

## Matériaux d'origine végétale ou animale / Materials from vegetal or animal origin

# Analyse du cycle de vie d'un biocomposite

A. Le Duigou<sup>1</sup>, P. Davies<sup>2</sup> et C. Baley<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LIMATB (Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne), Université de Bretagne Sud,  
56321 Lorient Cedex, France  
e-mail : antoine.le-duigou@univ-ubs.fr ; christophe.baley@univ-ubs.fr

<sup>2</sup> IFREMER, Centre de Brest, Materials and Structures Group, 29280 Plouzané Cedex, France  
e-mail : peter.davies@ifremer.fr

### Mots-clés :

Biocomposites ; fibres végétales ;  
recyclage ; analyse de cycle de vie

**Résumé** – Outre l'impact sur le changement climatique généré par l'utilisation de ressources non renouvelables pour les activités humaines [1], l'épuisement des gisements de ressources fossiles est inéluctable. Un changement de manière de penser s'impose. Cet article présente l'analyse du cycle de vie d'un biocomposite fibres de lin/poly(L-Lactique) acide et d'un composite verre/polyester, de la fabrication en passant par la comparaison des propriétés mécaniques et la définition des épaisseurs équivalentes et sa fin de vie. L'impact environnemental global a été évalué grâce à un outil normalisé : l'Analyse de cycle de vie. Les biocomposites fibres de lin/PLLA, élaborés par film stacking, présentent des propriétés en traction comparables, à masse égale, à celles des composites verre/polyester notamment en ce qui concerne la rigidité. Outre le fait d'être compostables, les biocomposites fibres de lin/PLLA sont recyclables en fin d'usage. Enfin, l'impact du cycle de vie d'un biocomposite lin/PLLA est nettement inférieur à celui du composite verre/polyester pour les mêmes fonctions mécaniques. Le recyclage des biocomposites en fin d'usage permet de séquestrer la totalité du carbone présent dans le matériau et d'économiser les matières premières. La méthanisation permet une valorisation énergétique par l'intermédiaire de la production de biogaz et permet de séquestrer une partie du carbone inclus dans le biocomposite.

### Key words:

Biocomposites; vegetal fibres;  
recycling; life cycle analysis

**Abstract – Life cycle analysis of a Flax/PLLA biocomposite.** In addition to the impact on climate change resulting from the use of non renewable resources [1], the depletion of existing fossil fuel sources is inevitable. A major change of strategy is required. This article presents an analysis of a Flax fibre/PLLA biocomposite life cycle compared to common glass fibre reinforced polyester composites from manufacturing to mechanical design and end-of-life. Environmental impacts have been assessed by Standardized method called Life Cycle Analysis (ISO 14044). Flax fibre/PLLA biocomposites manufactured by film stacking have, for similar mass, tensile modulus close to that of Glass/Polyester. Besides being compostable at end of life, biocomposites have been proved to be recyclable which makes it possible to keep the whole carbon content and save primary resources. Methanization is another end of life scenario for biocomposites that enable biogas synthesis as well as carbon sequestration.

Depuis plus d'un siècle, le développement de notre société est basé sur un modèle économique s'appuyant très fortement sur les énergies fossiles pour satisfaire ses besoins. Pourtant ce modèle est loin d'être pérenne. Outre l'impact sur le changement climatique généré par l'utilisation de ressources non renouvelables pour les activités humaines [1], l'épuisement des gisements de ressources fossiles est par ailleurs inéluctable. Un changement de manière de penser s'impose, notamment pour les concepteurs. L'éco-conception, appuyée par des outils globaux et multicritères comme l'Analyse de cycle de vie (ACV), peut leur permettre d'intégrer le facteur environnemental dès la conception. L'approche est à appliquer sur tout le cycle de vie (« du berceau à la tombe ») du produit.

Aujourd'hui les matériaux composites verre/polyester sont très largement utilisés dans la construction de bateaux de plaisance grâce à leurs propriétés mécaniques spécifiques. Ces matériaux ne sont pas issus de ressources renouvelables alors que, lors de leur transformation, ils peuvent émettre des

composés organiques volatils (COV). De plus, à l'heure actuelle, il n'existe aucune solution économiquement rentable pour les retraiter lors de leur fin de vie.

Les travaux présentés s'inscrivent dans un projet de recherche pour disposer demain d'une solution alternative aux composites verre/polyester pour une utilisation en environnement marin. Cette alternative consiste à développer des matériaux biocomposites, élaborés avec une matrice biopolymère et de biofibres de renforts tous deux compostables et issus de ressources renouvelables [2].

Ce texte présente une comparaison du cycle de vie d'un biocomposite fibre de lin/poly(L-lactique) acide et d'un composite verre/polyester. L'étude comprend l'analyse des performances mécaniques en traction, la fin de vie par recyclage et l'évaluation environnementale.

## Matériaux et méthodes

Les fibres de renforts utilisées sont des fibres de lin sélectionnées et cultivées en Normandie (variété Alizée). Les tiges de lin ont d'abord subi un rouissage au sol (pour faciliter l'extraction des fibres) puis des traitements mécaniques de teillage et de peignage. Les fibres sont ensuite coupées (10 mm de longueur) puis organisées sous forme de mat (fibres aléatoirement dispersées dans le plan de stratification) par un procédé papetier.

Le poly(L-Lactique) acide (PLLA) est un biopolymère issu de la fermentation d'amidon de maïs. Il est recyclable et compostable en fin de vie. Il est utilisé ici comme matrice des biocomposites. Le PLLA est utilisé sous forme de film fin d'environ 200  $\mu\text{m}$  d'épaisseur.

La technique de mise en forme des biocomposites est le film stacking. Il s'agit de la compression à chaud de l'empilement de films de PLLA et de mats de lin (Fig. 1). Les paramètres, comme la température ( $T_{\text{transformation}} = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), la pression appliquée (20 bars), le temps, sont contrôlés pour optimiser l'imprégnation, le taux de porosité, maîtriser la fraction volumique de renfort.

En parallèle, des composites à matrice polyester insaturé renforcés par des mats de verre sont réalisés avec des fractions volumiques équivalentes. L'imprégnation s'effectue par voie humide alors que la consolidation est réalisée sous presse avec une pression de 20 Bars et une température de

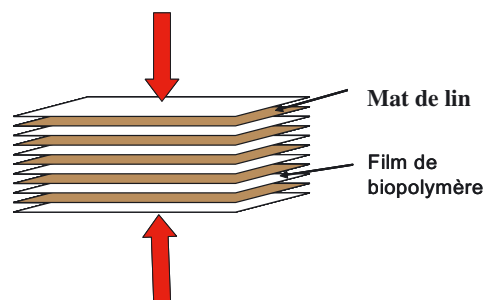


Fig. 1. Schéma du principe du film stacking.

Fig. 1. Schematic view of film stacking processing route.

80  $^{\circ}\text{C}$  pendant 45 min. Les plaques de composites sont ensuite étuvées à 50  $^{\circ}\text{C}$  pendant 12 h pour s'assurer que la réticulation est complète. L'épaisseur des composites est de 3 mm.

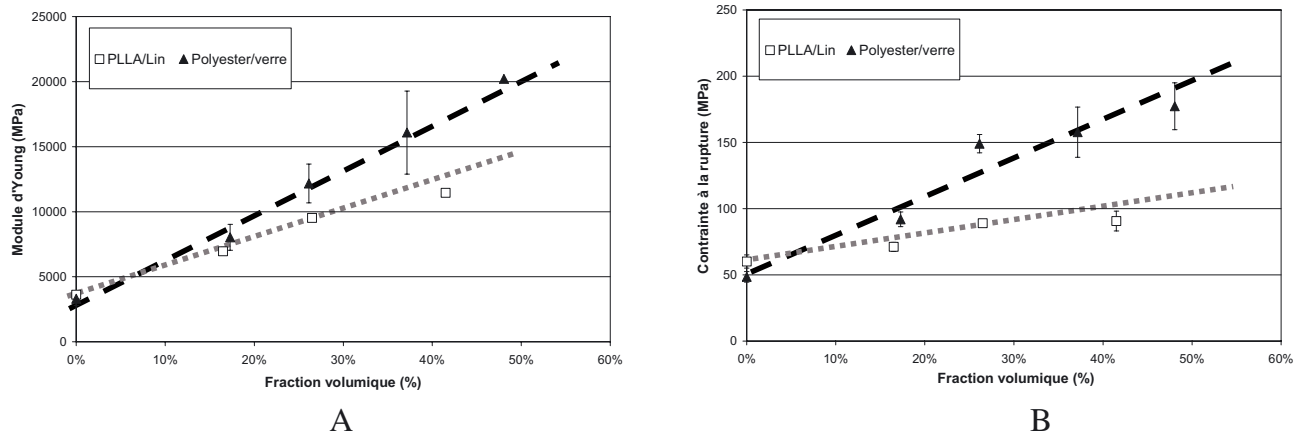
## Résultats

### Comparaison des propriétés mécaniques en traction des composites

Figures 2A et B présentent les propriétés mécaniques en traction en fonction de la fraction volumique de renfort des biocomposites pour une sollicitation en traction (pointillés gris). Celles-ci sont comparées aux propriétés des composites verre/polyester (traits discontinus noirs).

Les biocomposites présentent des modules de Young proches de ceux des composites verre/polyester grâce aux bonnes propriétés des fibres de lin sélectionnées ( $E_{\text{fl Lin}} = 65,8 \pm 38\text{ GPa}$  et  $\sigma = 1454 \pm 835\text{ MPa}$  [3];  $E_{\text{fl Verre}} = 72\text{ GPa}$  et  $\sigma = 2000\text{ MPa}$  [4]). Par ailleurs, les fibres de lin possèdent une densité nettement plus faible que celle de la fibre de verre (1,54 contre 2,55) ce qui confère aux biocomposites une densité plus faible (1,31 contre 1,57 pour une fraction volumique de 26,5 %).

Dans le cas d'un dimensionnement d'une structure avec un critère de déplacement en traction, les biocomposites lin/PLLA seront de bons candidats de substitution des composites verre/polyester. Pour une fraction volumique de 26,5 % (couramment utilisée en construction navale de plaisance) et dans le but d'avoir les mêmes raideurs que les composites verre/polyester, les biocomposites devront avoir une épaisseur de 3,8 mm (contre 3 mm pour les composites). Une plaque en biocomposite pèsera 4,98  $\text{kg/m}^2$  contre 4,71  $\text{kg/m}^2$  pour le



**Fig. 2. Module de Young (A) et contrainte à la rupture (B) en traction en fonction du taux volumique de fibre pour les biocomposites mat de lin/PLLA et les composites polyester/verre.**

*Fig. 2. Young modulus (A) and tensile strength (B) as a function of fibre volumic fraction for Flax/PLLA biocomposite and glass polyester composites.*

composite verre/polyester soit une augmentation de masse de 6 %.

Figure 2B présente l'évolution des contraintes à ruptures des biocomposites et des composites verre/polyester. Les biocomposites ont des résistances à la rupture plus faibles notamment lorsque le taux de renfort augmente. Le Duigou et al. [5] ont pourtant montré que l'adhérence fibre de lin/PLLA (résistance de la liaison fibre/matrice au cisaillement) est du même ordre de grandeur que celle des fibres de verre/polyester. Ainsi les différences de résistance peuvent s'expliquer par la différence de longueur de renfort entre les deux matériaux ( $L_{\text{fibre biocomposite}} \approx 10 \text{ mm}$  alors que  $L_{\text{fibre composite}} \approx 70 \text{ mm}$ ) mais aussi par l'endommagement des fibres de lin lors de la fabrication (mat et composite).

Dans le cas d'un dimensionnement d'une structure en biocomposite basé sur un critère de résistance, une modification de la géométrie de la pièce en biocomposite lin/PLLA est également nécessaire pour pouvoir supporter les mêmes contraintes que les composites verre/polyester. Les biocomposites devront avoir une épaisseur de 4,3 mm (contre 3 mm pour les composites verre/polyester). Une plaque en biocomposite dimensionnée pèsera alors  $5,63 \text{ kg/m}^2$  contre  $4,71 \text{ kg/m}^2$  pour le composite verre/polyester soit une augmentation de masse de 22 %. Ces modifications des quantités de matière seront intégrées lors de l'analyse de cycle de vie.

Enfin, pour des pièces exposées à un environnement agressif, il serait nécessaire de tenir compte de l'évolution des propriétés des composites lors d'un vieillissement en milieu marin [6].

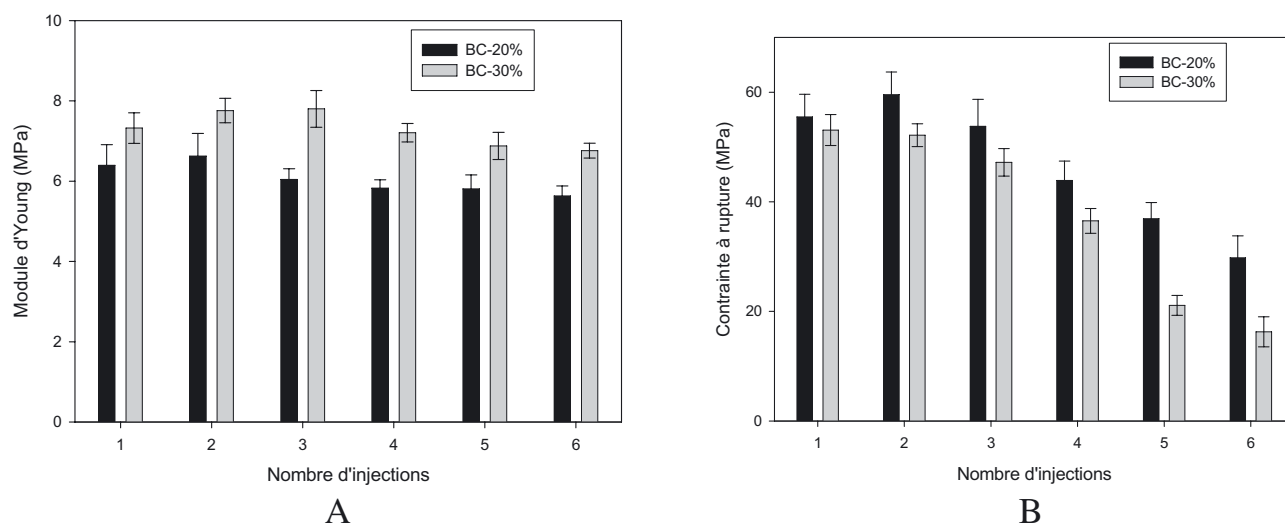
### Propriétés supplémentaires des biocomposites : le recyclage

Les biocomposites lin/PLLA sont compostables en fin de vie [7]. Néanmoins, l'un des intérêts des biocomposites à matrice thermoplastique par rapport aux composites verre/polyester est de permettre une gestion de fin de vie plus diversifiée. Ainsi l'analyse de la recyclabilité a été réalisée sur des biocomposites lin/PLLA mis en forme par moulage par injection [8]. Les fractions volumiques de renfort sont 16,5 et 26,5 % correspondant à 20 et 30 % en masse. Les propriétés mécaniques (Figs. 3A et B) sont suivies après chaque cycle d'injection.

Les résultats mettent en avant une faible évolution du module de Young du biocomposite lors du recyclage mécanique (Fig. 3A). Le rapport d'aspect des fibres (longueur divisée par la largeur), qui est un paramètre prépondérant dans les mécanismes de transfert de charges, varie peu lors des cycles successifs [8]. En effet, dans la plante, les fibres de lin sont organisées en faisceaux. Durant les injections, la longueur des fibres sera réduite alors que les faisceaux de fibre seront divisés permettant également de diminuer le diamètre du renfort. De plus, la rigidité de la matrice PLLA varie peu lors des injections successives [9].

Figure 3B souligne la baisse de la contrainte à rupture des biocomposites notamment après 3 cycles d'injection. La dégradation de la matrice peut expliquer cette tendance.

Bien que les biocomposites se fragilisent lors du recyclage, ils conservent des



**Fig. 3. A** Évolution du module de Young (A) et de la contrainte à rupture en fonction du nombre de cycles d'injection.  
 Fig. 3. A Evolution of Young modulus (A) and tensile strength as a function of injection cycles.

propriétés intéressantes après les 3 premiers cycles d'injection. Il est par ailleurs important de garder à l'esprit que dans une situation industrielle, la matière recyclée sera mélangée à de la matière non recyclée.

#### Évaluation de l'impact environnemental du cycle de vie d'un biocomposite et d'un composite verre/polyester

L'analyse de Cycle de Vie (ACV) doit être menée en raisonnant par rapport à une fonction, à un besoin, à un service rendu. La norme ISO 14040 définit l'unité fonctionnelle comme « la performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une ACV ». Il s'agit de raisonner à service rendu identique. Les biocomposites et les composites verre/polyester sont donc évalués pour des propriétés mécaniques en traction identiques pour une fraction volumique de 26,5 %. L'étape de dimensionnement des éprouvettes a souligné la nécessité de considérer, dans le cas le plus défavorable, 22 % de matière de plus pour le biocomposite pour posséder des propriétés de résistance à la rupture identiques aux composites verre/polyester. Ainsi pour 1 kg de composite verre/polyester, 1,22 kg de biocomposite lin/PLLA sera évalué.

Les renforts évalués sont les fibres de lin sélectionnées. Les données sont issues des travaux de Labouze et al. [10]. La valorisation des coproduits (graines...) est prise en compte par un système d'allocation massique. *EcoInvent* est utilisé comme base de

données pour les fibres de verre. La matrice étudiée est le PLLA, les données sont celles issues des travaux de Vink et al. [11,12]. Une attention particulière est prise concernant les sources d'énergies. Les certificats de compensations d'énergie éolienne et les évolutions potentielles des modes de production du PLLA ne sont pas pris en compte. Les données pour la résine polyester insaturée sont issues d'*EcoInvent*.

Deux méthodes de calcul sont utilisées pour calculer les impacts environnementaux : « CML 2000 », dont les résultats sont présentés sous forme de graphique Radar, et « Cumulative Energy Demand », sous forme de tableaux. L'étude environnementale se divise en deux parties, la première partie évalue l'impact de la production (« du berceau au produit »). La seconde traite du cycle de vie entier avec des biocomposites en comparaison de composites verre/polyester (« du berceau à la tombe »).

#### Du berceau au produit

Cette analyse est une étape vers l'analyse de cycle complet. Elle permet de mettre en avant l'impact lié à la production des matériaux. Le périmètre de l'étude « Du berceau au produit » comprend la culture, l'extraction et les transports pour le renfort. La consommation énergétique et les rejets de dioxyde de carbone sont pris en compte pour la fabrication du mat de lin. Pour le PLLA, l'extraction des matières premières, la transformation et le transport sont pris en compte. Les paramètres de mise en œuvre (temps, température...) sont inclus dans l'analyse

à travers la consommation énergétique des appareils utilisés (presse à plateaux chauffants). Figure 4 présente la comparaison des impacts environnementaux pour la production de biocomposite PLLA/lin et composite verre/polyester.

L'analyse des neuf indicateurs environnementaux donne un net avantage au biocomposite. On observe que deux indicateurs sont supérieurs pour les biocomposites (eutrophisation et écotoxicité marine). Il s'agit d'indicateurs de pollutions locales liées à la culture du maïs et du lin. La résine PLLA est majoritairement (87 %) responsable de l'eutrophisation alors que les renforts ne représentent que 7 % et le transport 6 %. La réduction des impacts environnementaux pour la production de biocomposites devra s'opérer par une réduction de l'impact du PLLA. Une solution consisterait à augmenter le taux de fibre pour réduire la part de PLLA et donc l'impact qui lui est attribué.

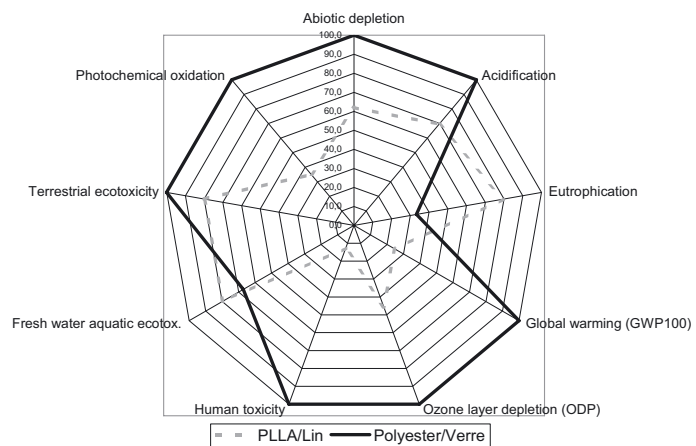
### Du berceau à la tombe

Dans cette analyse, l'ensemble du cycle de vie est pris en compte. Les hypothèses et sources suivantes sont utilisées.

Le scénario de fin de vie *par incinération* tient compte d'une récupération d'énergie fonction du pouvoir calorifique des constituants. La simulation est basée sur les données suivantes :

- la capacité calorifique du PLLA est de 18 MJ/kg [13];
- la capacité calorifique du lin est de 14 MJ/kg et est considéré égale à celle des fibres de jonc de chine (China reed) [14];
- la capacité calorifique de la résine polyester est comprise entre 26,6 et 31,1 MJ/kg [15]. Elle sera arbitrairement fixée à 30 MJ/kg;
- la capacité calorifique des fibres de verre est de -1,7 MJ/kg [16];
- le CO<sub>2</sub> capté pendant la photosynthèse (croissance du lin et du maïs) est libéré durant l'incinération soit 1,8 kg de CO<sub>2</sub>/kg de fibres.

Le caractère pétrochimique de la résine polyester lui confère une capacité calorifique élevée en comparaison du PLLA et des fibres de lin. Les fibres de verre « coûtent » de l'énergie durant l'incinération. La capacité de récupération d'énergie dépend de la densité, de la composition chimique et du taux d'humidité du matériau.



**Fig. 4. Comparaison des impacts environnementaux pour la production de biocomposite PLLA/lin et composite verre/polyester.**

*Fig. 4. Comparison of environmental impacts for Flax/PLLA biocomposite and glass/polyester production.*

Pour le recyclage, les hypothèses suivantes sont réalisées :

- le rendement du recyclage est de 90 %.

La mise en décharge (sans récupération de gaz) requiert également des hypothèses : en moyenne, 65 % du carbone contenu dans le biocomposite est transformé en gaz (32,5 % de méthane et 32,5 % de dioxyde de carbone) [17, 18]. Le reste est séquestré par la biomasse.

Le scénario de digestion anaérobie fait l'hypothèse qu'en moyenne 65 % du carbone contenu dans le biocomposite est transformé en méthane (en moyenne 42,5 %), en dioxyde de carbone (en moyenne 23,5 %) et est valorisé sous forme de biogaz [19]. Le reste est séquestré par la biomasse. Les autres données prises en compte sont :

- la consommation énergétique pour faire fonctionner le digesteur est de 27,23 W h/kg d'électricité et 93 kJ/kg de fioul [20];
- la digestion anaérobie de 1 kg de PLLA produit 0,84 m<sup>3</sup> de biogaz [13];
- la digestion anaérobie de biomasse lignocellulosique comme les fibres végétales produit environ 0,6 m<sup>3</sup>/kg [21].

*Le scénario de compost (aérobie).*

D'après les travaux de l'Agence de protection environnementale américaine [17], dans des conditions de compostage (présence d'oxygène = aérobie), on peut considérer la production de méthane comme négligeable. Ainsi 65 % du carbone contenu dans le biocomposite sera réémis sous forme de CO<sub>2</sub> [18], le reste est stocké sous forme de biomasse. L'impact du compost sur le sol

**Tableau 1. Consommation énergétique non renouvelable/UF – De l'extraction de matière première à la fin de vie.***Table 1. Consumption of non-renewable energy/UF – From primary resources extraction to end of life.*

Scénarios	Consommation énergétique non renouvelable (MJ/UF)		
	Énergie fossile	Énergie nucléaire	Total
Lin/PLLA mise en décharge	51	25,7	76,7
Lin/PLLA recyclage	21,9	60,5	82,4
Lin/PLLA incinération	45,4	-34,5	10,9
Lin/PLLA compost	51,6	26,3	77,9
Lin/PLLA méthanisation	45,5	-38,3	7,2
Verre/polyester mise en décharge	84,9	59,4	144,3
Verre/polyester incinération	79,6	1,75	82,3

n'est pas pris en compte même si théoriquement celui-ci apporte des nutriments. L'analyse ne tient pas compte d'azote relargué au cours du processus de méthanisation.

Le tableau 1 présente la consommation énergétique non renouvelable pour les biocomposites et les composites verre/polyester en fonction des scénarios de fin de vie. La consommation énergétique non renouvelable en France est divisée en énergie fossile (gaz, pétrole, charbon) et en énergie nucléaire. Des scénarios d'incinération et de mise en décharge sont considérés plausibles pour les composites verre/polyester.

Les résultats obtenus soulignent que, dans tous les cas, les biocomposites consomment moins d'énergie que les composites verre/polyester. En effet les fibres de lin ne requièrent que peu d'énergie (environ 11,7 MJ/kg) pour être produites grâce aux mécanismes de photosynthèse alors que les fibres de verre, mises en œuvre à 1180 °C, ont besoin de davantage d'énergie non renouvelable (~50 MJ/kg). De plus la production de PLLA consomme deux fois moins d'énergie non renouvelable que celle de la résine polyester (58,3 contre 123,3 MJ/kg) [22].

Concernant les scénarios de fin de vie, il est intéressant de souligner que l'incinération est plus favorable aux biocomposites qu'aux composites verre/polyester du fait du caractère incombustible des fibres de verre. Les valeurs négatives obtenues pour les biocomposites sont expliquées par la récupération d'énergie liée au pouvoir calorifique des constituants. La fin de vie par mise en décharge modifie peu la consommation énergétique des deux matériaux.

Les biocomposites sont compostables [7] et recyclables. Il est donc intéressant d'évaluer d'autres scénarios de fin de vie. Le recyclage s'avère intéressant même s'il requiert de l'énergie pour retraiter la matière

(broyage). La méthanisation peut s'avérer également avantageuse car une valorisation des biogaz émis (CH<sub>4</sub>) sous forme d'énergie est effectuée et comptabilisée dans le bilan énergétique (valeur négative).

Les résultats présentés sur la figure 5 montrent l'effet du scénario de fin de vie sur les indicateurs environnementaux pour les biocomposites en comparaison des composites verre/polyester selon l'unité fonctionnelle établie.

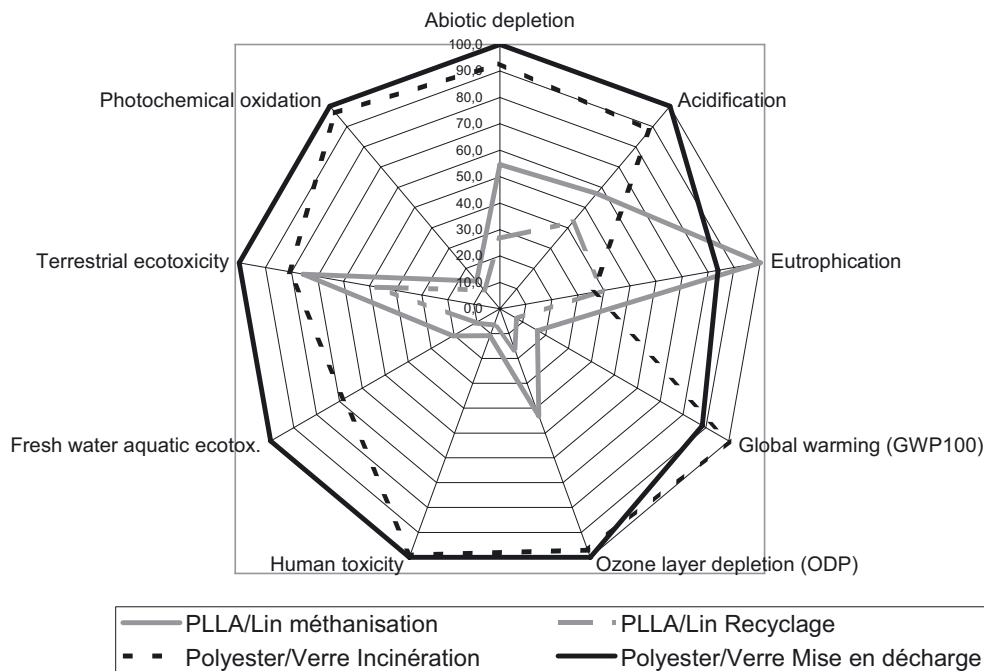
Tout d'abord, on observe que les biocomposites présentent un impact global nettement inférieur à ceux des composites verre/polyester quelque soit la fin de vie évaluée.

La méthanisation des biocomposites est une solution intéressante car elle permet à la fois une séquestration du carbone sous forme de biomasse (baisse de l'indice « Global warming ») et une économie de l'énergie utilisée et des impacts liés.

D'après la figure 5, le recyclage est le choix à privilégier. Il permet d'accroître la durée de vie de la matière et donc de stocker le carbone absorbé lors de la photosynthèse. De plus il réduit fortement la consommation de matières premières. Dans ce cas l'approche est plus du type « du berceau au berceau » que « du berceau à la tombe ». Les deux méthodes de calcul (CML 2000 et Cumulative Energy Demand) soulignent l'intérêt environnemental des biocomposites. Le recyclage apparaît comme le scénario de fin de vie à privilégier même si la consommation énergétique est non négligeable. Dans ce sens la réutilisation demeure la meilleure solution.

## Conclusion

Cet article présente l'analyse du cycle de vie d'un biocomposite lin/poly(L-Lactique)



**Fig. 5. Comparaison des impacts environnementaux sur tout le cycle de vie de biocomposite PLLA/lin et composite verre/polyester en fonction des scénarios de fin de vie.**

*Fig. 5. Comparison of environmental impacts for flax/PLLA biocomposite and glass/polyester life cycle in function of the end of life scenarii.*

acide et d'un composite verre/polyester, de la fabrication en passant par la comparaison des propriétés mécaniques et la définition des épaisseurs équivalentes et sa fin de vie. L'impact environnemental global a été évalué grâce à un outil normalisé, l'analyse de cycle de vie.

Les biocomposites lin/PLLA, élaborés par film stacking, présentent des propriétés en traction comparables à masse égale celles des composites verre/polyester notamment en ce qui concerne la rigidité. L'optimisation de leurs performances passe obligatoirement par une meilleure compréhension des mécanismes de renforcement d'un polymère par des fibres végétales.

Outre le fait d'être compostables, les biocomposites lin/PLLA présentent l'aptitude d'être recyclables en fin d'usage. En effet les cycles d'injection affectent peu leurs propriétés élastiques.

Enfin, l'impact du cycle de vie d'un biocomposite lin/PLLA est nettement inférieur à celui du composite verre/polyester pour les mêmes fonctions mécaniques. Le recyclage des biocomposites en fin d'usage possible (le PLLA est une matrice thermoplastique) permet de séquestrer la totalité du carbone présent dans le matériau et d'économiser les matières premières. La méthanisation permet une valorisation énergétique par l'intermédiaire de la production de biogaz et

permet de séquestrer une partie du carbone inclus dans le biocomposite.

## Références

- [1] IPCC, Climate change 2001: Working group: The scientific basis <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/index.htm>, 2001, p. 98
- [2] C. Baley, Y. Grohens, I. Pillin, *Revue des composites et des matériaux avancés* **14** (2004) 135-166
- [3] K. Charlet, C. Baley, C. Morvan, J.P. Jernot, M. Gomina, J. Bréard, *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.* **38** (2007) 1912-1921
- [4] D. Guillon, *Technique de l'ingénieur* **A2** (1995) 110
- [5] A. Le Duigou, P. Davies, C. Baley, *Comp. Sci. Tech.* **70** (2010) 231-239
- [6] A. Le Duigou, P. Davies, C. Baley, *Polymer Degradation and Stability* **94** (2009) 1151-1162
- [7] C. Baley, Y. Grohens, I. Pillin, *Revue des composites et des matériaux avancés* **14** (2004) 135-166
- [8] A. Le Duigou, I. Pillin, A. Bourmaud, P. Davies, C. Baley, *Composites Part A* **39** (2008) 1471-1478
- [9] I. Pillin, N. Montrelay, A. Bourmaud, Y. Grohens, *Polymer Degradation and Stability* **93** (2008) 321-328
- [10] E. Labouze, Y. Le Guern, C. Petiot, Analyse de cycle de vie comparée d'une chemise en lin et d'une chemise en coton, Rapport Bio Intelligence Service, 2007
- [11] E.T.H. Vink, K.R. Rábago, D.A. Glassner, P.R. Gruber, *Polymer Degradation and Stability* **80** (2003) 403-419

- [12] E. Vink, D. Glassner, J. Kolstad, R. Wooley, R. O'connor, *Ind. Biotech.* **3** (2007) 58-81
- [13] A. Detzel, M. Krüger, Life Cycle Assessment of POLYLACTIDE (PLA)- A comparison of food packaging made from NatureWorks® PLA and alternative materials, <http://www.natureworkslc.com/news-and-events/press-releases/2007/7-2-07-new-eco-profile.aspx>, 2006
- [14] T. Corbière-Nicollier, B. Gfeller Laban, L. Lundquist, Y. Leterrier, J.-A.E. Månson, O. Jolliet, *Resource Conservative Recycling* **33** (2001) 267-287
- [15] T. Curlee, S. Das, Impacts of post consumer plastics waste on the management of municipal solid waste, in *Plastic waste, Management, control, recycling and disposal*, N.d. Corporation, Éditor, 1991, US Environmental Protection Agency, pp. 422-428
- [16] X. Xu, K. Jayaraman, C. Morin, N. Pecqueux, *J. Mater. Process. Tech.* **198** (2008) 168-177
- [17] Agency-USA EP, Solid Waste Management and Greenhouse Gases. A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, Environment Protection Agency-USA, 2006
- [18] S. Barrington, D. Choinière, M. Trigui, W. Knight, *Bioresource Technology* **83** (2002) 189-194
- [19] S. Frederic, <http://www.methanisation.info/valorisation.html>, Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, INRA
- [20] S. Kim, B. Dale, L. Drzal, M. Misra, *J. Biobased Mater. Bioenergy* **2** (2008) 85-93
- [21] EDF, Document EDF-La biomasse : production d'électricité, in [http://www.edf.com/html/lille3000/pdf/lille3000\\_biomasse.pdf](http://www.edf.com/html/lille3000/pdf/lille3000_biomasse.pdf)
- [22] A. Le Duigou, G. Jouanne, Y. Grohens, P. Davies, C. Baley, *Int. J. Life Cycle Assessment* (2009) submitted