

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie mécanique



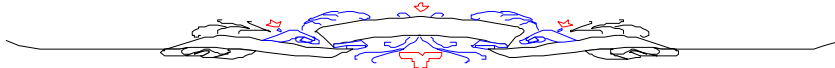
Mémoire

De fin d'études

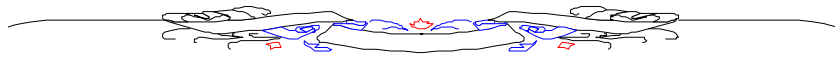
*En vue de l'obtention du diplôme de
Master académique en génie mécanique*

OPTION : énergétique

Thème



ÉLABORATION ET CARACTÉRISATION
THERMOMÉCANIQUE D'UN MORTIER RENFORCÉ
PAR DES FIBRES ANIMALES



Proposé et dirigé par :
Mr. S. MAKHLOUF

étudié par :
M^{lle} : KHEDACHE Souad

Année : 2010/2011

Résumé

RESUME

Les matériaux de construction ont connu une nette amélioration dans les caractéristiques tant mécaniques que thermiques ou phoniques afin de répondre à des besoins précis dans le domaine du bâtiment. Les chercheurs en science des matériaux et en génie civil sont constamment à l'écoute des industriels et ne cessent d'innover dans ce domaine. La tendance actuelle est la recherche de nouveaux matériaux dits intelligents où plusieurs caractéristiques sont réunies. Dans notre cas, il s'agit de mettre au point un nouveau matériau de construction répondant aux normes du bâtiment, c'est-à-dire avec des caractéristiques mécaniques acceptables, mais en plus doit pouvoir accomplir une autre fonction qui est celle d'augmenter l'inertie thermique qui passe par l'amélioration de la chaleur massique du matériau composite. L'inertie thermique permet dans le cas du bâtiment d'effacer les crêtes, sources d'inconfort, mais également de décaler dans le temps ces valeurs maximales de température de paroi. On améliore l'inertie thermique en mettant en point des composites chargés de matériaux à changement de phase à forte chaleur latente de fusion. L'originalité de ce travail consiste à piéger un matériau à changement de phase (MCP) dans les microporosités des matériaux creux et légers disponibles en grande quantité et dont la mise en œuvre est facile et moins onéreuse. Pour ce faire, nous avons opté pour des fibres obtenues à partir des plumes de volaille traitées. Une opération qui consiste à imprégner les fibres d'un MCP a été menée avant de les introduire dans un composite en mortier. Des éprouvettes cylindriques et prismatiques ont été réalisées afin de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau. Des essais de compression et de flexion trois points ont été effectués à cet effet. De plus pour avoir une idée sur la conductivité thermique du composite, des plaques ($300 \times 300 \times 10 \text{ mm}^3$) en mortier dans lesquelles des fibres de plumes chargées d'un MCP ont été incorporées, ont été mises au point pour les essais de conductivité thermique.

Mots clés :

Matériaux composites ; matériaux à changement de phase ; isolation thermique ; caractéristiques mécaniques ; béton de fibres ; fibres animales.

REMERCIEMENT

Toute ma gratitude à mon encadreur, Mr MAKHLOUF Said maitre de conférence à l'université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou. Je le remercie pour le sujet, pour ses corrections, ses conseils éclairés et sa constante disponibilité et sa grande qualité humaine, ce qui m'a permis d'approfondir mes connaissances et de progresser dans mon travail.

Que Messieurs les membres du jury qui ont accepté de lire et de juger ce mémoire en soient remerciés.

Je remercie messieurs MAMOU et BOUHRAOUA membres du laboratoire de Génie Civil.

Ma reconnaissance à Mme HALEM Zohra responsable du laboratoire de thermodynamique.

Je suis très reconnaissante à Mr SAIDANI Ingénieur de laboratoire SDM pour ses orientations et son aide.

Je tiens à remercier Mr ACHER Hakim Ingénieur de laboratoire de chimie ENIEM.

Je remercie également ma très chère amie Souad pour son aide dans la confection des éprouvettes.

DEDICACES

Je dédie ce travail à mes chères parents, qui mon été la source d'encouragements et d'assurance.

En particulier à :

-Mes frères : Farid, Hamid, Karim, Mourad, Marzouk Et Mazigh.

-Mes sœurs : Karima, Djamila, Samia, Hayat, Dihia et Lilia.

-Mes grands parents, mes oncles et mes cousins.

- Mes amis(es) : Souad, Hayat, Roza, Kahina, Sabrina, Fariza, Karim, , Rabah, karima et Houria.

-Mes belles sœurs : Rachida et Ouiza.

-Mes petits neveux: Saïd et Randa.

-Toute ma promotion.

Mon ange

Moussa

NOMENCLATURE

$\lambda_{a\ p\ p}$: La conductivité thermique apparente [$W/m^2 \cdot K$]

λ_f : La conductivité thermique du fluide [$W/m^2 \cdot K$]

λ_s : La conductivité thermique du solide [$W/m^2 \cdot K$]

λ_s : La conductivité thermique effective [$W/m^2 \cdot K$]

ε : La porosité

M_1 : Masse du pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge et le solide à côté [g]

M_2 : Masse du pycnomètre contenant le solide et rempli d'eau jusqu'au trait de jauge [g]

M_e : Masse du pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge [g]

ρ_s : La masse volumique du solide [kg/m^3]

ρ_l : La masse volumique du liquide utilisé [kg/m^3]

f_c : Résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) [MPa]

σ'_c : Classe de résistance du ciment [32,5 ; 42,5 ; 52,5] [MPa]

C : Dosage en ciment [en kg/m^3].

E : Dosage en eau totale sur matériaux secs [en litre pour 1 m^3]

G : Coefficient granulaire.

D : Dimension du plus gros granulat [m].

V : Le volume absolu de l'ensemble des granulats [m^3]

P : Charge à la rupture [m].

b : Largeur de l'éprouvette [m].

h : L'épaisseur de l'éprouvette [m].

L : Distance entre les appuis [m].

Y : Flèche [m].

I : Le moment quadratique [N.m].

M_f : Moment fléchissant [N.m].

E : Module d'élasticité [MPa]

ν : Coefficient de poisson

σ : Contrainte a la rupture [MPa]

Is : Epaisseur du spécimen [m]

dT: Différence de température [C°] (T_1-T_2)

T: Température moyenne [C°] $(T_1+T_2) / 2$

HFM : Sortie de débitmètre (Heat Flowmetr Reading) [mv].

T_1 : Température de la plaque chaude [C°]

T_2 : Température de la plaque froide [C°]

Liste des tableaux et figures

LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableau. I.1:</u> Production de poules pondeuse par année	4
<u>Tableau. I.2:</u> Production de poulet de chair par année	4
<u>Tableau. I.3:</u> Production de dinde par année	4
<u>Tableau. I.4 :</u> La part des plumes en % du poids vif dans la volaille.	5
<u>Tableau. I.5:</u> Poids des plumes générées par la production du poulet de chair et des 6pondeuses à l'échelle national durant l'année 2008/2009	6
<u>Tableau I.6 :</u> Poids des plumes générées par la production de poule pondeuse.....	7
<u>Tableau I.7 :</u> Poids des plumes générées par la production de poulet de chair	7
<u>Tableau I.8 :</u> Poids des plumes générées par la production de dinde.....	7
<u>Tableau I.9:</u> Liste des acides aminés.....	14
<u>Tableau I.10:</u> Les propriétés mécaniques des barbes de plumes de poulets comparées à celle de dindes et laine.....	20
<u>Tableau I.11 :</u> Les propriétés physiques des plumes	21
<u>Tableau II.4 :</u> Différents types de fibres.	25
<u>Tableau II.5:</u> Caractéristiques moyennes des fibres et renforts.....	29
<u>Tableau. IV.1:</u> Valeurs approximatives du coefficient granulaire G	46
<u>Tableau. IV. 2 :</u> Terme correcteur K	48
<u>Tableau. IV. 3 :</u> Coefficient de compacité	48
<u>Tableau. IV. 4 :</u> Analyse chimique du clinker (NA 5042).....	49
<u>Tableau.I V. 5 :</u> Composition minéralogique du clinker (NA 5042).	49
<u>Tableau V.1 :</u> Les valeurs des masses mesurées (M_2 , M_1 et M_e) des échantillons de plume	63
<u>Tableau V.2 :</u> La masse volumique des échantillons de plume.	64
<u>Tableau V.3 :</u> Les valeurs des masses mesurées (M_2 , M_1 et M_e) des trois type de sable.	65
<u>Tableau V.4 :</u> La masse volumique des trois sables	65
<u>Tableau .V.5:</u> Dimensions nominales des tamis pour le sable 0-5.....	68
<u>Tableau V.6:</u> Courbe de référence	68
<u>Tableau.V.7:</u> La masse des fibres pour chaque pourcentage.....	69
<u>Tableau.V.8 :</u> Composition des mélanges pour le volume $1m^3$	70

<u>Tableau V.9:</u> <i>Résultats des essais de compression sur éprouvettes 10× 20 cm</i>	75
<u>Tableau .V.10:</u> <i>Module de Young en fonction du pourcentage des fibres.....</i>	76
<u>Tableau V.11:</u> <i>Caractéristiques mécaniques du mortier témoin en flexion</i>	78
<u>Tableau V.12:</u> <i>Résultats associés aux composites mortiers – fibres à différentes compositions</i>	82
<u>Tableau V.13 :</u> <i>La conductivité obtenue pour chaque composite.....</i>	84

LISTES DES FIGURES

<i>Figure. I.1: Principales plume de contour d'une aile d'un oiseau</i>	<i>8</i>
<i>Figure. II.2 : photographie d'une plume de poulet</i>	<i>9</i>
<i>Figure. II.3: Image de MEB montrant la structure tertiaire des plumes,</i>	<i>10</i>
<i>Figure. I.4 : Image de MEB de la section transversale d'une barbe</i>	<i>10</i>
<i>Figure. I.5 : Image de MEB de la surface des barbes</i>	<i>11</i>
<i>Figure. I.6 : Image d'un fil tissé d'un mélange de barbes et coton.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure. I.7 : Image de MEB d'une portion d'un fil de barbes et de coton.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure. I.8: Formule chimique générale des acides aminés</i>	<i>13</i>
<i>Figure. I.9: Formation liaison peptidique.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure. I.10: Schématisation des différentes structures d'une protéine</i>	<i>15</i>
<i>Figure. I.11: L'hélice α</i>	<i>16</i>
<i>Figure. I.12: Feuillet β</i>	<i>17</i>
<i>Figure. I.13: Coupe transversale d'une corne.</i>	<i>19</i>
<i>Figure. I.14: Structure du cheveu.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure. II.1:Rôle des fibres dans la matrice de béton.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure.II.2 : Matériau composite.</i>	<i>27</i>
<i>Figure.II.3: Histogramme des propriétés en traction des fibres</i>	<i>29</i>
<i>Figure. III.1: Représentation de CRANE et VACHON.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure. III.2: Modèle de conduction.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure. III.3: Modèle KUNII et SMITH.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure. IV.1: a)Rachis b) Barbes c)Calamus.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure. IV.2: Fusion de la paraffine au bain marie.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure. IV.3: Fibres chargées de paraffine.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure. IV.4 : Fibres imbibées de résine.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure. IV. 5: Pycnomètre.</i>	<i>42</i>
<i>Figure. IV. 6 : Les organes essentiels du MEB</i>	<i>44</i>
<i>Figure. IV.7 : Dosage en ciment en fonction de C/E et de l'affaissement.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure. IV.8 : Correction sur le dosage en eau.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure. IV.9 : Eprouvettes cylindriques 10 ×20 cm.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure. IV.10: Eprouvettes prismatiques 4 × 4×16 cm</i>	<i>51</i>
<i>Figure. IV.11: Machine utilisée dans les essais de compression et flexion.</i>	<i>52</i>

Figure. IV.12: Epreuve de flexion.....	53
Figure. IV.13: Diagramme de l'effort tranchant T et du moment fléchissant M	54
Figure. IV.14: Diagramme de la contrainte normale	56
Figure. IV.15: Répartition des contraintes normales et inter laminaires en flexion trois points	
Figure. IV.16: Une poutre soumise à deux forces opposées.....	58
Figure. IV.17: Contrainte normale	58
Figure. IV.18: Courbe contrainte- déformation de l'essai de compression	59
Figure. IV.18: le CT mètre	60
Figure. IV.19: Moule de dimension 300×300×1 mm	60
Figure. V.1: Coupe transversale du rachis observée au MEB	65
Figure. V.2: Coupe de la face extérieure du Calamus observée au MEB.....	65
Figure. V.3 : Duvet observé au MEB	66
Figure. V.4 : Fibre observée au MEB	66
Figure. V.5 : Mortier renforcé de fibres +paraffine observée au MEB.....	66
Figure. V.6: Granulométrie.....	69
Figure. V.7 : Epreuve en compression simple.....	70
Figure. V.8: Courbe contrainte-déformation associée au mortier témoin.....	71
Figure. V.9 : Courbe contrainte-déformation associée au composite mortier-0,04% fibre.	72
Figure. V.10 : Courbe contrainte-déformation associée au composite mortier-0,07% fibre	72
Figure. V.11 : Courbe contrainte-déformation associée au composite mortier-0,14% fibre	73
Figure. V.12 : Courbe contrainte-déformation associée au composite mortier-0,42% fibre	73
Figure. V.13 : Courbe contrainte-déformation associée au composite mortier-69% fibre	74
Figure. V.14: Courbe contrainte –déformation associée aux différents composites (0,04 ;0,07 ;0,14 ;0,42 ;0,69 %de fibres).....	75
Figure. V.15 : Contrainte max en fonction du pourcentage des fibres (compression)	75
Figure. V.16 : Module d'élasticité en fonction du pourcentage des fibres	76
Figure. V.17: Epreuve en flexion trois points.	77
Figure. V.18: Courbe charge-flèche associée au mortier témoin	78
Figure. V.19 : Courbe charge-flèche associée au composite mortier -0,04% fibres	79
Figure. V.20 : Courbe charge-flèche associée au composite mortier -0,07% fibres	79
Figure. V.21 : Courbe charge-flèche associée au composite mortier -0,14% fibres	80
Figure. V.22 : Courbe charge-flèche associée au composite mortier -0,42% fibres	80
Figure. V.23 : Courbe charge-flèche associée au composite mortier -0,69% fibres	81

Figure.V.24 : Courbe charge-flèche associée aux différents composites (0,04 ; 0,07 ; 0,14 ; 0,42 ; 0,69 %de fibres)	81
Figure.V.25 : Contrainte max en fonction du pourcentage des fibres	81
Figure.V.26 : Module d'élasticité E en fonction du pourcentage des fibres.....	82
Figure. V.27: Composite mortier-0,04% fibres résine	84
Figure.V.28: Composite mortier-0,04% fibres paraffine	84
Figure. V.29: Composite 0,04% de fibres	84
Figure. V.30: Mortier seul.....	84

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES DECHETS DE VOLAILLE

I.1 GENERALITES SUR LES DECHETS DE VOLAILLE

I.1.1 Marche de la volaille et analyse technico-économique	03
I.1.1.1.La production avicole dans le monde	03
I.1.1.2. La production avicole en Algérie.....	03
I.1.1.3. la production avicole dans la wilaya de Tizi Ouzou	03
I.1.2 Les sous produits d'abattage de la volaille	04
I.1.2.1.La plume	05
I.1.2.1. La part des plumes en (%) du poids vif de la volaille.....	05
I.1.2.2. Estimation de la quantité des plumes produites en Algérie	06
I.1.2.3.Poids des plumes générées par la production du poulet de chair et des pondeuses et de dinde dans la wilaya de Tizi Ouzou.....	07

I.2 GENERALITES SUR LES FIBRES KERATINIQUES

I.2.1 GENERALITES SUR LA PLUME.....	08
I.2.1.1. La couleur.....	08
I.2.1.2. Type de plume.....	08
I.2.1.3. La structure et la morphologie de barbes	09
I.2.2 LES PROPRIETES CHIMIQUES, PHYSIQUES ET MECANIQUES.....	13
I.2.2.1. Les propriétés chimiques	13
I.2.2.1.1. Rappels sur la structure des protéines	13
1) Constitution des protéines	14
2) Conformation des protéines.....	15
a) La structure primaire.....	15
b) La structure secondaire	15
c) La structure tertiaire.....	17
d) La structure quaternaire	17
I.2.2.1.2.Protéine fibreuse	18
1) La kératine.....	18
a) Kératine des plumes.....	18
b) Kératine de corne et de sabot.....	18
c) Kératine de la laine	19
d) Kératine des cheveux et des ongles	19
I.2.2.2. Les propriétés mécaniques	20
I.2.2.3. Les propriétés physiques	21

CHAPITRE II : ETAT DE CONNAISSANCE SUR LES MATERIAUX : COMPOSITES-BETON

II.1-GENERALITES SUR LE BETON DE FIBRES	22
II.1.1. Définition du béton de fibre	22
II.1.2. Rôle des fibres dans le béton	23
II.1.3. Différents types de fibres	24
II.2. GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES	24
II.2.1. Définitions et Propriétés	25
II.2.1.1. Les renforts	26
II.2.1.2. Les matrices	29
II.2.1.3. Les charges et additifs	29
II.2.2. Avantages et inconvénients	30

CHAPITRE III : ISOLATION THERMIQUE

III.1. LES ISOLANTS THERMIQUES	31
III.1.1. Les isolants synthétiques	31
III.1.2. Les matériaux d'origine minérale	32
III.1.3. Les matériaux d'origine végétale	33
III.1.4. Les matériaux d'origine animale	33
III.2. LES PROPRIETES D'UN ISOLANT	34
III.2.1. La résistance thermique	34
III.2.2. Caractérisation physicochimique	34
III.2.3. La conductivité thermique	34
III.2.3.1. Modèles de conductivité thermique effective	35
a) Modèles statiques	35
b) Analogie électrique	37

CHAPITRE IV : MATERIELS ET METHODES

IV.1. PREPARATION DES ECHANTILLONS D'ESSAIE	39
IV.1.1. Les échantillons pour la détermination de la masse volumique	39
IV.1.2. Préparation des échantillons de mortier de fibres	39
IV.1.2.1. Fibres chargées de paraffine	40

IV .1.2.2. Fibres imbibées de résine	40
IV.2. LA MASSE VOLUMIQUE	41
IV. 2.1- Détermination de la masse volumique.....	41
IV. 2.1.1. Mesure de la densité par la méthode du flacon	41
IV. 2.1.2. Principe de mesure la densité d'un solide.....	41
IV.3. OBSERVATION SOUS MICROSCOPE ELECTRONIQUE	42
IV.3.1. L'étude au Microscope Electronique à Balayage (MEB)	42
IV.3.2. Principe de fonctionnement du MEB.....	42
IV.3.2.1. Fonctionnement simplifié.....	42
IV.4. BETON DE FIBRE.....	43
IV.4.1. Présentation de la matière première	43
IV.4.1.1. Renfort	43
IV.4.1.2. Matrice	44
IV.4.1.2.1. Formulation de bétons.....	44
IV.4.1.2.2- Choix et propriétés des constituants	48
a) Ciment	48
b) Sable	49
c) Eau	49
d) Fluidifiant	49
IV.4.2. Fabrication des corps d'éprouvettes.....	49
IV.5. ESSAIS SUR LES MATERIAUX COMPOSITES.....	51
IV.5.2. Essais de flexion	52
IV.5.3. Essais de compression.....	58
IV.6. CT METRE	58
IV.6.1-Description de l'appareil.....	59
IV.6.2-Méthode d'essais	59
IV.6.3-Méthode de calcul.....	60

CHAPITRE V : RESULTAT ET DISCUSION

V.1- DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE PAR PESEE ET PYCNOMETRE	
V.1. Plume de dinde	63
V.1.2. Sable	64
V.2. OBSERVATION AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB).	
V.2 .1.Observation de la plume.....	65
V.2 .2. Observation du composite mortier-fibre	66

V.3. COMPOSITION DU BETON.....	67
V.3.1. Donnée de base.....	67
V.3.2. Dosage des constituants du béton	67
a) Dosage en ciment	67
b) Dosage en eau.....	67
c) Dosage du sable.....	67
V.4. CARACTERISATION MECANIQUE DU MATERIAUX COMPOSITE	69
V.4.1- Résistance à la compression	69
V.4.1.1- Courbes individuelles	70
V.4.1.2- Superposition des courbes contraintes – déformations associées aux différents Composites	73
V.4.1.3- Evolutions des propriétés mécaniques caractéristiques usuelles en fonction de la concentration de fibres de plume de dinde	74
a) Evolution de la contrainte à la rupture en fonction de la concentration de fibres de plume de dinde.....	74
b) Evolution module d'élasticité en fonction de la concentration de plumage	75
V.4.2- Resistance à la flexion trois points.....	78
V.4.2.1- Courbes charge-flèche	78
V.4.2.2- Superposition des courbes charge – flèche associées aux différents composites	78
V.4.2.3- Evolutions des propriétés mécaniques caractéristiques usuelles en fonction de la concentration de fibres de plume de dinde	80
a) Evolution de la contrainte à la rupture en fonction de la concentration de fibres de plume de dinde.....	81
b) Evolution module d'élasticité en fonction de la concentration de plumage	82
V.4. LA CONDUCTIVITE THERMIQUE	82
CONCLUSION GENERALE.....	85
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	86

Introduction

Le renforcement des matériaux de construction, en l'occurrence les bétons et les mortiers, par des fibres est une technique de plus en plus utilisée dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques, notamment leur résistance à la traction et à la fissuration ainsi que la ductilité. Le rajout de fibres pour le renforcement des matériaux, dans le secteur du bâtiment, l'industrie automobile ou plus récemment l'aérospatial, est une technique très ancienne, il apporte de nombreux avantages fonctionnels: légèreté, résistance mécanique, aspect chimique non corrosif, isolation thermique et phonique et une grande liberté de mise en forme. En effet, nos prédécesseurs utilisaient la paille pour renforcer l'argile et le crin (poils de chevaux) pour renforcer différents mortiers ou le plâtre.

Le renforcement des bétons par des fibres améliore leur résistance à la traction. Durant l'apparition et la propagation des microfissurations, ces fibres peuvent coudre les microfissures actives qui retardent l'apparition des macros fissurations et éviter ainsi la rupture brutale. Néanmoins, l'incorporation des fibres animales dans le béton frais a une influence directe sur sa mise en œuvre souvent difficile.

L'utilisation de fibres naturelles comme renfort de matériaux composites a un double objectif:

- Valoriser une ressource locale non ou peu utilisée.
- Développer de nouveaux matériaux qui prennent en considération l'impact sur l'environnement.

Dans notre travail, on s'intéresse à l'un des matériaux de construction qui a une résistance thermique et mécanique plus et moins favorable qui est le mortier. Pour améliorer ses caractéristiques, nous avons d'abord élaboré un matériau composite avec différents pourcentages de fibres d'origine animale, puis il a été caractérisé d'un point de vue mécanique et thermique.

Le premier chapitre de ce travail est consacré à l'étude de l'état du secteur avicole dans le monde et plus particulièrement en Algérie et le volume des plumes générées par l'abattage de volaille.

Le deuxième chapitre est consacré à la définition et à la caractérisation de la structure des déchets kératiniques.

Le troisième chapitre fait appel aux généralités sur le béton de fibres et sur les composites.

Le quatrième chapitre est consacré aux rappels théoriques sur l'isolation thermique, les différents types et les propriétés des isolants.

Le cinquième chapitre est consacré à la présentation du matériel utilisé pour la réalisation des éprouvettes et à la définition des méthodes de calcul des propriétés du matériau composite obtenu.

Le sixième chapitre donne les résultats expérimentaux obtenus sous comportement des mortiers renforcés de fibres d'origine animale avec analyse et commentaires concernant les propriétés expérimentales.

Enfin une conclusion générale est proposée avec quelques perspectives mettant en évidence la combinaison entre les propriétés mécaniques et thermiques et le pourcentage nécessaire de fibres introduites dans la matrice du mortier.

Chapitre I

Généralités sur les déchets de volaille

Ce chapitre présente l'état du secteur avicole dans le monde et plus particulièrement en Algérie et quelques généralités sur les fibres kératiniques.

I.1-Généralités sur les déchets de volaille

I.1.1-Marché de la volaille et analyse technico-économique

I .1.1.1- La production avicole dans le monde.

Selon l'organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture connue **FAO**, la production mondiale de viande a nettement progressé pour atteindre 281 millions de tonnes en 2008. La production de viande de volaille a enregistré une forte progression avec un taux de croissance moyen de près de 5% par an .En 2008, celle-ci est estimée 93 millions de tonnes dont 86% représente la production de poulet de chair d'où une estimation de 10,97 millions de tonnes de plume générée [12].

I .1.1.2- La production avicole en Algérie

L'aviculture algérienne a bénéficié dès les années 70 d'importants investissements qui lui ont permis d'évoluer très rapidement vers un système de production de type intensif et de ce fait, assurer à la population un apport privilégié en protéines animales (5kg viande blanche/hab/an et 21 œufs/hab/an).

L'avènement des réformes économiques en 1988 et la libéralisation du marché des importations avicoles ont généré une crise structurelle qui s'est traduite par un recul de la production avicole, mettant à nu des dysfonctionnements au niveau des différents maillons de la filière . Ce repli de la production avicole est aggravé aujourd'hui par un contexte mondial caractérisé par la crise des matières premières sur le marché international, le réchauffement climatique, les maladies émergentes (dont l'influenza aviaire) et la limitation de certains additifs médicamenteux à l'aliment. Cette conjoncture est peu propice à l'essor de la production avicole en Algérie et peut même mettre en péril son devenir. En Algérie, la quantité de plumes de volaille, qui va en décharge, est estimée à 8100 tonnes/an

I.1.1.3- La production avicole dans la wilayas de Tizi Ouzou

Poules pondeuses

Selon le Ministère de l'Agriculture et Développement Rural ,la wilaya de Tizi Ouzou occupe la 2^{ème} place en poulet de chair et 11^{ème} place en effectifs de poules pondeuses pour l'année 2008/2009 .le relief accidenté, l'exiguïté de la surface agricole utile, ont incité les éleveurs à opter pour un élevage hors sol relativement rentable, d'autant plus que la plupart des modules de poulaillers (chair et ponte)sont de type à capacité limitée répartis un peu partout dans la wilaya.

Tableau. I.1 : Production de poules pondeuse par année

Année	Effectifs (sujets)
2004/2005	350 000
2005/2006	482 000
2006/2007	530 000
2007/2008	493 000
2008/2009	531 378
2009/2010	/

Nos constatons une relative évolution assez timide des effectifs avec une légère baisse en 2007/2008.

Poulets de chair

Tableau. I.2 : Production de poulet de chair par année

Année	Effectifs (sujets)
2004/2005	3 389 000
2005/2006	3 712 500
2006/2007	4 434 992
2007/2008	4 935 200
2008/2009	6 818 860
2009/2010	5 500 932

Nos constatons une nette évolution des effectifs.

Production de dinde

Tableau. I.3 : Production de dinde par année

Année	Effectifs (sujets)
2008/2009	14 000
2009/2010	69 694

L'effectif paraît modeste par rapport à celui de poulet de chair et poule pondeuse ceci est dû sans doute à l'absence d'habitude de consommation de cette espèce avicole dans la wilaya de Tizi Ouzou.

I.1.2 -les sous produits d'abattage de la volaille

La production et la consommation de volaille ne cessent d'augmenter et malgré quelques fluctuations observées d'une année à une autre, les quantités produites demeurent très élevées.

Cette production est essentiellement destinée aux filières alimentaires en particulier, la filière viande qui génère des quantités importantes des sous produits d'abattage non consommés par l'homme (plumes, pattes, têtes, sang ...) avec un taux de 32%. Dans le cadre de notre étude, on s'intéresse plus particulièrement au déchet de plumes qui représente jusqu'à 7% du poids de la volaille.

I.1.2.1-Plume

Les plumes sont des sous-produits provenant des activités suivantes :

- Abattage de palmipèdes : les plumes sont collectées auprès des abattoirs industriels ou artisanaux de palmipèdes, afin de récupérer le duvet qui est très recherché pour ses propriétés d'isolant thermique, principalement dans l'industrie textile [2].
- Production d'abattage de volaille : les plumes représentent environs 5 à 6% du poids vif de la volaille.
- Récupération textile : Les plumes de récupération proviennent des articles textiles ayant contenu des plumes collectés par les entreprises de récupération textile [2].

II.1.2.1.1-La part des plumes en (%) du poids vif de la volaille

Tableau. I.4: la part des plumes en % du poids vif dans la volaille [2].

	% du poids vif
Plumes	4,5%
Sang	3,6%
Tête	6,0%
Pattes	2,7%
Cou	3,5%
Intestin	2,7%
Poumons-trachée	2,0%
Foie	1,7%
Cœur	0,5%
Gésier	2,8%
Pertes lors de la découpe	2,0%
Os	17,0%
Viandes saisies	51,0%
Total	100,0%

I.1.2.1.2-Estimation de la quantité des plumes produites en Algérie

Tableau. I.5 : Poids des plumes générées par la production du poulet de chair et des pondeuses à l'échelle nationale durant l'année 2008/2009.

Wilaya	Poids de plumes générées par la production de poulets de chair (Kg)	Poids de plumes générées par la production de poule pondeuse (Kg)
Chlef	93518	896
Tipaza	93682	2173
Ain Defla	275000	1087
Alger	956447	1523
Blida	122211	2075
Médéa	165418	1599
Boumerdes	313156	4400
Tizi Ouzou	292384	1997
Buira	155555	5391
Bejaia	204907	4892
Tlemcen	198600	2500
Ain Temouchent	66824	559
Sidi bel Abbes	9978	200
Oran	106916	637
Mascara	200787	3798
Mostaganem	100329	2974
Relizane	183269	2309
Jijel	37244	298
Mila	199798	1271
Skikda	67680	594
Constantine	70569	403
Annaba	85340	845
Guelma	48378	770
El Taref	13160	57
Souk Ahras	41202	216
Bordj Bou Arreridj	152100	5568
Stif	29238	6609
Batna	291807	9223
Oum el Bouaghi	107864	978
Khenchla	20316	301
Tébessa	46589	433
Laghouat	12453	125
Djelfa	42133	479
Msila	19933	826
Naama	5667	/
El Bayadh	2340	/
Saida	2573	132
Tiaret	81571	74
Tissemsilt	38731	114
Biskra	25538	883
El Ouad	14320	600
Ouargla	2300	/
Ghardaia	240	3
Bechar	23069	9
Tindouf	1793	115
Adrar	11500	/

Tamanrasset	3449	/
Illizi	/	/
Total	4 039 684	69940

Source : Direction des services agricoles de la wilaya de Tizi Ouzou.

I.1.2.1.3- Poids des plumes générées par la production du poulet de chair et des pondeuses et de dinde dans la wilaya de Tizi Ouzou

Poule pondeuse

Tableau I.6 : Poids des plumes générées par la production de poule pondeuse

Années	Poids de plumes générées (Kg)
2004/2005	14 000
2005/2006	19280
2006/2007	21280
2007/2008	19720
2008/2009	21255
2009/2010	1 100 186

Poulet de chair

Tableau I.7 : Poids des plumes générées par la production de poulet de chair

Années	Poids des plumes générées (Kg)
2004/2005	135 560
2005/2006	148 500
2006/2007	177 400
2007/2008	197 408
2008/2009	272 754
2009/2010	1 100 186

Dinde

La viande de dinde est de plus en plus consommée et elle vient en complément de celle du poulet traditionnellement utilisée.

Tableau I.8 : Poids des plumes générées par la production de dinde

Années	Poids des plumes générées (Kg)
2008/2009	350
2009/2010	13 939

Source : Direction des services agricoles de la wilaya de Tizi-Ouzou.

L'analyse de toutes ces données montre que les quantités annuelles de plumes, qui sont de nature kératinique riche en protéine, provenant de l'abattage de volaille représentent une évolution croissante. Ce qui peut causer de sérieux problèmes de pollution à l'environnement. Il est alors intéressant de rechercher une synergie technique et écologique pour une meilleure valorisation de ces déchets.

I.2- Généralités sur les fibres kératiniques

Chez les oiseaux, la plume constitue une production tégumentaire complexe, constituée essentiellement de feuillets β de la macromolécule kératine. La plume est un élément qui caractérise la classe des oiseaux. Comme les poils, les écailles, les ongles, les griffes et les sabots, les plumes sont des phanères.

L'ensemble des plumes, généralement plusieurs milliers, forme le plumage, dont les fonctions sont de protéger le corps de l'oiseau du milieu ambiant, notamment contre l'eau et le froid, de leur permettre le vol et le camouflage, mais elles ont aussi une fonction sociale et reproductive.

I.2.1-Généralités sur la plume

I.2.1.1- La couleur

Les couleurs du plumage peuvent être de type pigmentaire quand la plume est colorée par un pigment comme la mélanine ou caroténoïde [22], ou de type structural si la couleur que l'on voit est due à la réfraction ou à la réflexion de la lumière. La couleur de la plume peut varier à l'usure [36]

II.2.1.2- Type de plume

Il existe plusieurs types de plumes :

- Les plumes de contour qui comprennent les grandes plumes des ailes, celles de la queue et les plus petites plumes qui recouvrent le corps de l'oiseau.



Fig. I.1: Principales plume de contour d'une aile d'un oiseau [36]

- Le duvet

Il se présente sous la forme de flocons délicats, du noyau quasi invisible se développent des filaments soyeux en forme d'étoile avec d'innombrables ramifications. Ces minuscules fibres s'accrochent les unes aux autres pour piéger une multitude de petites bulles d'air. Celles-ci constituent un excellent isolant et la chaleur dégagée par le corps durant la nuit est captée puis stockée par le duvet, qui protège ainsi la volaille du froid et lui procure un

certain confort pour son sommeil. Avec un poids de 1 à 2 mg par plumule (il faut plus d'un million de plumules pour un kilogramme de duvet), le rapport entre le pouvoir isolant et le poids est inégalé si on le compare à d'autres matériaux isolants [36].

I.2.1.3- La structure et la morphologie de barbes

Les dispositifs morphologiques des barbes de plume sont montrés dans la figure ci-dessous :

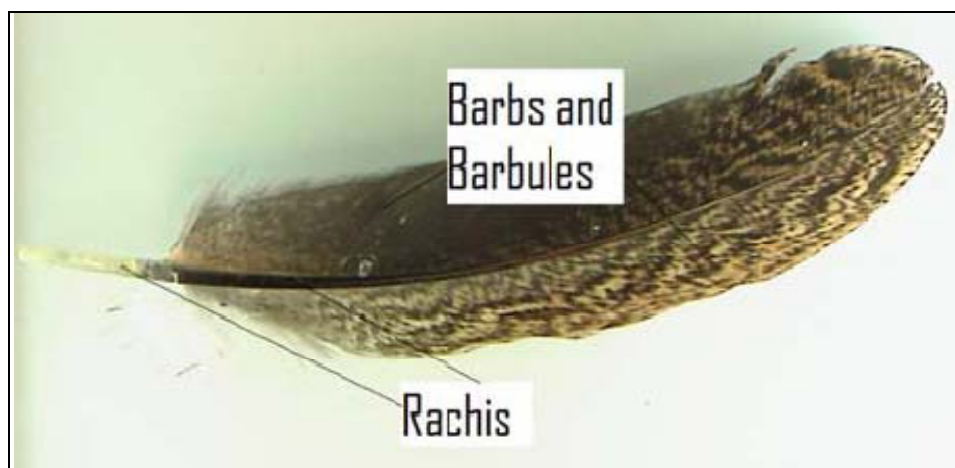


Fig. I.2: Photographie d'une plume de

Une plume se compose principalement de trois unités distinctes comme montré dans la figure I.2 :

- L'axe central de la plume, qui constitue la structure primaire, est appelé le rachis.
- Les barbes, attachées au rachis constituent la structure secondaire.
- les barbules, attachées aux barbes, constituent la structure tertiaire.

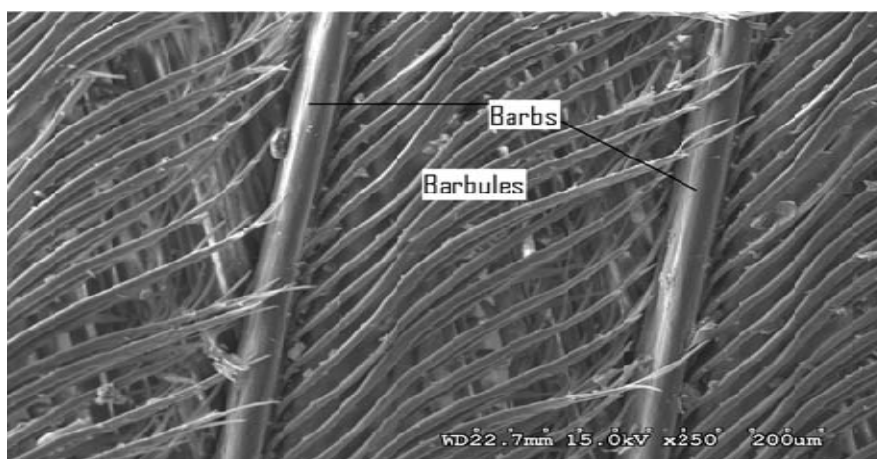


Fig. I.3: Image au MEB montrant la structure tertiaire des plumes, barbules.

Les barbules ont des longueurs d'environ 0,3 –0,5 millimètres et ont des crochets à leurs extrémités.

Le rachis parcourt la longueur entière de la plume et peut atteindre jusqu'à 17,8 centimètres en longueur. Les barbes quant à elles, ont des longueurs de 1 à 4,5 centimètres selon leur endroit sur la longueur du rachis. Les barbes à la base du rachis sont plus longues que ceux au bout. Les structures tertiaires, les barbules ont des longueurs d'environ 0,3–0,5 millimètres.

Le rachis de plume est épais et rigide et non approprié comme fibres naturelles protéiniques. D'autre part, les barbes de plume ont une longueur, une résistance et une flexibilité qui les rendent appropriées en tant que fibres naturelles protéiniques. En outre, les barbes ont une section transversale unique que l'on ne retrouve pas dans les fibres naturelles protéiniques de la laine et de la soie. Les barbes de plume sont en forme de nid d'abeilles avec des cellules creuses dans la section transversale [25].

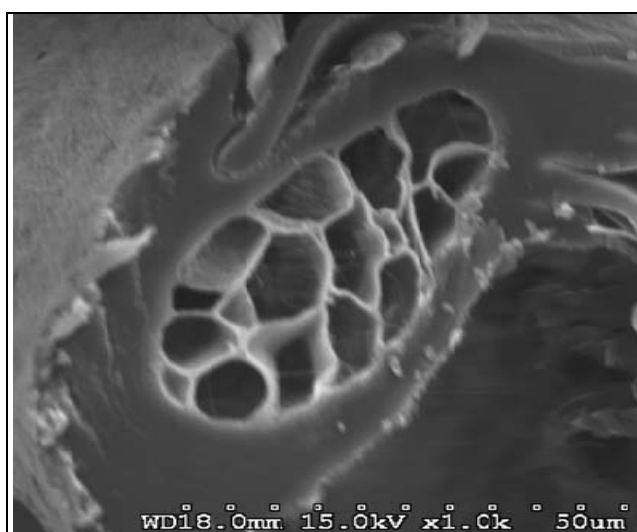


Fig. I.4: Image au M EB de la section transversale d'une barbe.

Les cellules creuses agissent efficacement en isolation thermique et phonique donc très appropriée aux applications dans l'industrie de l'automobile, comme matériaux qui peuvent absorber les ondes sonores. De plus, la structure en nid d'abeilles fournit une résistance élevée à la compressibilité. La présence de cette structure permet aux barbes d'avoir un poids léger combiné à leur capacité isolante.

Longitudinalement, les barbes ont une surface fibrillaire mais sont dépourvues d'écailles présentes au niveau de la laine [25].

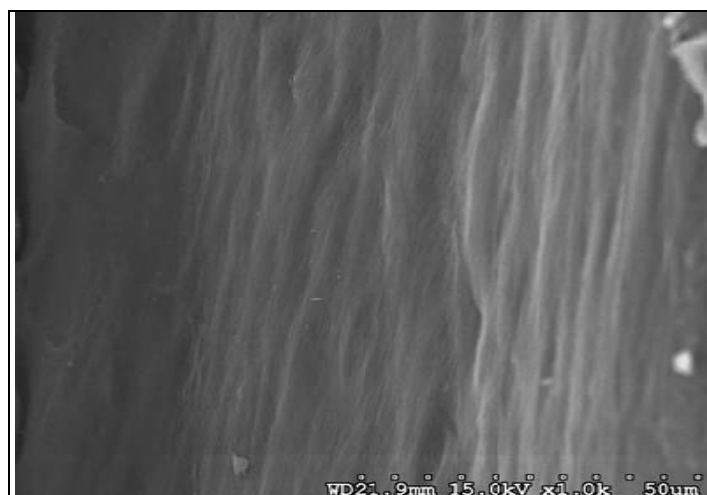


Fig. I.5: Image au MEB de la surface des barbes [25]

La présence des barbules attachées aux barbes, permet de fournir une interaction unique avec d'autres fibres quand des barbes sont utilisées pour obtenir des filaments hybrides. Les barbules peuvent également empêtrer avec d'autres fibres et améliorer les propriétés mécaniques de composites fibreux. Les barbes sont plus flexibles que le rachis et peuvent être tissés quand elles sont assemblées [25]. Ce qui confère aux fils une bonne cohésion et une durabilité élevée aux tissus fabriqués avec ce matériau.

La figure ci-dessous montre un fil produit d'un mélange d'environ 70% de coton et 30% de fibres de plume de poulet, les barbes sont entrelacées et tissées avec les fibres de coton.



Fig. I.6: Image d'un fil tissé d'un mélange de barbes et coton.

Le fil observé à l'ESEM, montre que les fibres de coton sont enchevêtrées avec les barbules des plumes. L'interaction structurale des barbes, barbules et crochets avec d'autres mélanges de fibres, procure un meilleur enchevêtrement et une bonne cohésion des fils. Une telle interaction structurale entre les fibres ne peut exister chez une autre fibre naturelle ou synthétique actuellement

disponibles. En outre, la flexibilité des barbes et leur capacité d'être tissées lorsqu'elles sont mélangées, sont des propriétés qui contribueront à la résistance des filaments [25].

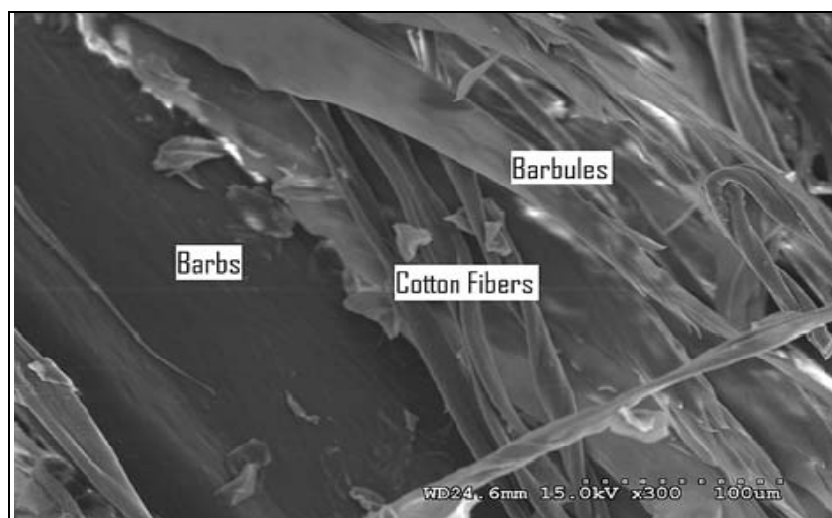


Fig. I.7: Image au MEB d'une portion d'un fil constitué d'un mélange de barbes et de coton.

Sur cette figure, on voit des barbes tissées avec des filaments de coton [25].

I.2.2- Les propriétés chimiques, physiques et mécaniques

I.2.2.1- Les propriétés chimiques

Afin de connaître avec exactitude l'aspect moléculaire des déchets kératiniques, il est utile de rappeler quelques notions sur les propriétés structurales des protéines avant d'exposer les caractéristiques des protéines fibreuses.

I.2.2.1.1- Rappels sur la structure des protéines

Les protéines constituent le principal matériau de construction des êtres vivants. Elles jouent un rôle actif et vital dans le fonctionnement des cellules (enzymes, anticorps, antigènes, toxines ...). Toutes les protéines contiennent du carbone, de l'oxygène, de l'hydrogène et de l'azote. Plusieurs contiennent aussi du soufre et du phosphore.

1) Constitution des protéines

Une protéine est un polymère organique résultant de la condensation d'acides aminés par formation de liaisons peptidiques. Les acides aminés constitutifs sont appelés résidus, le radical R présent sur le résidu est appelé chaîne alkyle (Figure I.8).

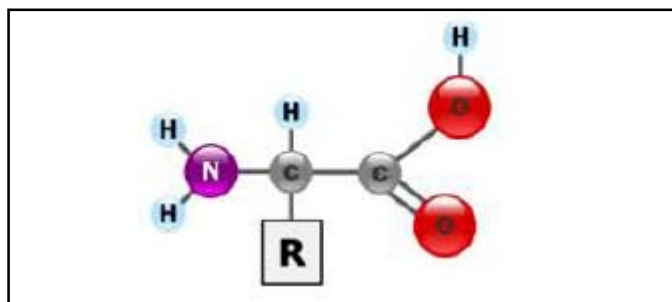


Fig. I.8: Formule chimique générale des acides aminés

Deux acides aminés peuvent s'associer de façon covalente pour former un dipeptide. La liaison ainsi établie est la liaison peptidique, elle résulte de la combinaison entre le groupement carboxyle (COOH) d'un acide aminé et le groupement amine (NH₂) de l'autre, avec perte d'une molécule d'eau (*Figure I.9*).

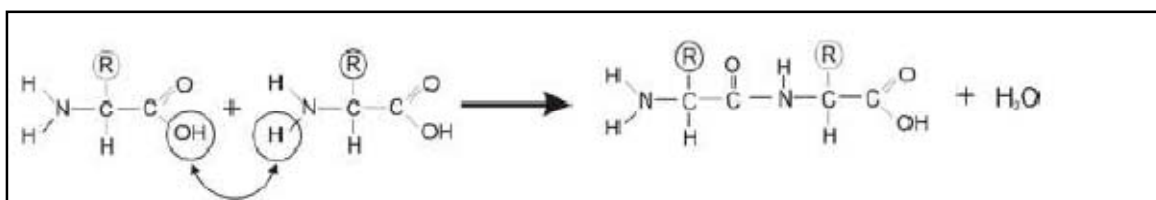
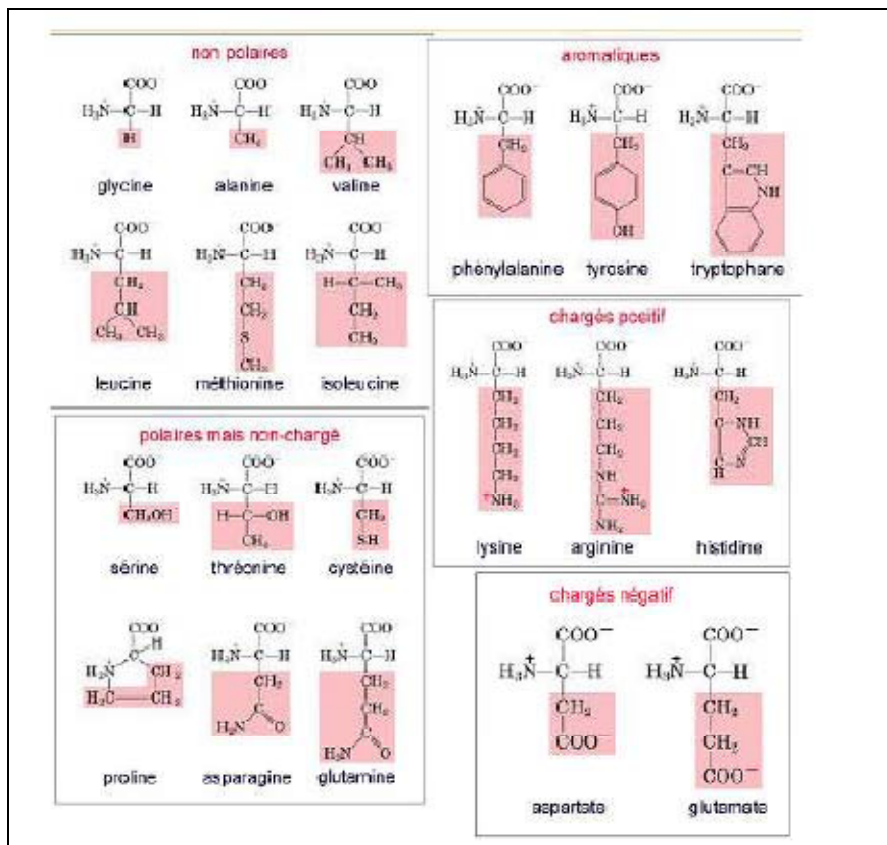


Fig. I.9: Formation liaison peptidique

La répétition de cette réaction n fois, permet ainsi d'obtenir un peptide ($n < 100$) ou une protéine ($n > 100$) [19]

Le Tableau I.9 présente la structure des 20 acides aminés les plus fréquemment rencontrés.

Tableau I.9: Liste des acides aminés

La séquence d'acides aminés, ou structure primaire, détermine presque à elle seule les propriétés physico-chimiques et structurales des protéines, en particulier ses interactions avec l'eau. Les protéines interagissent avec l'eau par leurs liaisons peptidiques (interactions dipôle-dipôle ou liaison hydrogène) ou par les chaînes latérales (interactions avec les groupements polaires, ionisés et même non polaires). La solubilité des protéines dans l'eau dépend de la compétition entre les interactions protéines-protéines et les interactions protéines-eau [18].

2) Conformation des protéines

Chaque protéine est caractérisée par sa conformation, c'est-à-dire son organisation tridimensionnelle: les protéines fibreuses, par exemple, sont composées de chaînes polypeptidiques assemblées le long de l'axe commun (collagène, kératine...etc.). Les protéines globulaires sont formées de chaînes enroulées sur elles-mêmes engendrant des formes sphériques ou ellipsoïdales (sérum albumine) [18].

On distingue quatre niveaux d'organisation mis en évidence dans la figure I.9:

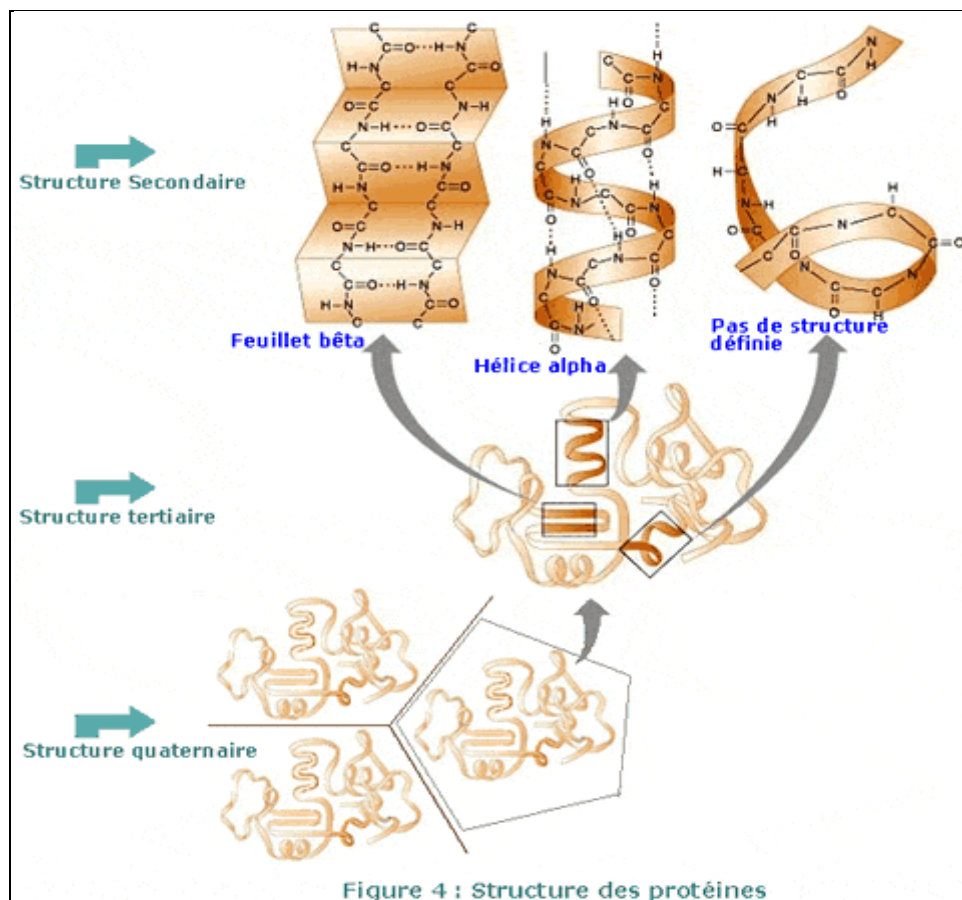


Fig. I.10: Schématisation des différentes structures d'une protéine [18].

a) La structure primaire

La structure primaire correspond à la séquence en acides aminés. Cela va ensuite conditionner le repliement de la protéine.

b) La structure secondaire

➤ L'hélice α

C'est une structure en bâtonnet. La chaîne polypeptidique principale étroitement enroulée forme la partie interne du bâtonnet et les chaînes latérales se disposent à l'extérieur en un arrangement hélicoïdal. L'hélice est stabilisée par des liaisons hydrogène entre les groupes NH et CO de la chaîne principale. Le CO de chaque acide aminé (A.A) est lié par une liaison hydrogène au groupe NH de l'A.A situé 4 résidus plus loin dans la chaîne polypeptidique linéaire. Chaque résidu est disposé par rapport au suivant selon une translation de $1,5 \text{ \AA}$ le long de l'axe de l'hélice et une

rotation de 100° , ce qui donne 3,6 résidus d'A.A. par tour d'hélice. Les hélices α rencontrées dans les protéines sont droites.

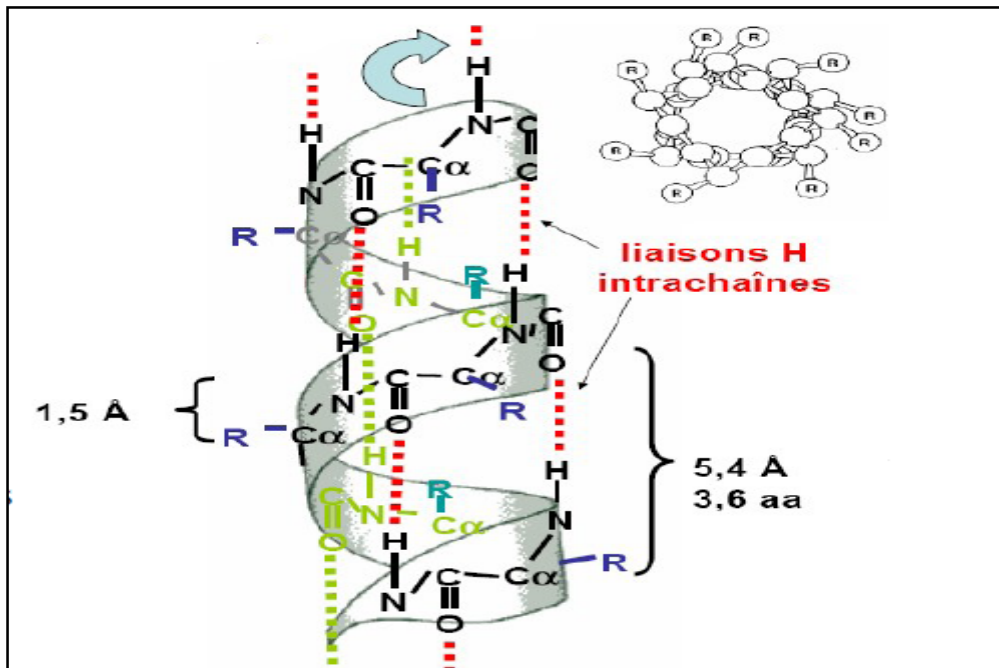


Fig. I.11: L'hélice α . [19]

Deux hélices peuvent s'enrouler l'une autour de l'autre pour former un câble. Ces enroulements super hélicoïdaux sont rencontrés dans la kératine des cheveux, la myosine et la tropomyosine du muscle, l'épiderme de la peau et la fibrine des caillots sanguins. Ces câbles jouent un rôle mécanique en formant des faisceaux rigides de fibres.

➤ Le feuillet β

La chaîne polypeptidique du feuillet β est presque totalement étirée. La distance axiale entre les A.A. adjacents est de 3,5 Å. Le feuillet est stabilisé par des liaisons hydrogènes entre le CO et NH de chaînes polypeptidiques différentes. Les brins adjacents d'un feuillet plissé peuvent être de même sens ou de sens opposés (feuillets antiparallèles). La fibroïne de la soie est constituée presque entièrement de feuillets antiparallèles. Des unités structurales comprenant de 2 à 5 feuillets parallèles ou antiparallèles sont très répandues.

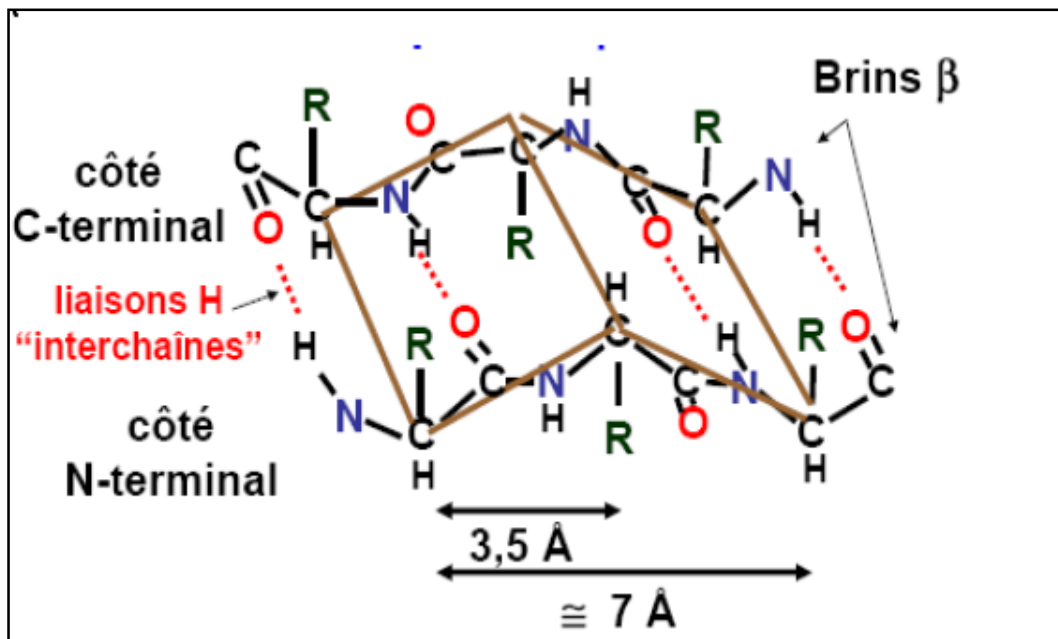


Fig. I.12: Feuillet β [18].

c) La structure tertiaire

Elle résulte des relations entre les A.A éloignés dans la structure linéaire. En effet des acides aminés très éloignés les uns des autres dans la séquence peuvent se trouver très proches en raison des repliements et former des régions indispensables au fonctionnement de la protéine comme le site actif.

Les chaînes latérales polaires sont groupées en surface. Les radicaux hydrophobes sont rejetés vers l'intérieur de la protéine. Ces radicaux sont unis par des liaisons hydrophobes (interactions de type de Van der Waals).

d) La structure quaternaire

Plusieurs chaînes polypeptidiques peuvent s'associer grâce à des interactions de 3 types ; ce qui confère une activité biologique au niveau du protomère qu'on ne retrouve pas au niveau de l'oligomère. Les 3 types de forces sont:

- Les liaisons électrostatiques: ce sont des liaisons non covalentes qui s'établissent entre un radical chargé positivement et un radical chargé négativement.
- Les liaisons hydrogènes: c'est une liaison non covalente qui se forme quand sont à proximité un atome d'hydrogène lié à l'azote ou à l'oxygène et d'autre part un doublet électronique non partagé d'un autre azote ou d'oxygène.
- Les liaisons hydrophobes: les chaînes latérales hydrophobes sont repoussées par l'eau et ont tendance à se rapprocher entre elles.

I.2.2.1.2- Protéine fibreuse

Les protéines fibreuses sont appelées *protéines structurales* car elles constituent le principal matériau de construction chez les Vertébrés. Elles sont linéaires, insolubles dans l'eau et d'une grande stabilité (support mécanique aux tissus et résistance à la traction).

Les principales protéines fibreuses sont le collagène, la kératine, le fibrinogène et les protéines musculaires.

1) La kératine

La kératine, présente dans les couches supérieures de l'épiderme, dans les cheveux, les ongles, les écailles, les sabots et les plumes, s'enroule en une torsade régulière appelée «hélice alpha». Chargée de protéger l'organisme contre l'environnement extérieur, la kératine est totalement insoluble dans l'eau. Ses nombreuses liaisons disulfures en font une protéine extrêmement stable, capable de résister à l'action des enzymes protéolytiques [32].

a) Kératine des plumes

C'est une protéine d'une structure moléculaire bien fermée, stabilisée par des ponts disulfure, interaction hydrophobe et des liaisons hydrogène. Elle représente plus de 90% du poids total des plumes, la majorité de cette kératine est sous forme de feuillets β emballés dans une chaîne polypeptidique avec un taux élevé de ponts disulfure entre les résidus cystéine. Le reste est présenté par la kératine α sous forme de chaînes polypeptidiques étroitement associées en paires d'hélice α . Elle est constituée dans sa structure de 40% de groupements chimiques hydrophiles et 60% hydrophobes [32].

b) Kératine de corne et de sabot

Les kératines, constituants principaux de la corne, sont synthétisées par l'épiderme dans sa couche interne. Les cellules migrent graduellement à partir de cette couche jusqu'à la couche cornée dont la partie supérieure est formée par ces mêmes cellules mortes. Les kératines sont constituées de deux types de protéines. Les premières ont une structure filamenteuse. Leur élément de base est constitué de deux polypeptides formant chacun une structure compacte avec une conformation en hélice α . Ces deux hélices s'enroulent l'une sur l'autre pour former une super hélice, stabilisée par des liaisons covalentes (ponts disulfures), formant des résidus cystines (voir figure 5). La rigidité de ces protéines est due à la présence des ponts disulfures [5].

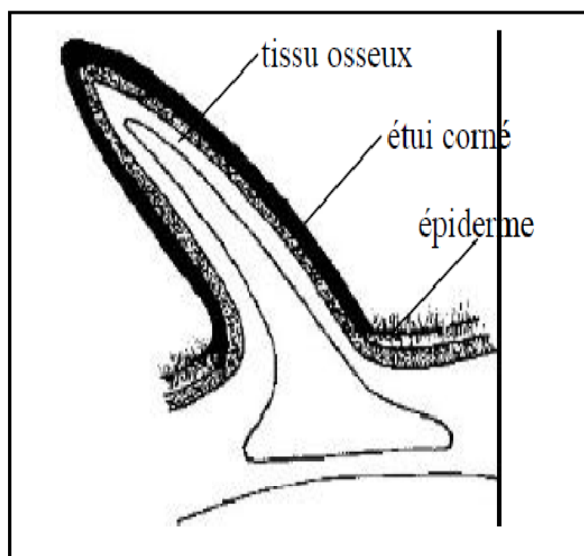


Fig. I.13: Coupe transversale d'une corne [5]

c) Kératine de la laine

La laine est un matériau protéique appartenant à la famille des kératines. On distingue deux types de kératine selon leurs caractéristiques physiques, l'histologie et leurs compositions chimiques : les kératines molles et les kératines dures.

La laine, comme les cheveux, la corne ou encore les ongles et les plumes, appartient à la famille des kératines dures. Celles-ci contiennent beaucoup de soufre provenant majoritairement de la présence de cystéines et montrent une transition plus graduelle entre les zones de formation et les zones kératinisées [30].

Une fibre de laine contient 17 ou 18 des 20 acides aminés naturels, formant plus de 170 protéines différentes réparties de façon non uniforme tout au long de la fibre et dont, à ce jour, seules 28 ont été séquencées.

d) Kératine des cheveux et des ongles

Le cheveu est d'une solidité incroyable. Chaque cheveu pouvant supporter 100 grammes, une chevelure moyenne de 120 000 cheveux pourrait soutenir 12 tonnes, si le cuir chevelu était assez résistant ! C'est l'organisation étonnante de la kératine dans le cortex qui autorise cette performance. Dans le corps du cheveu, le cortex, la kératine est organisée en protofibrilles, composées de quatre chaînes de kératine. Les protofibrilles sont assemblées en une structure d'ordre plus élevé, la microfibrille, composée de 8 protofibrilles (en cylindre ou parallélépipède creux). Les microfibrilles sont aussi réticulées par des ponts SS ; leur nombre détermine le degré de rigidité de la fibre [32]

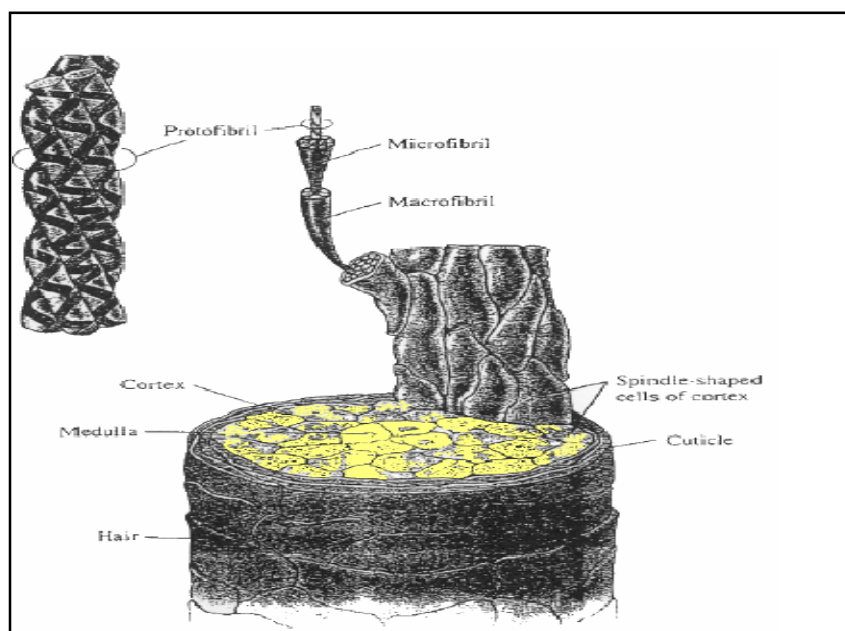


Fig. I.14: Structure du cheveu [32]

I.2.2- les propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des barbes de plumes ont été comparées à celles de la laine et de la plume de dinde.

Tableau I.10: Les propriétés mécaniques des barbes de plumes de poulets comparées à celles de dindes et laine [27].

Fibres	Finesse (denier)	Longueur (cm)	Resistance (g/den)	Gain d'humidité (%)	Allongement (%)
Barbes de plume de poulet	76	1.5–4.5	1.44 ± 0.46	9.7	7.7 ± 0.85
Barbes de plume de dinde (pennes)	142	5.2	0.83	–	7.96
Laine	11	4.5–11.5	1.2–1.8	16.0	30–40
Barbes de plume de dinde (duvet)	55.2	4.1	0.36	–	16.43

- Les plumes de poulet ont des barbes avec des longueurs de 1,5 à 4,5 centimètres, selon l'emplacement le long du rachis. Cette longueur est plus petite comparativement à celle retrouvée dans les plumes de dinde ou des fibres de laine ou de coton, dont la longueur est entre 2.5 et 3.5 cm, utilisées habituellement dans le textile.

- La finesse de des barbes de plume de poulet est semblable à la finesse moyenne de barbes de plumes de dinde mais plus grosse que celle de la laine.
- La résistance des barbes de plume de poulet est semblable à celle de la laine mais plus élevée que celle des plumes de dinde.
- Toutes les fibres de ces plumes examinées ont un allongement inférieur que celui de laine.
- Le gain en humidité des barbes de plumes de poulet à 9,7 % est plus bas que celui de laine mais plus élevé que celui des fibres de cellulose.
- Bien que les barbes de plumes de poulets soient plus épaisses que la laine, leur résistance et leur allongement, indique leurs propriétés mécaniques similaires à celles de la laine. Cependant la structure unique des barbes de poulets et leur faible densité, font d'elle des matériaux préférés pour plusieurs applications. Un mélange de barbes de faible densité à d'autres fibres naturelles à densité relativement élevée, crée des interactions leur conférant des propriétés uniques [27].

I.2.2.3- les propriétés physiques

Certaines propriétés physiques de la plume sont reportées sur le tableau ci-dessous:

Tableau I.11: Les propriétés physiques des plumes

Composition	70 à 80% de plume de volailles lavées, traitées à chaud pour être débarrassées des allergènes. Laine de mouton (5 à 10%) et fibres textiles de liage (10 à 20%)
Utilisation	Polyvalente
Masse volumique (1)	20 à 30 kg/m ³
Comportement au feu (2)	Difficilement inflammable
Conductivité thermique (3)	0,033 à 0,042 W/m°C
Perméabilité à la vapeur d'eau	Hydrophobe (sans que cela nuise à son pouvoir isolant).
Prédateurs	Non consommable, possibilité de nidification.
Spécificités	Valorisation des sous produits agricoles, hautes performances thermiques constantes quelque soit le taux d'humidité.
Performance	Très bonne performance
Avantage	Abondante et facilement disponible
Inconvénient	Traitement contre les acariens ou autre.

(1) la masse volumique donnée à titre indicatif, pouvant varier suivant les fabricants les mises en œuvre.

(2) Selon les classements en vigueur.

(3) Coefficient lambda donné à titre indicatif. Plus le coefficient est grand, plus le matériau est conducteur et plus il est faible, plus le matériau est isolant.

Chapitre II

Etat de connaissance sur les matériaux : composites-béton

Généralités sur le béton de fibres et sur les composites

II.1-Généralités sur le béton de fibres

Introduction

Le béton est un mélange précisément dosé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants. Il est formulé en fonction de l'usage auquel il est destiné et est utilisé essentiellement pour la construction d'ouvrages de Génie Civil et d'Architecture.

Vers 2600 avant J.C., les Assyriens et les Babyloniens ont employé l'argile comme un matériau liant, c'est à dire comme le ciment. Les Egyptiens ont utilisé un ciment à base de chaux et de gypse. En 1756, un ingénieur anglais, John SMEATON a fait le premier béton moderne (ciment hydraulique) en utilisant l'addition de gravillons naturels ressemblants aux graviers et d'un mélange de briques pulvérisées comme ciment. En 1824, un inventeur anglais, Joseph ASPDIN a inventé le Ciment Portland qui est la méthode la plus utilisée à ce jour pour la production de béton. Ce premier ciment artificiel a été créé par le brûlage simultané d'argile et de roches calcaires. Le processus de brûlage change les propriétés chimiques de ces matériaux, et de cette façon, ASPDIN a créé un ciment avec une résistance à la compression très supérieure à celle des mortiers de chaux qui étaient utilisés jusqu'alors. Le seul inconvénient de ce matériau nouveau est sa faible résistance à la traction. En 1849, un jardinier parisien, Joseph MONIER a inventé le béton armé à partir de l'idée de renforcer les bacs à fleurs qu'il construisait en béton en y incorporant des barres en fer. Cette nouvelle invention a été brevetée en 1867. Cette armature métallique permet au béton de supporter partiellement les contraintes de traction.

En 1928, un ingénieur français, Eugène FREYSSINET a inventé le béton précontraint par fils adhérents. Sans son invention, largement utilisée par ses successeurs dans le monde entier, de nombreux ouvrages contemporains n'auraient pu être construits ou le seraient différemment

II.1.1-Définition du béton de fibre

Le béton renforcé de fibres est un matériau composite dont les propriétés mécaniques résultent de la combinaison des propriétés du béton, des fibres et de l'interface entre les matériaux.

L'ajout de fibres dans le béton modifie ses propriétés. Largement utilisées pour assurer la pérennité des ouvrages, certaines sont capables de coudre les macrofissures. Une pièce en béton armé renforcée à l'aide d'une couche en béton de fibres permettrait d'augmenter la

résistance au feu (par limitation des ouvertures des fissures et aussi en protégeant les armatures traditionnelles). Il existe maintenant trois gammes de fibres utilisées pour des applications très différentes: métalliques, macro fibres synthétiques et microfibres polypropylène.

II.1.2-Rôle des fibres dans le béton

De l'ensemble des recherches effectuées, il est apparu que le rôle des fibres est de contrôler au mieux la fissuration du béton en état de service, en réduisant l'ouverture des fissures, et de transformer le comportement fragile du béton en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultime. Le béton présente toujours des microfissures dues à différentes causes, le retrait, les contraintes thermiques, les contraintes appliquées au jeune âge...etc. Dans le cas d'un béton fissuré quand on exerce une traction sur la matrice les lignes de tension doit s'infléchir parce que la charge ne peut être transmise par la fissure et les tensions aux extrémités de la fissure augmentent [1].

Les fibres ont donc comme but principal de modifier la répartition des fissures de les couvrir et par conséquent de rendre le matériau moins fragile et donc ductile, il faut plus d'énergie pour faire progresser la fissure [1].

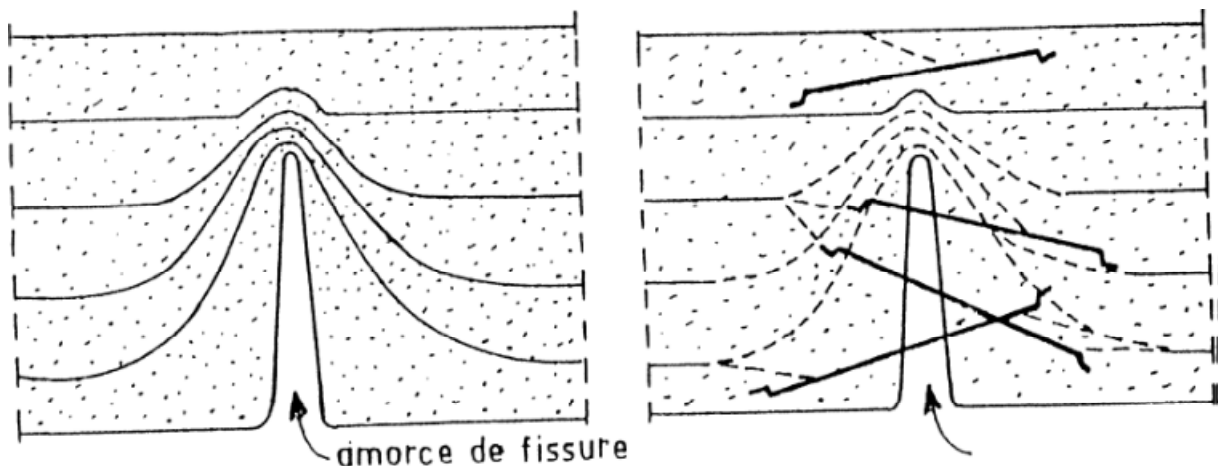


Fig. II. 1:Rôle des fibres dans la matrice de béton.[1]

II.1.3-Différents types de fibres

Il existe plusieurs types de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur Longueur (macro ou micro fibres), leur forme et leur état de surface. Par leurs caractéristiques, différentes les unes des autres, les fibres sont définies suivant qu'elles soient naturelles ou artificielles. Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces ou

massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation des structures), de leurs propriétés (résistance et module élevés, bonne adhérence), de leur disponibilité et de leur prix. Le tableau II.1 représente les différents types de fibres et donne leurs principales caractéristiques [23].

Tableau II.1 : Différents types de fibres. [23]

Fibres naturelles		Fibres artificielles	
végétales	Animales	minérales	organiques
Lin	Poil	Laitiers	Polypropylène
Chanvre	Laine	Carbone	Polyamides
Celluloses	Soie	Métaux (acier, fonte)	polyesters
Sisal		Verres spéciaux	
Coir		amiante	

II.2. Généralités sur les matériaux composites

Introduction

Les composites sont très anciens: le bois (composite naturel), le torchis, le béton (agréats et pâte de ciment), le béton armé, le bois contre-plaqué (sandwichs et lamifiés) décoratifs par exemple constituent des matériaux composites très utilisés de nos jours.

Le développement des technologies dans le domaine de la production de fils et de fibres d'origine organique, céramique ou métallique et dans le domaine de la transformation des matières plastiques a permis une évolution rapide de l'utilisation de structures en matériaux composites.

Cette évolution est notamment due aux propriétés de résistance, de rigidité et de faible poids des matériaux composites par rapport à celles des matériaux conventionnels. Cependant l'optimisation de la conception de telles structures nécessite d'appréhender le comportement du matériau composite.

Dans le cas des structures dites à hautes performances mécaniques, ces dernières se présentent généralement sous forme de poutre, de plaque ou de coque. L'épaisseur est obtenue par

superposition de couches ou de strates élémentaires réalisant un stratifié multicouche. Ces couches sont constituées d'une matrice renforcée essentiellement par des fibres présentant des caractéristiques mécaniques élevées.

Ces fibres sont soit alignées parallèlement (fibres unidirectionnelles) soit croisées (tissus) ou orientées aléatoirement (mats). Ce renfort confère généralement au matériau une très forte anisotropie mécanique. Il apparaît donc nécessaire pour faire face au développement sans cesse croissant de ces matériaux de concevoir des outils de calcul performants prenant en compte leur comportement spécifique [15,6].

La connaissance, aussi précisément que possible, des caractéristiques géométriques et mécaniques d'un mélange « renfort + matrice » qui est la structure de base des pièces composites, est primordiale. Les caractéristiques mécaniques du mélange renfort/matrice peuvent être estimées à partir des caractéristiques de chacun des constituants [20].

Ces nouvelles exigences imposent le développement de nouvelles techniques de mise en œuvre et d'élaboration de nouveaux matériaux. Les matériaux composites à base de résine de synthèse se définissent essentiellement par leurs deux constituants de base : la matrice et le renfort. Le renfort assure la résistance mécanique, il est généralement constitué de fibres de verre, de carbone et d'autres suivant destination.

La matrice, pour l'essentiel en résine moulable ou malléable, assure trois fonctions principales :

- la répartition de la charge mécanique sur tous les renforts;
- le lien entre renforts pour assurer une homogénéisation de l'ensemble ;
- la protection des renforts vis à vis du milieu extérieur.

Ces deux constituants principaux reçoivent des additifs ou charges qui en modifient l'aspect ou les caractéristiques : pigments coloration, agent anti UV, isolation thermique ou acoustique...

L'identité du matériau composite permet de renseigner sur ses caractéristiques techniques.

II.2.1- Définitions et Propriétés

Un matériau composite est une combinaison de deux ou plusieurs matériaux distincts à l'échelle macroscopique (voir figure III. 2), dans le but de produire un matériau possédant des propriétés qui excèdent celles de ses constituants [20].

En fait, un matériau composite est constitué de deux phases inertes l'une par rapport à l'autre : la matrice et le matériau de renfort, lequel se présente le plus souvent sous forme de fibres. La

matrice, généralement ductile mais possédant une résistance et une rigidité faibles, sert de milieu de transfert des efforts vers les fibres, plus rigides et plus résistantes [9].

En utilisant un ensemble de fibres plutôt qu'un seul élément de dimension équivalente, on obtient une meilleure résistance, puisqu'on a moins de chance de faire face à une rupture soudaine causée par un défaut. On y observe de plus une diminution de la propagation des fissures en comparaison avec une tige constituée d'un seul élément [21].

Les matériaux composites se caractérisent par le fait que leur comportement est linéaire élastique jusqu'à la rupture, c'est-à-dire qu'ils ne subissent pas de déformations plastiques irréversibles avant la rupture. Ceux-ci ne présentent donc pas un comportement ductile, que l'on définit comme étant l'aptitude d'un matériau à subir de grandes déformations plastiques avant la rupture.

En général, les matériaux composites présentent une excellente résistance en tension et une grande rigidité. Ces propriétés mécaniques peuvent toutefois être variables, puisqu'elles sont étroitement liées aux caractéristiques propres des fibres et de la matrice du composite ainsi qu'à leurs proportions respectives [6]. D'autre part, leur masse volumique est environ quatre fois inférieure à celle de l'acier, ce qui en facilite la manipulation et l'installation en chantier. De surcroît, le problème de corrosion ne se pose pas [9].

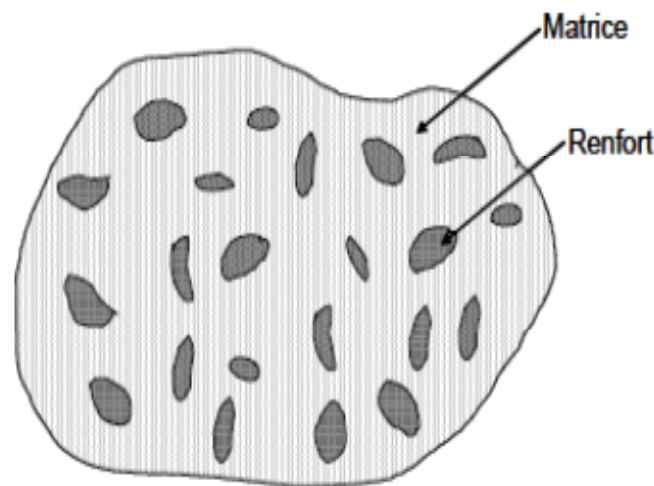


Fig. II.2 : Matériau composite. [24]

III.2.1.1- Les renforts

Le comportement des matériaux composites dépend principalement du pourcentage de fibres et des propriétés mécaniques des constituants. Ce sont les renforts fibreux qui donnent aux composites leurs propriétés hautement directionnelles, leur imposant un comportement

anisotrope et essentiellement linéaire élastique jusqu'à la rupture. Les renforts les plus utilisés sont les fibres de verre, d'aramide et de carbone.

Le tableau III.2 récapitule les principales propriétés des fibres et le graphe de la figure III.3 compare la résistance en traction de différents types de fibres.

Les paragraphes qui suivent décrivent les principales caractéristiques de ces trois types de fibres.

- Fibres de verre

Les fibres de verre sont les renforts les plus utilisés, surtout en Amérique du Nord, parce qu'elles offrent des performances mécaniques intéressantes et que leur coût est relativement bas. Elles présentent également une bonne résistance à l'humidité et à la corrosion. Il en existe cinq catégories (C, D, E, R et S), le verre E étant le plus répandu. Les composites à base de fibres de verre possèdent une résistance mécanique relativement élevée. Cependant, leurs applications structurales sont souvent limitées par leur faible module d'élasticité. De plus, certaines limites à l'utilisation de ces fibres sont imposées afin d'éviter les réactions alcali-granulats avec le béton.

- Fibres d'aramide

Les fibres d'aramide, qui ont une masse volumique très faible, sont celles qui possèdent la plus grande résistance spécifique. Elles sont souvent mieux connues sous le nom commercial de « Kevlar », lequel est fabriqué en trois catégories. Les composites à base de fibres d'aramide résistent bien aux chocs et à la fatigue. Ils ont par contre une faible résistance à la compression et leur coût est très élevé.

- Fibres de carbone

Les fibres de carbone, grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques, sont celles qui possèdent le plus grand potentiel d'applications en Génie des structures. Ces fibres sont composées de plus de 90 % de carbone. Dans la fibre, les groupes d'atomes de carbone sont liés de façon continue dans la direction de la fibre. Elles peuvent être classées en plusieurs grades selon leurs propriétés mécaniques et en deux types selon la longueur des fibres (courtes et continues). Les fibres continues sont utilisées pour fabriquer, entre autres, des tendons de précontrainte et des câbles de suspension [10].

Les composites à base de fibres de carbone ont tendance à être moins fiables sous des charges de compression. La résistance et le module en compression sont généralement plus faibles que

les propriétés en tension Les propriétés en compression sont également plus sensibles aux défauts de fabrication, donc nécessitent un contrôle de qualité plus strict. Par conséquent, ces composites seront le plus souvent utilisés de manière à ce qu'ils soient sollicités en tension. Le coût des fibres de carbone est très élevé et il est peu probable qu'il connaisse une baisse radicale avec les techniques de fabrication actuelles. Cependant, ces dernières peuvent être utilisées avantageusement pour la réparation ou le renforcement d'ouvrages existants. En effet, dans les travaux de réhabilitation, étant donné la faible quantité de matériaux utilisés, le coût élevé du produit est souvent compensé par une réduction significative des coûts de main-d'œuvre et des inconvénients liés aux travaux de construction [17].

Tableau II.2 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts [15]

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique (kg.m^{-3})	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	d	Mv	E	G	k	C_r	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	$0,5 \cdot 10^{-5}$
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	$0,3 \cdot 10^{-5}$
Carbone HM	6,5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	$0,08 \cdot 10^{-5}$
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	$0,02 \cdot 10^{-5}$
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	$-0,2 \cdot 10^{-5}$
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	$0,4 \cdot 10^{-5}$
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

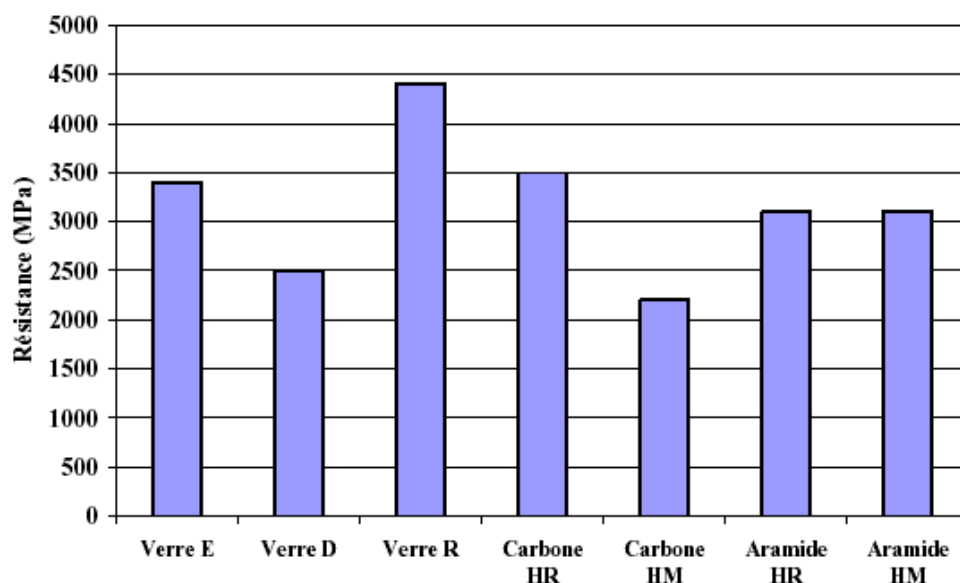


Fig.II .3: Histogramme des propriétés en traction des fibres [10]

II.2.1.2- Les matrices

La matrice a pour rôle de lier les fibres (renforts), de répartir les contraintes subies, d'apporter la tenue chimique de la structure et de donner la forme désirée au produit.

On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développent fortement.

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices.

- La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.
- La structure des TD à la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pont (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

II.2.1.3- Les charges et additifs

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières. Les quantités de produits peuvent varier de quelques dizaines de pourcentage dans le cas de charges à quelques pourcentages et moins dans le cas d'additifs. Les propriétés particulières qui peuvent généralement être améliorées portent sur les résistances mécaniques (compression) et les propriétés de mise en œuvre (thixotropie). Nous pouvons ainsi, citer en exemple les charges de renfort qui se présentent sous formes sphériques (microbilles de verres) ou non sphériques (écailles de mica), les charges non renforçantes, qui ont pour rôle de diminuer le coût de la résine et peuvent contribuer à l'augmentation de certaines propriétés (masse volumique, dureté, module d'élasticité).

Les additifs interviennent comme lubrifiants, colorants ou agents anti-ultraviolets. Il est important de noter que l'ensemble de ces ajouts modifient les propriétés physiques et mécaniques des résines.

II.2.2- Avantages et inconvénients

Les matériaux composites sont peu utilisés ou recommandés par les ingénieurs à cause de l'absence de normes de design détaillées et des coûts relativement élevés des produits. Pourtant, dans les applications traditionnelles, les matériaux ne représentent que 20% des coûts, alors que la main-d'œuvre en représente 80 % [21]. Ainsi, si l'on considère le coût total

des travaux, il est possible de faire des économies sur la main-d'œuvre, puisque les matériaux composites sont plus faciles à mettre en place que l'acier. L'utilisation des matériaux composites peut donc devenir compétitive sur le marché, puisque les coûts élevés liés directement à l'achat des matériaux peuvent être compensés par des coûts moindres en main-d'œuvre. Nous présentons dans ce qui suit un bref résumé des avantages et des inconvénients liés à l'utilisation des composites comme matériaux de construction.

Avantages

- Rapport résistance-poids très élevé.
- Très grande rigidité.
- Résistance à la fatigue.
- Résistance à la corrosion.
- Facilité de mise en forme.
- Possibilité d'optimisation (choix de renforcement, direction).
- Multifonctionnalité (résistance mécanique, résistance à l'eau et à la corrosion...etc).

Inconvénients :

- Coût relativement élevé du produit de base jusqu'à 10 fois le coût de l'acier, pour une masse identique).
- Connaissances limitées sur leurs propriétés à long terme, notamment en ce qui concerne l'adhérence à l'interface béton-composite.
- Manque de ductilité.
- Absence de normes de design.

Chapitre III

Isolation thermique

Introduction

Pour améliorer le confort thermique dans un bâtiment et économiser de l'énergie, il est nécessaire de mettre en œuvre des matériaux particulièrement performants, assurant une meilleure isolation thermique. En effet, une bonne isolation thermique entraîne le choix d'équipements de climatisation moins puissants donc plus économiquement rentables.

Dans la plupart des cas, l'isolation thermique est obtenue par l'emploi de matériaux spécifiques qui, outre une bonne résistance à la transmission de la chaleur, doivent présenter d'autres qualités qui sont fonction des impératifs de mise en œuvre comme par exemple:

- la légèreté et la non hygroscopicité des matériaux utilisés afin de conserver dans le temps leurs qualités isolantes,
- une bonne résistance mécanique,
- une bonne tenue aux températures d'emploi,
- une absence d'effets nuisibles sur les matériaux en contact avec l'isolant.

III.1-Les isolants thermiques

Un isolant est un corps ou un matériau qui ne conduit pas la chaleur, il a une masse volumique très faible du fait de sa structure poreuse. Tous les matériaux constitués de cellules emprisonnant de l'air immobile seront d'excellents isolants, c'est le cas du polystyrène expansé, polyuréthane, la mousse, les plumes ...etc. [16]

Les isolants thermiques diffèrent les uns des autres par de nombreux paramètres. Nous présentons ci-après un aperçu des principales caractéristiques par type d'isolant.

III.1.1- Les isolants synthétiques

Le polyuréthane (PUR)

Il se présente sous différentes formes:

- Panneaux nus ou panneaux composites (associés avec des plaques de plâtre ou du bois)
- Mousse de remplissage pour les interstices autour des dormant de fenêtres [16].

Les polystyrènes (expansé EPS et extrudé XPS)

La mousse de polystyrène expansée est obtenue à partir d'hydrocarbures (styrènes) expansés à la vapeur d'eau et au pentane. Issu d'un procédé similaire, le polystyrène extrudé est soumis en

outre à un agent gonflant sous pression qui lui assure une meilleure résistance à la vapeur d'eau et à la compression, permettant une utilisation en milieu humide.

Il se présente sous forme :

- En vrac, sous forme de billes qui sont insufflées
- Panneaux nus ou composites [16].

III.1.2 Les matériaux d'origine minérale

La laine de roche

Les fibres de laine de roche sont liées à l'aide de résines synthétiques polymérisées pour former des rouleaux et des panneaux. La laine de roche a une composition non uniforme (parties infibrées).

Elle se présente sous forme :

- Panneaux nus ou panneaux composites (associés avec un pare-vapeur et une plaque de plâtre)
- Rouleaux [16].

La laine de verre

Les fibres de la laine de verre sont obtenues par la fonte de verre et de sable quartzeux. Elles sont traitées par un produit hydrofuge.

Elle se présente sous forme :

- Panneaux nus ou panneaux composites (associés avec un pare-vapeur et une plaque de plâtre)
- Rouleaux [16].

Le verre cellulaire (CG)

Le verre cellulaire est une mousse de verre obtenue par expansion de celui-ci lorsqu'il est en fusion. Les cellules ainsi formées contiennent un gaz inerte.

Elle se présente sous forme de panneaux rigides

La perlite expansée (EPB)

Le processus de fabrication consiste à poser sur un tapis roulant un mélange composé d'eau de perlite expansée, de fibres de verre, de cellulose et d'un liant bitumeux. Le mélange est comprimé jusqu'à l'obtention de l'épaisseur voulue [16].

Elle se présente sous forme:

- En vrac : billes ou paillettes brutes
- En panneaux
- En blocs de construction [16].

III.1.3- Les matériaux d'origine végétale

Le liège expansé (ICB)

Le liège est un matériau isolant naturel, obtenu du chêne-liège, qui pousse dans les pays méditerranéens. La récolte de l'écorce se fait tous les dix ans environ. La matière première est réduite en granules, puis expansée à la vapeur dans un four à 300 °C. Il se présente en vrac ou en panneaux [16].

Le chanvre

Les qualités mécaniques des fibres de chanvre permettent d'obtenir des produits présentant une bonne résistance mécanique, même avec de faibles densités et une résistance thermique du même niveau que celles des laines minérales. Il se présente en rouleaux souples ou en panneaux semi-rigide [16].

La fibre de bois

Les panneaux de laine de bois sont élaborés à partir de fibres de bois, le liant étant la lignine de bois. Ce matériau naturel possède un coefficient de conductivité thermique identique aux autres laines isolantes, une structure rigide à assemblage rainuré garantissant une très grande longévité.

III.1.4- Les matériaux d'origine animale

La laine de mouton

Les produits de tonte sont d'abord lavés au savon et à la soude, puis la laine reçoit un traitement insecticide et contre le feu (sel de bore). Puis elle est cardée et texturée (fibres de polyester). Elle se présente en écheveaux (voiles torsadés), en rouleaux, en panneaux semi-rigides, en feutres.

Les plumes

Le duvet des oiseaux est utilisé depuis longtemps comme protection thermique. Depuis quelques années, les rouleaux de plumes sont conditionnés industriellement pour devenir un matériau homologué du bâtiment. Traitées à 150 °C, les plumes utilisées sont intégralement débarrassées de toute matière allergène (acariens...). Ce produit est aujourd'hui commercialisé en Belgique. Elle se présente en en rouleaux, en panneaux semi-rigides [16].

III.2- Les propriétés d'un isolant

Les qualités d'un isolant sont définies par sa conductivité thermique, par sa résistance thermique et par ses caractéristiques physiques et chimiques. Ces paramètres sont définis comme suit:

III.2.1- La résistance thermique

C'est une valeur quand on attribue aux matériaux de construction en fonction de leur capacité de s'opposer aux échanges de chaleur. Un matériau ayant une résistance thermique élevée a un bon pouvoir isolant. Elle est désignée par la lettre R ; les matériaux de construction ayant la meilleure résistance thermique sont ceux qui représentent des structures discontinues ou qui renferment de l'air comme le béton cellulaire autoclave, le béton d'argile expansée et la brique creuse .

III.2.2- Caractérisation physicochimique

Les isolants utilisés sont classés en fonction de leur résistance au feu. En outre, ils doivent être inaltérables et imputrescibles (puisque'ils sont souvent exposés à l'humidité) mais aussi chimiquement stables et non corrosifs. Il faut qu'ils soient légers pour ne pas surcharger la construction.

III.2.3- La conductivité thermique

La conductivité thermique est une valeur propre à chaque matériau. Elle est exprimée en watt par kelvin et par mètre ou $W.m^{-1}.K^{-1}$, notée parfois λ . Ainsi, plus λ est élevée, moins le matériau est isolant. Un matériau est considéré comme un isolant si λ est inférieure à 0,065. Le coefficient λ dépend de plusieurs facteurs notamment:

- de la température du matériau (λ augmente avec la température du matériau).
- de l'humidité du matériau (l'humidité fait croître la valeur de λ).

III.2.3.1- Modèles de conductivité thermique effective

A partir de la résolution de l'équation de l'énergie, beaucoup de modèles de calculs de la conductivité thermique ont été développés par de nombreux auteurs. L'intérêt de ce paragraphe consiste à exposer brièvement les modèles de la littérature qui peuvent donner de bons résultats pour le calcul de la conductivité thermique apparente des milieux granulaires.

a) Modèles statiques

Ces modèles reposent sur une description statique d'un tel milieu poreux, qui peut être construit d'une manière aléatoire, en admettant une distribution statistique du nombre et/ou de la position des points de contact entre particules [31]

Modèle de CRANE et VACHON

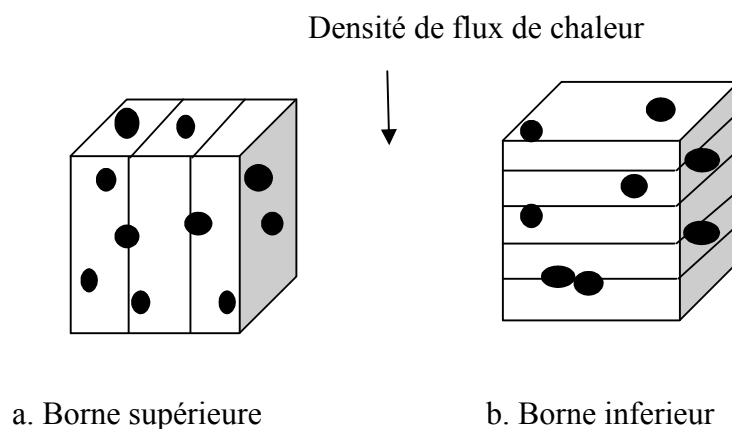


Fig. III.1: Représentation de CRANE et VACHON

Dans ce modèle, Crane et Vachon supposent que la conductivité thermique est comprise entre deux bornes inférieure et supérieure. Ces bornes sont définies en découpant le milieu en des tranches parallèles, d'épaisseur inférieure à celle des particules. Pour décomposer une cellule-unité en résistances, nous procédons de deux façons:

a) Borne inférieure

Nous décomposons le milieu en plaques perpendiculaire au flux de chaleur, considéré comme monodimensionnel. Les phases solides et gazeuses contenues dans chaque tube, sont considérées comme étant en parallèle, alors que les tubes sont en série (voir figure III.1). En faisant tendre l'épaisseur des plaques vers zéro, la conductivité thermique peut être exprimée par :

$$\lambda_{ef} = \int_0^1 \frac{\lambda_s \lambda_f}{\lambda_s (1-\varepsilon) + \varepsilon(\lambda_s - \lambda_f)} dx \quad (III.1)$$

b) Borne supérieure

Nous décomposons le milieu en plaque de même épaisseur parallèlement à la direction du vecteur de la densité de flux de chaleur. Nous supposons que chaque plaque est un tube de flux et sa résistance thermique est équivalente à un système de deux résistances parallèles, ainsi le milieu sera décomposé en n résistances en parallèle. La conductivité thermique apparente est:

$$\lambda_{ef} = \frac{1}{\int_0^1 \frac{dx}{\lambda_f (1-\varepsilon) + \varepsilon(\lambda_s - \lambda_f)}} \quad (III.2)$$

Pour évaluer ces deux intégrales (équation III.1 et III.2), il faut déterminer la fonction de distribution de fraction solide $f(1-\varepsilon)$, car $dx = -f(1-\varepsilon)d(1-\varepsilon)$. Crane et Vachon établissent cette fonction en la supposant une fonction gaussienne [31].

Modèle de ZARICHNIAK et NOVIKOV

Le milieu est présenté par un empilement aléatoire de tubes de flux. Nous supposons que chaque colonne est formée d'un empilement de n cubes en série entre eux, et un tube de flux. Les tubes de flux sont parallèles entre eux. Pour une couche contenant n cubes, la conductivité thermique apparente est:

$$\lambda_{ap} = \sum_{p=1}^n \frac{\lambda_s^p \varepsilon^p (1-\varepsilon)^{n-p}}{\frac{p}{\lambda_g} + \frac{n-p}{\lambda_s}} \quad (III.3)$$

La conductivité thermique dépend du nombre n . Pour n tendant vers l'infini, nous obtenons le modèle en série, et pour $n=1$, nous obtenons le modèle parallèle.

b) Analogie électrique

- **Modèles de contact**

Le premier modèle de calcul de la conductivité thermique apparente des milieux poreux, qui repose sur l'implication des zones de contact, est dû à Disseler et Eian. Beaucoup de chercheurs se sont inspirés de ce modèle pour développer des nouveaux modèles qui s'appuient sur le même principe de Disseler à savoir l'implication des zones de contact.

Modèle YAGI et Kunii

Dans ce modèle, Yagi suppose que le transfert thermique au sein du milieu s'effectue par conduction dans le fluide situé dans les pores ainsi que dans la couche fluide entourant les points de contact entre les particules. La conductivité thermique apparente s'écrit comme suivant:

$$\frac{\lambda_{app}}{\lambda_f} = \varepsilon_1 + \frac{(1 - \varepsilon) \lambda_s}{(1 - \varphi) \lambda_f + \varphi \lambda_s} \quad (III.4)$$

α_1 représente le rapport entre l'épaisseur de la couche stagnante de fluide en série avec le solide et la dimension de la cellule élémentaire, et ε_1 est donné par l'expression suivante :

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon - \varphi}{1 - \varphi} \quad (III.5)$$

Les valeurs de α_1 et ε_1 sont proposées dans la littérature.

- **Modèle de conduction**

C'est un modèle qui tient compte de la conduction. On peut d'abord supposer le milieu formé de couches parallèles alternées de fluide et de solide dont les conductivités thermiques sont respectivement λ_f et λ_s .

Les résistances thermiques correspondantes seront en parallèle pour un matériau dans lequel les phases fluide et le solide sont continues dans le sens du gradient de température, tandis que les couches seront considérées comme perpendiculaires (résistance en série) dans le cas où le flux de chaleur traverse successivement les deux phases solide et fluide (voir figure III.2). On a alors:

Cas parallèle: $\lambda_{ef} = \varepsilon \lambda_s + (1 - \varepsilon) \lambda_f$ (III.6)

Cas série: $\lambda_{ef} = \frac{\lambda_s}{(1 - \varepsilon) + \frac{\varepsilon \lambda_s}{\lambda_f}}$ (III.7)

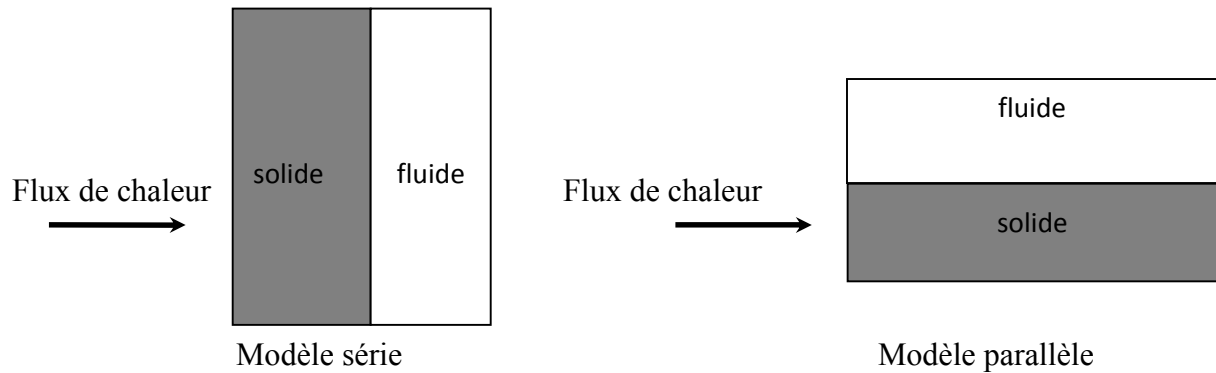


Fig. III.2: modèles de conduction

Modèle de KUNII et SMITH

Le milieu d'étude est sous forme d'un empilement de sphères de même diamètre où n est le nombre de contact de chaque particule. Kunii et Smith supposent que le transfert s'effectue dans la couche fluide et dans le solide au voisinage des points de contact (voir figure III.3), d'où l'équation [31] :

$$\frac{\lambda_{ef}}{\lambda_f} = \varepsilon_1 + \frac{(1 - \varepsilon) \lambda_s / \lambda_f}{(1 - \varepsilon) + \frac{\alpha_1 (\lambda_s / \lambda_f)}{1 + \frac{H_p d_p \alpha_1}{\lambda_f}}} \quad (\text{III.8})$$

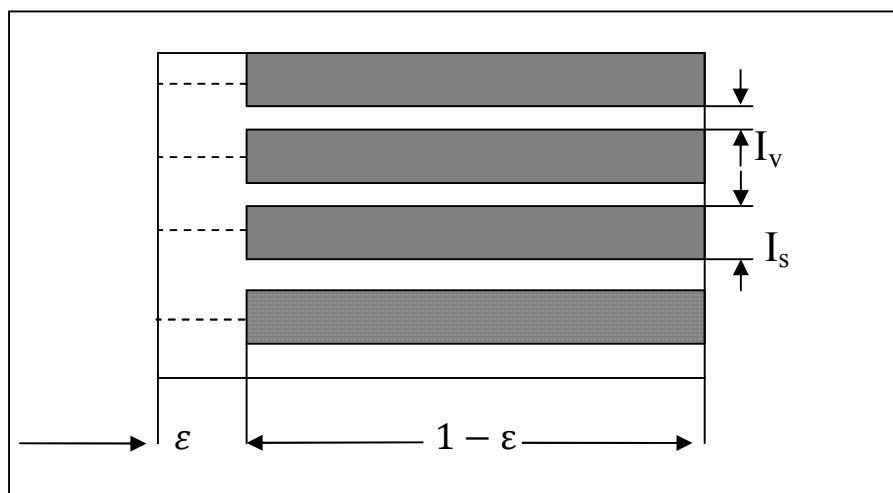


Fig. III.3: Modèle KUNII et SMITH

Chapitre IV
Matériel et méthodes

La partie expérimentale porte sur l'étude de la plume de dinde. Dans ce chapitre nous parlerons de la préparation des échantillons et du mode opératoire, du matériel utilisé et de son fonctionnement.

Matériel et méthodes

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé des fibres d'origine animale obtenues à partir des plumes de volaille et plus précisément des plumes de dinde.

IV.1. - Préparation des échantillons d'essais

Ce plumage, une fois récupéré des abattoirs, a été lavé plusieurs fois et ensuite séché au soleil. Après séchage, les fibres ont été cardées après les avoir extraites mécaniquement et séparées du rachis.

IV.1.1- Les échantillons de plumes pour la détermination de leur masse volumique



Fig.IV.1: a) Le rachis

b) Les barbes

c) Le calamus

IV.1.2-Préparation des échantillons de mortier de fibres

IV.1.2.1-Fibres chargées de paraffine

L'opération consiste à faire fondre la paraffine au bain-marie (voir figure V.2). Après la fonte totale de la paraffine, nous plongeons les fibres dans le récipient contenant la paraffine liquide pendant quelques minutes.

Les fibres imprégnées sont retirées et sont laissées s'égoutter sous une passoire. Après l'égouttage, nous remettons les fibres dans le récipient 5 à 6 fois afin de faire fondre toute la

paraffine de surface placée à l'interface des fibres, pour s'assurer que la restante s'est infiltrer dans la structure poreuse des fibres.



Fig.IV.2 : Fusion de la paraffine au bain marie



Fig.IV.3: Fibres avec paraffine

IV .1. 1.2-Fibres imbibées de résine

Les fibres de dinde sont souvent attaquées par un insecte kératophage appelée mite de vêtements [27], ce qui rend ces fibres et les matériaux obtenus à partir de ces fibres vulnérables et réduit ainsi leur durée de vie. C'est dans cet esprit que nous nous sommes proposés de protéger ces fibres avec de la résine à fin de leur éviter l'attaque par la mite.

La première étape consiste à imprégner ces fibres dans de la résine qui prend moins d'une minute. Les fibres ensuite sont laissées à l'air libre pour sécher (voir la figure IV.4).



Fig.IV.4: Fibres imbibées de résine

IV.2- La masse volumique

IV. 2.1- Détermination de la masse volumique

La masse volumique représente la masse d'une substance par unité de volume

IV. 2.1.1- Mesure de la masse volumique par la méthode du flacon

Le flacon utilisé s'appelle un pycnomètre. Il est constitué d'un petit ballon (d'environ 50 cm³) sur lequel vient s'adapter un bouchon rôdé creux surmonté d'un tube capillaire et d'une ampoule de garde.

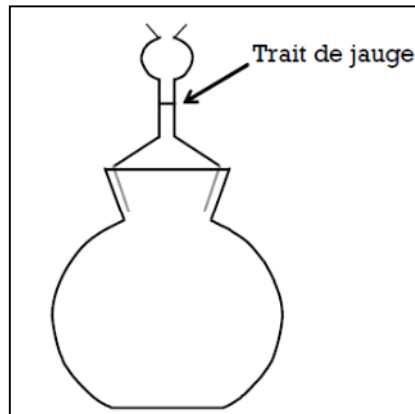


Fig. V .5: Pycnomètre de laboratoire utilisé

V. 2.1.2- Principe de mesure la masse volumique d'un solide

Il faudra **peut-être** veiller à utiliser un pycnomètre à col large. On réalise les trois pesées suivantes:

- pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge et le solide à côté: M_1
- pycnomètre contenant le solide et rempli d'eau jusqu'au trait de jauge: M_2
- pycnomètre rempli d'eau jusqu'au trait de jauge: M_e

La masse du solide s'obtient par différence : $m_s = M_1 - M_e$

La masse d'eau occupant le même volume s'exprime par: $m_e = M_1 - M_2$

L'expression de la masse volumique du solide est donc donnée par :

$$\rho = \frac{m_s}{m_e} \cdot \rho_l = \frac{M_1 - M_e}{M_1 - M_2} \cdot \rho_l \quad (I\ V.1)$$

ρ_s : La masse volumique du solide

ρ_l : La masse volumique du liquide utilisé

IV.3- Observation sous microscope électronique

IV.3.1- L'étude au Microscope Electronique à Balayage (MEB)

Le pouvoir séparateur d'un microscope optique (son grossissement) est limité par la longueur d'onde de la lumière visible; aucun détail de dimension supérieure à $0,2\ \mu\text{m}$ ne peut être observé. Aussi l'utilisation de particules accélérées de plus courte longueur d'onde associée permet d'augmenter le grossissement. Le choix d'électrons accélérés, pour produire un rayonnement de courte longueur d'onde est déterminé par plusieurs critères:

- La faible masse de ces particules qui peuvent être accélérées et focalisées au moyen de champ électronique ou magnétique,
- Une source d'électrons est aisée à mettre en œuvre,
- Les électrons sont plus facilement focalisés que les particules plus lourdes,
- L'interaction des électrons avec la matière est plus faible que pour des particules plus lourdes.

IV.3.2- Principe de fonctionnement du MEB

Le MEB permet d'obtenir des images de surface pratiquement de tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe ($\times 10$) à celle du microscope électronique en transmission (500.000 ou plus). Ces images mettent en valeur en premier le faisceau d'électrons réémis par le relief et la grande profondeur du champ.

Le MEB à pression contrôlée (dit environnemental) permet l'observation dans un vide allant jusqu'à 30 bars, rendant ainsi possible l'examen d'échantillons qui peuvent supporter le vide sans le polluer [11].

IV.3.2.1-Fonctionnement simplifié

L'image est une reconstitution: une sonde envoie faisceau d'électrons qui balaye la surface de l'échantillon, un détecteur récupère de manière synchrone induit par cette sonde pour en former une image cartographique de l'intensité de ce signal. Le MEB est constitué d'une source d'électrons et d'un jeu de lentilles "condenseur" qui focalise sur un diaphragme.

Une deuxième lentille "objectif" refocalise ce faisceau sur l'échantillon en un spot très fin ($<15\ \text{à}\ 200\ \text{\AA}$). Un jeu de bobines de déflexion permet de déplacer le faisceau et donc de balayer l'échantillon.

L'agrandissement est déterminé par le rapport entre la surface balayée sur l'échantillon (un rectangle de dimension variant entre quelques mm et une fraction de micromètres de côté), et la dimension du document final sur l'écran d'observation [11].

Système de fixation:

Une fois préparé correctement, l'échantillon doit être introduit dans la chambre objet du microscope et fixé sur un support adéquat [11].

La nature du support et la manière à fixer sur ce support dépend à la fois de la nature de l'échantillon et du type d'observation et/ou d'analyse.

Dans le cas d'une observation topographique d'un échantillon massif, la méthode la plus courante est de le coller sur un porte échantillon à l'aide d'une laque conductrice (laque à l'argent ou au carbone) ou éventuellement d'un ruban adhésif double face [11].

La figure ci-dessous montre les éléments qui constituent le MEB.

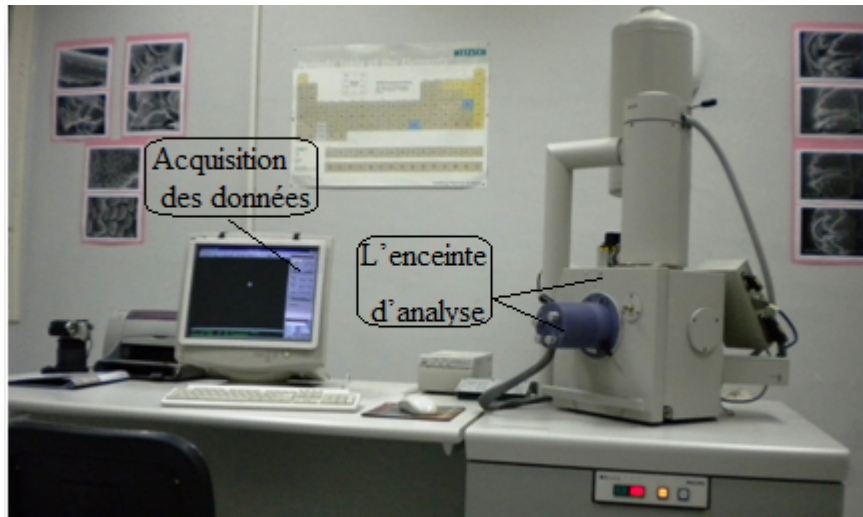


Fig. IV. 6 : Les organes essentiels du MEB

IV.4- Béton de fibre

IV.4.1- Présentation de la matière première

IV.4.1.1- Renfort

La matière première associée au plumage de volaille a été récupérée auprès de l'abattoirs de la région de BORDJ –MENAIL.

Pourcentage des fibres

Pour réaliser les éprouvettes en mortier renforcées de fibres nous avons procédé à des pesées de fibres pour avoir des pourcentages massiques à utiliser en fonction de la composition de la matrice en mortier. Dans cette étude, la plage de pourcentage massique retenu est faible, il varie de 0,04 à 0,69 %.

IV.4.1.2- La matrice

La matrice contenant ces fibres est un micro béton (mortier) ordinaire ne contenant pas de gravier. Il est composé essentiellement de ciment, sable et de l'eau.

IV.4.1.2.1- Formulation du mortier

La méthode de la formulation d'un béton ou d'un mortier consiste à déterminer le mélange optimal des différents granulats, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin d'obtenir le béton avec les caractéristiques adaptées à l'ouvrage.

La méthode pratique permettant de déterminer la composition des bétons est la méthode de **Dreux-Gorisse**. Cette méthode permet de définir de façon simple et rapide une formule de composition adaptée au béton étudié. Afin d'obtenir la meilleure formule, il sera nécessaire de réaliser des essais d'affaissement et de résistance. A la suite de ces essais, il sera éventuellement nécessaire d'effectuer certaines modifications [14].

- **Méthode de Dreux-Gorisse**

Résistance souhaitée

Soit f_{c28} la résistance en compression souhaitée à 28 jours. En tenant compte des dispersions et des écarts quadratiques, on adoptera la règle approximative pour la résistance moyenne à viser majorée de 15 % à 20%:

$$f_c = f_{c28} + 20\% \quad (IV.2)$$

Dosage en ciment nécessaire

On évalue approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne souhaitée f_c qui est estimée par la relation suivante:

$$f_c = G * \sigma'_c * (C/E - 0,5) \quad (IV.3)$$

f_c : résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa

σ'_c : Classe de résistance du ciment (MPa) 32,5 ; 42,5 ; 52,5 MPa

C : dosage en ciment (en kg/m³).

E : dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1 m³)

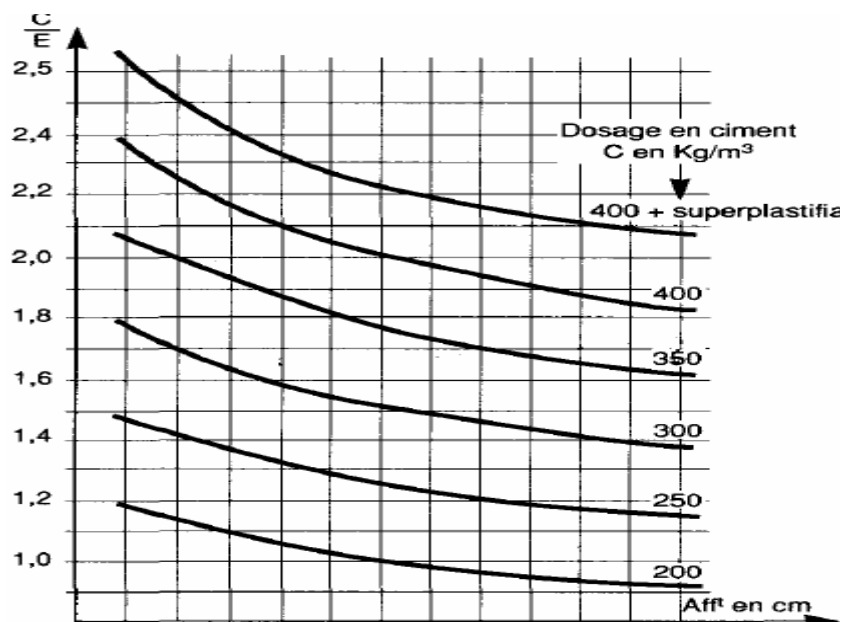
G : coefficient granulaire.

Dans le tableau qui suit nous donnons les valeurs approximatives du coefficient granulaire G, en supposant que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions, par vibration, en principe.

Tableau. IV.1- Valeurs approximatives du coefficient granulaire G

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins (D ≤ 16 mm)	Moyens (20 ≤ D ≤ 40 mm)	Gros (D ≥ 50 mm)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Afin de déterminer le dosage en ciment, il faut utiliser l'abaque de la figure IV.7 permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée [14].

**Fig.IV.7:** Dosage en ciment en fonction de C/E et de l'affaissement

Dosage en eau

Ayant évalué le dosage en ciment C et le rapport C/E, il est plus facile de connaître approximativement le dosage E en eau totale. En fonction de la dimension maximale D des granulats, il sera nécessaire d'appliquer une correction sur le dosage en eau totale, donnée par le graphique de la figure IV.8 ci-dessous [14].

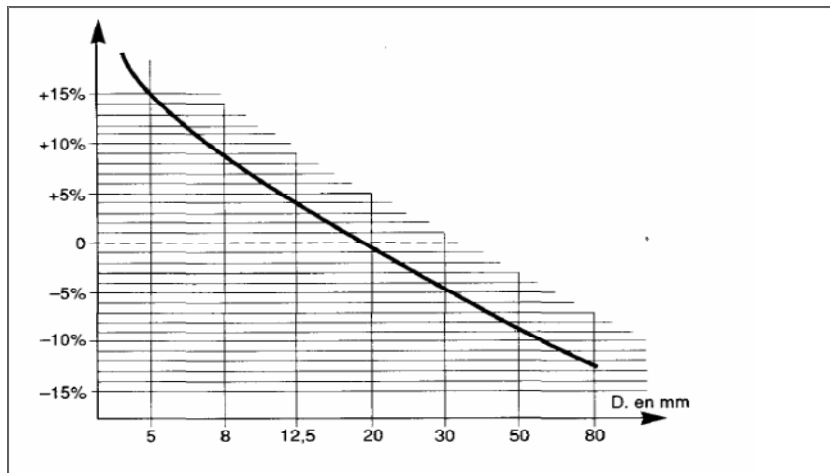


Fig.IV.8 : Correction sur le dosage en eau

Dosage des granulats

Tracé de la courbe granulaire de référence

Sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR, on trace une composition granulaire de référence **O A B**.

Point **B**: ordonnée : 100%, abscisse : dimension **D** du plus gros granulat

Point **A**: Abscisse :

Si $D < 20$ mm, l'abscisse sera égale à $D/2$

Si $D > 20$ mm, l'abscisse sera située au milieu du segment gravier limité par la dimension de tamis 5 mm

$$\text{Ordonnée : } Y = 50 - \sqrt{D + K} \quad (\text{IV.4})$$

K : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés et également du module de finesse du sable [14].

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs du coefficient de correction **K** obtenus pour différents dosages de ciment.

Tableau. IV. 2 : Terme correcteur K [14].

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400 + Superplastifiant	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6
Nota 1 : Correction supplémentaire K_s : si le module de finesse du sable est fort (sable grossier) une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6 Mf - 15$ (Mf étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2,5 pour laquelle la correction préconisée est alors nulle). Nota 2 : Correction supplémentaire K_p : si la qualité du béton est précisée « pompable » il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courante ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur $K_p = + 5$ à $+ 10$ environ, selon le degré de plasticité désiré.							

Coefficient de compacité

Le coefficient de compacité γ est défini comme le rapport du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) en mètre cube, réellement contenues dans un mètre cube de béton frais en œuvre.

Tableau. IV. 3 : Coefficient de compacité

Consistance	Serrage	γ coefficient de compacité						
		D = 5	D = 10	D = 12,5	D = 20	D = 31,5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,730	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855
Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes : - sable roulé et gravier concassé = - 0,01, - sable et gravier concassé = - 0,03.								

La courbe granulaire OAB de référence est tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats, en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point 5% de la courbe du granulats suivant. On lira alors sur la courbe de référence, au point de croisement avec les droites de partage, le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats.

Le volume absolu des grains de ciment c est tel que :

$c = C/3,1$ (3,1 étant la masse spécifique admise pour les grains de ciment).

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est:

$$V = 1000\gamma - c$$

On en déduit alors le volume absolu de chacun des granulats ainsi que les masses spécifiques de chacun des granulats [14].

IV.4.1.2.2- Choix et propriétés des constituants

a) Le ciment

Nous avons utilisé pour tous nos mélanges, un seul type de ciment: c'est un CEM II provenant de la cimenterie de LAFARGE d'Alger, norme NA442 dont l'ajout principal est le calcaire. Ses différentes propriétés chimiques et minéralogiques sont données dans les tableaux suivants :

Tableau IV. 4 : Analyse chimique du Clinker (NA 5042).

Eléments	Teneur (%)
Perte au feu	8-10
Résidus insolubles	0,7-1,5
Teneur en sulfate	2,1-2,5
Teneur en oxyde de magnésium	1-1,3
Teneur en chlorure	0,01-0,03

Tableau IV. 5 : Composition minéralogique du Clinker (NA 5042).

Eléments	Abréviation	Teneur
Silicate tricalcique	C ₃ S	55-62
Silicate bi calcique	C ₂ S	13-22
Aluminate tricalcique	C ₃ A	6,5-8,2
Alumino-ferrite tétra calcique	C ₄ AF	10-13

b) Le sable

Les granulats alluvionnaires, dits roulés, ont une forme arrondie due à l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension.

c) L'eau

L'eau est des ingrédients essentiels du mortier. L'eau ne doit contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles [14].

L'eau utilisée dans notre cas est l'eau potable du robinet provenant de la source du barrage de TAKSEBT qui alimente notre laboratoire.

d) Le fluidifiant

Le fluidifiant utilisé est de nature polynaphtalène sulfoné. Par définition, les adjuvants sont des produits dosés en faible quantité dans les bétons, moins de 5% de la masse de ciment. Ce sont souvent des composés organiques, spécialement formulés pour les applications béton, et disponibles commercialement sous forme de solutions aqueuses. Ils ont pour but d'améliorer certaines propriétés du matériau. C'est surtout la rhéologie du béton frais et la cinétique de prise et de durcissement que l'on peut espérer modifier directement.

Sur la base de différents paramètres de composition retenus, nous avons choisi pour notre étude les constituants suivants:

- un ciment de type **CPJ-CEM II/A 42,5 R**,
- un sable fin (roulé **0/0,05 mm**),
- un sable moyen (roulé **0,05/1,6 mm**),
- un sable gros (roulé **1,6/0,5 mm**),
- une eau du robinet,
- fibres de plumes de dinde.

IV.4.2- Fabrication des corps d'éprouvettes

Le remplissage des moules en acier se fait en deux ou trois couches successives suivant les dimensions des moules, jusqu'à un remplissage uniforme.

Une table vibrante a servi à mettre les mélanges en place dans des moules. La finition de la surface est effectuée à l'aide d'une règle métallique. Après mise en place du mélange dans les moules, ils sont laissés pendant 24 heures dans la salle de fabrication. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées.

Les différents corps d'épreuves sont :

Eprouvettes cylindriques 10 × 20 cm

Les éprouvettes cylindriques réalisées avec ces moules **10×20 cm**, dont les extrémités ont été préalablement rectifiées, sont utilisées pour l'essai d'écrasement en compression simple.



Fig. IV.9: Moules pour éprouvettes cylindriques 10×20 cm

Ce type d'éprouvette a été conçu pour la détermination de la résistance à la compression à 14 et 28 jours, des mortiers utilisés dans notre recherche.

Eprouvettes prismatiques 4 × 4×16 cm

Les éprouvettes réalisées avec ces moules prismatiques **4×4×16 cm**, sont utilisées pour l'essai de flexion trois points.



Fig. IV.10 : Moule prismatique 4 × 4×16 cm

IV.5- Essais sur les matériaux composites

De nombreux essais mécaniques sont définis par des normes pour déterminer les caractéristiques des matériaux renforcés ou non.

Machine d'essai de compression et flexion trois points

La machine d'essai est une presse hydraulique **Ibertest** de 200 KN force maximale et d'une vitesse d'écrasement qui vaut 10 KN /s. La charge de rupture, est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.



Fig. IV.11: Machine utilisée dans les essais de compression et flexion.

- Essais de flexion

L'essai de flexion est très souvent pratiqué pour mesurer des caractéristiques mécaniques d'un matériau, telles que le module de Young, la résistance en flexion et la flèche maximale.

Essai de flexion trois points

Le principe de cet essai consiste à déformer une éprouvette rectangulaire reposant sur deux appuis, par l'intermédiaire d'une poutre située à égale distance des appuis et se déplaçant à une vitesse constante.

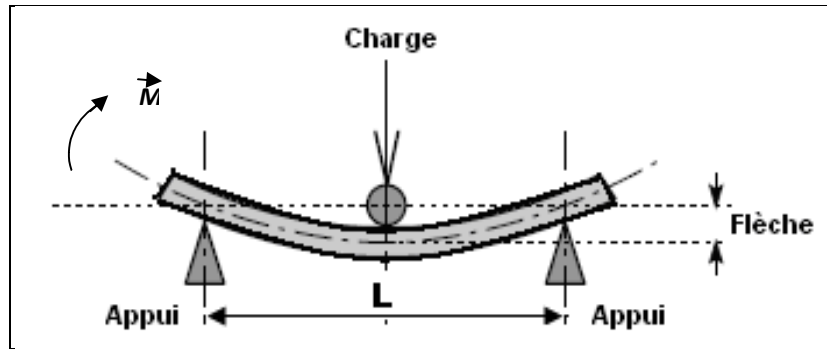


Fig. IV.12: Epreuve de flexion [35].

La valeur de la contrainte à la rupture d'une éprouvette à section rectangulaire, La flèche maximale et le module d'élasticité E sont obtenus par le calcul suivant :

Soit une poutre de longueur L, de section constante, de hauteur h et de moment d'inertie I, qui supporte en son milieu une charge P (figure IV.12).

• **Effort tranchant (T) :**

$$\text{Entre A et M : Si } 0 < x < \frac{L}{2}, \quad T = -\frac{P}{2}$$

$$\text{Entre M et B : Si } \frac{L}{2} < x < L, \quad T = -\frac{P}{2} + P = \frac{P}{2}$$

• **Moment fléchissant (M) :**

$$\text{Entre A et M : Si } 0 < x < \frac{L}{2}, \quad M_f = -\frac{P \cdot x}{2}$$

$$\text{Entre M et B : Si } \frac{L}{2} < x < L, \quad M_f = \frac{P \cdot x}{2} - P \cdot \left(x - \frac{P}{2}\right) = -\frac{P}{2}(L - x)$$

Le moment fléchissant est au maximum au milieu de la poutre ($x = \frac{L}{2}$)

$$\text{Donc : } M_{\max} = \frac{P \cdot L}{4} \quad (\text{IV.5})$$

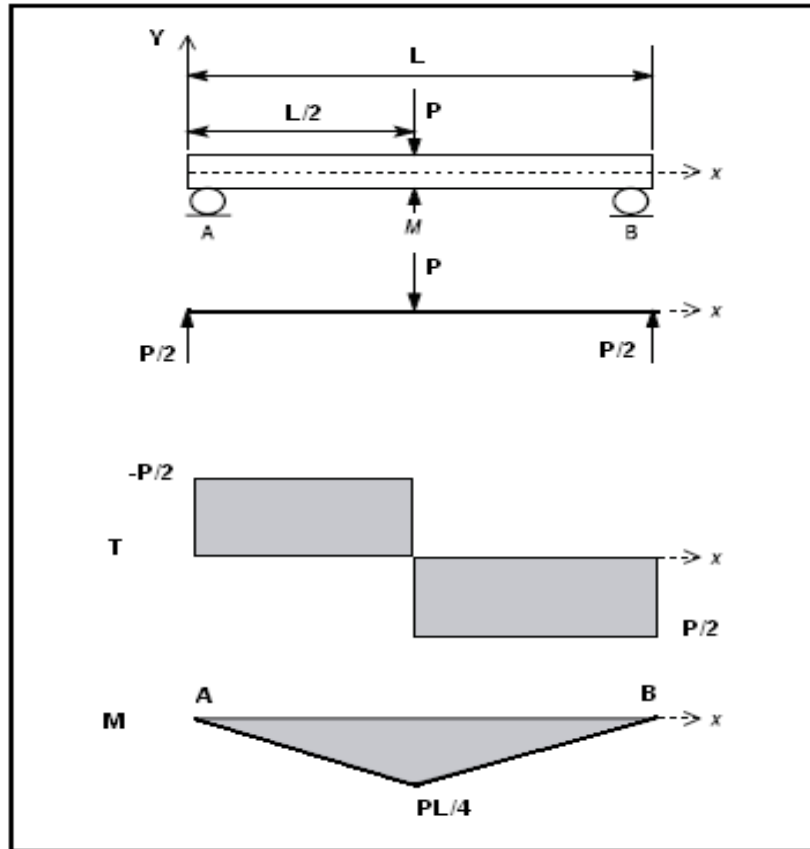


Fig. IV.13: diagramme de l'effort tranchant T et du moment fléchissant M [34].

Calcul de la flèche :

On sait que $Y'' = -\frac{M_f}{EI}$ (IV.7)

Entre A et M : Si $0 < x < \frac{L}{2}$, $M_f = -\frac{P \cdot x}{2}$

Donc $EIY'' = -M_f = \frac{P \cdot x}{2}$

La première intégration donne :

$$EIY' = \frac{P}{4} \cdot x^2 + C_1 \quad \text{(IV.8)}$$

La flèche est à son maximum pour : $x = \frac{L}{2}$

Ce qui donne : $Y' = 0$ alors :

$$E \cdot I \cdot Y' = \frac{P}{4} \cdot x^2 + C_1 = 0$$

$$D'où \quad C_1 = -\frac{P \cdot L^2}{16}$$

$$E \cdot I \cdot Y' = \frac{P \cdot x^2}{4} - \frac{P \cdot L^2}{16} \quad (IV.9)$$

En intégrant pour la deuxième fois :

$$E \cdot I \cdot Y = \frac{P \cdot x^3}{12} - \frac{P \cdot L^2}{16} \cdot x + C_2 \quad (IV.10)$$

Pour $x=0$, $Y=0$ donc $C_2=0$

L'équation de la déformée est donc

$$Y = -\frac{1}{E \cdot I} \left(\frac{P}{12} \cdot x^3 - \frac{P \cdot L^2}{16} \cdot x \right)$$

La flèche maximum est donnée par la relation (V.11), pour $x = \frac{L}{2}$:

$$Y_{\max} = -\frac{1}{E \cdot I} \left(\frac{P}{12} \times \frac{L^3}{8} - \frac{P \cdot L^2}{16} \times \frac{L}{2} \right)$$

$$Y_{\max} = \frac{P \cdot L^3}{48 E \cdot I} \quad (IV.11)$$

Avec I représente le moment quadratique. Il est donné, pour une section rectangulaire, par la relation suivante :

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

D'où le module de Young qui est donné par la relation suivante :

$$E = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot I \cdot Y_{\max}} = \frac{P \cdot L^3}{4b \cdot h^3 \cdot Y_{\max}} \quad (\text{IV.12})$$

avec :

- P : charge à rupture
- b : largeur de l'éprouvette
- h : l'épaisseur de l'éprouvette
- L : distance entre les appuis
- Y : flèche.

• La contrainte

La contrainte normale σ en un point p d'une section droite (s) est proportionnelle à la distance y entre ce point et le plans moyen passant par G (figure IV.14). Elle est donnée par la relation suivante [34] :

$$\sigma = \frac{M_f \cdot y}{I} \quad (\text{IV.12})$$

Avec :

$$M = \frac{P \cdot L}{4} \quad \text{et} \quad I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

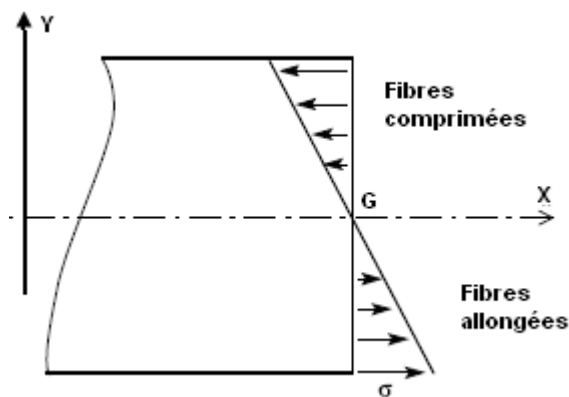


Fig.IV.14: Diagramme de la contrainte normale [34].

La contrainte est maximale à la périphérie de la section (s), $y = \frac{h}{2}$

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (\text{IV.14})$$

On notera que pour une sollicitation en flexion trois points, l'effort tranchant engendre non seulement des contraintes normales de traction-compression, mais également des contraintes de cisaillement τ , avec une répartition parabolique (figure IV.10).

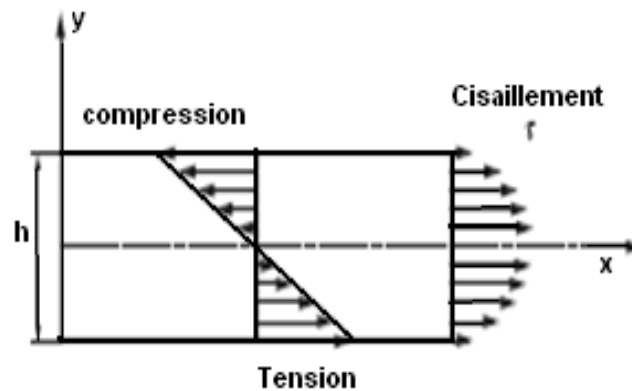


Fig. IV.15: Répartition des contraintes normales et inter laminaires en flexion trois points

$$\tau_{xy} = \frac{3P}{4bh^3} (h^2 - 4y^2)$$

La contrainte maximum $\tau_{\max}$ est observée sur le plan de symétrie de l'éprouvette (axe neutre).

Donc pour $y = 0$: $\tau_{\max} = \frac{3}{4} \frac{P}{b \cdot h} \quad (\text{IV.15})$

Module de cisaillement en flexion :

$$G_{xy} = \frac{E}{2(1 + 2\nu)} \quad (\text{IV.16})$$

IV.5.3 -Essais de compression

Définition de la compression simple

Une poutre est sollicitée à la compression simple lorsqu'elle est soumise à deux forces directement opposées, appliquées au centre de surface des sections extrêmes et qui tendent à la raccourcir (voir figure IV.16).

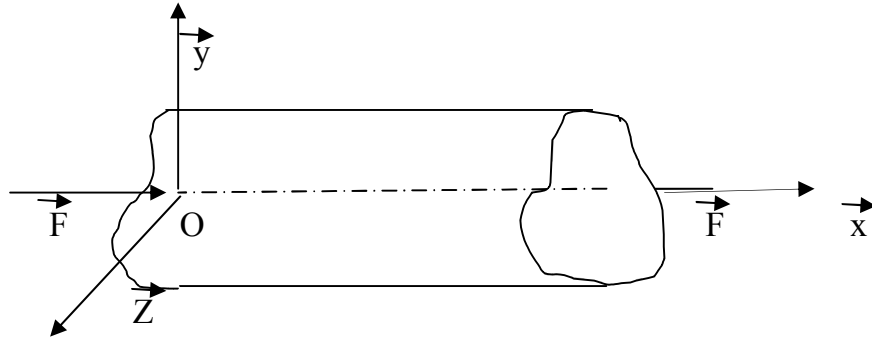


Fig. IV.16:Une poutre soumise à deux forces opposées

Dans le repère de définition des sollicitations $R = (G, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ lié à la section droite (S), les éléments de réduction en G du torseur des efforts de cohésion s'expriment [29].

$$(IV.17) \quad \left\{ \begin{matrix} \tau_{co} \\ \sigma \end{matrix} \right\}_G = \left\{ \begin{matrix} \vec{x} = N \\ \vec{o} \end{matrix} \right\}_G = \begin{pmatrix} N & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{Avec } N < 0$$

$G \quad G \quad (\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$

Résultat de l'essai de compression

l'essai de compression montre qu'il existe une zone pour laquelle la contrainte est défini :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (IV.18)$$

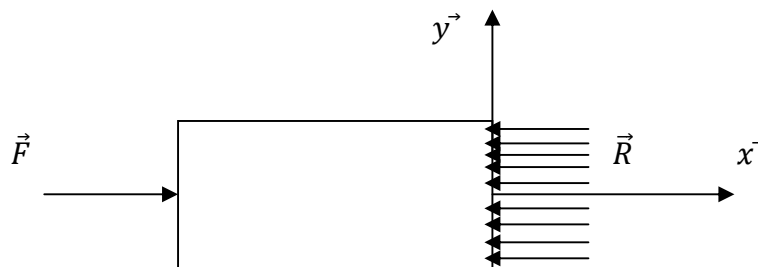


Fig. IV.17:contrainte normale [29].

D'autre part σ_e est la contrainte élastique en compression. Pour certains matériaux, cette contrainte est identique à l'extension (acier) pour d'autre elle peut être très différente (béton, fonte) [30].

Raccourcissement Δl d'une poutre de longueur l

D'après la loi de Hooke $\sigma_X = E \cdot \varepsilon_X$ avec $\sigma_X = \frac{N}{S}$ et $\varepsilon_X = \frac{\Delta l}{l}$, on peut écrire :

$$\Delta l = \frac{N.l}{E.S} \quad (\text{IV.19})$$

En compression : $\sigma_x < 0$; $\Delta l < 0$; $N < 0$.

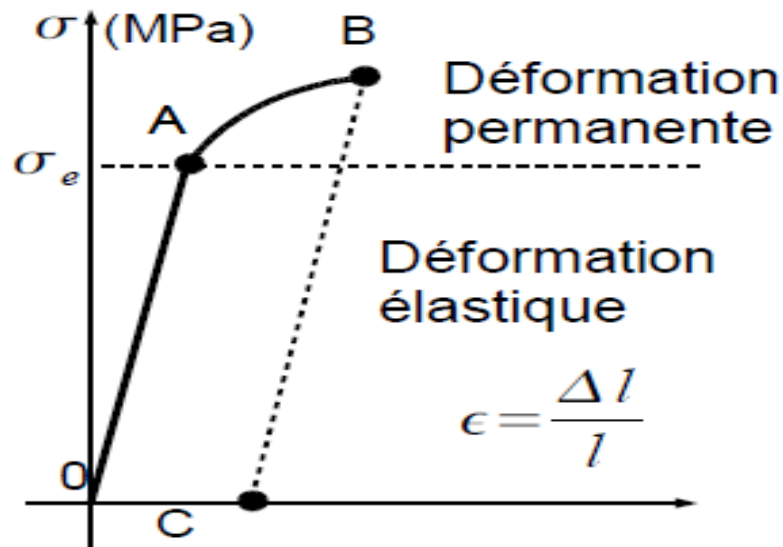


Fig. IV.18: Courbe contrainte- déformation de l'essai de compression [29].

IV.6- CT mètre

Le CTmètre, appareil de contrôle non destructif Thermique, a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les paramètres thermiques d'un certain nombre de matériaux, et de contrôler la production des matériaux isotropes et homogènes par prélèvements.

IV.6.1-Description de l'appareil

Une armoire à charnier en fibre de verre abrite les composants principaux de l'ensemble. La section de base de l'armoire contient le débitmètre thermique et la plaque froide, installée sur quatre ressorts. Cet ensemble est refroidi à l'aide d'eau à température stable de la manière à ce que la plaque soit sensiblement isothermique.

Le débitmètre thermique donne une sortie en millivolt, proportionnellement à la différence de température sur les deux surfaces. Le couvercle de l'armoire abrite la plaque chaude chauffée électriquement. Elle est contrôlée d'une manière électronique à une température de consigne et l'entrée de la température par voyant rouge clignotant. La plaque est levée et abaissée par le mécanisme à poignée à vise situé en haut de l'armoire.

Un indicateur à cardant dans la roue permet de déterminer le spécimen testé. Le mouvement de la plaque chaude permet d'utiliser des spécimens de l'épaisseur jusqu'à 75 mm. La plaque chaude est protégée par un interrupteur de haut température (70°C). Une isolation en mousse entoure l'ensemble de débitmètre thermique. une isolation similaire se trouve sur le couvercle, ainsi qu'un espace d'air stagnant autour de l'ensemble de la plaque chaude, pour empêcher la perte de chaleur [28].



Fig. IV.19: Le CT mètre

IV.6.2-Méthode d'essais

La taille des échantillons qui peuvent être utilisée avec méthode de mesure de conductivité pour un débitmètre thermique de 300×300 mm, le spécimen testé doit avoir des dimensions maximum de 75 mm d'épaisseur ×300×300mm.



Fig. IV.20 : Moule de dimension 300×300×1 mm

La résistance thermique soit entre 0,1 et 1,4 W/m³K. En général, plus le matériau utilisé est isolant, plus le spécimen devrait être mince, sinon la durée du test sera longue.

Des feuilles de caoutchouc en silicone sont utilisées pour des résistances inconnues ou d'une faible résistance thermique et aussi pour éliminer l'espace d'air entre le spécimen, la plaque chaude et la plaque froide [28].

Pour les spécimens granuleux, comme le sable et gravier une plinthe de bois est fournie pour y mettre le matériau. Il doit être placé dans la plinthe de 15 mm d'épaisseur pour lui donner une densité maximale, sinon le résultat ne sera pas précis à cause des espaces d'air entre les grains de sable.

IV.6.3-Méthode de calcul

On dit que les conditions de régime permanent sont obtenues lorsque 5 lectures consécutives à cet intervalle donnent des valeurs de résistance thermique d'une stabilité de 1% sans changer à chaque fois dans le même sens.

A chaque intervalle d'échantillonnage, noter les valeurs de T_1 et T_2 et de la sortie du débitmètre thermique. La température moyenne et la différence de température entre T_1 et T_2 sont calculées [28].

Selon que des tapis de caoutchouc au silicone sont utilisés ou non, la conductivité thermique peut être déterminée par l'équation lambda suivante :

$$\lambda = \frac{I \left[(k_1 + (k_2 * T)) + ((k_3 + (k_4 * T) * H F M) + ((k_5 + (k_6 * T)) * H F M)) \right]}{d T} \quad (IV.20)$$

avec

λ : Conductivité thermique

I_s : Epaisseur du spécimen en m

dT : Différence de température en C° ($T_1 - T_2$)

T : Température moyenne en C° ($(T_1 + T_2) / 2$)

HFM : Sortie de débitmètre (Heat Followmetr Reading) en mv.

T_1 : Température de la plaque chaude

T_2 : Température de la plaque froide

avec silicone :

$$k_1 = -30,7912$$

$$k_4 = -0,0055$$

$$k_2 = 0,6087$$

$$k_5 = 0,0132$$

$$k_3 = 3,3452$$

$$k_6 = 0,0004$$

sans silicone :

$$k_1 = -12,7377$$

$$k_4 = -0,0459$$

$$k_2 = 0,2364$$

$$k_5 = 0,0567$$

$$k_3 = 3,3452$$

$$k_6 = -0,0007$$

Chapitre V
Résultats et discussion

Dans ce chapitre, nous allons traiter les résultats expérimentaux obtenus avec les essais sur les éprouvettes en mortier renforcé par des fibres de plumes de volaille.

V.1- Détermination de la masse volumique par pesée et pycnomètre

V.1.1- Plume de dinde

Afin de calculer la masse volumique, 5 échantillons de différentes parties de la plume de dinde ont été utilisés: le calamus, le rachis et les fibres de plume (barbes et barbules).

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau ci-dessous. Le tableau V.1 représente alors les valeurs des masses mesurées (M_2 , M_1 et M_e) pour déterminer et calculer la masse volumique.

Tableau V.1 : Les valeurs des masses mesurées (M_2 , M_1 et M_e) des échantillons de plume.

	Masse	M_e	M_1	M_2
Plume 1	Barbes	43,7300	43,8500	43,7700
	Calamus	48 ,6646	49 ,1142	48 ,7591
	Rachis	48 ,6540	48 ,9196	48 ,0600
Plume 2	Barbes	43,7600	43,8600	43,7600
	Calamus	48 ,6268	49 ,1740	48 ,7015
	Rachis	48 ,6411	48 ,9317	47 ,9730
Plume 3	Barbes	43,7600	43,9000	43,7600
	Calamus	48 ,6306	48 ,9156	48 ,6845
	Rachis	48 ,6317	48 ,8403	48 ,0376
Plume 4	Barbes	43,7400	43,8900	43,7700
	Calamus	48 ,6443	48 ,9182	48 ,6415
	Rachis	48 ,6350	48 ,7848	48 ,2150
Plume 5	Barbes	43,7300	43,8800	43,7500
	Calamus	48 ,6518	48 ,8630	48 ,6495
	Rachis	48 ,6411	48 ,8353	48 ,0485

Tableau de masse volumique obtenue pour chaque échantillon**Tableau V.2:** La masse volumique des échantillons de plume.

	Fibres (g/cm³)	Calamus (g/cm³)	Rachis (g/cm³)
Plume 1	1,1850	1,26612	0,30898
Plume 2	0,7900	1,15809	0,30311
Plume 3	0,7900	1,98988	0,26289
Plume 4	0,9875	1,23323	0,25987
Plume 5	0,9115	1,98922	0,24682
Moyenne	0,9328	1,13	0,28

Nous remarquons que la masse volumique du **Calamus** est plus élevée que celle de l'eau. Pour notre étude la masse volumique des fibres est égale à **0,93 g/cm³**.

V.1.2- Sable

Pour déterminer la masse volumique du sable, trois quantités différentes de chaque sable ont été utilisées pour mesurer les différentes masses (**M₂**, **M₁** et **M_e**).

Tableau V.3: Les valeurs des masses mesurées (**M₂**, **M₁** et **M_e**) des trois types de sable.

	Masse	M_e (g)	M₁(g)	M₂ (g)
Sable gros	SG 1	1488,2	1737,8	1647,1
	SG 2	1488,1	1735,7	1647
	SG 3	1489,8	1740,2	1646,7
Sable moyen	SM 1	1490,5	1739,9	1647,3
	SM 2	1490,3	1740,3	1647,2
	SM 3	1490,2	1741,5	1649
Sable fin	SF 1	1491,5	1741,5	1648,5
	SF2	1491,5	1740,5	1648
	SF 3	1492	1742	1650

Dans le tableau qui suit nous reportons les valeurs de la masse volumique des trois sables:

Tableau V.4: La masse volumique des trois sables.

	SG	SM	SF
Masse volumique (g/cm ³)	2,73	2,69	2,69

Ces masses volumiques déterminées expérimentalement sont par la suite utilisées pour calculer la masse du sable composant notre mortier.

V.2-Observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB)

Le **MEB** permet de montrer la structure et la morphologie détaillée des différentes parties constitutives de la plume: le rachis, le duvet, les barbes, les barbules et le calamus. Il nous a permis également de voir la structure de notre composite (béton de fibres de volaille).

V.2.1-Observation des parties constitutives de la plume

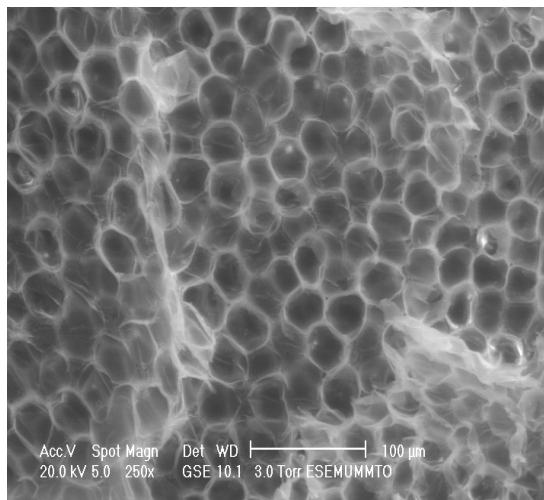


Fig. V.1: Coupe transversale du rachis observée au MEB

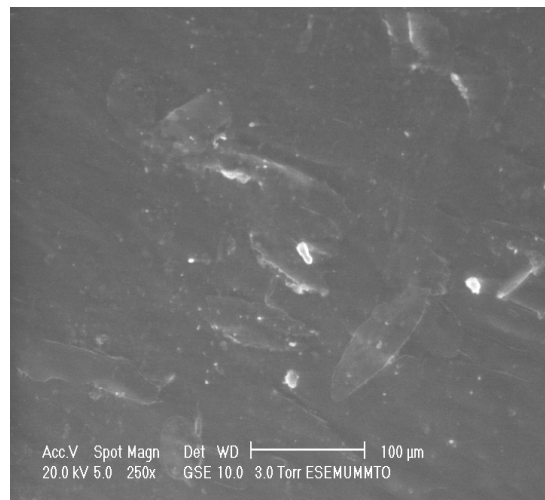


Fig. V.2: Coupe de la face extérieure du Calamus observée au MEB

La figure V.1 montre que le rachis a une forme en nid d'abeilles avec des cellules creuses dans la section transversale. La présence de cette structure permet au rachis d'avoir un poids léger combiné à sa capacité isolante. Quant au Calamus, il présente une structure cristalline qui est la partie lumineuse observée dans la figure V.2.

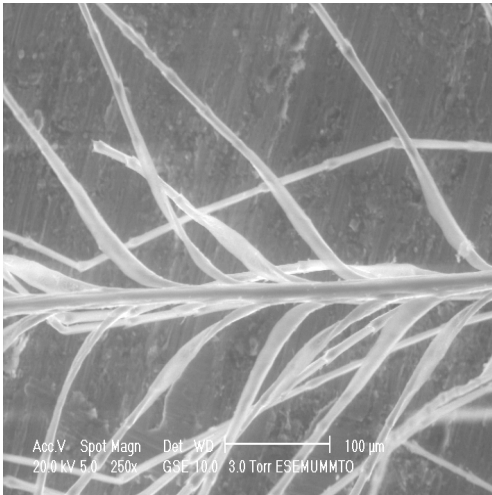


Fig. V.3: Duvet observé au MEB

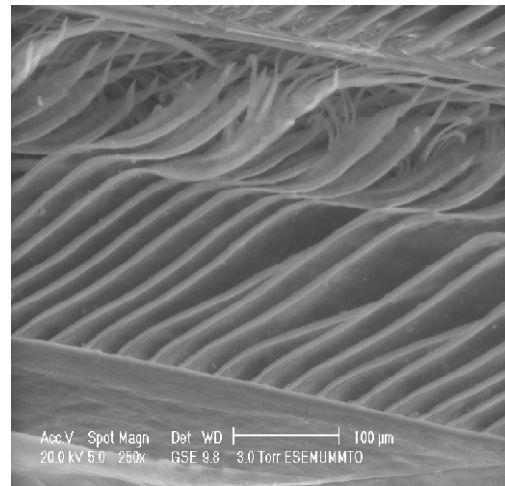


Fig. V.4: Plume côté rachis observée au MEB

Les fibres dans le duvet et dans la plume observées au MEB montrent des structures différentes. Les fibres de la plume sont parallèles entre elles et uniformes. La figure V.4 montre que les barbes sont plus épaisses que les barbules. Par contre, elles sont sous forme d'étoile, ce qui aide le duvet à emprisonner les bulles d'air lui conférant ainsi son caractère d'isolant.

V.2 .2- Observation du composite mortier-fibres

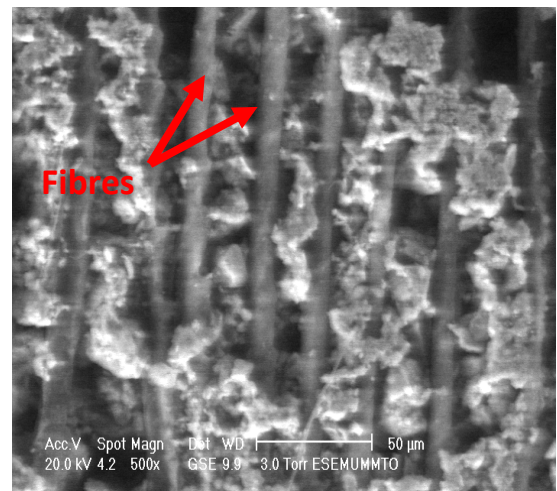


Fig.V.5: Mortier renforcé de fibres + paraffine observée au MEB

Le mortier de fibre +paraffine observé au MEB montre une faible adhésion entre les fibres.

V.3- Composition du béton

V.3.1- Données de base

- Il s'agit d'un sable roulé très propre et de bonne qualité. Nous pourrions admettre un coefficient granulaire $G=0,45$ (tableau 4). Nous désirons donc obtenir une résistance moyenne $f_{c28}=25\text{MPa}$ d'où $f_c=30\text{MPa}$.
- Le ciment est un **CPJ-CEM II/A 42,5 R**, dont la classe vraie moyenne à 28 jours est de 52 MPa utilisé dans le but d'obtenir un mortier bien plastique avec un affaissement de 7 cm.

V.3.2- Dosage des constituants du béton

a) Dosage en ciment

On doit avoir : $40=0,45*52$ (C/E =0,5)

D'où:

$$\boxed{C/E=1,8}$$

Sur l'abaque de la figure V.7, pour $C/E=1,8$ et affaissement =7 cm, un dosage de 360 kg/m^3 .

b) Dosage en eau

Avec un $C/E=1,8$, on aurait un dosage en eau totale d'environ $360 / 1,8=200\text{l}$. La figure 6 indique que le dosage normale en eau pour $D=5\text{mm}$ doit être majoré de **15%**. Nous aurons donc $E=1,15*184=230 \text{ l}$

$$\boxed{E=230 \text{ l}}$$

D'où dosage en ciment est de $C=230*1,8=414\text{kg /m}^3$.

$$\boxed{C=414\text{kg /m}^3}$$

c) Dosage du sable

Courbe de référence

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K$$

K est choisi dans le tableau V.6: pour une vibration normale, des granulats roulés et un dosage en ciment de 414 kg/m^3 nous obtenons donc $K= -2$

Correction de k

- Module de finesse du sable 0/5

Le module de finesse M_f d'un sable est égal au $1/100^e$ de la somme des refus, exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivantes: **0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5** et **5mm**.

Tableau .V. 5: Dimensions nominales des tamis pour le sable 0-5

Tamis en (mm)	Refus en (gr)	Refus cumulés en (gr)	Refus cumulés en (%)	tamisât cumulés en (%)
5	88	88	5,87	94,13
2,5	246	334	22,27	77,73
1,25	375,5	709,5	47,30	52,70
0,63	427	1136,5	75,77	24,23
0,315	170	1306,5	87,10	12,90
0,16	148,5	1455	97,00	3,00
0,08	37	1492	99,47	0,53
Fond	8	1500	100,00	0,00
module de finesse			3,35	

Le M_f retrouvé est de 3,35 indiquant que le sable est un peu grossier.

D'après le tableau V.2, le terme correcteur K_s est de $6 \times 3,35 - 15 = 5$,

$$Y = 50 - \sqrt{5} - 2 + 5 = 51 \%$$

X est au milieu du segment sable, de 0 à 5 mm, soit à 2,5 mm.

Tableau V.6: Courbe de référence

selon X	selon Y
0,08	0
2,5	51
5	100

Le tracé des lignes de partage donne les proportions de sable suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2 \text{ } 0\% \text{ du sable fin} \\ 1 \text{ } 0\% \text{ du sable moyen} \\ 5 \text{ } 8\% \text{ du sable gros} \end{array} \right.$$

Expliqué dans la figure ci-dessous :

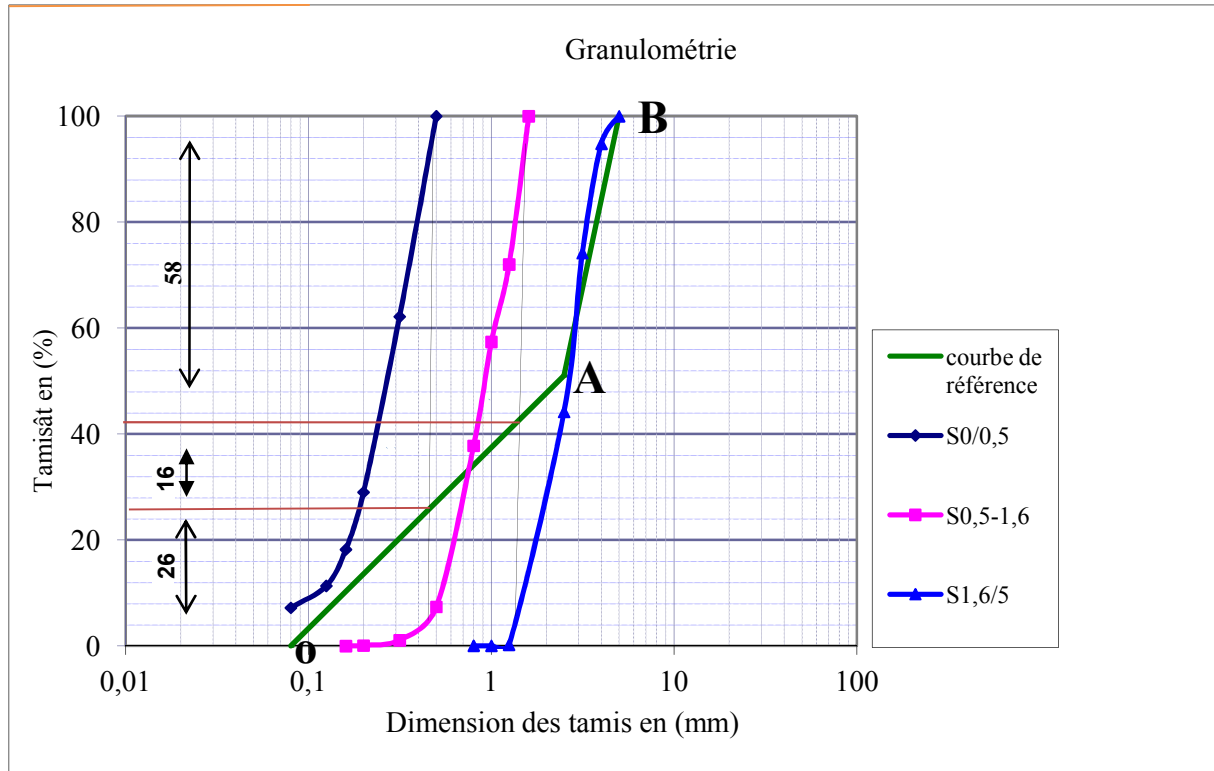


Fig. V.6: Granulométrie

A partir de cette courbe nous remarquons que la fraction dominante est celle du sable gros à 58% suivie de celle à sable fin qui représente 26% puis la dernière fraction qui est celle du sable moyen à 16%. La masse des fibres pour chaque pourcentage est donnée sur le tableau ci-dessous :

Tableau. V.7: La masse des fibres pour chaque pourcentage

La quantité en %	La masse(Kg)
0,04	0,856
0,07	1,497
0,14	2,994
0,42	8,983
0,69	14,759

- **La masse des composants du béton**

En adoptant, dans le tableau V.8, un coefficient de compacité $y=0,77$, la masse des composants sera:

Tableau. V.8: Composition des mélanges pour le volume 1 m³

	MT	MF 0,04%	MF 0,07%	MF 0,14%	MF 42%	MF 69%
Eau (Kg)	230	230	230	250	260	270
Ciment (Kg)	414					
Sable fin (Kg)	4 4					
Sable moyen (Kg)	2 7					
Sable gros (Kg)	1 0 0					
Fluidifiant (Kg)	20,7					

VI.3- Caractérisation mécanique du matériau composite

VI.3.1 -Résistance à la compression

Les résultats de la caractérisation des mélanges sont obtenus dans le but de générer un ensemble d'informations suffisamment riche pour permettre de relier la composition du béton avec ses performances. Le résultat d'un essai (ou une mesure) est la moyenne de trois valeurs issues d'une même gâchée.

**Fig. V.7:** Epreuve en compression simple

V.3.1.1- Courbes individuelles

Tout d'abord, nous reproduisons ci-dessous les courbes contraintes-déformations associées à la matrice seule ainsi qu'aux autres composites. Ensuite nous comparerons, via la superposition, les différents comportements mécaniques en vue de tirer des conclusions utiles.

- **Mortier seul**

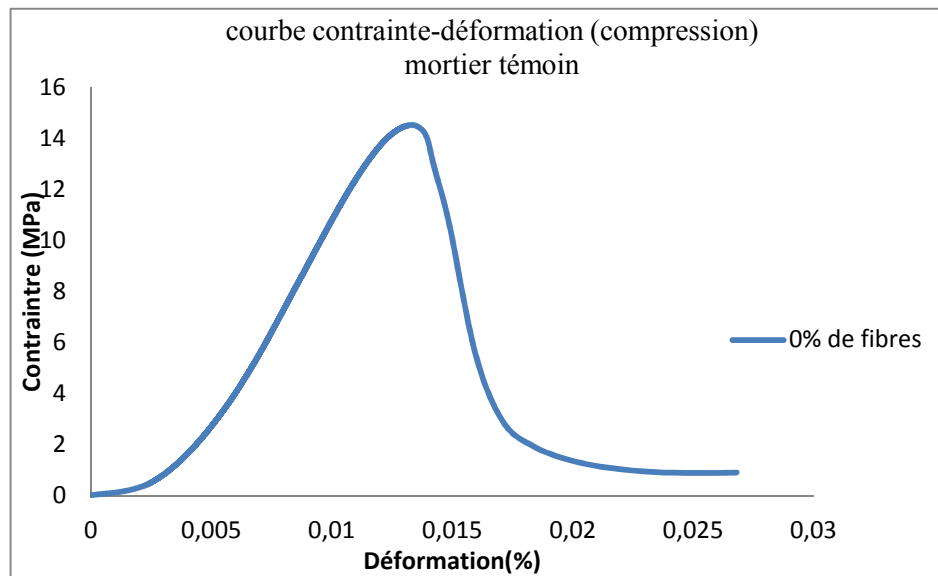


Fig. V.8: Courbe contrainte-déformation associée au mortier témoin

- **Comportement en compression du composite mortier de fibre**

Afin de pouvoir illustrer l'influence du "renfort" (fibres) sur le mortier, nous avons caractérisé les différents composites réalisés par des essais de compression sur des éprouvettes normalisées. Les caractéristiques mécaniques enregistrées durant ces essais sont résumées dans les tableaux V.8 et V.9.

Evolution des courbes contrainte-déformation des différents composites à vitesse de sollicitation fixée ($v = 10 \text{ mm/mn}$)

Composite Mortier-0,04% fibres

La figure représentée ci-dessous présente le comportement mécanique du composite **mortier avec 0,04% fibres**.

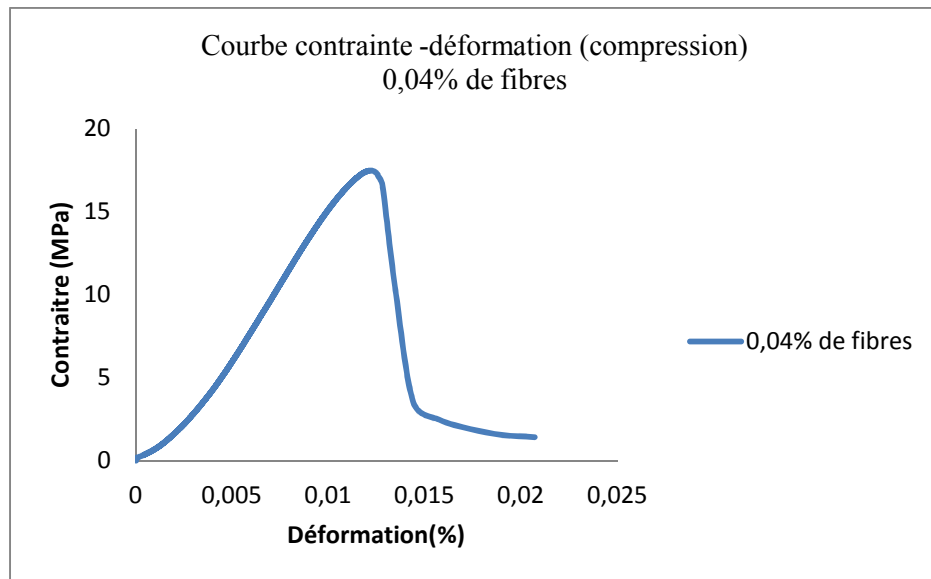


Fig.V.9 : Courbe contrainte-déformation associée au composite mortier-0,04% fibres.

Composite Mortier avec 0,07% fibres

La figure représentée ci-dessous présente le comportement mécanique du composite Mortier-0,07% fibres

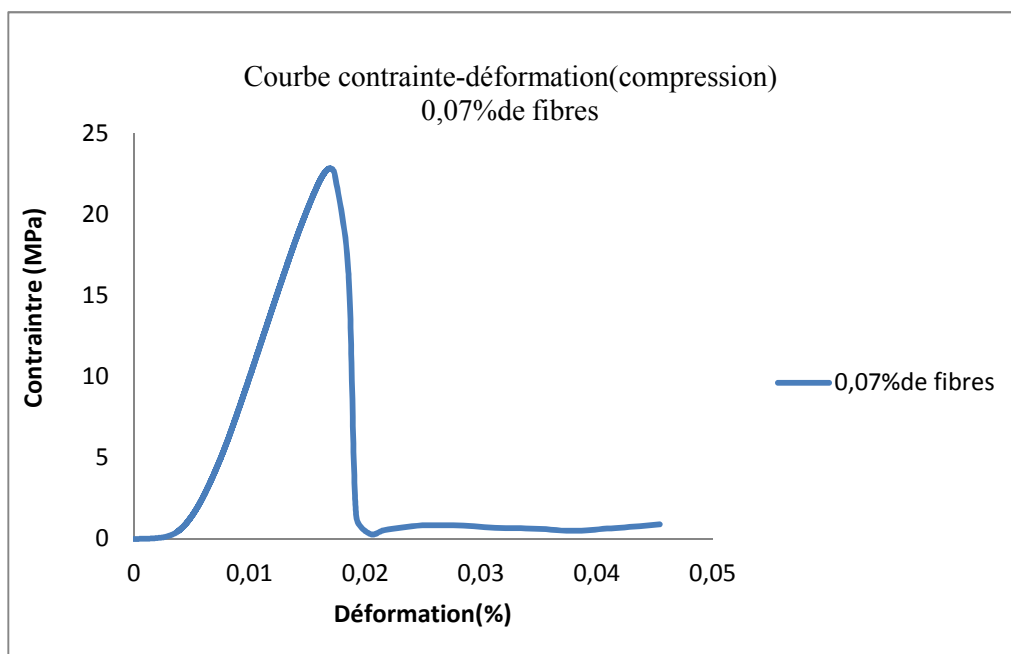


Fig. V.10 : Courbe contrainte-déformation associée au composite mortier-0,07% fibres

Composite mortier-0,14% fibres

La figure représentée ci-dessous présente le comportement mécanique du composite **mortier-0,14% fibres**.

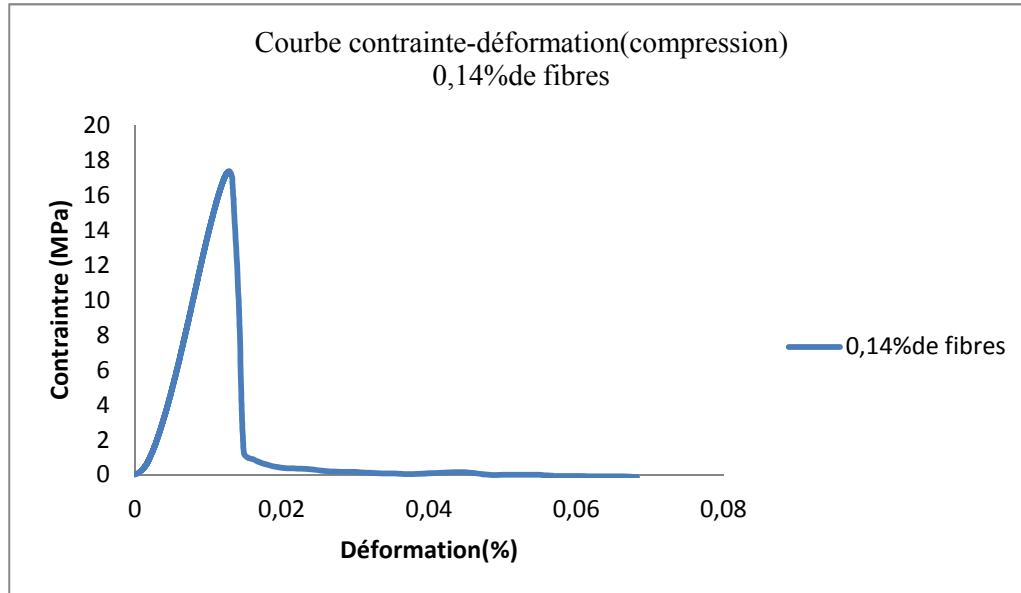


Fig.V.11: Courbe contrainte-déformation associée au composite mortier-0,14% fibres

Composite mortier-0,42% fibres

La figure représentée ci-dessous présente le comportement mécanique du composite **mortier-0,42% fibres**.

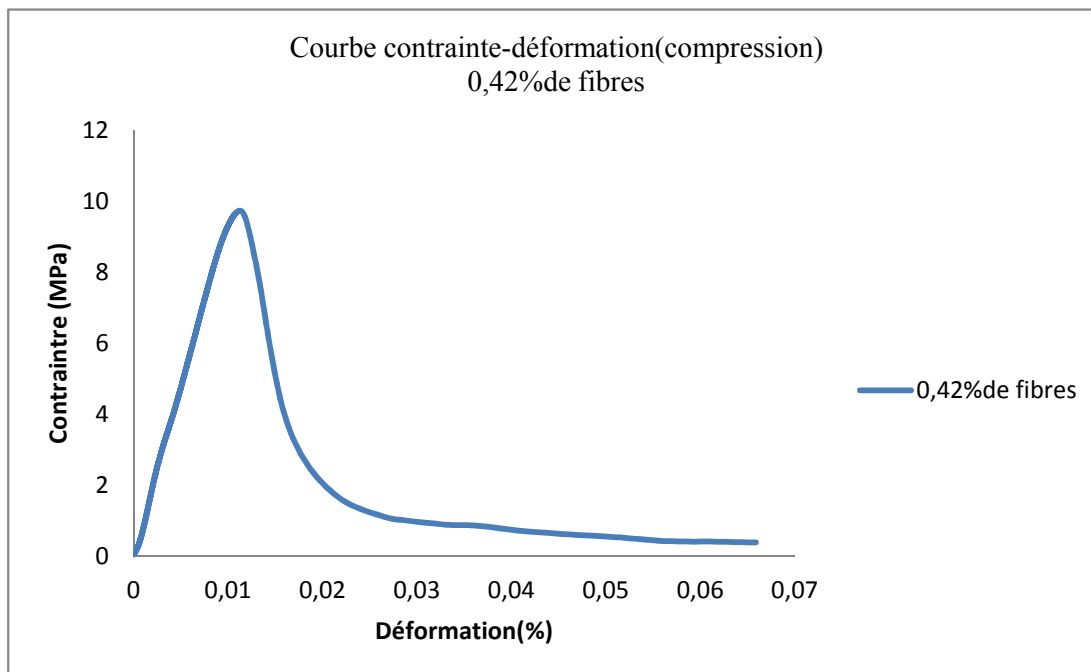


Fig.V.12: Courbe contrainte-déformation associée au composite mortier-0,42% fibres.

Composite mortier-0,69% fibres

La figure représentée ci-dessous présente le comportement mécanique du composite **mortier-0,69% fibres**.

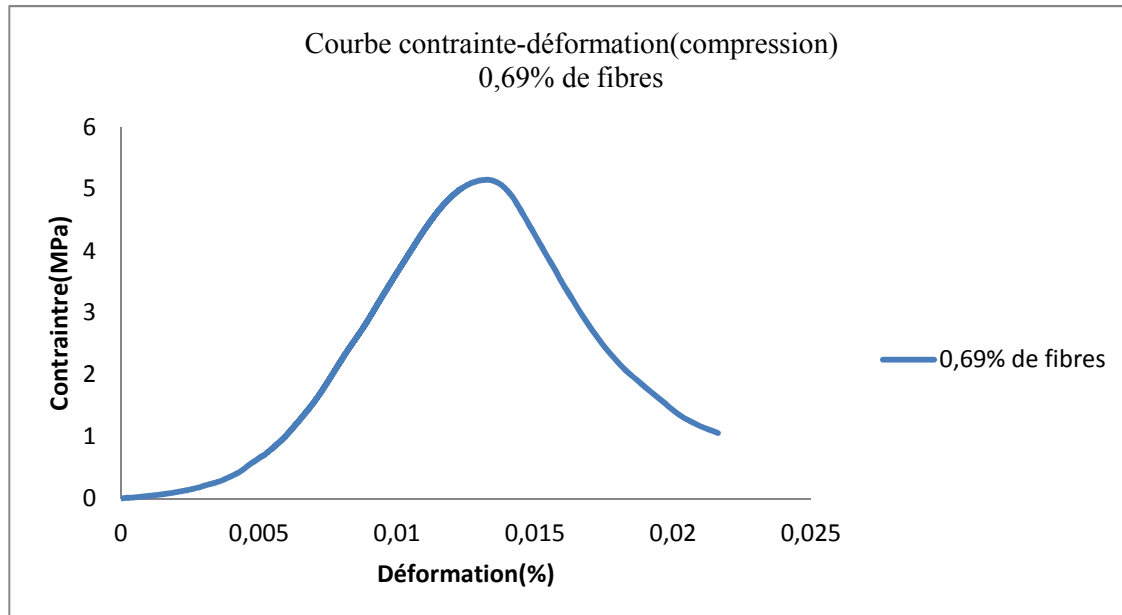


Fig.V.13 : Courbe contrainte-déformation associée au composite mortier-0,69% fibres

V.3.1.2- Superposition des courbes contrainte-déformation associées aux différents composites

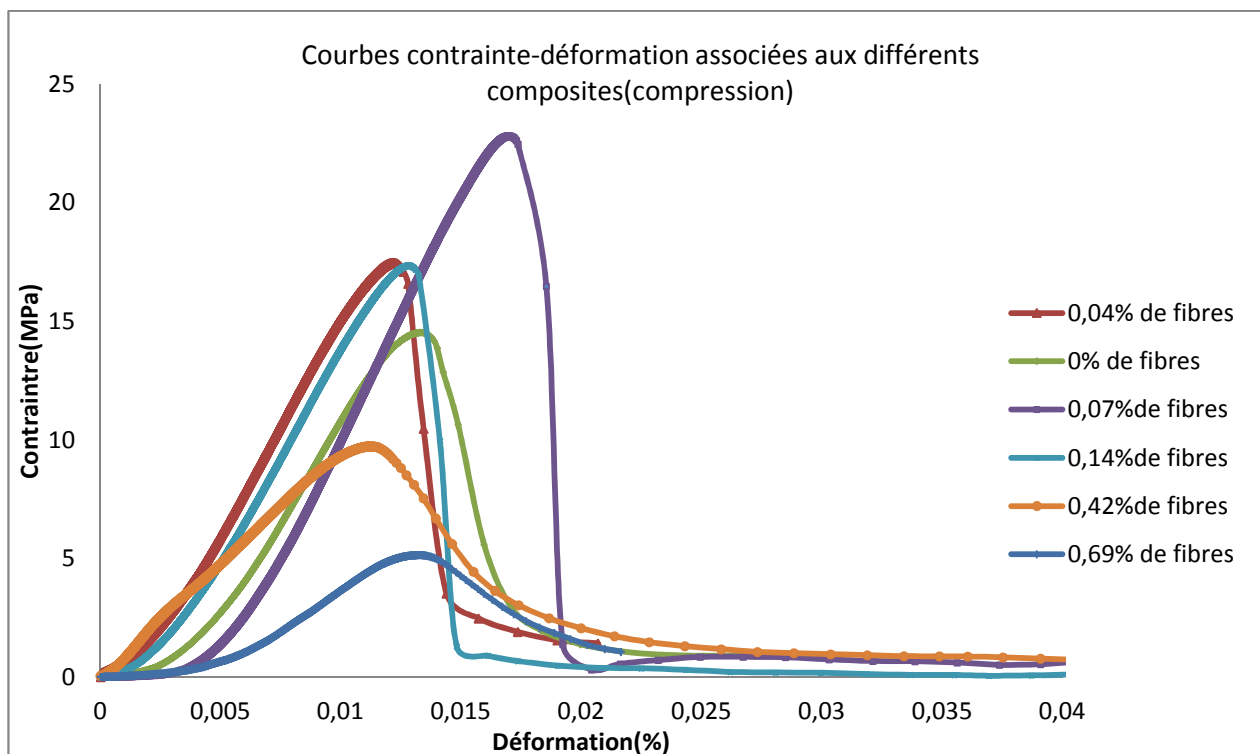


Fig. V.14: Courbe contrainte-déformation associée aux différents composites (0,04; 0,07; 0,14; 0,42; 0,69 % de fibres)

V.3.1.3- Evolution des propriétés mécaniques caractéristiques usuelles en fonction de la concentration de fibres de plume de dinde

Le dépouillement des courbes contrainte–déformation nous permet de déterminer les propriétés caractéristiques usuelles qui sont présentées ci-dessous:

a) Evolution de la contrainte à la rupture en fonction de la concentration de fibres de plumes de dinde

Tableau V.9: Résultats des essais de compression sur éprouvettes 10× 20 cm

MORTIER	RC 14 jours (MPa)	RC 28 jours (MPa)
MT	14,06	16,25
MF 0,04%	17,18	19,75
MF 0,07%	21,42	24,63
MF 0,14%	16,55	19,03
MF 0,42%	8,5	9,77
MF 0,69%	5,09	5,88

Les résultats du tableau V.9 sont représentés dans la figure ci-dessous:

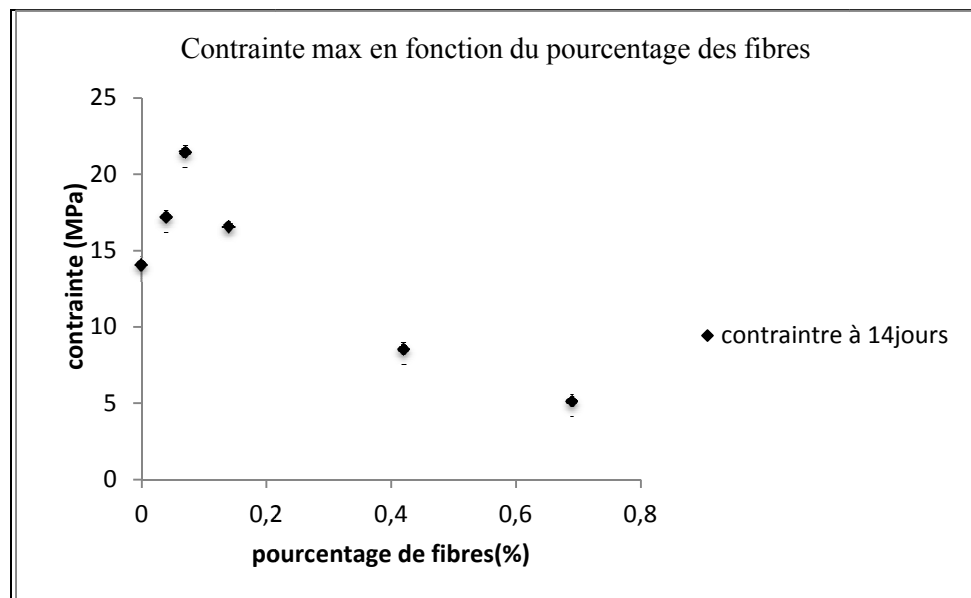


Fig. V.15 : Contrainte max en fonction du pourcentage des fibres (en compression)

Pour la résistance à la compression, les résultats indiquent que les fibres de volaille ont une augmentation très importante par rapport à celle du mortier non renforcé de fibres. En effet, nous remarquerons que la résistance à la rupture s'est améliorée pour les pourcentages qui se situent dans l'intervalle allant de 0,04 à 0,14%. A l'état sec du matériau composite (matrice + fibre), les fibres sont liées à la matrice par plusieurs liaisons hydrogène. Après rupture de la matrice, le transfert de chargement aux fibres passe par ces liaisons jusqu'à la fracture de la fibre. Au delà de cet intervalle, la résistance diminue de façon significative avec des quantités croissantes des fibres. Cela peut être expliqué par le fait que l'incorporation des fibres dans la matrice du mortier engendre une augmentation du volume des vides et diminue la compacité du mortier, d'où la faible résistance à la compression. On note que 0,07% est la fraction massique optimale à introduire dans la matrice.

b) Evolution module d'élasticité en fonction de la concentration de plumage

Tableau .V.10: Module de Young en fonction du pourcentage des fibres.

Composite	E (MPa)
MT	1,469
MT 0,04%	1,546
MT 0,07%	1,856
MT 0,14%	1,430
MT 3%	0,784
MT 5%	0,513

Les résultats du tableau V.10 sont représentés dans la figure ci-dessous:

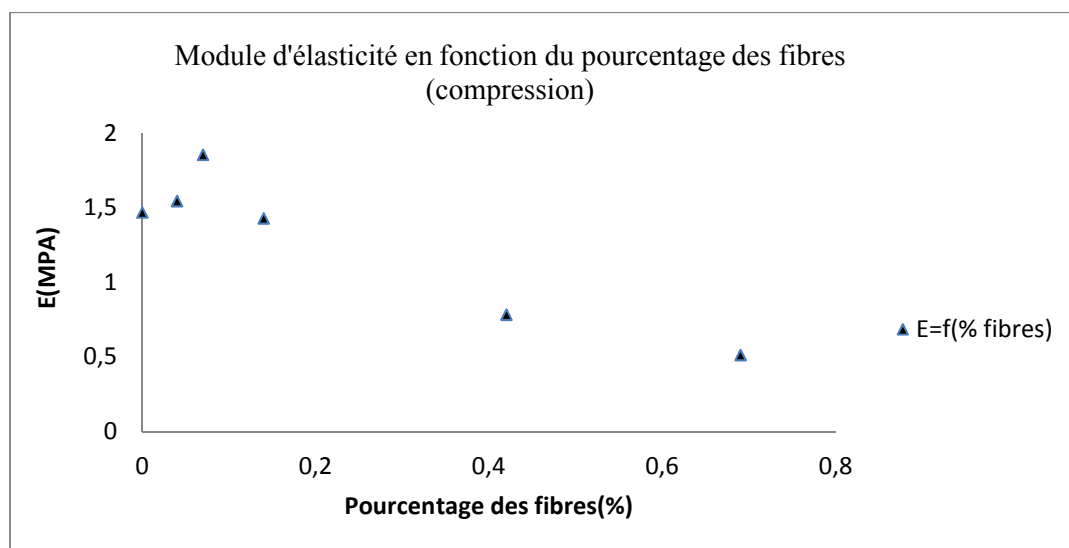


Fig.V.16: Module d'élasticité en fonction du pourcentage des fibres

Nous remarquons que les modules d'élasticité associés à tous les composites sont supérieurs à celui de la matrice seule dans l'intervalle des compositions allant de 0,04 à 0,14% de fibres. Au-delà de ces concentrations, le module de Young diminue brutalement par rapport à celui de référence (mortier seul).

V.4.2- Resistance à la flexion trois points

Principe d'essai

L'essai flexion trois points consiste à déformer une éprouvette normalisée reposant sur deux appuis, par l'intermédiaire du mors mobile, se déplaçant à une vitesse de 10 mm/mn et ce, jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Les courbes charge /flèche sont présentées ci-dessous :



Fig. V.17: Epreuve en flexion trois points

V.4.2.1- Courbes charge -flèche

Tout d'abord, nous reproduisons ci-dessous les courbes charge-flèche associées à la matrice seule ainsi qu'aux autres composites. Ensuite nous comparerons, les différents comportements mécaniques en vue de tirer des conclusions.

- **Mortier seul**

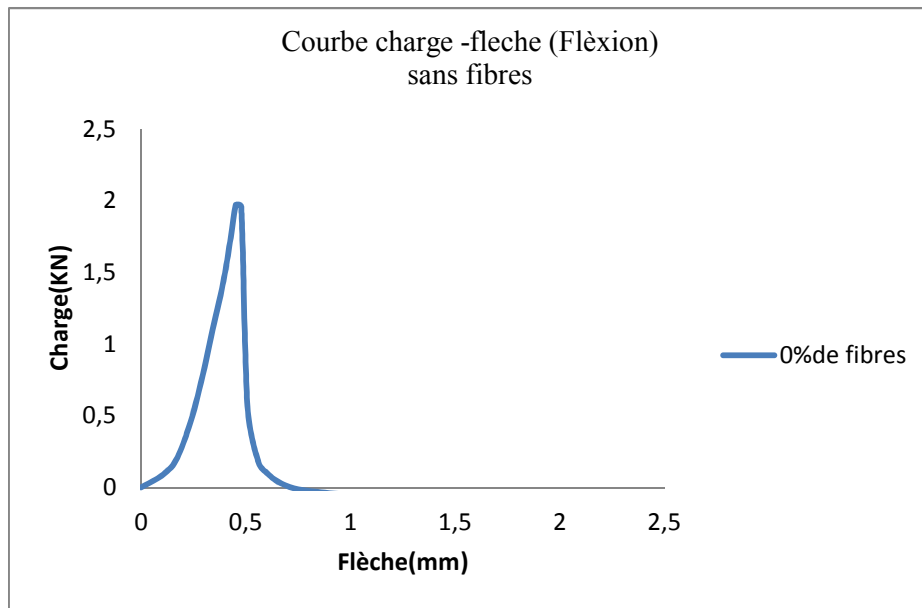


Fig.V.18 : Courbe charge-flèche associée au mortier témoin

Tableau V.11: Caractéristiques mécaniques du mortier témoin en flexion

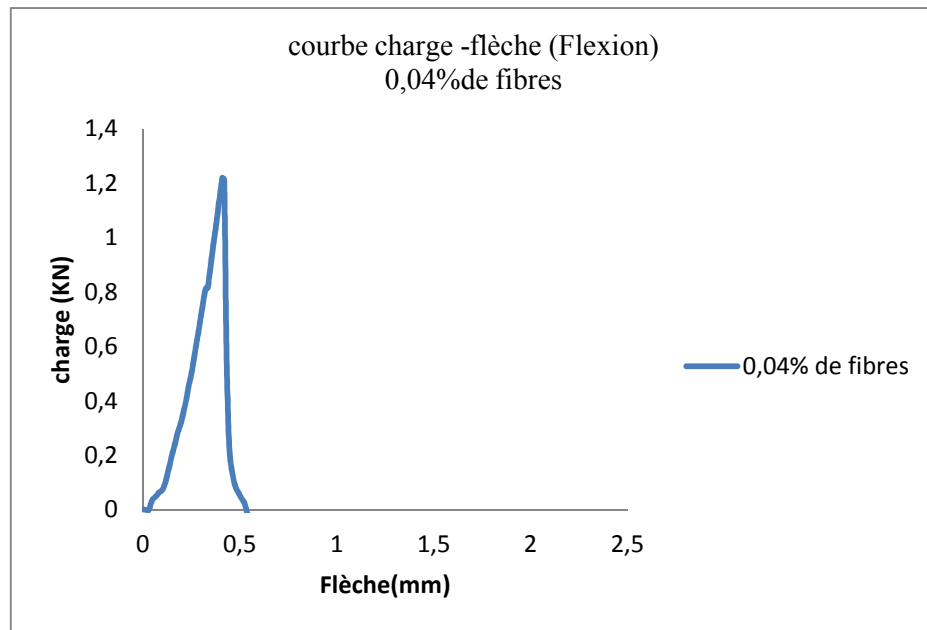
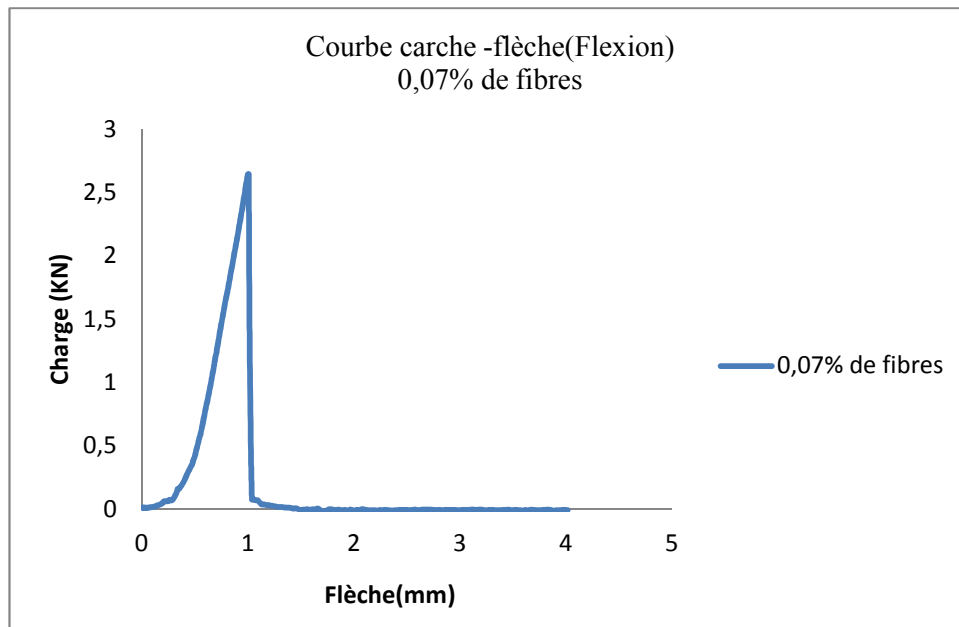
	F (KN)	σ (MPa)	f_m (mm)	E(MPa)
Mortier	2,036	4,775	5,56	35,7

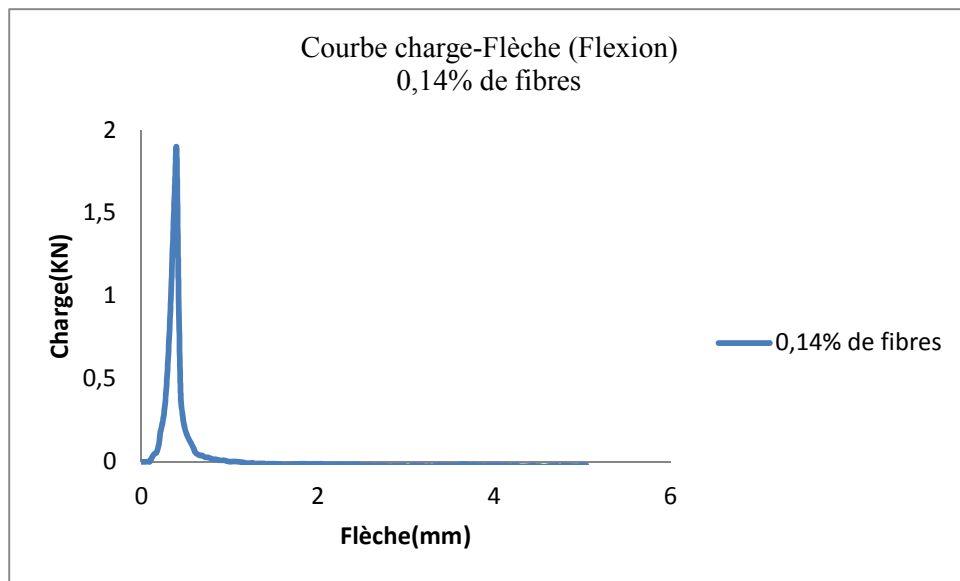
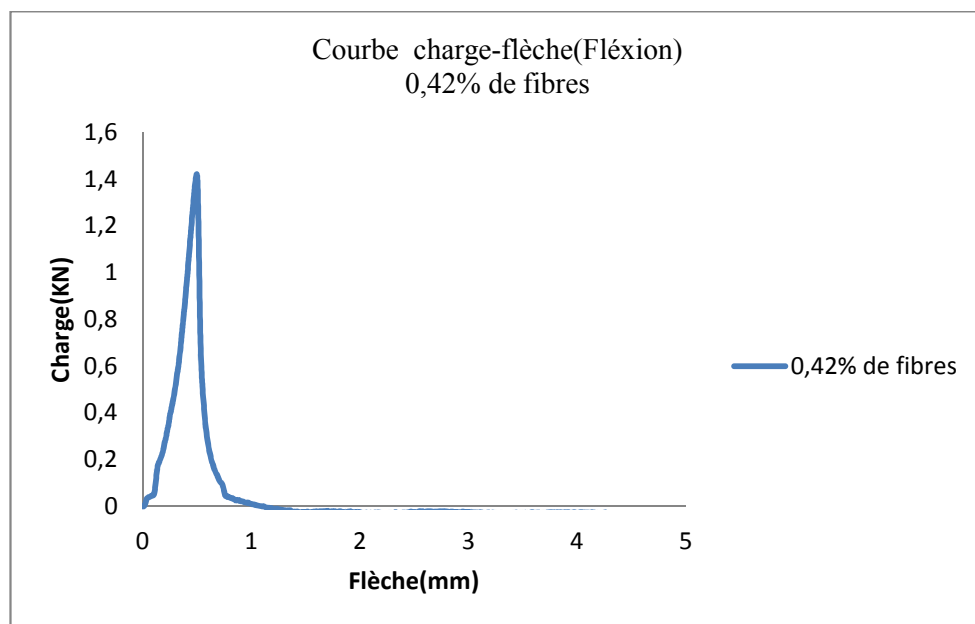
σ : La contrainte à la rupture ; ε : l'allongement à la rupture de l'éprouvette ;

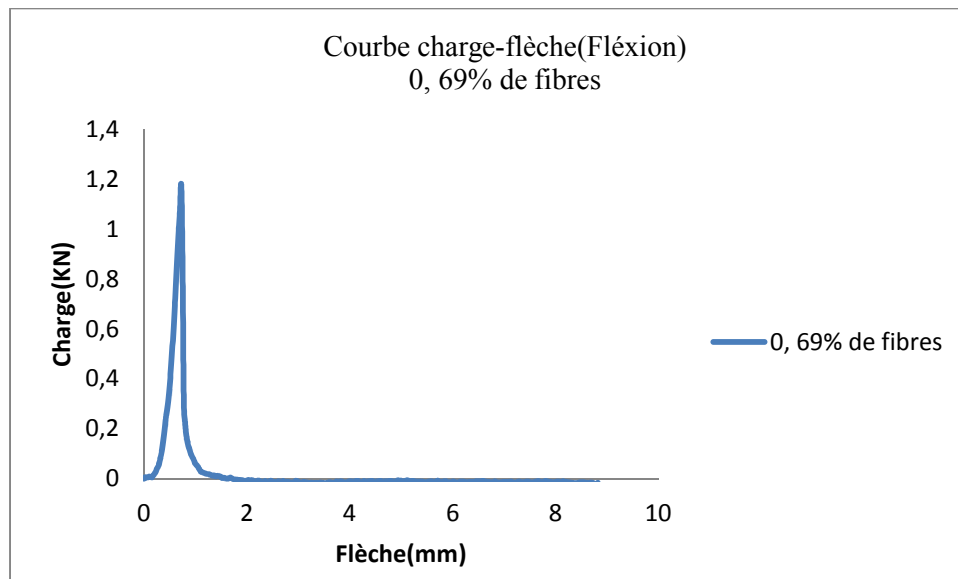
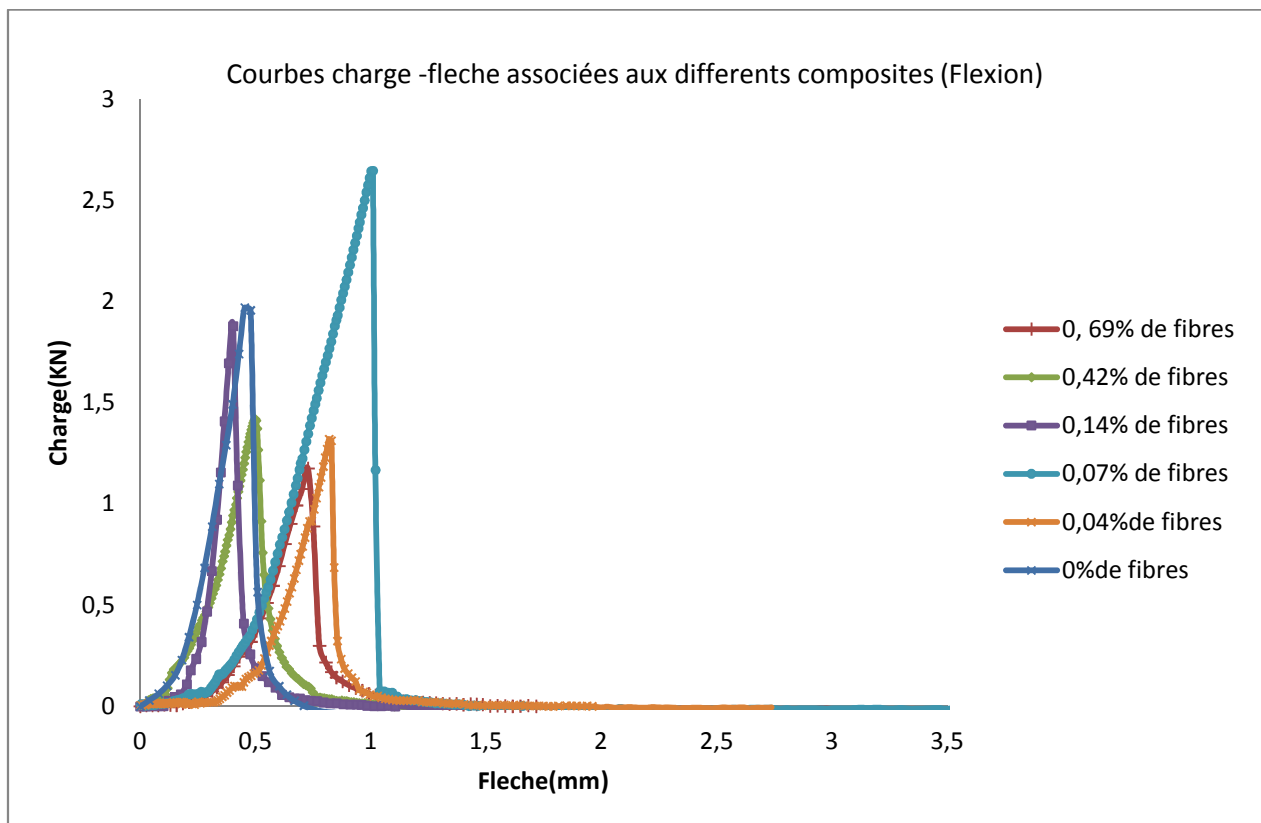
E : Le module d'élasticité ; F : la force maximale appliquée

La courbe charge-flèche montre une rupture fragile à 4,775 MPa, avec une flèche de 5,56 mm sous une charge de 2,036 KN.

- **Evolution des courbes charge-flèche des différents composites à vitesse de sollicitation fixée ($V = 10$ mm/mn):**

Essai avec 0,04% de fibres:**Fig.V.19:** Courbe charge-flèche associée au composite mortier -0,04% fibres**Essai avec 0,07% de fibres:****Fig.V.20 :** Courbe charge-flèche associée au composite mortier -0,07% fibres

Essai avec 0,14% de fibres:**Fig.V.21** : Courbe charge-flèche associée au composite mortier -0,14% fibres**Essai avec 0,42% de fibres:****Fig.V.22**: Courbe charge-flèche associée au composite mortier -0, 42% fibres

Essai avec 0,69% de fibres:**Fig.V.23 :** Courbe charge-flèche associée au composite mortier -0,69% fibres**V.4.2.2- Superposition des courbes charge-flèche associées aux différents composites****Fig. V.24 :** Courbe charge-flèche associée aux différents composites (0,04 ; 0,07 ; 0,14 ; 0,42 ; 0,69 %de fibres)

V.4.2.3- Evolution des propriétés mécaniques caractéristiques usuelles en fonction de la concentration à base de plumage

Dans ce qui suit, nous analyserons les propriétés mécaniques caractéristiques usuelles associées aux différents composites, à vitesse de sollicitation fixée.

Tableau V.12: Résultats associés aux composites mortier–fibres à différentes compositions

Fibres	F (KN)	σ (MPa)	f_m (mm)	E (MPa)
0,04%	1,32	3,09	2,74	47,05
0,07%	2,65	6,20	4,02	64,37
0,14%	1,9	4,45	7,78	24,7
0,42%	1,42	3,33	5,56	24,65
0,69%	1,19	2,78	11,63	9,99

a) Evolution de la contrainte à la rupture en fonction de la concentration de fibres de plume de dinde

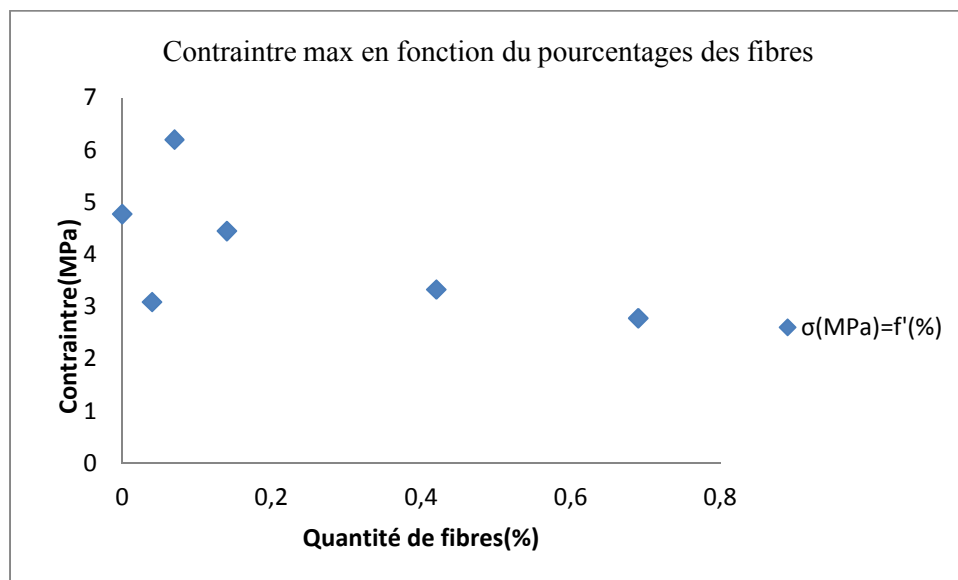


Fig.V.25: Contrainte max en fonction du pourcentage des fibres

On constate que pour l'éprouvette à 0,07% de fibres a donné une résistance à la flexion supérieure à celle du l'éprouvette témoin. Au delà de ce pourcentage, la résistance diminue avec l'augmentation des quantités de fibres.

b) Evolution de module d'élasticité en fonction de la concentration de fibres de plume de dinde

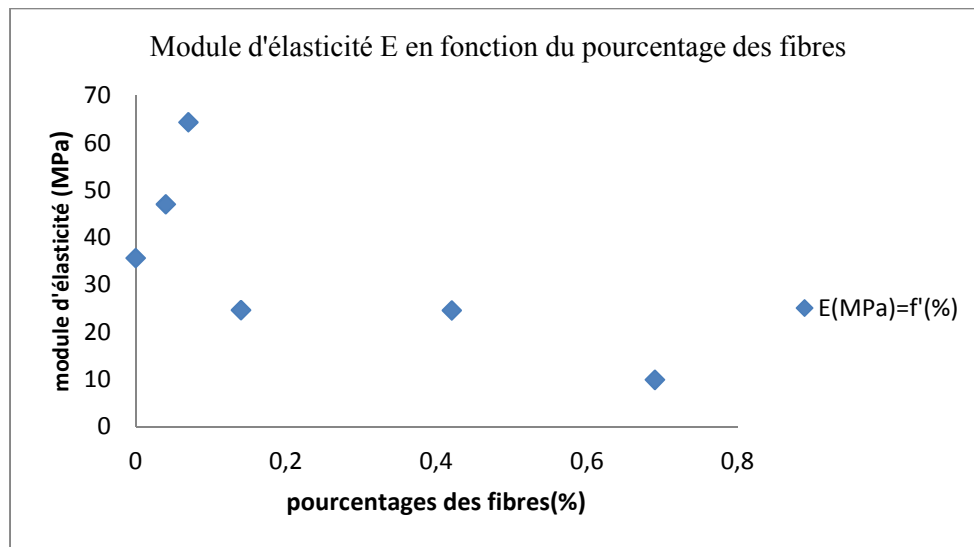


Fig.V.26 : Module d'élasticité E en fonction du pourcentage des fibres

Nous remarquons que les modules d'élasticité associés à tous les composites sont supérieurs à celui de la matrice seule dans l'intervalle des compositions allant de 0,04 à 0,07% de fibres. Au-delà de ces concentrations, les modules diminuent brutalement par rapport à la référence (mortier seul).

V.4 - La conductivité thermique

La conductivité thermique λ caractérise la capacité des matériaux recherchée à isoler thermiquement. Tel qu'on le destine le matériau qu'on vient d'élaborer doit faire l'objet d'essais spécifiques afin d'apprécier son pouvoir isolant qui est l'inverse de la conductivité thermique λ .

Ainsi plus λ est faible et plus le matériau sera isolant en particulier lorsque $\lambda \leq 1$. Pour ce faire, on confectionne des éprouvettes de dimensions 30x30x1cm adaptées à l'appareillage utilisé (CT METRE) pour les différents mortiers à savoir le mortier témoin (MT), un mortier de fibres dosé à 0,04%, un mortier de fibres imbibées de résine dosé à 0,04% et un mortier de fibres chargées en matériau à changement de phase dosé à 0,04%.

Les éprouvettes confectionnées sont conservées pendant 21 jours à l'air ambiant dans le laboratoire à une température de 25 ± 2 °C.

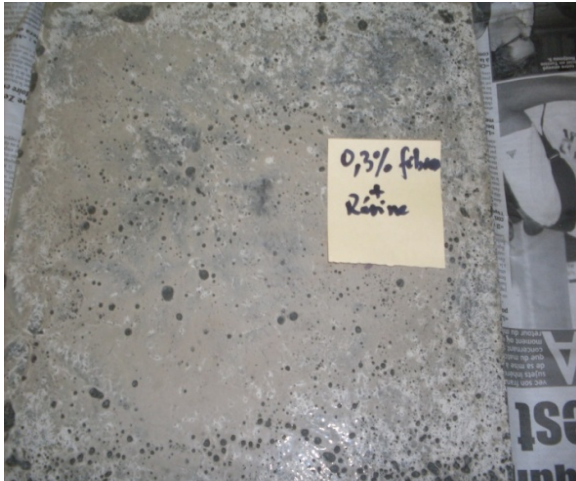


Fig. V.27 : Composite mortier-0,04 %fibres résine

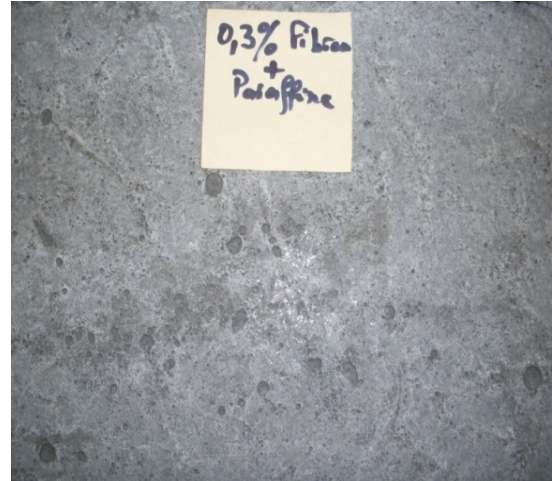


Fig.V.28 : Composite mortier-0,04% paraffine

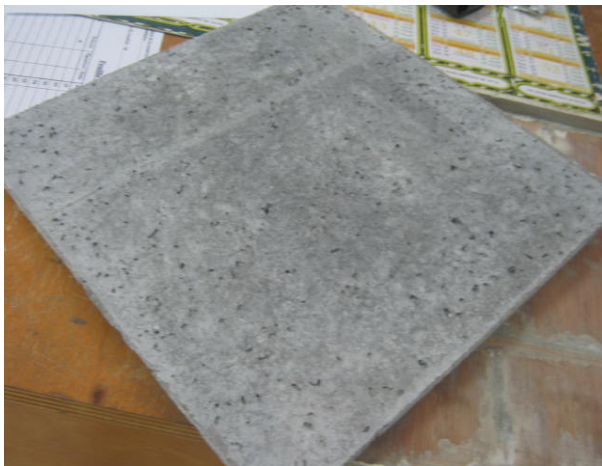


Fig. V.29: Composite 0,04% de fibres



Fig. V.30: Mortier seul

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau V.13 : la conductivité obtenue pour chaque composite

Type de mortier	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
MT	0,2588
MF 0,04%	0,2914
MF à changement de phase 0,04%	0,2565
MF imbibées de résine 0,04%	0,3187

D'après le tableau ci-dessus nous remarquons que dans le composite mortier de fibres avec paraffine à 0,04%, la conductivité thermique diminue, expliqué par le fait que les fibres incorporées engendrent dans le matériau une porosité supplémentaire et une diminution de la masse volumique. La paraffine qui est un matériau à changement de phase qui stocke de l'énergie à température constante. Les fibres améliorent le pouvoir isolant, ce matériau composite devient alors un bon isolant thermique avec une meilleure inertie thermique, ce qui est recherché dans les matériaux de construction.

Enfin nous pouvons noter que même si la conductivité thermique n'est que sensiblement améliorée, le mortier de fibres-paraffine donne une valeur de λ de l'ordre de **0,256 W/m °C**, ce qui est assez proche des performances d'un isolant.

Conclusion

Le mortier et le béton sont utilisés pour la construction de l'enveloppe de bâtiments. Dans notre étude nous avons réalisé de nouveaux matériaux incorporant des fibres d'origine animale en vue d'une amélioration de leurs performances en isolation thermique. Notre travail consiste à déterminer un ensemble de propriétés thermiques et mécaniques de ces nouveaux matériaux en vue de leur utilisation dans le bâtiment. Nous nous sommes alors intéressés au renforcement du mortier par des fibres de plumes de dinde qu'on trouve en abondance dans la nature provenant des déchets d'abattoirs de volaille. Pour pouvoir utiliser ce matériau composite, il est cependant nécessaire de s'assurer qu'il possède des propriétés mécaniques intéressantes.

Pour les essais de compression réalisés à cet effet, toutes les courbes obtenues présentent une partie droite dans le domaine élastique, puis ces courbes s'éloignent de cette droite. Cela est dû à la présence des fibres dans la matrice qui prolonge le palier de ductilité du matériau. La mesure de la résistance faite sur les éprouvettes de mortier de fibres de différents pourcentages montre une amélioration dans l'intervalle allant de 0,04 à 0,14%, avec une augmentation de 52,4% pour un pourcentage de fibres de 0,07%.

Pour les essais de flexion réalisés dans le cadre de ce travail, l'éprouvette utilisée se présente sous forme prismatique. Les résultats des essais effectués montrent une légère amélioration de la contrainte maximale qui est de l'ordre de 40%.

On notera que, pour la conductivité thermique, l'ajout des fibres dans la matrice apporte une légère amélioration pour le mortier fibré avec paraffine. On peut alors améliorer sensiblement la conductivité thermique en regardant certains paramètres tels que :

- Respecter les dimensions de l'éprouvette d'essai avec exactitude.
- Assurer une bonne planéité de l'éprouvette pour éviter les macroporosités.
- Réaliser des essais avec des éprouvettes dépourvues totalement d'eau.

Références bibliographiques

- [1] **A. ADJRAD (2000).** *Renforcement du béton par des coupeaux, étude expérimentale et modélisation.* Thèse de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [2] **AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE, ADEME (2002).** *Etat des lieux et perspectives du recyclage des déchets issus du traitement des plumes et duvets en France.* Rapport final.63p
- [3] **M.L. ANSON, K. BAILEY, J.T. EDSALL (1954).** *Advances in protein chemistry.* Volume 10.Academic press Inc. New York.
- [4] **B. MORTGAT (2005).** *Environnement et Technique,* Société Alpine De Publication (SAP) ISSN : 0986-2943, N°247,46,47 ,48p.
- [5] **C.PARIS (2004).** *Méthodologies spectroscopiques pour l'étude de matériaux :objets du patrimoine de la fin du 19^{ème} au début du 20^{ème} siècle.* Thèse de doctorat de l'université Pierre & Marie Curie.
- [6] **D.GAY.** *Matériaux composites.* Edition Hermès, Paris 1989, pp 672.
- [7] **DEBLOIS, M., PICARD, A., BEAULIEU, D. (1992).** *Renforcement de poutres en béton armé a l 'aide de matériaux composites: études théorique et expérimentale.* Proceedings of ACMBS- 1, Canadian Society for Civil Engineering, Montréal, p. 265-275.
- [8] **D. Hormin (2004).** *Chicken Connection .Le poulet africain étouffé par l'Europe.* Agrobusiness, dumping, souveraineté alimentaire.
- [9] **DORLOT, J.M., BAILON, J.P., MASOUNAVE, J. (1986).** *Des matériaux.* Édition de l'École Polytechnique de Montréal. 2^{ème} édition, Canada, 467 p.
- [10] **E.H. ROCHDI (2004)** *.Contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites.* Thèse d'état, université CLAUDE BERNARD - LYON 1.
- [11] **FAEBER (2004).***Microanalyse X par sonde électrique.* Institut de physique et de chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS).

- [12] **G.TENO ,2009.** Etude des déterminants de la consommation du poulet du pays : cas de la région de Dakar (Sénégal). Ecole inter-états des sciences et médecine vétérinaires de DAKAR.
- [13] **GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES.** *Centre d'Animation Régional en Matériaux Avancés (CARMA)* .Actualisation octobre 2006.
- [14] **G.DREUX ET J.FESTA (2002).***Nouveau guide du béton et de ses constituants*, édition Eyrolles, Paris.
- [15] **J.M.BERTHELOT (1999).** *Matériaux composites – comportement mécanique et analyse des structures*. 3^{ème} édition .Technique & documentation. pp 642
- [16] **J-P OLIVA (2001).** *Les isolants écologiques*. Edition Terre Vivante.
- [17] **KATSUMATA, H et AL (1990)** *Application of Retrofit Methods with Carbon Fiber for existing Reinforced Concrete Structures*. The 22nd Joint UJNR Panel Meeting on repair and retrofit of existing structures US-Japan Workshop, 28 p.
- [18] **K. RBII (2010).** *Formation d'agrégats de hauts poids moléculaires dans la gélatine et comportement en solution aqueuse*. Thèse de l'université de Toulouse.
- [19] **L. DOUADJI (2007).** *Traitement thermique uniforme des composites non métalliques au moyen de l'effet diélectrique de l'inversion de l'atténuation des ondes électromagnétiques*. Thèse de doctorat l'université ENAM de Paris.
- [20] **MCKENNA, J.K., ERKI, M.A. (1994).** *Strengthening of Reinforced Concrete Flexural member Using Externally Applied Steel Plates and Fibre Composite Sheets*. A Survey, Canadian journal of Civil Engineering, no. 2 1, p. 16-24.
- [21] **MEIER, U. (1992)** *Carbon Fiber-Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge*. Engineering, Structural Engineering International, no. 1, p.7- 12.
- [22] **MELANIE, M.A CHAMPION (2007).** *Le cactos rosablin ,eolophus roseicapillus, en captivité. Biologie, maintien en captivité, élevage, pathologie principal*. Ecole nationale de vétérinaire de Toulouse.75-77p.

- [23] **M.BENTALHA (2007).** *Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire. caractérisation - comportement monotone – microstructure.* Thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine.
- [24] **M. BOUKHEZAR (2009).** *Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites.* Thèse de Magister, Université Mentouri, Constantine.
- [25] **N. Reddy, Y. Yang (2007).** *Structure And Properties Of Chicken Feather Barbs As Natural Protein Fiber.*
- [26] **Office de l'Elevage (2006).** La production et la consommation dans le secteur volailles .171-172p.
- [27] **S Ouali et T Ouali, Caractérisation et biodégradation d'un déchet kératinique «Cas des plume de volaille».** Thèse d'ingénieur, université MMTO, 2010
- [28] **PA.HILTON LTD, 1994.Documentation ENIEM**
- [29] **P. AGATI, F. LEROUGE, M. ROSSETTO .Résistance des matériaux.** Edition Donut, Paris, 2008.
- [30] **P Rammani et al (2005).** *Structural and biomedical mechanism of feather degradation.*
- [31] **S .MELKA (1996).** *Etude théorique et expérimentale des transferts thermique dans les milieux poreux granulaires pour l'isolation thermique.* Thèse de doctorat .Ecole des mines de paris.
- [32] **S.BERRADA (2007).** *Coiffure Les Principaux Produits Capillaires : Composition et Propriétés.* LP Jules Ferry –Montpellier.
- [33] **TECHNIQUE D'INGENIEUR C2-210-12.** Édition 19
- [34] **TECHNIQUE D'INGENIEUR.** *Essais mécaniques des plastiques, caractéristique instantanées.* AM 3510
- [35] **VAL CUNNINGHAM (2004).** *Minnesota Conservation Volunteer. Nature of the feathers.*
- [36] **VERBAND SCHWEIZER BETTWARENFABRIKEN VSB (2009).** *Information technique n°6 de l'Association suisse des manufactures de literie.*

