



02 MAI 2019

LES BIOCOMPOSITES  
THERMODURCISSABLES À BASE DE LIN  
DANS L'AUTOMOBILE

RAPPORT DE VEILLE TECHNOLOGIQUE ET D'INTELLIGENCE ECONOMIQUE

ANTHONY ANDRIEU - MAXIME HEDOU - AGATHE MOUREN - PHILIPPE PHAM

GRENOBLE INP - PAGORA



<b>Introduction.....</b>	<b>2</b>
<b>1. Les composites dans l'automobile .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Historique des composites dans l'automobile.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Le marché de l'automobile et des composites .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3. Les matériaux utilisés .....</b>	<b>7</b>
1.3.1. Les contraintes des constructeurs .....	7
1.3.2. Les attentes des clients finaux .....	8
1.3.3. Les polymères employés pour répondre à ces exigences .....	9
1.3.3.1. Les pièces produites .....	10
1.3.3.2. Les propriétés .....	10
1.3.4. Les nouveaux matériaux : les biocomposites .....	12
1.3.4.1. Présentation .....	12
1.3.4.2. Le marché des biocomposites .....	14
<b>2. Les biocomposites dans l'automobile.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. Les renforts fibreux : Fibres de verre VS fibres végétales.....</b>	<b>17</b>
2.1.1. Production, extraction .....	17
2.1.1.1. Les fibres de verre .....	17
2.1.1.2. Les fibres de carbone.....	17
2.1.1.3. Les fibres naturelles.....	18
2.1.2. Propriétés.....	23
2.1.2.1. Les fibres de verre .....	23
2.1.2.2. Les fibres de carbone.....	24
2.1.2.3. Les fibres naturelles.....	25
<b>2.2. Les matrices polymères.....</b>	<b>27</b>
2.2.1. Mise en forme.....	27
2.2.1.1. Les thermoplastiques .....	28
2.2.1.2. Les thermodurcissables .....	29
2.2.2. Propriétés.....	31
<b>2.3. Impact environnemental.....</b>	<b>32</b>
2.3.1. Définition de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV).....	32
2.3.2. ACV de la production de fibres de lin .....	34
2.3.3. ACV d'un composite polypropylène / lin pour l'automobile .....	36
<b>3. Analyse stratégique .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1. Les enjeux économiques des biocomposites dans l'automobile.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2. Structure concurrentielle de l'industrie des composites – Diagramme de PORTER .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3. Perspectives d'évolution.....</b>	<b>42</b>
3.3.1. Diagnostic stratégique – Matrices SWOT .....	42
3.3.2. Élaboration de scénarios.....	44
<b>Conclusion .....</b>	<b>47</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>48</b>
<b>Table des figures.....</b>	<b>51</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>53</b>

Le secteur de l'automobile est actuellement en plein essor dans le monde. En effet, il est le symbole du développement d'un pays, de l'accroissement de la population et d'un besoin de mobilité grandissant. En effet selon l'INSEE [1], en 1990 seulement 76,8% des ménages français possédaient au moins une voiture contre 82,9% en 2015.

Dans les années 60, la voiture ne contenait que 6% de matériaux plastiques contre 15% aujourd'hui [4 - 2018].

Cette évolution s'explique par un cahier des charges de plus en plus pointu avec la recherche du meilleur matériau et d'un procédé de fabrication optimisé pour chaque pièce. Ces contraintes peuvent être d'ordre technique, industriel, économique (coût des matériaux, de la production), ou bien encore socio-environnemental (normes, envie du client). Par exemple, la consommation du carburant cherche constamment à être diminuée pour des raisons économiques et environnementales. Cela est directement relié à la diminution de la masse du véhicule. Ainsi une partie des pièces métalliques a été remplacée par du plastique. Aussi, la diminution de la masse diminue les contraintes mécaniques subies par les voitures et donc allonge le temps de vie de celles-ci.

L'évolution des matériaux utilisés implique une évolution des techniques, en effet le changement de matériaux doit impacter le plus faiblement possible les propriétés mécaniques des pièces. Afin de répondre à ces différentes contraintes, sont apparus les matériaux composites<sup>1</sup> dans l'automobile au milieu des années 1950.

A cette époque, il y avait peu de diversité dans les matériaux employés et les procédés de transformation. Les industriels employaient principalement comme matrices des polyesters therm durcissables avec des renforts en fibres de verre courtes. Ces composites étaient fabriqués manuellement dans des moules ouverts ou fermés suivant le procédé SMC (Sheet Moulding Compound).

Au XXI<sup>e</sup> siècle, il existe une plus grande variété de matériaux et de procédés. Les matrices sont soit thermoplastiques (polypropylène, polyamide, polyuréthane, ...) soit therm durcissables (polyester, vinylester, époxy, polydicyclopentadiène,...). Les renforts peuvent être des fibres de verre, d'aramide, de carbone ou encore thermoplastiques. Elles peuvent être aussi végétales et utilisées sous différentes formes (courte ou longue, continue, tissée, tressée, tricotée).

---

<sup>1</sup> Voir la définition d'un matériau composite en introduction de la partie 1 : Les composites dans l'automobile.

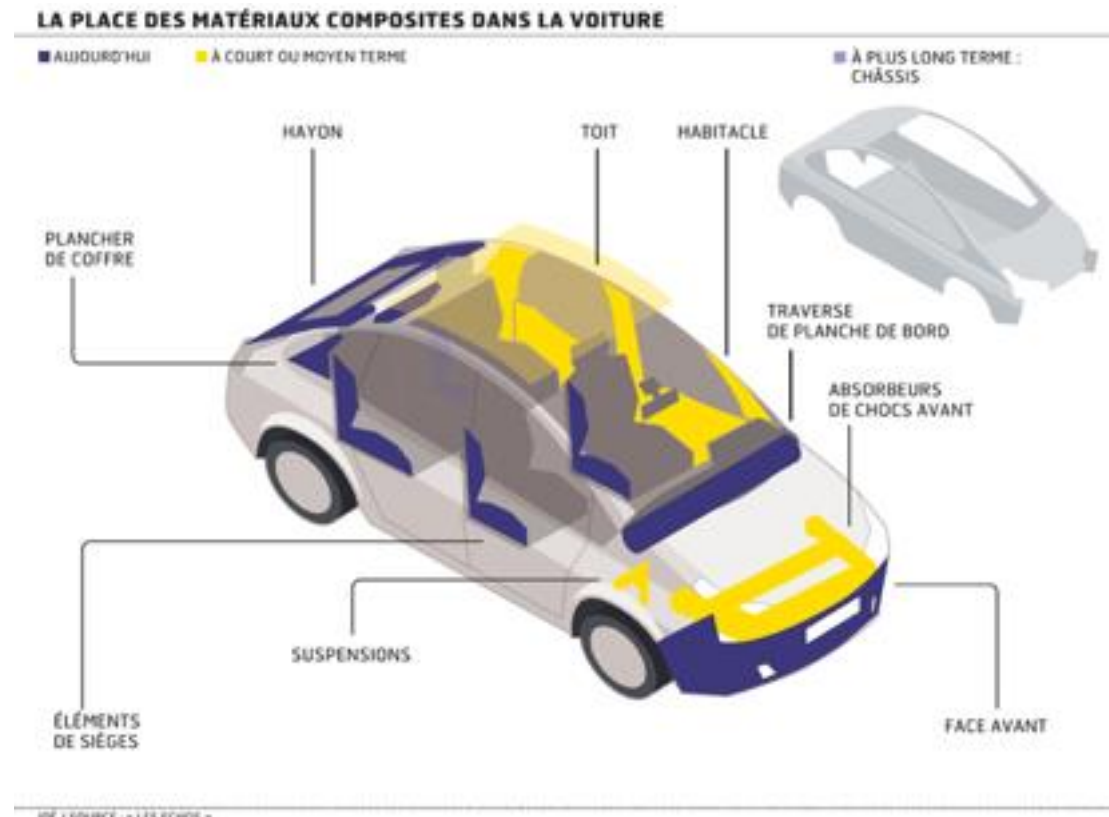


Figure 1 : La place des composites dans une voiture [NIEDERCORN 3 - 2012]

Selon les véhicules, les pièces de la voiture en composites représentent entre 10-20% en masse, répartis de la manière suivante [3] :

- équipement intérieur ou habitacle : 50 %
- applications extérieures : 30 à 35 %
- pièces sous capot : 15%
- pièces de structure : 0 à 5%

L'utilisation de fibres végétales ou naturelles comme renfort dans les composites est en pleine croissance. Elles ont beaucoup d'avantages comme leur faible densité (ce qui va permettre de réduire drastiquement le poids des pièces), leur disponibilité, leur empreinte carbone neutre et leur prix ainsi que leurs propriétés mécaniques. Cela rend ces fibres attrayantes par rapport aux fibres de verre, de carbone et autres fibres synthétiques utilisées plus conventionnellement [4].

En effet, le principal argument de l'emploi des fibres naturelles dans l'automobile est leur faible densité : la densité du lin est de  $1,4 \text{ g/cm}^3$  alors que celle de la fibre de verre est  $2,5 \text{ g/cm}^3$ . L'utilisation de ces fibres permet donc de réduire le poids des composites et donc des pièces dans la voiture ce qui va encore réduire la consommation du véhicule et ses émissions de gaz à effet de serre.

L'autre argument fort des fibres naturelles est qu'elles permettent de réduire la consommation en énergie dans le processus, de réduire le coût de fabrication du composite et d'améliorer certaines propriétés comme l'amortissement ou l'acoustique.

Les faisceaux de fibres de lin<sup>2</sup> sont privilégiées dans le secteur de l'automobile car elles ont une faible densité (donc une forte capacité d'allègement des pièces), de bonnes propriétés mécaniques et sont peu chères (grâce à leur forte disponibilité) par rapport aux autres fibres végétales. En effet leur forte disponibilité en Europe est due au fait que la France en est le premier producteur mondial en quantité et en qualité [5].

La recherche et l'industrialisation sur les composites à base de fibres lignocellulosiques connaît un essor considérable depuis quelques années [17 – 2017]. Les fibres de lin sont de plus en plus utilisées par rapport aux fibres de verre pour faire face au défi de développer des technologies durables et de fabriquer des matériaux écologiquement plus acceptables. Cependant, les défis d'utilisation des fibres végétales comme renfort dans des polymères sont nombreux.

Ce rapport permettra de montrer quels sont ces défis et comment sont-ils relevés. Il permettra également de montrer comment les biocomposites therm durcissables à base de fibres de lin ont réussi à s'intégrer dans le secteur automobile.

## 1. Les composites dans l'automobile

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux de natures et de miscibilités différentes. Chaque composite est composé d'une matrice et d'un renfort. Le renfort constitue le squelette et supporte l'ensemble des contraintes du composite. Les renforts peuvent être de quatre sortes [6] :

- Renfort organique (ex : fibre de verre)
- Renfort minéral (ex : fibre de carbone)
- Renfort métallique (ex : fibre de bore)
- Renfort "vert" (ex : fibre de lin, fibre de chanvre)

Un biocomposite est un composite qui possède soit une matrice biosourcée, soit des renforts naturels, soit les deux. Il est soit appelé "biocomposite vert" si la matrice ou le renfort est d'origine biosourcé, soit "biocomposite vert-vert" si les deux matériaux sont biosourcés.

La matrice garantit la liaison de l'ensemble, protège le renfort et répartit les efforts. Les matrices peuvent être soit de type époxy, polyester, phénolique. L'intérêt d'un composite est la combinaison de plusieurs propriétés. En effet, chaque matériau utilisé possède certaines propriétés et l'assemblage de plusieurs matériaux permet d'augmenter la diversité des propriétés du composite (mécaniques, thermiques et chimiques).

---

<sup>2</sup> Dans ce rapport, « Fibre végétale » se rapporte à « Faisceau de fibres » par abus de langage

## 1.1. Historique des composites dans l'automobile

La première apparition des composites dans l'industrie automobile s'est faite en 1953 où les châssis et les panneaux de carrosserie de la Chevrolet Corvette et berline Alpine étaient réalisés en polyester avec contact de fibres de verre. [7]

En 1955, le toit de la Citroën DS 19 est fabriqué en grande série en panneaux non métalliques (mélange d'un polyester avec des fibres de verre).

En 1957 à cause de la pénurie d'acier en Allemagne de l'est, la carrosserie de la Trabant 601 est fabriquée en résine phénolique thermodurcissable renforcée par des fibres de coton.

En 1968, la Méhari Citroën possède une coque en ABS thermoformé et teinté dans la masse.

En 1972, les boucliers avant et arrière de la Renault 5 sont un mélange de polyester et de fibres de verre. Ce sont les premières pièces structurales composites fabriquées en grande série.

En 1982, la Citroën BX est composée d'un capot mono-pièce (BMC), d'un hayon bi-pièce (SMC) et de custodes latérales (SMC).

En 1984, les panneaux de carrosserie de la Renault Espace sont en panneaux de polyester et fibres de verre collés sur une cage en acier zingué. Cela correspond à 100 kg/voiture et permet une production de pièces pour 450 véhicules par jour.

En 1996, la production de panneaux de carrosserie Fiero et Saturn (ABS et charges) est de 1000 véhicules par jour.

En 2000, Audi lance la voiture de milieu de gamme A2 dans laquelle les panneaux de porte ont été fabriqués en polyuréthane renforcé de mélanges de mâts de lin et de sisal.

En 2015, une nouvelle réglementation impose de diminuer de 5% la masse des véhicules en vue d'amoinrir leur consommation de carburant. Cela permet l'augmentation de l'utilisation de fibres végétales par rapport aux autres fibres (verre / carbone) car leur densité est plus faible et leurs propriétés mécaniques se concurrencent (cf. Figure 18).

En 2015, Faurecia, Linéo, PSA développent le Flaxpreg, un composite à base de lin utilisé dans la fabrication de faux-plancher de coffre à multi-positions ou de plancher structurel à l'intérieur de l'habitacle. [8]

Aujourd'hui, de nombreux constructeurs comme PSA, Renault, BMW ou Mercedes-Benz [9 - 2015] utilisent les biocomposites pour alléger leur voiture (voir la partie 1.3.3.1).

Des « concept cars » sont également fabriquées avec une grande majorité de pièces biosourcées. Par exemple le projet Lina est un projet où des étudiants de l'Université Technologique d'Eindhoven, aux Pays Bas, ont réalisé une voiture électrique ultra légère de 300 kg. Pour cela, le châssis complet, la carrosserie et l'intérieur du véhicule ont été fabriqués en composites fibres de lin et PLA assemblés par thermocompression. La mise en forme a été réalisée par EconCore tandis que le PLA 100 %

biodégradable a été fourni par NatureWorks [4 - 2018]. Ce véhicule est certifié en état de rouler et parcourt les Pays Bas afin de faire la promotion de l'écoconception, un concept dans l'ère du temps.

## 1.2. Le marché de l'automobile et des composites

Le marché de l'automobile représente une part importante de l'industrie des matériaux. En Europe, il est produit un peu plus de 17 millions de véhicule par an ce qui représente une production mondiale de 62 millions de voitures [16 – 2018]. Cela représente en Europe environ 22 milliards de kg de matériaux (pour une moyenne de 1300 kg par voiture).

Le marché des composites (en 2007) correspond à 8,6 millions de tonnes de matières (36% en Amérique du Nord, 26% en Europe et 38% en Asie, Pacifique et le reste du monde) [16 – 2018]. La part des composites dans les véhicules est de 33% en Europe et 28% dans le monde) [16 – 2018]. Les composites qui ont une matrice thermoplastique correspondent à 37% du marché des composites, contre 63% pour les thermodurcissables [10 – 2018] comme le montre la Figure 2.

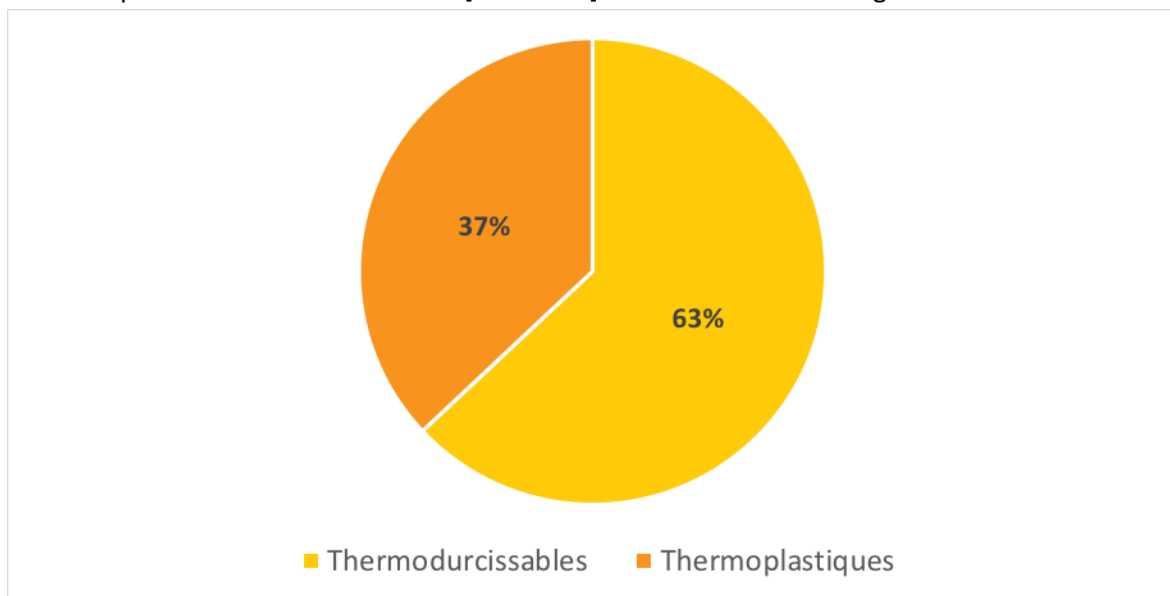


Figure 2 : Les différentes matrices sur le marché des composites [GERADON 10 – 2018]

En 2007, les composites à matrices thermodurcissables et renforcées de fibres de verre et de carbone représentaient 300 000 tonnes par an dont 36% pour le secteur de l'automobile.

En 2017, la production de biocomposites était de 410 000 tonnes contre 357 000 tonnes en 2012 [10 – 2018]. Ceci correspond à une croissance annuelle de la production d'environ 3%, cette valeur est similaire à celle de la croissance annuelle de la production des plastiques. Il existe plus de 30 entreprises qui fabriquent et vendent 80 000 tonnes de granulés en plastique renforcés par des fibres naturelles (bioplastique). Le secteur de l'automobile représente 36% du marché des biocomposites soit 150 000 tonnes en 2017 comme montré dans la figure 3 [10 - 2018].

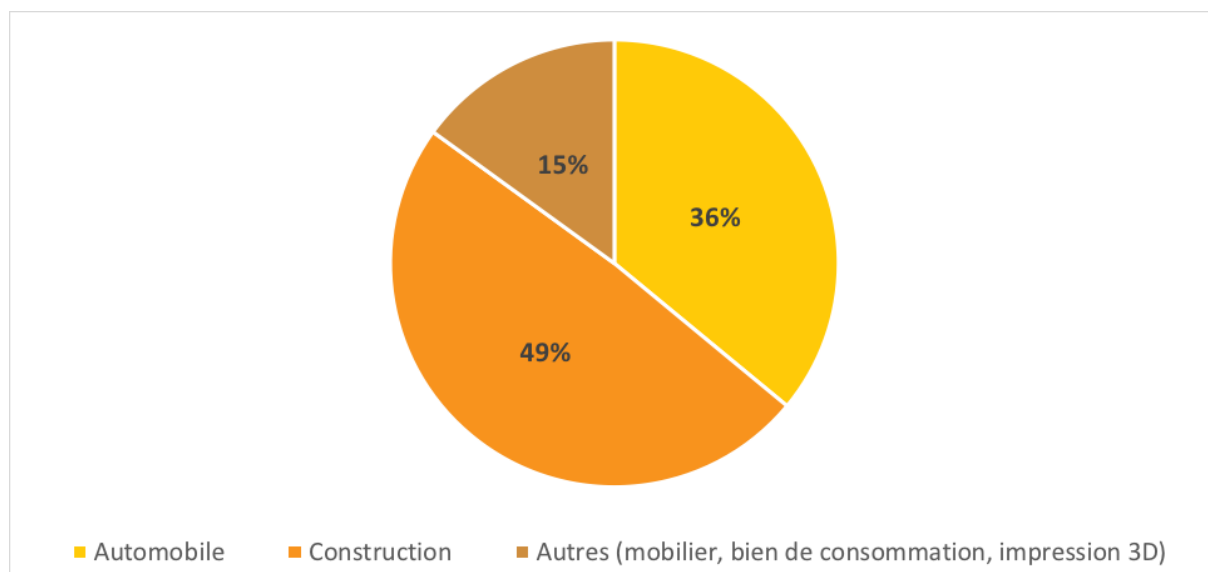


Figure 3 : Les secteurs d'applications des biocomposites [GERADON 10 – 2018]

La production de biocomposites peut se faire soit par l'ajout de fibres naturelles soit par l'ajout d'une matrice composée d'un polymère biosourcé.

Il existe des projets valorisant les biocomposites comme le projet Interreg COMPOSENS [11] ayant pour objectif de développer un composite polymère à base de bois ou de fibres végétales et d'obtenir de hautes performances et un faible impact environnemental. Les principaux partenaires de ce projet sont des centres de recherche comme Certech, l'INRA et CRITT MDTs.

### 1.3. Les matériaux utilisés

#### 1.3.1. Les contraintes des constructeurs

Une voiture doit répondre en moyenne à 60 réglementations [2]. Les constructeurs doivent donc prendre en compte ces contraintes réglementaires internationales lors de la fabrication de leurs automobiles. Ces contraintes sont principalement liées aux émissions sonores du moteur vers l'extérieur, à la sécurité des passagers et des personnes extérieures à la voiture (chocs à haute vitesse ou non, frontales ou non). Les contraintes environnementales sont également importantes avec un contrôle des gaz d'échappement et de CO<sub>2</sub> et le recyclage des véhicules en fin de vie. [2]

Pour la diminution des émissions sonores, les matériaux avec des propriétés amortissantes élevées sont recherchés. Les pièces métalliques sont remplacées par des composites, pour réaliser des écrans acoustiques pour des carénages sous moteur par exemple.

Au niveau de la sécurité, les véhicules doivent posséder une résistance au crash la plus élevée possible et à la réduction des impacts extérieurs (piétons, deux-roues). Les fabricants recherchent donc des matériaux avec une forte capacité d'absorption progressive d'énergie.

Il existe aussi la directive 2009/23/CE relative à la promotion des véhicules de transport routier propres et économes en énergie. En 2018 les émissions de CO<sub>2</sub> sont de 135 g/km et l'Union Européenne impose une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> à 95 g/km en 2020 [4 - 2018]. Il existe aussi des réglementations



dans d'autres pays comme les USA (99 g CO<sub>2</sub>/km en 2025), la Chine (117 g CO<sub>2</sub>/km en 2020) ou l'Inde (113 g CO<sub>2</sub>/km en 2022).

L'allègement des véhicules est le second levier le plus efficace dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> comme montré dans la figure 4. En effet, les composites ont des densités plus basses que les matériaux utilisés classiquement dans les véhicules et donc peuvent être une solution à l'allègement des véhicules.

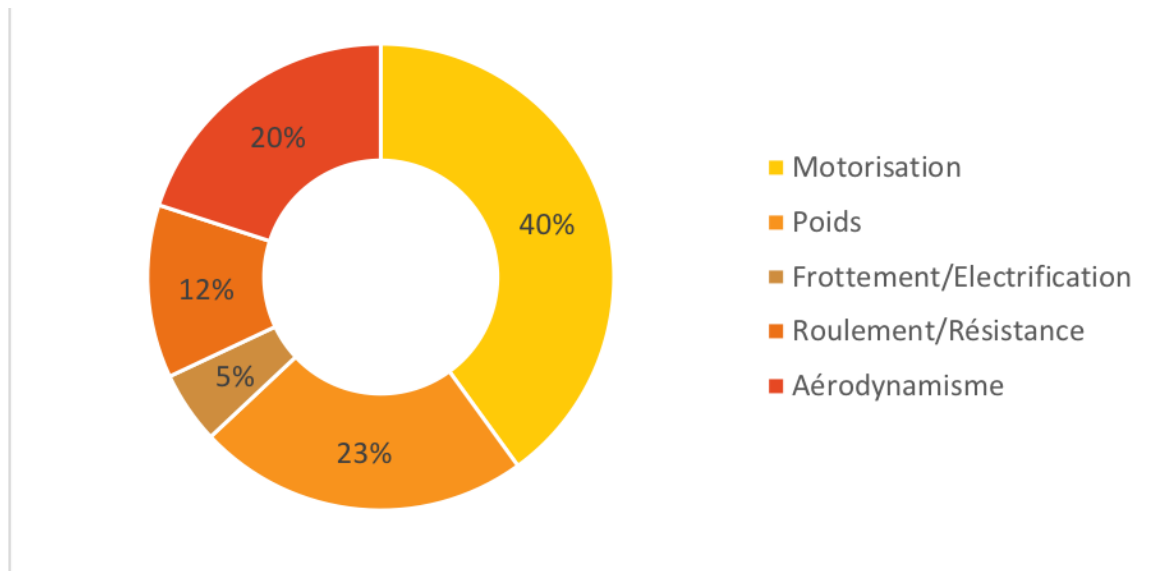


Figure 4 : Leviers pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules [GERADON 4 - 2018]

De plus, il a été montré que la diminution de masse de 100kg dans un véhicule réduit la consommation de carburant de 0,4L/100km ce qui correspond à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 10g/km [4 – 2018].

Au niveau du recyclage, les composantes métalliques sont recyclées depuis longtemps mais la filiale de recyclage du plastique est en plein développement. De plus le recyclage des pièces plastique s'est amélioré grâce à la directive européenne 2000/53/CE qui demandait pour 2015, « une valorisation des véhicules à hauteur de 95 % dont 85 % de recyclage/réemploi en masse des matériaux constitutifs du véhicule » [2 – 2011].

Les constructeurs cherchent à minimiser les coûts que ce soit du matériau, de la conception de la pièce ou du procédé de transformation. De manière générale le coût d'une pièce est réparti de la manière suivante : 60% pour le prix du matériau et 40% pour la mise en œuvre [2 – 2011]. Ceci implique de sélectionner des matériaux et des procédés de mise en œuvre qui correspondent et maximisent les performances attendues.

### 1.3.2. Les attentes des clients finaux

En majorité, les clients attendent un coût global le plus faible possible, ce qui regroupe les prix de l'achat, de l'entretien, de l'assurance et de l'utilisation courante. Si le véhicule est plus léger, alors l'usure sera plus lente ce qui va faire baisser le coût de l'entretien et augmenter la durée de vie du

véhicule. Cela va également faire baisser sa consommation de carburant et donc baisser son coût d'utilisation. Cela implique que les matériaux doivent avoir de faibles variations de dimensions et de propriétés et que l'usure et la fatigue doivent être connus et limités.

Certains clients s'intéressent à l'originalité et à l'image du véhicule qu'ils possèdent. L'effet de mode du moment est d'avoir une voiture plus écoresponsable, c'est à dire avec une empreinte carbone plus faible (voiture électrique, matériaux biosourcés).

### 1.3.3. Les polymères employés pour répondre à ces exigences

---

Selon les critères recherchés, il faut choisir une matrice adéquate. Chaque matériau possède des réactions à la chaleur différentes. Cette réaction à la chaleur permet de différencier deux classes de matériaux : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Ces deux classes se différencient principalement la création d'un réseau tridimensionnel, appelé réticulation.

Les thermoplastiques sont des matériaux à base de polymères pétrosourcés ou biosourcés qui sont recyclables grâce au fait qu'ils se ramollissent facilement sous l'action de la chaleur. Leur demande en énergie est faible car les thermoplastiques sont principalement constitués de chaînes linéaires ou ramifiées. La température limite d'utilisation d'un thermoplastique dépend de son caractère amorphe ou semi-cristallin. Parmi les matrices classiquement utilisées, il existe les polyéfines, qui ont des températures de mise en oeuvre faibles ou modérées tels que le polyéthylène (PE) et les polychlorures de vinyle (PVC). Cependant, ces matrices thermoplastiques sont celles qui présentent les moins bonnes propriétés mécaniques mêmes s'il existe certaines possibilités pour accroître les propriétés mécaniques comme l'enrobage ou le greffage.

Les thermodurcissables sont difficilement recyclables car leur solidification est irréversible. En effet le réseau tridimensionnel comporte des nœuds covalents qui demandent une énergie trop importante pour être rompues. Outre la chaleur, il existe tout de même des traitements chimiques permettant de ramollir ces thermodurcissables afin de récupérer les composants sous forme de pâte, par exemple en utilisant du CO<sub>2</sub> supercritique afin de rompre les liaisons. Les matrices thermodurcissables principalement utilisées sont des polyesters insaturés, des résines vinylesters, phénoliques et époxy. En générale, les matrices thermodurcissables possèdent de meilleures propriétés mécaniques que les thermoplastiques et leur stabilité des propriétés mécaniques à la température est aussi meilleure comme elles réagissent peu à la température. De plus à température ambiante et avant réticulation, elles présentent aussi une faible viscosité qui implique une meilleure imprégnation du renfort fibreux.

Il existe des matrices biosourcées formées exclusivement à l'aide de biopolymères provenant de la biomasse végétale ou animale comme les polysaccharides. Les plus connus sont : la cellulose, l'amidon, la chitine et le chitosane. Il existe aussi les polyhydroxyalcanoates (PHA). Cependant les biopolymères les plus utilisés comme matrice de matériau biocomposite reste les polylactides et les dérivés cellulosiques. Cependant, la mise en forme de ces matrices reste compliquée à cause de leur structure riche en oxygène qui entraîne une sensibilité à l'humidité. De plus ces matrices sont aussi fragiles à cause de leurs faibles masses molaires.

### 1.3.3.1. Les pièces produites

Les composites et les matériaux polymères peuvent être utilisés dans les habitacles de véhicules. Ils se retrouvent principalement dans les pièces suivantes : planche de bord, poste de conduite, ébénisterie, habillage de porte, garniture de toit, tablette arrière, tapis de sol et textiles. [2]

Leurs principales propriétés sont : l'amélioration du confort acoustique, la perception tactile, aspect (matériaux peints, teintés masse ou décorés avec des films), la limitation des émissions (odeurs, composés organiques volatils (COV) et les dépôts sur l'intérieur des vitrages et fogging). Le principal est de satisfaire les exigences d'aspect et de tenue à l'ensoleillement et à la rayure.

Les principaux matériaux utilisés comme matrice du composite ou comme polymère seul sont le : PP, PE, ABS, et ABS/PC, ASA, PVC, mousses thermoplastiques PP ou PUR chargées ou non et les résines époxydes<sup>3</sup>.

Les techniques de mise en œuvre sont détaillées dans le chapitre 2.2.1. Ces techniques peuvent être associées à la réalisation de « pièces sandwich » avec carton, bois, fibres de verre et fibres végétales (lin, chanvre). L'évolution des procédés permettrait la réalisation de pièces multi-matériaux en une opération comme le co-moulage, la bi-injection, l'injection basse pression.

La conception des pièces évolue vers le développement de pièces prêtes à monter avec plusieurs fonctions (panneaux de porte, garnitures de toit, ensemble du poste de conduite comprenant planche de bord et console) comme montré dans la figure 5.

Utilisations	Matrice utilisée
Dossiers, housses, tablettes arrière, autres garnitures intérieures, plateaux de plancher, panneaux de pilier, panneaux de porte	PP
Support pour panneaux de porte recouverts	Résine epoxyde
Doublures et panneaux de porte intérieurs	Résine thermodurcissable
Insonorisation, panneau de coffre, isolation	PP ou PET
Support pour panneaux de porte recouverts, tableaux de bord recouverts ou en mousse, inserts et composants recouverts, panneaux de dossier de siège revêtus, fibre dans les coussins de dossier, inserts, roue de secours, housses	Résine acrylique

Figure 5 : Exemples d'utilisation dans l'automobile de composites à matrice TD ou TP et renfort végétal [RAMLI 12 – 2018]

### 1.3.3.2. Les propriétés

Les figures 6 et 7 montrent que le module d'élasticité en traction est en moyenne 3 fois plus élevé pour les thermodurcissables (figure 7) que pour les thermoplastiques (figure 6), ce qui explique qu'ils sont plus utilisés comme matrice polymère dans les composites automobiles car ils sont plus résistants.

<sup>3</sup> Voir la liste non exhaustive des polymères et leurs acronymes en annexe 1

Cependant leur masse volumique est un peu plus élevée ce qui va alourdir le véhicule. C'est pour cela que les composites therm durcissables sont plus utilisés pour la fabrication de pièces de structures, tandis que les thermoplastiques sont utilisés surtout dans des applications intérieures et pour l'allègement de pièce sous capot.

Propriétés physiques et chimiques	PE haute densité	PE basse densité	PP	PS	PVC
Densité	0,95 – 0,97	0,91 - 0,93	1,41	1,05	1,35
Température max d'utilisation continue (°C)	90	50	100	85	60
Type de polymérisation	Ziegler Natta	Radicalaire	Ziegler Natta	Radicalaire	Radicalaire
Contrainte à la rupture (MPa)	30 – 35	9 – 23	45	60	58
Module de traction (GPa)	1,4	0,2	1	1,6	2,8
Prix (indice)	11	6	12	13	6

Figure 6 : Comparaisons de différentes propriétés des thermoplastiques les plus utilisés dans l'industrie automobile [AUCHET 13 - 2011]

	Résines polyesters	Résines époxydes	Résines vinylesters
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	1200	1100 à 1500	1200
Module d'élasticité en traction (GPa)	2.8 à 3.5	3 à 5	3.4 à 3.5
Module d'élasticité en flexion (GPa)	3 à 4.5		3.1 à 3.8
Contrainte à la rupture en traction (MPa)	50 à 80	60 à 80	70 à 85
Contrainte à la rupture en flexion (MPa)	90 à 130	100 à 150	115 à 140
Allongement à la rupture en traction (%)	2 à 5	2 à 5	2.5
Résistance au cisaillement (MPa)	10 à 20	30 à 50	
Température de fléchissement sous charge à 1.8 MPa (°C)	60 à 100	290	100 à 140

Figure 7 : Comparaison de différentes propriétés mécaniques des therm durcissables les plus courants [BOUFAIDA 14 - 2015]

Il existe également des matrices thermoplastiques biosourcées. En effet, l'acide polylactique (PLA) ou les polyhydroxyalcanoates (PHA) sont issus de la biomasse. Le PLA est polymérisé par condensation ou ouverture de cycle à partir de l'acide lactique. Le PHA est fabriqué à partir de fermentation bactérienne de sucres ou de lipides. Le PHA a un module d'élasticité de 1,5 GPa et le PLA de 2,7 GPa ce qui en fait un matériau résistant [18].

## 1.3.4. Les nouveaux matériaux : les biocomposites

### 1.3.4.1. Présentation

La plus grande différence entre un composite et un biocomposite est sa fin de vie. En effet, un biocomposite doit respecter des normes de biodégradabilité et de biocompostabilité et/ou de recyclabilité. C'est pourquoi il faut définir ses trois termes.

- **Recyclabilité** : Ce terme correspond à la capacité d'un matériau à pouvoir être réutilisé. Dans un biocomposite therm durcissable, la partie la plus difficile lors de son recyclage est la matrice comme vu dans la partie 1.3.3 (souvent une résine époxy).
- **Biodégradabilité selon la norme ISO 14852 : 2018 [16]** : Ce terme correspond à la capacité d'un matériau à se dégrader en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O dans la nature par des êtres vivants, aussi appelée bioassimilation. De plus, il existe des normes de biodégradabilité : le temps de bioassimilation du matériau doit être inférieur à 6 mois et le temps de dégradation doit être inférieur à 12 semaines.
- **Biocompostabilité selon la norme ISO 17088 : 2012 [16]** : Un matériau biocompostable est biodégradable. Mais ce terme est surtout utilisé pour définir les conditions dans lesquelles les matériaux sont dégradés.

L'industrie automobile cherche à remplacer les fibres de verre et de carbone par des fibres végétales. En effet, depuis quelques années la recherche sur les polymères composites à base de fibres biosourcées est en pleine croissance notamment dans les domaines de l'automobile, de l'aéronautique, du sport, de la construction ou dans l'emballage [17]. Le défi est de développer des technologies durables et de fabriquer des matériaux plus acceptables écologiquement.

Les fibres végétales possèdent plusieurs avantages par rapport aux fibres synthétiques. En effet leur densité et leur coût est plus faible (voir partie 2.2.2). Leur disponibilité et leur abondance varient en fonction de la zone géographique ce qui permet de diminuer les coûts de transport. Il existe donc une grande diversité de fibres utilisées en fonction des régions du monde. En effet, la figure 8 montre que par exemple la fibre de coco est utilisée au Brésil, contrairement à l'Europe ou de lin, le chanvre et le sisal sont plus utilisés par des constructeurs comme Opel, Mercedes-Benz ou Chrysler. Au Japon, le constructeur automobile Toyota utilise la fibre de kénaf. Les fibres végétales ont également de bonnes propriétés mécaniques (voir chapitre 2.2.2) et sont peu abrasives, ce qui diminue l'usure des appareils utilisés lors des mises en forme des pièces.

Constructeur auto/modèle	Pièces	Fibre végétale utilisée
Brazilian trucks	Garniture, coussins de sièges	jute coco
Mercedes Benz (Classe E)	Panneaux intérieur de portes	Sisal /lin
Mercedes Benz (Classe C)	Panneaux de lunette arrière	sisal, de coton
Mercedes Benz (Classe S)	Panneaux intérieurs de portes	Chanvre
Chevrolet Impala	Garniture de panneaux	Lin
Daimler Chrysler (MB Travego Coach)	Couverture du moteur et de la transmission	sisal, lin, fibre de coco, le chanvre, le coton
General Motors (Opel Astra/Vectra)	Panneaux intérieurs de portes, dossier de sièges	chanvre, kénaf et lin
Toyota	Tablette de coffre	Kénaf

Figure 8 : Exemples de pièces de voitures contenant des fibres végétales [BOUZOUITA 9' - 2013]

Il existe cependant encore des limites à l'utilisation des biocomposites dans l'automobile. Premièrement, il y a des freins liés aux procédés d'assemblage des véhicules. L'investissement dans les biocomposites est très coûteux pour la conception de nouveaux véhicules. En effet cela demande un investissement dans des nouveaux procédés comme la compatibilisation renfort/matrice et l'imprégnation du renfort par le polymère.

En effet, la plupart des matrices polymères utilisées dans l'industrie sont des polymères non polaires alors que les fibres végétales composées de cellulose sont hydrophiles, c'est à dire polaires<sup>4</sup>. Cela implique une faible mouillabilité, une mauvaise distribution et dispersion des fibres dans les matrices polymères. Il y a aussi une faible adhésion fibre/matrice. Pour résoudre ces problèmes, il faut réaliser un traitement de surface des fibres (voir partie 2.1.1) avant la mise en forme des pièces afin de les fonctionnaliser. [17]

Il existe également des problèmes concernant la variabilité des propriétés des fibres en fonction de leur source, en particulier leur caractère hydrophile ce qui peut entraîner une tendance à absorber des fortes quantités d'eau lors des applications en particulier dans l'automobile. Aussi, la matière végétale ne résiste pas à des hautes températures ce qui limite la mise en œuvre des composites à un maximum d'environ 200°C. Cela restreint le choix de polymères thermoplastiques à faible point de fusion comme le polyéthylène, le polychlorure de vinyle et le polystyrène. [17]

Des freins liés aux approches culturelles peuvent être rencontrés. En effet, l'utilisation d'acier est encore prédominante dans l'esprit des constructeurs. La plupart du temps lors de la conception d'un nouveau modèle les modèles précédents sont souvent utilisés.

Pour finir il existe des freins liés aux réglementations environnementales. En effet la directive européenne 2000/53/CE stipule que en 2015, 95% de la masse d'une voiture doit être recyclée ou revalorisée.

<sup>4</sup> La polarité d'une molécule est due à la différence d'électronégativité entre les éléments chimiques qui la composent et à leur répartition dans l'espace. Si la répartition est asymétrique, la molécule sera polaire et si elle est symétrique, la molécule sera apolaire.

### 1.3.4.2. Le marché des biocomposites

La figure 9 montre que le taux de croissance annuel global (CAGR) de la production de biocomposites en Europe est d'environ 3%, ce qui correspond environ à la croissance moyenne du marché des plastiques. Mais des taux de croissance beaucoup plus élevés, allant jusqu'à 30%, ont été identifiés dans divers domaines d'application innovants des biocomposites. Ces domaines d'application vont des applications techniques aux meubles en passant par les biens de consommation produits principalement par le moulage par injection, la 3D et d'autres méthodes de production comme le rotomoulage. Le taux de croissance nul dans l'automobile est dû au fait que les biocomposites qui se développent dans ce secteur sont les biocomposites à matrice thermodurcissables et non thermoplastique comme le présente ce tableau. Le marché de l'automobile représentant environ 40% du marché des biocomposite cela explique le faible taux de croissance global dans ce tableau.

En outre, dans le secteur des granulés commercialisés, le taux de croissance global a également été nettement supérieur à la moyenne en 2017 (15%).

Biocomposites	2012	2017	CAGR% (de 2012 à 2017)
Terrasses, bardages et clôtures, principalement l'extrusion	190 000	200 000	1
Automobile, principalement compression moulage	150 000	150 000	0
Applications techniques, meubles et biens de consommation, principalement moulage par injection, 3D et autres	17 000	60 000	29
<b>Total</b>	<b>357 000</b>	<b>410 000</b>	<b>3</b>
Production et commercialisation de granulés pour le moulage par injection et l'extrusion	40 000	80 000	15

Figure 9 : Production européenne (en tonnes) de biocomposites en 2012 et 2017 [Nova-Institute, 31 – 2017]

Il existe de nombreuses raisons de remplir ou de renforcer les plastiques avec du bois ou des fibres naturelles de toutes sortes. Les raisons optiques et de toucher jouent un rôle lorsqu'il s'agit de différencier les produits des produits en plastique standard. En particulier dans les ménages, les biens de consommation et les jouets sont des considérations importantes pour l'optique, le toucher et l'image verte. Un gain de poids, des temps de cycle plus courts, une résistance aux rayures et une empreinte carbone réduite jouent un rôle crucial dans les applications techniques et dans l'industrie automobile. Et, en combinaison avec les plastiques biodégradables, des produits sont également fabriqués pour l'agriculture et l'horticulture ainsi que pour des applications spéciales telles que les billes filtrantes et les capsules de café.

Aujourd'hui, outre les fabricants de composants expérimentés qui proposent depuis des années une grande variété de biocomposites, de nouveaux fournisseurs sur le marché souhaitent utiliser des technologies innovantes pour produire et commercialiser des granulés encore meilleurs.

Au total, plus de 30 producteurs de composés européens avec différents polymères et fibres naturelles produisent actuellement plusieurs centaines de recettes. Les plastiques pétrochimiques courants sont le PP, le PE, le PVC et le TPE / TPS. De plus en plus souvent, des biopolymères tels que Bio-PE, PLA, PBS,

PBAT ou PHA sont utilisés. Selon l'application visée, les fibres naturelles contiennent également de la farine de bois, des fibres de bois, des fibres de cellulose, des fibres libériennes telles que le chanvre, le lin, le jute ou le kénaf, mais également du bambou, du liège ou des fibres de coques de graines de tournesol. La teneur en fibres pour les granulés de moulage par injection est généralement comprise entre 20% et max. 50%, avec des contenus d'extrusion allant jusqu'à 80% sont possibles. [32]

La figure 10 répertorie les principaux fournisseurs européens de granulats de plastique renforcé de fibres de bois et de fibres naturelles avec leurs quantités de production en 2017. Seuls quelques fabricants sont en mesure de produire et de vendre des quantités de 10 000 t ou plus par an. Le plus gros producteur est la société portugaise Amorim avec ses granulats renforcés liège, qui sont utilisés dans les semelles de chaussures, les manches et même dans les voyages dans l'espace. De nombreux producteurs produisent moins de 1 000 t / an ou même seulement 500 t / an, bien que certains d'entre eux, marqués dans le tableau par «NEW», aient des plans de croissance très substantiels. [32]

Au cours des prochaines années, des capacités de production supplémentaires de plus de 50 000 à 300 000 tonnes devraient apparaître. Cette estimation pourrait ne pas être irréaliste car la qualité et les prix se sont régulièrement améliorés au cours des dernières années et de nombreux granulats ont aujourd'hui un rapport qualité-prix attractif. [32]

En revanche, les nouveaux producteurs n'ont pas réussi à mettre sur le marché des quantités supérieures à 20 000, voire 50 000 t / an au cours des dernières années. Pour cette raison, certains acteurs se sont retirés du marché (Borealis, A. Schulman), tandis que d'autres ont considérablement modifié leurs plans (Mondi, PolyOne, UPM). [32]



Granulate Producer	Country	Polymers	Fibres	Production 2017 in tonnes
AMORIM	PT	PP, TPE/TPS	Cork	20.000 – 50.000
Beologic	BE/AT	ABS, PC, PE, PHA, PHB, PLA, PMMA, PP, PS, PVC, SAN, TPE	Wood and natural fibres and others	10.000 – 20.000
Tecnaro	DE	Lignin, PE, PP, PLA, PP, PBS, PBAT	Wood and natural fibres	5.000 – 10.000
Advanced Compounding	DE	PA, PE, PP	Wide range of natural fibres	1.000 – 5.000
Golden Compound	DE	PP, Biopolymers	Fibres from sun flower shells	1.000 – 5.000
Jelu Werke	DE	PP, Biopolymers	Wood and natural fibres and others	1.000 – 5.000
Pinuform	DE	PE	Wood	1.000 – 5.000
Plasticwood	IT	PP	Wood	1.000 – 5.000
Biowert	DE	PE, PP, PLA	Grass fibres, flax	500 – 1.000
FKuR	DE	Bio-PE, Bio-TPE, PHA, PLA, PP	Bamboo, wood, corc	500 – 1.000
Hexpol	SE	TPE	Cork	500 – 1.000
UPM	FI	PP	Cellulose fibres	500 – 1.000
Werzalit	DE	PP	Wood	500 – 1.000
Addiplast	FR	PP	Wood and natural fibres, cellulose fibres	< 500
Aqvacomp	FI	PP	Cellulose fibres	< 500 NEW
GreenGran	NL	PP, biopolymers	Natural fibres	< 500
HempFlax	NL	PP, PLA	Natural fibres	< 500 NEW
Linotech	DE	PP, PLA	Wood and natural fibres	< 500
Mondi Paper	AT	PP	Cellulose fibres	< 500
PolyOne	USA/EU	PP	MDF wood fibre	< 500
Sappi	SA/DE	PP	Cellulose	< 500 NEW
Transmare	NL	PP, PLA	Wood, bamboo and natural fibres	< 500
<b>Total</b>	<b>EU</b>			<b>80.000</b>

Figure 10 : Principaux producteurs et fournisseurs de granulats de plastique renforcé de fibres de bois et naturelles avec leurs quantités de production en Europe en 2017 [Nova Institute, 32 - 2017]

## 2. Les biocomposites dans l'automobile

### 2.1. Les renforts fibreux : Fibres de verre VS fibres végétales

Les premières utilisations de fibres végétales remontent à plus de 10 000 ans avant JC. En effet, des fibres de chanvre ont été retrouvées dans des poteries en Chine. Cependant, c'est au XIX<sup>ème</sup> siècle que M. Lepage réalise le premier composite renforcé par des fibres naturelles qui amènera un brevet en 1855. L'utilisation de fibres synthétiques est beaucoup plus récente. Dans cette étude, les deux fibres synthétiques les plus utilisées actuellement sont étudiées : les fibres de verre et les fibres de carbone. [9]

#### 2.1.1. Production, extraction

##### 2.1.1.1. Les fibres de verre

La fibre de verre est l'une des fibres synthétiques la plus utilisée dans le monde. Les trois principaux pays producteurs de cette fibre sont : la Chine, les USA et l'Égypte. Le groupe chinois Jushi possède de nombreux sites de production en Chine et en Égypte, tandis que Owens Corning est le leader de la fibre de verre aux États Unis.

La fibre de verre est obtenue par fusion entre un mélange de silice SiO<sub>2</sub> et de borosilicate d'aluminium. Lors de la création de ces fibres, il est souvent employé des additifs pour pouvoir obtenir les propriétés mécaniques, chimiques et électriques souhaitées. Le procédé de création de fibre de verre est composé de quatre étapes [18] :

**L'affinage** : la composition est chauffée. Lorsqu'elle atteint 800°C elle devient visqueuse, puis liquide jusqu'à la vitrification. Lorsque la composition atteint 1500°C elle est homogène, sans bulles, ni impuretés.

**Le filage par étirement** : Lors de cette étape la température est proche de 1250 °C. Le mélange passe à travers une filière en platine. Une grande vitesse à cet endroit permet d'obtenir un filament qui est refroidi et est enroulé autour d'une broche.

**L'ensimage** : Cette étape consiste à ajouter un revêtement qui va protéger les filaments, ce qui permet leur agglomération.

**Finition et séchage** : Les fils sont coupés selon les attentes du client et sont séchés à une température entre 700 °C et 800 °C.

##### 2.1.1.2. Les fibres de carbone

La fibre de carbone est l'une des fibres synthétiques la plus utilisée dans l'aéronautique. Légers et résistants, concurrents directs des métaux comme l'acier et l'aluminium, ils se retrouvent aussi bien dans les vélos que dans les éoliennes ou les voitures.

Les deux principaux producteurs de fibres de carbone sont le japonais Toray et l'américain Hexcel.

Les fibres de carbone sont créées généralement à partir de deux précurseurs [9] :

- Le précurseur brai de mésophase est obtenu par traitement thermique de brais isotropes (mélange d'hydrocarbures issus de résidus de houille ou de pétrole). Ils sont sélectionnés et purifiés pour pré-orienter axialement la structure de la fibre.
- Le précurseur polyacrylonitrile (PAN)

Ces deux précurseurs sont créés de la même manière en deux étapes :

- **Le filage et l'étirage** permettent d'orienter la structure dans la direction axiale et d'obtenir des fibres.
- **Le traitement thermique** des fibres permet l'oxydation, la carbonisation et la graphitisation.

La fabrication des deux précurseurs varie lors de l'étape d'oxydation. L'oxydation est faite simultanément avec l'étirage lorsque le précurseur PAN est utilisé. Cela confère aux mono-filaments une orientation axiale préférentielle. Dans le cas du précurseur brai de mésophase, la structure orientée existe déjà. L'oxydation a pour objectif le passage de la mésophase d'un état thermoplastique à un état infusible. Le module de traction des fibres augmente en même temps que la température lors des étapes de carbonisation ou graphitisation.

### 2.1.1.3. Les fibres naturelles

Dans le monde actuel, plusieurs fibres naturelles différentes sont utilisées comme le ramie, la jute, l'alfa et certains palmiers [19]. Cependant, les fibres principalement utilisées sont les fibres de coton, les fibres de chanvre et de lin. Une fibre végétale est en moyenne composée principalement de cellulose, hémicellulose et de lignine, sauf le coton qui est entièrement composé de cellulose. Ce sont des plantes annuelles et leurs fibres ont une structure semblable : paroi primaire, paroi secondaire, membrane plasmique et cytoplasme (figure 11).

Les renforts lignocellulosiques utilisés dans les biocomposites sont en réalité des faisceaux de fibres (diamètre de 50 à 100  $\mu\text{m}$ ), composés de fibres unitaires (diamètre 20 à 50  $\mu\text{m}$ ) ou des regroupements de faisceaux de fibres (figure 12).

Les principaux producteurs et transformateurs de fibres de lin et de chanvre sont en Europe. Les principales entreprises de transformation de lin et de chanvre sont françaises : Ecotechnilin, Fibre Excellence.

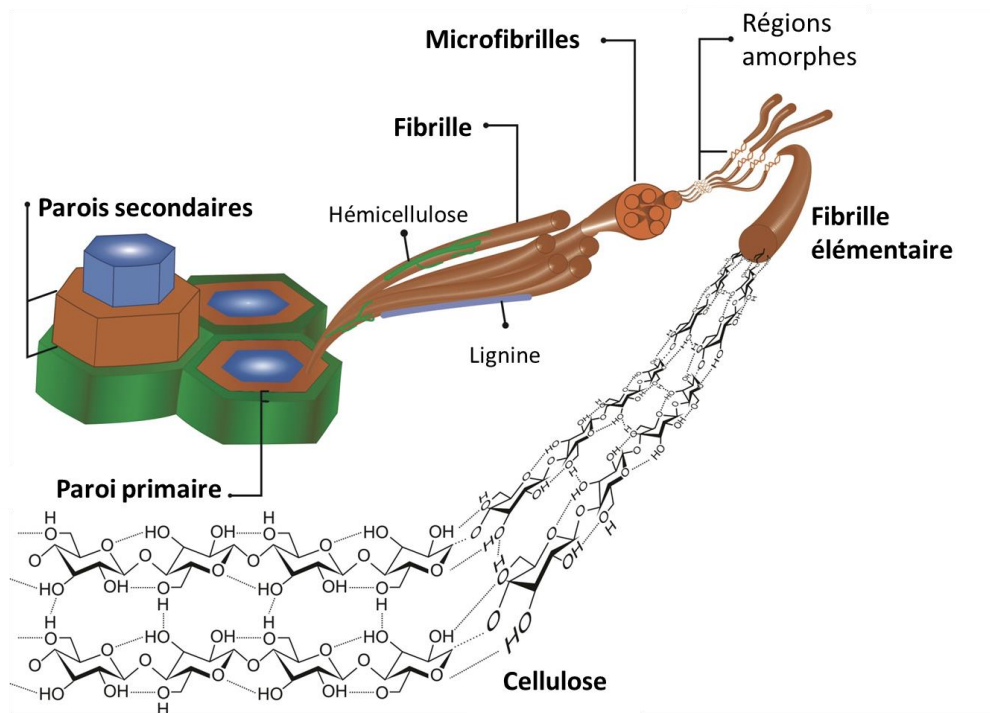


Figure 11 : Fibre végétale unitaire à différentes échelles [NGUYEN 29 - 2016]

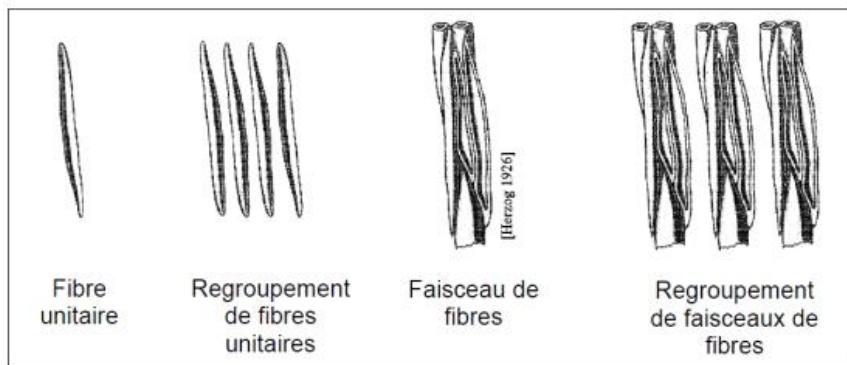


Figure 12 : Fibres unitaires et faisceaux de fibres [NGUYEN 29 - 2016]

- Lin et chanvre :

Les fibres de lin et de chanvre suivent le même procédé de transformation. C'est pourquoi uniquement le procédé du lin sera détaillé. La France est un acteur majeur mondial dans la production de lin puisqu'elle est le plus gros producteur mondial avec une production d'environ 80%. Le lin pousse dans un croissant partant du nord des Pays-Bas jusqu'au Calvados en France comme montré dans la figure 13.

Dans ces régions la météo pour la croissance du lin est idéale puisque cette plante a besoin d'alternance entre pluie et soleil. Le temps de pousse d'une fibre de lin est de 100 jours, ce qui permet de faire plusieurs récoltes dans la même année. La récolte des fibres de lin et de chanvre est composée de deux phases. La première est l'**arrachage**, où la fibre est arrachée et non coupée pour éviter d'abîmer la fibre qui se trouve le long de la tige. Après être arrachée, la fibre est laissée au sol pour la deuxième phase de la récolte, le **rouissage**. Cela consiste à laisser la paille aux champs et grâce à une

alternance pluie/soleil et à des microorganismes qui vont dégrader les pectines, il y aura une séparation entre l'écorce et la fibre ce qui permettra une meilleure exploitation lors de la transformation. Le chanvre et le lin sont ensuite ramassés et mis sous forme de botte de paille pour être transformé en lambrin (lin teillé). Les regroupements de faisceaux de lin mesure environ 90 cm. Les regroupements de faisceaux de fibres sont défibrées à l'aide d'une ligne d'affinage. Ces faisceaux de fibres sont ensuite **peignés et enchevêtrés** pour réaliser un ruban continu qui est stoppé au bout d'1km. Ce ruban est ensuite embobiné sous forme d'un bumb qui pèse environ 40 kg et qui est prêt à l'exportation.[20]

La figure 14 montre les différents produits issus du lin et leurs applications. La chènevotte correspond à la partie rigide (écorce) de la plante annuelle. Cette chènevotte combinée à un liant peut être utilisée en béton de chanvre pour remplacer des briques de béton dans les bâtiments avec les avantages d'être plus léger que le béton et plus isolant. Outre cette possibilité, les fibres techniques (ou faisceaux de fibres) de chanvre sont notamment utilisées pour renforcer des plastiques qui peuvent être notamment utilisés dans l'industrie automobile.

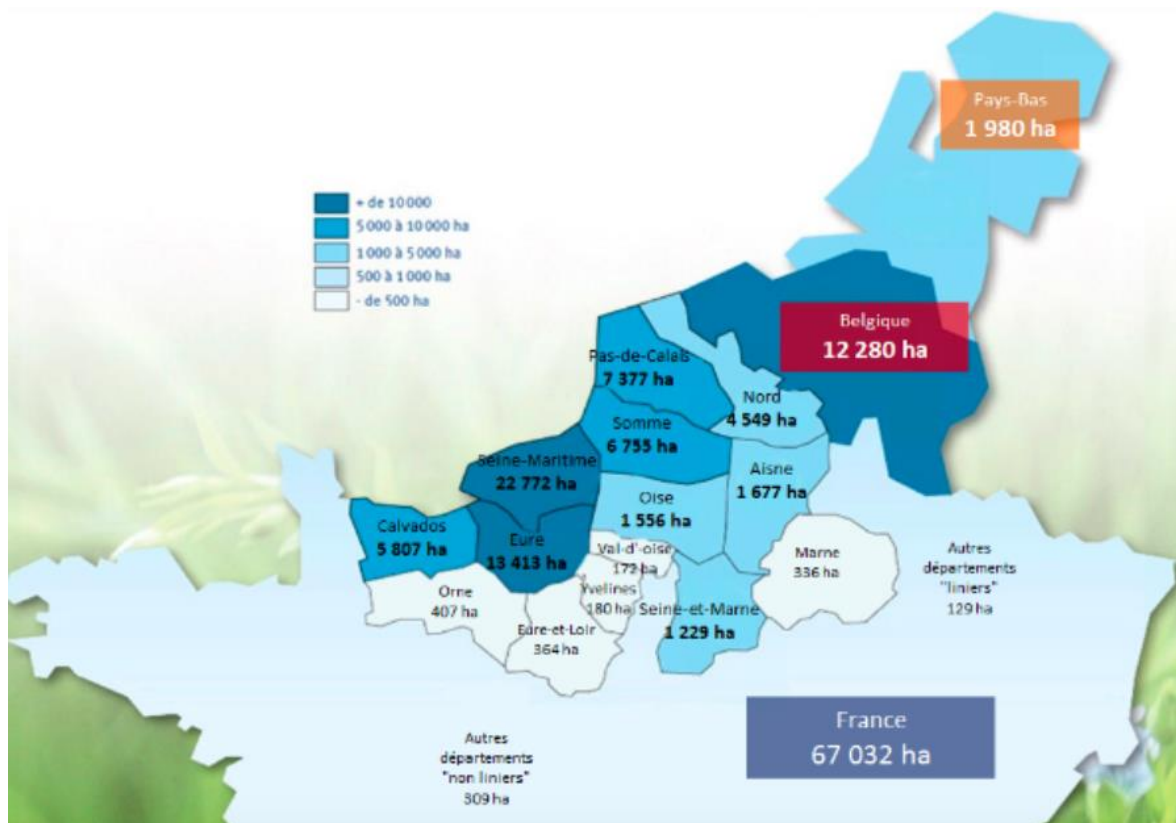


Figure 13 : Carte montrant les surfaces ensemencées de lin en France, Pays bas et Belgique en 2014 [Lorraine Nature 21 - 2016]

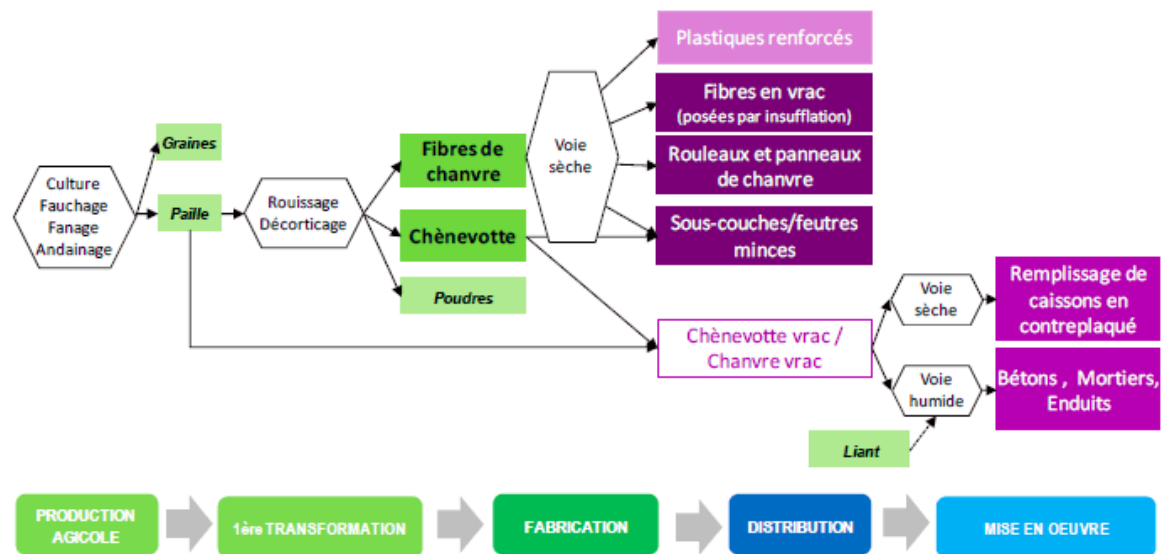


Figure 14: Bilan des étapes de la récolte et de la transformation du chanvre et de ses applications [LY et SALASCA 22 - 2015]

- Le coton [19] :

L'utilisation du coton est ancienne puisque des chercheurs ont retrouvé des traces de coton datant de plus de 7000 ans. Le coton est principalement produit en Chine, en Inde, en Égypte, aux USA et en Europe. La récolte se fait lorsque le fruit est à maturité. C'est le moment où il libère l'ensemble de ses fibres composées de 100% de cellulose. Après la récolte, le coton est exposé à l'air libre et au soleil pendant quelques jours. Après ce séchage, une étape de séparation fibre-graine est réalisée. Cette étape s'appelle l'**égrenage**. Ensuite les fibres de coton sont empilées par balles de 230kg. Elles sont transportées jusqu'à une usine où les différentes bottes de cotons sont mélangées pour être homogénéisées. Puis le coton suit un processus de **cardage, étirage, torsion et envidage**. L'étape de cardage est l'étape la plus importante. Elle a pour but d'aligner les fibres de cotons pour en former des rubans.

- Traitement de surface des fibres :

Comme vu précédemment, les fibres naturelles sont peu compatibles avec les matrices polymères non-polaires. Il existe des traitements de surfaces des fibres qui permettent à ces fibres de créer des liaisons matrice/fibres. La fonctionnalisation des fibres végétales consiste à modifier la chimie de surface des fibres en y greffant des groupements fonctionnels qui ont une grande affinité avec les chaînes polymères des matrices. Il existe aussi des traitements physiques qui permettent de modifier les propriétés de surfaces de fibres et de les rendre compatibles avec les matrices. [17], [9']

Le traitement chimique le plus utilisé est le **mercerisation**. Le but de cette opération est d'éliminer la lignine, les hémicelluloses et les pectines avec de la soude (hydroxyde de sodium). L'augmentation de la surface spécifique est apportée par l'apparition de microfibrilles, elles-mêmes responsables d'une meilleure adhésion mécanique. Cependant, une concentration importante de soude peut détériorer la fibre et en diminuer son degré de cristallinité.

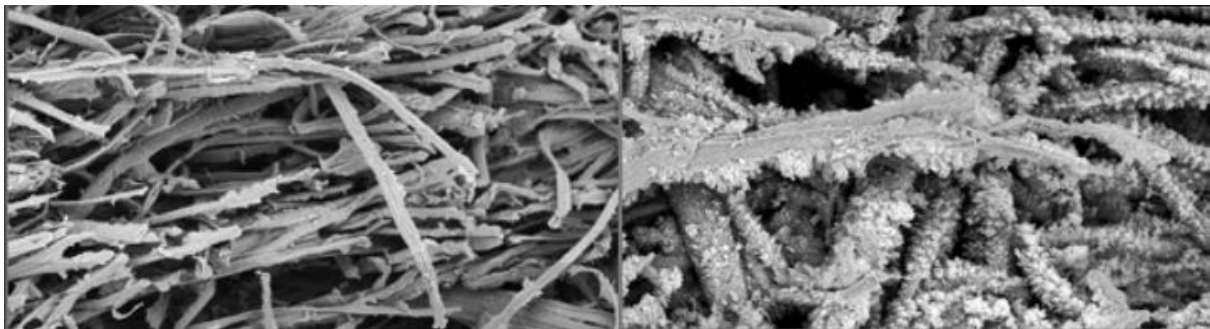
Les traitements par des **organosilanes** permettent de créer une liaison covalente entre les fibres et la matrice ce qui permet d'augmenter jusqu'à 70% la résistance en traction, en flexion et au cisaillement.

Les traitements **radicalaires en présence de peroxydes** vont permettre de créer un radical libre à la surface de la fibre qui va être susceptible de réagir avec la matrice pour former une liaison covalente.

Les groupements **isocyanates** peuvent être utilisés comme agents de couplage entre les fibres végétales et la matrice. Ces molécules peuvent réagir avec les groupements hydroxyle des fibres végétales pour former des liaisons uréthanes. Aussi, ces molécules sont bifonctionnelles et peuvent également réagir avec les matrices pour créer des liaisons covalentes entre les fibres et la matrice.

**Le traitement plasma** (ou corona) est un traitement physique consistant à bombarder le substrat par des particules à haute énergie se déplaçant dans le flux de plasma [17],[23]. Cela va créer des creux dans la structure de la fibre qui peuvent être comblés par des charges (figure 15). Ce traitement permet d'améliorer des propriétés à la résistance au feu, des propriétés mécaniques (dureté, élasticité) ou encore des propriétés hydrophobes [18].

Il existe également des traitements physiques aux **rayonnements ultra-violets** [17] qui permettent de vieillir les surfaces lignocellulosiques et d'augmenter le nombre de groupements carbonyles présents, ce qui permet d'augmenter leur polarité. Il faut donc trouver un compromis entre l'amélioration de la polarité et la diminution des propriétés mécaniques de fibres.



**Figure 15 : Photo en MEB montrant l'effet du traitement plasma et ajout de charges minérales sur des fibres naturelles [GAQUERE 23 - 2013]**

L'un des enjeux majeurs de l'emploi des fibres végétales dans les matériaux composites est le développement de procédés d'application efficaces et fiables prenant en compte la faisabilité industrielle. La recherche se porte également sur des procédés propres, sans solvants et économes en énergie et en eau. Les traitements de surface des fibres doivent donc permettre de fonctionnaliser ces fibres de manière rapide et homogène afin d'obtenir les propriétés de surface voulues et de diminuer leur variabilité tout en améliorant les performances des fibres.

Il existe deux types de procédé de traitement, par voie humide ou par voie sèche.

Dans les procédés de traitement par voie humide, il existe le traitement par **voie liquide** où les fibres longues mise sous forme de bobine de fil passent dans un bain d'ensimage lors d'un procédé continu. Néanmoins ce procédé est très consommateur de solvants pour et d'eau (étape de rinçage).

Il existe un traitement par **voie vapeur** principalement utilisé dans les industries papetières. Ce procédé consiste à chauffer et vaporiser une molécule de fonctionnalisation puis de la condenser sur le substrat à traiter.

Les procédés de traitement par voie sèche consistent à réaliser la comptabilisation fibres/matrice au cours de la mise en œuvre soit en utilisant l'**extrusion réactive** qui incorpore directement l'agent comptabilisant au cours de la fabrication du composite. Il existe également une méthode de **mélange à sec** où les polymères et les additifs sont ajoutés sous forme de poudre au sein d'un mélangeur haute vitesse, ce qui va permettre d'enrober les fibres en vue d'une utilisation ultérieure. [17]

## 2.1.2. Propriétés

### 2.1.2.1. Les fibres de verre

Étant l'un des renforts les plus utilisés, il existe plusieurs types de fibres de verre. Elles peuvent être de composition, de propriétés et de procédés de fabrication différents. [9]

Les bonnes propriétés électriques d'isolation des fibres de type E expliquent leur développement initial mais ces dernières présentent en plus des bonnes propriétés mécaniques et sont peu chères (de 2 à 5 fois moins chères que les autres types). La comparaison avec le prix des fibres végétales est faite en figure 18. Ces différents avantages en font les fibres les plus utilisées dans le marché des fibres de renforcement.

Les éléments principaux des fibres D sont la silice et le bore, ce type de fibre comporte aussi de très bonnes propriétés d'isolation électrique. Ils sont utilisés par exemple en tant que radôme pour les avions militaires.

Les fibres C ont une forte teneur en silice (jusqu'à 65%), cela leur permet une tenue supérieure à celle des fibres E en milieu chimique et spécialement en milieu acide. Ils sont utilisés dans le génie chimique comme couche de protection anticorrosion par exemple.

Les fibres de verre R et S contiennent beaucoup de silice et d'alumine mais pas d'oxyde de bore ni de métaux alcalins. Sans ces composants (dits fondants car ils diminuent la température de fusion des mélanges vitrifiables) il est plus difficile d'élaborer ces fibres et les coûts de production sont aussi plus élevés. Elles sont préférées aux fibres de verre E dans les industries aérospatiales, de l'armement et pour des applications industrielles performantes pour leur résistance en traction, leur module d'élasticité plus élevé (respectivement 30% et 20% plus élevés), leur masse volumique plus faible (4%), leur meilleure tenue à la température et en milieu acide.

Les fibres de verre AR ont comme particularité d'avoir une forte teneur en oxyde de zirconium (16-20%) et sont beaucoup utilisés comme renfort de ciment en milieu basique.

Les fibres E-CR présentent les mêmes propriétés mécaniques et électriques que les fibres de verre E mais se différencient par l'absence d'oxyde de bore leur donnant une meilleure résistance en milieu acide.

Les fibres de verre présentent des propriétés élevées en termes de stabilité et de résistance électrique et thermique. De nombreuses options de tissage et une large gamme de tailles de fils permettent d'optimiser l'association de performance de matériau et d'économie.



Fibres	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Allongement à la rupture en traction (%)	Résistance en traction (MPa)	Module d'élasticité en traction (GPa)
Verre E	2,54-2,61	4,6-4,8	3200-3400	72-73
Verre D	2,14	4,5	2500	55
Verre A	2,45	4,4	3100	71
Verre C	2,49	4,8	3300	70,3
Verre R	2,55	5,2	4400	86

Figure 16 : Propriétés des fibres de verre [NGUYEN 9 – 2015]

Les fibres de verre présentent des élongations maximums à la rupture de 4,4% à 5,2% et des ratios élevés résistance/poids élevés. Ces fibres sont donc intéressantes pour des applications nécessitant une résistance importante et un poids minimum.

Les fibres de verre sont des matériaux inorganiques donc ne brûlent pas. De plus elles présentent une résistance élevée et une stabilité de dimension, à 540°C elles conservent approximativement 25% de leur résistance initiale. Elles se déforment peu et supportent une exposition à des températures extrêmement élevées ou basses car elles ont un faible coefficient d'expansion thermique ( $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Ce coefficient correspond à l'allongement du matériau par unité de longueur pour une variation de 1°C.

Les fibres de verre sont résistantes aux produits chimiques, de plus elles n'absorbent pas l'humidité et ne changent pas physiquement ou chimiquement sous exposition à l'eau.

#### 2.1.2.2. Les fibres de carbone

En fonction de leur module de traction les fibres de carbone sont classées en cinq catégories [9] :

- D'usage général ou pour application thermique (UG) :  $E < 200 \text{ GPa}$  ;
- De haute résistance (HR) :  $200 \text{ GPa} < E < 250 \text{ GPa}$  ;
- De module intermédiaire (IM) :  $250 \text{ GPa} < E < 350 \text{ GPa}$  ;
- De haut module (HM) :  $350 \text{ GPa} < E < 550 \text{ GPa}$  ;
- De très haut module (THM) :  $E > 550 \text{ GPa}$ .

En plus d'une bonne résistance mécanique et d'un module d'Young élevé, les fibres de carbone présentent une masse volumique faible ( $1,43 - 2 \text{ g/cm}^3$ ), une résistance spécifique et module spécifique plus grand que ceux des métaux. La figure 17 présente des propriétés de fibres de carbones commercialisées.

Le degré de cristallinité, l'espace inter-couche et la taille des cristallites influencent les propriétés de la fibre. Une fibre de haut module résulte d'un haut degré de cristallinité et d'un espace inter-couche faible. Les couches de carbone sont principalement réparties parallèlement à l'axe de la fibre. Les fibres

de carbone présentent de meilleures propriétés (haut module, conductivité thermique et électrique) dans l'axe de la fibre. Les propriétés de la fibre augmentent aussi en fonction du degré d'alignement des couches.

De plus les fibres présentent une bonne résistance thermique (supporte des températures de 2500°C dans un milieu sans l'oxygène), un coefficient de dilatation thermique proche de zéro dans le sens longitudinal et une conductivité électrique cent à mille fois inférieur à celle des métaux.

Les fibres de carbones présentent une large gamme de module avec des valeurs très élevées mais sont des fibres chères (de 30 à 50€ par kg) ce qui explique leur grande utilisation dans les composites de hautes performances.

Fabricant	Nom commercial	Module (GPa)	Résistance à la rupture en traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)
Kureha Chemical (Japon)	Kureca T - 101	33	790	-
	Kureca T - 102	33	690	-
Cytec (USA)	Thornel P 25W	160	1400	-
	Thornel P55S	380	1900	-
	Thornel P 75S	520	2100	-
Toray (Asie) Soficar (Europe) CFA (USA)	T 300	230	3530	1.5
	T 400 H	250	4410	1.8
	T800 H	294	5490	1.9
	M 40	392	2740	0.7
	M 46 J	436	4210	1.0
	M 50 J	475	4120	0.8
	M 55 J	540	4020	0.8
	M 60 J	588	3920	0.7

Figure 17 : Caractéristiques des fibres de carbone en fonction de leur fabricant [NGUYEN 9 - 2015]

### 2.1.2.3. Les fibres naturelles

Les propriétés mécaniques des fibres naturelles dépendent des paramètres suivants : dimensions, conditions climatiques et qualité du sol de culture et des méthodes d'extraction. Les propriétés comme la densité, la résistance à la traction, le module d'Young dépendent en partie de la structure de la fibre mais également de son extraction (rouissage, teillage etc.).

Cependant, toutes les fibres naturelles ont une densité inférieure à celle du verre. De plus la rigidité spécifique des fibres végétales est supérieure ou égale à celle des fibres de verre. [12]

Les fibres de lin, de chanvre et de jute ont des valeurs de rigidité spécifique très bonnes. Ces fibres ont donc de très bonnes propriétés mécaniques pour à une introduction dans des biocomposites dans le secteur automobile. En effet, les matériaux fabriqués avec ces fibres peuvent parfois être plus légers,

plus rigide, plus résistant et moins chers. Le sisal, le coton, la coco et la jute peuvent également être utilisés car ils ont des prix faibles tout en ayant de bonnes propriétés mécaniques.

Fibres	Force à la rupture MPa	Module d'Young GPa	Densité	Rigidité spécifique	Allongement à la rupture %	Prix Euro/kg
E-Verre	2500-3500	70-73	2.56	29	2.5-3.0	1.5-2.5
Carbone	2500-6000	220-700	1.75-1.9	400	1.4-2	30-50
Lin	500-900	50-70	1.4-1.5	50	1.3-3.3	0.5-1
Sisal	80-840	9-22	1.3-1.45	17	3-7	0.3
Jute	200-450	20-55	1.3-1.4	42	1.16-1.5	0.12-0.5
Chanvre	310-750	30-60	1.48	41	2-4	0.5-1
Banane	530-750	7-20	1.4	14	1-4	0.5
Coco	130-175	4-6	1.15	5	15-40	0.25
Coton	300-600	6-10	1.5	7	7.0-8.0	1.6-4.6
Soie	-	-	1.34	-	-	18.3-36.7
Laine	125-200	-	1.31	-	-	< 15.4

Figure 18 : Comparaison de différentes propriétés de fibres de verre, de carbone et végétales [RAMLI 12 - 2018]

- **Les fibres de lin :**

Le lin est utilisé dans de nombreux domaines industriels comme l'automobile, en tant que renfort dans les composites. Le lin possède une grande diversité de propriétés en fonction de la variété utilisée comme le montre la figure 19. Les modules d'élasticité fluctuent entre 31,4 à 68,2 GPa, les contraintes à la rupture évoluent entre des valeurs de 751 à 1454 MPa et enfin les allongements à la rupture varient de 1,6 à 3,3 %. [24]

Variété	Diamètre moyen ( $\mu\text{m}$ )	E (GPa)	$\sigma$ (MPa)	A (%)
Ariane	17,8 $\pm$ 5,2	54,1 $\pm$ 15,1	1339 $\pm$ 486	3,3 $\pm$ 0,8
Electra	15,4 $\pm$ 4,9	51,1 $\pm$ 15,0	808 $\pm$ 342	1,6 $\pm$ 0,5
Oliver	17,5 $\pm$ 3,6	47,2 $\pm$ 21,3	751 $\pm$ 414	1,7 $\pm$ 0,6
Marylin	15,85 $\pm$ 3,9	53,8 $\pm$ 14,3	1215 $\pm$ 500	2,2 $\pm$ 0,6
Alizée	15,20 $\pm$ 3,3	47,9 $\pm$ 16,1	1012 $\pm$ 391	2,3 $\pm$ 0,7
Oliver	15,3 $\pm$ 4,5	55,5 $\pm$ 20,9	899 $\pm$ 461	1,7 $\pm$ 0,6
Hermès	19,6 $\pm$ 6,7	68,2 $\pm$ 35,8	1454 $\pm$ 835	2,3 $\pm$ 0,6

Figure 19 : Propriétés mécaniques du lin en fonction de sa variété [MARTIN 24 - 2014]

La sorption correspond à la quantité d'eau qui est trouvée à la surface et dans la masse des fibres de lin. Dans la figure 20, R1, R3 et R6 correspond à des taux de plus en plus importants de rouissage. Plus les fibres sont rouies moins les fibres absorbent l'eau [25]. Il y a peu d'articles concernant la résistance des fibres de lin à l'état humide.

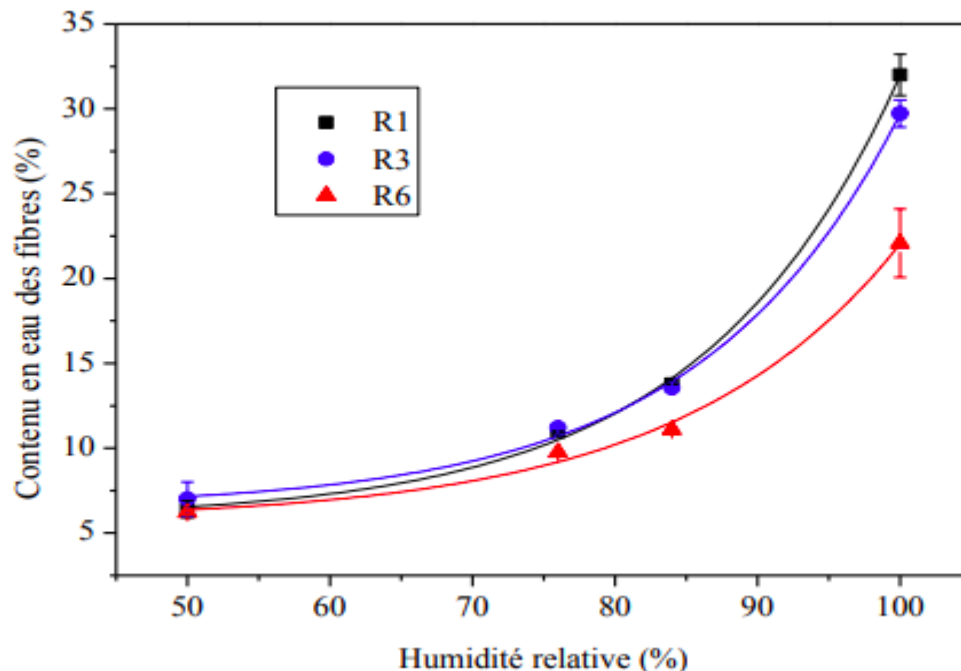


Figure 20 : Evolution du contenu en eau des fibres en fonction de l'humidité relative [CELC 25 - 2010]

Aussi, les fibres de lin possèdent de bonnes propriétés d'isolation phonique car elles ont une structure creuse et un bon module d'élasticité. Ces fibres sont également utilisées dans l'isolation thermique car elles possèdent une structure microporeuse.

- **Les fibres de chanvre :**

Le chanvre a des propriétés mécaniques un peu plus faibles que celles du lin, avec un module d'élasticité de 30 GPa [25], c'est pour cela qu'elles sont moins utilisées dans l'automobile. Néanmoins elles possèdent de bonnes propriétés thermique, phonique, un faible retrait et sont résistantes aux UV.

## 2.2. Les matrices polymères

### 2.2.1. Mise en forme

Les procédés de mise en forme des composites à renfort naturels sont en général analogues à ceux utilisés pour les matériaux composites traditionnels. Il existe différents types de procédés conduisant à des pièces composites présentant des performances mécaniques variées et fabriquées à différentes

cadences de production. Uniquement les procédés de mise en forme les plus utilisés pour la fabrication des composites à renforts lignocellulosiques seront présentés.

Il existe trois étapes indispensables dans la mise en forme des biocomposites. Elles peuvent avoir lieu dans des ordres différents suivant le procédé de mise en forme. Ces étapes sont [17] :

- L'imprégnation du renfort lignocellulosique par le polymère dans le cas où le composite est composé d'une forte concentration de fibres. Lorsque la concentration des fibres dans le matériau est plus faible, c'est une dilution des renforts dans la matrice.
- La mise en forme à la géométrie de la pièce.
- La réticulation ou le durcissement pour les matrices thermodurcissables. Dans le cas des matrices thermoplastiques, c'est une solidification par refroidissement.

### 2.2.1.1. Les thermoplastiques

Les températures de transformation des matrices thermoplastiques n'excèdent pas 220°C en général.

- **Le moulage par injection :**

Il s'agit d'une technique de manufacture permettant de créer des produits à partir de matériaux thermoplastiques. Le matériau plastique contenu dans un silo est introduit dans un fourreau présentant une vis sans fin tournante. Le plastique avance dans le fourreau par la rotation de la vis qui est chauffée et qui permet donc de faire fondre le plastique, après avoir été entièrement fondu ce dernier est introduit dans un moule à haute pression présentant la forme inverse du produit final.

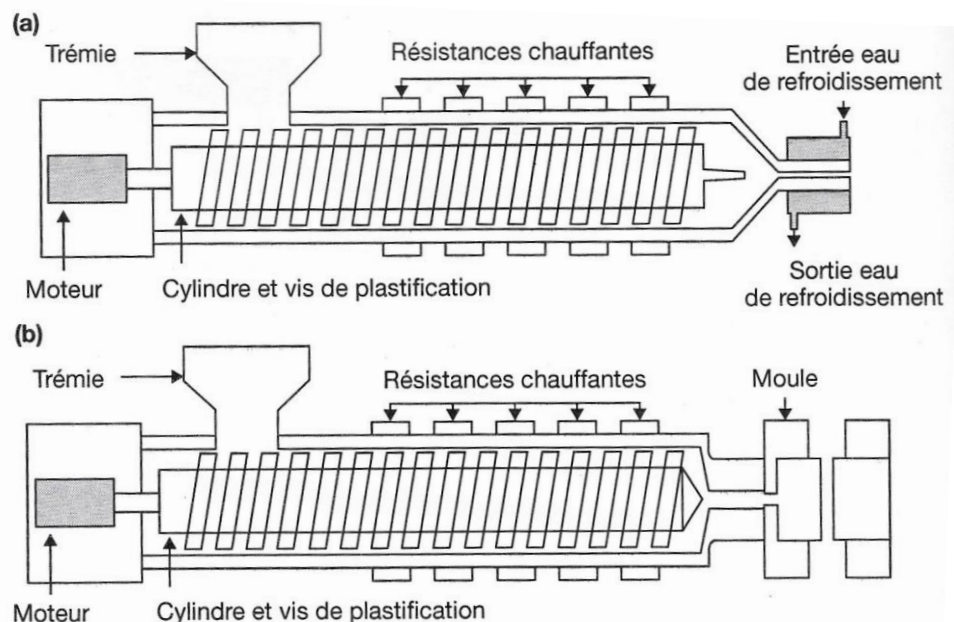


Figure 21 : Schémas de principe de l'extrusion et de l'injection [BERZIN 17 – 2017]

- **Le moulage par compression :**

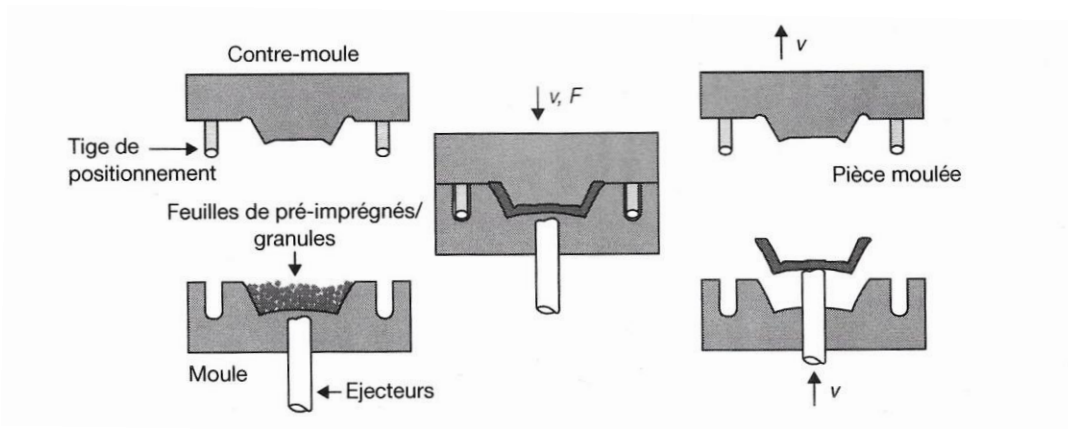


Figure 22 : Schéma de principe du procédé de moulage par compression [BERZIN 17 – 2017]

### 2.2.1.2. Les thermodurcissables

Les réactions exothermiques de réticulation des matrices TD peuvent conduire à des montées rapides de température et endommager les fibres.

- **Le moulage au sac (avec autoclave) de pré-imprégnés :**

Cette méthode consiste à créer une dépression afin de mouler la pièce au contact d'un support.

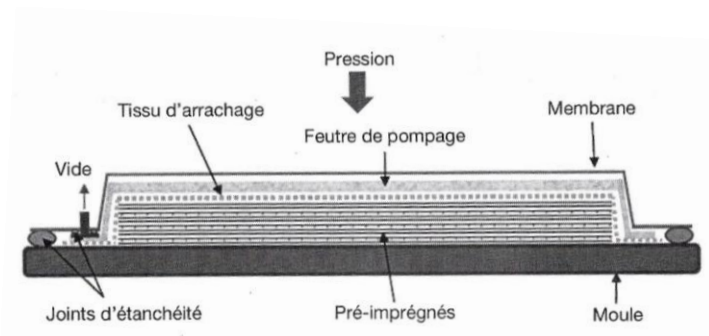


Figure 23 : Schéma de principe du moulage au sac à vide [BERZIN 17 – 2017]

- **LCM (liquid composite moulding) :**

C'est un procédé par voie humide où la résine est préparée séparément du drapage du renfort fibreux. Le renfort est ensuite imprégné par la résine.

- **Le moulage par injection de résine (RTM : resin transfert moulding) :**

Ce procédé est réalisé dans des préformes fibreuses nécessitant un moule, un contre-moule et une presse.

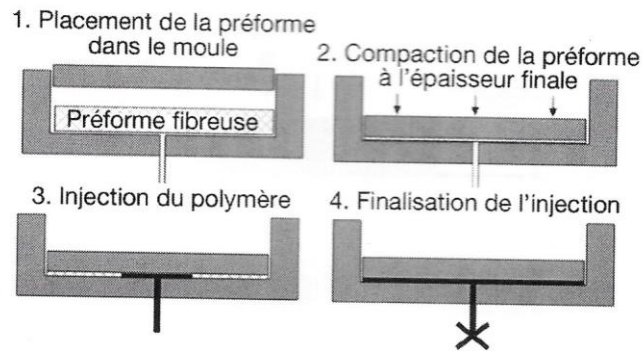


Figure 24 : Schéma de principe du procédé RTM [BERZIN 17 – 2017]

- Le moulage par infusion de résine (RFI : resin film infusion ; LRI : liquid resin infusion) :

Ce moulage permet de réduire les distances parcourues par la résine lors de l'imprégnation de la préforme fibreuse.

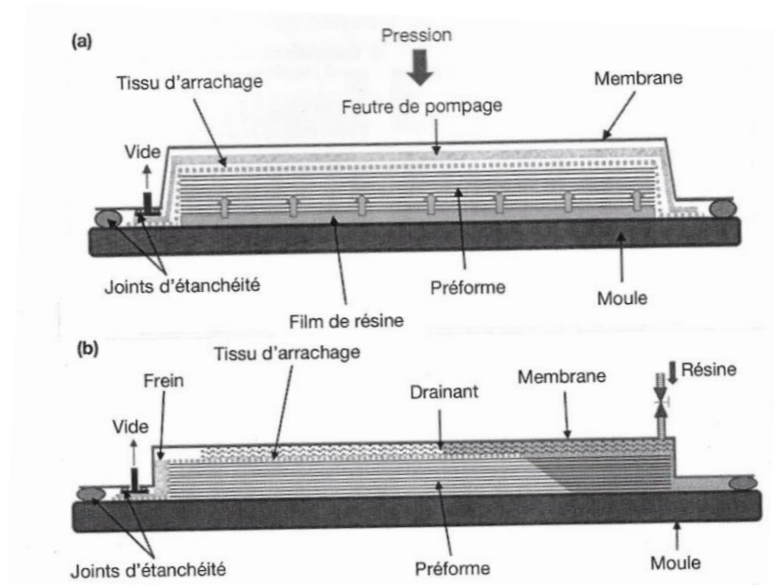


Figure 25 : Schémas de principe des procédés RFI (a) et LRI (b) [BERZIN 17 – 2017]

- Moulage par compression (procédé identique à celui avec les thermoplastiques)
- Assemblage sandwich, exemple du Flaxpreg produit par l'entreprise Faurecia pour PSA [8] :

Les pièces thermodurcissables produites peuvent être assemblées afin de créer une structure dite « sandwich ». Ce sont des structures résultant de l'assemblage par collage ou soudure de deux peaux ou semelles minces sur une âme ou un cœur présentant des plus faibles caractéristiques mécaniques. Leur écartement est maintenu et par cisaillement les actions mécaniques d'une peau est transmise à l'autre.

L'entreprise Faurecia a développé le produit Flaxpreg en structure sandwich à base de lin. Ce projet développé par Faurecia avec PSA Peugeot-Citroën, Lineo et l'Université de Reims Champagne-Ardenne a remporté le prix de l'innovation de la JEC Europe en 2015 [8].

Dans le procédé de fabrication du composite Flaxpreg, les étapes de filature et de tissage ont été supprimées. Le but premier est de réduire drastiquement le coût de production du FlaxTape non-tissé. Ce produit possède aussi des propriétés mécaniques supérieures grâce au renfort de fibres planes parfaitement alignées et non-torsadées, ce qui se traduit par une réduction significative de la masse.

Un voile de lin homogène, produit directement à partir de rubans de lin, a été développé. Il permet de se passer de l'étape de tissage. L'imprégnation de la résine acrylique directement en ligne permet de produire un matériau pré-imprégné, connu sous le terme de « prepreg ». La construction en sandwich a été développée en utilisant une structure en nid d'abeille de papier avec des temps de cycle inférieurs à deux minutes par pièce.

### 2.2.2. Propriétés

De manière générale, les composites à matrice thermodurcissable possèdent de meilleures propriétés mécaniques que les thermoplastiques. De plus la figure 27 montre que les composites à renforts unidirectionnels sont les meilleurs d'un point de vue mécanique. Les composites à renforts multiaxiaux ont des propriétés mécaniques inférieures mais sont plus résistants que les non tissés ou les pièces moulées par injection (qui sont fabriqués à une cadence élevée et en grandes séries d'après la figure 26).

Donc, le composite à base de fibres lignocellulosiques avec les meilleures propriétés mécaniques est un pré-imprégné à matrice thermodurcissable et à renfort unidirectionnel.

Procédé de mise en forme	Cadences de production	Pression de consolidation	Fraction volumique de fibres (%)	Porosité (%)	Type de matrice polymère
Moulage par injection	Grande série	> 100MPa	Jusqu'à 45% (typiquement de 15 à 30%)	-	Thermoplastique
Moulage par compression	Moyenne et grandes séries	Jusqu'à 4 MPa (typiquement entre 2 et 3 MPa)	Jusqu'à 85% (typiquement de 25 à 50%)	Jusqu'à 25% (typiquement de 2 à 8%)	Thermoplastique ou thermodurcissable
Moulage au sec (avec autoclave) de pré-imprégnés	Petite série	De 0 à 1 MPa (typiquement de 0,4 à 0,6 MPa)	Jusqu'à 60% (typiquement de 35 à 50%)	Jusqu'à 10% (typiquement de 0 à 4%)	Thermodurcissable
LCM (RTM, RFI, LRI)	Petite et moyenne séries	De 0 à 0,4 MPa (typiquement de 0 à 0,2 MPa)	Jusqu'à 60% (typiquement de 25 à 50%)	Jusqu'à 10% (typiquement de 1 à 4%)	Thermodurcissable

Figure 26 : Procédés de mise en forme et caractéristiques typiques des composites à fibres lignocellulosiques [BERZIN 17 – 2017]



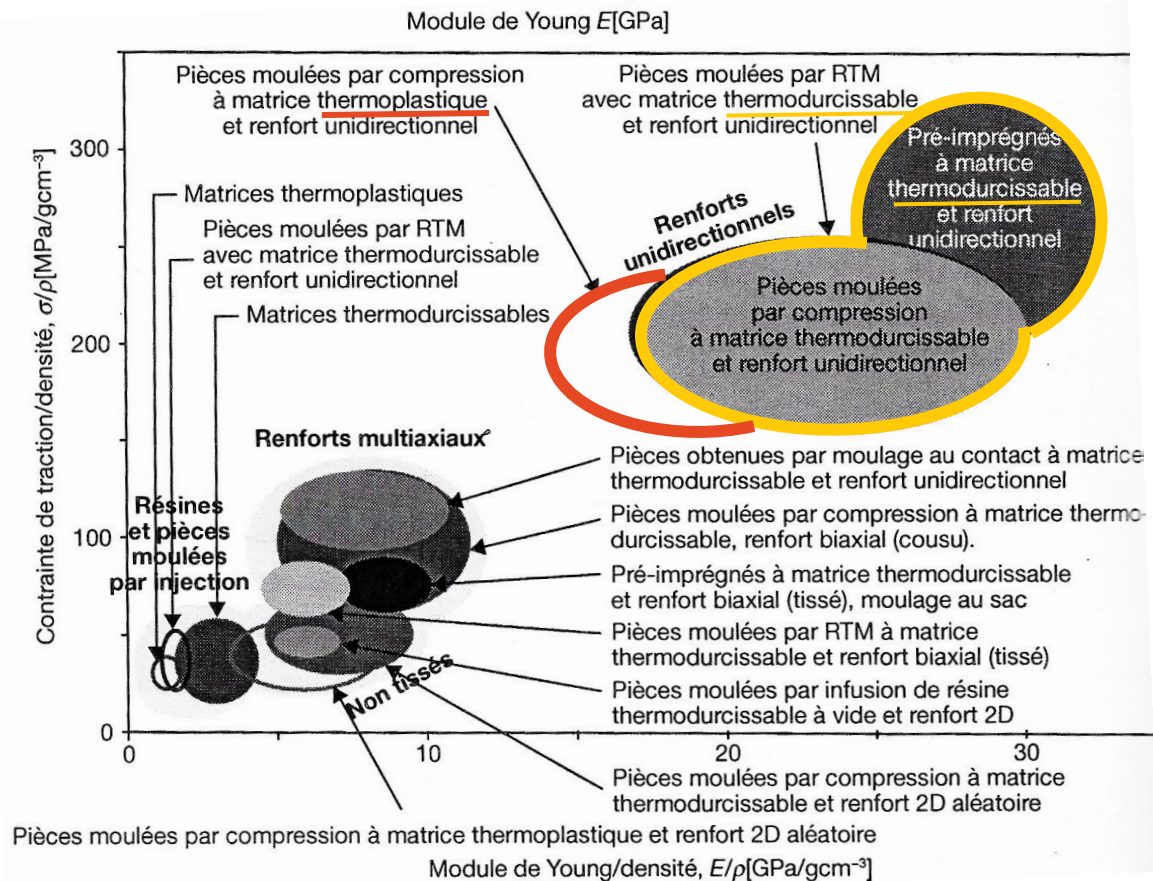


Figure 27 : Propriétés mécaniques spécifiques des composites à renforts biosourcés suivant leur type de matrice et leur procédé de fabrication [BERZIN 17 – 2017]

### 2.3. Impact environnemental

#### 2.3.1. Définition de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

La production de biocomposites implique plusieurs attentes et contraintes. Il faut prendre en compte les attentes du client, la faisabilité technique et les coûts de production. Il faut également tenir compte du marché et des critères économiques [17].

Par exemple, l'objectif du remplacement des fibres de verre par des fibres de lin est d'améliorer l'impact de la pièce créée sur l'environnement. Dans un premier temps les industriels peuvent se concentrer sur l'écoconception des objets techniques qui sont globalement régis par la norme ISO/TR 14062:2003 qui définit l'écoconception. Elle se décompose en différents niveaux d'action.

Le premier niveau est incrémental. Il consiste en une simple amélioration des procédés actuels. Ensuite le deuxième niveau concerne. Elle s'attelle à redéfinir les usages du produit en conservant les mêmes objectifs. La reconception est néanmoins plus coûteuse et plus chronophage qu'une simple incrémentation. Enfin si le problème est insoluble il faut convenir à un changement de système. C'est le troisième niveau. Cette méthode revient à réinventer la fonction d'usage du produit et prône une stratégie sur le long terme mais elle est peu utilisée dans l'industrie car trop coûteuse.

Une méthode d'écoconception est l'Analyse de Cycle de Vie appelée ACV. Cette méthode se veut plus large est plus rigoureuse qu'un simple bilan carbone par sa transparence et son caractère multi-critères. Le but de cette méthode est de tenir compte de l'ensemble des impacts environnementaux qu'a un objet technique au cours de sa vie.

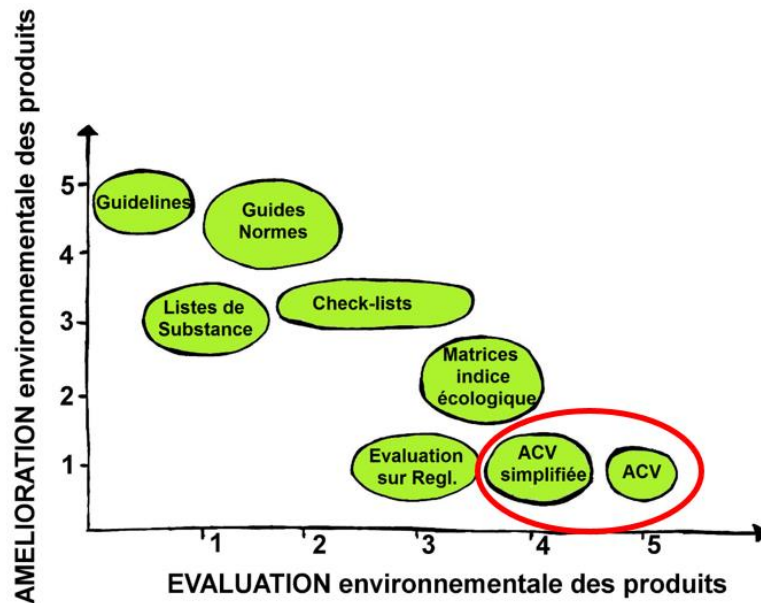


Figure 28 : Les différents outils de la démarche d'écoconception [30]

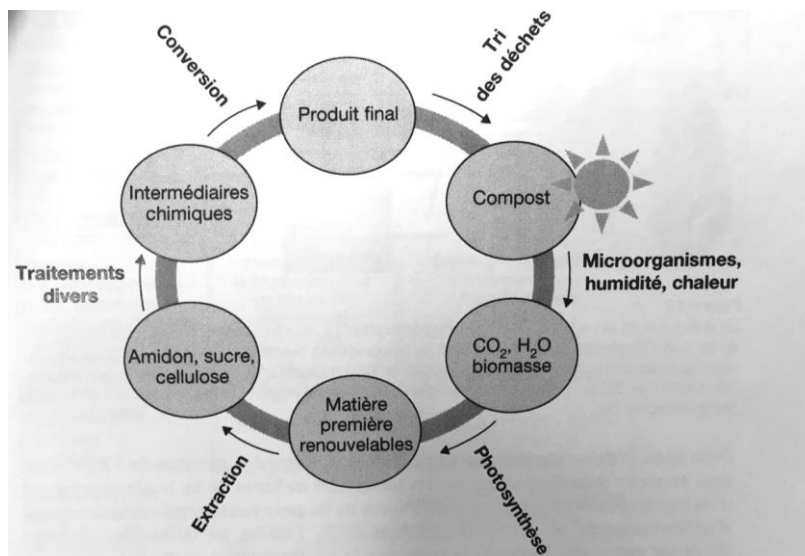


Figure 29 : Cycle de vie d'un polymère biosourcé et biodégradable [BERZIN 17 - 2017]

L'ACV est définie par la norme ISO 14044. Son séquençage est précis et se divise en 4 étapes.

La première étape consiste à définir les objectifs et les champs de l'étude. Il faut définir l'unité fonctionnelle qui correspond à la performance cible et à la durée de vie du produit. Il faut définir alors les flux de références pour satisfaire l'unité fonctionnelle, puis il faut déterminer les limites du système pour fixer les limites de l'étude.

La seconde étape consiste à réaliser un inventaire du cycle de vie du produit. Pour cela la consommation en ressources doit être quantifiée ainsi que les diverses émissions dans tous les milieux en contact avec le produit ou les unités de production.

La troisième étape s'intéresse à la quantification des impacts environnementaux en convertissant les données connues des inventaires en réels impacts pour un produit. Les impacts environnementaux sont choisis selon des critères de fiabilité, de pertinence et du public visé par l'analyse.

La dernière étape se concentre sur une interprétation des résultats précédents et une analyse poussée de ces résultats, l'objectif étant de proposer une amélioration.

Les impacts environnementaux sont définis par une norme ISO 14001 2005 qui prend en compte toute modification bonne ou mauvaise du produit sur l'environnement, que ce soit un changement climatique avec les rejets ou la consommation de gaz à effets de serre. Par exemple l'eutrophisation correspond à un déséquilibre du milieu aquatique dû à la trop forte présence de substance nutritives telles que l'azote, le phosphore ou les nitrates. En effet, la présence de nitrates ou de phosphates va entraîner un phénomène d'eutrophisation qui correspond à un développement de micro-organismes et d'algues qui vont consommer une partie de l'oxygène disponible. L'oxydation photochimique correspond à la fabrication d'ozone en basse couche atmosphérique sous l'effet des rayons du soleil. La perforation de la couche d'ozone par la dégradation de l'azote par des chlorés ou des oxydes d'azote est également pris en compte.

L'analyse et la méthodologie d'analyse des indicateurs d'impact environnementaux est régie par la norme ISO 14044.

Ces ACV doivent être contrôlés par un tiers pour être validés avant d'être publiés, afin de vérifier que la sensibilité des impacts environnementaux est bien relative aux produits et non subjective.

L'ACV est une avancée dans l'étude d'un produit car elle permet des conceptions plus responsables. Néanmoins les limites de cette analyse résident dans le fait que le côté économique et rentable n'est pas pris en compte alors que c'est un aspect primordial dans la conception d'un produit et sans lequel il n'y a pas de projet. De plus la comparaison de deux ACV pour deux produits est difficile car pour qu'elle ait un sens il faut que les deux objets étudiés possèdent des contextes et des hypothèses similaires.

### 2.3.2. ACV de la production de fibres de lin

---

Dans cette partie, les impacts environnementaux de la production de fibres de lin seront étudiés pour une utilisation en tant que renfort dans les matériaux composites qui seront comparés aux renforts en fibres de verre.

Une difficulté avec les fibres de lin destinées aux renforts de matériaux est que leur capacité de renforcement dépend de la technique de mise en œuvre et des méthodes d'extrusion. Pour les fibres

de lin l'ACV inclut également leur culture qui est un atout majeur dans la comparaison des ACV avec les fibres de verre.

La culture d'un hectare de lin en Europe produit environ 7750 kg de fibres de lin vertes qui deviendront 6650 kg de lin roui. Les étapes de teillage et de peignage conduisent à la production d'une tonne de lin par hectare.

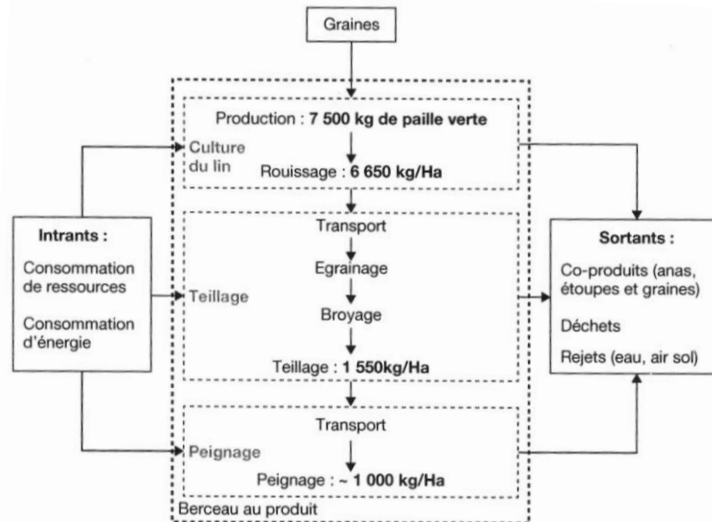


Figure 30 : Diagramme de la production de fibre de lin incluant les coproduits (kg/ha) [BERZIN 17 - 2017]

La culture du lin est un atout écologique, en effet lors de la photosynthèse la plante capte le CO<sub>2</sub> de l'air et cela contribue grandement à la diminution de 90% des ressources abiotiques<sup>5</sup> et près de 98 % la toxicité humaine par rapport à l'extraction des fibres de verre. L'indicateur d'acidification est diminué de 80% pour les fibres de lin (voir figure 31). Les valeurs négatives de l'indicateur de changement climatique correspondent à la sequestration du CO<sub>2</sub> lors de la photosynthèse ce qui est globalement très positif pour le climat et reflète l'avantage de l'utilisation de ressources issues de la biomasse plutôt que de ressources fossiles.

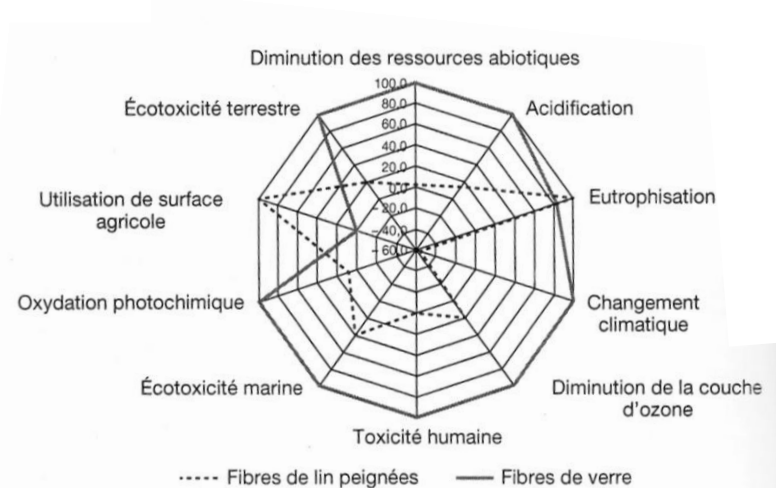


Figure 31 : Impacts environnementaux pour la production de fibres de lin peignées en comparaison de fibres de verre [BERZIN 17 - 2017]

<sup>5</sup> Se dit d'un facteur lié au milieu, indépendant des êtres vivants.

La production de lin consomme environ 5 fois moins d'énergie que la production de fibres de verre. En effet, l'énergie solaire est utilisée lors de la photosynthèse pour faire grandir la plante alors qu'il est nécessaire d'atteindre les alentours de 1500°C pour la fabrication du verre. De plus, la faible densité du lin est aussi un atout lors des transports et du stockage mais aussi sur les propriétés du composite.

### 2.3.3. ACV d'un composite polypropylène / lin pour l'automobile

Les ACV d'un composite thermoplastique/lin ont été beaucoup étudié par les chercheurs [17], [27], [28]. Or comme vu précédemment, les thermoplastiques sont recyclables et ne suivent pas les mêmes procédés de transformations que les thermodurcissables. L'ACV pour un composite thermodurcissable sera donc différente avec des avantages et des inconvénients mais il y a actuellement peu d'études dessus, donc il sera présenté dans cette partie l'ACV d'un composite PP/lin pour l'automobile.

Le matériau utilisé sera une pièce en polypropylène (PP) renforcée par 30% en masse de fibres de lin. La pièce a été sollicitée en flexion durant son fonctionnement normal au sein de la voiture. Les flux d'entrée et de sortie ont été calculés via les modèles micromécanique Halpin-Tsai et Tsai-Pagano. Leur assimilation au procédé de fabrication a été faite grâce à la méthode d'Ashby [17]. Les propriétés mécaniques ont été vérifiées par l'expérimentation. Enfin les limites géographiques de cette étude ont été fixées à l'Europe.

Le gain environnemental dû à l'utilisation des fibres de lin est d'environ 10-20% selon l'impact considéré (voir figure 32).

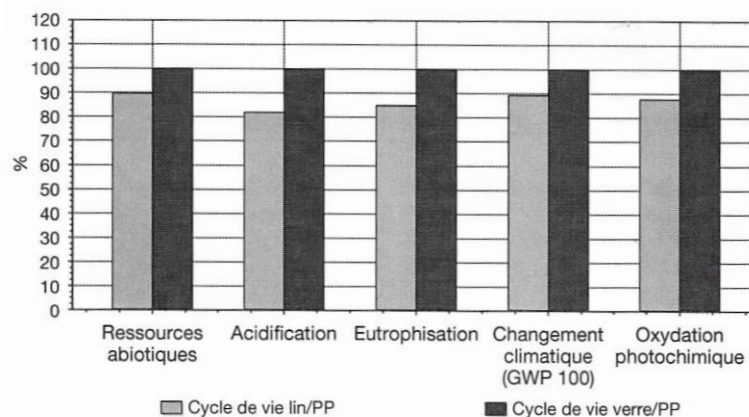


Figure 32 : Comparaison des impacts environnementaux des composites PP/lin et PP/verre sur l'ensemble de leur cycle de vie (masse de fibres=30%) [BERZIN 17 - 2017]

Ces indicateurs sont particulièrement sensibles aux gaz émis suite à la combustion des carburants fossiles qui sont très courant dans le milieu automobile. Ils sont plus bas dans le cas du lin car sa faible densité permet des propriétés mécaniques égales avec une masse totale du véhicule plus faible.

La production du polymère constitue une partie importante de la production d'un composite. Néanmoins il serait judicieux à terme de changer le polymère PP par un autre respectant l'unité fonctionnelle mais plus respectueux de l'environnement comme le PLA.

L'ACV est aussi quelques fois intégrée directement à la conception (voir figure 33). L'ACV intégrée permet une amélioration du produit plus efficace.

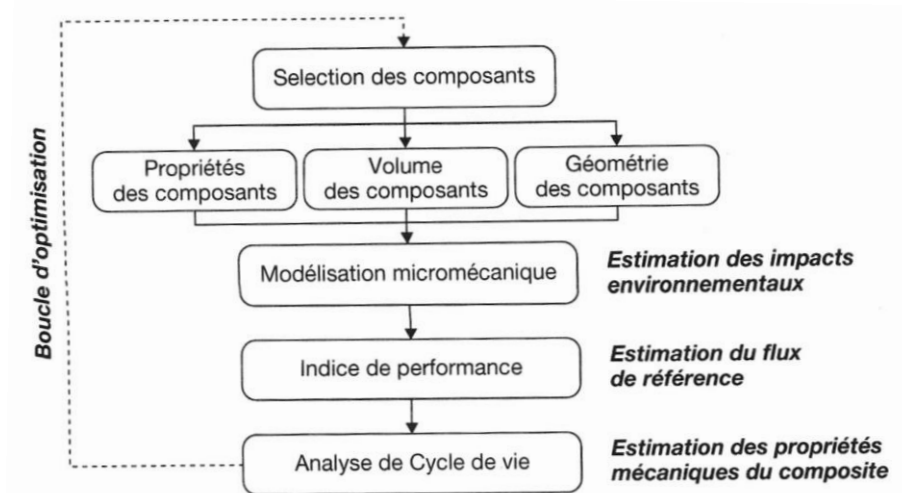


Figure 33 : Description schématique du principe de la méthodologie d'ACV intégrée [BERZIN 17 - 2017]

Pour la fin de vie d'un composite PLA/lin, quatre étapes sont envisageables : le compost, l'enfouissement, l'incinération et le recyclage. Celles-ci permettent de réduire considérablement les impacts environnementaux du matériau comme le montre la figure 34.

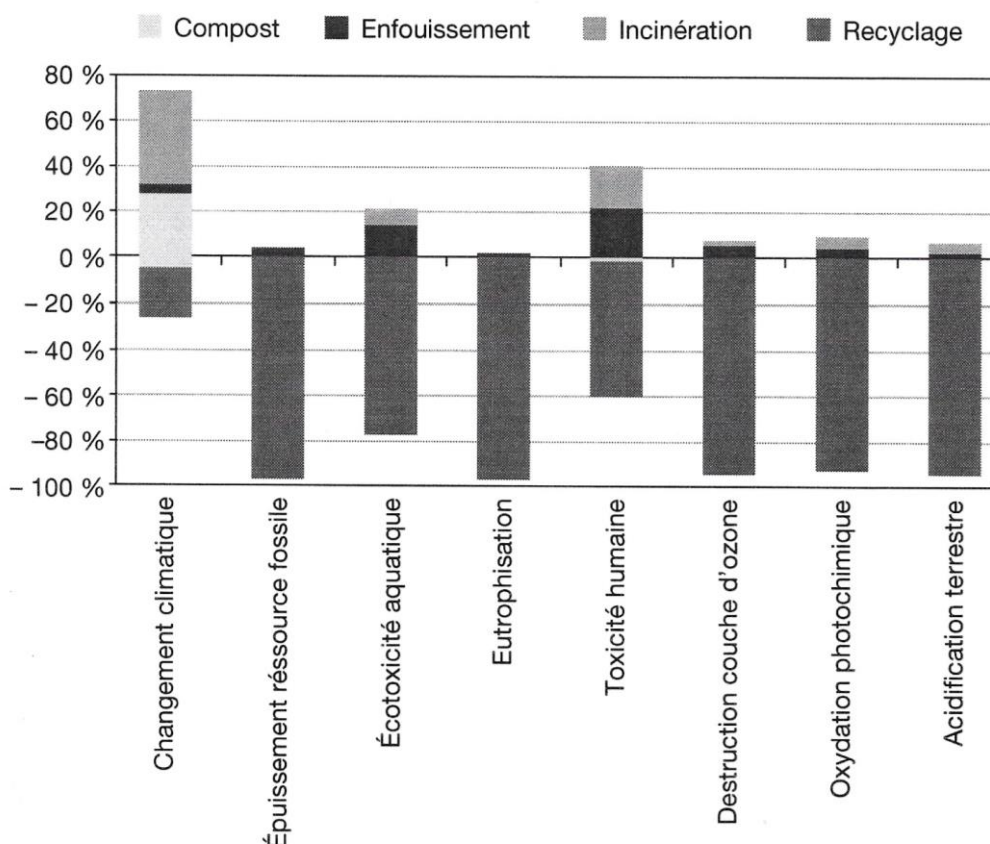


Figure 34 : Impacts environnementaux des quatre scénarios de fin de vie d'un biocomposite PLA/lin [BERZIN 17 - 2017]

### 3. Analyse stratégique

#### 3.1. Les enjeux économiques des biocomposites dans l'automobile

L'utilisation de fibres naturelles dans la confection de pièces automobile est la volonté des constructeurs automobile de substituer des pièces renforcées en fibre de verre par des fibres végétales telles que le lin.

Les consommateurs qui peuvent être des particuliers ou des professionnels ont des attentes bien spécifiques. Une des plus importante est le coût du véhicule qui peut être une barrière pour le consommateur. Un avantage de la fibre de lin est son prix, en effet elle coûte 1000 à 1500€ de moins par tonne que la fibre de verre [33], actuellement majoritaire dans le secteur automobile. De plus le remplacement pour une voiture standard de la fibre de verre par une fibre de lin correspond à un gain en masse de 60kg soit un gain net de 90€ dans le coût total de la voiture. Cet allègement permet une diminution des émissions de CO<sub>2</sub> et donc une diminution des taxes concernant la législation sur ces émissions.

Le prix d'achat d'une voiture représente un coût important tout comme celui l'utilisation quotidienne.

La durée de vie d'une voiture est d'en moyenne 200000 Km. Un allègement d'un véhicule de 6% conduit à une réduction de 3,6% de la consommation.

En 2019, le coût moyen du carburant est de 1,5€/L [35] et la consommation moyenne d'un automobiliste représente 6,39L pour cent kilomètres. Cela revient à un gain de 700€ par véhicule [34], ce qui correspond en moyenne à 10% du prix initial d'achat d'une voiture.

Pour les sociétés de transport public de personnes comme l'entreprise Taxi Radio Marseille dont le parc automobile est composé de 550 taxis [36], cet allègement entraînerait une économie de 380 000€.

De plus la diminution du poids permet d'augmenter la longévité d'autres pièces de la voiture telle que les plaquettes de freins ou des pneus dont l'usure est très dépendante de la masse de la voiture et du nombre de kilomètres parcouru. Sur ce point les informations chiffrées sont peu nombreuses car il faut prendre en compte beaucoup de paramètres. En effet si les voitures sont sensiblement plus légères les pneus et les freins pourraient être alors adaptés et donc leur coût initial réduit. Mais leur durée de vie et leur usure seraient sensiblement identiques à ceux présents sur le marché. Dans un cas où un investissement initial dans la production de nouveaux freins s'avérerait trop coûteuse, l'utilisation de freins déjà présents sur le marché mais étudiés pour des modèles dont la masse est légèrement supérieure seraient plus chers à l'achat mais permettrait un meilleur freinage donc une plus grande sécurité sur les routes et surtout une durée de vie plus longue.

Les consommateurs sont de plus en plus sensibles à leur impact sur l'environnement, notamment sur leur réduction d'émission de CO<sub>2</sub>. En effet, un véhicule rejette en moyenne en 2019 130g de CO<sub>2</sub> par kilomètre parcouru, ce qui correspond à une réduction d'émissions de CO<sub>2</sub> de 1,2 tonnes pendant la durée de vie d'un véhicule.

Cette quantité de rejet correspond à la production de 5 tonnes de pomme de terre et aussi au rejet annuel d'un indien moyen.

Plusieurs études soulignent le coût plus faible des fibres naturelles par rapport aux fibres synthétiques, mais la comparaison correcte doit être faite par rapport à leurs applications et en tenant compte de leur coût de production et de leur cycle de vie ou de leur impact. Des propriétés mécaniques différentes nécessiteront une masse différente de chaque fibre, des fibres de qualité et de fiabilité différentes entraîneront des déchets et des rebuts différents pendant la production des composites et des besoins différents de remplacement des pièces pendant la durée de vie. Néanmoins, plusieurs études indiquent que les fibres naturelles ont en général un coût inférieur à celui des fibres synthétiques comme par exemple PECAS [16] dans la figure 35. Selon ces auteurs, les fibres naturelles coûtent moins cher et nécessitent moins d'énergie à produire, ce qui entraîne des avantages en termes de coût et d'énergie par rapport aux fibres de renforcement « traditionnelles » comme les fibres de verre et de carbone.

Fibres	Coût (\$/tonne)	Energie (GJ/tonne)
Fibre naturelle	200 – 1000	4
Fibre de verre	1200 - 1800	30
Fibre de carbone	12 500	130

Figure 35 : Demande énergétique et prix des différentes fibres [PECAS, 16 – 2018]

Différentes régions du monde cultivent et utilisent différents types de fibres. Ces pays exportent ou importent parfois des fibres d'autres endroits. Par exemple, l'industrie automobile européenne utilise le chanvre et le lin alors que la jute et le kénaf sont importés du Bangladesh et de l'Inde, la banane est importée des Philippines et le sisal d'Afrique du Sud, des USA ou de Brésil.

La fibre de lin est la fibre naturelle la plus utilisée dans l'industrie automobile allemande [37]. Les voitures allemandes contiennent environ 3,6kg de fibres naturelles. La figure 36 montre l'utilisation de différentes fibres naturelles dans l'industrie automobile européenne. Par exemple en considérant qu'en 2011, environ 15,7 millions de voitures pour particuliers ont été produites en Europe et que 80 000 tonnes de fibres végétales sont utilisées dans l'industrie automobile européenne par an, cela correspond en moyenne à 5,1 kg de fibres naturelles par voiture.



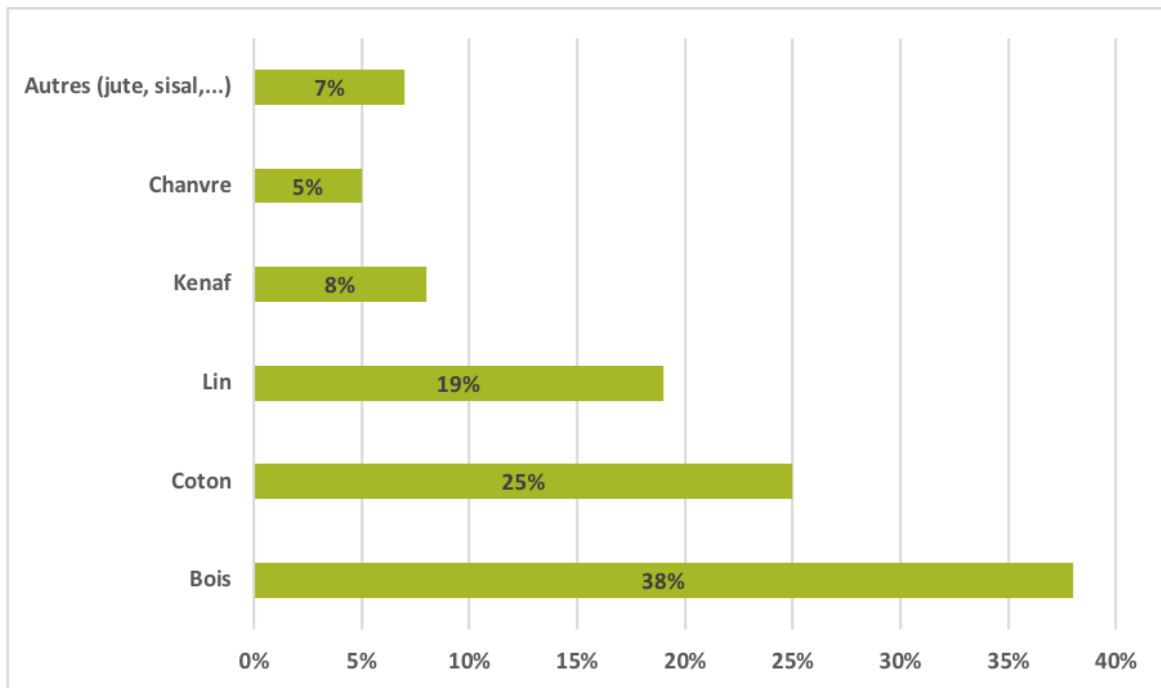


Figure 36 : Utilisation de fibres naturelles dans les composites dans l'industrie européenne en 2012 (Volume total = 80 000 tonnes) [PECAS, 16 - 2017]

### 3.2. Structure concurrentielle de l'industrie des composites – Diagramme de PORTER

Les composites à base de fibre synthétique, verre ou carbone, correspondent aux actuels concurrents principaux des biocomposites à base de fibre de lin dans le domaine automobile. Les biocomposites à base de lin sont actuellement en développement avec des entreprises comme FRD qui ont un pôle recherche très impliqué. Aussi la mise en vigueur de directives européennes pour l'environnement poussent les constructeurs automobiles à se tourner vers les nouveaux entrants.

Les fournisseurs des entreprises créant des composites avec des fibres synthétiques renforçant des matrices pétrosourcées et les entreprises fabricant des biocomposites renforcés de fibres de lin sont complètement différents mais les fabricants de pièces automobiles et les clients finaux quant à eux restent les mêmes quel que soit la technologie mise en place.

Les composites et les biocomposites dans le secteur de l'automobile sont néanmoins menacées par des technologies ou des projets comme les pare-brises intelligents qui pourraient faire disparaître les tableaux de bord.

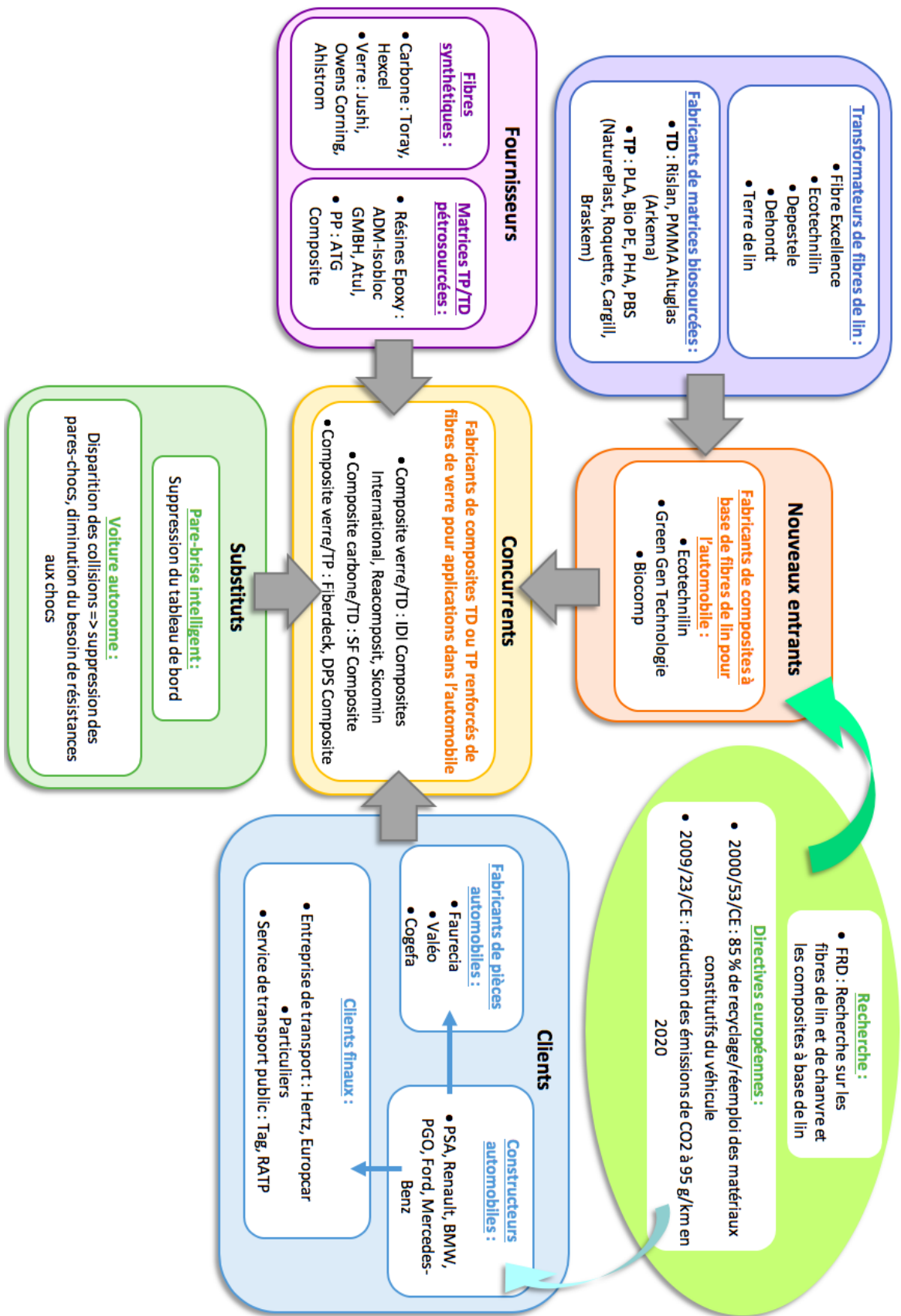


Figure 37 : Diagramme de PORTER des composites dans l'automobile

### 3.3. Perspectives d'évolution

#### 3.3.1. Diagnostic stratégique – Matrices SWOT

Grâce à l'intitulé du sujet : les biocomposites thermodurcissables à base de lin dans l'automobile, il semble intéressant d'effectuer deux matrices SWOT. Une première matrice par rapport à la ressource naturelle utilisée (figure 38), le lin, car cette plante influe le sujet. Puis une deuxième matrice SWOT sur le sujet (figure 39).

Il est intéressant d'effectuer une matrice SWOT sur la production des fibres de lin (figure 38) car cette plante annuelle possède plusieurs qualités. En effet, cette plante étant naturelle, elle est Bio3 (biodégradable, biosourcée, biocompatible). De plus, les autres forces du lin sont sa densité faible ( $d=1.4$ ), d'excellentes propriétés acoustiques qui pourraient continuer de se développer dans les futures années. Une discussion concernant la disponibilité comme une force ou une faiblesse pourrait être faite mais il semble que ce soit actuellement une force car la production suit la demande. En effet cette demande continue de grandir grâce à l'effet de mode de toujours faire des objets de plus en plus verts. La législation environnementale et l'évolution de la demande renforcent cet effet de mode.

Cependant, il ne faut pas oublier que le lin est en concurrence avec les fibres de carbone et surtout les fibres de verre. Même si la densité est faible, les propriétés mécaniques du lin ne sont toujours pas équivalentes à celles des fibres de verre et cela est la principale faiblesse des fibres de lin. Si l'utilisation de cette plante continue de croître, il faudra peut-être la concurrence d'autres pays qui pourraient se lancer dans le marché du lin.

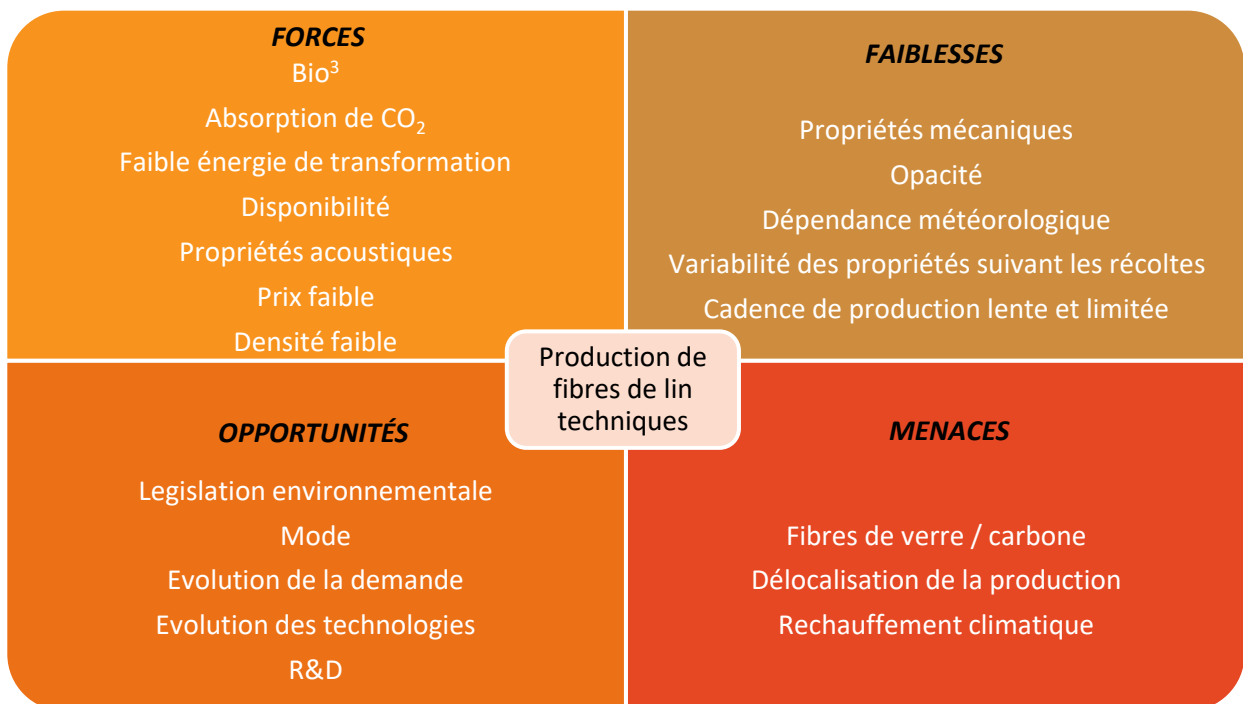


Figure 38 : Matrice SWOT de la production de fibres de lin techniques

Les biocomposites à base de fibres de lin sont très intéressants car la densité de ces composites est très faible ce qui en fait une grande qualité. Cette faible densité entraîne un plus faible impact environnemental que les composites actuels utilisant comme renfort des fibres de verre ou de carbone. Cette faible densité pourrait permettre à ces biocomposites de se développer aussi dans d'autres applications que l'automobile. De plus, plusieurs procédés sont déjà fonctionnels pour réaliser des biocomposites à base de lin ce qui en fait aussi une grande force. Le développement des pays pauvres pourrait aussi devenir une force pour ces biocomposites à base de lin dans l'automobile. Malgré un prix plus élevé pour ces nouveaux composites, le développement des pays pauvres ne pourra pas être négatif pour les composites à base de lin et pourrait aussi se développer dans ces pays avec le lin ou des ressources locales.

Certains points sont toujours à améliorer pour accroître l'utilisation de ces composites comme la compatibilité entre la matrice et le renfort qui reste actuellement le problème majeur de ces biocomposites. De plus, la technologie pousse de plus en plus vers les voitures autonomes et ainsi la suppression de certaines pièces dans les voitures pourrait réduire l'utilisation des biocomposites dans l'automobile. A contrario si la production augmente, la disponibilité de cette ressource pourrait devenir un problème.

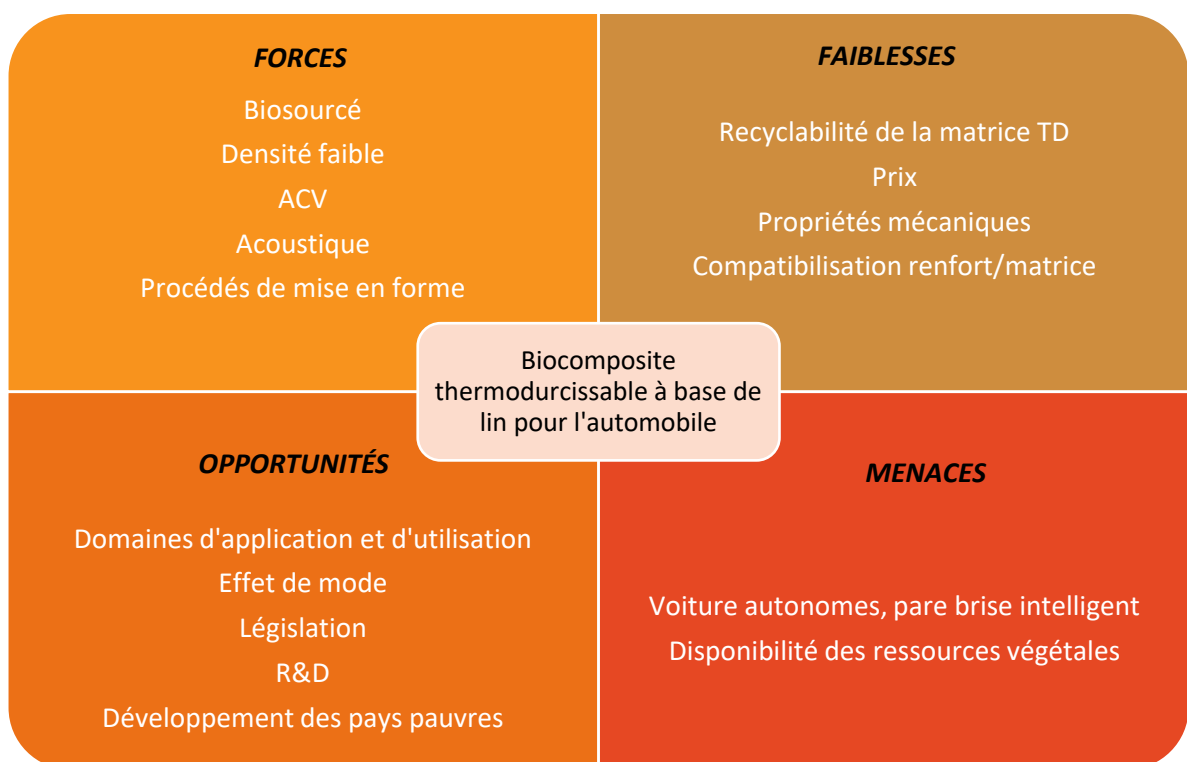


Figure 39 : Matrice SWOT des biocomposites thermodurcissables à base de lin dans l'automobile

**Scénario pessimiste : En 2035, le développement des voitures autonomes, le réchauffement climatique et les progrès de la recherche ont fait disparaître les biocomposites dans le secteur (probabilité 40%).**

Hypothèses :

- Développement des systèmes embarqués et des automobiles autonomes (probabilité : 60%)
- Réchauffement climatique et maladie affectant les récoltes et les productions annuelles de lin (probabilité : 40%)
- Synthèse d'une nouvelle fibre ayant de bonnes propriétés mécaniques et étant peu chère (probabilité : 20%)

Les salons automobiles montrent des concepts-cars de plus en plus futuristes dans lesquelles la matière disparaît pour être remplacée par des systèmes embarqués comme des parebrises connectés. D'ici 2035, il est impossible de négliger la disparition des tableaux de bord et des pare-chocs, entre autres, pour améliorer l'allègement et diminuer la consommation en CO<sub>2</sub> des voitures.

La production de lin nécessite des conditions climatiques très particulières. Le réchauffement climatique pourrait dérégler la production et les récoltes, entraînant des changements de propriétés comme les propriétés mécaniques. Si cela arrive, l'utilisation du lin dans l'automobile pourrait être remise en question voire totalement arrêtée. De plus, le lin est susceptible de subir des maladies comme toutes les plantes. Pour éviter ces maladies, le lin devra être traité et cela entraînera des modifications des propriétés et/ou sa disparition.

Dans les prochaines quinze années, la recherche permettra peut-être de synthétiser une nouvelle fibre ayant des propriétés remarquables, peu chère et possédant une excellente empreinte carbone, amenant les recherches des biocomposites à base de fibres végétales obsolètes.

Les pays avec un climat plus froid comme la Russie pourront trouver des terres et un climat exploitable pour cultiver le lin en cas de réchauffement climatique, cela contribuerait à la diminution de la production en Europe et principalement en France. Ainsi la fibre de lin deviendrait plus chère à l'exportation entraînant une hausse du prix de la tonne et donc une disparition dans les biocomposites à cause du manque d'attractivité.

**Scénario optimiste : En 2040, avec la raréfaction du pétrole, le développement des pays pauvres et l'utilisation de végétaux ayant une croissance rapide, les composites à base de fibres végétales sont majoritaires sur le marché de l'automobile. (Probabilité de 50%)**

Hypothèses :

- La législation par rapport à l'environnement se durcie fortement (allègement, obligation d'un haut ratio de fibre végétale, recyclage) (probabilité de 60%)

- Disparition du pétrole : arrêt de la production de fibres de verre (probabilité de 60 %)
- Utilisation d'une fibre végétale ayant une croissance rapide, et de bonnes propriétés mécaniques pouvant être utilisées dans l'alimentaire et dont les déchets peuvent être utilisés dans l'automobile (probabilité de 40%)
- Développement des pays pauvres : augmentation de la demande, utilisation des ressources disponibles dans le pays. (Probabilité de 40%)

Il est possible que dans un futur proche, la législation par rapport à l'environnement se durcisse. En effet la prise en compte du réchauffement climatique et les nombreux meetings constitués de chercheurs et de spécialistes ont fait pression sur les gouvernements. Le milieu de l'automobile est fortement affecté par ces nouvelles lois environnementales. Pour réduire la consommation des véhicules la majorité des constructeurs automobiles choisissent de remplacer les fibres de verres par des fibres de lin pour les renforts des pièces. Cette nouvelle décision fut permise par l'étude et la prise en compte sérieuse des ACV du lin qui permet lors de sa culture de capturer du CO<sub>2</sub>. De plus de nouvelles techniques de recyclage permettent de mettre en œuvre un recyclage très efficace des véhicules présentant des pièces avec un haut ratio de fibres de lin dans leurs renforts.

Aussi le pétrole pourrait disparaître, les nouvelles voitures seraient alors entièrement électriques ou fonctionneraient avec des biocarburants. De ce fait l'utilisation de fibres de verre, serait stoppée. La population utiliserait moins de matériaux non verts, car elle est de plus en plus sensibilisée aux risques pour sa santé. Les constructeurs répondraient donc aux attentes de leurs consommateurs et opteraient pour des voitures renforcées principalement avec des fibres végétales.

Il est possible qu'une nouvelle espèce végétale dont les propriétés seraient encore plus avantageuses apparaisse. En effet, la réintroduction d'espèces ou de variétés anciennes oubliées ou éteintes par le biais de nouvelles technologies serait possible. Celles-ci pourraient posséder un rendement et des propriétés très intéressantes pour le milieu automobile. Ces nouvelles variétés constitueraient une source de nourriture et les fibres techniques proviendraient des pailles qui sont des déchets agricoles. Cela éviterait d'utiliser des terres agricoles pour des utilisations non alimentaires.

Le développement des pays pauvres permettrait une augmentation importante de la demande dans le secteur automobile. Il serait nécessaire de fabriquer les véhicules sur place et aussi d'utiliser les espèces végétales du milieu, différentes des espèces européennes. L'utilisation de ressources végétales locales serait moins chère que l'importation de fibres de verre. Cela développerait l'économie locale, créerait de l'emploi et augmenterait le pouvoir d'achat des habitants et permettrait au pays de se développer. Cela serait profitable aux locaux et aux constructeurs automobiles.

**Scénario tendanciel : En 2035, les composites à base de fibres végétales sont bien implantés dans le marché de l'automobile et concurrencent les composites renforcés de fibres de verre grâce à une législation renforcée, une prise de conscience collective écologique et les progrès de la recherche. (Probabilité de 75%)**

Hypothèses :

- La recherche et l'innovation révèle des propriétés très utiles, autres que celles proposées des fibres de verre (isolation phonique, thermique) et un prix compétitif (Probabilité : 80%)
- La législation se durcie et s'oriente vers des solutions plus écologiques : consommation, émission de gaz, de polluants (Probabilité : 95%)
- La prise de conscience collective entraîne un phénomène de mode écologique, green concept (Probabilité : 70%)
- Dans un souci de réduction des transports et d'écologie, la réduction de l'importation entraîne l'augmentation de l'utilisation de ressources locales (lin) (Probabilité : 50%)

Avec la mise en vigueur de nouvelles législations européennes concernant les émissions de gaz à effet de serre, la gestion des polluants et des déchets. Les fabricants de composites et les constructeurs automobiles décideront de travailler de manière conjointe sur le développement des pièces automobiles à base de fibres naturelles.

La première décision pouvant être choisie, est de réduire les importations et ainsi d'utiliser principalement les ressources disponibles directement sur le territoire sous l'incitation du gouvernement et de réduire les coûts liés au transport de matière première. Puis après beaucoup d'année de recherches et d'études ces deux acteurs auront créer des composites biosourcés présentant des propriétés mécaniques et des prix comparables à ceux renforcés par des fibres de verre. Malheureusement ces composites ne seront utilisables que pour certaines pièces spécifiques de l'automobile donc il existera toujours des pièces en fibre de verre. De plus les pièces biosourcés présenteront des propriétés différentes de celles obtenues par fibre de verre telles qu'une meilleure isolation thermique et phonique par exemple.

Avec le développement des courants de pensée des sociétés envers le respect de l'environnement et l'écologie, les constructeurs automobiles sauront convaincre les consommateurs de la sûreté de leurs produits et ces derniers accepteront pleinement l'utilisation des biocomposites dans les automobiles.

L'avantage des composites est d'intégrer des fibres dans une matrice polymère, les fibres végétales ayant une densité plus faible que la matrice permettent d'alléger le matériau et de diminuer la consommation globale du véhicule.

Les problématiques liées à l'utilisation des fibres végétales ont également été abordées. En effet, les fibres végétales étant polaires et les polymères étant non polaires, il faut comptabiliser les matériaux entre eux. Aussi la matière végétale se décompose à des températures relativement faibles (environ 200°C) ce qui limite les températures de mise en œuvre des composites. Ces dernières sont variées et permettent de fabriquer des pièces avec différents niveaux de résistance mécanique à différentes cadences de production.

La diversité des matrices polymères permet l'application des composites dans de nombreuses structures des véhicules. Les thermoplastiques, comme le polypropylène, sont plutôt utilisés pour les pièces intérieures car ils sont plus légers et moins chers, tandis que les composites thermodurcissables ont de meilleures propriétés mécaniques et sont plutôt utilisés dans des pièces de structure des véhicules.

Les biocomposites les plus utilisés dans l'automobile sont des composites avec une matrice polymère issue du pétrole et avec un renfort lignocellulosique. Les fibres naturelles ont l'avantage d'être moins chère, plus légère et ont des propriétés mécaniques semblables aux fibres de verre. Les fibres de carbones ont des propriétés mécaniques supérieures mais sont jusqu'à 50 fois plus chères.

Les industriels automobiles investissent de plus en plus dans le secteur des biocomposites notamment à cause des normes environnementales. En effet les comparaisons des analyses de cycle de vie des fibres de lin et de verre montrent que les biocomposites présentent des avantages environnementaux fort. Cependant il existe encore des freins dans ce secteur comme la variabilité des propriétés des fibres qui dépendent des récoltes, des espèces, etc.

L'utilisation des biocomposites à base de fibres de lin dans l'automobile sont menacés par l'arrivée des nouvelles technologies comme les parebrises intelligents et les voitures autonomes. Malgré le renforcement de la législation environnementale, l'augmentation de l'effet de mode et de la prise de conscience en faveur de l'éco-conception, les nouvelles technologies pourraient conduire à la suppression de certaines pièces dans les véhicules afin d'alléger les voitures et de diminuer la consommation de carburant qui est l'objectif principal des lois et des directives européennes.



## Bibliographie

- [1] INSEE. Tableau de l'économie française, édition 2017. Disponible sur : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2569366?sommaire=2587886> (consulté le 20/02/19)
- [2] Nicolas PICCIRELLI, Alain GIOCOSA. Les composites dans l'industrie automobile, tiré des techniques de l'ingénieur, 2011, 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 le 20/02/19)
- [3] FRANK NIEDERCORN. Le composite, nouvelle frontière de l'automobile, 2012, consultable sur : [https://www.lesechos.fr/15/05/2012/LesEchos/21185-036-ECH\\_le-composite--nouvelle-frontiere-de-l-automobile.htm](https://www.lesechos.fr/15/05/2012/LesEchos/21185-036-ECH_le-composite--nouvelle-frontiere-de-l-automobile.htm) (consulté le 20/02/2019)
- [4] Céline GERADON. Le secteur automobile : driver pour l'émergence des biocomposites. 08/01/18. Consultable sur : <https://valbiomag.labiomasseenwallonie.be/news/le-secteur-automobile-driver-pour-lemergence-des-biocomposites> (consulté le 20/02/19)
- [5] Le lin coté nature. Les différentes zones de production du lin dans le monde et en France. 2017. Consultable sur : <https://www.lelin-cotenature.fr/FR/Les-zones-de-production-41.html> (consulté le 7/03/19)
- [6] FMC composites. Les matériaux. Consultable sur : <http://www.fmc-composites.com/materiaux-composites-29> (consulté le 20/02/19)
- [7] BERGERET Anne. Polymères, Composites et Renforts. Département Conception éco-innovation et Génie de Matériaux Avancés. Centre des Matériaux de Mines d'Alès. 2018. 161 pages.
- [8] FAURECIA. Faurecia Flaxpreg remporte le prix de l'innovation JEC Europe 2015 dans la catégorie produits semi-finis. 2015. Consultable sur : <https://www.faurecia.com/newsroom/faurecia-flaxpregtm-remporte-le-prix-de-linnovation-jec-europe-2015-dans-la-categorie-produits-semi-finis> (consulté le 9/03/19)
- [9] Anh Vu Nguyen. Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances de systèmes robotiques. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2015. Consultable sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01276672/document> (consulté le 9/03/19)
- [9'] BOUZOUITA Sofien, Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel, Janvier 2013, consultable sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00769959/document> (consulté le 20/02/19)
- [10] Céline GERADON. Biocomposites : un marché en développement ?. 15/01/18. Consultable sur : <https://valbiomag.labiomasseenwallonie.be/news/biocomposites-un-marche-en-developpement> (consulté le 20/02/19)

- [11] INTERREG. Le projet Composens. Consultable sur <http://composens.eu/le-projet/?lang=fr> (consulté le 20/02/19)
- [12] N RAMLI. Natural fiber for green technology in automotive industry: A brief review. 2018. Consultable sur : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/368/1/012012/pdf> (consulté le 20/02/19)
- [13] Jérémie AUCHET. Étude comparative du comportement composites à matrice thermoplastique ou thermodurcissable. 2011. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00557897> (consulté le 9/03/19)
- [14] Zakariya BOUFAIDA. Analyse des propriétés mécaniques de composites taffetas verre/matrice acrylique en relation avec les propriétés d'adhésion des fibres sur la matrice. Thèse mention mécanique et énergétique. Université de Lorraine, Soutenue le 03 juillet 2015, 211 pages. Disponible sur [http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC\\_T\\_2015\\_0108\\_BOUFAIDA.pdf](http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2015_0108_BOUFAIDA.pdf) (consulté le 09/03/2019)
- [15] Jean-Luc Wertz. Polymères biobasés : amidon, PLA, PHA, PE et PET. Valbiom. Novembre 2016. 54 pages. Disponible sur <https://monprojet.labiomasseenwallonie.be/download/file/fid/558> (consulté le 09/03/19)
- [16] PECAS Paulo, Natural fibre composites and their applications : a review, Septembre 2018, consultable sur : <https://www.mdpi.com/2504-477X/2/4/66/pdf> (consulté le 20/02/19)
- [17] BERZIN Françoise. Composites polymères et fibres lignocellulosiques : Propriétés, transformation et caractérisation. Lavoisier, Paris, 2017, 312p. ISBN 978-2-7462-4777-2
- [18] Ecofin gestion publique. L'Égypte devient le troisième producteur mondial de fibre de verre derrière les États-Unis et la Chine. Janvier 2018. Consultable sur : <https://www.agenceecofin.com/economie/1501-53488-l-egypte-devient-le-troisieme-producteur-mondial-de-fibre-de-verre-derriere-les-etats-unis-et-la-chine> (consulté le 09/03/2019)
- [19] Michèle Mosiniak et Roger Prat. Les textiles d'origine végétale. 2002. Consultable sur : <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/textiles/index.html> (consulté le 09/03/2019)
- [20] Midi en France : VU D'ICI : Le lin habille le pays de Caux. 2014. 5min. Consultable sur : <https://www.youtube.com/watch?v=DpHuNQkLPXw> (consulté le 09/03/2019)
- [21] Lorraine nature. Le LIN est le plus vieux textile du monde. Consultable sur : <https://lorrainature.wordpress.com/2016/06/12/le-lin/> (consulté le 20/02/2019)
- [22] Adam LY et Augustin SALASCA. Fibres de miscanthus et matériaux composites. Mai 2015. Consultable sur : <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2016/miscanthus-composite.htm> (consulté le 20/02/2019)

[23] GAQUERE Ludovic. Amélioration des propriétés hydrophobes et ignifuges des isolants naturels à base de fibres de lin et de chanvre par traitement au plasma atmosphérique. Ecobat Sciences & Techniques. 2013. Consultable sur :

[http://www.crepim.fr/docs/dvt\\_fr\\_trait\\_surf\\_crepim\\_materianova.pdf](http://www.crepim.fr/docs/dvt_fr_trait_surf_crepim_materianova.pdf) (consulté le 10/03/2019)

[24] Nicolas Andre Michel Martin. Contribution à l'étude de paramètres influençant les propriétés mécaniques de fibres élémentaires de lin: Corrélation avec les propriétés de matériaux composites. Matériaux. Université de Bretagne Sud, 2014. Consultable sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01194534/document> (consulté le 09/03/2019)

[25] CELC. Les fibres naturelles végétales européennes de lin et de chanvre : Double performance technique et écologique. Consultable sur :

[https://www.mastersoflinen.com/img/outilsPdf/LES\\_FIBRES\\_NATURELLES\\_VEGETALES\\_EUROPEENNES\\_DE\\_LIN\\_ET\\_CHANVRE\\_2010.pdf](https://www.mastersoflinen.com/img/outilsPdf/LES_FIBRES_NATURELLES_VEGETALES_EUROPEENNES_DE_LIN_ET_CHANVRE_2010.pdf) (consulté le 09/03/2019)

[26] Jonathan PAGE. Traitement des fibres de lin au plasma atmosphérique : Influence sur les propriétés d'un composite ciment-lin. Avril 2016. Consultable sur :

[https://www.researchgate.net/publication/311582659\\_Traitement\\_des\\_fibres\\_de\\_lin\\_au\\_plasma\\_atmosphérique\\_Influence\\_sur\\_les\\_propriétés\\_d'un\\_composite\\_ciment-lin](https://www.researchgate.net/publication/311582659_Traitement_des_fibres_de_lin_au_plasma_atmosphérique_Influence_sur_les_propriétés_d'un_composite_ciment-lin) (consulté le 10/03/2019)

[27] A. LE DUGOU. Eco-conception et analyse de cycle de vie : comparatif entre un composite synthétique et un composite renforcé par des fibres végétales. Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne (LIMATB). 2014. Consultable sur :

[http://www.mecamat.asso.fr/Aussois/2014/res/Ledigou\\_com.pdf](http://www.mecamat.asso.fr/Aussois/2014/res/Ledigou_com.pdf) (consulté le 11/03/19)

[28] ADEME. Analyse de cycle de vie comparative de panneaux de porte automobiles biosourcé (pp/fibres de lin et de chanvre) et petrosourcé (abs). Novembre 2016

[29] NGUYEN. Caractérisation de l'interface fibre/matrice. Application aux composites polypropylène/chanvre. 2016. Disponible sur : <https://www.theses.fr/196772435> (consulté le 24/04/19)

[30] Eco-conception. Analyse du cycle de vie (ACV). Disponible sur : <https://www.eco-conception.fr/static/analyse-du-cycle-de-vie-acv.html> (consulté le 24/04/19)

[31] Nova-Institute, 2017, European biocomposite production reached 410.000 tonnes in 2017 (press release). Disponible sur : <http://biocompositescc.com/pressrelease?id=373> (consulté le 20/03/2019)

[32] Nova-Institute, 2017, Natural fibre-reinforced plastics : establishment and growth in niche market (press release) : <http://biocompositescc.com/pressrelease?id=372> (consulté le 20/03/2019)

[33] Confédération Européenne du lin et du chanvre. Le baromètre du lin européen. 2015. Consultable sur : [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/fr/Documents/sustainability-services/deloitte\\_barometre-lin-europeen\\_2015.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/fr/Documents/sustainability-services/deloitte_barometre-lin-europeen_2015.pdf) (consulté le 20/03/2019)

[34] Joël Le Gal. Surcoût admissible par kg d'allègement. 2013. Disponible sur : <https://www.auto-infos.fr/Surcout-admissible-par-kg-d,4792>(consulté le 20/03/2019)

[35] Prix des carburants. 2019. Disponible sur : <http://france-inflation.com/prix-carburants.php>(consulté le 20/03/2019)

[36] <https://www.taximarseille.com>(consulté le 20/03/2019)

[37] Huda, M.S.; Drzal, L.T.; Ray, D.; Mohanty, A.K.; Mishra, M. Natural-fiber composites in the automotive sector. In *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*; Woodhead Publishing: Oxford, UK, 2008; ISBN 9781845692674.

## Table des figures

Figure 1 : La place des composites dans une voiture [NIEDERCORN 3 - 2012].....	3
Figure 2 : Les différentes matrices sur le marché des composites [GERADON 10 – 2018].....	6
Figure 3 : Les secteurs d'applications des biocomposites [GERADON 10 – 2018] .....	7
Figure 4 : Leviers pour la réduction des émissions de CO <sub>2</sub> des véhicules [GERADON 4 - 2018] .....	8
Figure 5 : Exemples d'utilisation dans l'automobile de composites à matrice TD ou TP et renfort végétal [RAMLI 12 – 2018] .....	10
Figure 6 : Comparaisons de différentes propriétés des thermoplastiques les plus utilisés dans l'industrie automobile [AUCHET 13 - 2011] .....	11
Figure 7 : Comparaison de différentes propriétés mécaniques des thermodurcissables les plus courants [BOUFAIDA 14 - 2015] .....	11
Figure 8 : Exemples de pièces de voitures contenant des fibres végétales [BOUZOUITA 9' - 2013] ....	13
Figure 9 : Production européenne (en tonnes) de biocomposites en 2012 et 2017 [Nova-Institute, 31 – 2017].....	14
Figure 10 : Principaux producteurs et fournisseurs de granulats de plastique renforcé de fibres de bois et naturelles avec leurs quantités de production en Europe en 2017 [Nova Institute, 32 - 2017].....	16
Figure 11 : Fibre végétale unitaire à différentes échelles [NGUYEN 29 - 2016].....	19
Figure 12 : Fibres unitaires et faisceaux de fibres [NGUYEN 29 - 2016] .....	19
Figure 13 : Carte montrant les surfaces ensemencées de lin en France, Pays bas et Belgique en 2014 [Lorraine Nature 21 - 2016].....	20
Figure 14: Bilan des étapes de la récolte et de la transformation du chanvre et de ses applications [LY et SALASCA 22 - 2015] .....	21
Figure 15 : Photo en MEB montrant l'effet du traitement plasma et ajout de charges minérales sur des fibres naturelles [GAQUERE 23 - 2013] .....	22

Figure 16 : Propriétés des fibres de verre [NGUYEN 9 – 2015] .....	24
Figure 17 : Caractéristiques des fibres de carbone en fonction de leur fabricant [NGUYEN 9 - 2015] .....	25
Figure 18 : Comparaison de différentes propriétés de fibres de verre, de carbone et végétales [RAMLI 12 - 2018].....	26
Figure 19 : Propriétés mécaniques du lin en fonction de sa variété [MARTIN 24 - 2014] .....	26
Figure 20 : Evolution du contenu en eau des fibres en fonction de l'humidité relative [CELC 25 - 2010] .....	27
Figure 21 : Schémas de principe de l'extrusion et de l'injection [BERZIN 17 – 2017] .....	28
Figure 22 : Schéma de principe du procédé de moulage par compression [BERZIN 17 – 2017] .....	29
Figure 23 : Schéma de principe du moulage au sac à vide [BERZIN 17 – 2017].....	29
Figure 24 : Schéma de principe du procédé RTM [BERZIN 17 – 2017].....	30
Figure 25 : Schémas de principe des procédés RFI (a) et LRI (b) [BERZIN 17 – 2017] .....	30
Figure 26 : Procédés de mise en forme et caractéristiques typiques des composites à fibres lignocellulosiques [BERZIN 17 – 2017] .....	31
Figure 27 : Propriétés mécaniques spécifiques des composites à renforts biosourcés suivant leur type de matrice et leur procédé de fabrication [BERZIN 17 – 2017] .....	32
Figure 28 : Les différents outils de la démarche d'écoconception [30] .....	33
Figure 29 : Cycle de vie d'un polymère biosourcé et biodégradable [BERZIN 17 - 2017] .....	33
Figure 30 : Diagramme de la production de fibre de lin incluant les coproduits (kg/ha) [BERZIN 17 - 2017].....	35
Figure 31 : Impacts environnementaux pour la production de fibres de lin peignées en comparaison de fibres de verre [BERZIN 17 - 2017] .....	35
Figure 32 : Comparaison des impacts environnementaux des composites PP/lin et PP/verre sur l'ensemble de leur cycle de vie (masse de fibres=30%) [BERZIN 17 - 2017] .....	36
Figure 33 : Description schématique du principe de la méthodologie d'ACV intégrée [BERZIN 17 - 2017] .....	37
Figure 34 : Impacts environnementaux des quatre scénarios de fin de vie d'un biocomposite PLA/lin [BERZIN 17 - 2017].....	37
Figure 35 : Demande énergétique et prix des différentes fibres [PECAS, 16 – 2018].....	39
Figure 36 : Utilisation de fibres naturelles dans les composites dans l'industrie européenne en 2012 (Volume total = 80 000 tonnes) [PECAS, 16 - 2017].....	40
Figure 37 : Diagramme de PORTER des composites dans l'automobile .....	41
Figure 38 : Matrice SWOT de la production de fibres de lin techniques .....	42
Figure 39 : Matrice SWOT des biocomposites thermodurcissable à base de lin dans l'automobile ....	43
Figure 40 : Liste des acronymes des polymères et procédés [PICCIRELLI, 2 - 2011].....	53

ABS	copolymère de styrène, butadiène et acrylonitrile
ASA	acrylonitrile styrène ester acrylique
BMC	<i>Bulk Molding Compound</i>
C-SMC	<i>Carbon Fibre – SMC</i>
EP	résine époxy
EPDM	terpolymère d'éthylène, de propylène et d'un diène
FC	fibres de carbone
FV	fibres de verre
LFT	<i>Long Fibre Thermoplastic</i>
PA	polyamide
PBS	polybutylène succinate
PBT	polybutylène téréphtalate
PC	polycarbonate
PDCPD	polydicyclopentadiène
PE	polyéthylène
P/E	polypropylène/polyéthylène
PET	polyéthylène téréphtalate
PLA	acide polylactique
PMMA	polyméthacrylate de méthyle
PP	polypropylène
PPA	polyphthalamide
PPO	polyoxyphénylène
PPS	polysulfure de phénylène
PUR	polyuréthane
PVC	polychlorure de vinyle
RIM	<i>Reaction Injection Molding</i>
RIM PUR	<i>Reaction Injection Molding Polyuréthane</i>
SMC	<i>Sheet Molding Compound</i>
TD	thermodurcissable
TP	thermoplastique
UD	renfort unidirectionnel
UP	résine polyester
VE	résine vinylester

Figure 40 : Liste des acronymes des polymères et procédés [PICCIRELLI, 2 - 2011]