

ECO-CONCEPTION ET ANALYSE DE CYCLE DE VIE : COMPARATIF ENTRE UN COMPOSITE SYNTHÉTIQUE ET UN COMPOSITE RENFORCÉ PAR DES FIBRES VÉGÉTALES

A. Le Duigou, Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne (LIMATB), Centre de recherche C Huygens, 56100 Lorient. *Téléphone : 02 97 87 45 86, Télécopie : 02 97 87 45 88, Email antoine.le-duigou@univ-ubs.fr,*

Mots clés : Eco-conception, analyse de cycle de vie, composites renforcés par des fibres végétales, démarche intégrée

1. INTRODUCTION

L'impact avéré de l'activité humaine sur notre environnement associé aux coûts évalués des différentes catastrophes écologiques et du changement climatique motivent fortement au changement de comportement. Les composites conventionnels comme les composites polyester ou époxy/ verre sont couramment utilisés dans les domaines du nautisme, du transport ou de l'éolien pour leurs propriétés mécaniques, leur légèreté et pour leur faible coût (Ashby 1999). Cependant, ceux-ci sont très souvent basés sur des ressources pétrochimiques non renouvelables. De plus, leur transformation est énergivore et peut générer des composés toxiques pour le transformateur. Enfin, leur gestion de fin de vie est complexe et peu viable économiquement.

Désormais une réflexion globale s'impose sur les conséquences du choix des matériaux, non plus seulement sur la fabrication d'un produit, mais également sur leur utilisation (économe) et leur fin de vie. C'est ce que l'on appelle l'éco-conception qui se définit comme l'intégration des critères environnementaux dès la conception du produit et sur tout le cycle de vie. L'ADEME nomme un produit éco-conçu comme étant le fruit d'une démarche d'éco-conception. Dès lors, la définition et la quantification des impacts environnementaux au moyen de méthodologies adaptées et normalisées (ISO 14044 (ISO-14044 2006)) comme l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) sont nécessaires.

Les composites à fibres végétales et notamment ceux renforcés par des fibres de lin ou de chanvre ont des propriétés spécifiques compétitives (Bodros, Pillin et al. 2007) et sont biodégradables si la résine choisie est un biopolymère. Toutefois, leur fait d'être biodégradable et d'être partiellement ou totalement issu de ressources renouvelables ne garantit pas une innocuité environnementale. L'utilisation de l'ACV est, pour le développement de biocomposites, nécessaire afin de ne pas se fourvoyer dans le blanchiment écologique. Rappelons que le blanchiment écologique ou green washing attribue de manière fallacieuse des vertus environnementales à un produit sans réelle preuve. Cet article se décompose en trois parties. La première partie présente deux exemples de résultats d'analyse de cycle de vie intégrant des fibres végétales et des composites à fibres végétales. La deuxième partie décrit les différents noeuds méthodologiques liés aux biocomposites. Enfin, la troisième partie traite du développement d'une approche où modélisation micromécanique, indice de performance et ACV sont couplés pour permettre une démarche environnementale intégrée.

2. EXEMPLE D'ACV DE COMPOSITES SYNTHETIQUES EN COMPARAISON DE COMPOSITES RENFORCES PAR DES FIBRES VEGETALES

2.1 Production de fibres de lin pour usage de renfort de matériaux composites

La production d'un kilogramme de fibres de lin de renforts est analysée du berceau au semi-produit incluant la phase agricole, le rouissage, l'extraction mécanique par teillage et par peignage (Figure 1A). la filature ainsi que le tissage, typiques de la filière textile, ne sont pas pris en compte car celles-ci sont peu recommandées pour le développement de semi-produits performants pour les biocomposites (Goutianos, Peijs et al. 2006). De plus, elles consomment une quantité forte d'énergie non renouvelable et sont très souvent effectués en Asie. L'extraction des fibres de lin est un procédé générant plusieurs produits et/ou coproduits. D'après (Labouze, Le Guern et al. 2007), la culture d'un hectare de lin produit 6650 kg de fibre rouies. Le teillage produit environ 1550 kg de fibre teillées, 365 kg de graines pour la production d'huile, 2960 kg d'anas et 850 kg d'étoupes utilisé pour le paillage agricole. À partir des fibres teillées, le peignage génère environ 1000kg de fibres peignées, 465 kg d'étoupes et 85 kg de déchets. Finalement les fibres peignées représentent environ 15% de la masse de la plante. La répartition des impacts environnementaux entre les différents coproduits est faite selon une affectation massique. Ce point sera rediscuté dans la section méthodologique.

La figure 1B présente un bilan environnemental multicritères de la production d'un kg de fibres de lin en comparaison d'un kg de fibres de verre.

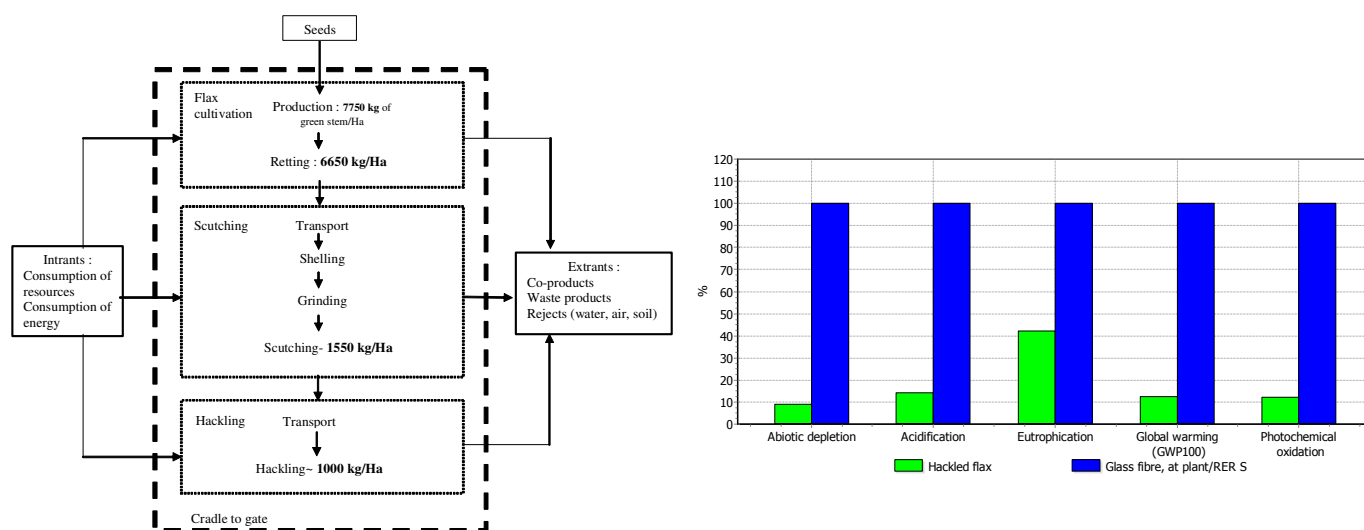


Figure 1 A Frontière du système analysé. B Bilan environnemental de la production de fibre de lin en comparaison de fibre de verre

La production de fibres de lin peignées réduit fortement quatre indicateurs environnementaux (acidification, déplétion des ressources abiotiques, changement climatique et oxydation photochimique) de l'ordre de 90% et 60% pour l'eutrophisation. Il est important de constater que la valeur de l'eutrophisation est nettement supérieure pour la production de fibre de verre alors que les résultats publiés en 2011 avec la version de l'inventaire Ecoinvent 1.2. (Le Duigou, Davies et al. 2011) démontraient l'inverse.

Ces observations peuvent être dues à une optimisation des inventaires ainsi qu'à une amélioration de la méthode de calcul. L'analyse exclusive des valeurs absolues s'avère ne pas être suffisante puisqu'elle maximise les incertitudes.

Il est possible, par analyse précise des données et leurs assemblages, d'évaluer la contribution de chacun des sous-process. Par exemple, la figure 2 présente la contribution de l'ensemble de flux entrants et sortants sur la consommation d'énergie non renouvelable lors de la production d'un kg de fibres de lin. La production des engrais « Triple Superphosphate » apparaît comme étant la plus impactante.

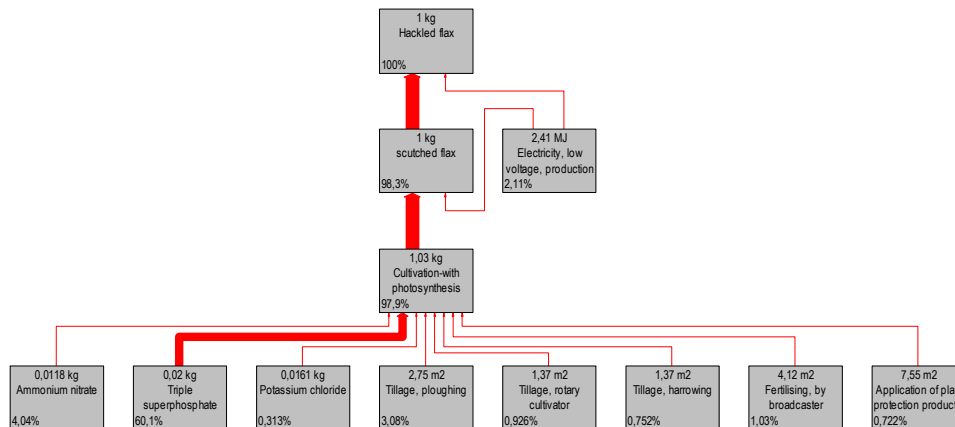


Figure 2 Contribution des sous-processus à la consommation d'énergie non renouvelable lors de la production d'un kilo de fibres de lin

Une des force de l'analyse de cycle de vie consiste donc à pouvoir mettre en avant les éléments les plus polluants. Le travail de l'éco-concepteur est de développer des solutions techniques en accord avec l'ACV comme par exemple, la conduite de culture en agriculture biologique.

2.2 Cycle de vie de biocomposites à usage navale (Le Duigou, Davies et al. 2012)

Dans ce paragraphe nous comparons les impacts environnementaux de deux matériaux composites aux renforts aléatoirement dispersés, le verre/polyester et lin/Poly(acide) lactique (PLA). Leur utilisation est envisagée pour une utilisation de mobilier d'intérieur de bateau de plaisance à voile (figure 3).



Figure 3 Photographie d'un voilier de plaisance auquel s'applique notre ACV

L'unité fonctionnelle appliquée dans le cas présent est : « un biocomposite mat de lin/PLA avec des propriétés mécaniques en traction identiques à celles des composites mat de verre /Polyester ». Les fractions volumiques sont fixées à environ 25% volumique ce qui est courant dans la construction de

navire de plaisance (Perrot 2006). Il est important de noter que qu'il n'est pas tenu compte de la durabilité des différents matériaux. Ce point est d'ailleurs discuté dans les travaux de Le Duigou *et al.* (Le Duigou, Davies et al. 2012).

Basé sur le cas de dimensionnement le plus défavorable, c'est à dire un critère de résistance mécanique équivalente, le flux de référence (quantité de matière) est évalué. Un surpoids de l'ordre de 22% est alors constaté pour les biocomposites. Il est important de noter que dans le cas d'un critère de rigidité les masses sont alors équivalentes.

Les frontières du système s'étendent sur l'ensemble du cycle de vie des deux pièces, c'est-à-dire de l'extraction des matières premières jusque la fin de vie (Figure 4A). La phase d'utilisation est exclue de la modélisation car celle-ci apparait, à priori, comme peu contributrice à l'ensemble du cycle de vie pour un voilier de plaisance. Deux scénarios de fin de vie sont présentés ici, un par enfouissement et l'autre par incinération (Figure 4B). Ces deux scénarios sont choisis car ils apparaissent comme les plus probables actuellement pour les composites verre/polyester.

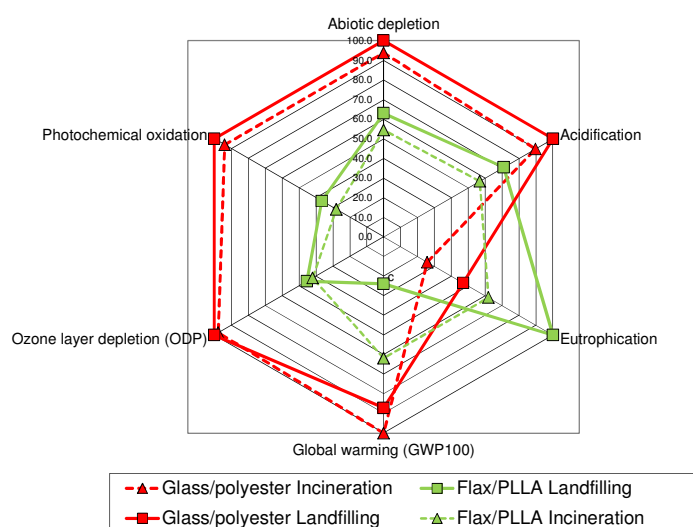
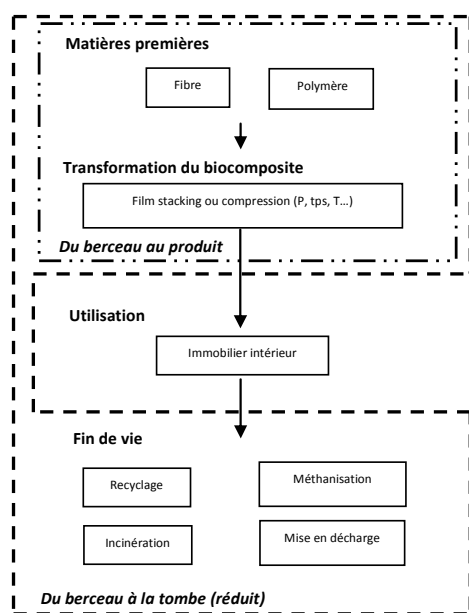


Figure 4 A Frontière du système analysé. B Analyse de cycle de vie de pièce en biocomposite PLA/lin en comparaison de pièce en polyester/verre

En comparaison des composites verre/polyester, les biocomposites PLA/lin possèdent globalement des impacts plus faibles (Figure 4B) sauf pour l'eutrophisation. Une analyse détaillée (non montrée ici) souligne la forte contribution de la production de PLA et la culture du maïs (production du biopolymère) associée à cet impact.

La fin de vie par incinération est plus favorable sur la plupart des indicateurs environnementaux par rapport à l'enfouissement, notamment pour les biocomposites. En effet, l'enfouissement génère une pollution forte via la production de lixiviats alors que l'incinération permet un gain énergétique important lié au pouvoir calorifique de chacun des constituants. A l'inverse des fibres végétales qui possèdent un pouvoir calorifique (PCI) positif, les fibres de verre sont incombustibles ce qui se traduit par un PCI inférieur à zéro.

Le recyclage des biocomposites suivi par la méthanisation et le compostage permettent de réduire durablement les impacts environnementaux. Ces scénarios permettent d'économiser de la matière première pour les cycles suivants (recyclage), de produire du gaz naturel (méthanisation), de produire un engrais susceptible de remplacer les engrais pétrochimiques (méthanisation et compostage) et enfin de stocker du CO₂ sur une longue période (recyclage, compostage et méthanisation).

3. MÉTHODOLOGIES SPECIFIQUES AUX COMPOSITES RENFORCÉS PAR DES FIBRES VÉGÉTALES (L'ADEME 2009)

3.1 Choix des indicateurs environnementaux

Les indicateurs environnementaux ou impacts sont rassemblés sous forme d'une méthode de calcul. Ces dernières traduisent les inventaires en impact via l'utilisation de facteur de caractérisation (exemple du pouvoir de réchauffement global (PRG) pour le changement climatique). Certaines méthodes comprennent plus de 10 indicateurs comme l'acidification, l'eutrophisation, le changement climatique, la dépletion des ressources abiotiques, toxicité humaine, toxicité aquatique, oxydation photochimique, utilisation des sols, consommation d'énergie non renouvelable...

Tous ces impacts n'ont pas le même intérêt suivant le cas analysé. De plus, le grand nombre d'impact peut s'avérer un frein à une communication claire. Toutefois, la norme ISO 14044 n'apporte pas de méthodologie spécifique pour choisir les indicateurs environnementaux les plus pertinents. Certains auteurs utilisent la liste fournie par Guinée *et al.* (Guinée, Gorée et al. 2001) même si finalement beaucoup d'articles scientifiques sur l'ACV de biopolymères (PLA, PHA et TPS) se focalisent seulement sur 1 ou 2 indicateurs comme le montre de récentes reviews (Hottle, Bilec et al. 2013; Yates and Barlow 2013). Quelques auteurs conservent les indicateurs grâce à leur fiabilité, leur représentativité des impacts potentiels et globalement aux recommandations de l'ADEME (Weiss, Patel et al. 2007; l'ADEME 2009; Vidal, Martínez et al. 2009; Le Duigou, Davies et al. 2011; Le Duigou, Davies et al. 2012).

3.2 Allocation des co-produits

Une récente directive européenne (Council 2008) propose de distinguer les déchets des co-produits lorsque les conditions suivantes sont remplies :

- (1) Il existe une utilisation définie de la substance ou de l'objet.
- (2) La substance ou l'objet intègre complètement un processus de production.
- (3) La substance ou l'objet peut être utilisé directement sans autre étape de production.
- (4) La substance ou l'objet ne produit aucun produit dangereux pour l'homme et son environnement.

Dans le cas de la production de fibres longues de lin, d'autres produits sont générés de manières conjointes et sont couramment utilisés dans diverses applications. Par exemple, la culture d'1 hectare de lin peut permettre de produire, mis à part les fibres longues pour le textile, 1000 panneaux intérieur de portière, 300 m² de paillage horticole, 200 kg de nourriture pour animaux, 100 litres d'huile (2010). La condition (1) est donc satisfaite. Comme le teillage et le peignage apparaissent en fin de production, il est donc impossible de ne pas co-produire des fibres courtes et des anas ce qui satisfait la condition (2). Les anas sont actuellement utilisés pour le paillage agricole. De nombreux projets de recherche visent, par ailleurs, à valoriser les anas dans des agro-bétons.

Les fibres courtes requièrent un cycle de thermo-compression pour former des intérieurs de portière. L'étape supplémentaire est donc limitée et en accord avec la condition (3). A la différence de fibres de verre, les fibres végétales ne sont pas considérées comme irritantes ainsi la condition (4) est satisfaite.

L'intégration des co-produits s'avère donc essentielle si l'on veut une analyse environnementale pertinente. Plusieurs moyens existent pour intégrer les co-produits dans la modélisation environnementale, comme par le ratio massique, économique ou énergétique. De précédents travaux ont montré l'influence du choix des allocations sur le calcul des impacts environnementaux notamment pour le cas de fibres de lin (Le Duigou, Davies et al. 2011). Le choix des allocations n'est pas consensuel. Ainsi certains précaunisent, lorsque l'objet (économique) de la culture est la

fibre, d'allouer économiquement cette (co)-production (Turunen and Van der Werf 2006). La fluctuation des prix suivant l'évolution des marchés reste toutefois un frein à son utilisation.

Par ailleurs, le SETAC propose d'allouer les co-produits de manière massique afin de modéliser au plus juste les flux de matière en restant proche de la notion de rendement et de relation de cause à effet (intrant-produit). L'ADEME favorise également un prorata massique sauf si l'écart entre allocation massique et économique est supérieur à 10.

Le plus sage étant de modéliser les deux modes d'allocations au sein d'une analyse de sensibilité et de discuter les variations.

3.3 Absorption et stockage du dioxyde de carbone

Le processus de photosynthèse permet la croissance des plantes via l'absorption de dioxyde de carbone atmosphérique et sa conversion en carbone (structure de la plante). La quantité de dioxyde de carbone biogénique séquestré est calculé selon l'équation suivante (Boutin, Flamin et al. 2005):

$$Q_{CO_2} = (Q_{DM} \times \%_c) \times \left(\frac{M_{CO_2}}{M_c} \right)$$

Avec Q_{CO_2} la quantité de CO_2 requise pour élaborer le squelette carboné de la plante sèche (Q_{DM}). $\%_c$ est le pourcentage de carbone contenu dans la plante (par exemple $\%_c = 45\%$ pour le lin (Sharma 1992)).

M_{CO_2} et M_c sont les masses molaires du CO_2 (44g/mol) et du carbone (12g/mol). Ainsi 1.65 kg de CO_2 biogénique sont séquestrés pour produire un kilo de fibre de lin.

Le stockage du CO_2 peut être temporaire ou durer un certain nombre de temps fonction de la durée du bioproduit et de sa fin de vie (incinération, compostage...). Ceci peut mener au développement d'un facteur incluant un crédit pour le stockage de dioxyde carbone. En l'absence de consensus sur ces calculs l'ADEME préconise de ne pas intégrer ces paramètres dans le calcul environnemental.

3.4 Utilisation des engrais et rotation des cultures

L'évaluation environnementale des bioproduits impose d'intégrer au plus juste la pratique agricole, au sens large, dans la production de plantes à fibres comme matière première de matériaux composites. En effet, il existe une variabilité forte des intrants (engrais par exemple) et des extrants (rendement et émissions diverses comme le protoxyde d'azote) liée au terroir, aux conditions pédoclimatiques, à la variété des plantes cultivées et au système de rotation de culture. Il est hautement conseillé de réaliser l'analyse environnementale sur des données représentatives de plusieurs années de cultures sur une même zone géographique. Concernant l'utilisation d'engrais et le système de rotation de culture, l'ADEME propose de tenir compte dans le bilan global de l'apport d'azote, des apports nutritifs cédés par les cultures précédentes et aux cultures suivantes. Cette méthodologie favorise donc les cultures de plantes, considérées comme bonne tête d'assolement, qui permettent de réduire durablement l'apport d'engrais pétrochimiques. Le lin fait partie de cette catégorie puisque son exploitation, dans un cycle de rotation conventionnel, d'accroître les rendements des cultures à posteriori.

4. DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE INTEGREE

La plupart des analyses de cycle de vie menées actuellement sont réalisées à postériori. Elles permettent d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit sur tout son cycle de vie N et surtout d'identifier les points critiques à améliorer. Ces éléments seront à intégrer par les ingénieurs dans une re-conception du produit au cycle N+1. C'est le cas de la pièce étudiée dans la section 2.2.

Pourtant, la définition de l'éco-conception est bien d'intégrer dès la phase de conception les paramètres environnementaux au même titre que les critères dimensionnants, le coût...

Les propriétés mécaniques et notamment les rigidités de matériaux composites peuvent être correctement estimés à l'aide de modèles micromécaniques basés sur les propriétés des constituants, leur fraction volumique et leur géométrie. Par exemple, l'utilisation du modèle d'Halpin-Tsai (Halpin and Kardos 1976) couplé à celui de Tsai-Pagano (Gibson 1994) permettent d'estimer le Module d'Young de composites élaborés par extrusion-injection dont les fibres sont aléatoirement dispersées (Le Duigou, Pillin et al. 2008). Le module d'Young des fibres, la fraction volumique et leur rapport d'aspect sont pris en compte.

En associant cette démarche aux critères de sélection de choix des matériaux d'Ashby (Ashby 1999) ainsi qu'à l'ACV (démarche multi-critères), on peut directement relier les propriétés des constituants, des matériaux composites et leurs impact environnementaux comme le montre la figure 5.

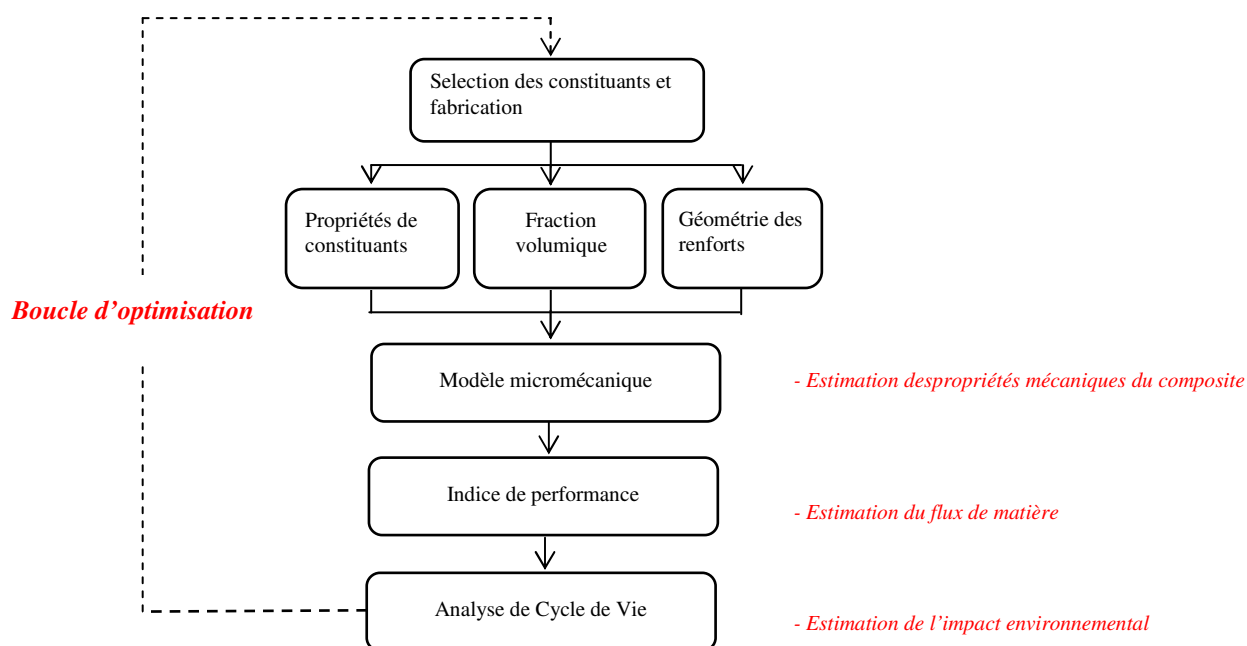


Figure 5 Description schématique d'une démarche intégrée d'ACV

Dans le cas d'une pièce automobile en PP/lin, avec une fonctionnalité définie par un même indice de performance en flexion ($E^{1/3}/\rho$) que le PP/verre, il est possible en utilisant la méthodologie d'ACV intégrée, de déterminer un taux de renfort optimisé de PP/lin d'environ 30% (figure 6).

Ce taux de fibre permet pour un même indice de performance en flexion que le PP/Verre (30% en masse) de minimiser l'ensemble des impact environnementaux. Le formulateur pourra donc se focaliser sur ce résultat pour mettre en œuvre son matériaux composite. Cette démarche permet un gain de temps. La démarche d'optimisation peut intégrer l'ensemble des paramètres utilisés dans le modèle micromécanique.

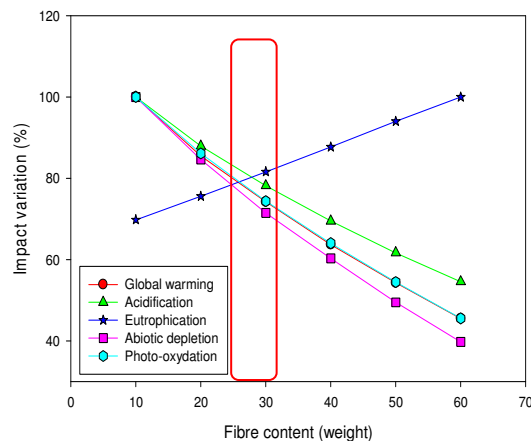


Figure 6 Evolution des impacts environnementaux du PP/lin en fonction du taux de fibre.

CONCLUSION

Le développement de matériaux composites renforcés par des fibres végétales répond se veut être une alternative verte aux composites conventionnelle d'origine pétrochimique. Toutefois, pour pérenniser leur développement et ne pas se fourvoyer dans le blanchiment écologique, l'utilisation d'une méthode d'analyse environnementale objective et normalisée est nécessaire.

Cette dernière, la plus performante à l'heure actuelle, est l'analyse de cycle de vie (ACV).

Les fibres végétales et notamment les fibres de lin sont compétitives mécaniquement pour remplacer les fibres de verre en tant que renforts des matériaux composites. D'un point de vue environnemental, elles présentent de nombreux avantages comme une réduction drastique de l'ensemble des indicateurs. Des efforts doivent cependant être entrepris pour raisonner les méthodes de culture.

Appliqué à l'échelle du composite l'ACV démontre que l'utilisation de biocomposites lin/PLA en remplacement de composites verre/polyester pour une application en ameublement de bateau apportent plusieurs bénéfices environnementaux. Le choix du critère dimensionnant et de la référence à substituer sont extrêmement importants. Ici un critère de raideur associé à une résistance équivalente aux composites verre/polyester implique un surpoids des biocomposites.

Le choix de la fin de vie (en lien avec le choix du matériaux) implique des différences d'impacts. Le recyclage est à privilégier tout comme les scénarios permettant de valoriser les produits générés (matière énergie...).

Le développement de bioproduits, parmi lesquels les biocomposites, requière des méthodologies environnementales particulières. Ces dernières sont encore loin de faire consensus auprès de la communauté scientifique ce qui implique une certaine prudence vis-à-vis des analyses purement quantitatives focalisées sur les valeurs absolues des impacts.

Les ACV sont quasi-systématiquement effectuées après la production des pièces ce qui permet d'améliorer les pièces de la production suivante. Une démarche intégrant la modélisation micromécanique, les indices de performance et l'ACV est proposée. Celle-ci induit un gain de temps puisqu'elle permet avant production d'optimiser les matériaux/pièces d'un point de vue environnemental en conservant une fonctionnalité similaire.

REFERENCES

- (2010). <http://www.lin.asso.fr>.
- Ashby, M. (1999). *Materials Selection in Mechanical Design*- 2nd edition.
- Bodros, E., I. Pillin, et al. (2007). "Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications?" *Composites Science and Technology* **67**(3-4): 462-470.
- Boutin, M., C. Flamin, et al. (2005). "Etude des caractéristiques environnementales du chanvre par l'analyse de son cycle de vie available at http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/chanvre_rapport_final_d235d.pdf."
- Council, E. p. a. (2008). " Directive 2008/98/EC of the european parliament and of the council on waste and repealing certain directives." *L* **312**: 3-30.
- Gibson, R. (1994). "Principle of composites material mechanics." *Mc Graw-hill International* (ed)- New-York.
- Goutianos, S., T. Peijs, et al. (2006). "Development of Flax Fibre based Textile Reinforcements for Composite Applications." *Applied Composite Materials* **13**(4): 199-215.
- Guinée, J., M. Gorée, et al. (2001). "Life cycle assessment : An operational guide to the ISO standards. Final report." Centre of environmental Science. Leiden University.
- Halpin, J. and J. Kardos (1976). "The Halpin-Tsai Equations: A review." *Polymer Engineering And Science* **16**(5).
- Hottle, T. A., M. M. Bilec, et al. (2013). "Sustainability assessments of bio-based polymers." *Polymer Degradation and Stability* **98**(9): 1898-1907.
- ISO-14044 (2006). Environmental Management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines.
- l'ADEME, B.-i. s. p. (2009). "Etude d'une méthodologie simplifiée pour la réalisation des ACV des bioproduits." www2.ademe.fr/servlet/getBin?name.
- Labouze, E., Y. Le Guern, et al. (2007). "Analyse de cycle de vie comparée d'une chemise en lin et d'une chemise en coton." *Bio intelligence Service Report*.
- Le Duigou, A., P. Davies , et al. (2011). "Environmental impact analysis of the production of flax fibres to be used as composite material reinforcement." *J. biobased. mater.bioenerg.* **5**: 1-13.
- Le Duigou, A., P. Davies , et al. (2012). "Replacement of glass/unsaturated polyester composites by flax/PLLA biocomposites : Is it justified ?" *J. biobased mater. bioenerg.* **5**(4): 466-482.
- Le Duigou, A., I. Pillin, et al. (2008). "Effect of recycling on mechanical behaviour of biocompostable flax/poly(l-lactide) composites." *Composite Part A* **39**(9): 1471-1478.
- Perrot, Y. (2006). "Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navales de plaisance." *PhD Thesis (In French)*.
- Sharma, H. S. S., Van Sumere, (1992). *The Biology and Processing of Flax*, M Publications, Northern Ireland.
- Turunen, L. and H. Van der Werf (2006). "Life Cycle Analysis of Hemp Textile Yarn, Comparison of three hemp fibre processing scenario and a flax scenario." *INRA Report*.
- Vidal, R., P. Martínez, et al. (2009). "Life cycle assessment of composite materials made of recycled thermoplastics combined with rice husks and cotton linters." *The International Journal of Life Cycle Assessment* **14**(1): 73-82.
- Weiss, M., M. Patel, et al. (2007). "Applying distance-to-target weighing methodology to evaluate the environmental performance of bio-based energy, fuels, and materials." *Resources, Conservation and Recycling* **50**(3): 260-281.
- Yates, M. R. and C. Y. Barlow (2013). "Life cycle assessments of biodegradable, commercial biopolymers—A critical review." *Resources, Conservation and Recycling* **78**(0): 54-66.