Module d'élasticité E			Contrainte Max σ_{Max}	
		E (GPa)	Ecart type	Valeurs théoriques	σ_{Max} (MPa)	Ecart type
Plâtre	100	0,642,08	-	-	1,39	0,13
Plâtre/Sisal F1D	1,12	0,515,92	0,15	2,00	4,1	0,56
Plâtre/Sisal F4D	1,08	0,543,89	0,09	1,96	1,91	0,38
Plâtre/Sisal FNO	0,98	0,605,39	0,09	1,83	2,28	0,17
Plâtre/RC F1D	1,60	0,651,41	0,20	1,67	2,59	0,56
Plâtre/RC F4D	2,32	0,772,09	0,38	2,14	3,46	0,45
Plâtre/RC FNO	2,07	0,520,12	0,26	1,98	1,53	1,75

F1D: Fibres d'orientation unidirectionnelle, F4D: Fibres d'orientation [0, 90, 45, -45], FNO: Fibres d'orientation aléatoire.

TAB. 3.20 – Tableau comparatif des caractéristiques mécaniques en flexion des composites plâtre/sisal et plâtre/RC

Il en ressort que seule la fibre de RC, dans les configurations fibres orientées, a apporté un plus au module d'élasticité. Cependant, le composite plâtre/fibres (avec le sisal tout comme avec le RC) offre une contrainte maximale à la flexion plus grande que le matériau de base seul. Ici, l'orientation des fibres en unidirectionnel donne les meilleures performances pour les deux fibres, la fibre de sisal renforçant nettement mieux que le RC.

3.5.3 Influence de l'architecture du RC

3.5.3.1 Traction

Les caractéristiques mécaniques expérimentales obtenues par traction sur des éprouvettes renforcées de fibres de RC selon trois architectures différentes, au même taux de

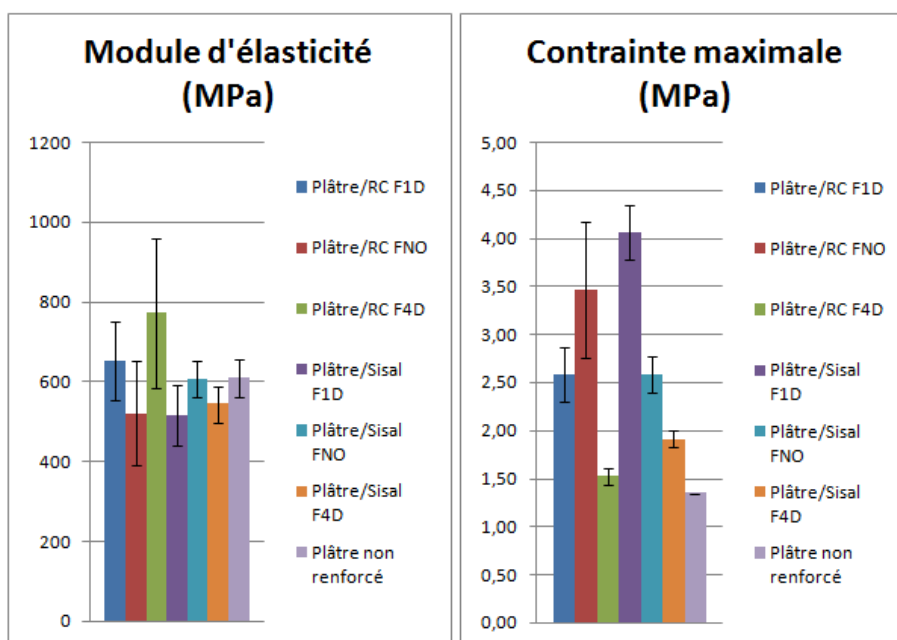


FIG. 3.53 – Comparaison des caractéristiques mécaniques en flexion 3 points

renforcement (0,39%), sont rassemblées à côté des valeurs théoriques obtenues par calcul avec la loi des mélanges dans le tableau 3.21. Une visualisation par des graphiques est faite à la figure 3.54.

Matériau	Fraction volumique (%)	Module d'élasticité E			Résistance à la traction Rm			Allongement à la rupture A	
		E (GPa)	Ecart type	Valeurs théoriques	Rm (MPa)	Ecart type	Valeurs théoriques	A%	Ecart type
Plâtre	100	1,72	0,46	2,78	0,86	0,12	-	1,16	0,70
Plâtre/RC FT	0,39	1,17	0,06	3,83	3,99	0,35	147,30	23,24	3,12
Plâtre/RC FNO	0,39	0,64	0,06	3,83	0,44	0,13	147,30	2,07	1,29
Plâtre/RC F1D	0,39	0,87	0,09	3,83	1,69	1,03	147,30	10,28	9,92

TAB. 3.21 – Tableau comparatif de l'influence de l'architecture des fibres sur les caractéristiques mécaniques en Traction du composite plâtre/RC

On observe plutôt un affaiblissement du module d'Young mais une résistance à la traction et un allongement à la rupture accrus. La configuration tissée des fibres de RC est la plus adaptée. Elle multiplie par 4 la résistance à la traction avec une atténuation de l'allongement à la rupture par rapport aux fibres unidirectionnelles libres. Ce qui est compréhensible, la compacité des fibres dans le tissu le rendrait moins élastique.

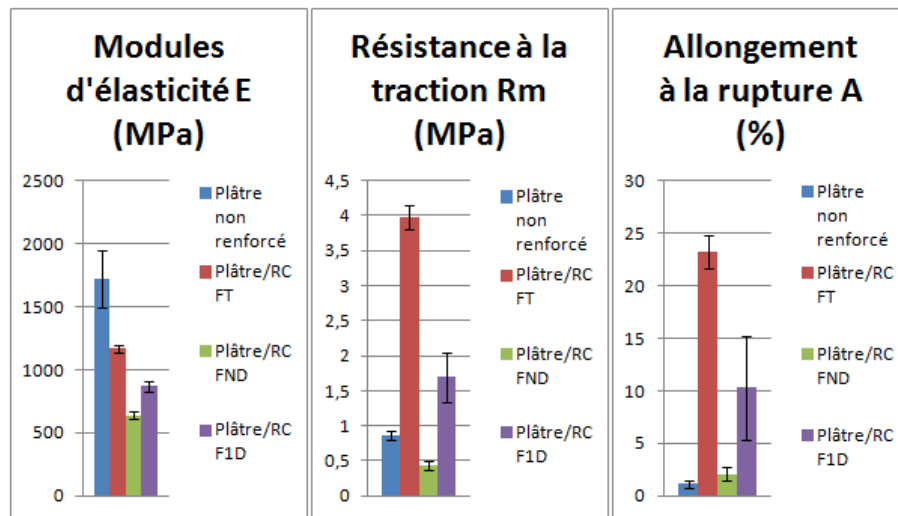


FIG. 3.54 – Comparaison de l'influence de l'architecture des fibres sur les caractéristiques mécaniques en Traction du composite plâtre/RC

3.5.3.2 Flexion

Les caractéristiques mécaniques expérimentales obtenues par flexion sur des éprouvettes renforcées de fibres de RC selon trois architectures différentes, au même taux de renforcement (0,39%), sont rassemblées dans le tableau 3.22 de la même manière que précédemment avec leurs valeurs théoriques. Une visualisation par des graphiques est aussi faite par la suite (figure 3.5.3.2).

Matériau	Fraction volumique(%)	Module d'élasticité E			Contrainte Max σ_{Max}	
		E (GPa)	Ecart type	Valeurs théoriques	σ_{Max} (MPa)	Ecart type
Plâtre	100	0,64	-	-	1,38	0,02
Plâtre/RC FT	3,34	0,42	0,09	2,80	2	0,07
Plâtre/RC FNO	3,37	0,36	0,19	2,82	2,4	0,04
Plâtre/RC F1D	3,34	0,61	0,15	2,80	2,94	0,04

TAB. 3.22 – Tableau comparatif de l'influence de l'architecture des fibres sur les caractéristiques mécaniques en Flexion du composite plâtre/RC

Il est révélé, là aussi, une réduction du module d'élasticité mais une multiplication de la contrainte maximale au moins par 2. L'architecture des fibres unidirectionnelles non liées fournit le plus grand apport mécanique en flexion. C'est parce qu'elles ont une forte probabilité de se répartir dans le volume de l'éprouvette.

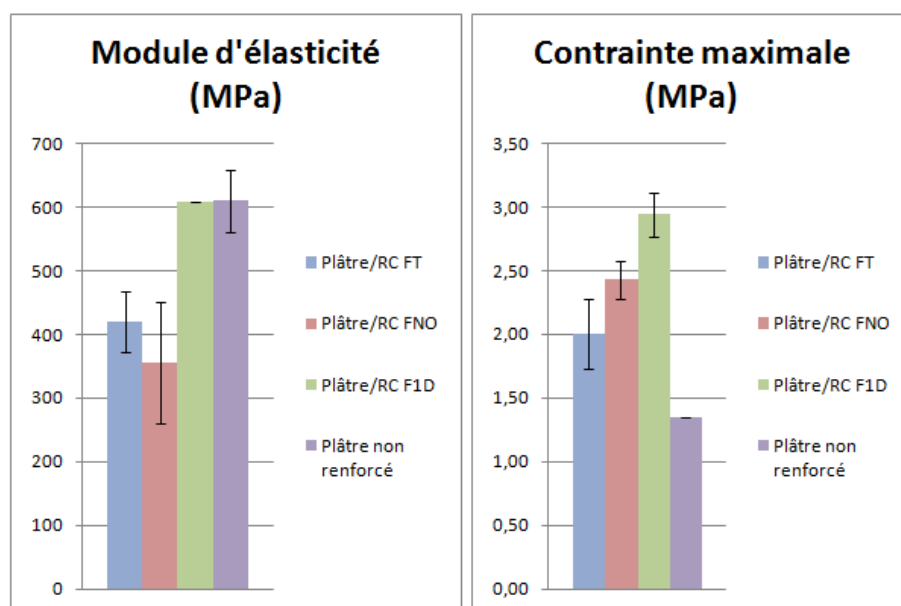


FIG. 3.55 – comparaison de l'influence de l'architecture des fibres sur les caractéristiques mécaniques en Flexion du composite plâtre/RC

3.5.4 Conclusion sur l'étude comparative

Le sisal est une fibre dite dure avec un module d'élasticité compris entre 9 et 21 GPa [12, 61] admettant un allongement à la rupture de 3 à 7% et une contrainte à la rupture par traction de 350 à 700 MPa. Les résultats qui sont révélés ici de son renforcement du plâtre par comparaison à la fibre de RC ne surprennent guère. On comprend aisément que la fibre de sisal prenne le dessus sur le RC en ce qui concerne l'apport en module d'élasticité au plâtre et la résistance à la rupture par traction ou par flexion. Le RC se révèle plus disposé à l'allongement à la rupture selon les résultats de la référence [12] confirmés par les essais effectués au cours de cette étude. Naturellement, le renforcement du plâtre avec cette fibre lui confère un allongement considérable jamais réalisé par une fibre. Elle garde une bonne proximité au sisal en ce qui concerne les résistances à la rupture.

3.6 Conclusion

Au terme de cette étude de caractérisation mécanique du plâtre renforcé par des fibres de RC par référence aux fibres de sisal, des informations précises se dégagent :

- en traction, le plâtre améliore sa tenue mécanique suite au mélange avec les fibres de sisal et de RC. La fibre de sisal augmente mieux le module d'élasticité et la résistance à la traction par rapport à celle de RC. Par contre, cette dernière confère au plâtre un allongement considérable. Elle serait adaptée pour une sollicitation admettant

de grandes déformations,

- En flexion, les fibres de RC orientées pourraient apporter une amélioration du module d'élasticité du plâtre. Il est noté que l'orientation des fibres en unidirectionnel donne les valeurs les plus élevées des résultats, le sisal renforçant mieux.

En s'intéressant à l'arrangement des fibres de RC dans le matériau, il est confirmé que l'architecture des fibres a bien une influence sur la tenue mécanique du composite. Les résultats révèlent toutefois qu'un taux de fibres élevé affaiblit la rigidité du composite plâtre/fibres par similitude au béton qui diminue son module d'élasticité avec le taux du renforcement [70] :

- en traction, l'architecture tissée du RC offre les plus grandes performances au plâtre. elle serait la mieux adaptée pour le renforcement du plâtre et certainement mieux pour le renforcement d'autres matrices,
- en flexion, l'orientation unidirectionnelle libre des fibres se révèle la plus intéressante parce qu'elle permet une répartition du renfort dans tout le volume de l'éprouvette. La structure tissée présente plutôt une distribution suivant des plans. Une configuration très favorable à la rupture par glissement parallèle des plans dans les matrices fragiles comme le plâtre.

En définitive, sur le plan structurel, les caractéristiques mécaniques bénéfiques du renforcement du plâtre par le RC sont la résistance à la traction, l'allongement à la rupture et la contrainte maximale à la rupture par flexion. Il serait optimal pour le renforcement en flexion de concentrer les fibres dans la partie sollicitée en traction. Il faut préciser que le matériau mise en œuvre sera exploité en deçà de la zone d'endommagement. L'étude de sa contribution au comportement fonctionnel qui va suivre permettra d'avoir une idée assez large sur les possibilités de cette fibre avec le plâtre.

Chapitre 4

Approche expérimentale du comportement thermique et hygrométrique

Sommaire

4.1 Aspects thermiques	132
4.1.1 Généralités sur le transfert thermique	132
4.1.2 Caractérisation d'un isolant thermique	138
4.1.3 Mesure de la diffusivité thermique du plâtre non renforcé	139
4.1.4 Mesure de la diffusivité thermique du plâtre renforcé de sisal	140
4.1.5 Mesure de la diffusivité thermique du plâtre renforcé de RC	142
4.1.6 Influence de l'architecture des fibres de RC	142
4.2 Aspect hygrométrique	146
4.2.1 Caractère hygrophile d'un matériau	146
4.2.2 Comportement hygrométrique des fibres	147
4.2.3 Comportement hygrométrique du plâtre non renforcé	151
4.2.4 Comportement hygrométrique du plâtre renforcé des fibres de sisal	153
4.2.5 Comportement hygrométrique du plâtre renforcé des fibres de RC	154
4.3 Etude comparative des résultats	156
4.3.1 Diffusivité thermique	156
4.3.2 Caractéristiques hygrométriques	157

Introduction

Le plâtre est très utilisé comme matériau de construction en bâtiment, son renforcement étudié dans le chapitre précédent contribue à diminuer sa fragilité légendaire. Cette application dans le bâtiment est motivée par ses qualités fonctionnelles. Il est important de s'interroger sur le maintien ou non de ces performances lorsqu'il est mélangé à des fibres nouvelles. Ce chapitre s'intéresse à examiner l'influence du renfort sur les caractéristiques thermiques du plâtre renforcé de fibres végétales et sur son comportement vis à vis de l'humidité.

4.1 Aspects thermiques

4.1.1 Généralités sur le transfert thermique

4.1.1.1 Quelques définitions

4.1.1.1.1 Le transfert thermique Lorsque deux points distincts d'un corps (ou bien deux corps en contact) ont la même température, on dit qu'ils sont en équilibre thermique. Si leur température est différente, l'énergie est cédée par le point ou le corps le plus chaud au point ou corps le plus froid. Il y a donc transfert thermique [72]. Le transfert thermique correspond donc à une transmission de l'énergie contenue dans une zone vers une autre.

4.1.1.1.2 Champ de température L'évolution de la température dans l'espace et dans le temps permet de déterminer les transferts d'énergie. La température est alors une fonction du temps et des coordonnées (x,y,z) de l'espace : $T = f(x,y,z,t)$. On appelle champ de température, la valeur à chaque instant de la température en tout point. On distingue deux cas de figure : lorsque le champ de température est indépendant du temps, on dit que le régime est permanent ou bien stationnaire ; lorsqu'il évolue avec le temps, on dit que le régime est variable ou instationnaire.

4.1.1.1.3 Gradient de température Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :

$$\vec{\text{grad}}(T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (4.1)$$

Avec :

\vec{n} vecteur unitaire de la normale,
 $\frac{\partial T}{\partial n}$ dérivé de la température le long de la normale.

4.1.1.1.4 Flux de chaleur La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur Q transmise par unité de temps et par unité d'aire S (en m^2) de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur. Il s'exprime en Wm^{-2} .

$$\Phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \quad (4.2)$$

Le flux de chaleur est la quantité de chaleur Q en (W) transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\varphi = \frac{dQ}{dt} \quad (4.3)$$

Les échanges thermiques sont classées en trois grandes familles de phénomènes physiques : la conduction, la convection et le rayonnement.

4.1.1.1.5 Modes de transfert thermique

4.1.1.1.5.1 Conduction C'est le transfert de chaleur dans la masse d'un milieu matériel, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier [63, 72] : la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température. Ce qui se traduit, pour un matériau isotrope et homogène, par l'équation :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \vec{grad}(T) \quad (4.4)$$

cette équation s'écrit sous forme algébrique comme suit :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.5)$$

avec:

φ	(W)	Flux de chaleur transmis par conduction
λ	(W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Conductivité thermique du milieu
x	(m)	Variable d'espace dans la direction du flux
S	(m ²)	Aire de la section de passage du flux de chaleur

La description analytique des échanges par conduction est faite par le premier principe de la thermodynamique sur la conservation de l'énergie en tout point qui conduit à l'équation de la chaleur sous sa forme générale :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left(\lambda \cdot \vec{\text{grad}} T \right) + q \quad (4.6)$$

avec:

- C_p la capacité thermique massique à pression constante,
- ρ la masse volumique du matériau considéré,
- λ la conductivité thermique du matériau,
- q l'apport de chaleur interne.

4.1.1.1.5.2 Convection C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Le mouvement du fluide peut avoir deux causes. Il peut être imposé de l'extérieur par une machine (pompe, ventilateur, compresseur) : c'est la convection forcée ; ou bien par le contact du fluide avec la surface du solide plus chaude ou plus froide entraînant la création des différences de masse volumique, génératrices de mouvement au sein du fluide ; c'est la convection naturelle. La convection mixte mêle de manière équivalente les deux modes de convection ci-dessus cités. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\Phi = hS (T_p - T_\infty) \quad (4.7)$$

avec:

Φ	(W)	Flux de chaleur transmis par convection
h	(Wm ⁻² K ⁻¹)	Coefficient de transfert de chaleur par convection
T_p	(K)	Température de surface du solide
T_∞	(K)	Température du fluide loin de la surface du solide
S	(m ²)	Aire de la surface de contact solide/fluide

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

4.1.1.1.5.3 Rayonnement Le rayonnement est fondamentalement différent des deux autres types de transfert de chaleur, en ce sens que les substances qui échangent de la chaleur n'ont pas besoin d'être en contact l'une avec l'autre. Elles peuvent même être séparées par le vide. La manifestation la plus commune de ce phénomène est celle

du rayonnement solaire qui nous parvient sur la terre après avoir parcouru une distance considérable dans le vide spatial. Le rayonnement est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces. Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant ; dans ce cas nous avons la relation :

$$\varphi = \sigma \epsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (4.8)$$

avec:

φ	(W)	Flux de chaleur transmis par rayonnement
s	$(5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4})$	Constante de Stefan
(ϵ_p)		Facteur d'émission de la surface
T_p	(K)	Température de la surface
T_∞	(K)	Température du milieu environnant la surface
S	(m^2)	Aire de la surface

Les caractéristiques du rayonnement thermique dépendent de la température du corps émetteur et des caractéristiques physiques de la surface émettrice. La propriété thermique du matériau qui conditionne l'émission est l'émissivité du matériau. Elle dépend de la nature du matériau, de l'état de la surface et des couches moléculaires proches de la surface. Pour qualifier le rayonnement, il faut mesurer sa puissance mais aussi sa composante spectrale. Max Planck, approfondissant la connaissance du phénomène de rayonnement au-delà du seul rayonnement thermique, a défini le corps noir comme un corps ayant un facteur d'absorption égal à 1 et un facteur de réflexion nul. La loi de Stephan-Boltzmann décrit la proportionnalité entre la puissance émise par la surface d'un corps noir (luminance totale L) et sa température T en degrés Kelvin :

$$L = \sigma \cdot T^4 \quad (4.9)$$

σ étant la constante de Stephan-Boltzmann $(W m^{-2} K^{-4})$.

4.1.1.1.6 Propriétés thermiques des matériaux En présence d'un ou de plusieurs modes de transfert thermique, les propriétés thermiques d'un matériau sont des grandeurs qui caractérisent son comportement. Ces propriétés expriment le comportement du matériau soumis aux transferts stationnaires : conductivité thermique, résistance thermique et émissivité, ou bien soumis aux transferts dynamiques : diffusivité thermique et effusivité thermique.

Les propriétés régissant les transferts par conduction et convection sont aussi appelées *propriétés de transport* car elles sont liées à l'agitation des atomes et des molécules du milieu qui *transportent* la chaleur. Elles se rapportent aussi à la capacité du matériau à

absorber de l'énergie thermique. Cette énergie thermique peut être absorbée pour élever la température du matériau ou pour le transformer : capacité thermique, enthalpie de fusion, coefficient de dilatation thermique, etc.

Toutes les propriétés thermiques de matériaux sont dépendantes de la nature du corps et de sa température. La mesure de ces propriétés est donc indissociable de la mesure de la température et de la connaissance de la nature du matériau (homogène ou isotrope). Les valeurs de chaque propriété sont donc affichées en donnant la nature du matériau et la température de mesure ou la relation de la grandeur en fonction de la température.

4.1.1.1.6.1 Caractéristiques statiques

– Conductivité thermique

La conductivité thermique (λ) est le flux de chaleur, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température de un kelvin entre les deux faces. Elle s'exprime en $W.m^{-1}.K^{-1}$. Cette valeur permet de quantifier le pouvoir isolant de chaque matériau. Plus elle est faible, plus le matériau sera isolant (faible conduction).

– Résistance thermique

La résistance thermique (R) est utilisée pour quantifier le pouvoir isolant des matériaux pour une épaisseur donnée. Elle s'exprime en $m^2.K.W^{-1}$. Une paroi est d'autant plus isolante que sa résistance thermique est élevée. Cette grandeur est particulièrement utilisée dans les applications d'isolation thermique. Elle se calcule par la relation suivante :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (4.10)$$

avec

R	$m^2.K.W^{-1}$	résistance thermique
e	(m)	épaisseur de l'isolant
λ	$W.m^{-1}.K^{-1}$	conductivité thermique

– Coefficient de transmission surfacique

Pour caractériser une paroi, on utilise souvent le coefficient de transmission surfacique (U). Ce coefficient correspond à l'inverse de la résistance thermique R. Il s'exprime en $W.m^{-2}.K^{-1}$. Il représente le flux de chaleur à travers $1m^2$ de paroi pour une différence de température de $1^\circ C$ entre les deux environnements séparés par la paroi. Plus (U) est faible, plus la paroi est isolante.

– Capacité thermique

La capacité thermique (C) d'un matériau représente sa capacité à absorber une quantité de chaleur (Q) en Whm^{-3} et à s'échauffer de ΔT en K.

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (4.11)$$

Elle s'exprime en $Wh.m^{-3}.K^{-1}$. Plus la capacité thermique est élevée, plus le matériau pourra stocker une quantité de chaleur importante. Un phénomène physique peut facilement montrer ce qu'est l'inertie thermique. Il s'agit des pierres exposées en plein soleil lors d'une journée ensoleillée. Lorsque le soleil n'illumine plus la pierre, on constate qu'elle reste chaude. Elle peut même continuer longtemps à rayonner sa chaleur emmagasinée. C'est un exemple de stockage de chaleur. Généralement ce sont les matériaux les plus lourds qui possèdent la plus grande capacité thermique. Au contraire, les isolants ont généralement une capacité thermique assez faible. Il convient alors de trouver le bon compromis entre le pouvoir isolant et l'inertie du matériau. Les blocs de construction à isolation répartie comme la brique monomur ont une capacité thermique assez élevée tout en conservant des performances d'isolation importantes. Pour les isolants, les panneaux de bois offrent l'un des meilleurs compromis entre inertie et isolation. A noter, dans les locaux utilisés de manière intermittente, l'inertie n'est pas souhaitable pour des raisons de lenteur de mise en température de confort et de consommations énergétiques importantes.

4.1.1.1.6.2 Caractéristiques dynamiques

– Diffusivité thermique

La diffusivité thermique (a) exprime la capacité d'un matériau à transmettre rapidement une variation de température. C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Elle s'exprime en $m^2.s^{-1}$. Ce paramètre est directement contenu dans l'équation de la chaleur simplifiée (lorsqu'il n'y a pas de génération d'énergie à l'intérieur du système $q = 0$) :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (4.12)$$

avec C_p en $J.kg^{-1}K^{-1}$, λ en $Wm^{-1}K^{-1}$ et ρ en kgm^{-3} . Plus la valeur de la diffusivité thermique est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur parvient sur une face d'un mur et le moment où elle atteindra l'autre face est important. On parle également de déphasage. (Un déphasage de 10 à 12 heures permet d'atténuer les différences de température entre le jour et la nuit).

– Effusivité thermique

L'effusivité thermique (E) des matériaux, parfois dénommée *chaleur subjective*, représente

la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau se réchauffe. Elle est la racine carrée du produit de la conductivité thermique (λ), de la masse volumique (ρ) et de la capacité thermique massique (C_p):

$$E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C_p} \quad (4.13)$$

avec C_p en $J.kg^{-1}.K^{-1}$, λ en $W.m^{-1}.K^{-1}$ et ρ en $kg.m^{-3}$. Elle s'exprime en $J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$. Plus le coefficient (E) est faible, plus le matériau se réchauffe vite. Les matériaux isolants ont un coefficient (E) faible et ont une bonne *chaleur subjective*, les matériaux dotés d'une inertie forte ont généralement un coefficient (E) élevé. Dans certains cas, il pourra être intéressant de disposer un matériau à faible coefficient (E) devant une paroi à forte inertie (E élevé). Cette solution permet de supprimer parfois l'effet de paroi froide, mais en revanche elle diminue de façon importante la capacité de stockage des calories dans la paroi froide et donc l'effet de régulation des températures. Par exemple, en hiver, pour une salle de bains où le temps d'occupation est souvent court, les revêtements à faible effusivité thermique comme le bois augmenteront le confort de la pièce puisqu'elle se réchauffera rapidement. Au contraire, dans les climats chauds l'utilisation de matériaux à forte effusivité comme le carrelage permet de maintenir un certain confort plus longtemps malgré l'échauffement de l'air de la pièce.

4.1.2 Caractérisation d'un isolant thermique

Lorsque deux corps en contact possèdent des températures différentes, il survient un échange de chaleur entre eux jusqu'à ce que les températures s'égalent. L'isolation a pour but de freiner cet échange thermique et de permettre ainsi de garder les parois, d'une habitation par exemple, à une température la plus proche possible de celle de l'air intérieur.

Un isolant thermique est un matériau ayant une faible conductivité thermique. Ce type de matériau a pour caractéristique de freiner les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment. Concrètement, les matériaux isolants évitent les fuites de chaleur d'une face de la paroi isolante vers l'autre face. Une isolation thermique performante se caractérise donc par l'absence de zones d'échanges de chaleur ou ponts thermiques.

La caractérisation d'un isolant thermique revient donc à effectuer la mesure d'une des propriétés thermiques ci-dessus recensée sur le matériau. La conductivité thermique λ est la propriété la plus mesurée. Des méthodes métrologiques existent pour la déterminer. Elles ont été largement explicitées au chapitre 1. La méthode de la plaque chaude gardée est la méthode la plus utilisée pour les faibles conductivités thermiques (inférieures à $1 W.m^{-1}.K^{-1}$), donc pour les matériaux isolants. Les mesures se font dans des conditions

stationnaires de température (en régime permanent). Il est possible d'accéder indirectement à la conductivité thermique λ à partir de la diffusivité thermique a étant donné que les deux propriétés sont liées par la relation (4.12). Le moyen métrologique utilisé dans cette étude pour l'évaluation du caractère isolant du matériau mesure la diffusivité thermique.

4.1.3 Mesure de la diffusivité thermique du plâtre non renforcé

4.1.3.1 Matériel et méthode

Des plaques de $210 \times 297 \times 10 \text{ mm}^3$ de plâtre non renforcé sont fabriquées. Elles sont insérées dans un cadre de polystyrène. Une caméra infrarouge Jade Cedip III-MWIR (figure 4.1) est utilisée pour capturer le champ de température sur une face (B) de l'éprouvette. La chaleur est projetée par un projecteur sur l'autre face (A) comme le montre le schéma simplifié de la manipulation de la figure 4.2. Cette caméra dispose des détecteurs infrarouges caractérisés par une gamme de longueurs d'onde de 3,5 à 5 micromètres. Le temps d'intégration utilisé pour les mesures est de 1500 micro-secondes. La résolution thermique à la température ambiante est environ $0,02^\circ\text{C}$. La fréquence d'acquisition (f_a) utilisée est égale à 1 Hz. En fait, chaque image correspond à l'image moyenne de 10 images (l'appareil est utilisé avec une acquisition de 100 Hz). La résolution spatiale en température, correspondant ici à la taille de pixel sur le spécimen, est égale à $320 \times 240 \text{ mm}^2$. Les éprouvettes ne sont pas particulièrement préparées pour des mesures thermographiques. D'habitude pour des matériaux métalliques, une mince couche de peinture noire est appliquée aux spécimens pour obtenir une émissivité près de 1. Dans le cas du plâtre, en étude, son émissivité étant proche de 1 (0,93) [73], il n'y a plus d'intérêt à appliquer une couche de peinture noire sur la surface du matériau. Un modèle programmé sur MATLAB utilisant la méthode des différences finies et prenant en compte des paramètres caractérisant le flux entrant d'un côté et la convection de l'autre côté ainsi que la diffusivité thermique permet d'approcher le thermogramme expérimental.

4.1.3.2 Résultats et discussion

La figure 4.3 montre le thermogramme de la variation de la température en fonction du temps. La diffusivité thermique est identifiée par recalage de la courbe théorique sur le thermogramme expérimental.

On observe qu'au bout de 40 minutes, la variation de la température se stabilise. La courbe théorique s'identifie à celle expérimentale pour une diffusivité thermique de $3,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Cette valeur est donc la diffusivité thermique de la plaque de plâtre testée, non renforcée et gâchée à $E/P=1$. Cette valeur est conforme aux valeurs calculées à

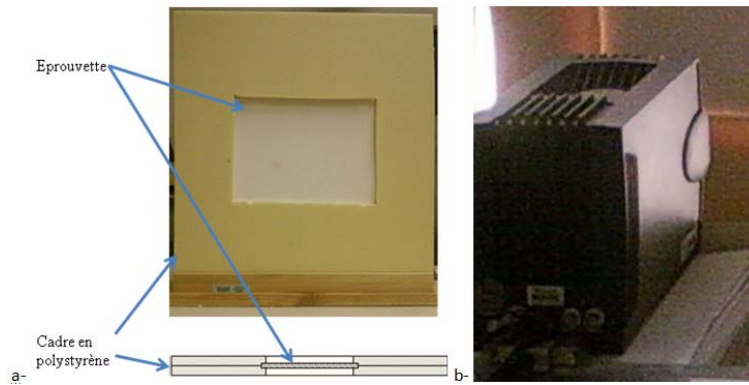


FIG. 4.1 – *Thermographie infrarouge: a- éprouvette en configuration d'essai b- caméra infrarouge*

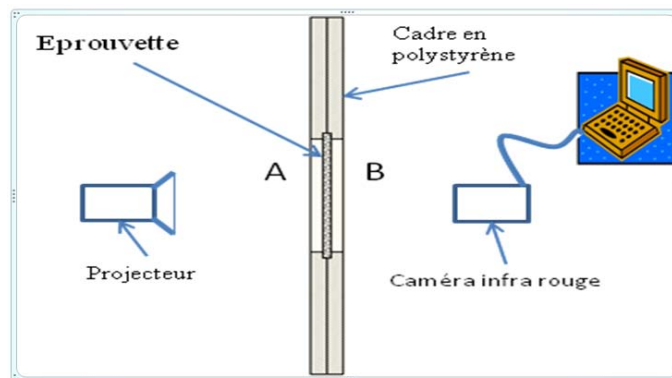


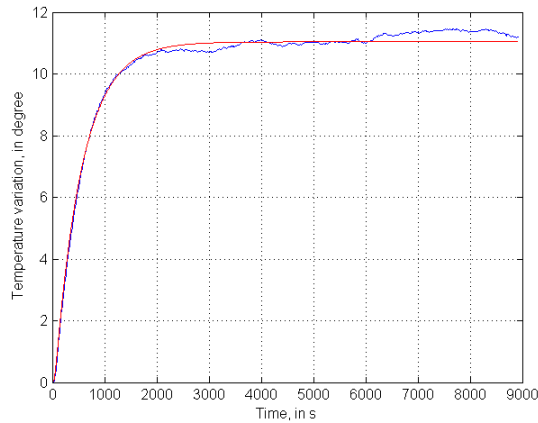
FIG. 4.2 – *Schéma de principe de la manipulation*

partir des paramètres (conductivité thermique, chaleur spécifique et masse volumique) recueillies dans la littérature (entre 3.10^{-7} et $3,73.10^{-7}$). Conformité qui permet de valider la méthode de mesure.

4.1.4 Mesure de la diffusivité thermique du plâtre renforcé de sisal

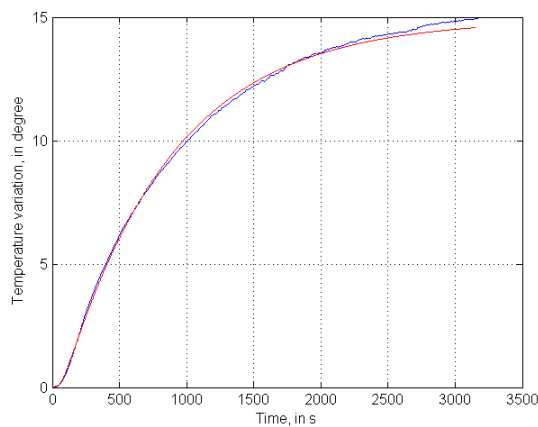
4.1.4.1 Préparation de l'éprouvette

Des plaques de $210 \times 297 \times 12\text{mm}^3$ de composite plâtre/sisal renforcées de fibres orientées $[0^\circ / 90^\circ / 45^\circ / -45^\circ]$ suivant quatre couches (F4D) sont fabriquées. Le dispositif expérimental et la méthode sont les mêmes que ceux présentés au paragraphe 1.1.3.1.

FIG. 4.3 – *Thermogramme de la plaque de plâtre non renforcée*

4.1.4.2 Résultats et discussion

Le thermogramme expérimental des variations de la température en fonction du temps, approché par la courbe théorique, est présenté à la figure 4.4.

FIG. 4.4 – *Thermogramme de la plaque de composite plâtre/sisal F4D*

La courbe théorique s'identifie à la courbe expérimentale lorsque la diffusivité thermique est de $2,77 \cdot 10^{-7} m^2 s^{-1}$. Cette valeur est la diffusivité thermique de l'échantillon mesuré de plâtre renforcé de fibres de sisal. La variation de la température se stabilise au delà de 50 minutes. Il y a chute de la diffusivité thermique du plâtre du fait de la présence des fibres. C'est un résultat qui traduit une réalité déjà évoquée dans une contribution en 2010 [74] rapportant un coefficient de diffusivité thermique du plâtre renforcé de la filasse égale à $2,07 \cdot 10^{-7} m^2 s^{-1}$.

4.1.5 Mesure de la diffusivité thermique du plâtre renforcé de RC

4.1.5.1 Résultats

Les résultats, sous la forme d'un thermogramme, sont données sur le figure 4.5.

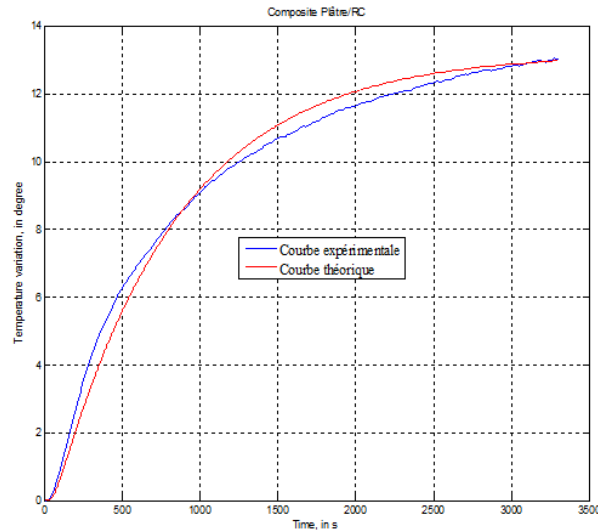


FIG. 4.5 – Thermogramme de la plaque de composite plâtre/RC F4D

L'identification par recalage des courbes théorique et expérimentale se produit lorsque la diffusivité thermique est égale à $2,65 \cdot 10^{-7} m^2 s^{-1}$. Cette valeur est considérée comme la diffusivité thermique de l'échantillon de plâtre renforcé de fibres de RC testé. La variation de la température se stabilise aussi au delà de 50 minutes.

4.1.5.2 Discussion et conclusion

L'observation de la courbe expérimentale permet de réaliser que le spécimen de plâtre non renforcé atteint un équilibre thermique au bout de 40 minutes alors que c'est au delà de 50 minutes que l'échantillon renforcé de fibres voit le sien atteint. C'est un premier signe de retardement de la vitesse de l'évolution de la température dans le matériau. Le renforcement du plâtre par les fibres de RC diminue la diffusivité thermique du matériau. En seconde remarque. On note ici une légère baisse de la caractéristique par rapport au renforcement par le sisal. La fibre de RC comme d'autres fibres végétales, par sa présence dans le plâtre augmente le caractère isolant du matériau. En plus, elles pourraient le faire mieux que le sisal.

4.1.6 Influence de l'architecture des fibres de RC

4.1.6.1 Fibres non orientées

4.1.6.1.1 Préparation des éprouvettes Le dispositif expérimental reste le même que précédemment ainsi que les méthodes utilisées. L'éprouvette est une plaque de composite plâtre/RC de $210 \times 297 \times 14 \text{ mm}^3$. Elle est renforcée de fibres d'orientation aléatoire à une proportion de 3%.

4.1.6.1.2 Résultats et discussion Les valeurs numériques de la variation de la température et du temps récupérées permettent de tracer un thermogramme. La figure 4.6 montre la courbe expérimentale approchée par la courbe théorique.

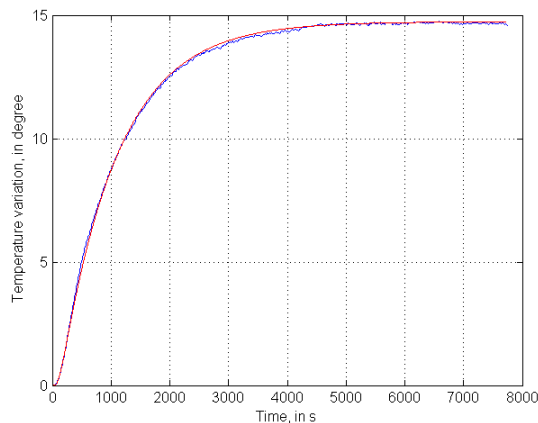


FIG. 4.6 – *Thermogramme de la plaque du composite FNO*

La variation de la température se stabilise au delà de 50 minutes. La courbe théorique s'identifie assez bien avec le thermogramme expérimental pour une valeur de la diffusivité thermique égale à $2,15 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Cette valeur est donc considérée comme étant la diffusivité thermique du composite plâtre/RC testé. Elle est inférieure à la valeur obtenue aussi bien lorsque le matériau n'est pas renforcé que lorsque le renforcement est le sisal.

4.1.6.2 Fibres unidirectionnelles libres

4.1.6.2.1 Préparation des éprouvettes L'éprouvette est une plaque de $210 \times 297 \times 14 \text{ mm}^3$ du composite plâtre/RC, l'orientation des renforts est unidirectionnelle à une proportion de 3% aussi. Le dispositif de l'essai est identique.

4.1.6.2.2 Résultats et discussion La valeur $2,25 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ de la diffusivité thermique permet d'identifier le thermogramme expérimentale à la courbe théorique (figure 4.7). C'est la valeur de la diffusivité thermique de cette éprouvette de plâtre/RC au plâtre gâché à E/P=1 et les fibres orientées suivant une direction. L'équilibre thermique a aussi lieu au delà de 50 minutes. Un temps qui reste supérieur à celui enregistré avec la plaque

de plâtre non renforcée. Pour cette configuration de l'architecture des fibres de RC, la diffusivité thermique est plus faible que lorsque le matériau est non renforcé ou que le renfort est le sisal.

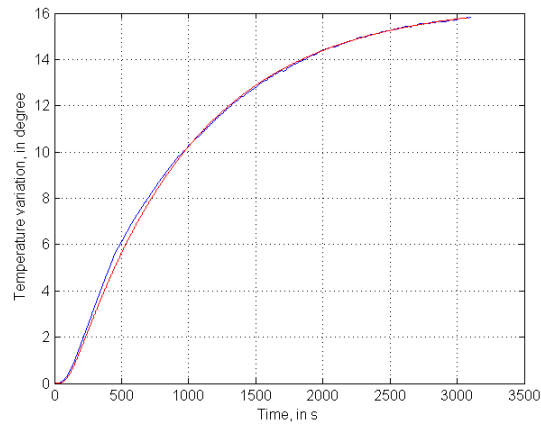


FIG. 4.7 – Thermogramme de la plaque du composite F1D

4.1.6.3 Fibres tissées

4.1.6.3.1 Préparation des éprouvettes L'éprouvette sous forme de plaque de $210 \times 297 \times 14 \text{ mm}^3$ est un composite de plâtre renforcé de fibres de RC tissées, d'armure toile (figure 4.8).



FIG. 4.8 – Tissus en fibres de RC

4.1.6.3.2 Résultats et discussion Le diagramme de variation de la température en fonction du temps qui résulte de l'essai thermographique de cet échantillon est représenté dans la figure 4.9.

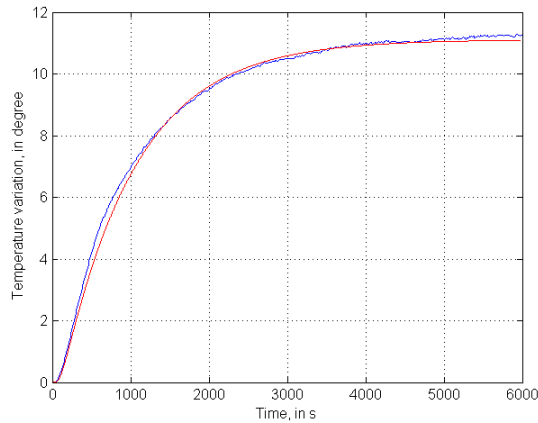


FIG. 4.9 – *Thermogramme de la plaque du composite FT*

La courbe théorique s'identifie au thermogramme expérimental pour une diffusivité thermique égale à $2,3 \cdot 10^{-7} m^2 s^{-1}$. Elle est retenue comme valeur de la diffusivité thermique du composite plâtre/RC à renfort tissé. La variation de la température est aussi stabilisée au delà de 50 minutes. Le composite à renfort RC, encore une fois, freine le transfert thermique entre les deux faces mieux que lorsque le plâtre est non renforcé ou renforcé des fibres de sisal.

4.1.6.4 Conclusion concernant l'aspect thermique

Les mesures de transfert thermique effectuées permettent de déterminer la diffusivité thermique des plaques échantillons de plâtre non renforcé, de plâtre renforcé respectivement de sisal et de RC. Les résultats révèlent en premier lieu que le plâtre renforcé de fibres végétales réduit la cinétique de transfert de chaleur à travers la paroi. Il apparaît aussi que le renforcement par le RC favorise davantage la fonction d'isolant thermique du plâtre. Des plaques de plâtre renforcées de fibres de RC avec la même teneur en fibres mais, d'architecture différentes sont donc essayées pour en identifier l'influence. Les résultats révèlent que pour une meilleure exploitation de son influence, l'architecture non orientée de fibres est recommandable.

4.2 Aspect hygrométrique

4.2.1 Caractère hygrophile d'un matériau

Tout produit d'origine minérale, animale ou végétale contient de l'eau et a la capacité d'échanger de l'humidité avec l'air ambiant. En effet, sous des variations de conditions d'humidité de l'air au voisinage, un matériau absorbe de la vapeur qui se condense sous forme d'eau liquide. Ceci se traduit par une augmentation de la masse apparente de ce matériau. Cette augmentation de masse est due à la fixation de molécules d'eau en surface du matériau, c'est le phénomène d'adsorption [75]. Inversement une diminution de l'humidité de l'air environnant entraîne une diminution de la masse apparente, c'est le phénomène de désorption. L'activité de l'eau dans un matériau dépend principalement de sa teneur en eau X et de sa température T . La courbe représentative de la teneur en eau X du matériau, pour une température donnée, en fonction de la valeur de l'activité de l'eau ou bien de l'humidité relative de l'air en équilibre s'appelle *isotherme d'adsorption* si elle est déterminée expérimentalement en partant d'un matériau sec ou bien *isotherme de désorption* si elle est déterminée expérimentalement en partant d'un matériau saturé en eau. Ces deux courbes, qui sont généralement différentes, ont l'allure de celles montrées dans la figure 4.10 [75].

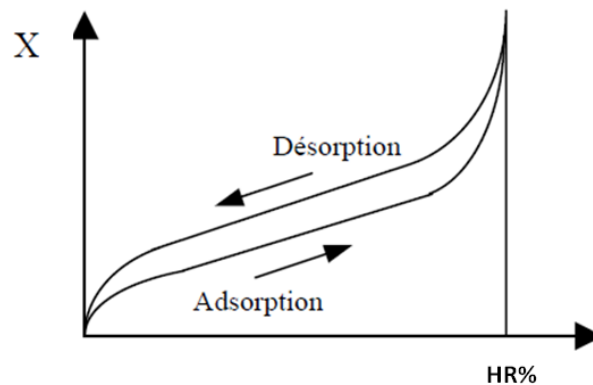


FIG. 4.10 – Allure générale d'une isotherme de sorption

Les isothermes d'adsorption/désorption présentent en général trois zones correspondant chacune à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit (figure 4.11(a) [75]) :

- une première zone (1) de constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit,
- une seconde zone (2), linéaire, d'adsorption des molécules sur la multicouche initiale : l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide,
- une dernière zone (3) où l'eau est présente à l'état liquide dans les pores du matériau.

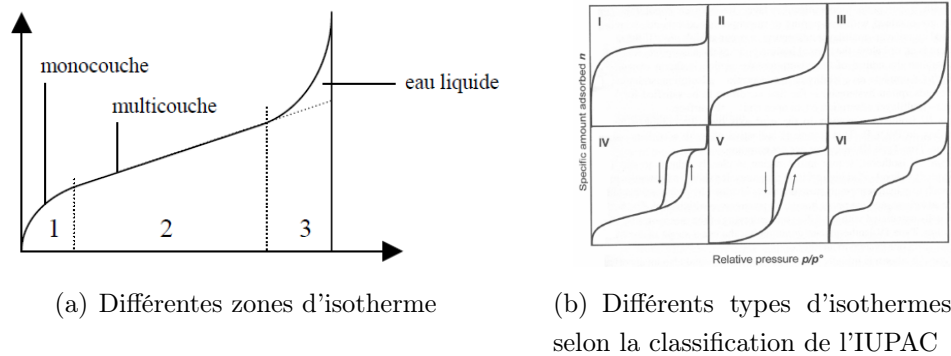


FIG. 4.11 – Description d'isothermes de sorption

Six types d'isothermes sont identifiées par l'IUPAC (figure 4.11(b) [75]) notamment le type I caractéristique de milieux ne contenant que des micropores saturés pour de faibles valeurs d'humidité relative; le type II caractéristique de milieux macroporeux avec adsorption multimoléculaire; le type III semblable au type II mais ici les interactions milieux poreux et gaz sont faibles; le type IV correspondant à des milieux mésoporeux dans lesquels il se produit une condensation capillaire; le type V semblable au précédent mais les interactions milieu poreux/gaz adsorbé sont faibles et le type VI correspondant à un milieu poreux dans lequel les couches adsorbées se forment les unes après les autres.

Au cours de ce travail, l'absorption de l'humidité des constituants (fibres et plâtre) et du composite plâtre/fibres dans une enceinte à humidité relative contrôlée est suivie et les résultats sont présentés pour chaque matériau : d'abord sous forme d'une courbe de la cinétique d'absorption d'humidité, puis sous forme d'un isotherme d'adsorption.

4.2.2 Comportement hygrométrique des fibres

4.2.2.1 Matériel et méthode

L'essai se déroule comme décrit par la norme NF EN ISO 483: 2006-01. On dispose de bocal instrumentés chacun d'une grille fine taillée aux dimensions pour être introduite dans le bocal, un tube en PVC de diamètre et hauteur 3 cm, une capsule (petit récipient en verre de 40 mm de diamètre maximum, une pince pour manipuler les capsules et les éprouvettes et une balance de précision 0,1 mg (figure 4.12). Les solutions salées sont réalisées avec de l'eau déminéralisée. Les solutions de sels chimiques utilisés sont présentés dans le tableau 4.1.

Les éprouvettes sont séchées pendant 48h à 60°C, à l'étuve (avec dessiccant). Les enceintes saturées en sel sont préparées 24 heures avant le début de l'essai. Les éprouvettes sèches sont pesées pour avoir la masse anhydre (m_0), puis placées dans l'enceinte. Elles sont ensuite pesées à intervalles de temps progressifs. L'évolution de la masse en fonction

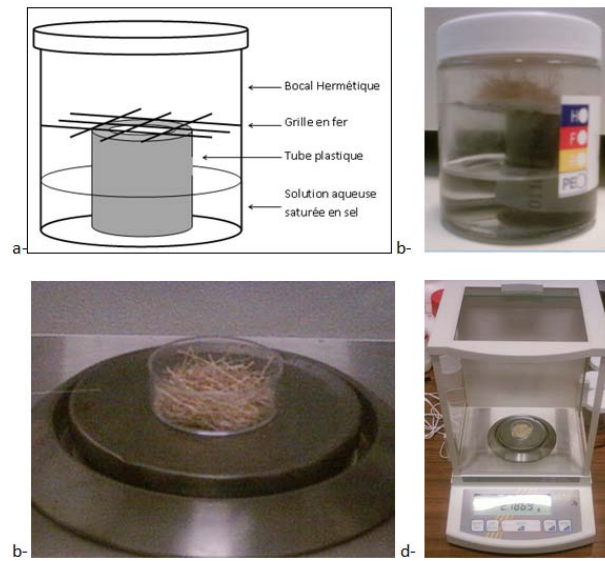


FIG. 4.12 – Matériel d’essai d’hygrométrie a-,b-schéma et photo enceinte à humidité contrôlée c-capsule contenant les fibres d-balance électronique de précision (0,1 mg)

Solution saline saturée	Solubilité (g.l ⁻¹)	Quantité pour 20 ml d’eau (g)	HR (%) à 20 °C
Hydroxyde de potassium (KOH)	1100	24,2	9
Chlorure de magnésium hexahydraté (MgCl ₂ , 6H ₂ O)	542	72	33
Nitrate de magnésium hexahydraté (Mg(NO ₃) ₂ , 6H ₂ O)	1250	27,5	54
Bromure de sodium (NaBr)	733	16	59
Chlorure de sodium (NaCl)	357	8	75
Sulfate de potassium (K ₂ SO ₄)	120	2,7	98

TAB. 4.1 – Solutions de sel utilisées et leur taux d’humidité à saturation

du temps est relevée jusqu’à saturation. A saturation, lorsque les masses sont stabilisées, l’échantillon est placé dans une hygrométrie différente pour atteindre le palier suivant. Le gain en masse d’eau X du matériau en fonction du temps est alors calculé pour chaque humidité relative selon l’expression 4.2.2.2.1:

$$X (\%) = \left(\frac{m - m_0}{m_0} \right) .100 \tag{4.14}$$

4.2.2.2 Résultats pour la fibre de sisal

4.2.2.2.1 Cinétique d’absorption Elle est observée dans une enceinte de 98% d’humidité relative. Les gains en masse obtenus sont représentés sous la forme d’une courbe de taux d’absorption en fonction du temps (figure 4.13).

La fibre de sisal absorbe de l’humidité dans les premières heures assez rapidement et commence à saturer au bout de 40 heures. Elle atteint un taux d’absorption d’humidité de 13,2%.

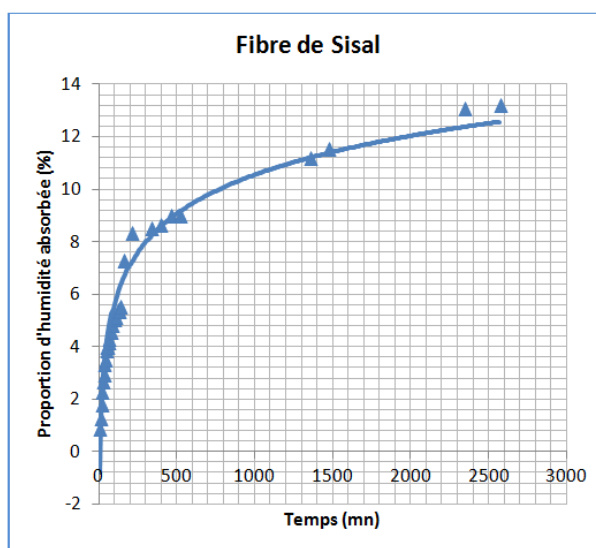


FIG. 4.13 – Cinétique d'absorption de la fibre de sisal à 98% HR à 20° C

4.2.2.2 Isotherme d'adsorption Après saturation de la fibre dans des enceintes d'hygrométries différentes, la courbe d'adsorption est construite. La figure 4.14 présente l'isotherme d'adsorption du sisal.

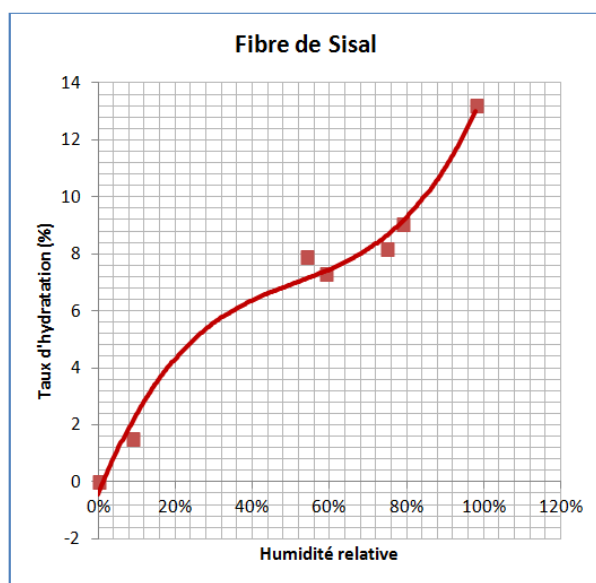


FIG. 4.14 – Isotherme d'adsorption de la fibre de sisal

L'isotherme d'adsorption est de type II caractéristique d'un matériau macroporeux selon la classification internationale [75, 76]. L'adsorption est multimoléculaire.

4.2.2.3 Résultats pour le RC

4.2.2.3.1 Cinétique d'absorption Aussi observée dans une enceinte de 98% d'humidité relative, les gains en masse d'eau de la fibre sont calculés et permettent de construire la courbe de la cinétique d'absorption. Elle est représentée à la figure 4.15.

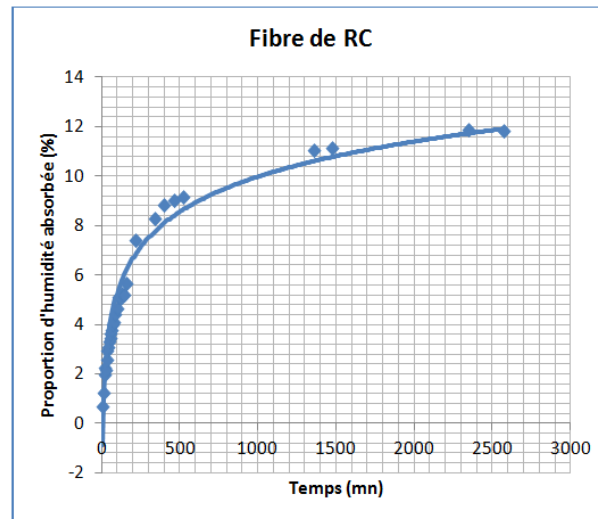


FIG. 4.15 – *Cinétique d'absorption de la fibre RC*

La fibre de RC absorbe assez rapidement l'humidité dès les premiers instants de son séjour en milieu humide. Elle sature en humidité au bout de 40 heures tout comme la fibre de sisal mais à un taux de gain en masse inférieur. Dans cette enceinte, elle atteint un taux d'humidité de 12%.

4.2.2.3.2 Isotherme d'adsorption Les gains de masse à saturation dans les enceintes d'hygrométries différentes sont récupérés et un isotherme de sorption est construit. Cette courbe est représentée dans la figure 4.16.

L'isotherme d'adsorption est caractéristique d'un matériau macroporeux comme dans le cas de la fibre de sisal.

4.2.2.4 Discussion et conclusion

L'absorption d'humidité de la fibre de RC est faite dans la même enceinte d'humidité relative que la fibre de sisal. On observe qu'elle a une même cinétique d'absorption que le sisal, à l'exception que le RC s'hydrate un peu moins que le sisal. Elle est saturée à 12% d'absorption d'humidité au bout de 40 heures alors que le sisal l'est à 13,2%. Ce résultat pour le sisal est du même ordre de grandeur que ceux disponibles dans la littérature [66] et permettent de valider le protocole expérimental utilisé. Les isothermes d'adsorption des deux fibres présentent la même allure: de type II. Ce qui permet de dire que le mécanisme de fixation des molécules d'eau à la surface des fibres de RC est similaire à

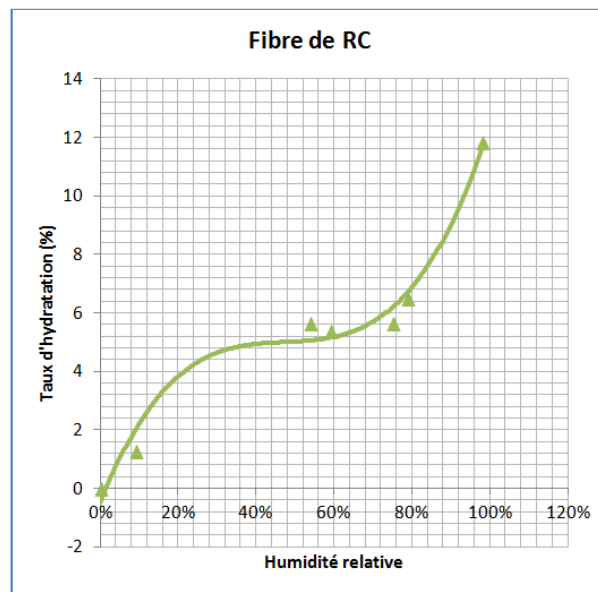


FIG. 4.16 – Isotherme d'adsorption de la fibre de RC

celui des fibres de sisal. Ils sont caractéristiques de milieux macroporeux. L'adsorption est multimoléculaire. La faible proportion d'absorption d'humidité du RC par rapport au sisal est ainsi mise en évidence.

4.2.3 Comportement hygrométrique du plâtre non renforcé

4.2.3.1 Matériel et méthode

Le matériel et les méthodes utilisés précédemment pour les fibres sont identiques à l'exception des capsules parce qu'ici, les éprouvettes sont déposées directement sur la grille. Les échantillons sont constitués de deux morceaux de plâtre prélevés sur les éprouvettes utilisées en traction de longueur 15 mm approximativement.

4.2.3.2 Résultats et discussion

4.2.3.2.1 Cinétique d'absorption Les valeurs de gain en masse calculées lorsque les échantillons sont dans une enceinte de 98% d'humidité relative à 20°C de température ambiante sont utilisées pour construire les courbes d'absorption en fonction du temps. Ces courbes sont présentées dans la figure 4.17.

Le plâtre absorbe l'humidité assez rapidement et sature au bout de 20 heures, soit 1,40% d'absorption.

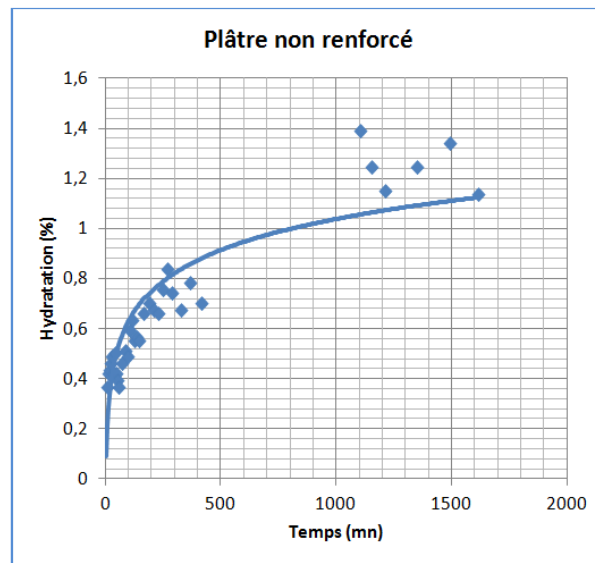


FIG. 4.17 – Cinétique d'absorption d'humidité du plâtre non renforcé

4.2.3.2.2 Isotherme d'adsorption Les gains de masse calculés à saturation pour les différentes hygrométries sont utilisés pour construire l'isotherme de sorption de l'éprouvette de plâtre non renforcé. La figure 4.18 montre la courbe obtenue.

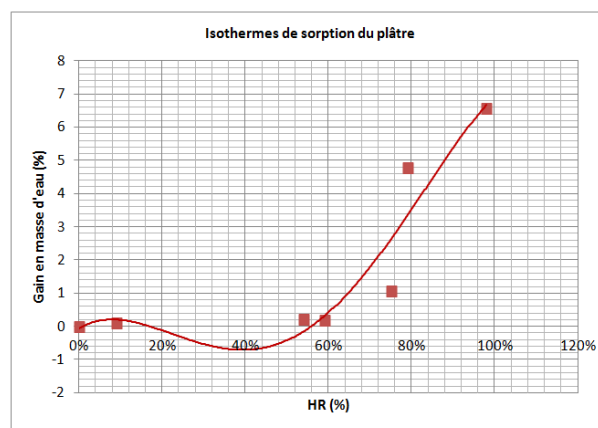


FIG. 4.18 – Isotherme d'adsorption du plâtre non renforcé

L'isotherme d'adsorption du plâtre est de type III caractéristique des milieux macroporeux comme le type II [75] : les interactions milieu et gaz absorbés sont faibles. L'isotherme obtenu est semblable à celui disponible dans la littérature établi par P. BOUSTINGORRY [20] confirmant lesdits résultats et validant la démarche expérimentale menée dans cette étude.

4.2.4 Comportement hygrométrique du plâtre renforcé des fibres de sisal

4.2.4.1 Résultats

4.2.4.1.1 Cinétique d'absorption Les échantillons sont prélevés sur les éprouvettes de traction renforcées de fibres de sisal. Les valeurs des gains en masse d'eau sont calculées et permettent de construire la courbe de la figure 4.19.

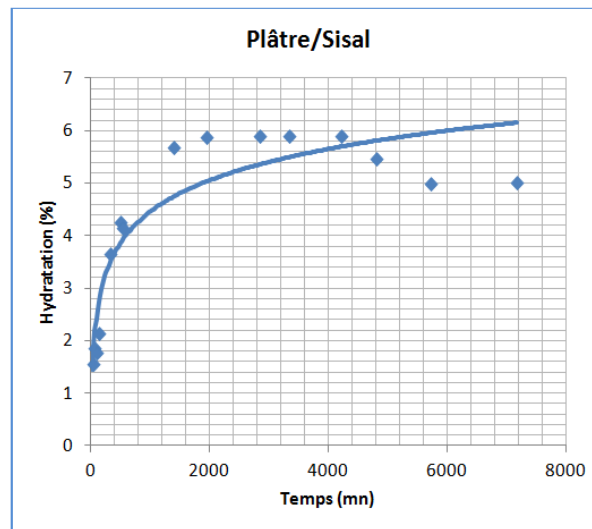


FIG. 4.19 – Cinétique d'absorption d'humidité du composite plâtre/sisal

Cette courbe révèle que le composite plâtre/sisal, dans une enceinte à humidité relative de 98%, s'hydrate à 5,9% en masse d'eau.

4.2.4.1.2 Isotherme de sorption du composite plâtre/sisal Les échantillons sont placés dans une hygrométrie différente après chaque saturation et les valeurs des gains de masse à saturation sont relevées. Elles servent à construire l'isotherme d'adsorption de la figure 4.20.

4.2.4.1.3 Discussion et conclusion On observe que le mélange plâtre/sisal, dans une enceinte à 98% d'humidité relative sature à partir de 33 heures. La présence des fibres allonge le temps nécessaire pour atteindre la saturation en humidité. L'isotherme d'adsorption montre une faible absorption à des faibles taux d'humidité relative et une importante absorption à des taux élevés. Il est de type II caractérisant les milieux macroporeux.

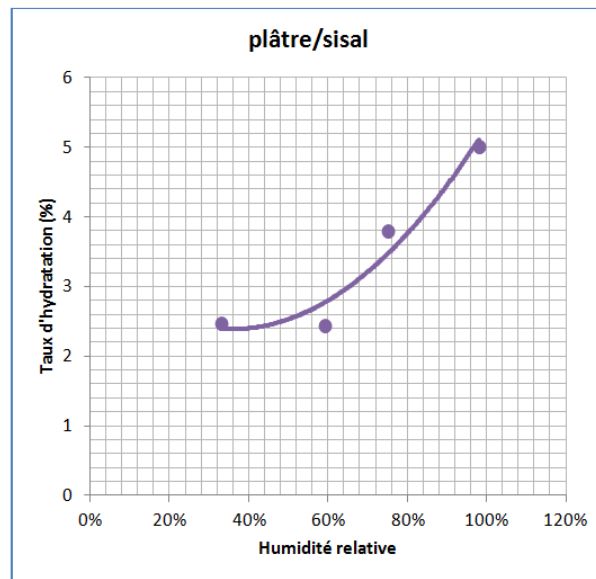


FIG. 4.20 – Isotherme d'adsorption du composite plâtre/sisal

4.2.5 Comportement hygrométrique du plâtre renforcé des fibres de RC

4.2.5.1 Résultats

4.2.5.1.1 Cinétique d'absorption Les gains de masses calculés donnent lieu à la courbe de cinétique d'absorption d'humidité présentée à la figure 4.21.

Le résultat dévoile que le composite plâtre renforcé de fibres de RC présente un taux d'absorption d'humidité égale à 7,61% dans une enceinte à 98% d'humidité.

4.2.5.1.2 Isotherme d'adsorption Les gains de masse à saturation dans différentes hygrométries sont récupérés pour construire l'isotherme d'adsorption du matériau. La figure 4.22 présente la courbe obtenue.

4.2.5.1.3 Discussion et conclusion Le plâtre renforcé de RC, dans une enceinte à 98% d'humidité relative sature à partir de 33 heures. Comme les fibres de sisal, la présence des fibres de RC retarde la saturation en humidité du matériau mais la ralentit un peu plus que le sisal. L'isotherme d'adsorption montre une faible absorption à des faibles taux d'humidité relative et une importante absorption à des taux élevés. L'isotherme d'adsorption est aussi de type II caractéristique de milieux macroporeux. L'adsorption est donc multimoléculaire.

L'observation du faciès (figure 4.23) d'une coupe au diamant d'un composite plâtre fibres montre des fibres couchées témoins d'une amorce d'arrachement de la fibre ca-

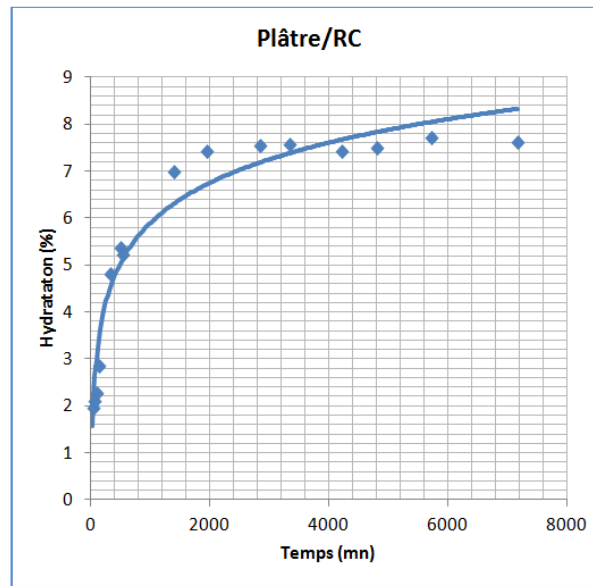
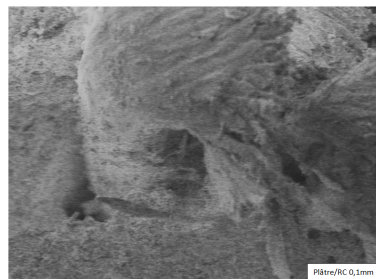
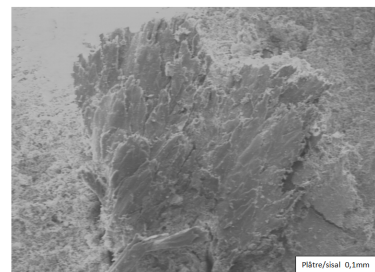


FIG. 4.21 – Cinétique d'absorption d'humidité du composite plâtre/RC

ractéristique d'un interface faible. Cette observation permet de dire que le phénomène de variation dimensionnelle des suites d'absorption d'humidité et séchage des matériaux serait aussi responsable de la faiblesse de l'interface.



(a) Arrachement de la fibre de RC à la coupe du composite



(b) Arrachement de la fibre de sisal à la coupe du composite

FIG. 4.23 – Faciès d'une coupe au diamant du matériau plâtre/fibre : mise en évidence de l'influence du gonflement et retrait des constituants sur la qualité de l'interface

4.2.5.2 Conclusion concernant l'aspect hygrométrique

Des essais de prise d'humidité ont été effectués sur des échantillons de fibres de sisal et de RC, de plâtre non renforcé, de composite plâtre/fibres. Les résultats montrent dans un premier temps que le RC, tout comme le sisal, en tant que fibres végétales sont plus hydrophiles que le plâtre non renforcé. Ceci confirme les résultats déjà trouvés en 1994 par

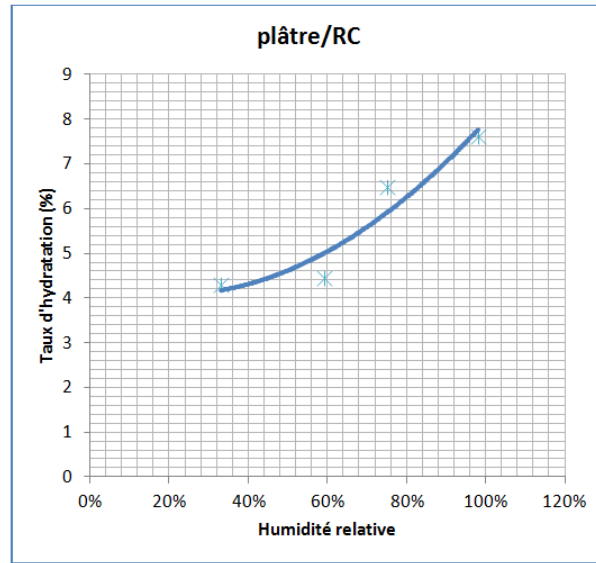


FIG. 4.22 – Isotherme d'adsorption du composite plâtre/RC

SING, M. et ses co-auteurs [38]. En second lieu, il est révélé que le RC présente la même cinétique d'absorption que le sisal mais sature légèrement avant le sisal. Les échantillons de composites plâtre/fibres testés absorbent en conséquence plus d'humidité par rapport au matériau non renforcé.

4.3 Etude comparative des résultats

4.3.1 Diffusivité thermique

Les valeurs de la diffusivité thermique obtenues sur les différents matériaux sont présentées dans le tableau 4.2. Le matériau plâtre/RC offre la plus faible valeur de diffusivité

	Plâtre non renforcé	Plâtre/sisal	Plâtre/RC
$a (m^2 S^{-1})$	$3,1.10^{-7}$	$2,77.10^{-7}$	$2,65.10^{-7}$

TAB. 4.2 – Tableau comparatif des diffusivités thermiques des matériaux plâtre et composites/fibres

thermique. Cela veut dire qu'avec ce renforcement, le plâtre améliore sa propriété d'isolant thermique.

L'influence de l'architecture des fibres de RC est examinée ; les valeurs de diffusivité thermique enregistrées sont regroupées dans le tableau 4.3. La configuration des fibres non orientées est la plus recommandable pour améliorer les propriétés d'isolation du matériau.

Des panneaux de fibres de bois sont commercialisées pour servir d'isolants thermiques des planchers et leur résistance thermique est fournie [77]. Nous comparons leur caracté-

	Fibres non orientées	Fibres unidirectionnelles libres	Fibres tissées
$a (m^2 S^{-1})$	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$2,25 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$

TAB. 4.3 – Diffusivité thermique du composite plâtre/RC en fonction de l'architecture des fibres

ristiques thermiques à celle du composite unidirectionnel plâtre/RC étudié dans le tableau 4.4.

Matériau	Epaisseur (mm)	$R (m^2 KW^{-1})$
Panneau type F	15	0,10
Panneau type A	35	0,78
Panneau type E	35	0,67
Panneau type db	35	0,67
Pâtre non renforcé	10	0,10
Composite plâtre/RC	14	$0,08 \leq R \leq 2,12$

(a) Calculée à partir de la conductivité thermique déduite de la diffusivité thermique expérimentale par la relation $a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$

(b) Calculée à partir des bornes de Voigt et Reuss de la conductivité thermique déduite de la diffusivité thermique expérimentale et ρC_p des fibres empreintée de celle des fibres du bois de chêne

TAB. 4.4 – Valeurs comparées des résistances thermiques des panneaux de fibres et le composite Plâtre/RC unidirectionnel.

4.3.2 Caractéristiques hygrométriques

4.3.2.1 Cinétique d'absorption

La cinétique d'absorption d'humidité permet d'apprécier le temps de gain en masse d'humidité du matériau jusqu'à la saturation. La figure 4.24 montre les courbes de vitesse d'absorption des matériaux testés. Les temps d'équilibre déterminés pour les constituants et les composites sont consignés dans le tableau 4.5. Les taux d'absorption d'humidité sont récapitulés dans le tableau 4.6 par comparaison aux valeurs disponibles dans la littérature.

	Constituants			Composites	
	Plâtre	Fibres de Sisal	Fibres de RC	Plâtre/Sisal	Plâtre/RC
Temps d'équilibre (min)	1200	2400	2400	2000	2000

TAB. 4.5 – Temps nécessaires pour établir l'équilibre d'absorption des constituants et composites plâtre/fibres

On peut observer que les fibres s'hydratent plus rapidement que le plâtre. En conséquence, le matériau plâtre renforcé de fibres devient plus hydrophile que lorsqu'il n'est

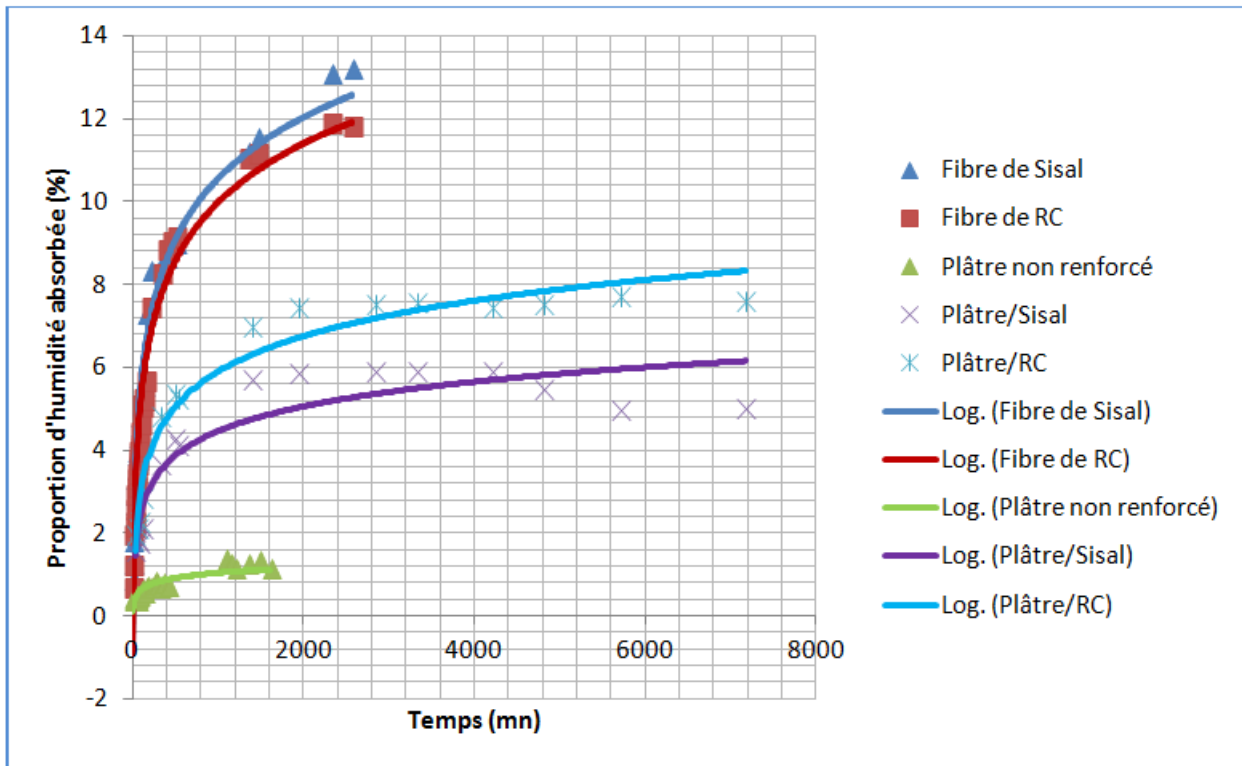


FIG. 4.24 – Cinétique d'absorption d'humidité des composites plâtre fibres et ses constituants

pas renforcé. Les courbes indiquent que les vitesses d'absorption de ces matériaux sont plus ou moins rapides en début de leur présence dans l'enceinte à humidité contrôlée.

	Plâtre	Sisal	RC	Plâtre/sisal	Plâtre/RC
Abs. Hum. % (lit.)	1 [55]	11[66]	-	1,5	-
Abs. Hum. % (exp.)	1,39	13,2	12	6	7,61
Echange d'Hum. avec atmosphère %	0,1 à 0,2				
Abs. Hum.: absorption d'humidité - lit.: littérature - exp.: expérimentale					
Réf. [38] partout sauf indication					

TAB. 4.6 – Valeurs de taux d'humidité comparées aux valeurs de la littérature.

4.3.2.2 Isothermes de sorption

Un lissage des points expérimentaux donne lieu à des isothermes de sorption (Figure 4.25) exprimant la teneur saturée en eau des constituants et du matériau plâtre/fibres sous des hygrométries différentes. Ces graphiques permettent de connaître la quantité d'eau liquide reprise par le matériau par rapport à son état anhydre ainsi que le mécanisme de fixation des molécules d'eau à la surface. On remarque que les isothermes de sorption des

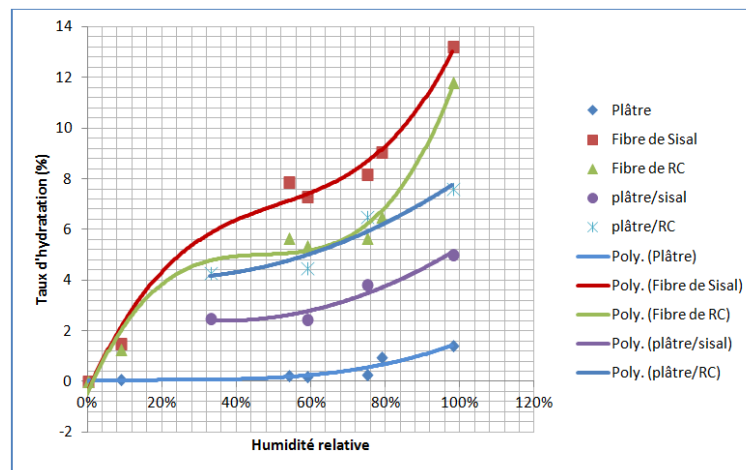


FIG. 4.25 – Isothermes de sorption des échantillons de composites plâtre/fibres et des constituants

deux fibres ont la même allure c'est à dire que les mécanismes de fixation de molécules d'eau en leur surface sont similaires. Les matériaux en plâtre renforcé de sisal ou de RC présentent conséquemment les mêmes comportements en présence de l'humidité. Ces isothermes suivent l'allure du type II caractéristique de milieux macroporeux. L'adsorption est multimoléculaire.

CONCLUSION

Les résultats expérimentaux de transfert thermique et d'absorption d'humidité ont été présentés dans ce chapitre. Les expériences faites sur les constituants et les composites plâtre/fibres révèlent que le renforcement du plâtre par des fibres végétales est un facteur retardateur de la vitesse de transfert thermique d'une face à l'autre d'une paroi. Des deux types de fibres étudiées pour ce renforcement, celles de RC favorisent mieux cette caractéristique. Elles révèlent aussi que le plâtre renforcé de fibres végétales absorbe l'humidité plus que lorsqu'il est non renforcé, les fibres utilisées étant plus hydrophiles que le plâtre. Leur temps de saturation est en conséquence rallongé. Ces résultats nous permettent de conclure que le renforcement du plâtre par des fibres végétales, notamment le sisal et le RC, accroît le ralentissement du transfert thermique dans le nouveau matériau. Ce qui nous conforte dans l'idée d'alléger la densité du plâtre pour augmenter sa capacité d'isolation thermique tout en le renforçant par des fibres végétales pour améliorer sa tenue mécanique. Les caractéristiques thermiques et hygrométriques ne sont pas affaiblies par l'adjonction des fibres de sisal, encore moins celles de RC. On note aussi que les fibres utilisées peuvent absorber et rejeter l'eau. Cette caractéristique est importante pour d'autres applications, le cas des procédés de fabrication par voie humide par exemple.

La conduite des essais d'absorption d'humidité, pour recueillir toutes les informations nécessaires avec une grande précision, demande la confection des éprouvettes d'une géométrie rigoureuse, ce que la découpe des éprouvettes de plâtre ne permet pas. Elle demande aussi un nombre grand d'essais. Les informations livrées par nos travaux donnent déjà une idée exploitable : on sait désormais que les fibres sont plus hydrophiles que le composite plâtre/fibres qui, à son tour l'est plus que le plâtre.

Chapitre 5

Approche multiéchelle du comportement du plâtre renforcé

Sommaire

5.1	Le plâtre renforcé : un matériau à microstructure hiérarchique	162
5.1.1	Observations	162
5.1.2	Description multiéchelle de la microstructure du plâtre renforcé	164
5.2	La modélisation multiéchelle	164
5.2.1	Rappel du principe de la méthode	164
5.2.2	Approche adoptée dans le cadre de ce travail	165
5.2.3	Rappels sur les méthodes d'homogénéisation	165
5.2.4	Modèles analytiques ou semi-analytiques	168
5.3	Application au plâtre renforcé de fibres unidirectionnelles . .	172
5.3.1	Comportement thermique	172
5.3.2	Comportement mécanique	174
5.4	Comparaison aux résultats expérimentaux	175
5.4.1	Comportement thermique	176
5.4.2	Comportement mécanique	176
5.5	Conclusion	176

Introduction

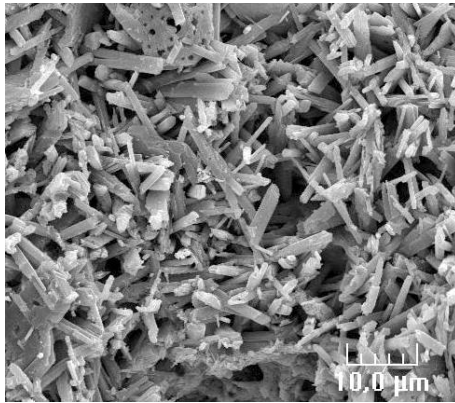
Dans les chapitres précédents, nous avons caractérisé expérimentalement les comportements mécanique et thermique du plâtre renforcé ou non de fibres végétales. Dans ce chapitre, nous proposons une méthode d'estimation des propriétés thermiques et mécaniques des composites plâtre/fibres végétales. Il s'agit d'une démarche surtout pédagogique montrant la méthodologie d'estimation de ces propriétés. Nous nous limiterons au cas du plâtre renforcé de fibres longues unidirectionnelles. Dans un premier paragraphe, la nature hiérarchique de la microstructure du plâtre renforcé de fibres longues unidirectionnelles sera mise en évidence. Puis, nous ferons une présentation succincte du principe de l'analyse multiéchelle et de quelques méthodes analytiques d'estimation des propriétés. Dans la suite du chapitre, la méthode sera mise en œuvre pour les matériaux étudiés dans le cadre de cette thèse. Enfin, les résultats issues de l'estimation seront comparés aux résultats expérimentaux.

5.1 Le plâtre renforcé : un matériau à microstructure hiérarchique

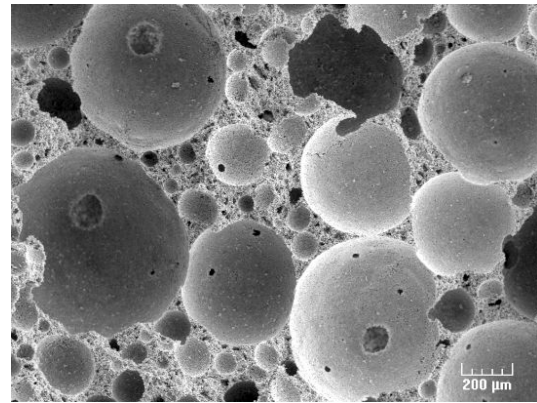
5.1.1 Observations

Comme dans le cas de nombreux matériaux, la microstructure du plâtre pris dépend fortement des conditions de son hydratation. Comme souligné précédemment, le taux de gâchage E/P, égal au rapport massique entre eau et semihydrate est un paramètre important qui détermine la porosité du matériau. Le volume d'air entré dans l'échantillon en cours d'hydratation est un autre paramètre important qui détermine la microstructure du matériau. J. Sanahuja a présenté dans son mémoire de thèse [1], une image MEB de la microstructure de plâtre pris dans laquelle une grande quantité de bulles d'air a été intentionnellement introduite (figure 5.1(b)).

Enfin, d'autres conditions de mise en œuvre comme la température et l'ajout d'additifs ont une influence sur l'élancement des cristaux obtenus. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons au plâtre pris sans bulles d'air intentionnellement introduites. Dans ce cas, la microstructure du matériau est poreuse et constituée de cristaux allongés (figure 5.1(a)) d'orientation aléatoire. Le comportement thermo-mécanique associé est donc quasi-isotrope.



(a) Image MEB d'un échantillon de plâtre pris sans bulles.



(b) Image MEB d'un échantillon de plâtre pris avec bulles.

FIG. 5.1 – *Influence du volume d'air sur la microstructure du plâtre [1, 2]*

L'image MEB d'une microstructure du plâtre renforcé de fibres longues unidirectionnelles est montrée à la figure 5.2 [1, 2]. Il convient de signaler les difficultés de préparation des échantillons : coupes droites sans arrachage des fibres, difficultés de polissage sans dégradation... La méthode utilisée dans le cadre de nos travaux est une découpe sans polissage à l'aide d'une scie circulaire après congélation du matériau. Malgré ces précautions, il n'a pas été possible d'obtenir une coupe droite franche des fibres comme on peut le voir sur la figure 5.2. On peut également remarquer que les faisceaux de fibres ne sont pas imprégnés à cœur et qu'un certain déchaussement peut être observé, traduisant une faible adhésion à l'interface entre le plâtre et les fibres.

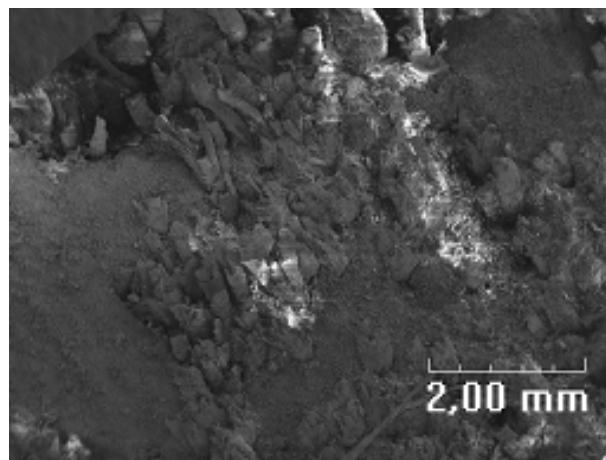


FIG. 5.2 – *Image MEB de la microstructure du plâtre renforcé de fibres longues de RC.*

5.1.2 Description multiéchelle de la microstructure du plâtre renforcé

Les observations précédentes conduisent naturellement à distinguer trois échelles dans la microstructure du plâtre renforcé de fibres longues unidirectionnelles.

- L'échelle macroscopique est celle du plâtre renforcé de fibres. Un volume élémentaire représentatif de ce matériau fait apparaître des fibres noyées dans du plâtre apparemment homogène, les cristaux de gypse n'étant pas perceptibles à cette échelle. Les propriétés homogénéisées calculées sur ce VER (Volume Élémentaire Représentatif) macro seront utilisées pour le calcul des ouvrages.
- L'échelle mésoscopique est celle du plâtre pris. Elle révèle, par grossissement, un second niveau d'hétérogénéité dans ce qui apparaissait précédemment comme homogène. On observe ainsi des cristaux de gypse sous forme d'aiguilles enchevêtrées et un réseau de pores intercrystallins. Les propriétés homogénéisées calculées sur un VER à ce niveau (VER méso) sont les propriétés du plâtre pris pur.
- L'échelle microscopique est celle du cristal de gypse que l'on considère comme matériau homogène. Il n'est pas exclu que ces cristaux renferment un réseau de nano-pores que nos moyens expérimentaux d'investigation n'ont pu déceler.

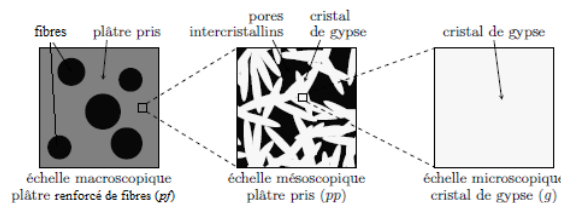


FIG. 5.3 – Description multiéchelle de la microstructure du plâtre renforcé [1]

Le diamètre des cristaux de gypse est de l'ordre de 2 micronmètres tandis que celui des faisceaux de fibres végétales utilisées est de l'ordre du millimètre, ce qui assure la séparabilité des échelles et une modélisation multiéchelle est donc applicable.

5.2 La modélisation multiéchelle

5.2.1 Rappel du principe de la méthode

Dans sa version "up-scale" ou approche ascendante, la modélisation multiéchelle consiste à développer et mettre en œuvre une cascade de modèles, les résultats d'un modèle à une échelle donnée servant d'entrée au modèle à l'échelle immédiatement supérieure. Elle est

parfois difficile à mettre en œuvre en raison de la difficulté à identifier expérimentalement les propriétés de matériaux aux échelles submillimétriques. C'est le cas par exemple dans nos travaux pour l'identification de la conductivité thermique des fibres végétales.

Dans sa version "down-scale" ou approche descendante, la modélisation multiéchelle permet d'accéder à des propriétés de constituants à des échelles fines par la résolution d'une cascade de problèmes inverses d'identification. Joseph Henon [59] a utilisé une méthode multiéchelle par approche descendante pour déterminer la conductivité thermique du squelette solide de matériaux poreux géopolymères présentant plusieurs réseaux de porosité : un réseau de macropores séparés par un squelette solide lui-même comportant un deuxième réseau de pores de diamètre beaucoup plus petit.

5.2.2 Approche adoptée dans le cadre de ce travail

L'estimation des propriétés du plâtre pris à partir des propriétés des phases a fait l'objet de nombreux travaux tant analytiques que numériques dans la littérature [6, 49, 2, 13]. Cette approche sera conservée dans le cadre de nos travaux pour le passage de l'échelle microscopique à l'échelle mésoscopique. En dépit des difficultés de caractérisation à l'échelle des fibres, nous mettrons en œuvre une méthode directe d'estimation de propriétés entre les échelles macroscopique et mésoscopique en utilisant comme propriétés manquantes des constituants, des propriétés de matériaux à comportement similaire.

La méthode adoptée dans le cadre de ce travail utilise donc une approche multiéchelle ascendante. La technique de changement d'échelle utilisée est l'homogénéisation en raison de ses fondements physiques et la possibilité qu'elle offre d'obtenir dans certains cas, des solutions analytiques.

5.2.3 Rappels sur les méthodes d'homogénéisation

L'homogénéisation a pour but la construction d'une loi de comportement macroscopique d'un matériau à microstructure hétérogène. Quatre étapes sont nécessaires pour la mise en œuvre de la méthode : la définition d'un volume élémentaire représentatif (VER) de la microstructure, le choix des conditions aux limites du VER, l'établissement des relations de changement d'échelles et enfin la détermination du comportement effectif.

5.2.3.1 Le volume élémentaire représentatif et ses conditions aux limites

Dans le cas de milieux périodiques, le VER est une période de la microstructure. Pour les milieux aléatoires, le VER est plus complexe et sa taille doit être déterminée avec

précaution. La règle générale est que la taille du VER soit grande devant l'échelle des hétérogénéités tout en restant petite par rapport à l'échelle macroscopique. De récents travaux [60] utilisent l'analyse morphologique pour estimer la taille du VER qui dépend également de la propriété à estimer.

Trois types de conditions aux limites peuvent être appliqués aux bords du VER : les conditions de Dirichlet, les conditions de Neuman et les conditions périodiques. Dans le cas d'un problème de mécanique, ce sont des conditions de déformation homogène, de contrainte homogène et périodiques.

Les conditions aux limites appliquées aux bords du volume élémentaire ont une grande influence sur les propriétés homogénéisées. Il a été montré par de nombreux auteurs que les conditions aux limites périodiques permettent d'obtenir un comportement homogénéisé avec des volumes élémentaires de petites tailles.

5.2.3.2 Relations de changement d'échelle

Nous prenons pour illustration le cas de la mécanique, V désigne le volume du VER. On note Σ_{ij} et E_{ij} , les contraintes et déformations homogénéisées respectivement, qui sont définies comme les moyennes des grandeurs locales σ_{ij} et ϵ_{ij} .

$$\begin{aligned}\Sigma_{ij} &= \frac{1}{|V|} \int_V \sigma_{ij} dV \\ E_{ij} &= \frac{1}{|V|} \int_V \epsilon_{ij} dV\end{aligned}$$

Ces relations d'homogénéisation sont dites "micro-macro" car elles permettent le passage des grandeurs locales vers les grandeurs homogénéisées. À ces relations, s'ajoute le lemme de Hill-Mandel, également utilisé pour le calcul des propriétés homogénéisées.

$$\Sigma : E = \Sigma_{ij} \cdot E_{ij} = \frac{1}{|V|} \int_V \sigma_{ij} \cdot \epsilon_{ij} dV$$

où l'opérateur $:$ est le produit tensoriel contracté deux fois.

Si le comportement du matériau étudié est linéaire, il est possible de définir des tenseurs dits de localisation des déformations $A_{ijkl}(x)$ et de concentration des contraintes $B_{ijkl}(x)$ fonctions de la position x des points matériels du milieu hétérogène, pour le passage des

grandeurs macroscopiques aux grandeurs locales.

$$\begin{aligned}\epsilon_{ij}(x) &= A_{ijkl}(x).E_{kl} \\ \sigma_{ij}(x) &= B_{ijkl}(x).\Sigma_{kl}\end{aligned}$$

Ces relations sont dites "macro-micro". Les tenseurs de localisation de déformation et de concentration de contraintes sont tels que, si I_{ijkl} désigne le tenseur identité d'ordre 4, alors

$$\frac{1}{|V|} \int_V A_{ijkl}(x)dV = \frac{1}{|V|} \int_V B_{ijkl}(x)dV = I_{ijkl}$$

La figure 5.4 [59] résume les relations de comportement et de changement d'échelles en homogénéisation linéaire.

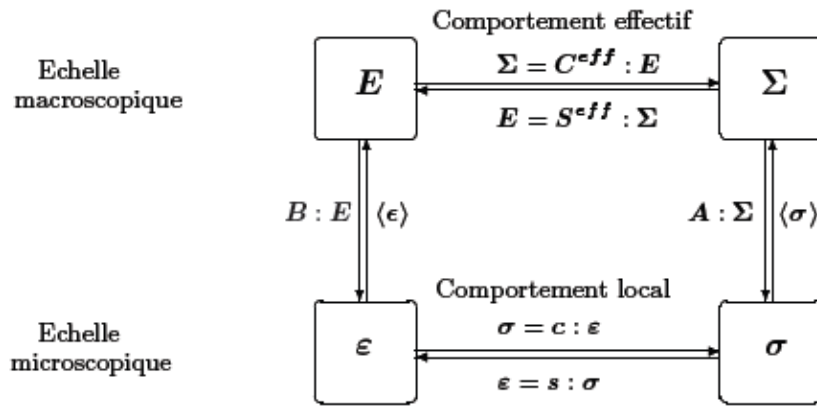


FIG. 5.4 – Changement d'échelles et lois de comportement linéaire

5.2.3.3 Détermination du comportement homogénéisé

En utilisant les relations de changement d'échelles et les lois de comportement, il est possible d'établir des expressions formelles des propriétés homogénéisées recherchées. Le cas de la mécanique avec comportement linéaire est toujours utilisé pour illustration.

◇ Dans le cas de déformations homogènes imposées, le tenseur des modules homogénéisés C_{ijkl}^{hom} est calculé de la façon suivante.

$$\Sigma_{ij} = \frac{1}{|V|} \int_V c_{ijmn}.A_{mnkl}.E_{kl}dV = \frac{1}{|V|} \int_V c_{ijmn}.A_{mnkl}dV.E_{kl} \implies C_{ijkl}^{hom} = \frac{1}{|V|} \int_V c_{ijmn}.A_{mnkl}dV$$

◇ Dans le cas de contraintes homogènes imposées, le tenseur des souplesses homogénéisées S_{ijkl}^{hom} est calculé de la façon suivante.

$$E_{ij} = \frac{1}{|V|} \int_V s_{ijmn} \cdot B_{mnkl} \cdot \Sigma_{kl} dV = \frac{1}{|V|} \int_V s_{ijmn} \cdot B_{mnkl} dV \cdot \Sigma_{kl} \implies S_{ijkl}^{hom} = \frac{1}{|V|} \int_V s_{ijmn} \cdot B_{mnkl} dV$$

Le lemme de Hill-Mandel permet également d'obtenir une expression formelle de C_{ijkl}^{hom} et S_{ijkl}^{hom} .

Les propriétés c_{ijmn} (ou s_{ijmn}) des constituants étant connues, on voit bien que toute la difficulté des méthodes d'homogénéisation réside dans la détermination la plus précise possible des tenseurs de localisation des déformations ou de concentration des contraintes. On distingue deux approches pour la détermination des tenseurs de localisation des déformations ou de concentration des contraintes en vue du calcul des propriétés homogénéisées : les approches analytiques et les approches numériques. Dans les approches analytiques, l'introduction d'hypothèses simplificatrices plus ou moins fortes sur les champs locaux de contraintes et de déformations permet d'obtenir un encadrement plus ou moins serré des propriétés homogénéisées. A titre d'exemple, les bornes de Voigt et Reuss sont obtenues en supposant que les champs locaux sont homogènes et égaux aux champs macroscopiques imposés, soit $A_{ijkl} = B_{ijkl} = I_{ijkl}$. L'encadrement qui en résulte n'est pas très précis. Plus l'on apporte de l'information dans les champs locaux, plus les bornes se resserrent. D'autres approches analytiques permettent d'obtenir, non pas des bornes mais des estimations. C'est le cas par exemple dans les problèmes de type inclusions-matrice où l'on suppose que la matrice a le comportement du milieu homogénéisé ou dans le cas où des conditions aux limites périodiques sont appliquées aux bords du VER. Les approches analytiques sont utilisées dans le cas de pavages réguliers avec des comportements linéaires. Pour des microstructures aléatoires et des comportements non-linéaires, on utilise plutôt des approches numériques et plus particulièrement la méthode des éléments finis pour évaluer les champs locaux.

5.2.4 Modèles analytiques ou semi-analytiques

5.2.4.1 Cas de la thermique

Les bornes de Voigt et Reuss correspondent aux lois de mélange des conductivités thermiques ou des résistivités. Dans le cas des matériaux poreux comme le plâtre dont le taux de porosité est noté ϕ , les expressions des bornes sont les suivantes :

$$\lambda^{hom} = \phi \lambda_p + (1 - \phi) \lambda_s \quad (5.1)$$

$$\frac{1}{\lambda^{hom}} = \frac{\phi}{\lambda_p} + \frac{1-\phi}{\lambda_s} \quad (5.2)$$

avec λ_p , la conductivité thermique des pores et λ_s , celle des cristaux de gypse.

En supposant que les pores sont sphériques et que le champ de température est uniforme, Hashin et Shtrikman ont obtenu des bornes plus resserrées que celles de Voigt et Reuss. La géométrie des pores dans le plâtre ne correspond pas du tout à cette hypothèse.

5.2.4.2 Cas de la mécanique

La détermination par approche théorique des modules d'élasticité d'un matériau composite à renforts unidirectionnels peut être abordée suivant trois types de méthodes : la recherche d'expressions limites en utilisant les théorèmes variationnels de l'énergie, la recherche de solutions exactes et les approches semi-empiriques.

Les théorèmes variationnels de l'énergie permettent de déterminer les bornes sur les modules d'élasticité : le théorème de l'énergie potentielle totale est utilisée dans une approche en déplacements pour déterminer les bornes supérieures ; les bornes inférieures quant à elles sont trouvées par une approche en contraintes en utilisant la théorie de l'énergie potentielle complémentaire [64]. Z. Hashin et R. Hill ont ainsi trouvé des bornes sur les modules d'élasticité [78, 79], elles sont données par les expressions suivantes :

$$K_m + \frac{V_f}{\frac{1}{K_f - K_m} + \frac{1 - V_f}{K_m + G_m}} \leq K_L \leq K_f + \frac{1 - V_f}{\frac{1}{K_m - K_f} + \frac{V_f}{K_f + G_f}} \quad (5.3)$$

$$G_m + \frac{V_f}{\frac{1}{G_f - G_m} + (1 - V_f) \frac{K_m + 2G_m}{2G_m(K_m + G_m)}} \leq G_{TT} \leq G_f + \frac{1 - V_f}{\frac{1}{G_m - G_f} + V_f \frac{K_f - 2G_f}{2G_f(K_f + G_f)}} \quad (5.4)$$

$$G_m + \frac{V_f}{\frac{1}{G_f - G_m} + \frac{1 - V_f}{2G_m}} \leq G_{LT} \leq G_f + \frac{1 - V_f}{\frac{1}{G_m + G_f} + \frac{V_f}{2G_f}} \quad (5.5)$$

$$\frac{V_f(1 - V_f)}{\frac{V_f}{K_m} + \frac{1 - V_f}{K_f} + \frac{1}{G_m}} \leq \frac{E_L - V_f E_f - (1 - V_f) E_m}{4(\nu_f - \nu_m)^2} \leq \frac{V_f(1 - V_f)}{\frac{1 - V_f}{K_f} + \frac{V_f}{K_m} \frac{1}{G_f}} \quad (5.6)$$

$$\frac{V_f(1 - V_f)}{\frac{V_f}{K_m} + \frac{1 - V_f}{K_f} + \frac{1}{G_m}} \leq \frac{\nu_{LT} - V_f \nu_f - (1 - V_f) \nu_m}{(\nu_f - \nu_m) \left(\frac{1}{K_m} - \frac{1}{K_f} \right)} \leq \frac{V_f(1 - V_f)}{\frac{1 - V_f}{K_f} + \frac{V_f}{K_m} \frac{1}{G_f}} \quad (5.7)$$

Avec V_i , la fraction volumique du constituant i ; K_i , le module de compression du constituant i ; G_i , le module de cisaillement du constituant i ; E_i , le module d'élasticité du constituant i ; ν_i , le coefficient de Poisson du constituant i ; $i \in \{m(\text{matrice}), f(\text{fibre})\}$; E_L et ν_{LT} le module d'Young et le coefficient de Poisson mesurés dans un essai de traction longitudinale ; K_L le module de compression hydrostatique mesuré dans une compression

hydrostatique latérale sans déformation longitudinale ; G_{TT} et G_{LT} les modules de cisaillement mesurés respectivement dans des essais de cisaillements transversal et longitudinal.

La recherche de solutions exactes est menée avec des simplifications sur la géométrie de la cellule élémentaire, sur les conditions imposées à la frontière de cette cellule élémentaire, etc. La résolution est soit analytique, soit par la méthode numérique des éléments finis. En abordant la solution par une approche analytique de type déplacement, du problème d'une cellule élémentaire cylindrique (fibre cylindrique entourée d'un cylindre de matrice (figure 5.5 [19]) soumise à la traction (figure 5.6 [19]), on obtient les expressions (5.6) et (5.7) identiques aux bornes inférieures du module d'élasticité (5.4) et du coefficient de Poisson (5.5).

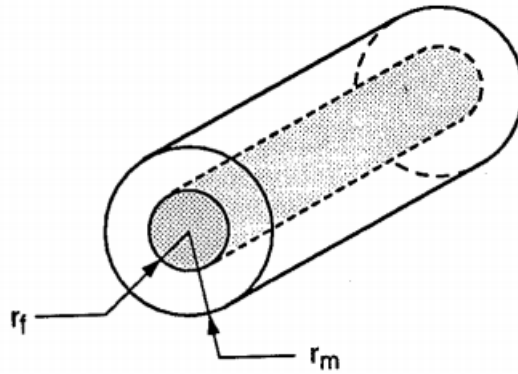


FIG. 5.5 – Cellule élémentaire cylindrique d'un composite unidirectionnel

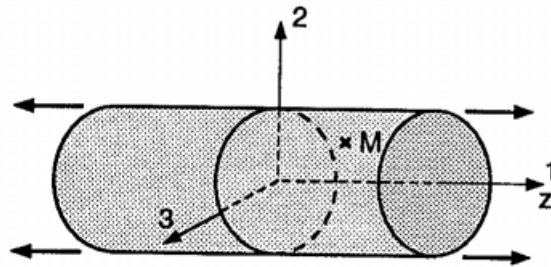


FIG. 5.6 – Cylindre soumis à une traction uniforme

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - \nu_f) + \frac{4(\nu_f - \nu_m)^2}{\frac{V_f}{K_m} + \frac{1 - V_f}{K_f} + \frac{1}{G_m}} \quad (5.8)$$

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f) + \frac{(\nu_f - \nu_m) \left(\frac{1}{K_m} - \frac{1}{K_f} \right) V_f (1 - V_f)}{\frac{V_f}{K_m} + \frac{1 - V_f}{K_f} + \frac{1}{G_m}} \quad (5.9)$$

Des applications numériques sur ces expressions conduisent souvent à les confondre avec

la loi des mélanges :

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (5.10)$$

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f) \quad (5.11)$$

Une approche simplifiée permet de déterminer le module d'élasticité longitudinal et le coefficient de Poisson longitudinal par le moyen d'un essai de traction longitudinale de la cellule élémentaire (figure 5.7 [19]), les expressions obtenues correspondent à la loi des mélanges. Des équations générales et simples de formulation ont été proposées par J.C. Halpin et S.W. Tsai [80].

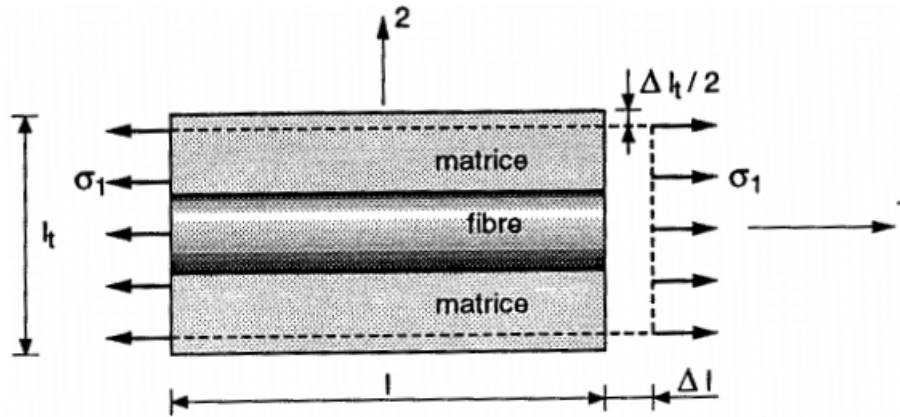


FIG. 5.7 – Schéma simplifié d'une traction longitudinale

D'autres modules d'élasticité, notamment les bornes inférieures des modules de cisaillement longitudinal G_{LT} et de compression latérale K_L , peuvent ainsi être calculés respectivement par les expressions (5.12) et (5.13).

$$G_{LT} = G_m \frac{G_f (1 + V_f) + G_m (1 - V_f)}{(1 - V_f) + G_m (1 + V_f)} \quad (5.12)$$

$$K_L = K_m + \frac{V_f}{\frac{1}{k_f} + \frac{1}{k_m + (G_f - G_m/3)}} + \frac{1 - V_f}{k_m + (4/3)G_m} \quad (5.13)$$

Un autre module, le module de cisaillement transversal G_{TT} résultant d'un modèle développé par les auteurs des références [81, 82] est définie par l'expression (5.14) de sa borne inférieure.

$$G_{TT} = G_m \left(1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{k_m + 7G_m/3}{2k_m + 8G_m/3} (1 - V_f)} \right) \quad (5.14)$$

Le module d'Young transversal E_T quant à lui est défini par l'expression (5.15).

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2K_L} + \frac{1}{2G_{TT}} + 2\frac{\nu_{LT}^2}{E_L}} \quad (5.15)$$

Les modules des constituants permettant de calculer les valeurs de ces expressions sont données par les formules suivantes : pour la fibre, $G_f = \frac{E_f}{2(1+\nu_f)}$, $k_f = \frac{E_f}{3(1-2\nu_f)}$, $K_f = k_f + \frac{G_f}{3}$; pour la matrice, $G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)}$, $k_m = \frac{E_m}{3(1-2\nu_m)}$, $K_m = k_m + \frac{G_m}{3}$.

5.3 Application au plâtre renforcé de fibres unidirectionnelles

5.3.1 Comportement thermique

5.3.1.1 Conductivité thermique homogénéisée du plâtre pris

A l'échelle mésoscopique, le calcul des valeurs limites de la conductivité thermique homogénéisée λ^{hom} du VER de plâtre est fait selon les expressions (5.1) et (5.2) respectivement pour les bornes supérieure (modèle parallèle) et inférieure (modèle série). Les valeurs numériques de la porosité ϕ obtenues au chapitre 4, de la conductivité thermique λ_p des pores (air) et λ_s des cristaux de gypse tirées de la littérature [4] sont respectivement 0,62%, 0,02W/mK et 0,35W/mK. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 5.1.

Borne inférieure	Borne supérieure
$\lambda^{hom}(W/mK)$	$\lambda^{hom}(W/mK)$
0,0312	0,1454

TAB. 5.1 – Valeurs limites de la conductivité thermique homogénéisée du plâtre

La caractéristique thermique fournie par l'essai utilisé est la diffusivité thermique. Il est donc important de déduire la valeur de cette propriété pour des besoins de comparaison avec les valeurs trouvées expérimentalement. Les valeurs de diffusivité thermique sont déduites par la relation $a^{hom} = \frac{\lambda^{hom}}{\rho_{Pltre}C_{pPltre}}$ et consignées dans le tableau 5.2. Elles sont calculées à partir des données de la masse volumique du plâtre $\rho_{Pltre} = 880 \text{ kg/m}^3$ obtenue au chapitre 2 et de la chaleur spécifique du plâtre $C_{pPltre} = 1000 \text{ J/kgK}$ tirée de la littérature [4].

Les valeurs des caractéristiques ainsi obtenues sont propres au plâtre pris c'est à dire $\lambda^{hom} = \lambda_{Pltre}$ et $a^{hom} = a_{Pltre}$.

Borne inférieure	Borne supérieure
$a^{hom}(m^2s^{-1})$	$a^{hom}(m^2s^{-1})$
$3,55.10^{-08}$	$1,65.10^{-07}$

TAB. 5.2 – Valeurs limites de la diffusivité thermique déduite de la conductivité thermique homogénéisée du plâtre

5.3.1.2 Conductivité thermique homogénéisée du composite plâtre/fibres

A l'échelle du mélange fibres/plâtre, le matériau est considéré composé de deux phases dont une matrice plâtre homogène de conductivité thermique λ^{hom} obtenue à l'échelle mésoscopique et les fibres de conductivité thermique λ_f . Sa conductivité thermique peut être encadrée par les expressions (5.16) et (5.17).

$$\lambda_{comp}^{hom} = \lambda_f v_f + (1 - v_f) \lambda^{hom} \quad (5.16)$$

$$\frac{1}{\lambda_{comp}^{hom}} = \frac{v_f}{\lambda_f} + \frac{(1 - v_f)}{\lambda^{hom}} \quad (5.17)$$

En l'absence d'informations sur les caractéristiques thermiques des fibres en étude, nous allons faire usage de celles du bois de chêne [83, 84, 73] de masse volumique $\rho_f = 770kgm^{-3}$ lorsque les fibres sont perpendiculaires au flux de chaleur, de conductivité thermique $\lambda_f = 0,2Wm^{-1}K^{-1}$ et de chaleur massique $C_p = 2,38kJkg^{-1}K^{-1}$. Le tableau 5.3 récapitule les données et les valeurs limites de la conductivité thermique des spécimens de composites testés.

	λ_{comp}^{hom} inférieure	λ_{comp}^{hom} supérieure
Plâtre/RC FT	4,66E-02	1,67E-01
Plâtre/RC F1D	4,66E-02	1,67E-01

TAB. 5.3 – Valeurs limites des conductivités thermiques des spécimens de composites testés

Pour faciliter la comparaison, il est nécessaire de convertir la diffusivité thermique fournie par le moyen expérimental utilisé. Ainsi, la chaleur volumique $(\rho C_p)_{composite}$ du composite est d'abord évaluée par la relation (5.18) [84].

$$(\rho C_p)_{composite} = (\rho C_p)_{fibre} v_f + (1 - v_f) (\rho C_p)_{pltre} \quad (5.18)$$

Par la suite, la conductivité thermique λ_{comp}^{exp} expérimentale du composite est déduite de la diffusivité thermique expérimentale $a_{composite}^{exp}$ en utilisant la relation $\lambda_{comp}^{exp} = (\rho C_p)_{composite} a_{composite}^{exp}$. Les valeurs résultantes sont consignées dans le tableau 5.4.

	(ρC_{pf})	$(\rho C_p)_{platre}$	$(\rho C_p)_{composite}$	$\alpha_{composite}^{exp}$	λ_{comp}^{exp}
Plâtre/RC FT	1832,6	8,80E+05	5,36E+05	2,3E-07	1,23E-01
Plâtre/RC F1D	1832,6	8,80E+05	5,36E+05	2,25E-07	1,21E-01

TAB. 5.4 – Conductivités thermiques déduites des diffusivités thermiques expérimentales des composites

5.3.2 Comportement mécanique

5.3.2.1 Calcul des modules homogénéisés du plâtre pris

Les équations (5.10) et (5.11) permettent de calculer les limites inférieures des modules d'élasticité et du coefficient de Poisson d'un matériau hétérogène à deux constituants. A l'échelle mésoscopique, le plâtre est constitué de la porosité et des cristaux de gypse. A cette échelle ces équations s'écrivent selon les relations (5.19), (5.20) et déterminent les caractéristiques du plâtre pris.

$$E^{hom} = \phi E_p + (1 - \phi) E_s \quad (5.19)$$

$$\nu^{hom} = \phi \nu_p + (1 - \phi) \nu_s \quad (5.20)$$

avec $E_s = 40 \text{ GPa}$ et $\nu_s = 0,34$ le module d'élasticité et le coefficient de Poisson du gypse tirés de la littérature [1]; E_p et ν_p le module d'élasticité et le coefficient de Poisson des pores (donc de l'air) nulles et la porosité $\phi = 62\%$ obtenue au chapitre 2. Les valeurs résultantes sont consignées dans le tableau 5.5.

$E^{hom}(\text{GPa})$	ν^{hom}
15,20	0,13

TAB. 5.5 – Valeurs des modules d'élasticité et coefficient de Poisson homogénéisés du plâtre pris

5.3.2.2 Calcul des modules homogénéisés du composite plâtre/fibres

A l'échelle du composite (plâtre pris et fibres), les caractéristiques homogénéisées du composite sont calculées tel que défini plus haut prenant en compte les caractéristiques homogénéisés du plâtre pris précédemment obtenues. Les données E_f des fibres sont les valeurs trouvées expérimentalement; les coefficients de Poisson ν_f des fibres sont tirées de la littérature [12]. Les valeurs des modules des constituants sont rassemblées dans le tableau 5.6.

Les modules d'élasticité homogénéisés des spécimens de composites unidirectionnels sont calculés à partir des données du tableau 5.6 en se servant des expressions théoriques

Modules	Sisal	RC	Plâtre
Module d'élasticité E(GPa)	12,76	7,10	15,2
Coefficient de Poisson ν	0,25	0,20	0,13
Modules de cisaillement G (GPa)	7,98	4,26	8,59
Module de compressibilité k (GPa)	2,13	1,42	3,75
Module de compression latéral K (GPa)	4,79	2,84	6,61

TAB. 5.6 – *Modules d'élasticité des fibres de sisal et de RC ainsi que du plâtre*

de solutions exactes dans le cas d'arrangement particulier des fibres. Le modèle géométrique de la cellule élémentaire est représenté dans la figure 5.5. Les valeurs obtenues sont consignées dans le tableau 5.7.

Modules	Plâtre/sisal fibres en faisceaux	Plâtre/RC fibres en faisceaux	Plâtre/RC fibres tissées	Plâtre/RC fibres libres
Fraction volumique	0,28	0,18	0,39	0,39
Module d'Young longitudinal EL(GPa)	14,52	13,74	12,04	12,04
Coefficient de Poisson ν	0,16	0,14	0,16	0,16
Modules de cisaillement GLT (GPa)	12,02	9,46	7,64	7,64
Module de compression latérale KL (GPa)	6,64	6,63	6,65	6,65
Modules de cisaillement transversal GTT (GPa)	9,10	8,67	8,76	8,76
Module d'Young transversal ET(GPa)	14,93	14,70	14,68	14,68

TAB. 5.7 – *Valeurs des modules d'élasticité des composites unidirectionnelles calculées à partir des expressions théoriques*

5.3.2.3 Valeurs expérimentales

Les moyens expérimentaux utilisés ont permis d'évaluer le module d'élasticité longitudinal. Ces valeurs sont consignées dans le tableau 5.8.

Modules	Plâtre/sisal en faisceaux	Plâtre/RC en faisceaux	Plâtre/RC tissées	Plâtre/RC libres	plâtre pris non renforcé	Fibre de sisal	Fibres de RC
Module d'élasticité longitudinale (GPa)	2,5	2	1,2	0,9	1,7	1,28	0,71

TAB. 5.8 – *Valeurs expérimentales des modules d'élasticités longitudinales*

5.4 Comparaison aux résultats expérimentaux

Nous procédons, dans ce paragraphe, à la comparaison des valeurs expérimentales mesurées directement ou indirectement sur les spécimens de composites unidirectionnels aux valeurs théoriques obtenues à partir des expressions établies plus haut. Il s'agit des valeurs caractérisant le transfert thermique et la tenue mécanique.

5.4.1 Comportement thermique

Les valeurs mesurées de la conductivité thermique des composites sont indiquées dans le tableau 5.4. Elles sont encadrées par les valeurs limites calculées à partir des expressions (5.16), (5.17) et la valeur de la conductivité thermique de la fibre. Les caractéristiques thermiques de la fibre utilisées sont celles du chêne avec des fibres considérées perpendiculaires au flux de chaleur. Elles se trouvent dans les références [83, 84, 73]. Les valeurs limites de la conductivité thermique du plâtre pris calculées au moyen des expressions (5.1) et (5.2) sont utilisées pour ces calculs. Ces données sont reportées dans le tableau 5.3.

Nous observons que les bornes obtenues encadrent bien les valeurs expérimentales. Ce qui montre que l'encadrement de la conductivité thermique expérimentale est bien décrit par les expressions utilisées. Toutefois, de travaux futurs doivent viser la mesure de la conductivité thermique des fibres de sisal et de RC afin de disposer de données fiables pour l'estimation des propriétés.

5.4.2 Comportement mécanique

Les valeurs mesurées du module d'élasticité sont consignées dans le tableau 5.8. A partir des valeurs des caractéristiques des constituants consignées dans le tableau 5.6, nous avons calculé les valeurs des modules d'élasticité des éprouvettes de composites unidirectionnels. Elles l'ont été à partir les expressions théoriques de (5.10) à (5.15) et reportées dans le tableau 5.7.

On observe que le module d'élasticité homogénéisé du plâtre pris est de loin supérieur à la valeur mesurée. Il faut noter, comme nous l'avons déjà dit, que la fragilité de cette matrice rend les manipulations très délicates pendant l'essai de traction : une amorce de fissure de la matrice peut survenir de manière inaperçue pendant la mise en place de l'éprouvette. La grande disparité et la faible moyenne des valeurs mesurées en sont le résultat. En conséquence, les valeurs théoriques des modules d'élasticité des composites qui en résultent sont assez éloignées des valeurs mesurées. En plus de cette explication, il faut dire que l'accrochage à l'interface entre les fibres et la matrice s'est révélée assez faible, ce qui est très néfaste au transfert des charges mécaniques vers les renforts.

5.5 Conclusion

Ce dernier chapitre de notre travail s'est consacré aux calculs théoriques de prédiction des caractéristiques thermiques et mécaniques des composites plâtre/fibres unidirectionnelles.

L'identification des paramètres caractérisant le transfert thermique dans des spécimens de composites unidirectionnels plâtre/sisal et plâtre/RC ainsi que leur tenue mécanique est menée par une approche multiéchelle analytique. A l'échelle locale du plâtre pris, les caractéristiques homogénéisées sont déterminées. Ces dernières servent par la suite à déterminer les valeurs des propriétés thermiques et mécaniques à l'échelle du composite. La conductivité thermique des matériaux a été estimée avec satisfaction mais les caractéristiques mécaniques théoriques présentent un écart important avec les valeurs expérimentales. Dans ce dernier cas, les caractéristiques de l'interface sont un facteur important pour le rapprochement des valeurs théoriques et expérimentales. Ici, la faible adhésion entre la fibre et le plâtre est responsable en grande partie de ces écarts.

Conclusion

Il a été question, dans ce travail de thèse, de caractériser les comportements mécaniques, thermiques et hygrométriques d'un matériau de construction à base de plâtre pris de forte porosité renforcé par des fibres d'origine végétale. Par une vaste campagne d'expérimentation, nous avons déterminé les caractéristiques mécaniques des constituants notamment les fibres de RC, les fibres de sisal, le plâtre pris non renforcé et l'interface entre chaque type de fibre et la matrice. Nous avons mesuré les caractéristiques mécaniques des matériaux issus du mélange fibres/plâtre. Par résolution de l'équation du transfert thermique dans ces matériaux par la méthode des différences fines, nous avons déterminé les caractéristiques thermiques du plâtre non renforcé et du mélange plâtre/fibres. Nous avons suivi la cinétique d'absorption d'humidité des fibres, du plâtre pris non renforcé et des composites plâtre/fibres. A partir des caractéristiques des constituants (mesurées ou tirées de la littérature) nous avons, par une approche multiéchelle, mené des calculs théoriques de prédiction des propriétés mécaniques et thermiques homogénéisées des composites unidirectionnels.

On enregistre une grande limitation de la propagation des fissures dans le plâtre avec la présence des fibres et une augmentation de sa rigidité. La fibre de sisal en apporte plus que le RC. Toutefois, la fibre de RC confère une ductilité importante au plâtre. Une architecture tissée en unidirectionnel des fibres de RC garantit son meilleur renforcement en traction et une répartition volumique assez homogène en apporte en flexion. Sur le plan thermique, le renforcement du plâtre par le RC réduit davantage la vitesse de propagation de la chaleur dans le matériau. L'architecture en forme de mat est la plus recommandée. Les fibres se montrent plus absorbantes d'humidité que la matrice, le composite en absorbe conséquemment plus que le matériau non renforcé. La présence du RC semble prolonger la prise d'humidité du matériau que lorsqu'il est mélangé au sisal. Cette particularité peut certainement être souhaitée dans d'autres types d'applications ou avec des matrices de natures différentes.

La modélisation analytique a semblé apporter une assez bonne prédiction du comportement thermique du composite bien que les paramètres des fibres aient été empruntés au

bois de chêne. Les caractéristiques mécaniques quant à elles ont été supérieures à celles mesurées expérimentalement. La faible adhésion à l'interface fibre/matrice et la grande variabilité des caractéristiques mécaniques des fibres seraient les principaux facteurs.

Il est important de noter une assez grande difficulté, et mention est faite par bien d'autres auteurs, à prédire avec précision le comportement d'un composite lorsqu'il est renforcé de fibres végétales. La sélection des fibres aux caractéristiques homogènes est encore problématique. La variation morphologique, l'uniformité des propriétés tout au long de la fibre et d'une fibre à l'autre étant difficilement contrôlable. Un grand champ d'investigation est encore disponible dans cette direction.

La modélisation du comportement thermique du composite rencontre des difficultés par une quasi absence d'informations sur les caractéristiques thermiques des fibres ou plutôt des techniques de mesure accessibles. C'est un autre axe de recherches encore à explorer.

La conduite des essais d'absorption d'humidité présente une exigence dans l'identité de la géométrie des éprouvettes. Les informations livrées par nos travaux donnent déjà une idée exploitable : il est clair que le sisal est plus hydrophile que le RC qui, à son tour l'est plus que le plâtre. Un travail plus approfondi est nécessaire dans la suite des recherches sur ces matériaux. Le milieu naturel aqueux de la fibre RC conduirait également à examiner son comportement vis à vis de la moisissure.

La mise en œuvre d'un matériau plâtre renforcé de fibres longues demeure une difficulté à surmonter quant à l'arrangement des fibres dans la matrice. Comme toutes les fibres végétales en général, un vaste champ d'études sur la fibre de *rhectophyllum camerunense* est encore disponible. A l'instar de son utilisation dans le secteur du bâtiment, des investigations sont envisageables avec diverses résines polymériques pour la fabrication de pièces à absorption d'énergie dans le génie mécanique. La fibre de RC est tubulaire et poreuse. Cette physiologie est un des facteurs de sa faible raideur. Une étude pourrait permettre d'identifier un traitement de la fibre conduisant à réduire son effet Poisson pendant la traction.

Il est certain qu'il existe une fraction volumique des fibres minimale qui garantisse une amélioration sensible des propriétés mécaniques du plâtre. La détection de ce seuil nécessite un suivi minutieux par des essais. Des études allant dans ce sens sont à mener.

Bibliographie

- [1] SANAHUJA Julien. *Impact de la morphologie structurale sur les performances mécaniques des matériaux de construction : application au plâtre et à la pâte de ciment*. PhD thesis, Ecole nationale des ponts et chaussées, France, 2008.
- [2] SANAHUJA Julien, DORMIEUX Luc, CHANVILLARD Gilles, and MEILLE Sylvain. Modélisation micromécanique des matériaux poreux (pâte de ciment, plâtre), Janvier - <http://cmm.mines-paristech.fr> - 12/09/2012 à 15h20 2008.
- [3] SATTLER H. The importance of porosity for the properties of hardened gypsum plaster products. *ZKG International*, pages 54–62, 1997.
- [4] Daniel DALIGANG. Plâtre. *Techniques de l'Ingénieur*, 'Traité Construction'(C910):24 p., jan 2002.
- [5] Les Industries du plâtre. La plaque de plâtre au cœur de la construction durable. <http://www.lesindustriesduplatre.org>, 21/09/2011 à 19h56.
- [6] Hamouda JAFFEL. *Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre*. PhD thesis, Ecole Polytechnique, 2006.
- [7] Philippe COQUARD. *Résistance mécanique des plâtres secs et humides*. PhD thesis, Université de droit, d'économie et des sciences d'Aix-Marseille III, 1992.
- [8] C. LEMAITRE. *Les propriétés physico-chimiques des matériaux de construction: Matière matériaux - Propriétés rhéologiques mécaniques-Sécurité réglementation - Comportement thermique, hygrosopique, acoustique et optiques*. Groupe Eyrolles, ISBN/ 978-2-212-13392-9, 2012.
- [9] Sophie EVE. *Comportement à la prise et caractérisation mécanique de matériaux composites à base de plâtre*. PhD thesis, Université de Caen, 2003.
- [10] A. BERTHEREAU and E. DALLIERS. Fibres de verres de renforcement. *Techniques de l'Ingénieur*, Ed TI, 2012, Paris.
- [11] WONSORAT W. *Effect of surface Modification on Physical Properties of sisal fiber/natural rubber composites*. PhD thesis, Suranaree University of Technology, 2010.
- [12] NTENGA R. *Modélisation Multi-échelles et Caractérisation de l'Anisotropie Elastique de Fibres Végétales pour le Renforcement de Matériaux Composites*. PhD thesis, Université Blaise Pascal de Clermont Ferrand, 2007.

- [13] ONU. Déclaration finale de la conférence des nations unies sur l'environnement, juin 1972. <http://www.un.org/french/events/rio92/rio-fp.htm> - 21/09/2011 à 19h10.
- [14] BRUNDTLAND Harlem. Notre avenir à tous, rapport de la commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'onu, avril 1987. <http://www.stephanedefis.com/arch/brundtland.pdf> - 21/09/2011 à 20h56.
- [15] <http://www.lesindustriesduplatre.org>, 21/09/2011 à 19h56.
- [16] <http://www.inies.fr/iniesconsultation.aspx>, 21/09/2010 à 21h00.
- [17] MAGNIONT Camille. *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un ecomatériau de constructon à base d'agroressources*. PhD thesis, Université Paul Sabatier de TOULOUSE, 2010.
- [18] <http://www.larousse.fr/encyclopedie/média/> 16/05/2010 à 23h22.
- [19] Berthelot J.-M. *Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures*. Ed. MASSON, 1996.
- [20] Pascal BOUSTINGORRY. *Elaboration d'un matériau composite à matrice gypse et renfort bois fragmenté- Amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqués en gypse*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne et Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.
- [21] KAFLOU ALI. *Etude du comportement des interfaces et des interphases dans les composites à fibres et à matrices céramiques*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2006.
- [22] Gu Weiqun. *Interfacial Adhesion Evaluation of Uniaxial Fiber-Reinforced-Polymer Composites by Vibration Damping of Cantilever Beam*. PhD thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [23] A. L. DUGOU, P. DAVIES, and C. BALEY. Interfacial bonding of flax fibre/poly (l-lactide) bio-composites. *Composites Science and Technology*, Doi: 10.1016/j.compscitech.2009.10.009 ref.CSTE 4539, 2009.
- [24] PIGGOTT M., R. Why interface testing by single-fibre methods can be misleading. *Composites Science and Technology*, 57:965–974, 1997.
- [25] NAIRN JOHN, A. Analytical fracture mechanics analysis of the pull-out test including the effects of friction and thermal stresses. *Advanced Composite Letters*, 9(No.6):373–383, 2000.
- [26] ZINCK Philippe. *De la Caractérisation Micromécanique du Vieillissement Hydrothermique des Interphases Polyépoxyte-Fibre de Verre au Comportement du Composite Unidirectionnel. Réalisation entre les Echelles Micro et Macro*. PhD thesis, INSA de Lyon, France, 1999.
- [27] Gu Weiqun. *Interfacial Adhesion of Uniaxial Fiber-Reinforced-Polymer Composites by Vibration Damping of Cantilever Beam*. PhD thesis, Blacksburg, Virginia, 1997.

- [28] Hampe A., GKalinka, Meretz S., and Schulz E. An advanced equipment for single-fibre pull-out test designed to monitor the fracture process. *Composites*, 26 N°1, 1995 p.
- [29] Beckert W. and Lauke B. Critical discussion of the single-fibre pull-out test: does it measure adhesion? *Composite Science and Thechnology*, 57:1689–1706, 1997.
- [30] A. L. DUGOU, P. DAVIES, and C. BALEY. Study of interfacial bonding of flax fibre/poly(l-lactide). In *JNC 16 Toulouse: France*, 2009.
- [31] Andersons J., Leterrier Y., Tornare G., Dumont P., and Månson J., A.E. Evaluation of interfacial stress transfer efficiency by coating fragmentation test. *Mechanics of Materials*, 39(9):834 – 844, 2007.
- [32] BONNAFOUS C., TOUCHARD F., CHOCINSKI-ARNAULT L., and DEVER C. Caractérisation expérimentale de l'interface fil/matrice dans les composites chanvre/epoxy. In *Compte rendu JNC17 Poitier*, 2011.
- [33] Sedan D., Pagnoux C., Smith A., and Chotard T. Interaction fibre chanvre/ciment: influence sur les propriétés mécaniques du composite. *Matériaux Techniques 95*, pages 133–142, 2007.
- [34] PANAITESCU Denis, Mihaela and Al. L'effet de l'interface dans les composites de fibres naturelles et de matières plastiques. *Revue Roumaine de Chimie*, pages 409–414, Vol. 52(4), 2007.
- [35] Singh Manjit and Carg Mridul. Glass fibre reinforced water-resistant gypsum-based composite. *Cement Composites*, 14:23–32, 1992.
- [36] Hernandez-Olivares F., Oteiza I., and de Villanueva L. Experimental analysis of toughness and modulus of rupture increase of sisal short fiber reinforced hemihydrated gypsum. *Composite Structures*, 22:123–137, 1992.
- [37] St John D., A. and Kelly J., M. The flexural behavior fibrous plaster sheets. *CEMENT and CONCRETE RESEARCH*, 5:347–362, 1975.
- [38] Singh Manjit, Verma CL, Garg Mridul, Handa S., K., and Kumar Rakesh. Studies on sisal fibre reinforced gypsum binder for substitution of wood. *Research and Industry*, 39:55–59, march 1994.
- [39] Khenfer M., M. and Morlier P., P. Plâtres renforcés de fibres cellulosiques. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 32:52–58, 1999.
- [40] Djoudi Amina., Khenfer Mohammed Mouldi., and Bali Abderrahim. Etude d'un nouveau composite en plâtre renforcé avec des fibres végétales du palmier dattier. In *SBEIDCO 1st International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria)*, October 12-14 2009.
- [41] [http://www.xella.ch/html/swi/fr/fermacell plaque platre arme fibres](http://www.xella.ch/html/swi/fr/fermacell%20plaque%20platre%20arme%20fibres), 21/09/2011 à 19h56.

- [42] Wikipédia français - l'encyclopédie libre, <http://fr.wikipedia.org/wiki> - 21/09/2010 à 19h20.
- [43] Lexicographie. www.cnrte.fr 10/06/2010 à 14h12.
- [44] FANCHON Jean, Louis. *Guide de Mécanique. Sciences et Techniques Industrielles*. Nathan, 1998.
- [45] ATCHONOU GLO KOSSI. *Identification des Paramètres Caractéristiques d'un Phénomène Mécanique ou Thermique Régi par une Equation Différentielle ou aux Dérivées Partielles*. PhD thesis, Université de Poitiers, 2006.
- [46] JANNOT Yves. *Théorie et pratique de la métrologie thermique*. Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA), <http://www.thermique55.com/principal/metrologiethermique.pdf> - 19/05/2012 à 22h40, 2011.
- [47] SPAGNOL Sandra. *Transfert conductifs dans les aérogels de silice, du milieu nanoporeux autisimilaire aux empilements granulaires*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2007.
- [48] RIGACCI Arnaud. *La mesure de conductivité thermique (à travers l'exemple de supers-isolants de type aérogels)*. Ecole des Mines de Paris Centre Energétique et Procédés (CEP) Equipe « Energétique, Matériaux et Procédés » (Etablissement de Sophia Antipolis), http://www.materiatech-carma.net/html/pdf/clubmat32_CEP-ENSMP.pdf, 21/10/2011 à 18h56.
- [49] Sylvain MEILLE. *Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure*. PhD thesis, INSA de Lyon, 2001.
- [50] C. BEZOU. *Etudes des caractéristiques cristallographiques, thermodynamiques et microstructurales des produits de déshydratation du gypse*. PhD thesis, Université de Bourgogne, 1991.
- [51] F. Peronnet. *Etude du comportement à la rupture et mécanismes de propagation des fissures dans le plâtre*, 1996. Rapport de DEA, Génie Physiques des Matériaux.
- [52] PEROGLIO MARTYNOVITCH Marianna. *Composites organiques-inorganiques poreux pour la substitution osseuse*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.
- [53] H. Sattler and H.-P. Bruckner. Changes in volume and density during the hydration of gypsum binders as a function of the quantity of water available. *ZKG International*, 54 Num.9 P.522-, 2001.
- [54] Saâdaoui M., Meille S., Reynaud P., and Fantozzi G. Internal friction study of the influence of humidity on set plaster. *Journal of European Ceramic Society*, 25:3281–3285, 2005.

- [55] VIGNES J.-L., ESSADDAM H, and DALIGAND et D. Une vie de plâtre: Expériences de chimie sur l'élaboration et la mise en œuvre d'un matériau. *Bulletin de l'Union des Physiciens N° 790*, pages 145–164.
- [56] Carvalho Magaly, Araújo and Al. Microstructure and mechanical properties of gypsum composites reinforced with recycled cellulose pulp. *Materials Research Vol. 11, N° 4*, pages 391–397, 2008.
- [57] Designs Inc Castina. Glass-fiber-reinforced plaster fabrication, [http://www.castingdesignsinc.com/Specs/GRG15/011/2009 à18h05. 09 27 13](http://www.castingdesignsinc.com/Specs/GRG15/011/2009%2018h05.09%2027%2013).
- [58] R.S.P. COUTTS and J.V.WARD. Microstructure of wood-fibre-plaster composites. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTERS*, 6, pages 562–564, 1987.
- [59] HENON Joseph. *Elaboration de matériaux poreux géopolymères à porosité multi-échelle et contrôlée*. PhD thesis, Université de LIMOGES, 2012.
- [60] SANAHUJA Julien. *Impact de la morphologie structural sur les performances mécaniques des matériaux de construction: application au plâtre et à la pâte de ciment*. PhD thesis, Ecole nationale des ponts et chaussées de Champs-sur-Marne, France, 2008.
- [61] BALEY C. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. *Techniques de l'ingénieur*, (n2220, éd. T.I., 2005, Paris, France):12 p.
- [62] Bahloul O., Bourzam A., and Bahloul A. Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de mortiers de ciment (cas de l'alfa), sbeidco. In *1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran (Algeria)*, 2009.
- [63] SOTEHI NASSIMA. *Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de l'Isolation*. PhD thesis, Université MENTOURI-CONSTANTINE, Algérie, 2010.
- [64] Christensen R., M. *Mechanics of Composite Materials*. John Wiley Sons, New York, 1979.
- [65] Thomason J.L., Carruthers J., Kelly J., and Johnson G. Fibre cross-section determination and variability in sisal and flax and its effects on fibre performance characterisation. *Composites Science and Technology* 71, page 1008–1015, March 2011.
- [66] Li Yan, Mai Yiu-Wing, and Ye Lin. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. *Composites Science and Technology* 60, April 2000.
- [67] Baley Christophe, Busnel Frédérique, Grohens Yves, and Sire Olivier. Influence of chemical treatments on surface properties and adhesion of flax fibre–polyester resin. *Composites: Part A* 37, page 1626–1637.
- [68] PANAITESCU Denis Mihaela, IORGA Michaela, VULUGA Zina, DONESCU Dan, DAN Maria, SERBAN Sever, and FLOREA Dorel. L'effet de l'interface dans les

- composites de fibres naturelles et de matières plastiques effect of interface in natural fiber-polymer composites. *Revue Roumaine de Chimie* 52(4), page 409–414, 2007.
- [69] Suquet Pierre. Rupture et plasticité. <http://www.ensta-paristech.fr/~mbonnet/mec551/mec551.pdf> - 12/11/2012 à 10h12.
- [70] BARRAU J.-J. and DEGEORGES D., GUEDRA. Structures en matériaux composites. *Techniques de l'ingénieur*, (bm 5080, éd. T.I., 2004, Paris, France):24p.
- [71] Veyret J.-B., Plunkett L., and Bullock E. Interfaces dans les composites fibreux c/si3n4 et hi-nicalon/si3n4. *J. PHYS. IV FRANCE 7, Colloque C6, Supplément au Journal de Physique III*, décembre 1997.
- [72] SACADURA Jean François and al. *Initiation aux transferts thermiques*. TEC DOC., Juin 2004.
- [73] MALONEY JAMES, O. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8th. Ed., 2008.
- [74] BRAHIM M.S. OULD and al. Caractérisation d'un matériau isolant thermique filasse-plâtre à partir de l'impédance thermique en régime dynamique fréquentiel. *Journal des Sciences*, Vol. 10, N° 3:46–54, 2010.
- [75] JANNOT Yves. Isotherme de sorption: modèles et détermination, Juillet 2008. <http://www.thermique55.com/principal/sorption.pdf> - 24/09/2012 à 18h10.
- [76] K SING, D. EVERETT, R. HAUL, L. MOSCOU, R. PIEROTTI, J. ROUQUEROL, and T. SIEMIENIEWSKA. Reporting physisorption data for gaz/solid systems. *Pure and Applied Chemistry*, vol. 57, N° 4, pages 603–19, April 1985.
- [77] Panneaux de fibres: Isolants de planchers. <http://www.ets-comelli.com/produits/fibrastyrene.pdf> - 22/09/2012 à 09h05.
- [78] Hashin Z. On elastic behavior of fibre reinforced materials of arbitrary transverse plane geometry. *J. Mech. Phy. Solids* 12, page 199 p., 1964.
- [79] Hill R. Theory of mechanical properties of fibre-strengthened materials: I. elastic behavior. *J. Mech. Phy. Solids* 13, page 199 p., 1964.
- [80] Halpin J., C. and Tsai S., W. Effetcts of environmental factors on composite materials. *AFML-TR*, pages 67–243, juin 1969.
- [81] Christensen R., M. *Mechanics of Composite Materials*. Ed. John Wiley Sons, 1979.
- [82] Christensen R., M. and Lo K., H. Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder model. *J. Mech. Phys. Solids*, n° 4, 27, 1979.
- [83] Ashby Michael, F. *Choix des matériaux en conception mécanique NP*. Collection: Techniques et Ingénierie, Dunod/L'Usine Nouvelle, 2012.
- [84] Jannot Y., Degiovanni A., and Payet G. Thermal conductivity measurement of insulating materials with a three layers device. *International Journal of Heat and Mass Transfert* 52, pages 1105–1111, 2009.

