

C.A.R.M.A.
CENTRE D'ANIMATION REGIONAL EN MATERIAUX AVANCES

**GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES
RENFORCES DE FIBRES D'ORIGINE RENOUVELABLE**

Actualisation décembre 2006



1.	PRESENTATIONS DES DIFFERENTES FIBRES D'ORIGINE RENOUVELABLE.....	4
1.1.	LES FIBRES VEGETALES.....	4
1.1.1.	STRUCTURE D'UNE FIBRE.....	4
1.2.	PRESENTATIONS DES DIFFERENTES FIBRES VEGETALES.....	5
1.2.2.	LE CHANVRE.....	5
1.2.3.	LE LIN.....	6
1.2.4.	LE COTON.....	6
1.2.5.	L'ABACA.....	6
1.2.6.	LE KENAF.....	6
1.2.7.	LE JUTE.....	6
1.2.8.	LE SISAL.....	7
1.2.9.	LA RAMIE.....	7
1.2.10.	LE COCO.....	7
1.3.	PROPRIETES USUELLES DES FIBRES VEGETALES.....	7
1.4.	PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES FIBRES VEGETALES COMME RENFORTS DE MATERIAUX COMPOSITES.....	8
1.5.	FIBRES D'ORIGINES ANIMALES.....	9
1.5.1.	LA LAINE.....	9
1.5.2.	LA SOIE.....	9
1.5.3.	LE FIL D'ARAIGNEE.....	9
1.5.4.	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES FIBRES ANIMALES.....	10
1.6.	LES FIBRES D'ORIGINE MINERALE.....	10
1.6.1.	L'AMIANTE.....	10
1.6.2.	LE BASALTE.....	10
1.7.	COMPARAISON DES PROPRIETES MECANIQUES EN TRACTION DE DIVERSES FIBRES.....	12
1.8.	LES FOURNISSEURS.....	12
1.8.1.	LES RENFORTS UTILISES DANS CETTE ETUDE.....	13
2.	FABRICATION DES EPROUVETTES.....	13
2.1.	INFUSION.....	14
2.2.	MOULAGE AU CONTACT.....	14
3.	CARACTERISATIONS DES COMPOSITES REALISEES.....	16
3.1.	DURETE BARCOL.....	16
3.1.1.	PRINCIPE.....	16
3.1.2.	TRAITEMENT DES RESULTATS.....	16
3.1.3.	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	16
3.2.	MESURE DE DENSITE.....	17
3.2.1.	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	17
3.3.	FLEXION TROIS POINTS.....	18
3.3.1.	PRINCIPE.....	18
3.3.2.	TRAITEMENT DES RESULTATS.....	18
3.3.3.	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	19
4.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	22
5.	BIBLIOGRAPHIE.....	24

INTRODUCTION

Chaque seconde sur terre, une surface de forêt équivalente à 19 courts de tennis disparaît, le désert augmente de 78 m² en Chine, 1600 t de glace fondent au Groenland et 720 t de CO₂ sont émises à partir de pétrole dans l'atmosphère [1]. Ces chiffres montrent qu'il est crucial de prendre en compte les effets des activités humaines sur l'environnement. C'est dans ce cadre que se développent les éco matériaux et que le terme de développement durable est de plus en plus évoqué. Cette notion de développement durable exige une prise en compte des problèmes d'environnement.

C'est pourquoi il est important de faire un point sur les différentes catégories de matériaux de ressources renouvelables et biodégradables. Dans le domaine des matériaux thermoplastiques, il existe les polymères d'origine végétale (amidon de maïs, polyacidelactique – PLA, polyhydroxyalkanoate – PHA).

Pour le renforcement de polymères, les fibres végétales présentent des propriétés mécaniques spécifiques importantes (au moins pour certaines d'entre elles) et de nombreux atouts si on s'intéresse aux impacts environnementaux. Il s'agit de ressources renouvelables, naturellement biodégradables, neutres quant aux émissions de CO₂ dans l'atmosphère et ne demandant que peu d'énergie pour être produites. Ces fibres peuvent se substituer aux fibres de verre dans de nombreux domaines ou permettre d'atteindre de nouveaux marchés.

Les industriels s'étaient limités jusqu'à présent à proposer des composites à base de fibres naturelles noyées dans une matrice polyoléfine, ayant un bon rapport performances/coûts. Les avantages « environnementaux » sont alors mis en avant de la sorte : économies d'énergies liées à la fabrication, au transport.

Bien que ces matériaux trouvent preneurs dans certains secteurs comme par exemple dans l'automobile, où les matériaux doivent être conservés dans le temps, exposés à la lumière, la chaleur et l'humidité, il semble que le caractère écologique ait du mal à être mis en avant.

Ce glossaire a pour objectif d'analyser l'utilisation potentielle de produits naturels, issus de l'agriculture par exemple, dans l'industrie des matériaux plastiques et composites. Il s'agit de faire une étude la plus exhaustive possible des différents matériaux disponibles sur le marché (fibres et résines d'origine naturelle), de définir ou caractériser les propriétés de ceux jugés les plus intéressants et d'envisager les procédés de mise en œuvre possibles afin d'obtenir des biocomposites.

1. Présentations des différentes fibres d'origine renouvelable

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine :

- les fibres végétales qui comprennent :
 - les fibres provenant des poils séminaux de gaines (coton kapok) ;
 - les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie) ;
 - les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de manille), d'enveloppes de fruits (noix de coco).
- les fibres animales qui proviennent des poils, telle que la toison animale, et sécrétions telle que la soie ;
- les fibres minérales telle que le basalte.

Elles constituent une alternative aux fibres de verre en raison de leur recyclabilité. Néanmoins leurs propriétés doivent être encore améliorées.

Elles présenteraient, toutefois, de nombreux avantages :

- des propriétés mécaniques proches de celles des fibres de verre (module d'Young) ;
- un recyclage facile (combustion).

En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau du développement industriel :

- une méthode de mise en oeuvre difficilement reproductible (non industrielle) ;
- des propriétés physiques non reproductibles ;
- la quantité et la qualité des fibres dépendent de l'environnement et de l'humidité ;
- une reprise en eau importante : 8 ou 10 % du taux d'humidité ;
- une calibration difficile.

1.1. Les fibres végétales

1.1.1. Structure d'une fibre

Les fibres végétales sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine [2]. Dans une proportion beaucoup plus faible, elles contiennent aussi des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques [3]. Contrairement aux autres composantes des fibres qui possèdent une structure amorphe, la cellulose possède une structure en grande partie cristalline. La cellulose cristalline est l'un des polymères ayant le module d'élasticité le plus élevé, soit environ 136 GPa à comparer au 75 GPa de la fibre de verre. Cette rigidité provient de la structure cristalline qui suit un agencement supramoléculaire hélicoïdal très ordonné. Il est important de noter que cette structure moléculaire particulière entraîne lors d'une elongation des fibres, un couplage torsion/traction qui peut avoir des conséquences sur l'interface, sur la déformation ou sur les mécanismes de rupture du composite. A l'intérieur de la fibre, les chaînes cellulosiques sont réunies en micro fibrilles qui en s'agglomérant forment des fibrilles sur plusieurs couches. L'angle qui existe entre ces éléments très structurés et l'axe de la fibre conditionne la rigidité de la fibre [4]. Les liaisons hydrogènes qui s'établissent le long et entre les chaînes cellulosiques sont à la base des bonnes propriétés des fibres cellulosiques [5]. Ce ces différences, constitutives ainsi qu'anatomiques, qui vont donner la grande variabilité des propriétés physico-mécaniques des fibres naturelles [6]

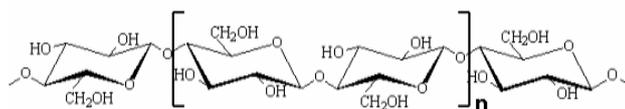


Figure 1 : molécule de la cellulose (n répétitions du motif cellobiose)

Une fibre végétale est assimilable à un matériau composite renforcé par des fibrilles de cellulose [7]. La matrice est principalement composée d'hémicellulose et de lignine. Les fibrilles de cellulose sont orientées en hélice suivant un angle nommé angle micro fibrillaire. Habituellement, dans un matériau composite, le taux de renfort et l'orientation des fibres conditionnent les caractéristiques élastiques et à rupture. De même, dans une fibre végétale, les propriétés physiques des fibres naturelles sont principalement déterminées par la composition chimique et physique, la structure, le pourcentage de cellulose, l'angle micro fibrillaire, la section et le degré de polymérisation [8]. En simplifiant, pour un pourcentage de cellulose donné, plus l'angle micro fibrillaire sera faible et plus la rigidité et la résistance de la fibre seront élevées ; plus l'angle micro fibrillaire sera important et plus l'allongement à la rupture sera important. Le tableau présente, pour différentes fibres, le pourcentage de la cellulose, l'angle micro fibrillaire, les dimensions des fibres et le rapport d'aspect L / d (longueur / diamètre), ce rapport étant un paramètre important pour permettre le transfert de charges entre fibre et matrice.

Nature des fibres	% de cellulose	Angle microfibrillaire (degrés)	Diamètre (µm)	Longueur (mm)	Rapport L / d
Lin	64 - 71	10	5 - 76	4 - 77	1687
Ramie	83	7,5	16 - 126	40 - 250	3500
Chanvre	78	6,2	10 - 51	5 - 55	960
Jute	61 - 71	8	25 - 200		110
Sisal	67 - 78	20	7 - 47	0,8 - 8	100
Noix de coco	43	45	12 - 24	0,3 - 1	35

Tableau 1 : composition et propriétés de différentes fibres végétales [9]

1.2. Présentations des différentes fibres végétales

1.2.2. Le chanvre



Le chanvre est une fibre libérienne, tout comme le lin, le kenaf, le jute et la ramie. Les plantes de cette famille présentent toutes des fibres externes longues et étroites et des fibres internes ligneuses. Par ses possibilités techniques, la fibre de chanvre répond à des besoins textiles traditionnels tout en ouvrant la voie à une foule d'innovations. Cultivé dans les pays à climat tempéré, on en trouve dans l'est de l'Europe, en France et en Italie.

La France est le premier producteur en Europe pour la production de chanvre, avec environ 9 100 ha cultivés en 2005.

Les fibres libériennes sont généralement transformées en textiles (tapis et vêtements) et en produits industriels comme des géotextiles, de la toile anti-érosion, du renfort de composite et du remplissage ce qui constitue d'ailleurs le principal emploi actuel et à venir de la fibre de chanvre. A cause de sa grande solidité et de son intérêt économique, la fibre de chanvre est en effet très recherchée comme substitut de la fibre de verre et d'autres matériaux synthétiques utilisés dans divers composites agglomérés, par exemple des pièces automobiles, des matériaux de construction et divers biens de consommation. En milieu industriel, le chanvre comporte en fait de nombreux atouts. Ses caractéristiques physiques lui confèrent une grande force, ainsi qu'une excellente rentabilité dans le domaine des composites et du papier. De plus, la tendance de l'offre est à la hausse. Enfin, les fibres sont maintenant offertes dans une vaste gamme de formats et de qualité : on pourrait en effet fabriquer de la fibre de chanvre plus légère, plus solide et moins chère que la fibre de verre.

1.2.3. Le lin



Le lin est une plante annuelle qui pousse dans le monde entier, aussi bien en Asie qu'en Europe. La fibre de lin vient des tiges de la plante mais aussi de l'huile extraite des graines. L'avantage de cette fibre est sa longueur élevée, en moyenne 25 mm et sa bonne résistance. Le lin peut être utilisé comme substitut au coton. De plus, le rendement de cette fibre est très nettement supérieur à la production de coton (jusqu'à 2 t/an/ha).

Cette fibre est utilisée en papeterie pour des papiers fins comme les papiers à cigarette ou le papier Bible. En effet, sa bonne résistance et sa longueur confèrent à ses papiers les caractéristiques mécaniques essentielles pour cette production particulière. Ces fibres sont très raffinées afin d'avoir des longueurs inférieures à 4 mm.

1.2.4. Le Coton



Le cotonnier est un petit arbuste annuel de 1 à 1,50 m de haut. Il est cultivé dans les zones chaudes d'Amérique, d'Afrique, d'Asie et même d'Europe (Espagne). Les fibres de coton proviennent des graines, et sont appelés linters. Le rendement en linters de coton est de seulement 0,05 t/ha/an. Cette fibre est utilisée pour ses bonnes caractéristiques physique et mécanique. En effet, les linters de coton mesurent 2 à 5 mm et ont une largeur de 18 μm . Elle est utilisée pour des papiers dits de luxe. Elles sont également utilisées

pour les papiers fiduciaires et principalement pour les billets de banques, papiers pour lesquels la caractéristique essentielle est la résistance au pliage. Cette fibre est aussi beaucoup utilisée dans le domaine du textile.

1.2.5. L'Abaca



L'Abaca ou chanvre de Manille est un bananier textile (Musacées) qui pousse aux Philippines : les fibres dans les gaines foliaires forment un pseudo tronc très recherché pour la fabrication de cordages légers et insubmersibles, pour des rabanes, des nappes, des stores ou des vêtements. La fibre d'Abaca a une longueur de 6 mm pour un diamètre de 22 μm . Elle est utilisée principalement dans la composition des papiers filtres, des sachets de thé. Ce sont des papiers poreux demandant une bonne résistance, en particulier au déchirement.

1.2.6. Le KénaF



Le kénaF est une plante herbacée dont la tige peut atteindre 3 m de haut. Il se trouve principalement dans les régions tropicales et en Amérique du Sud. La production de kénaF en Europe est rare. Elle est destinée uniquement pour le domaine papetier. Le rendement en fibre atteint près de 10 t/an/ha. La longueur moyenne des fibres (1,5 mm) est comprise entre celle des fibres de feuillus et celle des fibres de résineux.

1.2.7. Le Jute



Le jute est une plante buissonnante originaire du sud-est asiatique. Les principaux producteurs sont l'Inde et le Bangladesh. Le rendement en fibres est de 2 t/ha/an. Les fibres utilisées en papeterie sont les déchets de culture et de filature. La longueur moyenne des fibres est de 2 mm, avec une largeur de 20 μm . Les caractéristiques de ces fibres sont généralement assimilées à celles du kénaF.

1.2.8. Le Sisal



Le sisal est une plante vivace constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2 m de long. Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique. La longueur moyenne de ces fibres est de 3 mm.

1.2.9. La ramie



La ramie est une plante arbustive. Originnaire d'Asie de l'Est, la ramie a pour principaux producteurs la Chine, le Japon et l'Amérique. Le rendement en fibres est d'environ 2 t/ha/an.

La longueur moyenne des fibres est comprise entre 40 et 250 mm, pour un diamètre moyen de 45 μm . Ces fibres ressemblent aux fibres de lin mais sont encore plus longues, plus solides et plus rigides.

1.2.10. Le coco



Les fibres de coco proviennent de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco. Elles sont filées et tissées après avoir été assouplies dans l'eau. Le filage grossier et irrégulier donne au coco un aspect rustique. Le coco est très résistant, il est isolant, imputrescible et antibactérien. On utilise plutôt dans des pièces spacieuses et lorsqu'on veut mettre en avant son côté rustique.

Quelques exemples de tissus de fibres végétales sont présentés ci-dessous :



Chanvre



Jute



Sisal



Coton



Coco



Lin

Photo 1 : quelques exemples de tissus de fibres végétales

1.3. Propriétés usuelles des fibres végétales

Le tableau 2 présente les propriétés usuelles des fibres végétales. On remarque que la plupart des fibres présentent des propriétés proches de celles des fibres synthétiques (verre, aramide, carbone...). La production de ces fibres est relativement importante.

Propriétés	Type de fibres							
	lin	Chanvre	Jute	Ramie	Coco	Sisal	Abaca	Coton
Densité	1,4	1,48	1,46	1,5	1,25	1,33	1,5	1,51
Résistance à la traction (MPa)	800-1500	550-900	400-800	550	220	600 -700	980	400
Module d'élasticité (E) [GPa]	60-80	70	10-30	44	6	38		12
(E/densité) spécifique	26-46	47	7-21	29	5	29		8
Allongement à la rupture (%)	1,2-1,6	1,6	1,8	2	15-25	2-3		3-10
Absorption d'eau (%)	7	8	12	12-17	10	11		8-25
Production mondiale en 2002 en milliers de tonnes/an	750	78	3200	202	654	345	104	21200

Tableau 2 : les propriétés usuelles des fibres végétales [10]

1.4. Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites

Les fibres végétales constituent une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur recyclabilité. Ces fibres présentent de nombreux avantages comme renfort de matériaux composites. En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau du développement industriel. Les principaux avantages et inconvénients sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

Avantages	Inconvénients
Faible coût	Absorption d'eau
Biodégradabilité	Faible stabilité dimensionnelle
Neutre pour l'émission de CO ₂	Mauvaise tenue en vieillissement
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	Faible tenue thermique (200 à 230 °C max)
Pas de résidus après incinération	Fibres anisotropes
Ressource renouvelable	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo...
Demande peu d'énergie pour être produite	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	Renfort discontinu
Bonne isolation thermique et acoustique	
Non abrasif pour les outillages	

1.5. Fibres d'origines animales

1.5.1. La laine



La laine est une fibre qui provient de la toison de divers ovins (moutons). Son observation à l'œil nu montre une forme frisée et élastique de couleur variable, du blanc au brun en passant par le jaune. Sa longueur varie entre 3 et 30 cm. Au microscope, la fibre présente une structure en canal irrégulier recouvert d'écaillles qui se chevauchent. À l'état brut, la laine est grasseuse, car elle est imprégnée de sécrétions animales, qui constituent jusqu'à 30 % de sa masse. En outre, la laine fraîchement tondue contient de nombreuses impuretés (débris végétaux, organiques et minéraux), qui doivent être éliminées avant l'utilisation de la fibre. Ces déchets peuvent représenter jusqu'à 70 % de sa masse. La laine est un produit animal essentiellement composé par des protéines, dont la principale est la kératine. On distingue plusieurs catégories de laines : mérinos, croisées, communes, d'agneau (lambswool). La laine d'agneau est constituée par la toison de la première tonte d'un mouton. Enfin, on peut également récupérer la toison d'animaux morts ou reconstituer la laine à partir de vieux tissus. La résistance de la laine est inférieure à celle de la plupart des autres fibres textiles. Par contre, son élasticité est très grande, et les tissus ne se froissent pratiquement pas. La laine présente une grande aptitude à la filature, car les fibres adhèrent bien les unes aux autres, de même qu'elle se mélange bien avec d'autres types de fibres. Son toucher est rêche et elle possède un remarquable pouvoir isolant.

1.5.2. La soie



La soie est constituée de filaments produits par des chenilles de papillons, tel le bombyx du mûrier. Pour protéger leur métamorphose, les chenilles tissent autour d'elles un cocon, à l'aide de leur glande séricigène (glande à soie). Ce cocon, une fois dévidé, donne le fil de soie. À l'œil nu, la fibre se compose d'un fil très long, entre 700 et 1 500 m, et très fin, à l'aspect brillant et doux. Comme la laine, la soie contient un mélange de protéines, notamment la fibroïne et la séricine qui représentent respectivement 65 % et 25 % du poids total, mais aussi de l'eau et des sels minéraux. La fibroïne est la soie proprement dite, les autres éléments étant plus ou moins complètement éliminés au cours de la préparation de la fibre. Celle-ci a une résistance élevée, du même ordre de grandeur que celle d'un fil d'acier à diamètre égal. Son élasticité est très grande, ce qui donne des tissus presque infroissables. La soie est un bon isolant thermique.

1.5.3. Le fil d'araignée



Les araignées produisent un fil constitué lui aussi de protéines. Ses performances mécaniques intéressent nombre de chercheurs pour la confection de textile technique ou pour le renforcement de matériaux composites. C'est uniquement chez les araignées sédentaires que les pièges (les toiles) existent. Les types et la nature des soies sont divers et dépendent de type d'araignée. Les soies d'araignée ont différentes fonctions telles que : la capture de proies, la reproduction et la détection des vibrations. Les performances mécaniques des soies d'araignée combinent résistance en traction, compression et ténacité. Les meilleures performances mécaniques mesurées sur des soies naturelles sont un module d'Young initial de 60 GPa, une contrainte à rupture de 2900 MPa et un allongement à rupture jusqu'à 200 %. Cet allongement à rupture en traction très important explique que, pour l'absorption d'énergie mécanique, les soies d'araignée sont inégalées dans le monde de fibres synthétiques ou naturelles [9].

1.5.4. Avantages et inconvénients des fibres animales

Les fibres animales présentent des propriétés spécifiques importantes telles que les propriétés mécaniques (résistance et rigidité), la biodégradabilité, leur origine renouvelable, etc.

Malgré ces avantages, les fibres animales ne sont pas beaucoup utilisées comme renfort dans les matériaux composites à cause de leur prix élevé et leur faible production.

1.6. Les fibres d'origine minérale

Les renforts d'origine minérale sont principalement à base de silicium les plus courants étant l'amiante et le basalte.

1.6.1. L'amiante

L'amiante est un hydrosilicate de magnésium contenant de fer, du sodium, ou du calcium selon la variété. Deux familles sont distinguées :

- la serpentine avec la chrysotile représentant 95 % de la production totale d'amiante. Elle a pour formule brute $Mg_6 [(OH)_4Si_4O_{11}]_2$
- l'amphibole avec
 - la crocidolite de formule brute $Na_2MgFe_5[(OH)Si_4O_{11}]$
 - l'amosite de formule brute $MgFe_8[(OH)Si_4O_{11}]_2$



L'amiante est généralement associée aux résines phénoliques en raison d'un bon accrochage. Elle peut être employée en combinaison avec les fibres de verre dans le but de diminuer le coût. Elle est également ajoutée aux fibres de sisal pour améliorer les propriétés du matériau.

Bien que les fibres d'amiante présentent de nombreux avantages, elles posent de sérieux problèmes d'hygiène et de sécurité. En effet, les fibrilles d'amiante favorisent l'action de produit cancérigène sur l'homme, elle est donc aujourd'hui soumise à une réglementation très stricte.

1.6.2. Le basalte



Le basalte est une roche volcanique issue d'un magma refroidi rapidement au contact de l'eau ou de l'air. C'est le constituant principal de la couche supérieure de la croûte océanique. Le mot basalte est emprunté du latin basaltis, lui-même probablement dérivé d'un terme éthiopien signifiant « roche noire ». Le basalte est mélanocrate à holomélanocrate (sombre à très sombre). Il a une structure microlithique, est composé essentiellement de plagioclases (50 %), de pyroxènes (25 à 40 %), d'olivine (10 à 25 %), et de 2 à 3 % de magnétite. Le basalte est issu de la fusion partielle, au niveau de la low velocity zone, d'une pyrolite hydratée.

Composition chimique	Masse (%) (basalte)	Masse (%) (verre)
SiO ₂	57.5	55
Al ₂ O ₃	16.9	15
Fe ₂ O ₃	9.5	0.3
CaO	7.8	18
MgO	3.7	3
Na ₂ O	2.5	0.8
TiO ₂	1.1	-
K ₂ O	0.8	0.2
B ₂ O ₃	-	7
F	-	0.3

Tableau 3 : composition chimique de basalte comparée à celle d'un verre [11]

Les fibres de basalte présentent des propriétés surprenantes : elles résistent au feu, comme les fibres de silice, de céramique ou de carbone, tout en étant beaucoup moins chères (trois à quatre fois moins chères que les fibres de silice). De par ces propriétés, les premières applications visées sont les protections anti-feu notamment pour l'ameublement, la construction, les câbles, etc.

Ces fibres sont également utilisées comme renforts dans les matériaux composites. Les producteurs mettent en avant leur résistance aux agressions chimiques et leur résistance en traction qui est supérieure d'environ 20 % à celle de la fibre de verre. Les fibres de basalte possèdent également une bonne mouillabilité et n'absorbent pas l'humidité. Les renforts peuvent se présenter sous différentes formes : tissés et non-tissés, tissus 3D et triaxiaux, tresses et filaments coupés. Ces caractéristiques pourraient leur ouvrir des applications dans les sports et loisirs ou dans l'automobile.

Les fibres de basalte présentent des avantages importants par rapport aux autres fibres tels que :

- une température d'utilisation élevée : 820 °C ;
- une bonne résistance au feu ;
- une contrainte et déformation rupture supérieures à celles de la fibre de verre ;
- un module d'YOUNG élevé (89 GPa) ;
- une très bonne résistance aux produits chimiques : acides forts, bases, solvants ;
- une très bonne résistance à la corrosion, aux rayonnements UV ;
- matériau inerte, non toxique, non cancérigène ;
- un prix compétitif par rapport à la fibre de verre.



Photo 2 : fibres de basalte

1.7. Comparaison des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres

Le tableau 4 présente le prix et les caractéristiques mécaniques en traction de différentes fibres d'origines naturelles ainsi que celles des fibres de renfort couramment utilisée pour le renforcement de matériaux composites courants. Les valeurs présentées sont issues de la littérature et, compte tenu du caractère naturel de ces fibres, on remarque des dispersions. Ces valeurs sont discutables car on note des différences pour un même type de fibre, en fonction des paramètres tels que l'origine, la variété, les conditions de croissance et de récolte des fibres, associés aux traitements qu'elles ont subis. Les fibres végétales pourraient constituer une alternative intéressante aux fibres de verre en raison notamment de leur légèreté et de leur faible impact environnemental. Les fibres de lin ou de chanvre sont, avec leur densité proche de 1,5, plus légères d'environ 40 % que les fibres de verre. Elles présentent, d'autre part, des propriétés mécaniques pouvant atteindre celles du verre en termes de résistance à la traction et de résilience. Leur fabrication nécessite jusqu'à 80 % d'énergie en moins que les fibres de verre. Au niveau économique, les fibres végétales sont beaucoup moins chères que les fibres synthétiques.

Fibres	E (GPa)	A (%)	σ_r (MPa)	Densité	Prix (euro/Kg)
Fibres synthétiques					
Verre E (Filament vierge)	72 - 73	4,6 - 4,8	3200 - 3400	2,54	1,5
Carbone(Toray T300)	230	1,5	3530	1,7 - 1,9	30
Aramide	124	2,9	3620	1,44	
Fibres végétales					
Lin	13 - 85	1 - 4	600 - 2000	1,54	0,56 - 0,61
Ramie	61,4 - 128	1,2 - 3,8	400 - 938	1,56	
Chanvre	35	1,6	389	1,07	0,60 - 1,30
Jute	26,5	1,5 - 1,8	393 - 773	1,44	0,27
Sisal	9 - 21	3 - 7	350 - 700	1,45	0,31
Noix de coco	4 - 6	15 - 40	131 - 175	1,15	0,23 - 0,80
Coton	5,5 - 12,6	7 - 8	287 - 597	1,5 - 1,6	
Fibres animales					
Ver à soie Attacus atlas	5	18	200		
Ver à soie Bombyx mori	16	15	650		
Araignée Argiope	7	30	600		
E : module d'Young en traction			A : allongement à rupture en traction		
σ_r : contrainte à rupture en traction					

Tableau 4 : comparaison de prix et des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres [9]

1.8. Les fournisseurs

32 fournisseurs des différentes fibres sous forme des tissus multiaxiaux, non tissés, mats, feutres ont été recensés. Les fibres les plus représentées sont essentiellement le chanvre et le lin.

La plupart des fournisseurs identifiés sont situés à l'étranger, essentiellement en Allemagne et en Hollande. Ces deux pays semblent en effet être assez avancés dans l'utilisation potentielle de fibres naturelles dans les matériaux composites. Il s'agit toutefois essentiellement de fournisseurs de fibres désireux d'augmenter la valeur ajoutée de leur produit et qui découvrent un nouveau marché : la transformation des matériaux composites.

Très peu de fournisseurs de fibres peuvent fournir des tissus réalisés avec des fibres naturelles et d'une manière générale, il est très difficile de pouvoir obtenir des échantillons, les produits étant en cours de développement pour l'industrie du composite.

Le secteur principal de débouchés de ces fournisseurs semble être le secteur automobile qui fournit de multiples applications en produits non tissés et compounds : lunettes arrières, revêtement de coffres, pièces sous capots, pièces de structure, pièces d'aspect, inserts, planches de bord. Ces pièces sont essentiellement réalisées avec une matrice thermoplastique.

En France, il existe très peu de fournisseurs de fibres naturelles. Nous avons toutefois pu identifier quelques entreprises dont AFT Plasturgie et Technilin.

AFT Plasturgie se positionne comme un acteur majeur pour la production de matériaux renforcés de chanvre à destination de la plasturgie. Cette société propose des compounds utilisant une large gamme de polymères thermoplastiques, renforcés de fibres cellululosiques. Le procédé breveté utilisé permet d'obtenir un renforcement optimal des pièces techniques, tout en garantissant leur légèreté, leur facilité de recyclage et leur compétitivité économique.

AFT Plasturgie propose aussi des non-tissés aiguilletés composés de fibres naturelles ou thermoplastiques ou de mélanges. Ils sont généralement mis en forme par thermo compression.

La société Technilin, située au cœur de la production linière normande, fabrique des feutres non tissés de 100 à 3000 g / m² pour l'industrie des matériaux composites.

Elle propose des non tissés à base de fibres de lin mélangées ou non à des fibres thermoplastiques et destinés essentiellement à l'industrie automobile.

1.8.1. Les renforts utilisés dans cette étude

Les renforts caractérisés dans cette étude sont présentés dans le tableau suivant :

Renforts	Module d'élasticité longitudinal (E_r) en GPa	Masse volumique de fibre (kg/m ³)	Masse surfacique (kg/m ²)
Chanvre 400 g / m ²	35	1480	0,40
Chanvre 600 g / m ²	35	1480	0,60
Chanvre 800 g / m ²	35	1480	0,80
Lin	60	1400	0,78
Basalte	89	3000	0,65

Ces renforts ont été comparés à des renforts utilisés de manière classique dans la fabrication de pièces composites.

Tissu de verre équilibré	74	2600	0,25
Mat de verre	74	2600	0,45
Rovimat	74	2600	0,85

2. Fabrication des éprouvettes

Afin de caractériser les renforts approvisionnés, des plaques composites ont été réalisées par deux technologies de mise en œuvre présentant des caractéristiques différentes.

En parallèle, des composites renforcés de fibres de verre ont été aussi fabriqués afin de pouvoir comparer les caractéristiques des différents matériaux composites obtenus.

Les éprouvettes nécessaires à la caractérisation des matériaux ont été ensuite découpées aux dimensions souhaitées à l'aide d'une scie diamantée.

2.1. Infusion

Le principe repose sur le dépôt, dans un moule femelle, des renforts secs (tissus, âmes, etc.) qui vont concevoir la pièce composite, et de créer un système étanche à l'air à l'aide d'une bâche à vide. L'infusion consiste ensuite à injecter de la résine, par dépression réalisée sur la pièce, sur les tissus déposés à sec. Un descriptif complet de cette méthode de mise en œuvre est donné en sur le glossaire des matériaux composites.

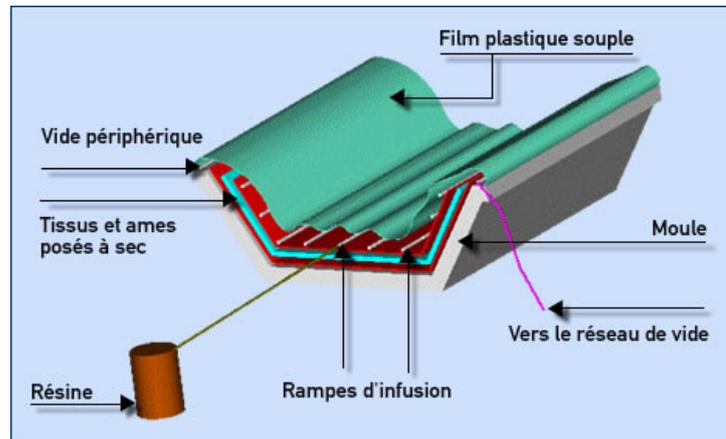
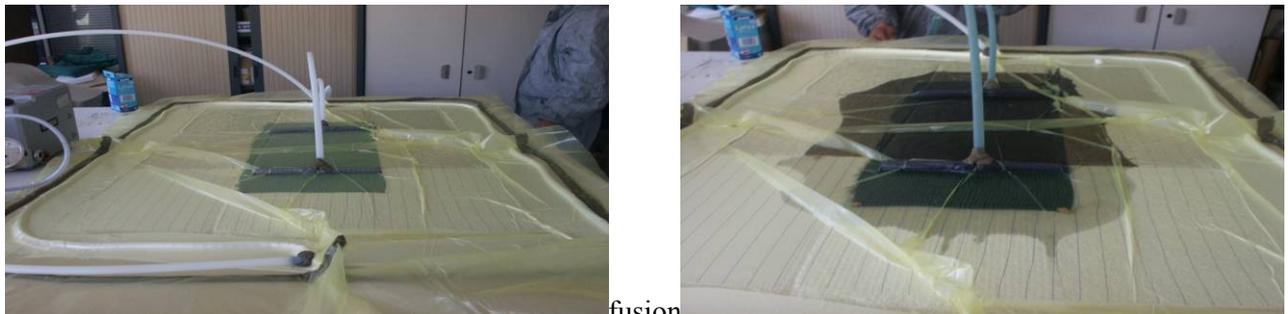


Figure 5 : schéma de principe de l'infusion

L'infusion permet d'obtenir un taux de renfort important, qui varie en fonction de la dépression appliquée sur la pièce et d'assurer l'homogénéité du composite.

L'ensemble des plaques composites a été réalisé, pour une même condition de dépression, lors d'une seule infusion afin d'assurer la reproductibilité des conditions de fabrication des différents échantillons.

Deux essais ont été réalisés à 0,5 et 0,8 bars.



2.2. Moulage au contact

Le moulage au contact est la technologie de mise en œuvre la plus utilisée dans le secteur de la transformation des matériaux composites.

Le principe consiste à imprégner les renforts secs, disposés dans un moule, de résine accélérée et catalysée. Une phase de débullage, à l'aide d'un rouleau est nécessaire afin d'éliminer les inclusions d'air dans la pièce.

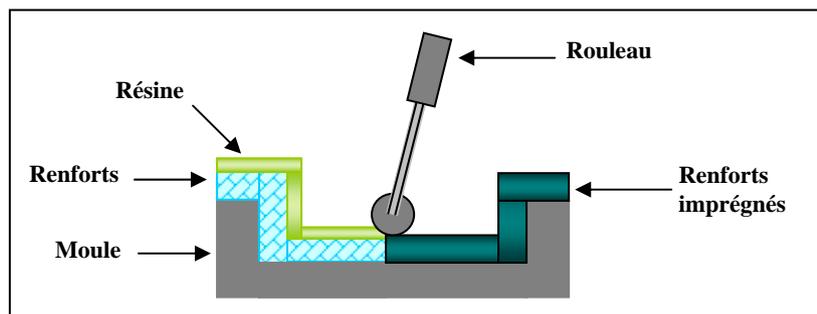


Figure 5 : schéma de principe du moulage au contact

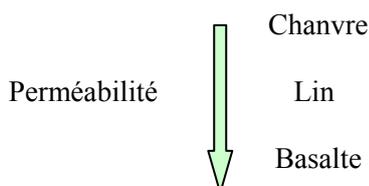
Cette technologie ne nécessite aucun investissement et est très facile d'apprentissage.

En revanche, le moulage au contact présente des inconvénients majeurs par rapport à la fabrication des éprouvettes. Contrairement à l'infusion, les taux de renfort restent assez faibles avec cette technologie de mise en œuvre (la quantité de résine nécessaire pour le mouillage de la fibre doit être importante) et l'homogénéité de la pièce dépend fortement de l'opérateur qui stratifie la pièce composite.

La réalisation des éprouvettes réalisées selon cette technologie a permis de vérifier la bonne mouillabilité du basalte et du lin. En revanche, les renforts de chanvre se mouillent difficilement.

La fabrication des éprouvettes a permis de comparer la perméabilité des différents renforts utilisés.

Parmi les renforts, il est possible de classer de manière croissante les matériaux par leur perméabilité de la manière suivante :



Le taux de renfort varie selon la technologie de mise en œuvre et le type de renfort. L'infusion permet d'obtenir un composite de taux de renfort plus élevé que le moulage au contact et ce phénomène est s'expliqué par de la dépression appliquée sur la pièce au court de l'infusion. Aussi le taux de renfort est plus élevé pour les composites renforcés par le verre car la densité de celui ci est plus élevée que à celle des autres fibres.

Le tableau suivant montre la différence de taux de renfort entre les deux technologies.

Technologies	Moulage au contact	Infusion (0,5 bar)	Infusion (0,8 bar)
	Taux massique de renfort (%)		
Chanvre 400 g / m ²	9,3 ± 0,2	18,7 ± 0,2	14,1 ± 0,2
Chanvre 600 g / m ²	10,7 ± 0,2	20,5 ± 0,2	20,2 ± 0,2
Chanvre 800 g / m ²	11,4 ± 0,2	20,5 ± 0,2	22,3 ± 0,2
Lin	14,4 ± 0,2	22,3 ± 0,2	19,9 ± 0,2
Basalte	11,3 ± 0,2	21,4 ± 0,2	24,7 ± 0,2
Tissu de verre équilibré	58,4 ± 0,2	63,8 ± 0,2	63,5 ± 0,2
Mat de verre	49,1 ± 0,2	50,6 ± 0,2	57,6 ± 0,2
Rovimat	47,1 ± 0,2	59,2 ± 0,2	61,3 ± 0,2

Tableau 5 : comparaison de taux de renfort entre les différentes technologies

3. Caractérisations des composites réalisées

Pour les composites comme pour tous les matériaux, les propriétés mécaniques sont essentielles car elles permettent le dimensionnement et la conception de structure qui doivent durer dans le temps. Afin de caractériser les propriétés mécaniques du matériau avec les différentes fibres, nous avons choisi trois types d'essais mécaniques :

- essais de dureté ;
- essais de flexion 3 points ;
- mesure de la densité.

3.1. Dureté Barcol

3.1.1. Principe



La mesure est basée sur la pénétration, dans l'échantillon, d'un cône tronqué sur laquelle est exercée un effort constant. La dureté est fonction de cet enfoncement. Le cadran indicateur possède 100 échelons, chacun représentant une profondeur de pénétration de 0,0076 mm. Ainsi plus la valeur lue sur le cadran est élevée, plus le matériau est dur.

3.1.2. Traitement des résultats

Afin de respecter la norme AFNOR NF T57-106 s'appliquant aux mesures de la dureté Barcol, il faut effectuer un certain nombre de relevés afin que le résultat moyen obtenu soit connu avec une limite de confiance de $\pm 4\%$ pour un niveau de confiance de 95 %.

Le niveau de confiance définit un intervalle de confiance dans lequel la valeur réelle à p % de chance de se trouver. Dans le cas de ce calcul, p = 95%.

Les calculs théoriques démontrent que l'écart type doit être majoré par un facteur multiplicatif (t) d'autant plus grand que le nombre de mesures est faible et l'exigence de fiabilité grande :

A une limite de confiance de p % correspond l'intervalle :

$$\text{valeur moyenne} \pm \frac{t \times \text{Ecart type}}{\sqrt{\text{Nombre d'essais}}}$$

t est appelé t statistique ou t de Student.

On trouve dans les ouvrages de statistique des tableaux complets donnant t en fonction du nombre d'essais et des limites de confiance.

L'application de tous ces calculs a été réalisée à l'aide d'un fichier Excel permettant de savoir très rapidement si nos essais sont conformes à la norme, ou si il faut continuer les relevés.

3.1.3. Interprétation des résultats

La mesure de la dureté Barcol a été effectuée au laboratoire de CARMA. Les résultats sont recensés dans le tableau ci-dessous.

	Moulage au contact		Infusion (0,5 bar)		Infusion (0,8 bar)	
	Dureté moyenne Barcol	Intervalle de confiance (%)	Dureté moyenne Barcol	Intervalle de confiance (%)	Dureté moyenne Barcol	Intervalle de confiance (%)
Polyester	37					
Chanvre 400 g / m ²	37	± 1,92	30	± 3,63	20	± 5,59
Chanvre 600g / m ²	37	± 1,57	32	± 3,11	21	± 5,32
Chanvre 800 g / m ²	34	± 3,28	32	± 2,83	23	± 7,40
Lin	34	± 2,89	31	± 4,55	18	± 4,54
Fibre de bois	38	± 1,59				
Basalte	37	± 3,45	47	± 1,37	44	± 2,08
Tissu de verre équilibré	62	± 2,11	63	± 5,71	64	± 1,54
Mat de verre	58	± 1,42	58	± 1,79	57	± 2,25
Rovimat	59	± 2,68	56	± 2,08	61	± 2,33

Tableau 6 : mesure de dureté Barcol

Les valeurs de la dureté de Barcol indiquées respectent les critères de la norme AFNOR NF T57-106 pour les deux technologies de mise en œuvre.

Ces mesures montrent que les plaques de résine semblent complètement réticulées. Une chute de dureté peut se remarquer sur quelques échantillons. Ce phénomène peut s'expliquer par l'hétérogénéité de composite due aux facteurs liés aux renforts (mouillabilité, traitement etc.).

3.2. Mesure de densité

Cet essai permet de déterminer la densité d'un matériau en utilisant la poussée d'Archimède.

Le calcul de la densité et de l'incertitude relative de la mesure ont été évalués à partir de relations spécifiques.

3.2.1. Interprétation des résultats

Les mesures de densité ont été réalisées avec le densimètre du laboratoire du CARMA.

Les différentes mesures ont été effectuées sur trois éprouvettes représentatives de chaque composite réalisé. Les résultats expérimentaux ont été comparés avec les résultats théoriques calculés selon les relations décrites précédemment.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

	Infusion (0,8 bar)		Infusion (0,5 bar)		Moulage au contact	
	Densité théorique	Densité expérimentale	Densité théorique	Densité expérimentale	Densité théorique	Densité expérimentale
Chanvre 400 g / m ²	1,233	1,099 ± 0,060	1,244	1,115 ± 0,079	1,222	1,147 ± 0,053
Chanvre 600 g / m ²	1,248	1,142 ± 0,052	1,249	1,180 ± 0,070	1,225	1,153 ± 0,058
Chanvre 800 g / m ²	1,253	1,098 ± 0,065	1,248	1,189 ± 0,047	1,227	1,159 ± 0,072
Lin	1,235	1,125 ± 0,081	1,240	1,152 ± 0,089	1,225	1,131 ± 0,043

Basalte	1,409	1,352 ± 0,074	1,377	1,353 ± 0,075	1,288	1,274 ± 0,037
Tissu de verre équilibré	1,824	1,871 ± 0,151	1,829	1,910 ± 0,145	1,750	1,842 ± 0,131
Mat de verre	1,740	1,722 ± 0,095	1,649	1,723 ± 0,142	1,632	1,620 ± 0,090
Rovimat	1,792	1,825 ± 0,102	1,763	1,732 ± 0,121	1,608	1,628 ± 0,106

Tableau 7 : mesure de densité

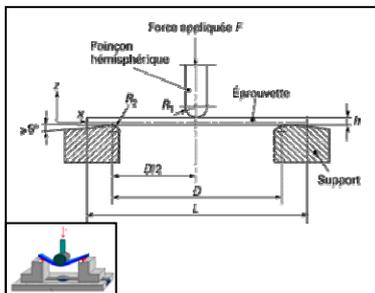
Nous constatons d'après les valeurs de densité reportées dans le tableau ci dessus que les valeurs expérimentales des composites réalisés correspondent aux valeurs théoriques quelques soient les technologies de mise en œuvre utilisées.

On remarque aussi que les composites renforcés par les fibres végétales (chanvre, lin) sont plus légers que les composites renforcés par les fibres de verre, ce qui s'explique par la faible densité de ces fibres par rapport aux fibres de verre.

Les composites renforcés de fibres végétales ou de basalte présentent des avantages en terme de légèreté par rapport aux fibres de verre.

3.3. Flexion trois points

3.3.1. Principe



Le principe de cet essai est de mesurer un déplacement (flèche y) à partir d'un effort (F) placé au milieu de deux appuis. Des relations issues de la résistance des matériaux permettent de faire le lien entre ces deux grandeurs (y et F), la géométrie de la pièce (L, h et b) et les caractéristiques du matériau (σ , ε et E).

L'éprouvette parallélépipédique, supportée comme une poutre, est soumise à une flexion, au milieu de la portée (flexion 3 trois points), à une vitesse constante, jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Les différentes caractéristiques peuvent être estimées grâce aux relations suivantes :

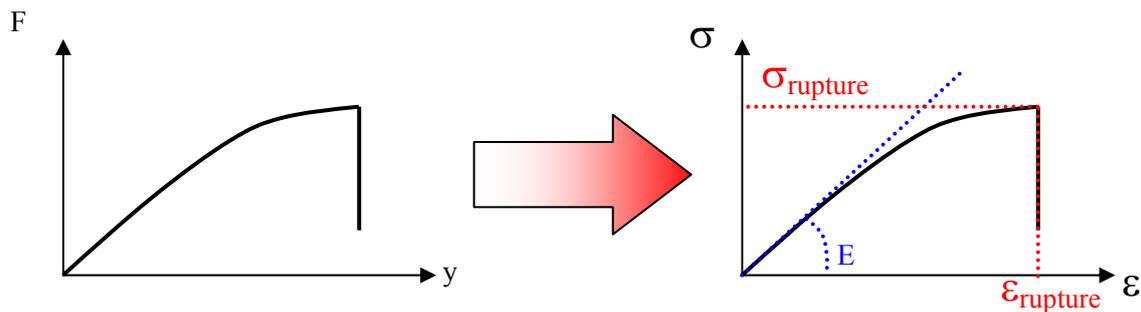
$$\sigma_f = \frac{3.F.D}{2.b.h^2} \qquad \varepsilon_f = \frac{6.h.Y}{D^2} \qquad E = \frac{D^3.F}{4.b.h^3.y}$$

Caractéristiques du matériau en fonction de l'effort (F), la flèche (y) et la géométrie de l'éprouvette (b,h) et de la portée choisie (D).

Ces essais ont été réalisés selon la norme ISO 14125

3.3.2. Traitement des résultats

A partir des courbes obtenues ($\sigma = f(\varepsilon)$), le module de flexion, la contrainte à la rupture ainsi que la déformation à la rupture ont été déterminés. Pour des essais de flexion réalisés selon les normes, (dimensions des éprouvettes, de la portée, etc.) le cisaillement est négligeable dans l'éprouvette ce qui permet de considérer le module de flexion équivalent au module de Young (E).



3.3.3. Interprétation des résultats

Nous avons donc estimé les modules de flexion et la contrainte à la rupture de chaque composite pour les deux technologies de mise en œuvre.

- **Moulage au contact**

Les résultats sont recensés dans le tableau ci dessous

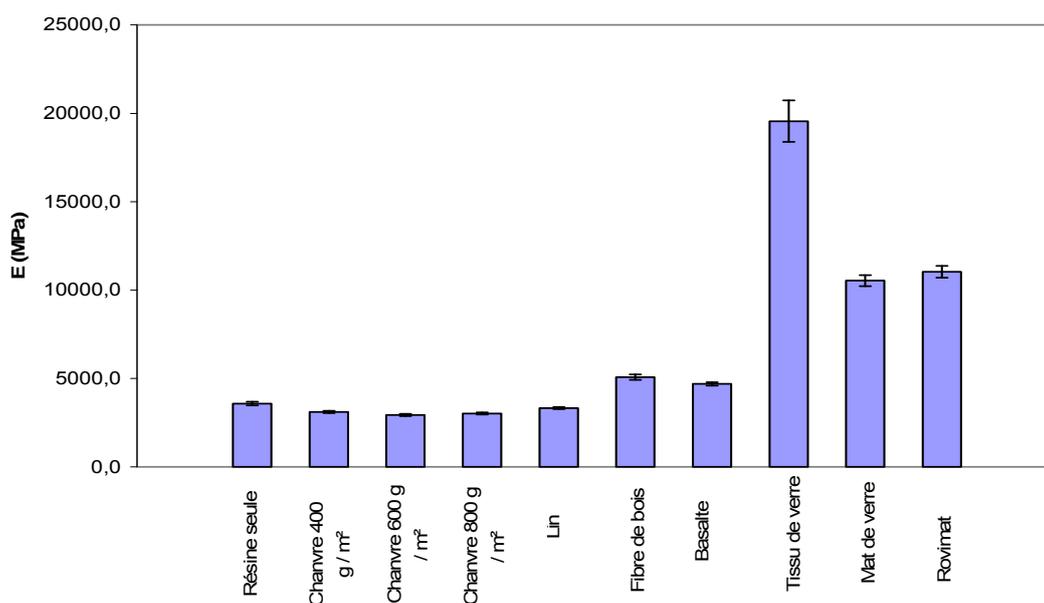
	Contrainte moyenne à la rupture (MPa)	Ecart type (MPa)	Moyenne module de Young (MPa)	Ecart type (MPa)
Résine seule	82	2	3578 ± 107	230
Chanvre 400 g/m ²	29	1	3108 ± 62	715
Chanvre 600 g/m ²	32	8	2935 ± 59	241
Chanvre 800 g/m ²	29	5	3017 ± 60	345
Lin	51	3	3329 ± 67	306
Fibre de bois	57	3	5073 ± 152	321
Basalte	72	5	4694 ± 141	92
Tissu de verre équilibré	408	26	19555 ± 782	779
Mat de verre	261	2	10536 ± 316	903
Rovimat	282	23	11031 ± 441	321

Tableau 8 : mesure de module de Young

Pour cette technologie de mise en œuvre, on remarque une amélioration des caractéristiques mécaniques des composites renforcés par les fibres de basalte et de bois par rapport à celles de la résine seule. En revanche, les composites renforcés par le chanvre et le lin présentent des caractéristiques mécaniques du même ordre de grandeur, voire plus faibles que la résine seule.

Les fibres végétales et le basalte présentent des caractéristiques mécaniques assez médiocres comparées au verre pour cette technologie de mise en œuvre. Le graphe suivant nous montre la différence entre les différents modules.

Comparaison de module de Young



Infusion

Nous avons calculé les modules de flexion et la contrainte à la rupture pour les plaques réalisées en infusion à 0,5 et 0,8 bars.

Les résultats sont recensés dans les tableaux ci dessous

	Contrainte moyenne à la rupture (MPa)	Ecart type (MPa)	Moyenne module d'Young (MPa)	Ecart type (MPa)
Chanvre 400 g/m ²	28	4	3050± 122	219
Chanvre 600 g/m ²	51	5	4321± 129	295
Chanvre 800 g/m ²	50	9	4242 ± 0,03	588
Lin	57	6	4804± 127	186
Basalte	71	18	5177± 155	481
Tissu de verre équilibré	477	4	25444 ± 1018	1178
Mat de verre	270	15	13573 ± 407	1059
Rovimat	375	10	23833 ± 953	1743

Tableau 9 : mesure de module de Young (infusion 0,5 bar)

	Contrainte moyenne à la rupture (MPa)	Ecart type (MPa)	Moyenne module d'Young (MPa)	Ecart type (MPa)
Chanvre 400 g/m ²	46	6	3313 ± 99	1023
Chanvre 600 g/m ²	51	8	4395± 132	618
Chanvre 800 g/m ²	39	3	3213± 96	405
Lin	62	8	4237± 127	921
Basalte	142	39	6243± 187	272
Tissu de verre équilibré	496	39	23803 ± 852	396
Mat de verre	198	10	15224± 609	1119
Rovimat	359	26	21782± 1089	3135

Tableau 10 : mesure de module de Young (infusion 0,8 bar)

Pour cette technologie de mise en œuvre, on remarque une amélioration des caractéristiques mécaniques des composites renforcés par les fibres végétales et les fibres de basalte par rapport à la résine seule.

En revanche, ces caractéristiques mécaniques restent toujours assez médiocres comparées à celles des composites renforcés par les fibres de verre.

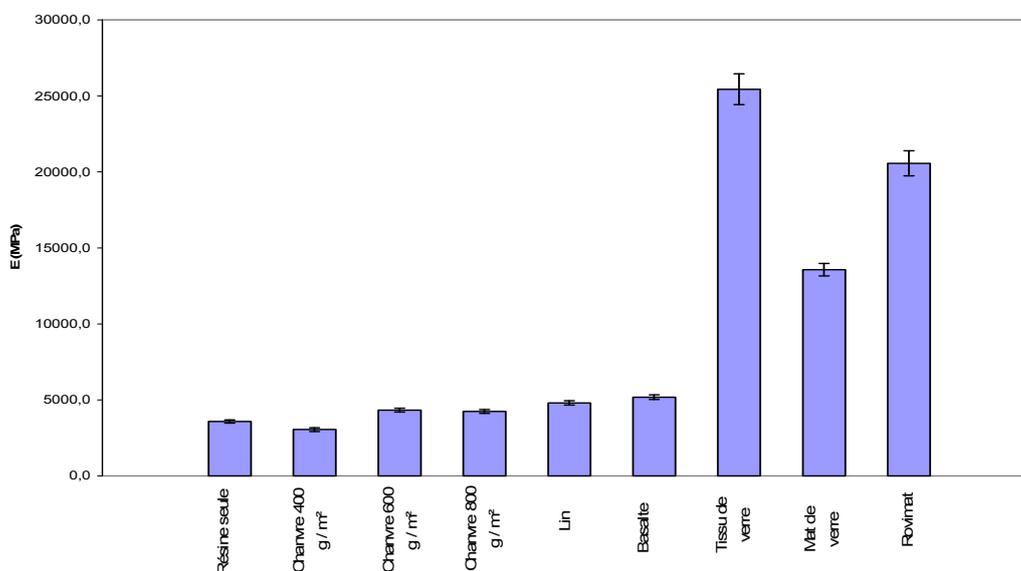
Pour les deux types d'infusion (0,5 et 0,8 bars), on n'observe pas de grande différence pour l'ensemble des renforts, sauf pour le basalte qui a un module d'Young plus élevé pour l'infusion à 0,8 bar.

Ces essais permettent aussi de vérifier que l'infusion permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques plus élevées que celles obtenues par moulage au contact.

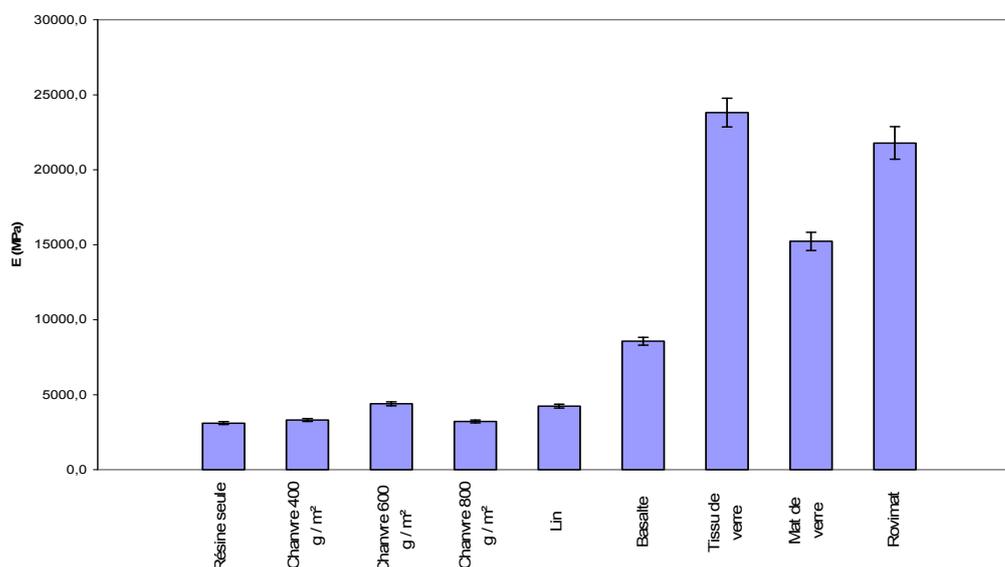
Ce renforcement s'explique par l'augmentation de taux de renfort pour l'infusion, dû au compactage des tissus par la dépression exercée sur ces derniers.

Les graphes suivants nous montre la différence de valeur des modules obtenus dans les différents cas.

Comparaison de module de Young (infusion 0,5 bar)



Comparaison de module de Young (infusion 0,8 bar)



Les fibres végétales (chanvre et le lin) et le basalte présentent de nombreux avantages (faible coût, biodégradabilité, ressource renouvelable.) par rapport aux fibres de verre. Malgré ces avantages, les composites renforcés par ces fibres ne présentent pas des propriétés mécaniques importantes.

Le rapport E / d (module / densité) est un paramètre important pour comparer les propriétés mécaniques d'un matériau. Dans notre étude le calcul de ce rapport montre que le composite renforcé par les fibres de chanvre, lin et basalte est moins important que celui obtenu dans le cas du composite renforcé par les fibres de verre au niveau de propriétés mécaniques. Les résultats sont recensés dans le tableau ci-dessous.

Ces types de fibres peuvent être utilisés pour diminuer le coût car leurs prix sont est moins élevés que celui de la résine, mais non pas pour améliorer les caractéristiques mécaniques du matériau composite.

Technologies	Moulage au contact			Infusion (0,5 bar)			Infusion (0,8 bar)		
	densité	Module (MPa)	E / d (MPa)	densité	Module (MPa)	E / d (MPa)	densité	Module (MPa)	E / d (MPa)
Chanvre 400 g / m ²	1,15	3108	2709	1,12	3050	2735	1,10	3313	3014
Chanvre 600 g / m ²	1,15	2935	2545	1,18	4321	3661	1,14	4395	3849
Chanvre 800 g / m ²	1,16	3017	2603	1,19	4242	3569	1,10	3213	2927
Lin	1,13	3329	2944	1,15	4804	4169	1,13	4237	3765
Fibre de bois	1,19	5073	4263						
Basalte	1,27	4694	3686	1,35	5177	3827	1,35	6243	4619
Tissu de verre équilibré	1,84	19555	10617	1,91	25444	13323	1,87	23803	12720
Mat de verre	1,62	10536	6503	1,72	13573	7876	1,72	15224	8843
Rovimat	1,63	11031	6775	1,73	23833	13763	1,82	21782	11937

Tableau 11 : synthèse des propriétés des différents renforts

4. Conclusions et perspectives

Les fibres naturelles présentent de nombreux avantages par rapport aux fibres synthétiques (faible coût, ressource renouvelable, biodégradabilité, propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)). En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau du développement industriel tels que, la méthode de mise en oeuvre difficilement reproductible (non industrielle, des propriétés physiques non reproductibles, la quantité et la qualité des fibres dépendent de l'environnement et de l'humidité ainsi actuellement ces fibres sont en cours de développement. La plupart des fournisseurs de ces fibres sont situés à l'étranger, essentiellement en Allemagne et en Hollande. Ces deux pays semblent en effet être assez avancés dans l'utilisation potentielle de fibres naturelles dans les matériaux composites. En France, il existe très peu de fournisseurs de fibres naturelles. Nous avons toutefois pu identifier quelques entreprises dont AFT Plasturgie et Technilin.

Après les différents essais (densité, dureté, flexion) réalisés sur les composites renforcés par ces fibres, on peut conclure que les caractéristiques mécaniques des composites renforcés par les fibres de lin, chanvre et basalte sont inférieures à celles renforcés par les fibres de verre, ce qui explique les développements limités de ces fibres dans le domaine du composite. Ces types de fibres peuvent être utilisés pour diminuer le coût car ils sont moins chers que la résine mais non pour améliorer les caractéristiques mécaniques.

Les composites renforcés par des fibres naturelles sont encore peu utilisés et en court de développement. Pour le développement à grande échelle, les efforts portent actuellement sur :

- la mise en place de filière de production et de distribution pour répondre aux besoins de l'industrie ;
- l'augmentation des connaissances sur ces matériaux (performances, gestion, maîtrise de la biodégradabilité, identifications de ces structures complexes...) sachant qu'il existe des fibres végétales ;
- la mise en place de filières de recyclage (de démontage et gestion des déchets) ;
- la mise en point de biopolymères ayant un coût compétitif ;
- le développement de technologies industrielles pour transformer ces fibres végétales (comme on sait le faire dans l'industrie textile, papetière et du bois).

5. Bibliographie

- [1] : HALADA (K) Progress of ecomaterials toward a sustainable society. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 7 (3), p. 209-216 (2003)
- [2] : www.theses.ulaval.ca (Jodin, 1994)
- [3] : www.theses.ulaval.ca (Rowell et al, 1997)
- [4] : www.theses.ulaval.ca (Pavithran et al, 1987 ; Mukhersee et Satyanarayana, 1986)
- [5] : www.theses.ulaval.ca (English et al, 1994)
- [6] : www.theses.ulaval.ca (Rowell et al, 1997 ; Banks et Lawther, 1994)
- [7] : MOHANTY (A.K), MISRA (M) et HINRICHSEN (G) Biofibres, Biodégradable polymers and biocomposites: an overview. Macromolecular Materials and Engineering, 276/277, p 1-24 (2000)
- [8] : BLEDZKI (AK) et GASSAN (J) Composites reinforced with cellulose based fibers. Progress in polymer Science, 24 p 221-274 (1999)
- [9] : Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites, Christophe BALEY , 2004, REF AM5 130 , Techniques de l'ingénieur
- [10] : BROUWER, W.D. « Natural Fibre Composites in Structural Components: Alternative Applications for Sisal
- [11] : <http://www.basaltex.com>
- [12] : www.madagascar-nosybe.com
- [13] : www.voilier-guerveur.com/