

2022

GUIDE DU RECYCLAGE ET DE L'ÉCOCONCEPTION DES COMPOSITES

LIVRET GREC





➤ *Disponible en téléchargement sur le site de l'ADEME :
<https://librairie.ademe.fr>*

Les contenus sont extraits du rapport technique (2022) réalisé par :

- IPC : Romain AGOGUE, Wassim MEDDEB, Margaux GLAIS, Lucas AINE
- CETIM : Benoit COURTEMANCHE, Pierre MADEC, Frédéric RUCH, Aurélie ZIMMERMANN, Thomas LE BRUN, Aurélien MILLER
- IFTH : Jean-Charles FONTANIER

SOMMAIRE

Contexte	p.4
L'intérêt d'associer recyclage et écoconception	p.6

01 QU'EST-CE QUE LES COMPOSITES ? p.7

> De quoi sont-ils constitués ?	p.7
> Coût et performances : des critères de sélection	p.8
> Quelques repères sur le marché des composites	p.9

02 REVALORISER LES COMPOSITES USAGÉS : AVEC QUELS GISEMENTS ? p.10

03 DES OPPORTUNITÉS POUR VALORISER LES DÉCHETS COMPOSITES p.12

> Gestion des déchets : comprendre la réglementation	p.13
> Solutions techniques	p.14
• Le réemploi	p.18
• La réutilisation	p.21
• Le recyclage	p.23
• La valorisation énergétique	p.28
• Le stockage	p.32

04 L'INNOVATION : DES TECHNOLOGIES ÉMERGENTES p.33

> Développement de nouveaux procédés	p.33
> Les résines thermoplastiques par voie liquide	p.34
> Vers des résines thermodurcissables recyclables	p.34

05 ENTRER DANS LA DÉMARCHE D'ÉCOCONCEPTION DES COMPOSITES p.36

> S'appuyer sur les ACV ou sur l'ACV simplifiée	p.37
> Exemple de résultats d'ACV	p.38
> Repères : comparer solutions classiques et pistes alternatives	p.40

Conclusions	p.41
Bibliographie	p.44
Lexique	p.45

Contexte

Le projet d'édition du **Guide pour le Recyclage et l'Ecoconception des Composites** (GREC) est issu d'une réflexion commune aux trois Centres Techniques Industriels français actifs dans le domaine des Composites que sont le Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM), l'Institut Français du Textile et de l'Habillement (IFTH) et le Centre Technique Industriel de la Plasturgie et des Composites (IPC). Tous trois, forts leur expérience respective aux contacts des industriels du secteur, ont constaté :

- Un accroissement de la pression réglementaire régissant la fin de vie des produits, objets et bien de consommation. Par exemple, l'« arrêté du 22 juin 2020 portant modification des prescriptions relatives aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent » dont l'article 20 exige qu'« après le 1^{er} janvier 2024, 95 % de [la masse totale d'une éolienne soit] réutilisable ou recyclable »
- Le besoin de la prise en compte de la fin de vie des produits en composites tant au niveau du développement de nouveaux matériaux, de nouveau procédés de mise en forme, et de la conception de pièces
- La volonté des industriels du composite d'inscrire leur activité dans une dynamique d'économie circulaire et de minimiser les externalités négatives relatives à leur production et à l'usage de leurs produits
- Une forte demande de l'Etat de travailler de concert sur la thématique des composites

L'initiative du présent projet, piloté par IPC, est donc commune aux trois centres techniques industriels actifs dans le domaine des composites.

Pour la première fois, CETIM / IFTH / IPC se proposent de collaborer étroitement afin d'aider ensemble tous les industriels faisant appel à cette classe de matériaux.

« Légers et résistants, les composites représentent un atout bas carbone pour des secteurs comme la mobilité, l'énergie ou le bâtiment. Leur croissance soutenue s'accompagne d'une production toujours plus importante de déchets qu'il va falloir recycler ce qui représente un véritable défi pour des matériaux réputés difficilement recyclables.

Le guide du recyclage et de l'écoconception des composites tombe à point nommé. Il est de nature à accélérer l'approche économie circulaire au sein de la filière des composites qui s'investit pleinement dans ce domaine ».

Jean MARTIN, Directeur Général de Polyvia

« Les propriétés uniques des composites en font un matériau incontournable de l'industrie nautique et confèrent aux bateaux de plaisance une longévité exceptionnelle. Après avoir mis en place la première filière au monde de déconstruction des bateaux en fin de vie dans le cadre de la responsabilité élargie des producteurs (REP), l'industrie nautique française est résolument engagée dans une démarche d'économie circulaire. Nous sommes heureux d'avoir pu participer activement à la réalisation de ce guide, qui constitue un socle précieux pour faire émerger des solutions individuelles et collectives d'éco-conception et de recyclage ».

Jean-Paul Chapeleau, Président de la FIN

« L'objectif d'IPC est d'aider nos industriels à accroître leur compétitivité sur les marchés internationaux, grâce à des produits respectueux de l'environnement, éco-conçus, plus légers, mais aussi à forte valeur ajoutée : innovants, connectés, « intelligents ». Ce Guide pour le Recyclage et l'Ecoconception des Composites constitue une première étape importante pour la mise en place de solutions aux défis techniques du recyclage des composites, respectant les contraintes économiques et réglementaires dans ce domaine. J'ai la certitude que les équipes d'IPC et de nos partenaires ont toutes les compétences pour apporter des solutions très concrètes à nos industriels ».

Etienne Bechet de Balan, président d'IPC

« La capacité à proposer une approche globale intégrant les aspects environnementaux constitue un enjeu majeur du développement de l'industrie française dans les années à venir, ainsi qu'un levier incontournable de la relocalisation de nos moyens de production. La démarche et les outils de l'éco-conception doivent permettre aux composites de réaliser les gains attendus en allègement des structures et amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes, tout en assurant une cohérence avec les objectifs de diminution de leurs propres impacts ».

Daniel Richet, Directeur Général du CETIM

« Les composites offrent un champ considérable d'innovations pour apporter des solutions aux entreprises et répondre aux enjeux climatiques et de développement durable. Ce guide préparé conjointement entre l'IFTH, le CETIM, IPC, l'ADEME, Polyvia et APER/FIN permet aux industriels de s'engager résolument dans une démarche d'éco-conception qui doit être structurante et qui doit diffuser dans l'ensemble des organisations. Ce guide apporte des réponses également aux problèmes aigus de recyclage. Une belle collaboration au service de nos filières et des entreprises ».

Clarisse Reille, Directrice Générale d'IFTH

L'INTÉRÊT D'ASSOCIER RECYCLAGE ET ÉCOCONCEPTION

Dans la lutte contre le changement climatique, tous les industriels oeuvrent à proposer des solutions pour décarboner. Parmi les leviers envisagés, l'allégement et l'allongement de la durée de vie des produits.

À cet égard, **les composites présentent des atouts considérables** : la conjonction de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur légèreté unique les rend particulièrement attractifs dans la conception de véhicules (trains, avions, automobiles, bateaux), de sources d'énergie renouvelable (éoliennes, énergie marine), de bâtiments (panneaux, tubes, coques), d'articles de sports et loisirs ou encore de biens de consommation.

Ils sont également incontournables dans la transition énergétique : à titre d'exemple, sans eux, il n'est aujourd'hui pas possible de développer des technologies bas-carbone pour les transports à hydrogène ou pour construire des éoliennes.

Néanmoins le bénéfice environnemental des composites se heurte à l'impact de leur gestion en fin de vie, finissant principalement en valorisation énergétique ou en enfouissement. Elle doit alors être repensée dès la conception, au regard de la diversité d'autres solutions existantes : **réemploi, réutilisation et recyclage**.

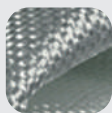
Des entreprises développent ainsi de nouveaux modèles économiques qui ont une réduction de l'impact environnemental. Poussés par la volonté grandissante des industriels d'engager une dynamique d'économie circulaire, **IFTH, CETIM et IPC** allient leurs compétences pour les accompagner dans cette démarche.

1 QU'EST-CE QUE LES COMPOSITES ?

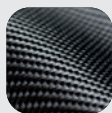
À défaut d'une définition réglementaire spécifique, les matériaux composites peuvent être décrits de la façon suivante : « produits solides comportant au moins deux phases distinctes comprenant un matériau de liaison (matrice), et un matériau sous forme particulière ou fibreuse ».

DE QUOI SONT-ILS CONSTITUÉS ?

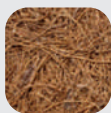
PRINCIPALES FIBRES



Fibres de verre
Plus de 85% des volumes composites produits



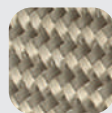
Fibres de carbone
associées à plus de 70% à des résines époxy



Fibres naturelles
Bois, lin, chanvre...



Fibres d'Aramide
(Kevlar)

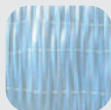


Fibres de Basalte

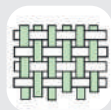
PRINCIPALES ARCHITECTURES



Mats / Fibres coupées



Tissus unidirectionnels



Tissus multiaxiaux
taffetas, sergé, satin...

PRINCIPALES MATRICES

Polyester
Vinylester
Epoxy
Polyuréthane
Phénoliques

Polyamide
Polypropylène
PEEK
PPS
PEI

Matrices thermodurcissables (TD)

Résines qui durcissent lors de la mise en forme devenant non fusibles, non solubles (au moins 70% des composites produits)

Matrices thermoplastiques (TP)

Résines qui peuvent être mises en forme plusieurs fois

COÛT ET PERFORMANCES : DES CRITÈRES DE SELECTION

Le coût et les performances des composites varient d'une résine à l'autre.

FAMILLE	NATURE DE RÉSINE	TENUE THERMIQUE (MAXI EN CONTINU)	TENUE CHIMIQUE	PRIX DE LA RÉSINE ORDRE DE GRANDEUR ANNÉE 2017
TD	Polyester standard	80 °C	Faible à moyenne	2 à 4 €/kg
TD	Vinylester	100 à 140 °C	Très bonne	4 à 8 €/kg
TD	Epoxy	120 à 200 °C	Très bonne	6 à 15 €/kg (>15 : résine aéro)
TD	Polyimide	200 à 300 °C	Bonne	>50 €/kg
TP	Polypropylène	80 °C	Excellente	1
TP	Polyuréthane TP	80 °C	Moyenne	4
TP	Polyamide 12	110 °C	Bonne	5
TP	Polyamide 6 et 66	150 °C	Bonne (mais sensible à l'humidité)	3
TP	PEI	180 °C	Moyenne	15
TP	PPS	200 °C	Bonne	9
TP	PEEK	300 °C	Très bonne	>40

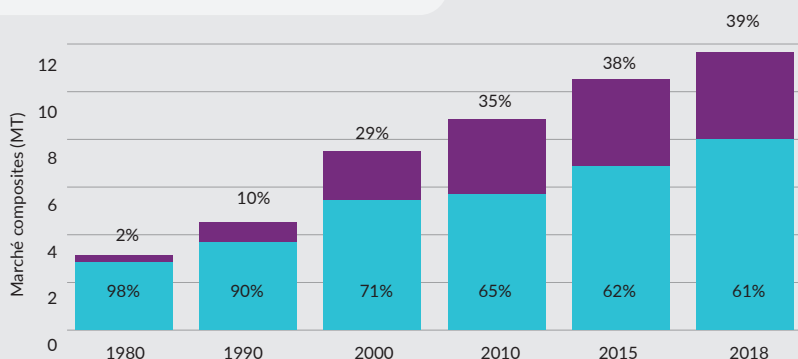
ORIGINE	NATURE DE FIBRES	MODULE D'ÉLASTICITÉ GPA	LIMITE EN RUPTURE MPa	ALLONGEMENT %	DENSITÉ FIBRE G/CM3	GAMME DE PRIX (EUR/KG)
Pétrosourcé	Verre E	73	2500	4	2,54	2
Pétrosourcé	Carbone Haute Résistance	>230	>3500	1,5	1,80	15 - 25
Pétrosourcé	Carbone Haut Module	>350	>2500	0,5	1,85	>100
Pétrosourcé	Aramide	124	>2500	2,5	1,45	15 - 20
Biosourcé	Chanvre	70	550 - 900	1,6	1,4 - 1,6	-
Biosourcé	Lin	30-80	345 - 1500	1,2 - 3,2	1,4 - 1,5	6 - 10

QUELQUES REPÈRES SUR LE MARCHÉ DES COMPOSITES

En 2019, la taille du **marché mondial des composites** est estimée à **89,04 milliards USD**. Avant la crise sanitaire, une croissance avec un taux annuel de **+7,6 %** de 2020 à 2027 était envisagée.

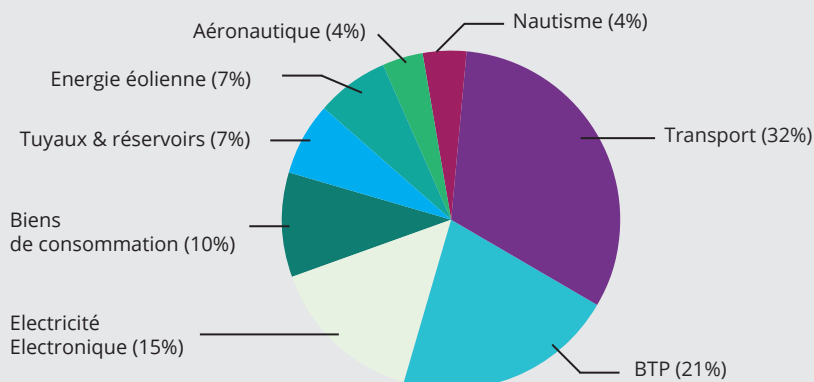
Evolution des parts de marché des matériaux thermoplastiques entre 1980 et 2018

Crédit CETIM



Une étude publiée par **JEC Group** en 2017 [1], structure le marché mondial des composites en huit segments principaux : le transport, le BTP, l'électricité et l'électronique, les biens de consommation, les tuyaux et réservoirs, l'énergie éolienne, l'aéronautique et le nautisme.

Part de marché par segment [2]



Ces chiffres sont susceptibles de varier selon les sources.

2 REVALORISER LES COMPOSITES USAGÉS : AVEC QUELS GISEMENTS ?

Sur la base d'un recoupement de données issues de diverses études, il est possible de donner une estimation des gisements de déchets composites sur la période 2022 – 2040 et d'identifier les principaux verrous associés au recyclage des composites.

Parmi les filières avec des gisements à fort potentiel :

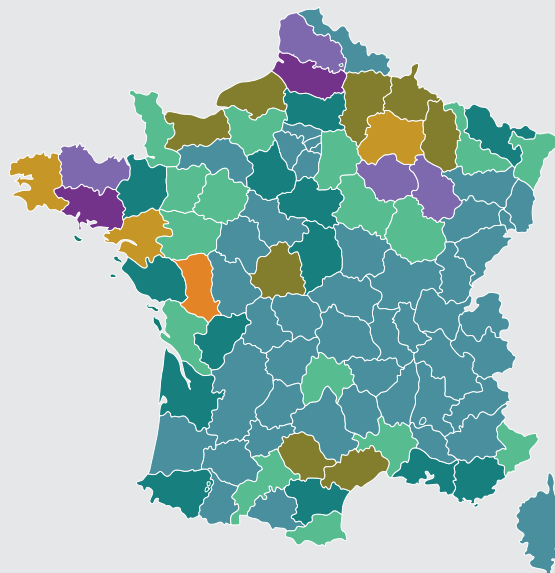
- > Le nautisme de plaisance
- > Les déchets industriels
- > L'éolien
- > Les articles de sports et loisirs (ASL)
- > Les poids lourds
- > L'aéronautique

FOCUS : le marché aéronautique...

Le marché aéronautique présente un intérêt fort, avec une structuration de la filière sur le territoire et un gisement de composites constitué majoritairement de fibres de carbone.

On estime une croissance dans les prochaines années qui le porterait à 7800 t en 2050 (contre 4 100 t en 2015). Le gisement européen représente une opportunité pour le marché français. Il devrait se répartir entre un nombre limité d'acteurs européens, notamment Tarmac Aerosave, un leader européen sur le stockage d'appareils et leader mondial pour le démantèlement et la revalorisation des appareils et moteurs, dont les actionnaires sont Airbus (33,6 %), Safran (32,8 %) et Suez (33,6 %).

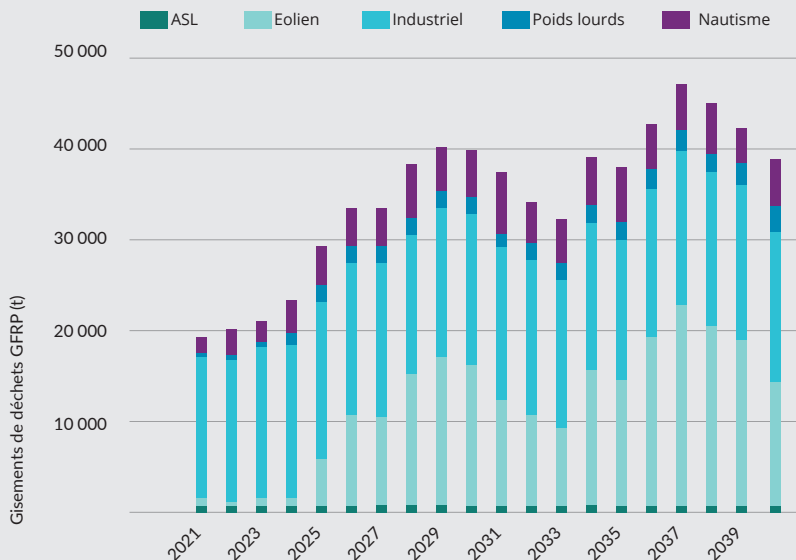
**Gisement de composites à fibres de verre
(GFRP) post-consommateur en 2021
hors aéronautique**



< 130 130 - 270 270 - 400 400 - 530 530 - 670 670 - 800 800 - 930 930 - 1070

Données extraites du guide pour le recyclage et l'écoconception des composites - rapport technique

**Gisement de déchets composites
hors aéronautique à l'échelle nationale**



Données extraites du guide pour le recyclage et l'écoconception des composites - rapport technique

3 DES OPPORTUNITÉS POUR VALORISER LES DÉCHETS DES COMPOSITES

TECHNOLOGIE	AVANTAGES	LIMITES	INDICATION DE COÛTS ¹
Réemploi	Utilisation de l'intégralité du matériau	Coût de transport pour des pièces de grande envergure	Variable suivant application
Réutilisation	- Possibilité de valorisation de l'assemblé du matériau - Large spectre d'utilisation pour les produits non-consolidés	- Nécessité d'intégrer des étapes complémentaires de transformation du matériau ou de la matière - Solution souvent limitée à des applications de niche	Variable suivant application
Recyclage mécanique	- Faible coût de mise en oeuvre - Recyclage intégral du matériau composite - Versatilité du procédé - Capacité à traiter de grande quantité de matériaux	- Détérioration des propriétés mécaniques des fibres - Valorisation limitée des produits - Forte compétition avec les charges naturelles (dans le cas des composites TD)	Inférieur à 4,5 €/Kg ^[1]
Recyclage thermique	- Procédé compatible pour le traitement d'assemblage multi matériaux - Possibilité de réutilisation de l'ensemble des produits et sous-produits générés - Procédé avantageux pour le traitement des fibres de carbone (préservation de l'intégrité et des propriétés des fibres) - Possibilité de revaloriser les huiles de pyrolyse pour une valorisation énergétique ou une revalorisation matière - Coût énergétique du traitement inférieur à la fabrication de fibres vierges	- Coût de mise en oeuvre - Production de gaz (CO et CO2) - Détérioré les propriétés des fibres de verre	De l'ordre de 11 - 17 €/Kg ^[1]
Recyclage chimique	- Conservation des propriétés mécaniques d'usage et longueur des fibres traitées permettant leur revalorisation pour le carbone - Procédé avantageux pour le traitement des fibres de carbone (préservation de l'intégrité et des propriétés des fibres) - Possibilité de valoriser les produits et sous-produits générés - Coût énergétique du traitement inférieur à la fabrication de fibres vierges	- Coût de mise en oeuvre - Utilisation de solvant pouvant présenter des risques de toxicité et une gestion de fin de vie - Détérioré les propriétés de la fibre de verre	De l'ordre de 11 - 17 €/Kg ^[1]
Valorisation énergétique	- Faible coût de mise en oeuvre - Recyclage intégral du matériau composite - Valorisation possible de l'ensemble des produits générés (cendres et fibres)	- Production de gaz (CO et CO2) - Faible pouvoir calorifique inférieur des composites - Usure prématurée des broyeurs due au caractère abrasif des fibres de verre	0,16 €/Kg
Stockage	Coût d'enfouissement faible	- Pollution de l'environnement - Interdiction progressive pour le stockage des matières plastiques - Hausse des coûts de stockage à prévoir et de la Taxe Générale sur les Activités Polluantes (TGAP)	0,12 - 0,18 €/Kg (TGAP incluses)

1-Les montants indiqués dans ce tableau sont extraits d'une publication dans le JEC Observer. Ils sont issus d'estimations, permettant d'évaluer l'attractivité relative des différentes solutions.

Le coût énergétique des procédés est à la fois un indicateur de l'impact environnemental des solutions de revalorisation des matériaux et un indicateur économique. La comparaison s'effectue entre une solution de revalorisation et la fabrication d'une fibre vierge.

FIBRE CONCERNÉE	PROCÉDÉ	COÛT ÉNERGÉTIQUE (MJ/KG)	SOURCES
Carbone	Fabrication	200 - 600	[3] [4]
	Recyclage mécanique	0,3 - 2	[5]
	Pyrolyse	3 - 30	[6] [7]
	Solvolyse	19,2	[8]
	Lit fluidisé	7,7	[9]
Verre	Fabrication	14 - 35	[1]

Coût énergétique pour l'obtention de fibres de carbone avec différentes techniques de recyclage ou de fabrication

GESTION DES DÉCHETS : COMPRENDRE LA RÉGLEMENTATION...

La directive cadre déchets n°2008/98/CE du 19 novembre 2008 établit un cadre juridique pour le traitement des déchets, au sein de la Communauté Européenne. Elle donne également les concepts et définitions de base relatifs à la gestion des déchets et développe un principe appelé « Responsabilité Élargie du Producteur » (REP).

De plus en plus de secteurs industriels utilisant des composites sont soumis à des REP. Les metteurs sur le marché sont considérés responsables de l'ensemble du cycle de vie d'un produit, de sa conception jusqu'à sa fin de vie. En France, la loi AGECE (2020) annonce une accélération du changement de modèle de production et de consommation afin de limiter les déchets et préserver les ressources. Elle transforme en profondeur le système d'organisation des filières REP : il ne s'agit plus seulement de traiter les déchets générés, mais en premier lieu de les prévenir.

Hierarchisation réglementaire de la gestion des déchets [2]

PRÉVENTION

RÉUTILISATION

RECYCLAGE

AUTRES VALORISATIONS
DONT ÉNERGÉTIQUE

ÉLIMINATION AVEC
ENFOUISSEMENT

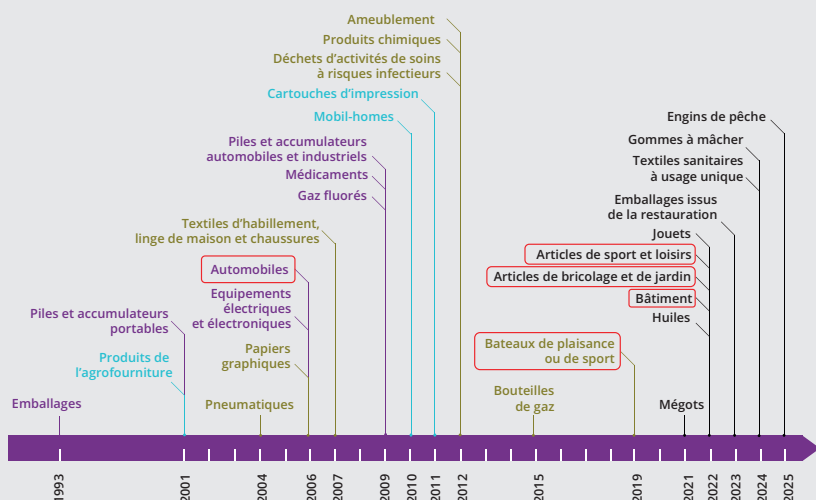


Les objectifs fixés pour les différentes REP sont les suivants :

- > Economiser les ressources en **développant le recyclage** de certains déchets et augmenter la performance de recyclage de ces déchets
- > Décharger les collectivités territoriales de tout ou partie des coûts de gestion des déchets et **transférer le financement du contribuable vers le consommateur**
- > Internaliser dans le prix de vente du produit neuf les coûts de gestion de ce produit une fois usagé afin d'inciter les fabricants à **s'engager dans une démarche d'écoconception**
- > **Allonger la durée de vie d'un produit**, en mettant en avant l'écoconception des produits, la réparation et le réemploi

Filière REP et date de mise en oeuvre opérationnelle

En rouge, les filières où les matériaux composites sont présents [10]



A tall, white, three-bladed wind turbine stands on a lush green field. The sky is a clear, vibrant blue. The turbine's tower is segmented and tapers slightly. The blades are long and narrow, with one blade pointing upwards and the other two angled downwards. A purple rectangular box with rounded corners is positioned on the right side of the image, containing white text.

SOLUTIONS TECHNIQUES

ÉTUDES DE CAS

SOLUTIONS TECHNIQUES

On désigne ici par « solution technique », une technologie disponible sur le marché pour le recyclage des matériaux composites.

Les études de cas vont permettre d'apprécier les différentes solutions techniques adoptées et voir ce que signifie précisément, au regard de la loi :

> LE RÉEMPLOI

> LA RÉUTILISATION

> LE RECYCLAGE

Recyclage mécanique

Recyclage thermique

Recyclage chimique

> LA VALORISATION ÉNERGÉTIQUE

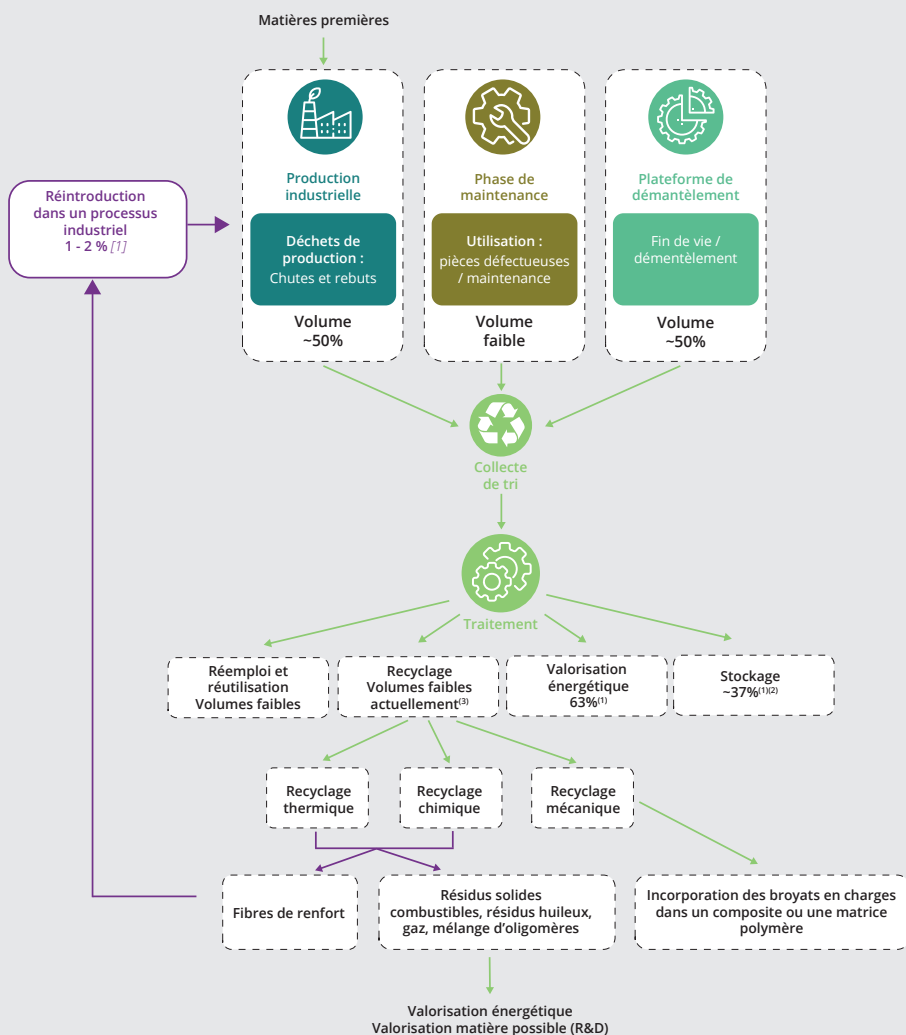
Combustible Solide de Récupération (CSR)

Incinération

> LE STOCKAGE



Cycle de vie des composites



⁽¹⁾ Sur la base du retour d'expérience sur la filière nautique

⁽²⁾ L'arrêt progressif du stockage va rendre progressivement impossible l'enfouissement de composites

⁽³⁾ Recyclage : les volumes sont faibles mais le potentiel de développement est important, poussé par l'évolution de la législation

3.1 SOLUTION TECHNIQUE

LE RÉEMPLOI

CE QUE DIT LA LOI



L'article L. 541-1-1 du code de l'environnement précise que le réemploi concerne « toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus ».

Le réemploi est sans aucun doute la solution la plus vertueuse pour qu'un produit puisse conserver une utilisation similaire et éviter un reclassement dans la catégorie des déchets. Il s'agit là de la première et la plus simple des solutions pour la gestion de fin de vie des matériaux composites.

À titre d'exemple, le réemploi d'éolienne est aujourd'hui largement mis en pratique notamment lors du remplacement des structures pour des raisons économiques (fin de subvention, licence d'exploitation, coût d'entretien, etc...). Ainsi, après de nombreux contrôles de qualité et de sécurité, la durée de vie des pales d'éoliennes peut être prolongée avec une remise en service dans un marché de seconde main.

La notion de réemploi peut également être utilisée dans le cadre de l'utilisation de coproduits pouvant être issus de chutes ou rebuts de production. Dans ce contexte, différentes entreprises françaises telles que Lavoisier Composites réemploient des coproduits composites issus de la filière aéronautique européenne pour la fabrication de nouveaux matériaux destinés entre autres au secteur de l'horlogerie de luxe. De la même façon, la startup Hopper réemploie des semi-produits à base de fibres de carbone issus des lignes de production de l'A350 et initialement destinés au rebut, pour la fabrication de lames de course.

Exemples de réemploi de semi-produits composites par l'entreprise Lavoisier Composites (à droite) et la société Hopper (à gauche)



ÉTUDE
DE CAS

SOCIÉTÉ : APPLY CARBON

Marché(s) : Automobile, coating, renfort cimentaire, impression 3D, textiles techniques

Concept : Apply Carbon est spécialisé dans la coupe de précision et le broyage de fibres techniques (carbone et aramide) mais propose également une gamme de fibres suréensimées utilisées comme matériau de renfort dans les thermoplastiques.

Matériaux traités en entrée : Fibres de carbone/aramide sèches. Apply Carbon collecte directement les résidus de carbone auprès des fabricants de matière, tissus et utilisateurs.

Produits vendus : Fibres broyées (75 à 300 µm), fibres coupées (300µm à 120mm), fibres surensimées et coupées (6mm)

MATÉRIAUX : CFRP

Maturité : Echelle industrielle TRL 9

Production : Jusqu'à 2000 t fibres/an



Modèle économique : Le modèle économique d'Apply Carbon est basé sur la reprise de matières premières / déchets industriels et leur valorisation par broyage et découpe. La capacité de production de plus de 1000 tonnes de carbone broyé par an permet à Apply Carbon de rester très compétitif grâce à des coûts de production maîtrisés.

Réduction de l'impact environnemental : Les techniques de broyage et découpe permettent de proposer des solutions en matière de déchets industriels et de déchets de carbone en fin de vie. Par ailleurs, l'utilisation de fibres de carbone recyclées vis-à-vis de fibres de premier choix tend à diminuer l'empreinte carbone des matériaux.

Contact : contact@apply-carbon.fr, +33 (0)2 97 65 10 89

ÉTUDE
DE CAS

SOCIÉTÉ : HOPPER

MATÉRIAUX : CFRP / GFRP

Marché(s) : Handisport

Maturité : Commerciale TRL 9

Volume réemploi : Actuellement 350 kg/an

Concept : Hopper réemploi des semi-produits à base de fibres de carbone issus des lignes de production de l'A350 et initialement destinés au rebut, pour la fabrication de lames de course.

Matériaux traités en entrée : Fin de bobines de préimprégnés therm durcissables à base de fibres de carbone et fibres de verre (dans une moindre mesure)

Produits vendus : Lames de course disponibles d'ici le printemps 2022.



Modèle économique : Hopper vise à promouvoir l'innovation et la durabilité en proposant des solutions performantes à moindre coût pour rendre le sport et la mobilité accessibles à tous.

Réduction de l'impact environnemental : A travers le réemploi de semi-produits préimprégnés, Hopper limite la mise en rebut/stockage de matériaux à haute valeur ajoutée dont le potentiel d'utilisation en tant que structure composite reste intact.

Contact : direction@hopper-accessibility.com

ÉTUDE
DE CAS

SOCIÉTÉ : LAVOISIER COMPOSITES

MATÉRIAUX : CFRP

Marché(s) : Pièces d'espect (luxe, hifi, automobile, aéronautique) et pièces de structures.

Maturité : Technologie disponible

Capacité de production : Séries > 15000 pc dès 2022

Concept : Lavoisier Composites développe des pièces composites à partir de sous-produits de la filière composite. Lavoisier Composites maîtrise l'ensemble de la chaîne de fabrication : conception, process et mise en oeuvre pour la fourniture de pièces moulées.

Matériaux traités : Sous-produits de préimprégnés therm durcissables (non réticulés) et thermoplastiques disposant d'une traçabilité.

Produits vendus : Développement et fabrication de pièces composites associant performances mécaniques et environnementales pour des applications d'aspect et de structure.



Modèle économique : Lavoisier Composites crée de la valeur par la sélection et la transformation de sous-produits en pièces à haute valeur ajoutée. Le passage à des moyens de production adaptés à des séries intermédiaires permettra d'être compétitif par rapport aux procédés d'usinage du titane et de l'aluminium.

Réduction de l'impact environnemental : L'utilisation de matières telles que Carbonium® à base de sous-produits permet une réduction de l'impact environnemental de 40 à 50% par rapport à des matériaux équivalents issus de matières premières vierges.

Contact : bonjour@lavoisier-composites.com, +33 (0)4 81 68 11 67

3.2 SOLUTION TECHNIQUE

LA RÉUTILISATION

CE QUE DIT LA LOI



La réutilisation s'identifie d'un point de vue réglementaire comme « toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau ».

La réutilisation est également l'une des voies les plus vertueuses pour la revalorisation des matières catégorisées en tant que déchets.

Dans ce cadre, il est donc possible de trouver diverses matières et matériaux issus de pièces en fin de vie dont la structure peut être réadaptée pour d'autres applications.



ÉTUDE
DE CAS

SOCIÉTÉ : BATHÔ

MATÉRIAUX : GFRP

Marché(s) : Tourisme, particuliers, entreprises, commerces, collectivités

Maturité : 25 bateaux/an ; 100 bateaux en 2023

Concept : Economie circulaire de déchets composites par le réemploi, ayant la capacité de créer un écosystème de partenaires (collectivités, industriels...)

Matériaux traités en entrée : Bateau en polyester fibrés de 6 à 16m.

Produits vendus : Gîtes et hébergements insolites sur terre ferme appelés "Bathôs" (bateau-hôtellerie), salles de réunions d'entreprises, aires de jeux pour enfants.



Modèle économique : 70% des coûts de main d'oeuvre (combinée avec une activité de formation). Statut Économie Sociale et Solidaire. Modèle économique basé sur la vente des Bathôs et travaux en cours pour vendre un usage (économie de la fonctionnalité).

Réduction de l'impact environnemental : Economie de ressources dans la fabrication d'hébergements insolites dont les murs, toit et fonctions existent déjà. Evite la destruction d'un matériau non recyclable. Aucun impact de construction au sol.

Contact : contact@batho.fr, +33 (0)2 40 40 20 12

ÉTUDE
DE CAS

SOCIÉTÉ : RECYCLING-CARBON

MATÉRIAUX : CFRP

Marché(s) : Tous marché - focalisé sur la fibre de carbone

Maturité : variable suivant maturité du projet client

Concept : Les solutions proposées sont des analyses de faisabilité technico-économique, spécifiques à chaque client, ayant pour principe l'un des 4 piliers : écoconception ; réparation ; upcycling et recyclage.

Matériaux traités : Les matériaux proposés en entrée sont des produits clients en fin de vie, de chutes de production ou de retours SAV, uniquement en fibres de carbone.

Produits vendus : Analyse de faisabilité, par exemple :

- Réemploi pour la structure d'un drone
- Vélo cargo à partir de chutes de production



Modèle économique : Recycling-Carbon est une association à but non lucratif. Il existe également une activité de consulting. Différents consultants sont actifs dans l'écosystème Recycling-Carbon.

Réduction de l'impact environnemental : La réduction de l'impact environnemental est au coeur de l'action de Recycling-Carbon. Les 4 piliers de l'association sont tous orientés en faveur de l'économie circulaire.

Contact : contact@recycling-carbon.org

3.3 SOLUTION TECHNIQUE

LE RECYCLAGE

CE QUE DIT LA LOI



L'article L. 541-1-1 du code de l'environnement définit le recyclage par « toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opération de recyclage ».

Le recyclage des composites renforcés de fibres peut être réalisé de différentes façons notamment en termes de procédés et de technologies.

Ainsi, plusieurs voies de traitement sont accessibles parmi lesquels les procédés mécaniques, thermiques et chimiques sont les plus avancés en termes de maturité technologique.

Le choix de la méthodologie de recyclage va ainsi dépendre de la nature des différents constituants du matériau que ce soit la matrice (thermoplastique ou thermodurcissable), le renfort (fibres de verre, carbone, autres) ou encore l'application visée pour l'utilisation du recyclat.

LE RECYCLAGE MÉCANIQUE

Le recyclage mécanique est potentiellement la méthode de traitement des composites la plus économique car elle autorise le recyclage de l'intégralité du matériau traité. Le processus de traitement passe généralement par une réduction initiale de la taille des déchets composites. La phase principale intervient ensuite dans un broyeur à haute vitesse dans lequel le matériau est débité en éléments plus fins allant typiquement de 10 mm à des particules micronisées de moins de 50 μm .

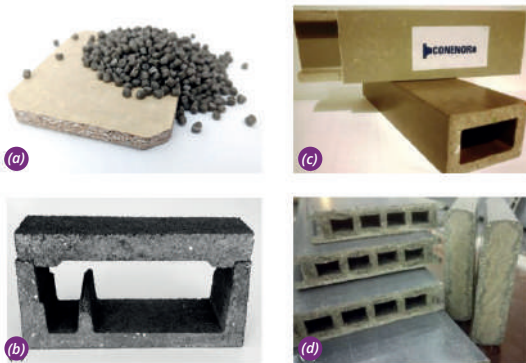
Cette phase est le plus souvent suivie de deux étapes complémentaires ; la première visant à récupérer des morceaux de taille grossière et la deuxième visant à affiner la granulométrie en fonction de l'usage visé. Une opération de tamisage final permet enfin de fractionner le recyclat obtenu en lots de tailles différentes. Diverses études ont notamment montrées que les recyclats issus de composites (fibres de verre et résine polyester) pouvaient être valorisés dans des composites thermoplastiques avec des propriétés mécaniques finales sensiblement comparables à un renfort en fibres de verre vierge [11], [12].

De la même façon, des recyclats sous la forme de broyats ont pu être utilisés en boucle ouverte dans les secteurs du bâtiment et du génie civil mais également dans l'industrie automobile sous forme de charges dans des parties non structurales [13].

Plusieurs sociétés européennes telles que l'entreprise Reprocover, située en Belgique, et l'entreprise finlandaise Conenor mais encore l'entreprise Global Fiberglass Solutions basée aux Etats Unis se sont spécialisées dans le recyclage de composites renforcés de fibres de verre, essentiellement par une technique de broyage/réincorporation dans une matrice polymérique thermodurcissable ou thermoplastique.

Exemple de produits intégrant des déchets issus de matériaux composites thermodurcissables renforcés de fibres de verre.

Crédits : (a) Global Fiberglass solutions ; (b) Reprocover ; (c-d) Conenor.



SOCIÉTÉ : FAIRMAT

MATÉRIAUX : CFRP

Marché(s) : Nouvelles mobilités, mobiliers de bureau et agencement, biens de consommation électroniques

Maturité : Technologie disponible en mars 2022 avec une capacité de 5 000 t/an

Concept : Fairmat utilise un procédé de recyclage mécanique des composites à fibres de carbone TD ou TP. Les déchets sont transformés en copeaux puis consolidés sous forme de laminés avec un liant polymérique. Le procédé est peu énergivore et permet de conserver à minima 55% de la performance du composite recyclé.

Matériaux traités en entrée : Composites à base de fibres de carbone sous forme de préimprégnés crus ou cuits, de semi-produits consolidés, pièces finies.

Produits vendus : Vente de produits qui incorpore de la matière composite recyclée sous forme de laminés et vente de copeaux.



Modèle économique : Le modèle économique de Fairmat est basé sur la reprise de déchets composites et leur valorisation par découpe mécanique puis réincorporation pour fabriquer des laminés.

Réduction de l'impact environnemental : Le procédé de recyclage de Fairmat a un impact limité dont l'estimation a été établie à -41kg de CO2 par kg recyclé. Fairmat souhaite utiliser le minimum d'énergie possible afin de réduire l'impact environnemental des produits mis sur le marché.

Contact : sales@fairmat.tech

LE RECYCLAGE THERMIQUE

Le traitement thermique par pyrolyse vise à récupérer les fibres de renfort en décomposant et dégradant thermiquement les chaînes polymères de la matrice organique dans une chambre anoxique à des températures de l'ordre de 300 à 800 °C pendant une durée de plusieurs heures.

À l'issue du traitement, la matrice est généralement récupérée sous la forme d'huile, de gaz ou de produits de charbons solides. Ces éléments peuvent ensuite être réutilisés comme intrants pour d'autres procédés chimiques ou simplement utilisés comme source d'énergie.

Dans le cas du traitement des composites renforcés de fibres de verre, des pertes de résistance à la traction de l'ordre de 50 % ont pu être enregistrées après traitement [14]. À l'inverse, dans le cas du traitement des fibres de carbone, certaines études ont montré que les propriétés mécaniques des fibres recyclées pouvaient, dans des conditions optimales, conserver jusqu'à plus de 95 % de leur résistance à la traction tout en présentant un état de surface sans résidus de résine [15].

LE RECYCLAGE CHIMIQUE

Le recyclage chimique également appelé solvolyse s'opère essentiellement dans le cadre des composites thermodurcissables où le principe consiste à décomposer la portion organique du matériau par dépolymérisation et ainsi libérer les fibres de leur gangue polymérique. Dans cette voie de recyclage, l'utilisation de l'eau apparaît comme le solvant le plus utilisé (généralement au point supercritique). D'autres solvants ayant une température et une pression critique plus basses tels que l'éthanol, le méthanol, le propanol ou l'acétone peuvent également être utilisés seuls ou en mélange avec l'eau afin de modérer les conditions de fonctionnement.

En raison de leur faible valeur commerciale et leur fragilité lorsqu'elles sont exposées à des conditions thermiques, acides et alcalines, peu d'études se sont attachées au traitement des fibres de verre. Toutefois, la littérature semble montrer que le traitement par voie chimique semble affecter fortement les propriétés mécaniques des fibres de verre avec des diminutions de la résistance à la traction comprises entre 35 et 65 % selon la température appliquée [16]. Pour ces matériaux, des travaux de R&D se développent actuellement pour développer un recyclage chimique en condition « douce », à l'image du projet CETEC porté par Vestas ou du projet ZEBRA porté par l'IRT Jules Verne. Concernant la fibre de carbone, le recyclage par voie chimique permet de récupérer des fibres de longueur variable avec une topologie de surface quasiment identique aux fibres vierges.

De nombreuses études ont ainsi montré que les fibres de carbone post-traitées conservent environ 95 % des propriétés mécaniques vis-à-vis des propriétés d'une fibre vierge [17].

SOCIÉTÉ : EXTRACTIVE

MATÉRIAUX : CFRP

Marché(s) : Sport & loisirs - transport

Maturité : Pilote TRL 6 / TRL 8-9 en 2023

Capacité de traitement : 340 t/an fin 2023

Concept : Extractive propose une technologie de traitement des matériaux composites thermodurcissables et thermoplastiques basée sur le procédé de solvolysse. La technologie nommée PHYre, est une solution innovante qui s'appuie sur l'emploi de solvants à une température modérée (typiquement inférieure à 200 °C). L'action combinée des solvants en "phase vapeur", permet de valoriser des fibres de carbone sans altérer leurs propriétés mécaniques.

Matériaux traités en entrée : Matériaux composites thermodurcissables et quelques thermoplastiques renforcés de fibres de carbone de tout format (fibres longues, courtes, etc...)

Produits vendus : Extractive travaille activement avec de nombreux partenaires sur l'élaboration d'une gamme de produit afin de préparer l'introduction sur le marché de ses fibres recyclées prévue en 2023.

Modèle économique : Extractive vise à commercialiser ses fibres de carbone recyclées entre 6 et 10 €/kg.

Réduction de l'impact environnemental : La technologie de recyclage PHYre présente un impact environnemental faible avec notamment une empreinte CO2 dix fois moins important vis-à-vis de la production de fibres vierges. En effet, grâce à un système de régénération de solvant, PHYre permet de recycler jusqu'à 90% des produits chimiques utilisés lors du procédé.



Contact : info@extractive.eu, +33 (0)7 48 88 26 90

SOCIÉTÉ : ALPHA RECYCLAGE COMPOSITES (ARC)

MATÉRIAUX : CFRP

Marché(s) : Nautisme, automobile, aéronautique, éolien, sport & loisirs

Maturité : Pilote industriel TRL8-9

Capacité de traitement : 1 tonne/j

Concept : ARC est positionné comme un valorisateur de fibres carbone recyclées grâce à la technologie de vapothermolyse. Ce procédé permet de récupérer des fibres de carbone propres, sans avoir à utiliser des produits chimiques, avec propriétés finales quasi-équivalentes à des fibres vierges.

Matériaux traités en entrée : Fibres sèches ensimées jusqu'aux composites à base thermodurcissable (déchet d'usinage, raté de fabrication, fin de vie, démantèlement).

Produits vendus : Fibres en vrac : fibres broyées, fibres courtes et fibres longues. Semi-produits : mat de 200 à 500 gsm en fibres de carbone recyclées, éventuellement comblées.



Modèle économique : ARC est positionné sur des offres allant de l'étude de traitement préalable en laboratoire jusqu'à la commercialisation de produits semi-finis. ARC vise à être compétitif par rapport aux solutions de traitement et rester compétitif par rapport aux produits renforcés de fibres de carbone vierges.

Réduction de l'impact environnemental : La fabrication de 1kg de fibres de carbone recyclées est moins énergivore (d'un facteur de 6 à 15) par rapport à la fabrication de fibres de carbone vierges, générant moins d'émissions de gaz à effet de serre.

Contact : l.pech@alpharecyclage.com, +33 (0)5 62 16 72 82

3.4 SOLUTION TECHNIQUE

LA VALORISATION ÉNERGÉTIQUE

CE QUE DIT LA LOI



L'article L. 541-1-1 du code de l'environnement, définit la valorisation énergétique par : « toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets ».

LE COMBUSTIBLE SOLIDE DE RÉCUPÉRATION (CSR)

L'appellation **Combustible Solide de Récupération** (CSR) est un terme générique qui regroupe tout type de déchets non dangereux solides, non constitués de biomasse uniquement, dont le pouvoir calorifique est suffisamment élevé pour présenter un intérêt en valorisation par combustion, en substitut des combustibles fossiles.

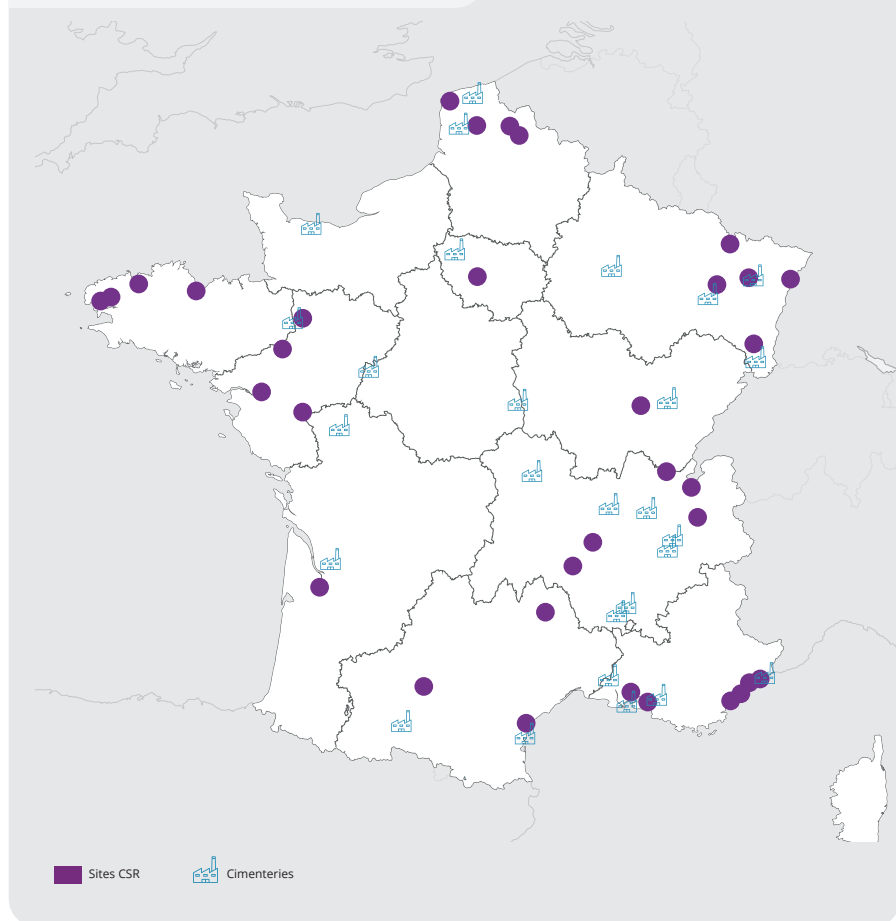
Les CSR se différencient notamment de l'incinération par la qualité du produit généré afin de répondre à un cahier des charges client qui impose un tri/contrôle qualité à la production (exemple : phase de tri préalable pour éliminer la présence éventuelle PVC afin de conserver une production stable en termes de PCI).

Si la France produit actuellement 400 kT de CSR par an, elle vise une capacité de production nationale de 2,5 Mt d'ici 2025.

Le détenteur de déchets composites, s'il souhaite valoriser son déchet en cimenterie, devra s'adresser à un préparateur de CSR (voir tableau extrait de [18]). Ce préparateur de CSR a la charge de générer un combustible dont l'exutoire final est essentiellement une valorisation en cimenterie.

Carte des acteurs de la filière CSR française

Crédit IPC



RÉGION	DÉP.	ADRESSE	NOM	SOCIÉTÉ / EXPLOITANT
AURA	1	Dortan	Site de SERRAND	SERRAND
AURA	42	Ricamarie	Plateforme d'activités de SERMACO	SERMACO
AURA	43	Polignac	Ecopôle ALTRIOM	3WAYSTE
AURA	73	Chamoux sur Gelon	BIOVAL (anciennement site de SIBUET)	BIOVAL
AURA	74	Villy-le-Pelloux	Centre de tri haute performance d'Excoffier	EXCOFFIER
BFC	21	Ruffey les Beaume	Site de Beaune	BOURGOGNE RECYCLAGE
Bretagne	22	Ploufragan	UTVME=Unité de Tri-Valorisation matière Energie	KERVAL
Bretagne	29	Guipavas	CTHP St Thudon	RECYCLEURS BRETONS
Bretagne	29	Saint-Martin des-Champs	Site de St Martin	GUYOT ENVIRONNEMENT
Bretagne	29	Brest	Site de Brest	GUYOT ENVIRONNEMENT
Grand Est	54	Ludres	CTHP de Ludres	VEOLIA
Grand Est	57	Heming	Plateforme intégrée sur la cimenterie de Heming	EQIOM
Grand Est	57	Longeville-lès-Saint-Avold	Site de Longeville	VTB
Grand Est	67	Strasbourg	Blueprint	Blueprint
Grand Est	68	Cernay	Cernay Environnement	Cernay Environnement
Haut de France	59	Blaringhem	Centre de Préparation Matières (CPM) et fabrication de CSR	BAUDELET
Haut de France	62	Evin Malmaison	TVME	SYMEVAD
Haut de France	62	Calais	Centre de tri de Calais	OPALE ENVIRONNEMENT (Séché)
Haut de France	62	Billy Berclau	Site VANHEEDE	VANHEEDE ENVIRONNEMENT SAS
Ile de France	91	Echarcon	SEMAVAL	SEMARDEL
Normandie	27	Alizay	Unité d'Alizay	NPC
Normandie	76	Oissel	Propreté Nord Normandie (VEOLIA)	VEOLIA
Nouvelle aquitaine	33	Mérignac	CORIS	GROUPE PENA
Occitanie	11	Narbonne	Ecopole Narbonne	GRAND NARBONNE
Occitanie	31	Bruguières	Site de Bruières PAPREC	PAPREC
Occitanie	48	Mende	Site d'Environnement Massif Central	ENVIRONNEMENT MASSIF CENTRAL
PACA	6	Nice	CTHP VALAZUR	VEOLIA
PACA	6	Villeuneuve-Loubet	Centre de tri de villeneuve - Loubet	VEOLIA
PACA	6	Cannes la bocca	Centre de valorisation organique	SMED06
PACA	13	Istres	Provence Valorisation	SUEZ PROVENCE VALORISATION
PACA	13	Gignac-La-Nerthe	Usine de Gignac-La-Nerthe	EPUR
PACA	83	Fréjus	Ecopôle SOFOVAR DND	SCLAVO ENVIRONNEMENT
Pays de la Loire	44	Coueron	CTHP du site Arc en Ciel	NANTES METROPOLE
Pays de la Loire	44	Chateaubriant	Site Tri OUEST	BARBAZANGES TRI OUEST
Pays de la Loire	49	Cholet	CDT de Cholet	BRANGEON RECYCLAGE
Pays de la Loire	53	Changé	Pole multi-filière de Changé	SECHE

SOCIÉTÉ : VANHEEDE ENVIRONNEMENT SAS

MATÉRIAUX : GFRP

Marché(s) : CSR à haut PCI**Maturité** : production 140 000 t/an

Concept : Vanheede gère la logistique du déchet, la préparation et l'expédition chez le client.

Matériaux traités en entrée : Déchets industriels issus d'activités économiques (DAE), essentiellement des déchets textiles et plastiques souples complexes, non recyclables. Préférence produits souples avec teneur en fibres de verre limitée (maxi 10%).

Produits vendus : CSR HPC, qualité cimenterie avec haut PCI, sous forme de fluff et pellets, pour la production de chaleur et la valorisation matière (part de charge minérale dans le ciment).

ALTERCOAL®
THE ALTERNATIVE FUEL FOR THE FUTURE



 VANHEEDE.COM
ENVIRONNEMENT

Modèle économique : La prestation d'enlèvement des déchets est facturée à l'émetteur de déchets. Vanheede est facturé par le cimentier pour réincorporer le CSR. Tous les coûts de traitement du déchet sont supportés par l'émetteur du déchet.

Réduction de l'impact environnemental : Le CSR évite l'enfouissement des DAE non-recyclables répondant à un cahier des charges strict. En cimenterie, le CSR HPC permet de réduire le recours aux énergies fossiles comme le charbon ou le coke de pétrole, ainsi que la valorisation matière des résidus minéraux issus de la combustion.

Contact : offre.fr@vanheede.com, +33 (0)3 21 18 17 62

L'INCINÉRATION

Outre la voie de transformation des matériaux en CSR, les déchets composites peuvent être utilisés comme combustibles de substitution dans des unités d'incinération conventionnelles pour la récupération d'énergie tel qu'on le retrouve dans la gestion des déchets ménagers non valorisables.

À la différence des CSR, le tri préalable des déchets n'est pas obligatoire impliquant ainsi de possibles variabilités de la qualité des gisements en termes de PCI et de composition. De ce fait, les installations d'incinération doivent disposer de filtres pour capter des polluants organiques issus de la combustion des déchets, contrairement aux installations utilisatrices de CSR.

3.5 SOLUTION TECHNIQUE

LE STOCKAGE

CE QUE DIT LA LOI



D'un aspect réglementaire, selon l'article L. 541-1-1 du code de l'environnement, le stockage correspond à : « toute opération qui n'est pas de la valorisation même lorsque ladite opération a comme conséquence secondaire la récupération de substances, matières ou produits ou d'énergie ».

Ainsi, **le stockage** est sans aucun doute la solution la plus défavorable dans le cycle de traitement des déchets. Si la majorité des déchets de production en composite a pu être stockée en Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND), anciennement appelé centre d'enfouissement technique, ces derniers ne sont autorisés à recevoir depuis 2002 que des déchets ultimes, définis de la façon suivante : « résultant ou non du traitement d'un déchet qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par la réduction de son caractère polluant ou dangereux ».

De façon globale, il est observé une saturation des centres de stockage et une augmentation du coût d'enfouissement [19]. Par ailleurs, la loi AGEC impose une réduction des quantités de déchets ménagers et assimilés admis en installation de stockage en 2035 à 10 %.

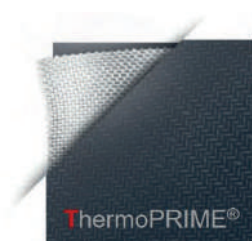
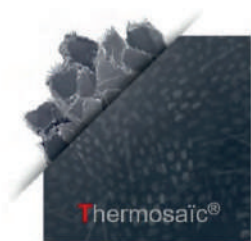
4 L'INNOVATION : DES TECHNOLOGIES ÉMERGENTES

Par opposition aux « solutions techniques » des technologies en cours de maturation (en développement ou proches du marché), pourraient préfigurer de l'avenir du recyclage des matériaux composites en Europe.

DES PROCÉDÉS POUR LE RECYCLAGE DES CHUTES DE PRODUCTION

En réponse aux procédés de mise en œuvre qui génèrent de nombreux déchets, qui peinent à trouver des voies de valorisation performantes, le Cetim Grand Est a développé deux éco-procédés de valorisation des déchets plastiques et composites thermoplastiques : les procédés Thermosaïc® et ThermoPRIME®.

Le procédé Thermosaïc® permet après des étapes de tri et de déchiquetage, d'agglomérer des déchets pour former des panneaux à haute formabilité. De façon analogue, le procédé ThermoPRIME®, permet de convertir les mêmes déchets de production en semi-produits à haute valeur ajoutée, par l'adjonction d'un renfort fibreux long ou continu.



Semi-produits (panneaux) obtenus par les procédés Thermosaïc® & ThermoPRIME®

LES RÉSINES THERMOPLASTIQUES PAR VOIE LIQUIDE

POUR COMPRENDRE

Elium® est une résine acrylique, développée par la société Arkema et apparue en 2014. Il s'agit d'une résine thermoplastique réactive bi-composante, dont la viscosité à température ambiante est compatible avec les procédés LCM (Liquid Composite Molding), de l'ordre de 100 à 500 cP. Après polymérisation, le comportement mécanique de cette résine est très proche de celui du PMMA. La faible viscosité initiale et le caractère thermoplastique de cette matière permettent actuellement à la résine Elium® de concurrencer les résines thermodurcissables en termes de recyclabilité, de mise en œuvre mais également de propriétés.

VERS DES RÉSINES THERMODURCISSABLES RECYCLABLES

POUR COMPRENDRE

Les réseaux tridimensionnels formés au cours de la polymérisation des matrices thermodurcissables sont généralement qualifiés de permanents ; c'est-à-dire que les systèmes obtenus ne peuvent ni être fondus ni être solubilisés. C'est notamment cette caractéristique propre aux matrices thermodurcissables qui rend les composites si difficiles à recycler. Face à cette problématique, une nouvelle classe de polymères appelées « vitrimères » a été développée. Ainsi, lors de la phase de polymérisation, ces systèmes ont la particularité de former des nœuds de réticulation qui à l'inverse des structures thermodurcissables classiques, ont la capacité de se dissocier et se recombinaient par simple augmentation de température.

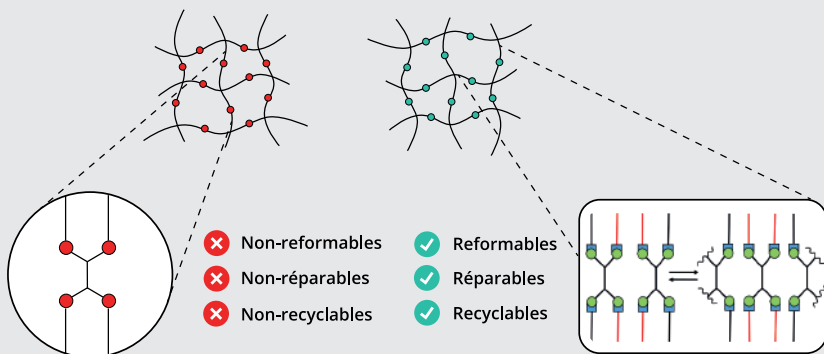
Ce caractère réversible permet notamment aux vitrimères de faire chuter fortement leur viscosité lorsqu'ils sont soumis à une élévation de température et donc de posséder des caractéristiques analogues à celles des polymères thermoplastiques. Ainsi, les vitrimères présentent à la fois des propriétés de tenue et de résistances propres aux matrices thermodurcissables ainsi qu'un potentiel de remise en forme propre aux thermoplastiques, autorisant ainsi une certaine recyclabilité des matières.

Représentation de la différence entre des nœuds de réticulation obtenus partir d'une matrice thermodurcissable classique versus une matrice vitrimère [20]

Thermodurcissables

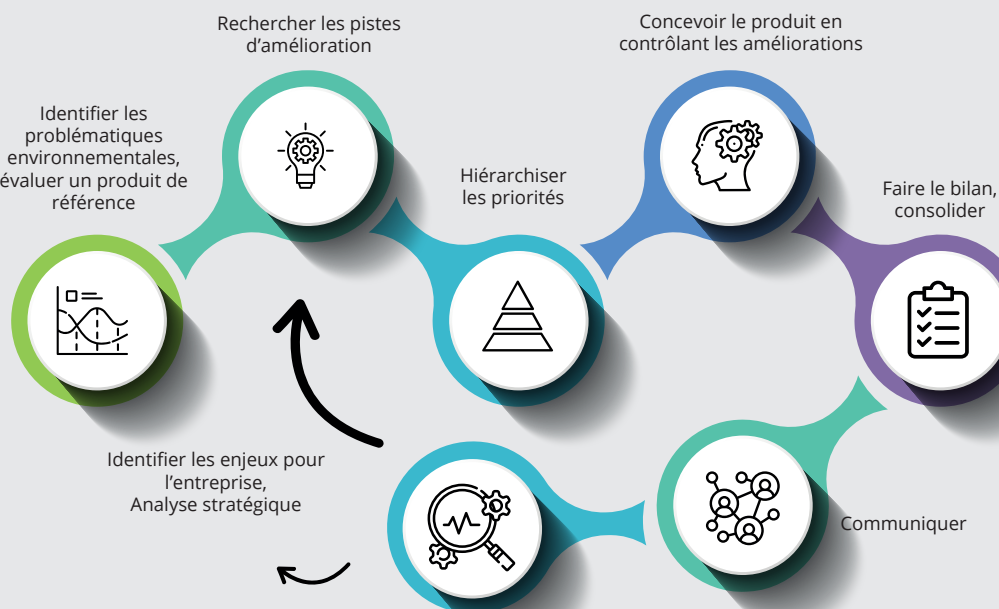
VS

Vitrimères



De la même façon, il est possible de noter l'essor de nouvelles résines thermodurcissables disponibles commercialement dont la chimie des durcisseurs a été modifiée pour faciliter le recyclage par voie chimique avec un procédé faiblement énergivore. Des solutions techniques existent actuellement à l'échelle industrielle et sont notamment proposées par les entreprises internationales telles que Aditya Birla/Connora technologies ou encore Adesso Materials.

Déroulement global d'une démarche d'écoconception



5 ENTRER DANS LA DÉMARCHE D'ÉCOCONCEPTION DES COMPOSITES

L'écoconception est une démarche qui consiste à prendre en compte les critères environnementaux dans la conception et le développement de produits nouveaux ou existants, dans le but de réduire les impacts environnementaux négatifs tout au long du cycle de vie du produit. Elle est encadrée par la norme ISO 14 006 : 2020.

Cette démarche doit être :

- > **Multicritère** : prise en compte de l'ensemble des impacts environnementaux potentiels
- > **Multi-étapes** : prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie du produit, depuis l'extraction des matières premières ("berceau") jusqu'à la fin de vie du produit ("tombe") en passant par la fabrication ("porte" de sortie de l'usine), la distribution et l'utilisation
- > **Multi-acteurs** : sensibilisation de toute l'équipe de développement du produit à l'écoconception afin d'en appliquer tous les principes

L'intégration de l'éco-conception permet à l'entreprise de répondre aux exigences réglementaires et marché croissantes, et peut générer également des gains économiques, à travers l'augmentation de la valeur perçue du produit ou l'optimisation de la conception.

S'APPUYER SUR LES ACV OU SUR L'ACV SIMPLIFIÉE

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un processus sur la base de critères quantitatifs. Elle est fondée sur les étapes suivantes :

- > Définition du champ de l'étude (unité fonctionnelle) et de l'étendue du cycle de vie (frontières)
- > Inventaire des flux entrants (énergies, matières premières...) et sortants (CO₂, eau, chaleur...) nécessaires sur l'ensemble du cycle de vie
- > Evaluation des impacts via des indicateurs environnementaux reconnus et quantifiés (réchauffement climatique, pluies acides, épuisement des ressources, ...)

Les résultats sont ensuite analysés afin d'en dégager des recommandations d'amélioration, et soumis à une revue critique extérieure.

Cette démarche peut être itérative pour évaluer la modification d'un produit sur l'environnement, avec le risque de transférer un impact sur un autre.

En première approche l'ACV simplifiée peut être utilisée pour évaluer des processus plus facilement. C'est une version allégée et rapide de l'ACV, basée sur des résultats d'autres études d'ACV, ce qui peut induire des biais dans les hypothèses. Ces outils doivent être utilisés avec le souci de transparence vis-à-vis des résultats obtenus.

AVANTAGES		LIMITES
ACV complète	• Méthode la plus robuste • Analyse exhaustive : composants, phases du cycle de vie. • Utilisable pour des documents réglementaires • Possibilité de communiquer	• Utilisés par des experts et pour les experts • Complexité de la collecte de données • Process des données fastidieux • Analyse compliquée
ACV simplifiée	• Collecte de données facilitée • Réalisation accessible à un public débutant, donc un niveau d'expertise moins élevé • Analyse plus aisée • Permet de dégager les principales tendances	• Nécessite une bonne connaissance du produit et de sa conception • Non utilisable pour des documents réglementaires • L'utilisation de données d'impact ne permet pas la customisation des jeux de données (spécificités process par exemple), les données sont moyennées. • Implique plus d'incertitudes dans les résultats.

Tableau de comparaison entre l'ACV complète et l'ACV simplifiée

EXEMPLE DE RÉSULTATS D'ACV

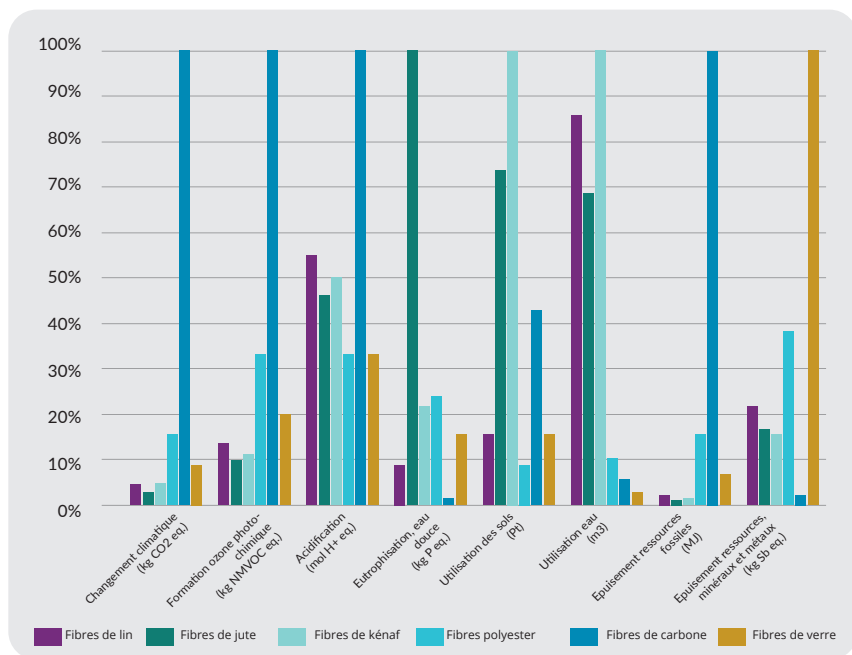
À titre d'exemple, les impacts de fibres et les matrices couramment utilisées dans la composition de composites pétrosourcés et biosourcés ont été étudiés et sont présentés ci-après, à savoir :

- > **Pour les renforts** : des fibres de verre et de carbone, des fibres végétales et une fibre polyester
- > **Pour les matrices** : du PA 6,6, du PA 6, du PC, du PPS, du PP, du PLA (plastique biosourcé et peu biodégradable), de l'ABS, de la résine polyester et de la résine époxy

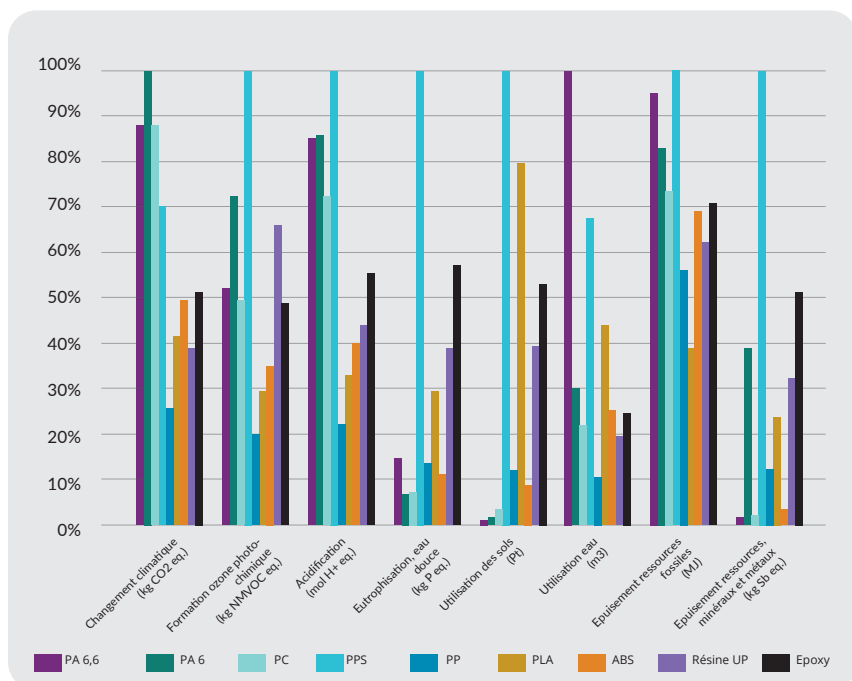
Les impacts utilisés sont des indicateurs couramment utilisés dans les ACV :

- > Le réchauffement climatique, l'acidification, et la formation d'ozone photochimique
- > L'utilisation des ressources fossiles, minières et métalliques, et des ressources naturelles (eau, sols).

Les impacts sont calculés à leur mise sur le marché, c'est-à-dire de l'extraction à la production et le transport



ACV comparative entre différentes fibres, à isomasse (1 kg), données Ecoinvent, logiciel Simapro et méthode EF 3.0, à mise sur le marché



ACV comparative entre différentes matrices, à isomasse (1 kg), données Ecoinvent, logiciel Simapro et méthode EF 3.0, à mise sur le marché

REPÈRES : COMPARER LES SOLUTIONS

Si l'on veut observer des ordres de grandeur et des comparaisons sur les impacts des matériaux composites (matrices et renforts), on peut retenir que :

- > Les analyses d'impact sont généralement complexes, car elles comportent de nombreux paramètres : étendue du cycle de vie, impacts pris en compte, solutions de référence... Les résultats de ces analyses doivent être lus en connaissance de cause des hypothèses de modélisation et des limites de l'analyse
- > La production des fibres synthétiques est plus impactante que celle des fibres naturelles en matière d'utilisation des ressources non-renouvelables et du changement climatique (à masse équivalente). La fibre de carbone est significativement plus impactante à produire que la fibre de verre, à l'exception de son impact sur les ressources minérales rares
- > Les fibres naturelles en revanche en général sont plus impactantes que les fibres synthétiques sur les impacts liés à l'agriculture à masse équivalente
- > Un polymère biosourcé n'implique pas automatiquement des impacts environnementaux moindres. La production et le transport des matières premières, ainsi que des transferts d'impact peuvent nuancer un bilan attractif au premier abord. Certains polymères pétrosourcés sont recyclables ou biodégradables, tandis que les polymères biosourcés ne le sont pas nécessairement
- > Les matrices thermoplastiques sont globalement plus impactantes à produire que les thermodurcissables, mais offrent l'avantage d'être recyclables
- > Un composite biosourcé et biodégradable PLA/lin est nettement moins impactant qu'un composite fibres de verre/résine polyester sur un cycle de vie complet
- > L'utilisation de thermoplastiques recyclés diminue de manière drastique (près de 75 % constaté dans cette étude) les impacts environnementaux
- > Ces analyses ne prennent que rarement en compte les bénéfices acquis par l'utilisation des matériaux composites sur l'exploitation des produits : allègement, résistance chimique. Ces avantages seraient à considérer dans le cas d'analyses comparatives avec d'autres matériaux

CONCLUSIONS

Les matériaux composites à base de résine polymérique thermoplastique (TP) ou thermodurcissable (TD) offrent des opportunités très intéressantes. La conjonction de leurs excellentes propriétés mécaniques et de leur légèreté unique les rend particulièrement attractifs dans la conception de véhicules (trains, avions, automobiles, bateaux), de dispositifs permettant la production d'énergie renouvelable (éoliennes, énergie marine), et de bâtiments (panneaux, tubes, coques), d'articles de sports & loisirs ou encore de biens de consommation. Néanmoins le bénéfice environnemental des composites se heurte à l'impact de leur gestion en fin de vie, finissant principalement en valorisation énergétique ou en enfouissement. Le taux de recyclage est actuellement très faible, en grande partie lié aux difficultés techniques vis-à-vis de la séparation de la matrice polymérique des fibres de renfort. La fin de vie des matériaux composites doit alors être repensée.

Concernant le recyclage des composites, les principaux enseignements de cette étude sont les suivants :

- > Il est préconisé de dissocier le recyclage des matériaux composites à fibres de carbone (matériau à haute valeur ajoutée) et les matériaux composites à fibres de verre (matériau à volume)
- > Le recyclage des composites à fibres de carbone se structure à l'échelon national autour d'acteurs tels que Tarmac Aerosave pour le démantèlement, de recycleurs/valorisateurs de fibres de carbone recyclées tels que Apply Carbon, Alpha Recyclage Composites et Extrachive, de transformateurs tels que Lavoisier Composites, Fairmat ou Hopper
- > Les exemples des sociétés telles qu'ABVAL ou APV montrent que les équilibres économiques sont plus difficiles à atteindre pour le recyclage des composites à fibres de verre. Toutefois, même s'il est plus difficile, cet équilibre économique est possible comme le montrent les exemples de sociétés EU ou US telles que Conenor, Reprover ou Glassfiber Solutions Inc. Ces sociétés ont en commun l'utilisation de technologies de broyage/réincorporation des GFRP dans des matrices thermodurcissables ou thermoplastiques
- > Pour favoriser l'émergence d'une filière de recyclage complète, il conviendra d'apporter des données économiques plus précises. Ces données permettront d'évaluer la viabilité économique des solutions de recyclage les plus adaptées à chaque territoire (nature et taille du gisement) en y associant notamment la notion de taille critique des gisements

Concernant l'écoconception des composites, les principaux enseignements de cette étude sont les suivants :

- > L'écoconception des composites devrait se développer fortement dans les années à venir, motivée par le contexte règlementaire (en particulier les REP) et les politiques RSE des entreprises, de plus en plus sensibles à la question environnementale
- > Le développement de l'écoconception devra s'appuyer sur des outils et des données d'impact fiabilisées afin de proposer des alternatives avec un réel effet. La collecte de ces données pour les composites est un enjeu majeur du secteur des composites
- > Parmi les principales pistes de réduction des impacts des composites, l'utilisation de matières recyclées est une de plus prometteuses. Aujourd'hui le potentiel de recyclage met en avant les thermoplastiques, mais ceux-ci sont généralement plus impactants à produire. L'utilisation de matières biosourcées peut présenter un intérêt mais n'est pas une garantie d'impact moindre
- > Les structures composites actuellement démantelées ont souvent un âge compris entre 20 et 40 ans et la fin de vie n'a souvent pas été intégré à la conception. On retrouve notamment des assemblages collés de matériaux hétérogènes (mousse/composite et/ou composite/bois) qui constituent une difficulté en fin de vie. Par ailleurs, les résines thermodurcissables utilisées pour leurs bonnes propriétés (mécaniques, chimiques, durabilité) posent des difficultés en fin de vie. Ainsi, il est recommandé de repenser la conception des structures composites pour en faciliter le recyclage. Ces travaux nécessitent d'intégrer également les fournisseurs de matériaux dans les futurs développements (résines, renforts, solutions d'assemblage)

Lorsque c'est applicable, il semblerait opportun d'envisager des changements de modèles économiques pour intégrer plus d'économie de la fonctionnalité (vendre un usage et non plus un produit).

Il apparaît également important de pouvoir fournir des données actualisées relatives au recyclage et à l'écoconception des composites. En effet, une dynamique s'installe sur ce thème et il semble important de pouvoir partager les bonnes pratiques et les savoir-faire entre les différents secteurs utilisateurs de composites mais également tout au long de la chaîne de la valeur, du fabricant de matière jusqu'au recycleur.



Partenaires

ifth Institut Français du
Textile et de l'Habillement



Financeurs



FÉDÉRATION
DES INDUSTRIES
NAUTIQUES



Contributeur



BIBLIOGRAPHIE

- [1] JEC Group et Estin, « *Current trends in the global composites industry*, JEC Observer », JEC Group, 2021.
- [2] CRECOF, IPC, et ADEME, « *Guide du recyclage des composites* », 2017.
- [3] F. Meng, J. McKechnie, T. A. Turner, et S. J. Pickering, « *Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled carbon fibres* », Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 100, p. 206-214, sept. 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.05.008.
- [4] W. Carberry, « *Airplane Recycling Efforts*, *aero quarterly* », vol. aeromagazine, 2008.
- [5] J. Howarth, S. S. R. Mareddy, et P. T. Mativenga, « *Energy intensity and environmental analysis of mechanical recycling of carbon fibre composite* », Journal of Cleaner Production, vol. 81, p. 46-50, oct. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.06.023.
- [6] Y. S. Song, J. R. Youn, et T. G. Gutowski, « *Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites* », Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 40, no 8, p. 1257-1265, août 2009, doi: 10.1016/j.compositesa.2009.05.020.
- [7] R. A. Witik, J. Payet, V. Michaud, C. Ludwig, et J.-A. E. Månson, « *Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications* », Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 42, no 11, p. 1694-1709, nov. 2011, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.07.024.
- [8] M. Keith, G. Oliveux, et G. Leeke, « *Optimisation of solvolysis for recycling carbon fibre reinforced composites* », présenté à European Conference on Composite Materials (ECCM) 17, Munich, Allemagne, juin 2016.
- [9] F. Meng, J. McKechnie, T. A. Turner, et S. J. Pickering, « *Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled carbon fibres* », Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 100, p. 206-214, sept. 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.05.008.
- [10] ADEME, « *Mémo REP 2021, Données 2019* », ADEME, 2021.
- [11] C. E. Kouparitsas, C. N. Kartalis, P. C. Varelidis, C. J. Tsenoglou, et C. D. Papaspyrides, « *Recycling of the fibrous fraction of reinforced thermoset composites* », Polymer Composites, vol. 23, no4, p. 682-689, 2002, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.10468>.
- [12] D. Perrin, E. Leroy, L. Clerc, A. Bergeret, et J. Lopez-Cuesta, « *SYLTEC : un procédé innovant pour le recyclage des matériaux composites à matrice thermodurcissable* », Matériaux & Techniques, vol. 95, no2, p. 121-131, 2007, doi: 10.1051/mattech:2007037.
- [13] S. Pimenta et S. T. Pinho, « *Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook* », Waste Management, vol. 31, no 2, p. 378-392, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.019>.
- [14] A. M. Cunliffe, N. Jones, et P. T. Williams, « *Pyrolysis of composite plastic waste* », Environmental Technology, vol. 24, no 5, p. 653-663, 2003, doi: 10.1080/09593330309385599.
- [15] L. O. Meyer, K. Schulte, et E. Grove-Nielsen, « *CFRP-Recycling Following a Pyrolysis Route: Process Optimization and Potentials* », Journal of Composite Materials, vol. 43, no 9, p. 1121-1132, 2009, doi: 10.1177/0021998308097737.
- [16] G. Oliveux, J.-L. Bailleul, et E. L. G. L. Salle, « *Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water* », Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 43, no 11, p. 1809-1818, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.06.008>.
- [17] J. Jiang et al., « *On the successful chemical recycling of carbon fiber/epoxy resin composites under the mild condition* », Composites Science and Technology, vol. 151, p. 243-251, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.08.007>.

- [18] AMORCE, « *État des lieux national des unités de préparation de Combustibles Solides de Récupération* », DT-126, mai 2021.
- [19] P. Krawczak, « *Recyclage des composites* », Techniques de l'ingénieur, noAM5895 V1, 2011.
- [20] A. Ruiz de Luzuriaga et al., « *Epoxy resin with exchangeable disulfide crosslinks to obtain reprocessable, repairable and recyclable fiber-reinforced thermoset composites* », Mater. Horiz., vol. 3, no 3, p.241-247, 2016, doi: 10.1039/C6MH00029K.

LEXIQUE

ACRONYME	DESCRIPTION
ACV	Analyse du Cycle de Vie
ACVS	Analyse du Cycle de Vie Simplifiée
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AGEC	Loi Anti-Gaspillage pour une Economie Circulaire
APER	Association pour la Plaisance Eco-Responsable
ASL	Article de Sport et Loisirs
CETIM	Centre technique des industries mécaniques
CFRP	Composite Fiber Reinforced Polymer
CSR	Combustible Solide de Récupération
FEE	France Energie Eolienne
FIN	Fédération des Industries Nautiques
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastic
GREC	Guide du Recyclage et de l'Ecoconception des Composites
IFTH	Institut Français du Textile et de l'Habillement
IPC	Centre Technique Industriel de la Plasturgie et des Composites
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
REP	Responsabilité Elargie des Producteurs
RSE	Responsabilité Sociétale des Entreprises
TD	Thermodurcissable
TGAP	Taxe générale sur les activités polluantes
TP	Thermoplastique
TRL	Technologie Readiness Level (niveau de maturité technologique)



Disponible en téléchargement
sur le site de l'ADEME :
<https://bibrairie.ademe.fr>

Ce document a été imprimé sur un papier 100% recyclé
issu de fibres post-consommation

Crédit photos Unsplash / Freepik / Flaticon / Istock
Composition graphique : Altcodes.fr