

# *Veille Technologique et d'Intelligence Économique*

FAVRE Camille  
FORTECOËF Aurégan  
JUST Mario  
LEBRET Louise  
M'BENGUE Marie-Stella

---

## Biocomposites thermoplastiques à base de fibres végétales dans le secteur de l'automobile

*Caractéristiques techniques ; Comparaison avec les composites à base de fibre de  
verre ou de carbone ; Acteurs et enjeux économiques*

---

2<sup>ème</sup> année - Option Ingénierie de Fibre et des Biomatériaux  
Soutenance le 28 mai 2018

*Mai 2018  
Saint-Martin d'Hères, Isère  
Grenoble INP- Pagora*

# SOMMAIRE

---

## I) Composites thermoplastiques dans l'automobile : définitions et généralités

<b>I.1) Pièces en composites dans l'automobile et propriétés recherchées</b>	
I.1.a Les propriétés physiques attendues	3
I.1.b La pluri-diversité des matériaux dans l'automobile	5
I.1.c L'évolution de la place des composites dans l'automobile	6
<b>I.2) Définitions</b>	
I.2.a Composites	7
I.2.b Thermoplastiques ; thermodurcissables	9
I.2.c Biocomposites	10
<b>I.3) Caractéristiques des composites</b>	
I.3.a Tests de comparaison et normes	10
I.3.b Affinité entre matrices polymériques et renforts fibreux	11

## II) Présentation technique des fibres

<b>II.1) Fibres de verre / carbone</b>	
II.1.a Fabrication	13
II.1.b Propriétés physiques intrinsèques	14
<b>II.2) Fibres naturelles</b>	
II.2.a Culture et extraction	15
II.2.b Propriétés physiques intrinsèques	17
<b>II.3) Comparaison</b>	
II.3.a Mise en oeuvre des composites - traitement de surface	20
II.3.b Propriétés mécaniques et physico-chimiques	21
II.3.c Propriétés environnementales	22

## III) Analyse économique et stratégique

<b>III.1) Composites</b>	
III.1.a Marché actuel des composites dans le secteur automobile	23
III.1.b Facteurs de développement / facteurs limitants et coûts	24
III.1.c Réglementations et aspects environnementaux	25
<b>III.2) Biocomposites</b>	
III.2.a Entrée des biocomposites sur le marché	26
III.2.b Diagramme de Porter, chaîne de valeurs, SWOT	28
III.2.c Impact environnemental et réglementations	30
<b>III.3) Prospectives</b>	
III.3.a Scénario tendanciel	31
III.3.b Scénario optimiste	32
III.3.c Scénario pessimiste	32

# *Introduction :*

Les composites constituent un vaste marché qui connaît actuellement une croissance rythmée d'une part par une forte compétitivité, et d'autre par l'organisation de la chaîne de valeurs. Comme tout autre marché, ce secteur nécessite la maîtrise du cycle de vie des produits, de la source à la fin de vie, ce qui favorise notamment l'essor des éléments biosourcés. Ainsi, les biocomposites contenant des fibres naturelles voient leur volume de production augmenter rapidement.

Cette étude a pour ambition de comparer les caractéristiques techniques des biocomposites à base de fibres végétales, à celles des composites plus classiques à base de fibres de verre ou de carbone dans le domaine de l'automobile.

Les comparaisons de ces matériaux se feront sur divers plans. En effet, des distinctions seront faites par l'étude de leur marché (acteurs, secteurs industriels, viabilité économique, domaine d'application) mais également par leurs caractéristiques physiques (propriétés, avantages, inconvénients). Enfin, nous nous pencherons sur de véritables problématiques techniques tout au long de cette étude, comme par exemple la mise en forme de tels matériaux à l'échelle industrielle dans le secteur de l'automobile.

→ **Dans quelle mesure les biocomposites contenant des fibres végétales peuvent-ils investir le marché automobile, voire supplanter les composites déjà présents sur ce marché (à base de fibres de verre et de carbone) ?**

Élèves ingénieurs à Grenoble INP - Pagora, nous avons arbitrairement fait le choix de restreindre le sujet de la manière suivante :

- Les fibres naturelles, trop nombreuses pour être toutes traitées, seront représentées par les fibres de lin et de chanvre en particulier.
- Les applications des fibres de verre et de carbone se limiteront au domaine de l'automobile.

*Étude supervisée par nos enseignants :*

- Raphaël PASSAS
- Jocelyne ROUIS

## *I) Composites thermoplastiques dans l'automobile : définitions et généralités*

Cette étude se limite au secteur de l'automobile qui représente l'industrie influençant le plus l'économie mondiale. Par ailleurs, ce marché constitue une conséquence directe de l'accroissement de la population de par leur désir d'accéder à ce bien de consommation traduisant le niveau de vie. Dans un monde se disant vouloir préserver la planète, ces liens de cause à effet forment donc une réelle contradiction. En ce sens, la technologie jusqu'alors utilisée doit impérativement évoluer.

### **I.1) Pièces en composites dans l'automobile et propriétés recherchées**

#### **I.1.a Les propriétés physiques attendues**

Les propriétés attendues d'un composite sont nombreuses. Afin d'améliorer toute comparaison entre différents composites, il semble nécessaire de recenser les propriétés attendues d'un composite au sein du domaine de l'automobile. En effet, le secteur de l'automobile suscite de grands intérêts d'amélioration de part sa place énorme dans notre vie au quotidien. Nombreuses réglementations permettent de guider les avancées et recherches dans ce secteur. Ces dernières se regroupent en quatre domaines d'attentes [4 : eduscol, 2011].

- Emission sonore :

L'utilisation sans limite de voitures par une grande part de la population mondiale impose la réglementation d'émissions sonores, particulièrement dans les zones urbaines. Ainsi, les voitures doivent avoir une faible émission sonore du moteur vers l'extérieur. Des matériaux répondent ainsi à ces critères par l'acquisition de propriétés d'amortissements élevées. Il est donc possible de les utiliser pour remplacer les organes mécaniques métalliques ou alors de les utiliser en tant qu'écran acoustique sous forme de carénage sous moteur par exemple.

- Sécurité :

Lors des accidents de la route, ou au moindre choc, la carrosserie doit minimiser les impacts sur l'homme. Les chocs peuvent être à basse ou haute vitesse dans des configurations frontales, décalées, latérales ou arrière. En somme, les matériaux doivent assurer la sécurité sous tous les angles. De même, le matériau doit protéger au mieux aussi bien les conducteurs que les piétons. L'amélioration de l'impact du crash se fait grâce à des matériaux présentant une forte capacité d'absorption progressive d'énergie permettant un endommagement moins brutal.

- Environnement, pollution :

Le développement durable étant devenu nécessaire, l'application et l'utilisation de tout produit de consommation doivent être pensées dans une optique de réduction de leur impact environnemental. Le domaine automobile est responsable de l'augmentation de la pollution par les gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>). Pour remédier à ce problème des plus conséquents, il est nécessaire de diminuer la cylindrée des moteurs. Néanmoins les performances de la voiture dépendent principalement du moteur et de la masse à déplacer. Ainsi pour un moteur réduit et une masse de véhicule constante le client risque d'être déçu de la capacité de sa voiture. Il semblerait donc primordial de diminuer la masse de la voiture pour demeurer à iso-performance avec de plus petits moteurs. La réglementation européenne prévoit de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> à 130 g/km en 2015 et 95 g/km en 2020. Notons de plus qu'il est communément admis qu'une diminution de masse de 100kg réduit la consommation de carburant de 0,4L/100km ou les émissions de CO<sub>2</sub> de 10g/km. Les composites présentent l'avantage de diminuer considérablement la masse des structures.

- Environnement, recyclabilité :

L'utilisation de l'analyse de cycle de vie est un outil permettant de quantifier le flux de matière et d'énergie dépensé pour un objet. La consommation directe d'un objet n'est plus le seul critère à prendre en compte, depuis les années 90. A ceci s'ajoute la consommation de matière première et d'énergie lors de sa fabrication, sa recyclabilité, sa durée de vie. Tout est pris en compte de l'extraction de la matière première jusqu'à la fin de vie. Ainsi depuis 2005, les nouveaux véhicules devront être valorisables de 95% avec 85% de recyclage et de réemploi [5 : technique de l'ingénieur, 2011]. Il faut donc des pièces recyclables, sans oublier la volonté de fabriquer des voitures avec une longue vie en limitant le risque de corrosion de surface. Notons que les principales sources de pollution liées au cycle de vie de l'automobile correspondent à la phase d'utilisation des véhicules en termes de rejets atmosphériques et de consommation énergétique vue dans le point précédent.

## I.1.b La pluri diversité des matériaux dans l'automobile

La création d'un véhicule se base sur l'assemblage de plusieurs dizaines de milliers de pièces élémentaires réunies en organes. Il est possible de diviser le corps de la voiture en quatre parties : la carrosserie, le groupe, le motopropulseur, le châssis. Il existe un panel de matériaux utilisables pour cette construction. Les métaux sont les matériaux les plus présents au sein d'une voiture. En effet, ils ont de bien meilleures propriétés mécaniques et trouvent également leurs atouts dans leur processabilité (figure 1). Néanmoins, le fait que 75% de la masse d'une voiture soit imputable au poids des matériaux métalliques - acier, fonte, aluminium principalement [7 : industrie, 2016] - la substitution des métaux dans une voiture constitue une réelle piste d'amélioration. Notons de plus qu'environ 73% des émissions de CO<sub>2</sub> sont liées à son usage contre 15% lors de sa production [7 : industrie, 2016]. Ainsi, l'industrie automobile est à la recherche de nouveaux matériaux. Ce changement peut répondre aux exigences législatives de plus en plus restrictives quant aux rejets de CO<sub>2</sub>.

	Métaux	Céramiques	Polymères	Composites
<b>Densité</b>	Moyenne Elevée	Moyenne	Faible Très faible	Moyenne Faible
<b>Prix</b>	Faible Elevé	Elevé (techniques) Faible (gde diffusion)	Faible Elevé	Elevé
<b>Elasticité</b>	Elevée	Très élevée	Moyenne Faible	Elevée
<b>Résistance mécanique</b>	Elevée	Très élevée (compression)	Moyenne Faible	Elevée
<b>Tolérance aux défauts et aux chocs</b>	Très tenace	Très fragile	Peu tenaces mais grande énergie absorbée	Très tenaces
<b>Température d'utilisation</b>	Moyennes Hautes	Hautes Très hautes	Moyennes Faibles	Moyennes
<b>Tenue aux Agressions chimiques</b>	Moyennes Mauvaise	Bonne Très bonne	Moyenne	Moyenne
<b>Conduction de la chaleur</b>	Bonne Très Bonne	Moyenne Faible	Faible Très faible	Faible
<b>Conduction de l'électricité</b>	Bonne Très bonne	Faible Très faible		
<b>Facilité de mise en forme</b>	Facile	Difficile (techniques) Facile (gde. diffusion)	Très facile	Moyenne dépendant de la forme
<b>Facilité d'assemblage</b>	Facile	Moyenne	Facile	Difficile

Figure 1 : Comparaison des différents matériaux utilisables dans le domaine de l'automobile. [6]

D'après la figure 1 ci-dessus, il existe différentes catégories de matériaux utilisés : métaux, inorganiques / non-métalliques, polymériques. Ils nécessitent des sciences bien distinctes, telles la métallurgie ou la science macromoléculaire. Les procédés et les savoirs-faire automobiles sont donc à retravailler dans leur fond, la documentation à ce sujet reste à améliorer. Même si les constructeurs automobiles fondent beaucoup d'espoir sur les composites pour substituer les pièces en aluminium/acier, ce challenge n'est pas encore surmonté. En effet, ceux-ci ne sont pas à la hauteur des métaux au niveau des propriétés de tenue statique (revêtement) et de résistance au crash [7 : industrie, 2016]. Ajoutons à ces caractéristiques le fait que le prix de ces matériaux est, à ce jour, trop élevé pour des productions à haute cadence et qu'ils sont réservés, pour des raisons économiques et

techniques, à des productions à faible volume. En cela, Laurent Vaucenat (BASF) affirme à juste titre « Pour favoriser l'innovation de matériaux innovants, il est nécessaire de faire évoluer les mentalités car le cahier des charges actuel de l'industrie automobile est conçu pour une industrie métallurgiste » [7 : industrie, 2016]

Notons que l'allègement de la structure est une solution qui paraît prédominer. Cependant, il existe d'autres possibilités d'amélioration telles que l'architecture, l'électrification, l'aérodynamisme, une meilleure gestion des frottements...

### I.1.c L'évolution de la place des composites dans l'automobile

L'industrie automobile est un lourd secteur qui a connu depuis sa naissance, il y a plus de 100 ans, des avancées majeures. En effet, les premières voitures étaient conçues en bois ou acier, aujourd'hui elles utilisent une grande variété de matériaux incluant tout particulièrement les composites. Ces derniers ne font leur apparition au sein du domaine automobile qu'en 1960-70 avec les matériaux organiques. Leur proportion d'utilisation restait néanmoins faible, d'environ 10-15% selon les véhicules. Les renforts étaient dans un premier temps surtout des fibres de verre [4 : archive, 1999].

Dès les années 1980, le secteur automobile - et plus particulièrement Ford et Peugeot - s'intéresse de près aux matériaux composites, pour lesquels il prévoit déjà un essor considérable. Mais il faudra attendre 1990 pour voir apparaître les premiers véhicules alliant aluminium et composites : la Jaguar XJ220 et la Bugatti EB110. Peu de temps après, le milieu de l'automobile a vu poindre la mise sur le marché de voitures ayant des pièces en composite renforcé en fibres naturelles. En effet en 2000, Audi a lancé la voiture de milieu de gamme A2 dans laquelle les panneaux de porte ont été fabriqués de polyuréthane renforcé de mélanges de mats de lin et de sisal. Au fil du temps, l'engouement pour les composites à renfort naturel a mené les constructeurs automobiles à utiliser davantage ce type de composites. En ceux-ci, ils trouvent des intérêts économiques, écologiques, et marketing. En 2015, une nouvelle réglementation visant à diminuer de 5% la masse des véhicules (en vue d'amoindrir leur consommation) encourage encore l'utilisation de tels matériaux au détriment des autres fibres (verre / carbone). L'année suivante, le procédé "one shot" de Faurecia, faisant intervenir des composants thermoplastiques chauffés dans des moules à injection, reçoit le prix JEC World 2016.

Ainsi, l'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisée que très récemment, comme le montrent les décisions récentes de grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) de développer des coffres et hayons. Les composites les plus fréquents sont ceux à base de matrice thermoplastique. L'utilisation des composites n'est pas égale selon les continents. En effet, les États-Unis les utilisent beaucoup plus qu'en Europe : 113 kg par voiture en moyenne contre 30 kg en Europe. De manière générale, la part consommée par les transports en composite est de 33% en Europe et de 28% dans le monde [4 : archive, 1999].

Selon les véhicules, les pièces de la voiture en composites représentent entre 10-20% répartis de la manière suivante [4 : archive, 1999] :

- équipement intérieur ou habitacle : 50 % □
- applications extérieures : 30 à 35 % □

- pièces sous capot : 15 % □
- pièces de structure: 0 à 5% □

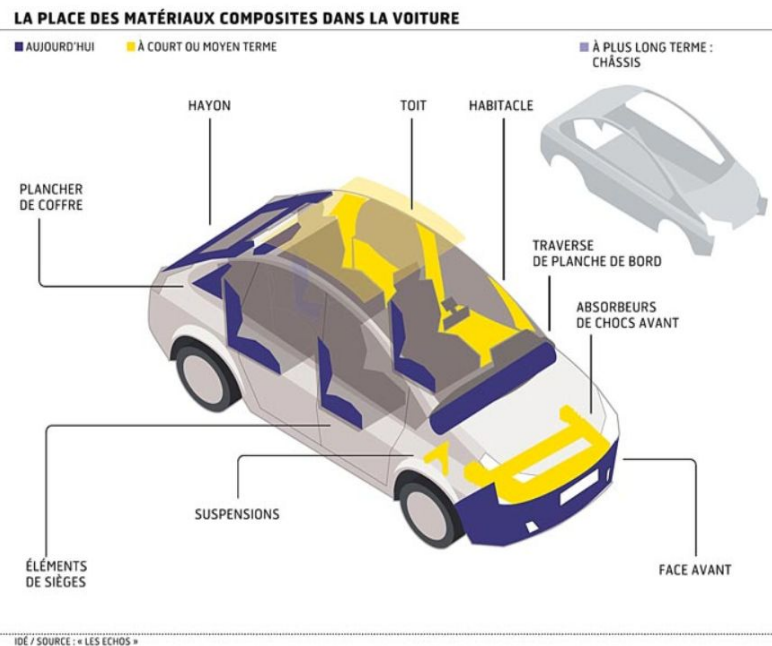


Figure 2 : Diverses utilisations de composites dans l'automobile [18: Cerig, 2017]

L'évolution des matériaux utilisés dans l'industrie automobile a permis de réduire les masses des véhicules, compensant ainsi l'augmentation des coûts de carburant. On est passé d'une consommation de 9,50L/100km (respectivement 10) en 1972 pour un véhicule essence (respectivement diesel) à 8,07L/100 km (respectivement 6,40) en 1997.

## I.2) Définitions

### I.2.a Composites

Un matériau *composite* est par définition un assemblage d'au moins deux matériaux différents. Ces derniers ne sont pas miscibles et ont des natures distinctes. Ce que l'on appelle les renforts sont à la fois l'ossature du matériau composite mais également le support principal des contraintes. La matrice (résine, liant : polymère ou plastique) quant à elle assure la cohésion de la structure ainsi que la répartition des efforts. Enfin, elle protège les renforts. Les propriétés de chaque constituant s'unissent pour donner des performances pouvant être très nettement supérieures à celles de chacun des composants pris individuellement (renforts - matrice).

Ces matériaux, offrant un large panel de propriétés, suscitent l'intérêt de nombreux industriels. Néanmoins leur non-homogénéité rend difficile leur caractérisation. Il faut combiner judicieusement les deux phases. Il existe différents types de composites : les composites de fibres, les matériaux de composites laminés, les composites de particules et une combinaison des trois premiers.

L'utilisation de composites constitue un réel avantage de part leurs propriétés mécaniques mais pas seulement. En effet, ils montrent des propriétés physico-chimiques intéressantes (mécaniques, thermiques et chimiques). A cela s'additionne leur faible masse volumique, inférieure aux matériaux

anciennement utilisés, ce qui permet finalement d'alléger les structures dans n'importe quel domaine incluant celui de l'automobile.

Les deux phases des composites : renfort et matrice apportent des caractéristiques distinctes. Intéressons-nous dans une première partie à celle que confèrent les fibres :

- Les renforts, définis comme l'ossature du composite, ont pour but de : répartir les efforts appliqués sur le matériau, de contrôler la propagation des fissures (I.2.3) et de supporter les efforts de traction lorsque la structure n'en est plus capable. La distribution s'effectuant de manière longitudinale est la suivante : les contraintes axiales sont réparties dans la fibre et les contraintes de cisaillement le sont sur l'interface fibre-matrice.

Dans un premier temps, lorsque l'on applique une force de traction sur le composite, l'interaction fibres/matrice est de nature élastique. La taille des fissures reste négligeable par rapport à celle de la structure, le matériau est donc homogène au point de vue de macroscopique [2] (modèle de Cox 1952).

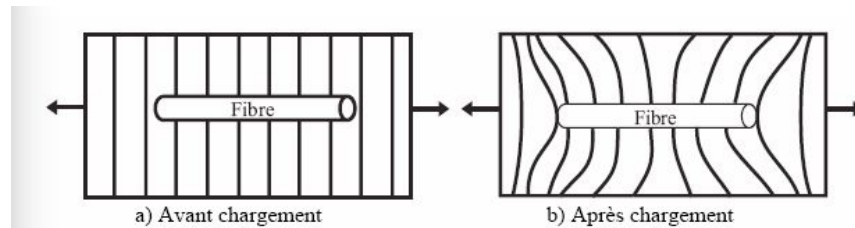


Figure 3 : Distribution de la contrainte dans la fibre [2]

Dans ce domaine élastique, la fibre développe des contraintes jusqu'à ce que l'adhérence fibre/matrice se rompt donc fissure. A cet instant les fibres agissent sans frottement [2 : Université de Laval]. La propagation des fissures est contrôlée par les renforts, permettant ainsi d'augmenter considérablement le travail qui mène à la rupture. Que ce soit dans les matrices fissurées ou non, le mécanisme de transfert des efforts reste le même. Cependant ce dernier change lorsque l'adhérence cède. Ainsi la distribution de contraintes de cisaillement sera une combinaison de deux contraintes de cisaillement.

Les renforts doivent être conçus de telle sorte que les propriétés mécaniques soient optimales. Ils sont les premiers responsables de la résistance et de la rigidité. En effet ces critères sont souvent d'un facteur 10 voire 100 fois plus importants que ceux de la matrice [1 : eduscol, 2011]. En ce sens, les propriétés mécaniques propres au composite dépendent fortement de la forme et de l'orientation des renforts.

- Forme : Les fibres longues ont un meilleur comportement mécanique que les fibres courtes (dans les directions renforcées par les fibres), mais restent plus chères. En effet il faut que la longueur soit suffisamment conséquente pour permettre de développer du frottement. Le facteur longueur/diamètre est un paramètre important. Il existe une longueur critique telle que  $\frac{l_c}{D} = \frac{\sigma_f}{2\tau}$ .
- Orientation : Les composites peuvent avoir un comportement anisotrope (fibres parallèles, orientées) ou isotrope (orientation aléatoire). On favorise le caractère anisotrope pour des pièces devant résister à des efforts importants.
- Dispersion des fibres
- Stabilité thermique



Notons que les renforts sont sous forme d'une multitude de fils distincts, généralement fabriqués sans défaut alors qu'une pièce massive du même matériau est moins résistante. Par exemple le verre est peu résistant sous forme massive mais est employé comme renfort lorsqu'il est sous forme fibreuse [1 : eduscol, 2011].

- Les matrices, quant à elles, permettent la cohésion de tous les matériaux. En ce sens, elles transmettent les efforts mécaniques aux renforts et imposent la forme de la pièce. Elles sont également responsables de la protection des renforts, en les aidant à supporter les contraintes subies par le composite.

## I.2.b Thermoplastiques ; thermodurcissables

La matrice du composite est choisie selon de nombreux critères, eux-mêmes se rapportant à l'utilisation. Néanmoins, une caractéristique reste prédominante. En effet, la majeure différenciation entre les matériaux demeure leur réaction à la chaleur. Ainsi, deux classes de matériaux existent : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Leur distinction peut s'appréhender en quelques mots : les thermoplastiques sont fusibles et solubles à l'inverse des thermodurcissables. Leur singularité se base sur le phénomène de réticulation, correspondant à la formation d'un réseau tridimensionnel stable entre les molécules.

Les *thermoplastiques* se ramollissent sous l'action de la chaleur permettant ainsi leur recyclage. Ils sont constitués de chaînes linéaires ou ramifiées liées entre elles par des liaisons à faible énergie (Van der Waals, hydrogène). Ce critère implique donc que la matière n'est pas dégradée thermiquement, les contraintes mécaniques de cisaillement lors de la mise en forme ne modifient pas la structure moléculaire. Leur solidité est réversible selon une certaine température. La température limite d'utilisation d'un thermoplastique dépend de sa structure : il s'agit soit de sa température de transition vitreuse (notée  $T_g$ ) s'il est amorphe, soit de sa température de fusion (notée  $T_f$ ) s'il est semi-cristallin. Il est particulièrement intéressant de renforcer les thermoplastiques semi-cristallins avec des fibres (renforts), afin d'augmenter considérablement leur module d'Young (noté  $E$ ) pour des températures supérieures à  $T_f$ . Ces composites peuvent ainsi être utilisés sous de fortes contraintes et à plus haute température.

Les *thermodurcissables* ne peuvent être recyclés car leur solidification est irréversible. Une fois les chaînes linéaires réticulées, le réseau tridimensionnel est constitué de noeuds covalents dont la rupture, nécessitant une forte énergie, n'est pas envisageable avec la chaleur. Notons qu'il devient possible de ramollir un thermodurcissable après réticulation uniquement lorsqu'il est soumis à des traitements chimiques. Ils ne réagissent pas/peu à l'action de la chaleur permettant ainsi la stabilité de leurs propriétés mécaniques. C'est le cas par exemple des pneus, résines mélamine-formaldéhyde (Formica), silicones, élastomères vulcanisés...

Cette étude sera limitée à l'analyse des composites thermoplastiques. En effet leur utilisation surpasse celle des thermodurcissables et ne cesse de croître pour la formation de composites renforcés en fibres végétales du fait de la plus grande facilité de mise en forme. En outre, ils se conservent facilement sur de longues périodes et ils sont non-toxiques.

Dans le domaine de l'automobile ils apportent un réel atout car ils permettent de mettre au point des véhicules plus légers, donc moins gourmands en carburant et émettant moins de  $CO_2$ . De plus, leur

flexibilité confère aux pièces une meilleure résistance aux chocs et aux impacts. Cependant, d'une part leur mise en forme consomme davantage d'énergie, car ce travail se fait à haute température et haute pression ce qui impose l'utilisation d'outillages spécifiques plus robustes. D'autre part, le cycle de polymérisation des thermoplastiques est long et les conditions opératoires sont difficiles (utilisation et vapeurs de solvants), ce qui en fait un procédé non vert.

### I.2.c Biocomposites

Les biocomposites se définissent par leur composition en renforts et matrice d'origine animale ou végétale. Les fibres sont donc naturelles et les résines ne proviennent plus de la pétrochimie. Différents degrés de "bio" existent, permettant de nuancer les atouts écologiques qu'un matériau peut avoir. Un composite serait parfaitement "bio" si toutes ses composantes étaient issues de la biomasse et s'il était recyclable et compostable en fin de vie. En somme, cette appellation "biocomposites" s'identifie à un matériau dont l'empreinte écologique a été allégée. Néanmoins l'analyse de cycle de vie reste à étudier. L'augmentation du prix du pétrole est l'une des raisons de la croissance de ce marché, appuyée par le désir de respecter l'environnement.

Différents termes permettent de nuancer les caractéristiques environnementales d'un matériau :

- **Recyclabilité :**

La capacité d'un matériau à être réutilisé. En cela le matériau peut être réintroduit dans la chaîne de production d'un nouveau produit pouvant être de même nature que ce dernier ou totalement différent. Dans le cas des biomatériaux la recyclabilité est surtout déterminée par la matrice (résine). En effet, comme vu précédemment, les thermodurcissables sont difficilement recyclables car non fusibles.

- **Bio-sourcé :**

Un matériau bio-sourcé signifie "issu de la biomasse", produit à partir du vivant. Les fibres végétales sont issues de la biomasse tout comme des matières plastiques formées à partir d'algues, de végétaux, de bactéries ...

- **Biodégradable :**

Ce terme est utilisé pour des matériaux pouvant être décomposés par des organismes vivants. Le produit peut être assimilé par l'environnement.

- **Bio-compostable :**

Un produit bio-compostable est également biodégradable, mais on aide la décomposition au sein d'une unité industrielle.

## I.3) Caractéristiques des composites

### I.3.a Tests de comparaison et normes

Plusieurs tests existent pour classer les composites selon leurs propriétés mécaniques, optiques, ou encore chimiques. Il s'agit notamment de quantifier la force d'adhésion à l'interface matrice/renfort. Cela permettra de déterminer le comportement du composite vis-à-vis des contraintes extérieures auxquelles il sera soumis lors de son usage. Par ailleurs, un composite se caractérise aussi par son vieillissement, ainsi que par ses résultats aux essais dynamiques, destructifs et de fatigue.

- Les essais de traction (norme ISO 547-4 : 1997 [8 : ISO, 1997]) permettent de comparer les comportements élastiques d'un matériau ainsi que de mesurer le degré de résistance à la rupture. Il en résulte donc la connaissance du module d'Young E. Plus ce dernier est faible, plus le composite est souple. On accède également par ces essais à la limite élastique, la résistance à la traction, ou encore l'allongement à la rupture.
- Les essais de cisaillement plan (ISO 14129) ou de compression (ISO 14126) permettent de quantifier la réponse à des contraintes respectivement de cisaillement et de compression [9 : archives, 2012].
- Les essais d'impact (norme ASTM D7136) sont réalisés sur une tour de chute. Le principe est d'apporter de l'énergie cinétique fixée par une partie "mobile" métallique sur l'échantillon (en composites) posé sur une partie fixe en béton. L'expertise des plaques impactées est ensuite réalisée à l'aide de la thermographie infrarouge active (non-destructif). Nous pouvons ainsi analyser la résistance aux chocs des composites, ce qui est un critère indispensable dans le domaine de l'automobile.
- Pour évaluer quantitativement l'adhésion, entre la matrice et les renforts, il existe plusieurs tests. L'essai par flexion notamment consiste à obtenir la force d'arrachement. Le test de déchaussement quant à lui, consiste à déterminer la contrainte de déchaussement (de friction).

De manière générale, il est possible d'observer les endommagements tels que la rupture des fibres, la décohésion fibre/matrice, la rupture de la matrice et le délaminage, via des microscopies optiques. On observe, sur la figure 4, la décohésion fibre/matrice **1)**, la rupture de la matrice **2)**, le clivage de la fibre **3)**, la décohésion fibre/fibre **4)**, la fissuration du cortex **5)**. De même, il est possible d'effectuer un travail d'observation du composite par spectroscopie infrarouge.

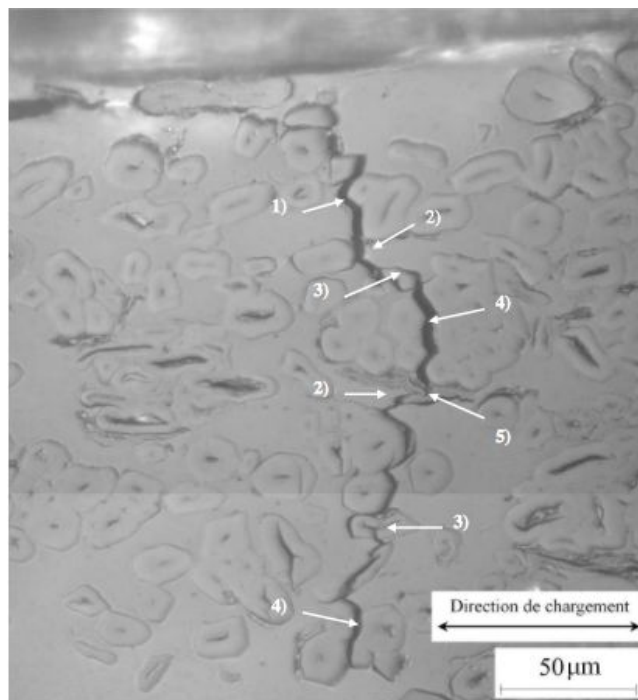


Figure 4 : Fissuration d'un composites [9 : archives, 2012]

### I.3.b Affinité entre matrices polymériques et renforts fibreux

Cette partie permet d'approfondir les propriétés des composites provenant de l'interface fibre/matrice. En effet l'interface est le siège où se passe le transfert de charge qui est l'un des paramètres cruciaux dans l'optimisation des propriétés mécaniques. Afin de garantir un transfert efficace des efforts repris par les fibres, il est nécessaire d'avoir, entre matrice et renforts, une bonne affinité et une bonne adhésion. Il s'agit du frottement de la fibre dans la matrice, défini par une contrainte de frottement, contrainte de cisaillement interfaciale. Il existe un deuxième phénomène impliquant la force de la liaison interfaciale: la décohésion qui est caractérisée par une contrainte de une énergie de décohésion. Les fibres sont reliées à la matrice via des liaisons qui dépendent de leur nature : arrangement atomique, moléculaire, composition chimique, propriétés morphologiques et capacité de diffusion. Ainsi l'adhésion, qui peut être d'origine physico-chimique, passe par une bonne attraction électrostatique et une bonne adsorption de molécules du polymère. En somme les phénomènes mis en jeu au niveau de l'interface peuvent être décrits par différents mécanismes :

- Enchevêtrement moléculaire et inter-diffusion
- Réaction chimique
- Attraction électrostatique
- Emboîtement mécanique

Il est possible d'améliorer l'adhésion en augmentant les capacités de surface à l'aide de traitements chimiques ou physiques appliqués aux deux surfaces de contact ou par l'ajout de différents additifs amorçant une réaction chimique entre matrice et renfort lors de la mise en forme.

Cependant l'adhésion reste à contrôler car une trop forte adhésion fragilisera paradoxalement le matériau. En effet, lorsque le composite subit des dégradations mécaniques et commence à se fissurer de manière brutale, les renforts permettent de stopper la fissure car elle s'arrête au niveau de l'interface (figure 4). La fissure change de direction et suit l'interface, il y a une décohésion. Ainsi l'interface rend les composites plus résistants à la rupture (plus ductile et tenace). Donc les fibres constituent une réelle barrière s'opposant à la propagation des fissures, et elles reprennent les efforts de traction lorsque la structure n'est plus capable de les subir. Si l'interface présente une trop bonne adhérence, le frottement se réduit, ce qui fragilise le matériau. Par conséquent, il ne faut pas une adhésion trop importante.



Figure 5 : Schéma du phénomène de décohésion au niveau de l'interface [1 : eduscol, 2011]

## II) Présentation technique des fibres

### II.1) Fibres de verre / carbone

Les fibres de verres furent, de loin, les premières fibres utilisées. En effet les égyptiens furent les précurseurs de leur utilisation, avec le filage du verre [a : Lavoisier, 1985]. À partir du XVIIème siècle, les fils de verre voient leur utilisation croître. Néanmoins, en raison du coût de fabrication élevé, les fibres de verre ne connurent une forte augmentation de production qu'à partir de 1930, pour une application ciblée (isolation des conducteurs électriques). Ce n'est que récemment que ce matériau, aujourd'hui très utilisé pour ses caractéristiques mécaniques et optiques, a révolutionné l'industrie verrière. Les matériaux renforcés par des fibres de verre ont fait leur apparition il y a plusieurs années en tant que matériaux de pointe dans l'aéronautique, le sport et l'automobile de compétition.

Parallèlement à cela, les fibres de carbone quant à elles, font leur apparition dans le secteur de l'électricité (fils pour lampe à incandescence) en 1860. Les fibres de carbone sont désormais présentes dans plusieurs secteurs, et notamment ceux de l'aéronautique (pièces primaires d'avion), de l'automobile ou encore du textile (protection corporelle). L'utilisation des fibres de carbone est bien plus récente que ces analogues. En effet, ce n'est qu'au milieu du XXème siècle qu'une nouvelle fibre à haute résistance à la traction et à haut module d'élasticité s'est développée : la fibre de carbone. Cette dernière pourrait également être appelée fibre de graphite. Les recherches sur la physique du solide furent à l'origine de l'utilisation de cette fibre, puisqu'elles ont été réalisées dans le but de trouver des éléments aux caractéristiques mécaniques intéressantes dans la table de Mendeleïev. Le bore, le béryllium, le carbone ainsi que d'autres éléments retinrent l'attention des scientifiques pour des études approfondies [a: Lavoisier, 1985].

## II.1.a Fabrication

### ❖ Verre

Le verre est par définition un borosilicate d'aluminium obtenu par fusion d'un mélange de silice  $\text{SiO}_2$ . On ajoute également des additifs leur conférant les qualités recherchées au niveau mécanique, électrique ou chimique. La formation des fibres de verre se divise en plusieurs étapes distinctes.

- La première étape de la création est **l'affinage**. La fusion a lieu à  $1550^\circ\text{C}$  dans des fours électriques à induction. La composition étant chauffée, elle devient visqueuse ( $800^\circ\text{C}$ ) puis liquide pour finalement se vitrifier. A  $1550^\circ\text{C}$ , elle est homogène et sans aucune impuretés ni bulles.
- A la sortie du four, on fait passer le mélange dans une filière en platine percée et chauffée par effet joule. Cette étape est **le filage**. La température est d'environ  $1250^\circ\text{C}$ . L'écoulement est gravitaire.
- **L'étirage** se fait directement en sortie de la filière et à grande vitesse. Puis on refroidit le mélange de manière à obtenir des monofilaments. Ce fil de verre se bobine autour d'une broche.
- Enfin la dernière étape est **l'ensimage**. L'étirage et le bobinage n'ont pas suffisamment d'effet pour rassembler durablement les centaines de filaments en un fil. Le verre étant trop lisse pour s'agglomérer, l'ensimage consiste à déposer à la surface des filaments de verre un agent de liaison de composition complexe pour permettre l'agglomération des filaments et faciliter l'intégration dans les polymères.
- Les fils sont ensuite bobinés ou coupés selon les finalités puis séchés à des températures de  $700$  à  $800^\circ\text{C}$ . [20-Wikipédia]

### ❖ Carbone

Les étapes de la fabrication des fibres de carbone sont les suivantes :

- Obtention de monofilaments par filage et étirage du polymère PAN ( $T_g = 95^\circ\text{C}$  environ). Les fibres obtenues à partir de polyacrylonitrile (PAN). Le PAN est un polymère dont la formule est  $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CN})-]_n$ .
- Assemblage des filaments en mèches (constituées de plusieurs milliers de fils) et obtention d'une orientation des chaînes polymériques dans le sens de la mèche
- Stabilisation des mèches par oxydation à  $200-300^\circ\text{C}$  pendant 1,5h tout en maintenant les fils sous tension pour garder l'orientation du PAN.
- Déshydrogénation du polymère qui conduit à une cyclisation
- Carbonisation entre  $1000-1500^\circ\text{C}$  du PAN pour faire disparaître une partie des éléments (H, N, O) et poursuivre la cyclisation du polymère pour enfin obtenir une fibre avec une structure désordonnée.

On peut améliorer la structure des fibres en appliquant un autre traitement thermique à  $2000^\circ\text{C}$  afin d'éliminer la quasi-totalité des éléments H, N, O et augmenter le caractère graphitique des fibres.

Les étapes de fabrication sont les mêmes pour les fibres obtenues à partir de brai (substance pâteuse d'origine végétale). [18 - Cerig, 2017]

## II.1.b Propriétés physiques intrinsèques

### ❖ Verre

Il existe 3 familles de fibres de verre :

- Les fibres E pour les composites grande diffusion
- Les fibres D utilisées dans les circuit imprimés
- Les fibres R utilisées pour leur haute performance

Les fibres de verre jouent le rôle d'armature dans les composites. Elles apportent la résistance en traction pendant que la matrice polymère leur permet de supporter les charges de compression. Plusieurs avantages sont liés à l'utilisation de la fibre de verre en tant que renfort pour le composite. Les composites fibre de verre/polymère se caractérisent par une bonne adhérence entre les fibres et la résine ce qui permet de mieux répartir les contraintes. Cependant, l'adhésion est moindre comparée à celle des composites carbone/polymère. D'autres propriétés confèrent certains avantages à l'utilisation de la fibre de verre telles que :

- Isolement électrique
- Inertie chimique
- Grande déformation à la rupture

D'autre part, la fibre de verre présente certains inconvénients tels qu'une rigidité souvent insuffisante pour certaines applications ainsi qu'un vieillissement accéléré au contact avec l'eau et les UV.

[18 - Cerig, 2017]

### ❖ Carbone

Les fibres de carbone apportent d'excellentes propriétés mécaniques aux composites mais également de la rigidité, une bonne conductivité thermique et électrique, une bonne résistance thermique et à

l'humidité. La bonne usinabilité permet de produire des composites dans de nombreux domaines. Par ailleurs, l'orientation des fibres peut apporter davantage de propriétés aux composites (propriétés anisotropiques). Cependant, les inconvénients des fibres de carbone sont une faible tenue aux chocs et un allongement à la rupture insuffisant.[18 - Cerig, 2017]

## II.2) Fibres naturelles

Les premières utilisations de fibres végétales pour renforcer des matériaux de construction remontent à 10000 ans av JC notamment en Chine avec l'utilisation de fragments de fibres de chanvre dans la poterie. Durant le XIXème siècle, des composites renforcés par des fibres naturelles sont créés : par exemple le compoundage de l'albumine et la poudre de bois par François Lepage pour inventer le matériau "Bois durci" (breveté en 1855) en France. A partir du XXème siècle, les fibres végétales deviennent de moins en moins utilisées au profit des fibres de verre.

Pour le lin (fibre fortement utilisée au moyen-âge), sa production a presque été éradiquée par l'arrivée du coton et à cause de diverses événements historiques (Seconde Guerre Mondiale). La production ne convenait plus aux industriels jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, après laquelle et l'arrivée d'agriculteurs Belges, la production du lin a été relancée environ avec 50 000 hectares en France. Aujourd'hui, la France est le principal producteur mondial de lin avec environ 70 000 hectares et 100 000 tonnes produites par an, ce qui représente 65% de la production mondiale et 80% de la production européenne. La production est localisée dans le Nord-Ouest car il faut des conditions particulières : sol limoneux, climat humide et vent de mer après arrachage. Malgré l'exportation de la quasi-totalité de la production (80 à 90%) en Asie pour la production textile, la production de lin technique pour application composite ne cesse de croître.

La culture du chanvre était prédominante en France au XIXème siècle : 176 000 hectares y étaient consacrés. Mais après de multiples campagnes de diabolisation et d'interdictions, relative à son usage récréatif, sa culture chute à 600 hectares au début du XXème siècle. Mais la relance de la production par les États-Unis pendant la Seconde Guerre Mondiale (un film y a été consacré : *Hemp for Victory*) font un peu changer les mentalités. Les travaux de l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) ayant pour but de développer des variétés industrielles, à très faible taux de THC (TétraHydroCannabinol) pour respecter la législation européenne (concentration inférieure à 0.3% en THC), relance la production en Europe et notamment en France suite à l'augmentation du prix du pétrole et aux exigences écologiques croissantes. Ainsi, la France est actuellement le principal producteur européen : près de 50 000 tonnes/an, ce qui représente la moitié de la production de l'Union Européenne.

### II.2.a Culture et extraction

#### ❖ Fibres de lin

La fibre de lin est un polymère pariétal naturel composé d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire. La paroi primaire, d'une épaisseur inférieure à un micromètre est hydrophile et élastique tandis que la paroi secondaire, d'une épaisseur de quelques micromètres est compacte, inextensible et rigide. Les tissus de la paroi primaire sont de type méristème/parenchyme et ont un rôle physiologique. Les tissus de la paroi secondaire sont de type xylème II et jouent un rôle de soutien et de conduction. En outre, la paroi secondaire présente une structure pluristratifiée ayant ainsi la structure pariétale la plus importante. Elle joue un rôle majeur dans les propriétés physico-chimiques

de la fibre de lin. On pourrait la définir comme un matériau composite de plusieurs polymères : une trame microfibrillaire faite de microfibrilles de cellulose, une matrice amorphe hémicellulosique et enfin un polymère anisotrope qu'est la lignine. Il est également important de souligner que la structure varie selon les conditions environnementales et de développement de la plante.

Le cycle de production commence par la culture et le rouissage du lin : la croissance de la tige du lin est d'environ 120 jours après la semis. Par la suite, a lieu une germination puis la floraison 8 semaines après. Un mois après la floraison, la plante arrive à maturité et peut être récoltée.

(NB : la floraison et la maturité des fibres interviennent respectivement pour des cumuls de température de 550 et 100 degrés.)

Pour récupérer un maximum de fibres, la tige est arrachée et non coupée. Elle est ensuite laissée à même le sol et exposée pendant plusieurs semaines aux conditions climatiques : c'est ce que l'on appelle le rouissage.

Sous l'effet des conditions climatiques (soleil, humidité), des bactéries présentes dans le sol vont faciliter la séparation des fibres en dégradant les lamelles assurant la cohésion inter-fibres par élimination des peptides. Après le rouissage des tiges, celles-ci sont stockées sous forme de balles avant d'être taillées (tige battue, broyée pour séparer les parties ligneuses de la fibre et extraire la fibre par des actions mécaniques) et peignées. [18 - Cerig, 2017]

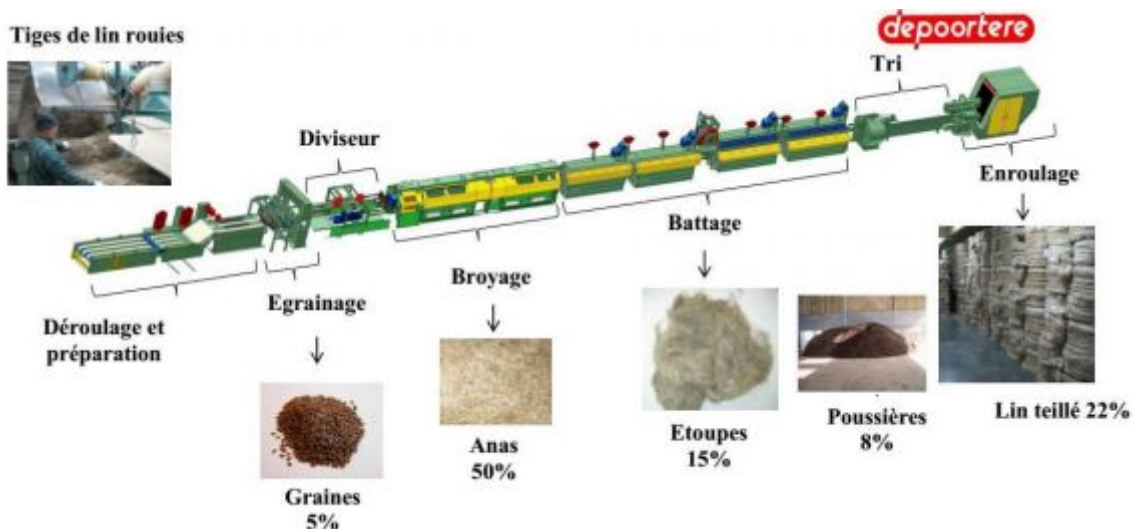


Figure 6 : Schéma d'une ligne de teillage [18 - Cerig, 2017]

Plusieurs produits sont obtenus :

- Le lin teillé : fibres longues, utilisées pour renforcer les composites
- Les étoupes : fibres plus courtes, utilisées dans l'industrie papetière, dans le renforcement de composites
- Les anas : utilisées pour la fabrication de combustible
- Les graines : utilisées pour faire de l'huile ou ré-utilisées pour la semence
- Les poussières : utilisées pour l'amendement des cultures



### ❖ Fibres de chanvre

Le chanvre, comme la fibre de lin, possède une structure bi pariétale avec une paroi primaire et une paroi secondaire. La paroi primaire est une matrice hémicellulosique et pectique dans laquelle sont dispersées des microfibrilles de cellulose. Cette paroi primaire est imprégnée de lignine. La paroi secondaire, faiblement imprégnée par la matrice hémicellulosique est très peu lignifiée. Elle possède des couches multiples S1, S2 et S3 dans lesquelles les microfibrilles de cellulose sont arrangées selon un angle d'orientation variable d'une couche à une autre par rapport à l'axe de la cellule. En particulier dans la paroi S2, les microfibrilles sont quasiment parallèles à l'axe de la cellule. Des similitudes avec la fibre de lin sont à relever : les fibres extra-xylémiennes du chanvre comme celles du lin ont comme composante majoritaire la couche S2, laissant très peu de place à la couche S1.

Le cycle de production est similaire à celui du lin : une phase de culture courte d'Avril à Septembre (120 à 150 jours), un récolte coupée en sections d'environ 40 cm pour rouissage sur champs, et enfin un traitement de la tige pour séparer les constituants.

La ligne de séparation des constituants est similaire à celle du lin : on récolte les chènevis (les graines) en premier, puis on bat les tiges pour séparer la fibre externe de la chènevotte. Enfin, on "purifie" la fibre de la chènevotte, de façon plus ou moins poussée en fonction de la qualité du produit semi-fini voulu.

Les utilisations des produits sont :

- Graine ou chènevis : Oisellerie, fabrication d'huile alimentaire, imprégnation en traitement des bois
- Chènevotte : Béton de chanvre et litière animale
- Poussières ou fines : Paillis végétal, litière animale et Énergie
- Fibres : Isolation thermique, panneaux de renforts dans l'industrie automobile ou encore composites.

La première étape est la dessiccation des fibres car les composites sont conditionnés avec une humidité résiduelle inférieure à 0,5%. La température de mise en oeuvre est plus basse que celle utilisée pour les polymères purs (PP/chanvre à 180°C). Il faut éviter des températures de masse fondue supérieures à 220°C.

Par ailleurs, il faut éviter les augmentations rapides de force de cisaillement et adapter les seuils d'injection à la viscosité du composite.

Enfin, a lieu la dégradation des peptides dans les fibres de chanvre à 160°C. Cette opération est responsable de la coloration brunâtre et dégage une forte odeur. Ainsi, il est nécessaire que les conditions de transformation soient adaptées à cette méthode.

Pour un premier essai, il est préconisé d'avoir une concentration de fibres de chanvre dans la matrice polymère n'excédant pas 20% de fibres.

[b, France agricole, 2006]

## II.2.b Propriétés physiques intrinsèques

### ❖ Fibre de lin :

Aujourd'hui, la fibre de lin est utilisée dans de nombreux domaines industriels et notamment dans les composites. En effet, l'avantage principal de cette fibre est l'absorption des vibrations. Elle est également associée à des caractéristiques mécaniques comparables à celles des fibres de chanvre et autres fibres performantes, comme les fibres de verre ou de carbone.

La fibre de lin présente une variabilité de ses propriétés du fait de la grande variété de fibres de lin cultivées.

- Propriétés mécaniques

Variété	Diamètre moyen ( $\mu\text{m}$ )	E (GPa)	$\sigma$ (MPa)	A (%)	Référence
Ariane	17,8 $\pm$ 5,2	54,1 $\pm$ 15,1	1339 $\pm$ 486	3,3 $\pm$ 0,8	(Baley, 2002)
Electra	15,4 $\pm$ 4,9	51,1 $\pm$ 15,0	808 $\pm$ 342	1,6 $\pm$ 0,5	(Bourmaud et al., 2010)
Oliver	17,5 $\pm$ 3,6	47,2 $\pm$ 21,3	751 $\pm$ 414	1,7 $\pm$ 0,6	(Bourmaud et al., 2013b)
Marylin	15,85 $\pm$ 3,9	53,8 $\pm$ 14,3	1215 $\pm$ 500	2,2 $\pm$ 0,6	(Bourmaud et al., 2013a)
Alizée	15,20 $\pm$ 3,3	47,9 $\pm$ 16,1	1012 $\pm$ 391	2,3 $\pm$ 0,7	(Roussière et al., 2012)
Oliver	15,3 $\pm$ 4,5	55,5 $\pm$ 20,9	899 $\pm$ 461	1,7 $\pm$ 0,6	(Pillin et al., 2011)
Hermès	19,6 $\pm$ 6,7	68,2 $\pm$ 35,8	1454 $\pm$ 835	2,3 $\pm$ 0,6	(Charlet et al., 2007)
Agatha	21,3 $\pm$ 6,3	57 $\pm$ 29	865 $\pm$ 413	1,8 $\pm$ 0,7	(Charlet et al., 2009)
/	18,9 $\pm$ 4,3	31,4 $\pm$ 16,2	974 $\pm$ 419	3,00	(Aslan et al., 2011)

Figure 7 : Propriétés mécaniques en traction des fibres unitaires de différents lins cultivés [22 : archive, 2015]

Les modules d'élasticité varient ainsi de 31,4 à 68,2 GPa, les contraintes à la rupture évoluent dans la grande fourchette de valeurs de 751 à 1454 MPa et enfin les allongements à la rupture varient de 1,6 à 3,3 %. Dans la littérature, il semblerait que le conditionnement des fibres de lin à température ambiante et à 50% d'humidité relative donne les meilleures performances mécaniques.

- Propriétés de sorption de l'eau

Nous désignons la sorption comme la quantité d'eau adhérant à la surface et dans la masse des fibres de lin. Les fibres de lin, de par leur structure et leur composition biochimique, possèdent un caractère hydrophile. Elles ont ainsi, une certaine quantité d'eau sorbée variant en fonction de leur conditionnement et des traitements subis. Pour une humidité relative de 100%, le lin roui contenait 26,6% d'eau contre 42,6% pour le lin vert [22 : archive, 2015]. Pour une humidité relative de 50%, les deux types de fibre contiennent la même quantité d'eau [22 : archive, 2015].

- Propriétés thermiques

La laine de lin est reconnue pour ses capacités d'isolation thermique. Cette propriété est due à la structure microporeuse de la fibre de lin mais aussi à l'air emprisonné à l'intérieur de sa paroi qui influence son caractère isolant. Couplées à ses propriétés de sorption et de relargage de vapeur d'eau selon les conditions hygrométriques, le lin peut agir comme régulateur thermique en étant isolant l'hiver et respirant l'été. [22 : archive, 2015]

- Autres propriétés

La fibre de lin peut servir en matière d'isolation phonique, due à sa structure creuse et à son module d'élasticité qui vont permettre l'absorption et l'atténuation des bruits aériens. D'autres propriétés sont

également intrinsèques à la fibre de lin telles que la résistance aux UV, le contact alimentaire entre autres.[22 : archive, 2015]

❖ Fibre de chanvre :

Le fabricant AFT plasturgie a déposé un brevet (N° W0 2004/071744) concernant un traitement thermomécanique permettant d'obtenir sur la fibre mère de chanvre une fibrillation de surface. En effet, ce traitement de surface permet de lever le verrou technologique concernant la compatibilisation des fibres végétales hydrophiles avec les matrices polymères hydrophobes. Avec la fibrillation de surface, les fibres partiellement libérées jouent le rôle d'ancrage mécanique entre la fibre mère et la matrice de polymère. La longueur moyenne des fibres incorporées est de 4 mm. [b, France agricole, 2006]

● Propriétés mécaniques

	HDPE (injection)		HDPE (injection)		HDPE ( extrusion)		HDPE (extrusion)		PPh	
	vierge	+30% chanvre	vierge	+30% chanvre roui	vierge	+30% chanvre	vierge	+30% chanvre	vierge	+30% chanvre
Traction (MPa)	900	3200	1000	1700	1200	3300	1250	6300	1000	5300
Flexion (MPa)	800	2750	900	1500	1100	3250	1750	4300	1400	3800

Figure 8 : propriétés mécaniques de composites avec et sans ajout de fibres de chanvre [b: France agricole, 2006]

On remarque une amélioration générale des propriétés mécaniques des différents polymères avec l'incorporation des fibres de chanvre en tant que renfort avec des valeurs quelques fois 3 à 4 fois plus grandes que les valeurs de référence. En traction notamment, la rigidité de la fibre de chanvre due à la cellulose, polymère semi-cristallin naturel avec un module d'élasticité très important (136 Gpa), aide à la résistance à la traction des polymères testés.

● Propriétés thermiques

La tenue thermique des polymères est améliorée avec l'ajout des fibres de chanvre en tant que renfort. Par exemple, une pièce de PP (PolyPropylène) associée à des fibres de chanvre, exposée pendant 400h à 150°C, ne subit aucune déformation alors qu'une pièce composée d'ABS (Acrylonitrile-Butadiène-Styrène) et de PC (PolyCarbonate) est déformée par le fluage sous son propre poids. La température de fléchissement sous charge pour le PP passe de 90 à 145°C avec un renforcement de 30% de chanvre [b: France agricole, 2006]. Le point Vicat c'est-à-dire la température à laquelle la résistance mécanique d'un matériau thermoplastique devient insuffisante pour un PVC (PolyChlorure de Vinyle) augmente de 5°C [b: France agricole, 2006].

- Reprise en eau

Une pièce renforcée par ajout de 30% de fibres naturelles permet d'absorber jusqu'à 7% d'eau lorsqu'elle est immergée [b: France agricole, 2006]. Si après saturation, on laisse la pièce à l'air libre dans des conditions standards de température et d'humidité relative, l'eau est complètement relarguée. Cette propriété est notamment importante pour l'utilisation bactéricide (pour les palettes par exemple). Il est également possible de créer des polymères actifs.

- Isotropie des propriétés

L'isotropie entraîne un blocage des retraits dans toutes les directions. Les principaux avantages liés à l'isotropie des propriétés du chanvre sont :

- Absence totale de retassures (cavité formée dans le métal et qui représente un point faible) même sur une forte épaisseur, les agents gonflants deviennent inutiles
- Grande stabilité géométrique même à chaud, pas de déformations post-moulage
- Démoulage possible des pièces à haute température, gain de temps de cycle atteignant 30% [b: France agricole, 2006].
- Faibles retraits

- Autres propriétés

La fibre de chanvre bénéficie d'autres propriétés ayant de l'intérêt dans une application automobile. Ces propriétés, entre autres, sont :

- La bonne tenue aux UV
- Le contact alimentaire
- L'atténuation acoustique du fait de la structure creuse de la fibre de chanvre
- La colorabilité
- La teneur naturelle en humidité induit une conductivité permettant l'écoulement de charges électrostatiques

Cependant, il faut savoir que la tenue au feu est légèrement dégradée (indice d'oxygène pour du PVC vierge = 43,8 contre 36 pour du PVC + 15% de chanvre) [b: France agricole, 2006]. Les fibres pourront être pré-traitées avec un produit intumescent pour instaurer des propriétés ignifuges au composite.

Les fibres de chanvre sont assez souples pour subir plusieurs malaxages successifs en milieu visqueux, dans un ensemble vis/fourreau de presse à injecter ou d'extrudeuse. Le rapport L/D (L étant la longueur des fibres et D leur diamètre) étant conservé, les propriétés de renfort sont donc peu affectées par les recyclages successifs.

## **II.3) Comparaison**

### **II.3.a Mise en oeuvre des composites - traitement de surface**

La mise en forme des composites en tant que telle est identique que l'on utilise des fibres naturelles ou non, les différences de procédé se trouve davantage dans le choix de la matrice. Cependant la compatibilité, avec les thermoplastiques, n'est pas la même entre les fibres lignocellulosiques et les autres fibres (verre/carbone), ce qui entraîne des étapes supplémentaires lors de la réalisation de biocomposites. Il existe en ce sens, deux catégories de traitement pouvant être appliqués : les

physiques et chimiques. Les traitement physiques sont souvent préférés car il n'utilisent pas de solvant pouvant être toxique.

- Traitements physiques :

*Le traitement plasma* est l'un des traitements permettant d'améliorer les propriétés interfaciales matrice/renforts. Le principe étant de bombarder le substrat par des particules à haute énergie se déplaçant dans le flux de plasma. Les propriétés telles la rugosité et la mouillabilité sont améliorées. Les transferts d'effort sont de meilleurs qualités due à la meilleure affinité.

*Le traitement corona* se fait au niveau de la matrice du composite et est basée sur l'utilisation d'une haute tension (1500 V [23: archives, 2009] ) entre deux électrodes qui ionise l'air. La surface réagit avec les électrons. En somme, ce traitement est une décharge électrique à haute fréquence qui améliore la connection chimique.

*Le traitement thermique* de séchage quant à lui s'applique aux fibres. En effet le séchage des ces dernières, avant mise en forme du biocomposite, est primordial. L'eau en contact des parois peut jouer un rôle de séparateur au niveau de l'interface fibres/thermoplastique. Cette eau peut également être responsable de la détérioration des composites lors de son évaporation possible au sein du composite, par la création de vide. Notons que la température de fusion des thermoplastiques étant supérieure à 100°C, cette option est à prendre compte pour ne pas avoir de mauvaises propriétés interfaciales. Les fibres doivent donc être bien séchées sans pour autant les abîmer en les soumettant à de trop hautes températures. [23: archives, 2009]

- Traitements chimiques :

Il est possible de traiter les fibres chimiquement. Le traitement le plus utilisé est *la mercerisation*. Le but de cette opération est d'éliminer la lignine, les hémicelluloses et les pectines avec de la soude caustique (hydroxyde de sodium). Cela entraîne des changements dimensionnels, morphologiques et mécaniques des fibres. L'augmentation de surface spécifique est apportée par l'apparition de microfibrilles, elle même responsable d'une meilleure adhésion mécanique. Cependant, l'hydroxyde de sodium peut détériorer la fibre en elle même car elle diminue son degré de cristallinité.

Enfin, il est possible d'enduire la fibre végétale d'agent de couplage qui constitue un pont de liaisons chimiques entre la matrice et les renforts. Les agents de couplage peuvent être de nature organique, inorganique ou une combinaison des deux. [23: archives, 2009]

### II.3.b Propriétés mécaniques et physico-chimiques

	Fibre de Lin	Fibre de Verre	Fibre de Carbone
Masses volumiques Kg/m <sup>3</sup>	1450	2500	1800
Contrainte à la rupture Mpa	1034	1000	700-5700
Rigidité spécifique GPa	55	30	200-60

Figure 9 : Tableau comparatif des propriétés selon les fibres utilisées [21 : cerig 2011]

Les fibres végétales présentent de nombreux avantages pouvant répondre au cahier des charges du secteur de l'automobile. Elles exhibent d'excellentes performances notamment en matière de rigidité, caractérisée par le module d'Young (E) et de capacité à se déformer quantifiée par l'allongement à la rupture (A %). Ci-dessous, un tableau comparatif entre la fibre de verre de type E, largement utilisées dans le commerce pour une application dans les composites, la fibre de carbone, la fibre de lin et la fibre de chanvre.

Fibres	E (GPa)	A (%)	Contrainte à la rupture $\sigma_r$ (Mpa)	Densité
Verre E	72-73	3	2000-2400	2,54
Carbone	230	1,5	3530	1,8
Lin	12-85	1-4	600-2000	1,54
Chanvre	35	1,6	389	1,07

Figure 10 : Tableau comparatif de propriétés mécaniques diverses selon les fibres [23 : archives, 2009]

La densité plus faible des fibres végétales assure leur utilisation pour une application dans des pièces légères. Les modules d'élasticité du lin et du chanvre, dans l'ordre de grandeur de celui du verre E, ainsi que les valeurs d'allongement à la rupture, permettent une application dans les pièces servant à la protection et à l'absorption des chocs.

### II.3.c Propriétés environnementales

Les avantages liés à l'utilisation de fibres végétales comparées aux fibres de verre et de carbone sont multiples d'un point de vue environnemental. Pour mieux se rendre compte de ces avantages, nous pourrions avoir recours à l'analyse du cycle de vie des composites. Cette méthode, qui permet de dresser un bilan environnemental sur le procédé de création des composites, évalue les étapes d'extraction des matières premières jusqu'au traitement en fin de vie des composites, en passant également par les phases d'usage, d'entretien ou encore de transport entre autres. Dans ce rapport, nous nous intéresserons uniquement aux matières premières.

Les différences de mise en oeuvre pour une même matrice commencent lors de la culture et l'extraction des fibres pour les fibres végétales et la fabrication des fibres pour les fibres de verre et de carbone. L'énergie nécessaire doit être prise en compte dans l'analyse du cycle de vie des composites.

	Fibre de Lin	Fibre de Verre	Fibre de Carbone
Energie de production MJ/Kg	4-15	30-55	130

Figure 11 : Tableau comparatif de l'énergie de production selon les différentes fibres [24 : archive 2013]

Les fibres végétales, de par leur légèreté, exhibent l'avantage de réduire l'impact environnemental en matière de transport.

Economie d'énergie (MJ)	273
Diminution d'émission CO <sub>2</sub> (kg)	17,76
Diminution d'émission SO <sub>x</sub> (g)	5,78
Diminution d'émission NO <sub>x</sub> (g)	163

Figure 12 : Tableau montrant les économies réalisées par chaque kg d'allègement d'un véhicule grâce à au transport de fibres de chanvre [b : France agricole, 2006]

Enfin, les fibres végétales sont entièrement recyclables du fait de leur origine bio-sourcée. Leur origine induit également une absence de toxicité en tant que renfort. En outre, l'utilisation de fibres végétales en tant que renfort dans les composites permet également l'abaissement du contenu en matériaux d'origine fossile du composite. D'autre part, l'incinération ultime en fin de vie des fibres végétales ne génère pas de résidus. Les fibres végétales sont neutres pour l'émission de CO<sub>2</sub> et issues de ressources renouvelables ce qui représente un avantage certain dans l'utilisation de ces fibres pour la fabrication de composites.

### III) Analyse économique et stratégique

#### III.1) Composites

##### III.1.a Marché actuel des composites dans le secteur automobile

Les composites constituent actuellement un fort marché au sein des matériaux. Cependant, il est difficile de chiffrer ce marché car il n'existe pas d'indice mondial de référence comme pour le métal ou le plastique.

Le graphique suivant montre l'évolution temporelle du marché mondial des composites d'après le chiffre d'affaires qu'ils représentent. On remarque que ce marché est en pleine expansion depuis quelques années (selon des données réelles), et que les prévisions jusqu'en 2024 sont favorables au développement de ce type de matériau. Par ailleurs, on peut constater que la proportion réservée au secteur du transport et donc notamment pour l'automobile est lui aussi en croissance. La croissance est linéaire et croît d'environ 6% par an. [Contact : Romain Hérisson]

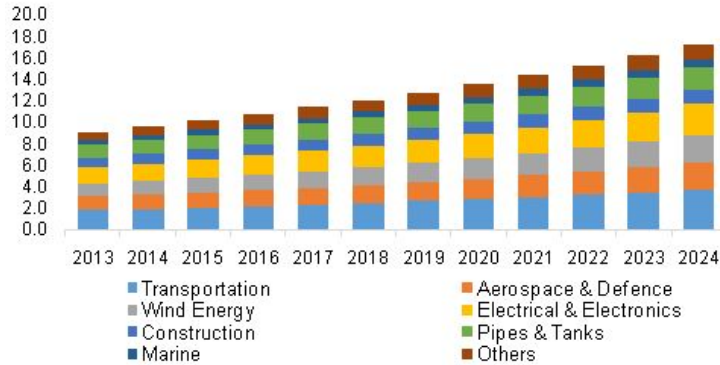


Figure 13 : Evolution temporelle mondiale de l'utilisation des composites (en M\$ de chiffre d'affaire) selon le secteur d'activités [Contact : Romain Hérisson]

Dans le marché actuel des composites, il faut distinguer plusieurs grands marchés :

- celui de la fibre de verre (85% du marché mondial), principalement pour le marché des transports et de la construction civile [Contact : Romain Hérisson]

- celui de la fibre de carbone (12% environ du marché de la fibre), alimenté par les secteurs de l'aéronautique, de l'éolien, des sports et loisirs, mais aussi de plus en plus par les industries automobiles, le génie civil et la construction navale. [10 : Actu Environnement, 2010, Contact : Romain Hérisson]

- le reste du marché (3%) concerne les fibres naturelles. Il reste un marché de niche dans les composites mais a un avenir prometteur compte-tenu de la prise de conscience environnementale et de la meilleure maîtrise des technologies de mises en oeuvre pour leurs incorporations dans une matrice thermoplastique [Contact : Romain Hérisson]

Bien que la fibre de verre soit prédominante sur le marché des composites, la fibre de carbone connaît une forte croissance, portée par le développement du secteur automobile et la recherche d'allègement des véhicules dans l'optique de réduire les émissions polluantes et allonger l'autonomie des véhicules électriques.

L'évolution du marché des composites est portée par celui des renforts. Selon le type de fibres, les prix peuvent varier de façon importante et ainsi devenir un facteur de sélection aux yeux des industriels qui les utilisent. Les sources [7 : DINHILL ON, 2016, 55 : Entreprise matériaux naturels, 2018, 56 : Entreprise Chanvre Auvergne, 2018] nous donnent les valeurs de prix suivantes, qui sont les prix actuels :

- Fibres de lin en vrac : 25€/180L (livrées en sac de volume standard)

- Fibres de chanvre : 1,38 - 1,50 €/kg

- Fibres de verre : 4 €/kg

- Fibres de carbone : 10 - 15 €/kg

Des projets tendent à réduire le prix des fibres de carbone, comme le projet FORCE mené par Faurecia est de commercialiser les fibres de carbone à moins de 8€/kg d'ici 2025 [11 : IRT Jules Vernes, 2016].

### III.1.b Facteurs de développement / facteurs limitants et coûts



### **Variables essentielles :**

- ▶ Prix des matières premières :
  - Le prix des monomères issus de la pétrochimie (quelques dizaines d'€ selon le monomère) influence les prix des matrices thermoplastiques. On observe ainsi un différentiel de prix des matrices polymériques par rapport aux produits de substitution : métaux, céramiques, ... [12 : Quotidienne Agora, 2015]
  - Le prix des fibres naturelles et non naturelles induit un différentiel de rapport qualité/prix entre fibres naturelles et fibres de verre / de carbone
- ▶ Impact environnemental :
  - Biosourcé, ressource renouvelable, mais la gestion des forêts est nécessaire (disponibilité de la matière première)
  - Recyclabilité des biocomposites (thermoplastiques + fibres végétales) :
- ▶ Productivité :
  - Le développement de procédés automatisés et à grande productivité entraîne une concurrence avec l'aluminium et les alliages

### **Facteurs clés de développement :**

- ▶ Avec la prise de conscience environnementale par les populations, on observe une orientation vers des produits plus naturels et une plus grande demande par les consommateurs des produits finis
- ▶ Législation et politiques environnementales :
  - Taxes sur les produits non recyclables ou non "bio" qui orientent les industries vers des produits plus naturels
  - Obligation de réduction des émissions par les véhicules neufs. Malgré les avancées dans la technologie des moteurs, cette réduction des émissions passe avant tout par l'allègement des véhicules, donc par le remplacement de structures métalliques par des structures composites.

### III.1.c Réglementations et aspects environnementaux

Le secteur de l'automobile s'est fixé un objectif visant à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> : passer de 135 g/km actuellement à 95 g/km en 2020. Pour se faire, l'un des critères majeurs est l'allègement des voitures en changeant la matériau initial de certaines parties, en composite.

- Fibres de carbone [13 : DMT Études et enquêtes, 2002 - 41 : Actu environnement, 2010 : ]

Actuellement, les fibres issues du PAN ne sont soumises à aucune réglementation ou législation au sein de l'Union Européenne. De même, le Centre international de recherche contre le cancer ne prévoit aucune mesure particulière en ce qui concerne ce type de fibres.

En effet, les données toxicologiques étant récentes, il est difficile de tirer des conclusions pour le moment. Mais il est déjà possible de constater que leur toxicité peut provenir à la fois de certaines opérations de fabrication, mais également lors de l'usinage de pièces créant alors des microfibrilles nocives pour les voies respiratoires et dissolvables dans le corps humains (conditions et milieux favorables).

Toutefois, l'Agence nationale chargée de la sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, tend à recenser chaque utilisation de ces fibres par la réglementation Reach. Ceci permettra d'établir par la suite des études de toxicité complètes.

- Fibres de verre [14: INRS, 2007]

Les fibres de verre sont présentes sur le marché depuis plusieurs décennies (brevetées en 1930), ce qui a permis de mener des études toxicologiques complètes. Ainsi, elles font l'objet d'une classification et sont mentionnées dans l'annexe VI du règlement CLP n°1272/2008, qui répertorie les risques potentiels que le produit représente, à savoir son action sur les voies respiratoires principalement.

Néanmoins, aucune réglementation d'utilisation n'existe, si ce n'est que la poussière des matériaux contenant des fibres de verre peut provoquer des complications respiratoires sévères.

### III.2) Biocomposites

#### III.2.a Entrée des biocomposites sur le marché

Le marché des biocomposites a atteint un chiffre d'affaire de 2,1 milliards d'euros en 2010 avec une croissance annuelle de 15%. En 2016, le chiffre d'affaire prévu était de 3,8 milliards d'euros avec un taux de croissance annuelle de 10%. On voit donc clairement que ces matériaux sont de plus en plus intéressants voire incontournables dans l'industrie actuellement. [15 : ASTA EDER Composites Consulting, 2011]

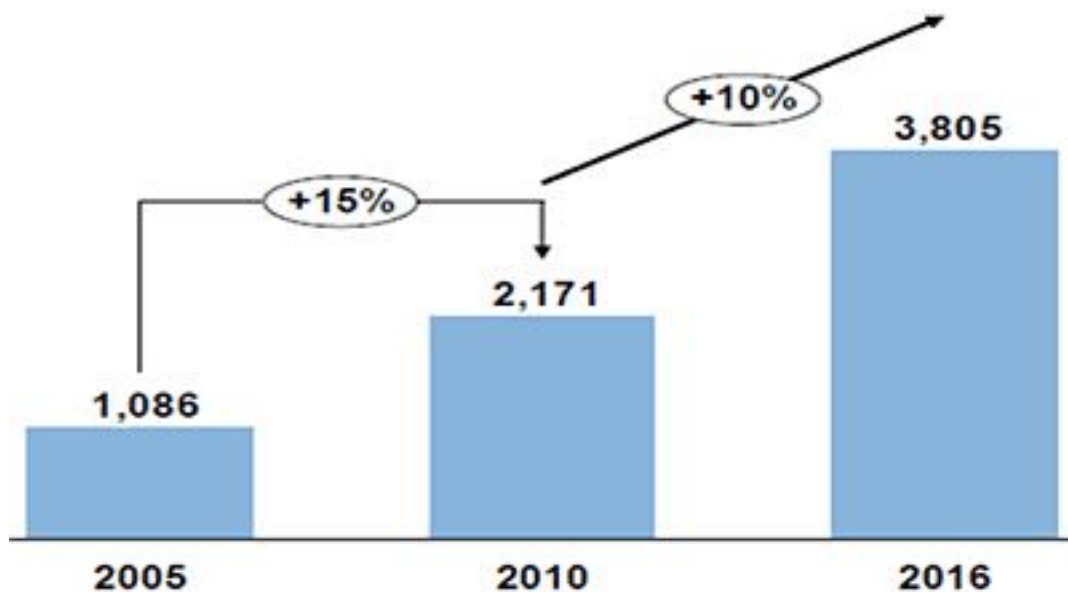


Figure 14 : Marché mondial des biocomposites en milliards de \$ d'après le rapport de Asta Eder Composites Consulting de 2011 [15 : ASTA EDER Composites Consulting, 2011]

Pour le secteur automobile :

Le secteur automobile reste le secteur le plus important pour les composites en terme de volume.

Ce dernier développe principalement des technologies permettant de produire à grande cadence des pièces renforcées par des fibres de carbone [16 : Journal du composite, 2016], telles que les pour le pare-choc, des éléments pour les sièges ou encore pour le plancher de coffre.

La part des composites dans la structure de l'automobile connaît une forte croissance comme le montre la figure suivante, d'après des données existantes, et des estimations :

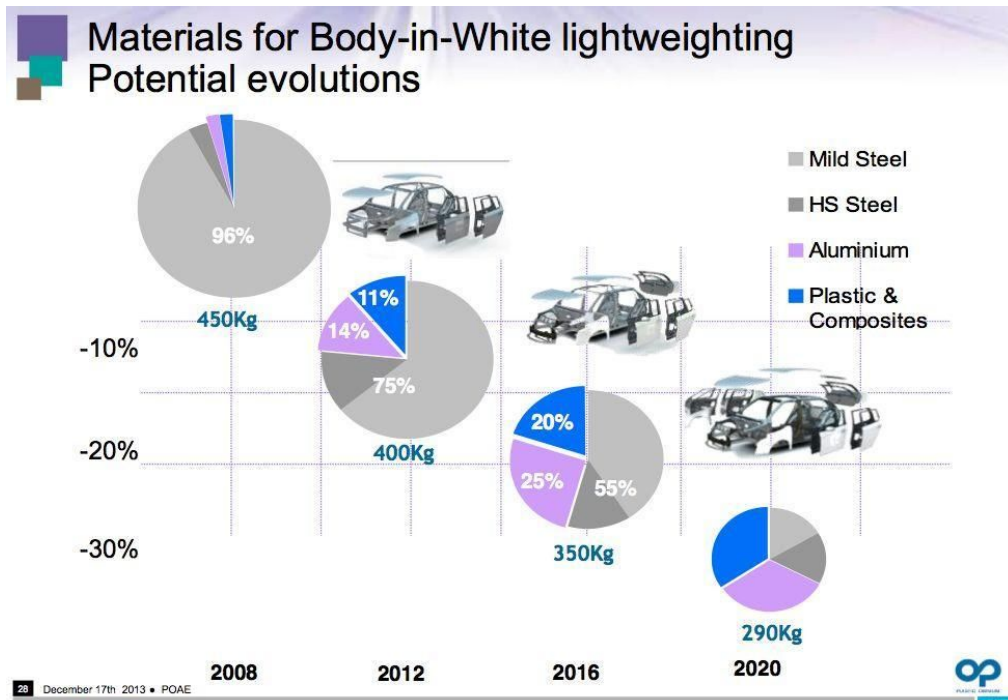


Figure 15 : Evolution de la part des composites dans la structure de l'automobile [17 : Le Point, 2013]

En 2008, les composites ne représentaient environ qu'un pourcent alors qu'en 2016 ils représentaient 20% de la structure de l'automobile (pièces extérieures non métalliques type pare-choc, et éléments de l'habitacle). Cette augmentation s'explique par le fait que les industriels recherchent de plus en plus de légèreté afin de diminuer la consommation énergétique et donc réduire l'impact environnemental, en conséquence à l'apparition et l'évolution de législations portant sur la réduction de CO<sub>2</sub>.

Ainsi, l'acier est peu à peu remplacé par de l'aluminium (plus léger) et par des composites, qui devraient ainsi représenter plus de 30% de la structure automobile en 2020 voire jusqu'à 70% d'ici 2030.

En fonction des prix de la matière première, qui tendent à diminuer, le budget dédié aux composites passerait de 70 à 300 milliards d'euros d'ici 2030 avec une croissance régulière d'environ 5% d'après Le Point et Le mensuel de l'industrie [17 : Le Point, 2013 - 44 : MSM le mensuel de l'industrie, 2017].

Cependant, les biocomposites semblent eux aussi avoir un avenir dans le secteur automobile car ils peuvent répondre aux exigences du cahier des charges des industriels. Il est notamment possible de les utiliser en proportions plus ou moins importantes (bois et coton principalement), comme le montre le camembert suivant :

## Use of Natural Fibres for Composites in the European Automotive Industry 2012

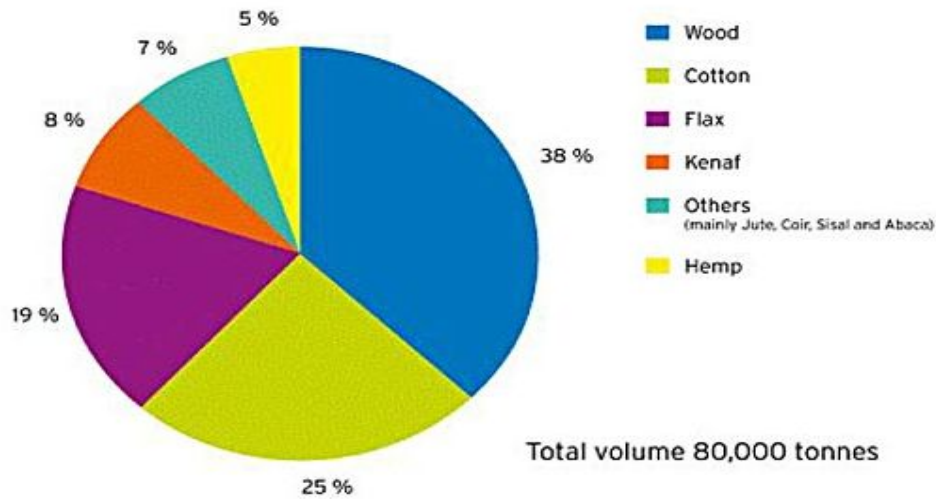


Figure 16 : Usage de fibres naturelles dans le secteur de l'automobile en 2012 d'après un rapport de Nova Institute [18 : Cerig, 2017]

### III.2.b Diagramme de Porter, chaîne de valeurs, SWOT

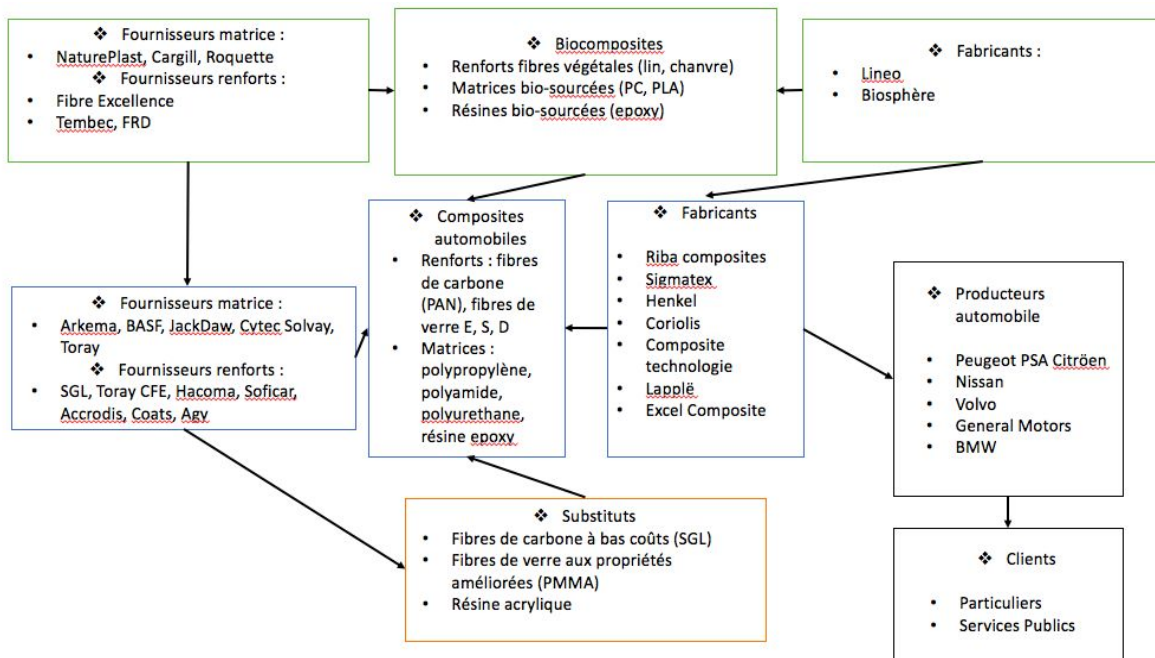


Figure 17 : Diagramme de Porter des composites dans le domaine de l'automobile

## Principaux acteurs

Fournisseurs de matrices :

- “Bio” : Natureplast, Cargill, Roquette
- Non “Bio” : Arkema, BASF, JackDaw, Cytec Solvay, Toray

Fournisseurs renforts :

- “Bio” : Fibre Excellence, Tembec, FRD
- Non “Bio” : SGL, Toray CFE, Hacoma, Soficar, Acrodis, Coats, Agy

Fabricants et équipementiers : Riba Composites, Sigmatech, Henkel, Coriolis, Composite technologie, Lapple, Excel Composite

Constructeurs : PSA Peugeot Citroën, Nissan, Volvo, General Motors, BMW, Honda, Toyota,...

D’après l’étude des relations entre les acteurs, ainsi que de leur rôle, nous avons pu établir la chaîne de valeur suivante :

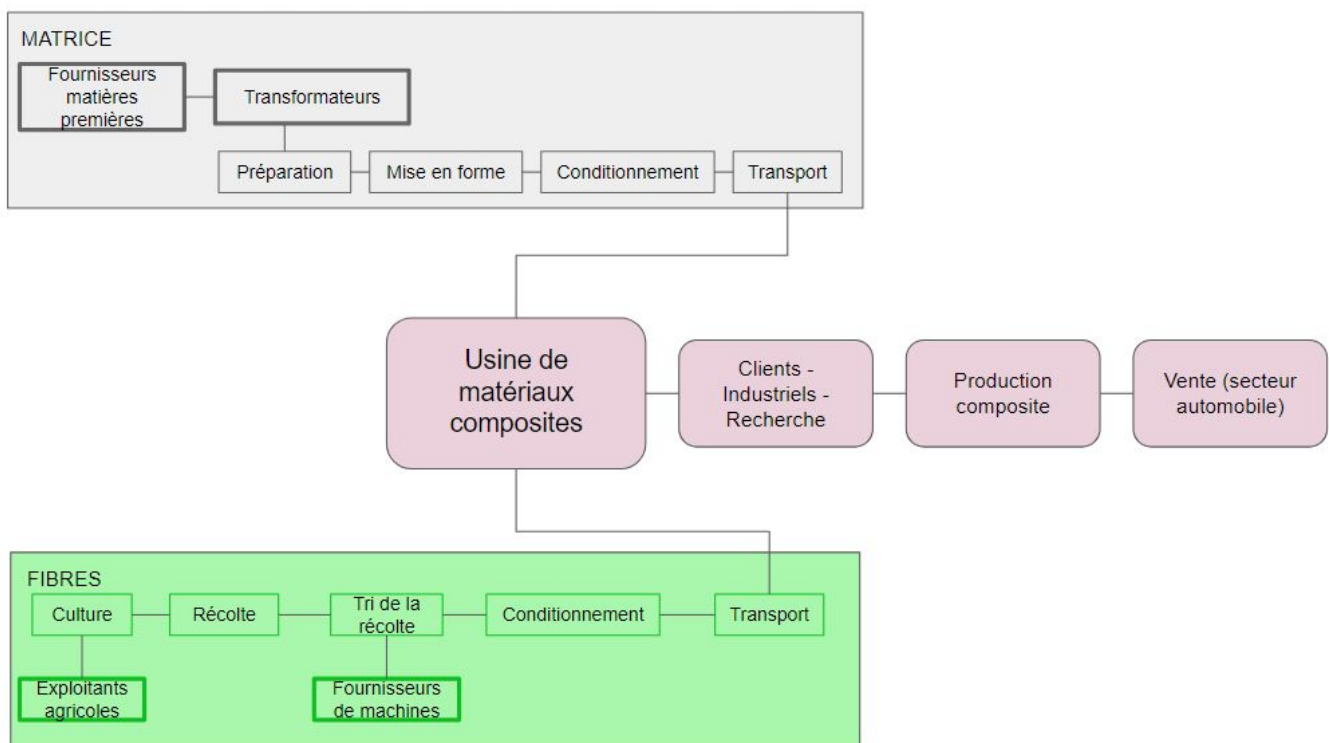


Figure 18 : Chaîne de valeur pour les composites

### Analyse de la stratégie des principaux acteurs (fournisseurs, acteurs, clients) :

Les constructeurs automobiles doivent répondre à la demande croissante due à l'augmentation de la population. Ils doivent, en même temps, vendre leurs produits à des prix optimum, ainsi que répondre aux critères de sécurité et aux obligations environnementales. Leur stratégie est la suivante : remplacer

dans la mesure du possible les pièces actuelles en pièces fabriquées à partir de composites. Ils pourront miser sur un aspect marketing tout en respectant la limitation de rejet de CO<sub>2</sub>. L'aspect marketing se base sur la prise de conscience environnementale humaine ainsi que sur le critère économique qu'apporte une plus faible consommation de carburant, bien que l'achat de la voiture reste plus cher. Si l'étude des biocomposites apporte des résultats concluants, il n'est pas impensable qu'ils s'insèrent, au même titre que les composites, dans l'industrie automobile. Le but d'une entreprise reste de faire du profit afin d'assurer son développement, toute prise de décision est analysée en ce sens.

Les fournisseurs de biocomposites sont dans l'attente d'une forte demande pouvant abaisser les prix de vente.

Les acheteurs de véhicules ont des exigences différentes selon leur niveau de vie, leur exigences techniques liées à leur environnement (montée, milieu aride). Cependant, quelques soient ces attentes, ils cherchent le concessionnaire qui leur promettra le meilleur rapport qualité/prix. Ils cherchent, de plus, à économiser sur du long terme. Le prix de vente est analysé au même titre que la dépense en carburant annuelle. Un nouveau critère de vente est de plus en plus souhaité, celui d'acheter des voitures locales.

Ainsi, nous avons pu établir un diagnostic stratégique via la matrice SWOT suivante :

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Diminution de la dépendance aux ressources pétrolières</li> <li>● Biodégradabilité</li> <li>● Nombreuses utilisations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ethique, utilisation de ressources alimentaires (élevage d'animaux)</li> <li>● Temps de culture/préparation long</li> <li>● Approvisionnement en eau important</li> </ul>
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Réglementation environnementale de plus en plus rigoureuse</li> <li>● Diminution des réserves de pétrole</li> <li>● Prise de conscience et envie de consommer durablement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Utilisation des fibres de verre et de carbone</li> <li>● Utilisation du plastique</li> <li>● Développement des biocarburants de 2<sup>e</sup> génération utilisant les fibres végétales</li> </ul>

Figure 19 : Diagnostic stratégique via la matrice SWOT [19 : Cerig, 2016, 20 : Cerig, 2013]

### III.2.c Impact environnemental et réglementations

En terme d'impact écologique, les biocomposites font l'objet de réglementation puisque leur valorisation dépend directement de leur recyclage, mais également de leur caractère biosourcé (par renfort avec des fibres végétales). La société Eco-Emballages fixe des objectifs de taux de recyclage année après année et induit, de ce fait, une législation environnementale de plus en plus stricte pour les biocomposites. [21 : Cerig, 2011]

### III.3) Prospectives

Dans notre société, la recherche du plus bas coût est primordiale. Il semble même que cette caractéristique prédomine sur l'origine des matières mises en oeuvre, les conditions de travail des employés, le caractère plus ou moins respectueux de l'environnement du produit, et ce principalement dans le secteur automobile.

Ainsi, parmi les facteurs de développement mis en jeu, les taxes, qui touchent directement le prix de vente du produit, apparaissent comme le facteur principal.

Néanmoins, le facteur concernant l'impact écologique demeure crucial, surtout dans le secteur automobile, car il met en jeu la viabilité et la commerciabilité du produit, condition sine qua non de la vente.

Enfin, on peut remarquer ces dernières années une prise de conscience environnementale des citoyens qui se sentent prêts à voir les prix de vente augmenter si le produit (notamment leur voiture), est plus respectueuse de l'environnement, consomme moins, et conserve les mêmes qualités techniques.

#### III.3.a Scénario tendanciel

**D'ici 2025, les biocomposites seront sur le marché de l'automobile mais ne concurrencent pas les composites à base de fibres de verre et de carbone**

##### Hypothèses :

- 1) Réglementations qui encouragent les matériaux verts (Probabilité : 80%)
- 2) Les biocomposites ont les caractéristiques attendues (résistance, protéger, isoler, limiter les impacts environnementaux et les nuisances sonores, gain de poids donc de consommation énergétique) mais le prix du marché est différent (prix des biocomposites supérieur au prix des composites déjà existants) (Probabilité : 50%)
- 3) Diminution de la dépendance aux ressources pétrolières (Probabilité : 30%)

Du fait de la diminution sensible du pétrole, l'utilisation de biocomposites est encouragée. Par ailleurs, les réglementations vis-à-vis de l'impact environnemental des matériaux devenant de plus en plus rigoureuses, les industriels sont obligés de se tourner vers les nouveaux arrivants c'est-à-dire les biocomposites. Cela est synonyme de changement. En effet, changer de produits nécessite de trouver de nouveaux fournisseurs, de nouveaux acteurs, d'entrer sur un nouveau marché. C'est également prendre des risques : il faut convaincre les clients que les biocomposites sont aussi efficaces que les composites voire meilleurs en terme de caractéristiques sachant que le prix du marché est différent. De plus, bien que l'utilisation de biocomposites est en bonne voie, la filière automobile attend néanmoins beaucoup de progrès pour les composites renforcés en fibres de carbone. Notons par exemple le projet FORCE (initié en 2014 par la plateforme automobile et UIC) qui vise à réduire le prix de la fibre de carbone trop onéreuse. Les études concernant les composites ne sont pas en suspens. Il est ainsi possible que ces produits déjà présents continuent à dominer le marché. Enfin, il est possible de découvrir un nouveau matériau révolutionnaire permettant de répondre à tous les critères attendus.

### III.3.b Scénario optimiste

#### **D’ici 2035, les biocomposites seront leaders sur le marché de l’automobile**

##### Hypothèses :

- 1) Réglementation et respect de l’environnement au profit des industriels et des consommateurs (Probabilité : 60%)
- 2) Épuisement du pétrole (Probabilité : 40%)
- 3) Mise en place du programme de réindustrialisation Nouvelle France Industrielle (Probabilité : 30%)

Les biocomposites pourraient être leader sur le marché. En effet la législation environnementale devient encore plus rigoureuse et restrictive quant aux émissions de CO<sub>2</sub>. L’allègement des véhicules dans le domaine de l’automobile semble être l’objectif visé par les entreprises. Il existe également de nombreux projets allant dans le sens de la domination des biocomposites, par exemple le programme de réindustrialisation “Nouvelle France Industrielle” (NFI). En effet il pourrait, par une ré-industrialisation profonde, jouer un rôle important en faveur des biocomposites. Les biocomposites, en ce sens, pourraient agrandir leur domaine de prédilection à savoir une production à faible cadence. Par ailleurs, avec le développement de la recherche dans ce domaine, ceci encourage fortement à utiliser des biocomposites. Les constructeurs automobiles travaillent sur des projets visant à diminuer le poids des pièces structurelles et des vitrages, “il y a un potentiel d’allègement de 200 à 300 kg à aller chercher via les matériaux” [7 : DINHILL ON, 2016 ] Gérard Liraut. Si cette tendance est maintenue, les biocomposites pourraient connaître une industrialisation croissante sans précédent. De plus, les clients ont de plus en plus tendance à vouloir consommer durablement (prise de conscience). Les voitures construites en accord avec les demandes écologiques semblent être un réel atout marketing. Enfin, l’épuisement du pétrole est en quelque sorte une opportunité pour les biocomposites puisque ceci oblige indirectement à se tourner vers des bioproduits comme les biocomposites.

### III.3.c Scénario pessimiste

#### **D’ici 2025, les biocomposites disparaissent du marché de l’automobile**

##### Hypothèses :

- 1) La production à grande échelle de biocomposites n’est pas viable industriellement (Probabilité : 20%)
- 2) Intérêt non-prouvé des biocomposites dans le domaine de l’automobile (Probabilité : 30%)
- 3) Les clients ne sont pas prêts à investir dans cette catégorie de produits qui utilisent des ressources alimentaires et de l’eau (Probabilité : 30%)

La disparition du pétrole n’étant pas imminente, les industries continuent d’utiliser le pétrole pour fabriquer des composites (matrice en PE, PET...), ce qui limite le développement des biocomposites. Par ailleurs, la demande étant inférieure à l’offre, il est difficile de trouver de nouveaux clients, habitués et satisfaits par les techniques actuelles (composites à base de fibres de verre et carbone par exemple). Il est ainsi difficile de développer une production à grande échelle. De manière générale, il est possible que les recherches à ce sujet n’aboutissent jamais. Le domaine automobile est conçu pour une industrie métallurgique. Il faut ainsi repenser tout le procédé, à quoi s’ajoute le fait que les propriétés des biocomposites ne sont pas tout à fait équivalentes à celles de matériaux métalliques



(propriétés de tenue à la statique, à la fatigue,...). Rien ne certifie que leur industrialisation mondiale soit possible. De plus les biocomposites, de par leur prix excessif, peuvent ne jamais connaître leur expansion et conquérir le marché automobile. Pour que le prix soit abaissé, il faudrait une industrialisation massive de composites, ce qui constitue un pari industriel comportant des risques. Ainsi, les entreprises, ayant de fortes responsabilités, pourraient ne jamais permettre la domination des biocomposites sur le marché des matériaux automobiles.

Par ailleurs, le problème éthique se pose quant à l'utilisation de ressources alimentaires, aux surfaces cultivables dédiées au secteur automobile, et à la quantité d'eau nécessaire au développement des végétaux sélectionnés (chanvre). Avec la croissance démographique que l'on connaît actuellement et qui ne cesse de s'accroître, cette problématique pourrait remettre en question l'utilisation de biomatériaux, au profit de cultures à usage alimentaire, afin de répondre aux besoins croissants de la population.

## *Conclusion :*

Cette veille technologique et d'intelligence économique nous permet de statuer sur l'évolution de la place des biocomposites sur un marché de l'automobile concurrentiel et qui ne cesse d'innover.

A moyen terme, notre scénario tendanciel pronostique que la place des biocomposites dans ce secteur industriel devrait s'affirmer de plus en plus, encouragée par les législations en faveur d'une éco-conception de l'automobile. Cependant, cette place s'affirmera sans pour autant prendre le leadership, actuellement occupé par les composites à renforts fibre de verre/carbone, matériaux dont la mise en oeuvre et l'usinabilité sont complètement maîtrisées par les fabricants.

Si la levée des verrous technologiques concernant l'industrialisation et la production à grande échelle de pièces en matériaux biocomposites est couplée à l'épuisement des ressources pétrolières et à une prise de conscience du consommateur, les biocomposites pourraient réaliser une percée dans ce secteur à la recherche de matériaux toujours plus compétitifs et innovants. Toutefois, le problème éthique concernant la menace des surfaces cultivables dédiées à la construction automobile sur celles dédiées à l'alimentation prédit la réalisation probable de ce scénario optimiste au terme d'une vingtaine d'années.

# Bibliographie

---

## Internet :

[1] *Structure matériaux composites*

Lionel le GENDRE - Matériaux composites et structures composites, science et culture industrielle, 17/05/2011, disponible sur : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/> (Consulté 05/04/2018)

[2] *Composites, but physiques*

Université de Laval - thèses et mémoire. Disponible sur : <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/21701/ch02.html> (Consulté le 05/04/2018)

[3] *Interface fibre / matrice*

Sofien BOUZOUTA - Optimisation des interfaces fibre-matrice de composite à renfort naturel, HAL archives-ouvertes, 04/01/2013, disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00769959/document> (Consulté 05/04/2018)

[4] *Réglementation propriétés physiques*

Nicolas PICCIRELLI, Alain GIOCOSA - Les composites dans l'industrie automobile, tiré des techniques de l'ingénieur, 1999, consultable sur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-plastiques-et-composites-tiaam/archive-1/les-composites-dans-l-industrie-automobile-am5600/> (Consulté 05/04/2018)

[5] *Environnement, recyclabilité*

Rozenn LE BORGNE, Pascal FEILLARD - Analyse du cycle de vie, application dans l'industrie automobile, avril 2011, disponible sur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-plastiques-et-composites-tiaam/archive-1/les-composites-dans-l-industrie-automobile-am5600/> (Consulté 05/04/2018)

[6] *Tableau comparatif des matériaux dans l'automobile*

[http://micro.icaunais.free.fr/materiaux\\_III.pdf](http://micro.icaunais.free.fr/materiaux_III.pdf)

[7] *Innovation et matériaux composites dans les voitures*

Dinhill On, Le futur de l'automobile passera par l'innovation dans les matériaux, Industrie, 01/08/2016, disponible sur : <http://www.industrie.com/chimie/le-futur-de-l-automobile-passera-par-l-innovation-dans-les-materiaux.75824> (consulté le 10/04/2018)

[8] *Normes*

Organisation internationale de normalisation - Catalogue de normes, 1997/2009, consultable sur : <https://www.iso.org/fr/committee/49462/x/catalogue/> (Consulté 18/05/2018)

[9] *Essais propriétés physiques*

Shaoxiong Liang - Etude de comportement en fatigue des composites renforcés par des fibres végétales, 05/07/2018,  
[https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00841850/file/These\\_A\\_LIANG\\_SHAOXIONG\\_2012.pdf](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00841850/file/These_A_LIANG_SHAOXIONG_2012.pdf)  
(Consulté 18/05/2018)

[10] *Rapport de l'agence de la sécurité sanitaire, nouvelles réglementation fibres de carbone*  
F. ROUSSEL - L'Afsset se penche sur les risques sanitaires liés à l'usinage des fibres de carbone [en ligne]. Actu Environnement.com, 05 Juillet 2010. Disponible sur :  
<https://www.actu-environnement.com/ae/news/avis-afsset-fibre-carbone-10620.php4> (consulté le 04/04/2018)

[11] *Prix fibres de carbone*  
IRT Jules Vernes - Fibres de carbone : vers un prix à moins de 8€/kg [en ligne], publié le 29/09/2016. Disponible sur :  
<https://www.irt-jules-verne.fr/actualites/vers-fibre-de-carbone-a-de-8ekg/> (consulté le 27/04/2018)

[12] *Composites dans l'automobile*  
Quotidienne Agora, L'automobile entame son chemin... du composite [en ligne] publié le 16/02/2015. Disponible sur : <https://quotidienne-agera.fr/materiaux-composites-automobile-voiture-carbone/>  
(consulté le 16/05/2018)

[13] *Législation fibres de carbonnes*  
DMT Études et enquêtes - Les fibres de carbone et de graphite, éléments pour une évaluation du risque [pdf en ligne]. INRS, document pour le médecin du travail, 4ème trimestre 2002. (consulté le 04/04/2018)

[14] *Rapport des risques des fibres de verre*  
INRS - Fibres de verre à usage spécial, fiche toxicologique n°268 [en ligne]. Edition 2007. Disponible sur :  
[http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX\\_268&section=reglementation](http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_268&section=reglementation) (consulté le 04/04/2018)

[15] *Données statistiques du marché des biocomposites*  
Asta Eder Composites Consulting - Responding to Asian imports [en ligne], 10/11/2011. Disponible sur : [http://www.wpc-consulting.eu/responding%20to%20asian%20imports\\_astaeder\\_2011.pdf](http://www.wpc-consulting.eu/responding%20to%20asian%20imports_astaeder_2011.pdf)  
(consulté le 04/04/2018)

[16] *Etat du secteur des composites*  
Magalie Castaing, Etude de marché : perspectives pour les composites en 2016, Journal du Composite, 8/01/2016, disponible sur :  
<https://www.journalducomposite.com/applications/etude-de-marche-perspectives-pour-les-composites-en-2016/> (consulté le 10/04/2018)

[17] *Evolution de la part des composites dans l'automobile*

Y.Maroselli, Le plastique c'est fantastique, Le Point [en ligne], 19/12/2013. disponible sur : [http://www.lepoint.fr/automobile/innovations/le-plastique-c-est-fantastique-19-12-2013-1772623\\_652.php](http://www.lepoint.fr/automobile/innovations/le-plastique-c-est-fantastique-19-12-2013-1772623_652.php) (consulté le 09/04/2018)

[18] *Fibres carbone, verre , lin : impression 3D avantages/inconvénients, techniques impression, analyse économique et environnementale, marché, SWOT, scénarios contrastés*  
Pierre COLLIGNON, Pierre LE FLOCH, Hugo MAYEUR. Impression 3D de biocomposites pour l'automobile. Cerig [en ligne], février 2017. Disponible sur : <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2017/impression3D-biocomposite-automobile.htm> (consulté le 15/02/18)

[19] *Fibres de miscanthus : pptés, cycle de vie produits à base de fibres végétales , cycle de vie composite, pptés méca, analyse éco, applications, acteurs, SWOT, fibres de lin : (concurrence) CA, production, emploi ; fibres de chanvre ; scénarios*  
Adam LY, Augustin SALASCA. Fibres de miscanthus et matériaux composites. Cerig [en ligne], avril 2016. Disponible sur : <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2016/miscanthus-composite.htm> (consulté le 15/02/18)

[19'] *Biocomposites application anti-choc : fibres naturelles et propriétés mécaniques, marché, diagramme de Porter (entrée des composites vert/vert sur le marché), SWOT, scénarios*  
Hippolyte DURAND, Yannis LABAT. Biocomposites pour applications antichoc : quel apport des nanocelluloses ?. Cerig [en ligne], juin 2013. Disponible sur : <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2013/biocomposite-antichoc-nanocellulose.htm> (consulté le 15/02/18)

[20] *Fibres de verre : procédé de fabrication*  
Wikipédia. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre\\_de\\_verre](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_de_verre) (consulté le 06/04/2018)

[21] *Procédés de recyclage des composites et législation :*  
F. MARTOIA et B. SAMPSON - "Recyclage des biocomposites, point clef ou propriété secondaire ?" [en ligne]. Cerig, Juin 2011. Disponible sur : [http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2012/recyclage-biocomposite.htm#map-recyclage-biocomposite\\_technique](http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2012/recyclage-biocomposite.htm#map-recyclage-biocomposite_technique) (consulté le 06/04/2018)

[22] *Propriétés fibres de lin*  
ANDRE Nicolas, MARTIN Michel - Contribution à l'étude de paramètres influençant les propriétés mécanique de fibres élémentaires de lin, Septembre 2015, consultable sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01194534/document> (consulté le 15/04/2018)

[23] *Traitement de surface*  
Poilâne C., Vivet A., Momayez L., Doudou BB., Ayachi M., Chen J., Propriétés mécaniques de préimprégné lin / époxyde, 11 Juin 2009, consultable sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00390504/document> (consulté le 17/04/2018)

[24] *Propriétés environnementales*

BOUZOUITA Sofien, Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel, Janvier 2013, consultable sur:  
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00769959/document>

Livres :

[a] *Guide pratique des matériaux composites :*  
 M.GEIER, D. DUEDAL “Guide pratique des matériaux composites”, Deuxième édition, Paris France, Technique et documentation Lavoisier, 1985, 349 p., ISBN 2-85206-314-x, chapitre 3 “Renfort” p114-150 et chapitre 6 “ Technologie de fabrication” p271-p291.

[b] *Fibres de chanvre, combinées avec du plastique :*  
 Pierre BOULOC - Le chanvre industriel, Production et utilisations. Edition France Agricole, 75010 Paris, 2006, 432 pages, ISBN 2-85557-130-8

Contact :

Romain Herisson, Composite strategic buyer chez Decathlon

## Annexes :

Annexe 1 : Tableau récapitulatif des solutions techniques, acteurs, fabricants, clients et application des fibres végétales, de verre et de carbone

Composites avec renfort :	<b>Biocomposites à base de fibres végétales</b>	<b>Composites à base de fibres de verre</b>	<b>Composites à base de fibres de carbone</b>
Sources	<b>A. / 3) / 4) / 5) / 6) / 9) / 10) / 11) / 13) / 16) / 17) / 18) / 19) / 20) / 21)</b>	<b>B. / 2) / 6) / 11) / 12) / 13)</b>	<b>6) / 7) / 13) / 15)</b>

<p><b>Solutions techniques</b> (caract. ppales)</p>	<p>Alternative intéressante aux fibre de verre car elles peuvent être brûlées</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-elles se travaillent très facilement avec les technologies de textile</li> <li>-la reproductivité de leurs caractéristique physique n'est pas parfaitement maîtrisée.</li> </ul> <p><u>Lin:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Biodégradabilité</li> <li>- Faible densité</li> <li>- Faible coût</li> <li>- E = 27-80 GPa (fibre seule)</li> <li>- résistance = 0,3-0,96 GPa (fibre seule)</li> <li>- densité = 1,4-1,5 g/cm<sup>3</sup> (fibre seule)</li> <li>- allongement = 1,5-4,0 % (fibre seule)</li> </ul> <p><u>Chanvre</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- cours du chanvre stable contrairement à d'autres plantes à fibre comme le lin</li> <li>- plants de chanvre résistants aux parasites/maladies donc aucun traitement chimique nécessaire durant culture</li> <li>- besoins en azote faible</li> <li>- culture + transformation maîtrisées par l'UE</li> <li>- Module d'Young (32-70GPa) (fibre seule)~ Module d'Young fibres de verre</li> <li>- densité : 1,4-1,5 g/cm<sup>3</sup> (fibre seule)</li> <li>-allongement : 1,0-6,0 %</li> <li>- résistance : 0,5-1,04 GPa</li> <li>- utilisable comme renfort de matières plastiques</li> <li>- tenue thermique des polymères améliorée par</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 85% des composites</li> <li>- Bon rapport performance/ prix</li> <li>- Disponible sous toutes les formes</li> <li>- Bonne adhérence à toute les résines</li> <li>- Résistance à la température</li> <li>- Dilatation thermique faible</li> <li>- Bonne propriété diélectrique</li> <li>- Bonne résistance à l'humidité</li> <li>- Renfort le plus utilisé industriellement</li> <li>- Possibilité d'orientation des fibres (propriétés anisotropiques)</li> <li>- Rigidité insuffisante pour certaines applications comme les pièces de structure primaire en aéronautique</li> <li>- Vieillessement accéléré au contact prolongé de l'eau, des rayonnements UV ou de températures élevées</li> <li>- inertie chimique</li> <li>- résistance aux chocs</li> <li>- isolation</li> <li>- allègement des structures de 30% par rapport à l'acier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excellente propriété mécanique</li> <li>- Très bonne tenue en température</li> <li>- Dilatation thermique nulle</li> <li>- Bonne usinabilité</li> <li>- Bonne conductivités thermique et électrique</li> <li>- Excellente résistance à l'humidité</li> <li>- tenue aux chocs faible</li> <li>- Prix relativement élevé, mais en baisse</li> <li>- Possibilité d'orientation des fibres (propriétés anisotropiques)</li> </ul>
---	---	---	--

incorporation de fibres de chanvre

- propriétés isotropiques
- taux de renfort atteignable = 70% en poids
- transformation aisée des composites pour un taux de renfort <40%

Miscanthus :

- longueur : 0,4-4,9 mm
- largeur : 4-28 um
- masse vol : 100-130 kg/m<sup>3</sup>
- E : 3,2-3,8 GPa

Fibres longues:

- Réalisation méthode "prepergs".
- Obtention de feuille qui peut être thermoformées.
- Peuvent être remis en oeuvre après broyage comme des matériaux renforcés par des fibres courtes.
- Extrusion et injection impossible avec ces fibres car trop de cisaillement, cela les couperaient trop.
- +- 1000 pièces / an
- possibilité de choisir leur orientation = renforcer les pièces dans les directions où elles seront les plus sollicitées

Fibres courtes:

- Mise en oeuvre adaptée au thermoplastique
- dimension faible, longueur critique minimale pour être efficace
- Peuvent subir plusieurs cycles de mise en oeuvre.
- Extrusion / injection

	<p>-&gt; 10 000 pièces/an</p> <p>Chanvre et lin =</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- plantes annuelles =&gt; accroissement de la production possiblement rapide</li><li>- contrairement au bois</li><li>- absence d'abrasion</li><li>- meilleure stabilité dimensionnelle</li></ul>		
--	--	--	--



<p><b>Acteurs</b> (fournisseurs mat.ières, matériel, pdts, coûts...)</p>	<p><b>Polymères extraits de la biomasse</b> Cellulose, hémicelluloses, lignine :Tembec, Södra  <b>Amidon</b> : Cargill, Roquette, Syral  <b>Dérivés de cellulose (CMC,AC)</b>: Eastman,Dow, Rhodia  <b>Dérivés de l'amidon</b>  Gaïalene®: Roquette  <b>Polymères synthétisés à partir de biomonomères</b>  PLA: NatureWorks, Purac, (Futero)  PE vert, PP vert: Braskem  Polyester: BASF  <b>Polymères produits par des organismes</b>  PHBV, PHB, PHBO: Metabolix  <b>Production de miscanthus</b>  NovaBiom  Rhizosfer</p>	<p><b>Fournisseurs de FVerre :</b>  - Saint Gobain (Vetrotex fibres calibrées de renforcement, Isoverre)  - Owens Corning  - PPG  -</p>	<p><b>Fournisseurs de FC:</b>  - Toray industries  - Toho Tenax  - Zoltex</p>
--	---	---	---

<p><b>Fabricants</b> (qui, quoi, où, coût...)</p>	<p>Utilisation en plasturgie :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Chanvrière de l'Aube</li> <li>- ARD</li> <li>- AFT plasturgie : leader dans le domaine en France</li> <li>- collaboration de l'INRA - ENSIACET, Toulouse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aeriane : France, Belgique, USA, Amérique du sud</li> <li>- Bstflex - toile de fibres : Chine ; prix variable en fonction du grammage, classiquement 3-4€/m<sup>2</sup></li> <li>- Bigrep : rouleau de fil</li> <li>- Formax - Aerontec : Afrique du sud, UK</li> <li>- TEI Composite : Taiwan</li> <li>- Hexcel Corp. : USA</li> <li>- Micam : plaque mélaminée renforcée : Irlande</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formax : Afrique du sud, UK</li> <li>- Gurit,</li> <li>- Hexcel Corporation américain, n°4 mondial,</li> <li>- Toho Tenax Europe GmbH : Asie, Océanie, Europe, Moyen Orient, Afrique, Amériques du Nord et du Sud</li> <li>- Zoltek : USA</li> <li>- Toray Carbon Fiber Composite Materials : japonais, 1er producteur mondial, produit PAN</li> <li>- SGL Group : Allemagne</li> <li>- Chomarat : France</li> <li>- Aeriane : France, Belgique, USA, Amérique du sud</li> <li>- Airbus : France</li> </ul>
---	---	--	--

<p><b>Clients</b> (secteur d'application, indus/privé, besoins, cahier des charges, perf...)</p>	<p><u>LIN :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- automobile (planche de bord)</li> <li>- mêmes secteurs d'application que le chanvre et même cahier des charges (légèreté, réduction émission CO2)</li> </ul> <p><u>CHANVRE :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- automobile (planche de bord); réduction émission CO2, gain de masse, absorption des vibrations</li> <li>- sports et nautisme (padel); légèreté, absorption des vibrations</li> </ul> <p>Alkar Technology</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- produits d'aménagement de la maison (dalles); qualité de recyclage</li> <li>- signalétique; origine renouvelable et producteurs locaux privilégiés</li> </ul> <p><u>AUTRES :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- AFT Plasturgie : filière structurée complète du cultivateur au plasturgiste pour concevoir et développer procédés pour production écologique et économique de polymères composites avec fibres naturelles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- équipement de sport</li> <li>- pare-chocs auto</li> <li>- bâtiments et infrastructures : 29%</li> <li>- transports (avions, TGV) : 25%</li> <li>- électricité, électronique : 16%</li> <li>- sports et loisirs : 14%</li> <li>- équipements industriels (11%)</li> <li>- isolation thermique : matelas de fibres courtes = laine de verre</li> <li>- fibres optiques dans le domaine médical (endoscopie) et des télécommunications</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aéronautique (planeur, avion): légèreté, rigidité</li> <li>- automobile (renforcement)</li> <li>- sports : planche de paddle : maniabilité et légèreté</li> <li>- textile (protection corporelle) : résistance à la déchirure, aux frottements, rigidité</li> <li>- instruments à vent (remplacement de l'ébène) : rigidité, légèreté</li> </ul>
--	---	---	---

