

GUIDE DU RECYCLAGE ET DE L'ÉCOCONCEPTION DES COMPOSITES

Rapport technique



EXPERTISES

Mai
2022

REMERCIEMENTS

Nous remercions les membres du comité de pilotage pour les échanges au cours de l'étude ainsi que l'ensemble des acteurs ayant répondu à nos questions et ainsi contribué à l'enrichissement du contenu de ce rapport.

Membres du comité de pilotage :

- IPC (pilote de l'étude) : Romain Agogué, Gilles Dennler ;
- CETIM : Aurélien Miller, Benoit Courtemanche, Pascal Souquet, Damien Guillon ;
- IFTH : Jean-Charles Fontanier, Isabelle Ferreira ;
- ADEME : Sandra Le Bastard ;
- FIN/APER : Guillaume Arnaud des Lions ;
- Polyvia : Marc Madec.

Nous remercions également :

- FEE et Carlier Plastiques pour leurs contributions au chapitre 2 – flux de déchets ;
- FEE, GIFAS, SNCF, ECOSYSTEM pour leur relecture du chapitre 2 – flux de déchets ;
- Alpha Recyclage, Apply Carbon, Bathô, Extracthive, Fairmat, Hopper, Lavoisier Composites, Recycling Carbon, Vanheede Environnement SAS pour leurs contributions au chapitre 5 – acteurs de la filière ;
- Le groupe JEC et son partenaire Estin & Co pour les partages d'informations relatives au marché des composites et aux flux de déchets.

CITATION DE CE RAPPORT

Auteur(s) personnes physiques et /ou morales, (éventuellement ADEME si contribution intellectuelle au projet ; nota bene: la copropriété des résultats ADEME/bénéficiaire peut être un indice de contribution effective de l'ADEME). Année de publication. Titre du Rapport. Nombre de pages.

AGOGUE Romain, MEDDEB Wassim, GLAIS Margaux, AINE Lucas (IPC), COURTEMANCHE Benoit, MADEC Pierre, RUCH Frédéric, ZIMMERMANN Aurélie, LE BRUN Thomas, MILLER Aurélien (CETIM), FONTANIER Jean-Charles (IFTH), 2022, Guide pour le recyclage et l'écoconception des composites – rapport technique. 173 pages

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 21DMD0002

Étude réalisée par IPC, CETIM, IFTH, Polyvia, FIN/APER, pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Coordination technique - ADEME : LE BASTARD Sandra

Direction/Service : Direction Economie Circulaire et Déchets / Service Ecoconception et Recyclage

SOMMAIRE

CONTEXTE DU PROJET	7
PRESENTATION PARTENAIRES DU PROJET	8
Partenaires.....	8
Financeurs	9
Contributeurs	10
1. INTRODUCTION AUX COMPOSITES	11
1.1. Les matériaux composites	11
1.2. Les constituants de base des CMO.....	16
1.3. Les procédés de transformation et de mise en œuvre des CMO	23
1.4. Les principaux marchés.....	34
1.5. Références bibliographiques.....	41
2. FLUX MATIERES DANS L'INDUSTRIE DES COMPOSITES	43
2.1. Flux de matière : quel enjeu ?	43
2.2. Marché du nautisme	43
2.3. Marché éolien.....	48
2.4. Marché aéronautique	55
2.5. Marché transport terrestre – hors ferroviaire	61
2.6. Marché ferroviaire.....	65
2.7. Marché des articles de sport et loisirs.....	70
2.8. Electricité et électronique.....	72
2.9. Déchets de production de composites	75
2.10. Autres secteurs et perspectives.....	78
2.11. Synthèse.....	78
2.12. Références bibliographiques.....	81
3. ÉCOCONCEPTION DES COMPOSITES.....	84
3.1. Les enjeux de l'écoconception.....	84
3.2. Présentation de la démarche d'écoconception	89
3.3. Méthodologie de l'analyse du cycle de vie.....	94
3.4. Grandeurs types pour les matériaux polymères et composites	106
3.5. Références bibliographiques	118
3.6. Glossaire du chapitre 3	119
4. OPPORTUNITES DE VALORISATION DES DECHETS DE COMPOSITES	
121	
4.1. Le contexte réglementaire.....	121
4.2. Les solutions techniques	128
4.3. L'innovation	141
4.4. Synthèse des technologies de revalorisation des matériaux composites.....	152
4.5. L'équilibre économique	153
4.6. Références bibliographiques	155

5. ANNUAIRE DES ACTEURS DU TRAITEMENT DES DECHETS COMPOSITES.....	160
5.1. Entretiens avec les acteurs français de la fin de vie des composites.....	160
5.2. Principaux acteurs – France.....	167
5.3. Principaux acteurs universitaires et centres techniques – France.....	169
5.4. Principaux acteurs – hors territoire national.....	171
5.5. Principaux acteurs universitaires et centres techniques – hors territoire national ..	176
5.6. Les acteurs de la filière CSR Française.....	179
5.7. Références bibliographiques.....	181
6. CONCLUSION / PERSPECTIVES.....	182
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	184
SIGLES ET ACRONYMES	189

RÉSUMÉ

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 Habillement (IFTH) et le Centre Technique Industriel de la Plasturgie et des Composites (IPC).

L'initiative du présent projet, piloté par IPC, est donc commune aux trois centres techniques. Pour la première fois, CETIM, IFTH et IPC se proposent de collaborer étroitement afin d'aider ensemble tous les industriels faisant appel à cette classe de matériaux.

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 sources d'énergie renouvelable (éoliennes, énergie marine), et de bâtiments (panneaux, tubes, coques). 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. La fin de vie des matériaux composites doit alors être repensée.

Dans ce rapport, il a tout d'abord été rappelé quelques éléments sur les composites (chapitre 1), à la fois sur le plan technique mais également économique. Les données concernant les mises sur le marché sont présentées. Les matières biosourcées sont également présentées et comparées aux matières pétrosourcées.

Le chapitre 2 est dédié à la qualification des gisements de déchets composites. Une évaluation sur différents marchés (nautisme, éolien, transport terrestre et aérien, industriels, électrique et électronique, articles de sports et loisirs) a été conduite et un gisement de l'ordre de 30 000 t/an à 35 000 t/an a été estimé. Les déchets post-industriels constituent actuellement le gisement le plus important. La quantification des déchets à une échelle départementale a été conduite afin de permettre l'émergence de solutions adaptées à chaque territoire.

Le chapitre 3 présente de manière didactique le sujet sur l'écoconception des matériaux composites. La démarche est présentée, basée sur des analyses de cycle de vie. Des analyses de sensibilité sont conduites afin d'évaluer l'impact sur l'environnement des différentes solutions actuelles (matières biosourcées, recyclage). Il est notamment mis en évidence que le recyclage présente effectivement un gain pour l'environnement. L'utilisation de matières biosourcées peut conduire à une réduction de l'impact environnemental. Un polymère biosourcé n'implique pas automatiquement de moindres impacts environnementaux. Les matrices thermoplastiques sont globalement plus impactantes à produire que les thermodurcissables, mais offrent un plus grand potentiel de recyclabilité.

Le chapitre 4 – solutions de recyclage – est scindé en trois parties. Le contexte réglementaire est tout d'abord présenté, suivi des solutions actuelles de revalorisation des composites et enfin les innovations, pouvant préfigurer les solutions à venir. Il est mis en évidence que le contexte réglementaire évolue rapidement sur la question de l'impact environnemental des composites, par les Responsabilités Elargies du Producteur (REP) ou les réglementations propres à chaque filière où les composites sont présents. Il est observé un marché dynamique, avec l'arrivée de nouveaux acteurs pour le recyclage des composites, qui se positionnent sur des technologies de recyclage mécanique, thermique ou chimique. L'innovation est également active, avec

ABSTRACT

This project, aiming at publishing a Guide for the Recycling and Ecodesign of Composites (GREC) is the result of a common assessment by the three French industrial technical centers active in the field of composites, namely the Technical Center for Mechanical Industries (CETIM), the French Textile and Clothing Institute (IFTH) and the Industrial Technical Center for Plastics and Composites (IPC).

For the first time, CETIM, IFTH and IPC have collaborate closely in this project – led by IPC – in order to help all manufacturers using this class of materials.

Composite materials based on thermoplastic (TP) or thermosetting (TD) polymeric resin offer very interesting properties. The combination of their excellent mechanical properties and their unique lightness makes them particularly attractive in the design of vehicles (trains, planes, automotive, boats), renewable energy (wind turbines, marine energy), and buildings (panels, tubes). Nevertheless, the environmental benefit of composites suffers from the impact of their end-of-life management, ending mainly in energy recovery or landfill. Then, the end of life of composite materials must be reconsidered.

To start with, this report presents a technical and economical overview of composites (chapter 1). Data analysis on market size and applications is provided. Bio-based materials are also presented and compared to petro-based materials.

The chapter 2 is dedicated to the qualification of composite wastes. Different markets are considered for this assessment: boating, wind energy, ground and air transport, industry, electrical and electronics, sports and leisure goods. A waste quantity of around 30,000 t/year to 35,000 t/year has been estimated. Post-industrial waste currently constitutes the largest deposit. The quantification of waste by department has been carried out in order to allow the emergence of solutions suitable for each region.

The chapter 3 gives an introduction of the eco-design of composite materials. The eco-design approach is presented, based on life cycle analyses. Sensitivity analysis have been performed so as to assess the environmental impact of the current solutions (biobased materials, recycling). In particular, it is observed that recycling does have a positive impact on environment. The use of bio-based materials can lead to a reduction in environmental impact, however a bio-based polymer does not automatically imply lower environmental impacts. The production of thermoplastic matrices is generally more impactful than the production of thermosets, but thermoplastics show a greater potential in recyclability.

The chapter 4 – recycling technologies – is divided into three parts. The current regulation is first presented, followed by the solutions for the recovery of end-of-life composites and finally innovations in the sector. It is highlighted that the regulatory context is changing rapidly on the topic of the environmental impact of composites, by the Extended Producer Responsibilities (ERP) and by regulations dedicated to specific sectors where composites are used. New players are emerging on the market for the recycling of composites, using new technologies based on mechanical, thermal or chemical recycling technologies. Innovations have been observed aiming to make the recycling of composites more competitive. Those innovation are based on new processes or on the development of new resins.

The chapter 5 presents the active players identified in the field of the recycling of composites

Contexte du projet

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 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 1er 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 et IPC se proposent de collaborer étroitement afin d'aider ensemble tous les industriels faisant appel à cette classe de matériaux.

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 sources 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. La fin de vie des matériaux composites doit alors être repensée. Poussés par la volonté grandissante des industriels d'engager une dynamique d'économie circulaire, IFTH, CETIM et IPC décident d'allier leurs compétences pour les accompagner dans cette démarche.

Après une introduction aux matériaux composites, les objectifs poursuivis dans ce guide sont les suivants :

- Chapitre 2 : Cartographier qualitativement et quantitativement les flux matières et gisements de déchets dans l'industrie française des composites ;
- Chapitre 3 : Dresser un état de l'art des solutions composites à faible impact environnemental ;
- Chapitre 4 : Elaborer un état de l'art des possibilités de revalorisation actuelles des déchets composites, incluant des éléments de réglementation ;
- Chapitre 5 : Consolider un annuaire des entreprises françaises et européennes capables de traiter des déchets composites.

Présentation partenaires du projet

Partenaires

IPC

IPC est le Centre Technique Industriel dont s'est dotée la profession pour catalyser l'innovation plastique et composite en France. IPC accompagne toutes les entreprises, notamment les TPE et PME. Son réseau d'experts est présent sur tout le territoire et travaille étroitement avec les acteurs technologiques et scientifiques français et européens, ce qui lui permet d'accompagner et de répondre aux entreprises sur des questions R&D, innovation, transfert de technologies et de compétences, et ce, quel que soit le procédé utilisé.

Les équipes d'IPC accompagnent les industriels pour concrétiser l'innovation : étude, établissement de protocole, faisabilité, ou transfert technologique...

Pour répondre aux attentes des industriels mais également aux enjeux de l'industrie Plastique et Composites, IPC a déterminé trois grands axes stratégiques : *l'Economie Circulaire, l'Industrie du Futur* et les *Produits à Haute Valeur Ajoutée*. Ce recentrage thématique va de pair avec la mission d'accompagnement des TPE/PME et les industriels vers des produits plus sûrs, plus écoresponsables. Mais aussi, pour une industrie de la plasturgie et des composites plus compétitive et innovante grâce au développement de produits haute performance à bas coûts, de produits intelligents, légers, multifonctionnels, recyclables, sécurisants et sans défaut.

C'est en développant des compétences en lien avec ces trois enjeux que les entreprises de la plasturgie et des composites pourront se développer et conquérir de nouveaux marchés. IPC, dans le cadre de sa mission, travaille à améliorer la compétitivité des entreprises, tout en prenant en compte les enjeux contextuels de l'économie circulaire et de la transition numérique.

CETIM

À la croisée de la recherche et de l'industrie, le CETIM, institut technologique labellisé Carnot et membre de l'Alliance Industrie du Futur, est le centre d'expertise mécanique français. Outil R&D de 6500 entreprises mécaniciennes, il totalise, avec ses centres associés et filiales, 1100 personnes dont plus des 2/3 d'ingénieurs et techniciens, pour 150 M€ de chiffre d'affaires. Il démultiplie son action avec un réseau de partenaires scientifiques et techniques.

Si le CETIM assure une forte présence au plus près de ses clients nationaux, ses capacités d'intervention industrielle s'étendent à l'international, notamment dans les régions francophones.

Son action de pilote de nombreux projets innovants en fait naturellement le fédérateur des grands projets industriels ou R&D multipartenaires et ce sur 5 axes principaux : Conception, simulation, essais - procédés de fabrication et matériaux - mécatronique, contrôle et mesure - développement durable - management et appui aux PME.

Partenaire de R&D, aux côtés des grands acteurs spécialisés, le CETIM propose une offre globale et pluridisciplinaire pour transformer et pour mettre en œuvre les connaissances scientifiques en application au service de l'industrie.

IFTH

IFTH, en tant que Centre Technique Industriel du Textile, de la Mode et de l'Habillement, a pour vocation d'accompagner les entreprises françaises dans leurs démarches d'innovations technologiques tout en préservant et en développant les savoirs.

Dans sa mission, IFTH s'inscrit dans une démarche d'acquisition de savoir-faire, d'investigation, de développement et de pré-industrialisation de produits textiles et habillement, ainsi que de transfert vers des applications industrielles dans une logique de souveraineté technologique de la filière. Pour cela, l'Institut s'appuie sur un ensemble unique d'experts et d'équipements technologiques couvrant tous les

métiers de la filière, allant de la fibre textile à la mise à la consommation des produits. IFTH intègre également l'ensemble des marchés actuels et porteurs d'avenir pour aider l'industrie française à disposer d'avantages technologiques et concurrentiels, notamment au service de l'innovation, de la RSE, du made in France et de la réindustrialisation des activités.

Fort d'un savoir-faire de plus de 60 ans, IFTH bénéficie d'une implantation répartie au niveau national, et met à disposition des ressortissants une expertise métier unique. Ses domaines de compétences couvrent l'ensemble des besoins de la filière, de la connaissance de la fibre textile à la mise sur le marché des produits jusqu'à la valorisation des textiles en fin de vie.

Financeurs

ADEME

À l'ADEME – l'Agence de la transition écologique –, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources. Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse. Dans tous les domaines – énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... – nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions. À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du Ministère de la Transition Ecologique et du Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

APER

L'APER, Association pour la Plaisance Eco-Responsable, est l'éco-organisme national en charge du traitement des bateaux de plaisance en fin de vie. Agréé en mars 2019 par le Ministère de la Transition Ecologique, l'APER est la première filière REP au monde dédiée aux bateaux de plaisance. Elle regroupe une centaine d'adhérents, constructeurs et importateurs, qui représentent plus de 85 % des ventes de bateaux de plaisance sur le marché français et financent l'activité de la filière. Plus de 4300 bateaux ont été pris en charge depuis le démarrage de l'activité en septembre 2019 et l'activité est en progression constante. 26 centres agréés sont actuellement opérationnels (dont un en Martinique) et 18 centres supplémentaires sont en attente d'autorisation administrative (ICPE 2712-3) pour entrer en activité et compléter le maillage territorial en métropole comme en outremer. Le recyclage des composites est un enjeu majeur pour l'avenir de la filière et l'APER mène plusieurs projets R&D avec des partenaires privés et institutionnels sur la réutilisation des bateaux et des équipements ainsi que sur le recyclage des composites dans une perspective d'économie circulaire.

FIN

La Fédération des Industries Nautiques (FIN) a pour vocation de représenter, défendre, et promouvoir les métiers de la filière nautique française, en France et à l'international. Elle porte la voix d'un tissu de plus de 5000 entreprises, et ses adhérents, regroupés en 11 métiers de l'industrie et des services nautiques, représentent plus de 80 % du chiffre d'affaires de la profession. Interlocuteur privilégié des pouvoirs publics sur le plan régional, national et européen, la Fédération assiste et conseille les entreprises dans les domaines juridique, social, économique, environnemental et technique. Elle est membre fondateur de la Fédération européenne des industries nautiques - European Boating Industry, de la Confédération du Nautisme et de la Plaisance (CNP) et du Comité Stratégique de Filière des Industries de la mer.

La Fédération est propriétaire du Nautic, Salon nautique de Paris, et du Yachting Festival de Cannes.

Elle est à l'origine de deux éco-organismes, l'APER qui gère la filière française de déconstruction des bateaux de plaisance hors d'usage et PYREO qui gère la collecte et le traitement des produits pyrotechniques périmés.

Polyvia

Polyvia est l'organisation professionnelle principale représentative des transformateurs de polymères sur l'ensemble du territoire. Cette filière compte plus de 3400 entreprises, soit près de 126 000 salariés principalement issus de PME. Polyvia accompagne et soutient ses entreprises adhérentes dans toutes leurs problématiques économiques, industrielles, sociales et d'innovation. Nous les aidons à se transformer pour répondre aux enjeux technologiques, environnementaux et sociétaux. Notre organisation professionnelle œuvre aussi à la représentation et la promotion des intérêts des professionnels auprès des pouvoirs publics et à l'explication et la pédagogie de leurs métiers et de leurs atouts. Polyvia s'est également dotée d'un unique organisme de formation. Ainsi Polyvia Formation regroupe l'ensemble des centres de formation continue et d'apprentissage dédiés aux métiers des transformateurs de polymères. Polyvia Formation contribue à assurer la promotion des métiers de la profession en développant des formations innovantes. Nous professionnalisons les collaborateurs des entreprises et recherchons les nouveaux talents.

Contributeurs

FEE

France Energie Eolienne, représente, promeut et défend l'énergie éolienne en France. L'association rassemble plus de 315 membres, professionnels de la filière éolienne en France, qui ont construit plus de 90 % des turbines installées sur le territoire français et en exploitent plus de 85 %.

L'éolien est en forte croissance partout dans le monde et les perspectives des prochaines années sont immenses. Les opportunités sont formidables pour l'éolien français qui constitue un véritable réservoir de croissance et d'emplois pour notre pays. Le tissu industriel éolien c'est plus de 900 entreprises et plus de 22 600 emplois qui irriguent l'ensemble du territoire français.

1. Introduction aux composites

Cette première partie du projet consiste principalement à présenter les notions indispensables à la compréhension de la fin de vie des composites. Les principales résines sont détaillées, puis les renforts et les procédés de mise en forme utilisés par les industriels du secteur. Par ailleurs, les divers usages des composites dans les industries sont présentés pour les secteurs de l'aéronautique, du ferroviaire de l'automobile, du bâtiment, des énergies renouvelables, du nautisme et du sport.

1.1. Les matériaux composites

Les matériaux composites ont joué un rôle important tout au long de l'histoire de l'humanité, depuis le logement des premières civilisations jusqu'aux innovations actuelles. Ils ont imprégné notre vie quotidienne, nos constructions, notre matériel médical, et beaucoup d'autres secteurs comme l'énergie, les transports, le sport et l'aérospatiale. Cette phase d'introduction présente un bref historique de l'évolution des matériaux composites au cours de l'histoire.

1.1.1. Historique et contexte

Les matériaux composites tirent leurs performances exceptionnelles d'une synergie entre un matériau fibreux et un liant. Le premier apporte la résistance mécanique, le second apporte la cohésion d'ensemble, permettant à la structure de conserver sa forme et de transmettre les efforts entre les fibres. Cette innovation est millénaire. En effet, les premières utilisations des composites remontent à 1500 av. J.C. lorsque les premiers égyptiens et mésopotamiens utilisaient un mélange de boue et de paille pour créer des bâtiments solides et durables. Plus tard, en 1200 après J.C, les mongols ont inventé le premier arc composite. À l'aide d'une combinaison de bois, d'os et de « colle animale » [1].



Figure 1: Construction en terre crue (crédit : Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble -



Figure 3 : Illustration guerrier mongol et son arc (crédit : Wikipedia).

Aujourd'hui, les matériaux composites se sont fortement modernisés notamment avec l'arrivée des matériaux de synthèse. Jusque-là, les résines naturelles dérivées de plantes et d'animaux étaient la seule source de colles et de liants. La révolution chimique s'est produite durant la période de 1870 à 1890. Les chercheurs découvrent à cette époque la polymérisation d'une nouvelle résine synthétique (polymère) et la possibilité de la transformer d'un état liquide à un état solide. Plus tard vers 1930, les résines de type polyester insaturées sont brevetées (brevet déposé par Mr. Carleton Ellis en 1936). Cette avancée a permis à ces résines de devenir le premier choix dans la production de matériaux composites, produisant ainsi des résines à haute performance, telles que les résines époxy. Ces

nouveaux matériaux synthétiques ont ainsi largement surpassé les résines dérivées de la nature. Cependant, les plastiques seuls ne pouvaient pas fournir suffisamment de résistance pour les applications structurales. Un renforcement était donc nécessaire pour fournir la rigidité. En 1935, Owens Corning a introduit la fibre de verre lorsqu'il s'est rendu compte qu'une fois combinée avec un polymère plastique, l'ensemble crée une structure rigide mais également légère. Les premières fibres de carbone ont été brevetées en 1961 et ont contribué au développement de nombreuses industries (maritime, aérien). De cette manière, l'utilisation des composites a



Figure 2: IMOCA l'Occitane en Provence (crédit : Black Pepper Yachts).

connu une croissance rapide à mesure que les bateaux, les camions, les voitures de sport, les réservoirs de stockage, et de nombreux autres produits ont été construits à l'aide de composites. Des méthodes de fabrication telles que la pultrusion, le moulage à vide et l'enroulement filamentaire à grande échelle ont été développées et ont rendu possible la commercialisation des produits à base de matériaux composites.

Malgré ce changement radical au niveau des matières premières utilisées ainsi que des techniques de mise en œuvre, on remarque parfois des similitudes avec les techniques de constructions traditionnelles, comme pour la fabrication de coque de bateau d'aujourd'hui (Tableau 1).

Structure composite traditionnel	Structure composite synthétique
 <p data-bbox="225 822 762 851"><i>Citadelle de Bam en Iran (crédit : CRAterre-ENSAG).</i></p>	 <p data-bbox="863 822 1339 880"><i>Coque d'Optimist (crédit : Centre Régional de Nautisme de Granville).</i></p>
 <p data-bbox="288 1214 699 1243"><i>Mise en œuvre d'un composite naturel.</i></p>	 <p data-bbox="823 1191 1378 1272"><i>Mise en œuvre d'un composite synthétique (crédit : F. Dimier pour l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)).</i></p>
 <p data-bbox="236 1594 750 1653"><i>Imprégnation des fibres à l'aide d'un liant (crédit : France3-régions).</i></p>	 <p data-bbox="879 1585 1321 1615"><i>Imprégnation des fibres à l'aide d'un liant..</i></p>
 <p data-bbox="264 1975 719 2004"><i>Structure composite argile/fibres naturelles.</i></p>	 <p data-bbox="863 1975 1337 2004"><i>Structure composite polyester/fibres de verre.</i></p>

Tableau 1 : Mise en évidence des similitudes entre composite biosourcé et composite synthétique.

Cependant, la découverte et le progrès engendrés par l'apparition de ces nouveaux matériaux ont eu d'importantes répercussions sur l'environnement. Alors que le cycle de vie des matériaux de construction naturels est simple car les déchets sont assimilables par l'environnement sur des échelles de temps de l'ordre de la centaine d'années (Figure 4), le cycle des composites synthétiques présente de nombreuses étapes de transformation et une augmentation très significative des temps requis pour l'assimilation de la matière par le milieu naturel (Figure 5).

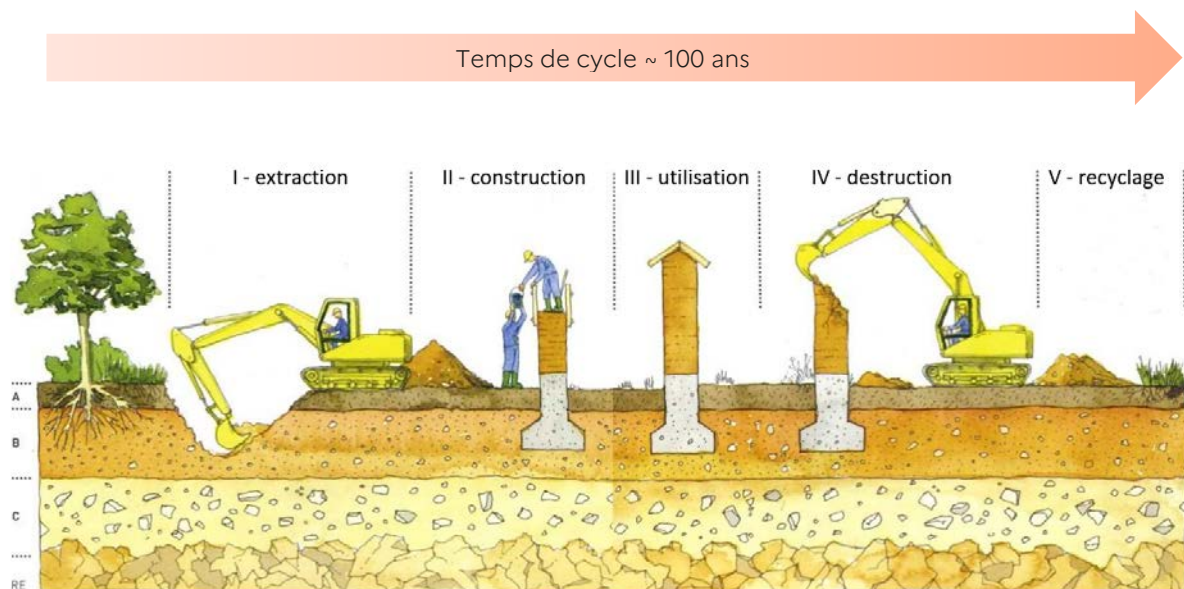


Figure 4 : Cycle de vie des matériaux de construction à base de terre (crédit : Anger & Fontaine).

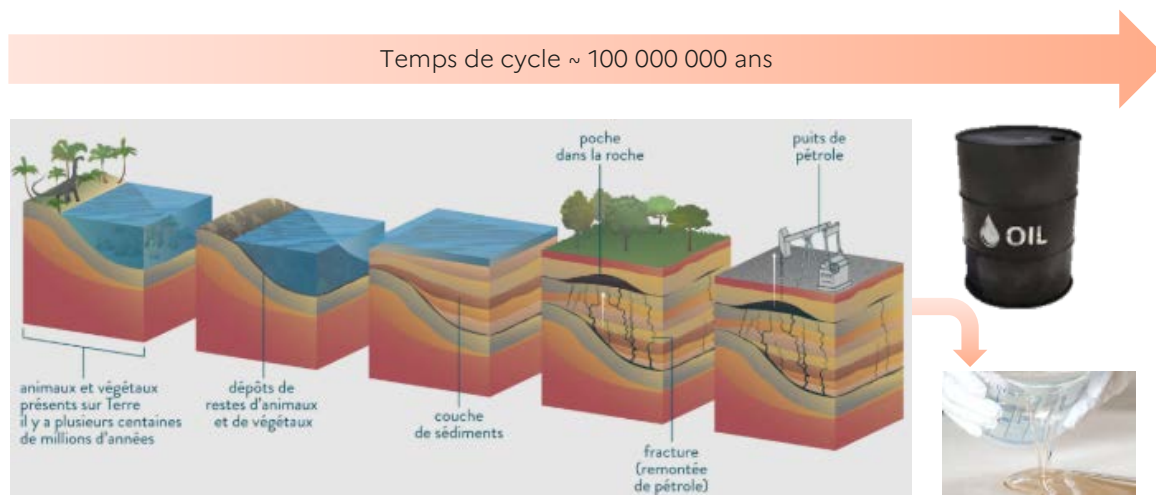


Figure 5 : Cycle de formation du pétrole, première étape de fabrication des polymères de synthèse (crédit : Schoolmouv).

L'enjeu d'aujourd'hui se trouve dans la fabrication de matériaux composites recyclables et/ou biodégradables. Une approche appréhendée comme un retour aux sources puisqu'elle met à l'honneur les matériaux issus de ressources renouvelables.

Les composites biosourcés représentent en effet un axe de compétitivité majeur, puisque de nombreux acteurs, rivalisent d'innovation en développant des systèmes de plus en plus écologiques, notamment dans le secteur du nautisme.

Par exemple, le navigateur Roland Jourdain, fondateur de la société Kairos qui cumule une activité de course au large et un pôle de développement de matériaux, avait construit en 2013 un trimaran de 7 m en fibre de lin. Fort de cette expérience, c'est désormais un catamaran de plus de 18 m en fibre de lin qu'il fait construire au sein du chantier Outremer. Les travaux ont démarré en septembre 2021, et le bateau sera mis à l'eau à l'été 2022.



Figure 6 : Le Gwalaz, premier trimaran éco-conçu [2].

1.1.2. Les composites à Matrice Organique (CMO) et à renfort fibreux (continues / discontinues)

Définition d'un matériau composite

Au sens large, un matériau composite est constitué d'au moins deux éléments non miscibles dont la combinaison confère à l'ensemble des propriétés supérieures à celles des éléments pris séparément. Il se distingue en cela de l'alliage qui est obtenu à partir de deux matériaux solubles l'un dans l'autre. Au niveau industriel, les matériaux composites désignent plus précisément des produits constitués à base de matrices et renforcés par des fibres.

Familles de matériaux composites [3]

Le périmètre de ce guide est limité aux composites à matrice organique (CMO) et fibres moyennes à longues. On trouve aussi l'acronyme FRP (*Fiber Reinforced Plastic* – Plastiques Renforcés de Fibres). Dans ce type de composites, les fibres ou renforts apportent la structure et les performances, le polymère, nommé matrice ou liant, enrobe les fibres et les lie entre elles. Les propriétés du matériau dépendent donc de l'adhésion des fibres à la matrice ainsi que de l'orientation des fibres.

Les polymères chargés de fibres courtes ne sont pas considérés dans ce guide. En effet, il a été choisi de centrer l'analyse sur les matériaux pour lesquels il existe actuellement des verrous importants pour la gestion de la fin de vie. Il s'agit des composites à fibres longues et sur les composites à matrice thermodurcissable. Pour cette raison, le recyclage et l'écoconception des polymères chargés en fibres courtes n'est pas considéré dans ce développement.

Plus généralement, les trois grandes familles de matériaux composites, classés en fonction de leur matrice, sont :

- Les composites à matrice organique (CMO), qui représentent la majorité des composites. Ils sont constitués de résines polymères (thermoplastiques ou thermodurcissables) ;
- Les composites à matrice céramique (CMC) présentent un coût très élevé et restent actuellement limités aux applications destinées aux très hautes températures comme l'industrie spatiale ;
- Les composites à matrice métallique (CMM), constitués de métaux légers (aluminium, titane, etc.) restent encore très complexes à produire, notamment par rapport aux alliages déjà disponibles.

Pour les composites à matrice organique, un traitement est ajouté sur la surface des fibres. Les principaux objectifs recherchés par les fabricants de fibres sont les suivants :

- Mise en œuvre des matériaux : protéger la fibre contre l'abrasion et assurer la cohésion des filaments constitutifs du fil ;
- Propriétés du composite : améliorer l'adhésion avec la matrice polymère.

Ce traitement est appelé ensimage des fibres (ou sizing en anglais). La composition chimique du traitement appliqué pour l'ensimage dépend du savoir-faire du producteur et de l'application ciblée pour le matériau.

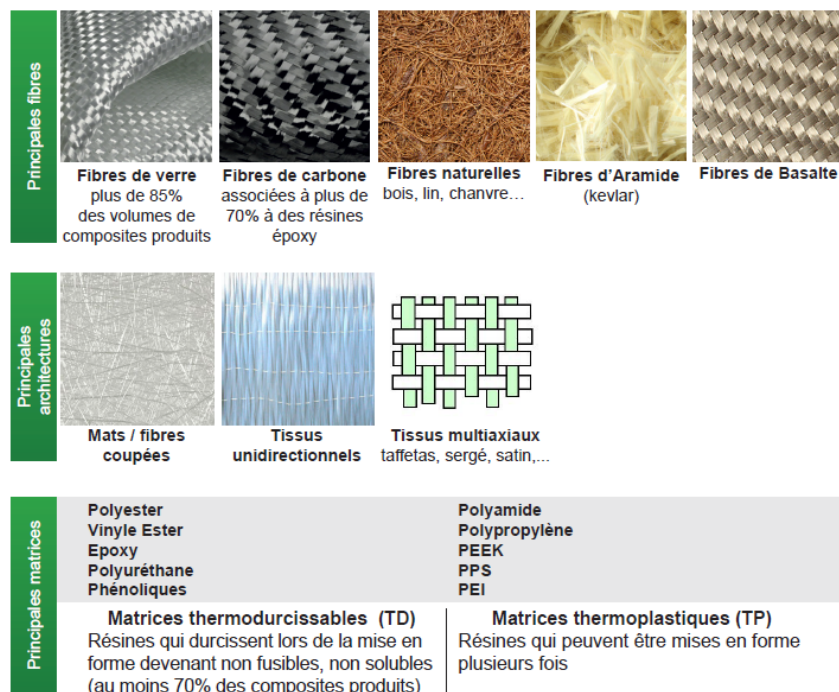


Figure 7 : Principales matrices, fibres de renforcement utilisés pour les CMO [21].

Ces formulations complexes peuvent en plus contenir des charges minérales comme des craies et carbonates, des silices, des talcs, des argiles, des oxydes et hydrates métalliques, du verre (poudres, billes, ...), du noir de carbone, etc.

1.1.3. Avantages et limites

Les composites sont généralement identifiés pour leurs bonnes performances mécaniques pour une masse limitée, moyennant un coût plus élevé que les matériaux classiques. Les principaux avantages et limites des matériaux composites sont présentés dans le Tableau 2.

Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> • Gain de masse • Mise en forme de pièces complexes et réduction du nombre d'interfaces • Tenue aux agents chimiques • Résistance à la corrosion • Résistance en fatigue • Amélioration de l'isolation phonique • Réparation possible avec peu de moyens 	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de cycle de production • Résistance aux chocs • Coût matière première et mise en œuvre • Souplesse par rapport à l'acier • Tenue thermique • Comportement au feu (fumées toxiques) • Sensibilité au vieillissement (UV, eau)

Tableau 2 : Avantages et limites des matériaux composites.

1.2. Les constituants de base des CMO

Comme il a été défini précédemment, un matériau composite est constitué d'un liant, résine thermodurcissable (polyester, époxyde, etc.), matière thermoplastique (polypropylène, polyamide) ou aujourd'hui, biosourcées et de fibres longues ou courtes (verre, carbone, kevlar, etc.). Ces différents éléments sont présentés dans les parties suivantes.

1.2.1. Les matrices

Les matrices utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont principalement de deux types. On retrouve les matrices thermodurcissables (TD) ainsi que les matrices thermoplastiques (TP). Par ailleurs, depuis quelques années, un réel intérêt se développe autour des résines biosourcées du fait de leur impact potentiellement moindre sur l'environnement. Cette dernière catégorie, qui peut se présenter sous la forme de résine thermoplastique et thermodurcissable, constitue le troisième type de résine qui sera détaillé dans cette section.

1.2.1.1. Les matrices thermodurcissables (TD)

Les polymères thermodurcissables peuvent être définis comme des structures dans lesquelles un réseau tridimensionnel est formé par des liaisons chimiques résultant d'une réaction de polymérisation entre une résine et un durcisseur. La mise en place de ce réseau 3D dense de liaisons covalentes leur confère un caractère infusible et insoluble. De ce fait, ils ne peuvent pas être refondus après leur synthèse. Les pièces produites en polymères thermodurcissables ne peuvent donc pas être remodelées pour l'obtention d'autres pièces. En raison du caractère infusible de ces matériaux, leur synthèse a lieu durant la fabrication d'une pièce. Ce mode de transformation présente des avantages et des limites par rapport à la fabrication de pièces en polymère thermoplastique.

Les principales familles de résines thermodurcissables sont présentées dans le Tableau 3.

Nature de résine	Tenue thermique (maxi en continu)	Tenue chimique	Prix de la résine ordre de grandeur année 2017
Polyester standard	80 °C	Faible à moyenne	2 – 4 €/kg
Vinylester	100 à 140 °C	Très bonne	4 – 8 €/kg
Epoxyde	120 à 200 °C	Très bonne	6 – 15 €/kg (>15 €/kg : résine aéronautique)
Polyimide	200 à 300 °C	Bonne	>50 €/kg

Tableau 3 : Caractéristiques de tenue thermique/chimique et de prix des résines thermodurcissables (CETIM).

1.2.1.2. Les matrices thermoplastiques (TP)

En termes de polymères, les thermoplastiques possèdent la caractéristique de pouvoir « fondre » ou de se « ramollir » avec un apport calorifique. Cette propriété particulière leur confère la possibilité d'être remodelés et donc réutilisés plusieurs fois sous certaines conditions. Une pièce fabriquée en thermoplastique, peut donc être utilisée comme base d'une autre pièce. De cette manière, elles constituent aujourd'hui une alternative intéressante aux résines thermodurcissables.

Les polymères thermoplastiques regroupent une variété très importante de matières. Cette variété peut être classée en 3 gammes :

- La gamme des polymères de grande distribution et de faible technicité. Cette gamme regroupe notamment, les polyoléfines (polypropylène PP, polyéthylène PE), les PVC (polyvinyle de chlorure) et les polystyrènes (PS). Ces matières sont produites en très grandes quantités (plusieurs milliers à plusieurs millions de tonnes par an) et ont des prix au kilo relativement faibles (< 4 €/kg) ;
- La gamme des polymères techniques. Cette gamme regroupe notamment, les polyamides (PA), les polycarbonates (PC), les polyméthacrylates (PMMA), les polyéthylène téréphtalates (PET), etc.

Ces matières sont produites en grandes quantités (plusieurs milliers à plusieurs millions de tonnes par an) et ont des prix intermédiaires (de 1,50 à 12 €/kg) ;

- La gamme des polymères hautes performances. Cette gamme regroupe notamment, les polysulfures de phénylène (PPS), les polyarylétones (PAE dont PEEK, PEEK, etc.), les polyimides (PI), les polyphénylsulfones (PPSU), les polyetherimides (PEI), etc. Ces matières sont produites en faibles quantités (centaines à milliers de tonnes par an) et ont des prix souvent élevés (> 15 €/kg).

Aujourd'hui, les résines les plus couramment utilisées pour la fabrication de matériaux composites sont présentées dans le Tableau 4. A noter que les informations de ce tableau sont des ordres de grandeur. Les composites à liant thermoplastique (composite TP) sont plus récents et leur comportement est moins connu que celui des composites thermodurcissables (composite TD).

Nature de plastique	Tenue thermique (maxi en continu)	Tenue chimique	Gamme de prix (€/kg) ordre de grandeur année 2017
Polypropylène	80 °C	Excellente	1
Polyuréthane TP	80 °C	Moyenne	4
Polyamide 12	110 °C	Bonne	5
Polyamide 6 et 66	150 °C	Bonne (mais rigidité et dimension évolutives selon taux humidité)	3
PEI	180 °C	Moyenne	15
PPS	200 °C	Bonne	9
PEEK	300 °C	Très bonne	> 40

Tableau 4 : Caractéristiques de tenue thermique/chimique et de prix des résines thermoplastiques (CETIM).

1.2.1.3. Les matrices biosourcées

Le vocabulaire dédié aux matériaux et produits éco-responsables est très riche et peut parfois être utilisé à tort. Ainsi, une matrice biosourcée est définie comme étant une résine issue de ressources biologiques et renouvelables.

Une ressource biologique désigne les composantes de la biodiversité qui ont une utilisation directe, indirecte ou potentielle pour l'humanité [5].

Une ressource renouvelable est une ressource naturelle dont le stock peut se reconstituer sur une période courte à l'échelle humaine de temps en se renouvelant au moins aussi vite qu'elle est consommée [6].

Les résines biodégradables peuvent être biodégradables ou non- biodégradables comme en témoigne le diagramme présenté en Figure 8.

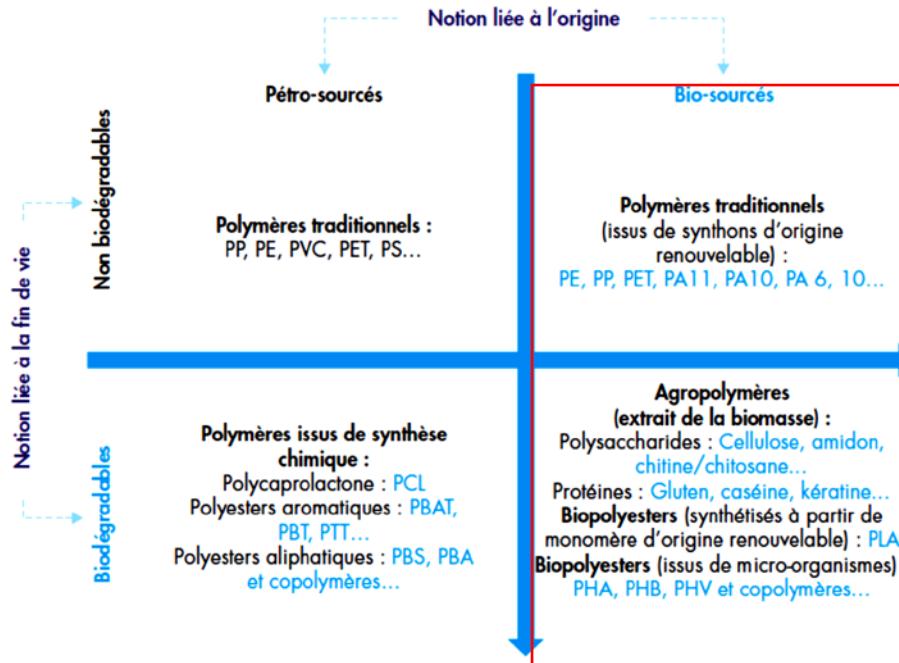


Figure 8 : Exemple de matrices biosourcées [4].

On remarque alors qu'il est possible d'obtenir des polymères dits traditionnels, tels que les PE, PP, PET, PA, ... à partir de matières premières d'origines renouvelables. Ces polymères ne sont cependant pas biodégradables.

On trouve dans les polymères biosourcés quatre classes de polymères également biodégradables : les polysaccharides, les protéines, les biopolyesters issus de monomères d'origine renouvelable et les biopolyesters issus de micro-organismes.

Gardons tout de même à l'esprit, d'une part, que la production mondiale de plastique en 2017 est évaluée à 348 millions de tonnes et la part des matrices biosourcées est d'environ 1 % [7]. D'autre part, les solutions composites fabriquées aujourd'hui à partir de résine 100 % biosourcées (PLA, PHA, etc.) ne permettent pas de rivaliser avec les structures issues de la pétrochimie sur le plan mécanique [8].

1.2.2. Les renforts fibreux

Les matériaux composites peuvent être constitués de fibres aux propriétés mécaniques élevées, incorporées dans la matrice polymère. Les fibres de ces matériaux sont les éléments porteurs des efforts mécaniques qui fournissent la résistance et la rigidité, tandis que les matrices polymères maintiennent l'alignement des fibres (position et orientation) et les protègent contre l'environnement ainsi que les dommages éventuels. Leur nature, taux volumique, orientation, influent grandement sur les propriétés d'une structure en particulier sur sa rigidité. De même que pour les matrices, il existe plusieurs types de renforts fibreux que l'on classe principalement en deux familles :

- Les fibres discontinues : des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids) ;
- Les fibres continues : sous forme de fibres longues, elles sont généralement utilisées pour les composites hautes performances. Elles offrent une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevé qu'une même pièce en métal.

Les parties ci-dessous s'intéressent principalement aux renforts continus qui permettent de créer des structures résistantes adaptées aux contraintes mécaniques. Parmi elles, deux sous-catégories se distinguent, les fibres synthétiques et les fibres naturelles.

1.2.2.1. Les fibres synthétiques

Parmi les fibres synthétiques, les fibres de verre sont les plus largement utilisées dans les composites polymères renforcés de fibres synthétiques (CPRFS), car elles offrent une bonne résistance et rigidité, une résistance aux chocs, une résistance chimique et une stabilité thermique à bas prix [9]. Les fibres de carbone sont appliquées à la place des fibres de verre, lorsque la rigidité la plus élevée est requise. D'autres types de fibres synthétiques comme l'aramide, le basalte, le polyacrylonitrile, le polyéthylène téréphtalate ou les fibres de polypropylène existent également mais ont un usage plus confidentiel que les composites à fibres de verre.

L'objectif de cette partie est de donner un aperçu des différents types de fibres en ce qui concerne leurs propriétés mécaniques, leurs densités et leurs performances. Les propriétés mécaniques sont présentées dans le Tableau 5.

Pour la fibre de verre, l'exemple de la fibre de verre « de type E » est donné. Cette fibre est utilisée pour un usage général et se distingue de fibres de verre plus spécifiques, telles que :

- La fibre « de type D », pour des hautes propriétés diélectriques, faibles pertes diélectriques ;
- La fibre « de type AR » (Alcali Résistant) pour une haute résistance aux acides et bases (ciments) ;
- La fibre « de type C » pour une haute résistance chimique ;
- La fibre « de type S, R » pour des propriétés mécaniques élevées.

Il existe de multiples grades parmi les fibres de carbone qui offrent des niveaux de rigidité et de résistance différents. Les familles de produits les plus courants sont les fibres Haute Résistance (HR) et Haut Module (HM).

	Module d'élasticité (GPa)	Contrainte à rupture (MPa)	Allongement (%)	Densité (g/cm ³)	Gamme de prix (€/kg)
Verre E	73	2 500	4,0	2,5	2
Carbone Haute Résistance (HR)	> 230	> 3 500	1,5	1,8	15 – 25
Carbone (Haut Module (HM))	> 350	> 2 500	0,5	1,8	> 100
Aramide	124	> 2 500	2,5	1,5	15 – 20

Tableau 5 : Exemples de fibres synthétiques (CETIM).

1.2.2.2. Les fibres naturelles

Bien que les CPRFS possèdent une résistance mécanique exclusive, ils présentent des limites tels qu'un coût élevé, et une aptitude au recyclage plus faible que les polymères non chargés. Pour ces raisons, au cours des dernières années, les composites polymères renforcés de fibres végétales naturelles ont de plus en plus attiré l'attention en tant qu'alternative viable aux CPRFS. Dans certaines applications composites, les fibres biosourcées se sont révélées compétitives par rapport à la fibre de verre. Les composites renforcés de fibres naturelles avec matrices thermoplastiques ont prouvé avec succès leurs qualités dans divers domaines d'application tels que le bâtiment, l'isolation thermique, l'automobile, etc [10]. L'intérêt croissant pour l'utilisation de fibres végétales naturelles comme renfort de composites à base de polymères est principalement dû à leur disponibilité à partir de ressources naturelles renouvelables, leur résistance, leurs modules spécifiques satisfaisants, leur légèreté, leur faible coût (par rapport aux fibres synthétiques) et à leur biodégradabilité [11].

Si la résistance mécanique d'un composite polymère renforcé de fibres naturelles ne peut toujours pas égaler celle d'un composite à fibres de carbone, et rendent certaines applications inaccessibles aux fibres naturelles, des recherches approfondies ont été menées et continuent d'apporter des solutions permettant d'améliorer leurs propriétés mécaniques (à biodégradabilité et faible densité des fibres inchangées). Afin d'illustrer ces propos, le Tableau 6 montre des exemples de résistance mécanique et de module d'Young pour des composites biosourcés à base de polypropylène (PP) ou d'acide polylactique (PLA) renforcés par des fibres de lin, de kénaf ou de chanvre [12]. De plus, l'élimination de l'eau absorbée des fibres augmentent les propriétés de flexion et de traction des stratifiés en fibre de kénaf, ce qui constitue encore une perspective d'amélioration des propriétés des composites renforcés par des fibres naturelles.

Agro-composite (% en masse)	Contrainte maximale (MPa)	Module (GPa)
Chanvre / PP (20/80)	29	15
Chanvre / PP (40/60)	36	4
Chanvre / PLA (20/80)	60	7
Chanvre / PP (30/70)	29	4
Lin / PP (30/70)	29	5
Lin / PLA (20/80)	49	5
Lin / PLA (30/70)	53	8
Kénaf / PLA (30/70)	130	13

Tableau 6 : Propriétés mécaniques de quelques composites biosourcés.

Le Tableau 7 présente quelques exemples de fibres naturelles [13].

Fibre	Module d'élasticité (GPa)	Contrainte à la rupture (MPa)	Allongement (%)	Densité (g/cm ³)	Gamme de prix (€/kg)
Chanvre	70	550 – 900	1,6	1,4 – 1,6	-
Lin	30 – 80	345 – 1 500	1,2 – 3,2	1,4 – 1,5	6 – 10
Jute	10 – 30	400 – 800	1,5 – 1,8	1,4 – 1,5	-
Ramie	45 – 130	290 – 1 060	2,0 – 3,8	1,5	-
Kénaf	10 – 60	220 – 940	1,6 – 4,3	0,6 – 1,5	-
Noix de coco	4 – 6	175 – 220	15,0 – 30,0	1,2	-
Sisal	10 – 40	400 – 700	2,0 – 14,0	1,3– 1,5	-
Bambou	25 – 40	500 – 600	1,9 – 3,2	1,2 – 1,5	-
Canne à sucre	4 – 6	170 – 350	6,3 – 7,9	1,1 – 1,6	-

Tableau 7 : Exemple de fibres naturelles [14].

1.2.3. Les semi-produits

Les matériaux composites peuvent être disponibles sous forme de différents semi-produits. Le Tableau 8 répertorie les semi-produits disponibles sur le marché.

	Nom du semi-produit et mode de mise en œuvre	Illustration
Semi-produits thermodurcissables	<p align="center">SMC – BMC (Sheet & Bulk Molding Compound)</p> <p>Matériaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fibres non tissées (verre) ; • Résine non polymérisée (polyester) ; • Ingrédients catalytiques ; • Charges minérales (CaCO₃). <p>Mise en œuvre : apport calorifique permettant la polymérisation.</p> <p>Procédé : moulage par compression (SMC), par injection (BMC).</p>	 <p align="center">(crédit : IDI Composites)</p>
	<p align="center">Préimprégné thermodurcissable (aussi appelé « Prepreg »)</p> <p>Matériaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fibres unidirectionnelles ou tissées (carbone, verre, etc.) ; • Résine (époxyde, polyimide, etc.) non polymérisée pour les matrices thermodurcissables ; • Ingrédients catalytiques. <p>Mise en œuvre : apport calorifique permettant la polymérisation.</p> <p>Procédé : moulage par drapage-autoclave, sous vide, par compression.</p>	 <p align="center">(crédit : Matmatch)</p>
Semi-produits thermoplastique	<p align="center">Co-mêlé</p> <p>Matériaux : fil composé de multiples filaments fait de fibres de renfort mélangés à la matrice thermoplastique.</p> <p>Mise en œuvre : voie fondue.</p> <p>Procédé : moulage par cycle pression température.</p>	 <p align="center">(crédit : Université de Montréal)</p>

<p style="text-align: center;">Organosheet – plaque composite</p> <p>Matériaux : plaque composite thermoplastique pré -imprégnée (les fibres sont imprégnées par la résine thermoplastique à cœur (PA, PP, PEEK, PPS, etc.)). L'épaisseur et les dimensions peuvent être variables en fonction du fournisseur et du besoin.</p> <p>Mise en œuvre : voie fondue.</p> <p>Procédé : moulage par thermo-estampage.</p>	 <p style="text-align: center;">(crédit : Compositesworld)</p>
<p style="text-align: center;">Tape</p> <p>Matériaux : fine bande de fibres unidirectionnelles pré imprégnée de résine thermoplastique (les fibres sont imprégnées par la résine thermoplastique à cœur (PA, PP, PEEK, etc.)).</p> <p>Mise en œuvre : voie fondue.</p> <p>Procédé : moulage par thermo estampage, enroulement filamentaire thermoplastique.</p> <p>Photo : produit destiné à l'enroulement filamentaire (tape carbone).</p>	 <p style="text-align: center;">(crédit : BASF)</p>
<p style="text-align: center;">Filament d'impression 3D renforcé</p> <p>Matériaux : filament de fin diamètre composé de fibres unidirectionnelles préimprégnées de résine thermoplastique (PA, PP, PEEK, etc.).</p> <p>Mise en œuvre : voie fondue.</p> <p>Procédé : fabrication additive (FDM - Fused Deposition Modeling).</p>	 <p style="text-align: center;">(crédit : Sculpteo)</p>

Tableau 8 : Semi-produits composites à partir de matrices thermodurcissables et thermoplastiques.

A noter qu'aujourd'hui, quelques-uns de ces semi-produits peuvent être réalisés à partir de ressources (partiellement) naturelles et renouvelables. De nombreuses études traitent du développement et de la caractérisation de tissus préimprégnés biosourcés pour différentes applications. Certains d'entre-eux sont d'ailleurs déjà commercialisés tels que la gamme FLAXPREG® conçu par l'entreprise EcoTechnilin. Il s'agit d'un tissu préimprégné constitué à partir de 50 % de fibres de lin et à 50 % de résine epoxy (Figure 9).



Figure 9 : Préimprégné FLAXPREG® commercialisé par EcoTechnilin (crédit : EcoTechnilin).

Les semi-produits d'impression 3D font également partie des articles disponibles sur le marché avec une origine biosourcée. Arkema propose par exemple une gamme de Rilsan® haute performance constituée d'un polyamide 11 biosourcé [15].

1.3. Les procédés de transformation et de mise en œuvre des CMO

Les fabricants de matériaux composites peuvent recourir à de multiples procédés de production. Le choix d'un procédé dépend de multiples critères, dont :

- Les caractéristiques techniques de la pièce (forme, taille, surface, etc.) ;
- Les éléments de base utilisés (résines thermodurcissables ou thermoplastiques) ;
- Les performances attendues de la pièce (haute performance, grande diffusion) ;
- La quantité de pièces à produire et les cadences ;
- Le montant des investissements nécessaires à l'adoption du procédé de fabrication.

La Figure 10 suivante présente les principaux procédés, en fonction des performances et des cadences.

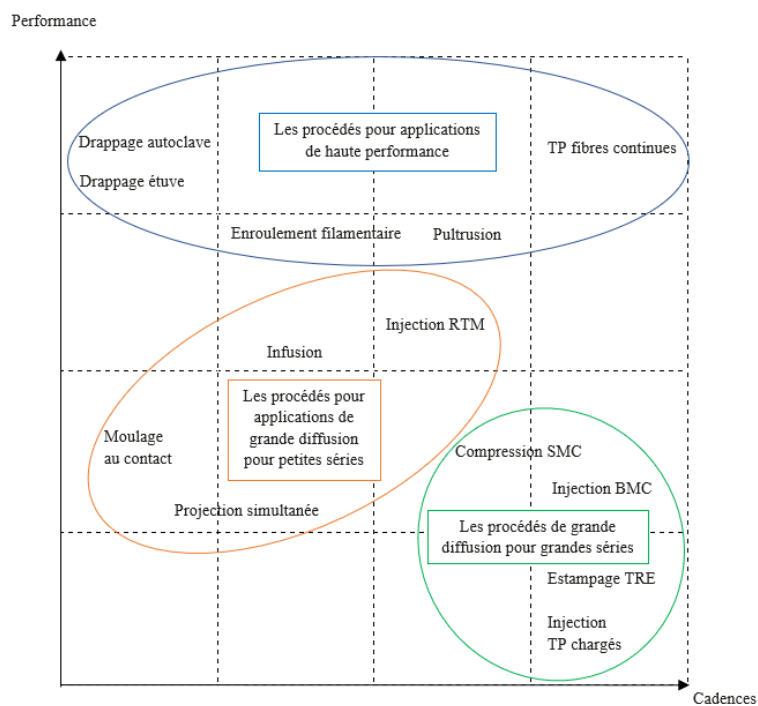
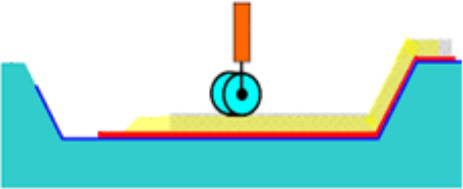

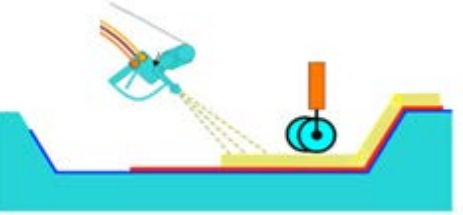

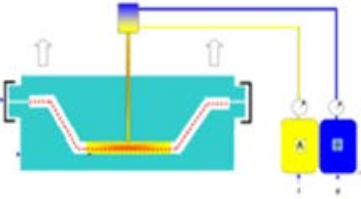



Figure 10 : Les différents procédés de fabrication des matériaux composites (crédit : Composite/IPC).

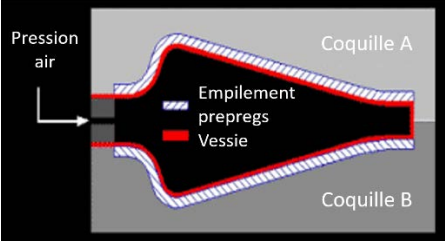
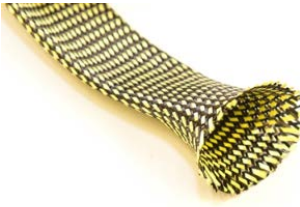
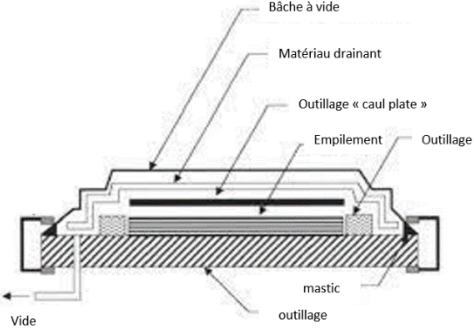

1.3.1. Procédés de fabrication des composites TD

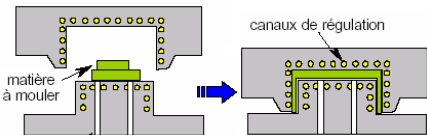
Actuellement, la plupart des pièces composites thermodurcissables renforcées de fibres continues sont formées par stratification successive de couches de tissus secs ou préimprégnés sur une surface de moule (Resin Transfert Molding ou RTM, infusion, etc.). Cette méthode est efficace pour les petites séries de production et les géométries complexes. Dans le but d'automatiser la production de pièces composites avancées à partir de préimprégnés, l'industrie aéronautique a progressivement développé des machines-outils destinées à la pose automatique de bandes préimprégnées (ATL – Automated Tape Laving). L'ensemble de ces techniques est détaillé dans le Tableau 9.

Procédé de moulage	Comment ?	Quoi ?	Avantages / Limites
<p>MOULAGE AU CONTACT</p>  <p>(crédit : Wikipédia)</p>	<p>Stratification de nappes de fibres et résine sur un moule.</p> <p>Possibilité de mettre des inserts, mousse, matériaux d'âme, etc.</p>	<p>Pièces techniques ou non à une unique surface lisse.</p>  <p>(crédit : voileetmoteur.com)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technique de moulage très simple ; • Toute forme et toute taille de pièce possible ; • Faible investissements. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Coût de main d'œuvre important ; • Émission de Composés Organiques Volatils (COV) ; • Maîtrise de la reproductibilité (selon opérateur).
<p>PROJECTION SIMULTANEE</p>  <p>(crédit : Wikipédia)</p>	<p>Projection de fibres et résine sur un moule.</p> <p>Possibilité d'inserts tels que des mousses, matériaux d'âme, etc.</p>	<p>Pièces de grandes dimensions peu sollicitées avec une unique surface lisse.</p>  <p>(crédit : SNCF)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Productivité ; • Flexibilité de formes ; • Peut-être robotisé. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rebut matière périphérique ; • Propriétés mécaniques faibles (fibres courtes) ; • Épaisseurs difficiles à maîtriser ; • Sensible à l'opérateur ; • Emission de COV.
<p>RESIN TRANSFERT MOLDING - RTM</p>	<p>Injection sous basse pression de résine en moule fermé comportant les fibres ainsi que les inserts.</p>	<p>Pièces techniques ou non à deux faces lisses.</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hygiène : Faible émission de COV ; • 2 faces lisses ; • Épaisseur maîtrisée. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Coût outillage ;

Procédé de moulage	Comment ?	Quoi ?	Avantages / Limites
 <p>(crédit : Wikipédia)</p>		 <p>(crédit : Time bicycles)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Non adapté pour des pièces de très grandes dimensions.

<p style="text-align: center;">INFUSION</p>  <p>(crédit : up-resin.com)</p>	<p>Aspiration par pompe à vide de résine dans un moule fermé comportant les fibres et inserts.</p>	<p>Pièces techniques ou non.</p>  <p>(crédit : actunautique)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Investissement moins important que pour le RTM ; • Moule économique (une seule partie) ; • Hygiène : faible émission de COV. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Consommables importants (films, tuyaux souples, mastics, ...) ; • Une surface lisse.
<p style="text-align: center;">RTM LIGHT</p>  <p>(crédit : indutch.in)</p>	<p>Infusion avec utilisation d'une peau mince stratifiée de 2 à 3 mm comme contre moule.</p>	<p>Pièces techniques ou non.</p>  <p>(crédit : SULPLAST)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Coût outillage (possibilité non métallique) ; • Hygiène : Fiable émission de COV. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Une surface lisse ; • Epaisseur moins calibrée (que le RTM).

<p>MOULAGE BIM (BLADDER INFLATION MOLDING)</p>  <p>(crédit : composite-sourcing.com)</p>	<p>Utilisation d'une vessie gonflable dans un moule extérieur en plusieurs coquilles pour maintenir la préforme pendant l'infusion.</p>	<p>Corps creux complexes.</p>  <p>(crédit : EC Fiberglass Supplies)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Surface lisse des deux côtés ; • Maîtrise de l'imprégnation ; • Hygiène : pas de COV. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Investissement outillage.
<p>DRAPAGE – AUTOCLAVE</p> 	<p>Drapage de nappes fibreuses préimprégnées suivi d'une opération de cuisson en autoclave (cycle pression – température).</p> <p>Le drapage peut être réalisé manuellement ou automatisé.</p>	<p>Pièces très techniques.</p>  <p>(crédit : Airbus)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Taux de renfort maîtrisé ; • Possibilité d'automatisation du moyen ; • Hygiène : pas de COV. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Coût matière première (préimprégnés) ; • Investissement important (autoclave).

<p>COMPRESSION SMC-BMC</p>  <p>INJECTION BMC – pièces épaisses</p> 	<p>Compression de fibres de verre préimprégnées polyester.</p> <p>Injection haute pression sur machine spéciale.</p>	<p>Pièces en grande série (> 10 000/an). Grandes pièces, faibles épaisseurs.</p>  <p>(crédit : Renault)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Matériau prêt à l'emploi ; • Productivité ; • Deux surfaces d'aspect. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Investissement moule acier ; • Découpage et/ou pesage matière à automatiser.
<p>ENROULEMENT FILAMENTAIRE</p>  <p>(crédit : CETIM)</p>	<p>Enroulement de fibres imprégnées de résine sur un mandrin.</p>	<p>Toutes pièces axisymétriques sans concavité.</p>  <p>(crédit : CETIM)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Orientation des fibres maîtrisée ; • Très bonnes propriétés mécaniques (taux de fibres élevé) ; • Surface intérieure lisse ; • Sur site possible (machine spéciale). <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Géométrie limitée (axisymétrique sans concavité) ; • Surface extérieure « rugueuse » ; • Faible cadence.



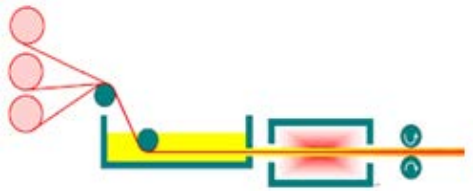

<p>PLACEMENT DE BANDES (ATL)</p>  <p>(crédit : Fives Group)</p>	<p>Procédé additif qui permet de déposer des bandes de préimprégnés de manière successive sur la surface d'un moule de drapage.</p>	<p>Pièces de très grandes dimensions (> 80 m).</p>  <p>(crédit : MTorres)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pièces de très grandes dimensions ; • Maniabilité de l'orientation des bandes lors de la dépose ; • Erreur de drapage plus faible qu'une réalisation manuelle. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Encombrement de la structure ; • Coût ; • Géométrie simple.
<p>PULTRUSION</p>  <p>(crédit : Wikipédia)</p>	<p>Traction de mèches de fibres imprégnées de résine durcissant dans une filière.</p> <p>Variantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pultrusion avec enroulement : pullwinding - Pultrusion de formes courbes : pullforming 	<p>Profilés.</p>  <p>(crédit : Epsilon Composite)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Production continue ; • Très bonne finition ; • Grandes longueurs. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limité en section (< 200 mm) ; • Epaisseur paroi constante ; • Fiable cadence (1 à 2 m/min max).

Tableau 9 : Les différents procédés de fabrication de composites thermosettables.

1.3.2. Procédés de fabrication des composites TP

Au début des années 2000, les méthodes de mise en œuvre des composites thermoplastiques renforcées se classaient principalement en deux catégories :

- L'injection qui est le procédé le plus utilisé, potentiellement renforcé de fibres courtes (cette famille de matériaux ne rentre pas dans les matériaux sélectionnés au paragraphe 1.1.2) ;
- L'emboutissage ou l'estampage de plaques.

Depuis quelques années, le panel de procédés, manuels ou automatisés, discontinus ou continus, d'élaboration et de mise en forme de composites thermoplastiques n'a cessé de se développer. Aujourd'hui, les composites à base de résine thermoplastique peuvent être transformés quasiment par l'ensemble des procédés utilisés pour la mise en œuvre des composites thermodurcissables. En effet, la situation actuelle dans l'industrie permet d'offrir une gamme élargie de matrices polymères thermoplastiques répondant aux mêmes critères de transformation que les résines thermodurcissables. Notamment l'augmentation de la fluidité des matrices thermoplastiques par l'intermédiaire de résines réactives a permis d'améliorer l'imprégnation du renfort fibreux (infusion, RTM, etc.) [16].

C'est par exemple sous la marque Elium®, qu'Arkema a lancé la première gamme de résines thermoplastiques liquides qui se transforment avec les mêmes procédés que ceux utilisés pour les composites thermodurcissables. La solution proposée consiste en un mélange de polymère à base acrylique dilué dans un monomère réactif qui rendent la résine fluide durant le procédé. Au cours du procédé un initiateur de polymérisation, mélangé à la résine, réagit pour donner la matrice thermoplastique. Cette avancée technologique permet de concevoir des pièces composites, facilement thermoformables et recyclables, aux performances mécaniques comparables à celles des pièces en époxy.

Des procédés de thermo-estampage / surmoulage se sont également développés. Par exemple, le CETIM a développé une ligne de production intégrée, de la fibre au produit fini, pour les composites thermoplastiques à fibres continues (carbone, verre, etc.) et les composites hybrides. Ce procédé, appelé "Quilted Stratum Process" (QSP), permet de réaliser des pièces en composite estampées sous presse avec une sur-injection de plastique pour réaliser des fonctions supplémentaires (finition de bords de pièce, ajout d'inserts, raidisseurs). Les temps de cycle sous presse sont de l'ordre d'une à deux minutes, poursuivant ainsi le but d'accéder à des procédés grande cadence pour les composites.

Des procédés de fabrication par dépôt de bande thermoplastique sont également en cours de développement, sur un modèle similaire à la dépose de matière thermodurcissable. La différence principale réside dans le fait que le composite thermoplastique est consolidé in-situ par un moyen de chauffe locale, généralement laser, et ne nécessite pas de phase de polymérisation par cuisson ultérieure.

Plus généralement, les thermoplastiques permettent l'assemblage par soudure au lieu du collage, diminuant ainsi les problématiques liées aux colles et solvants.

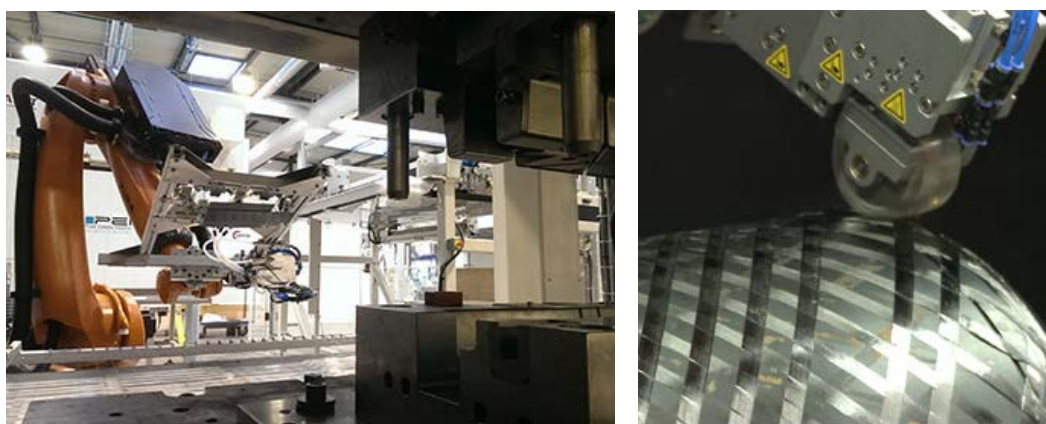
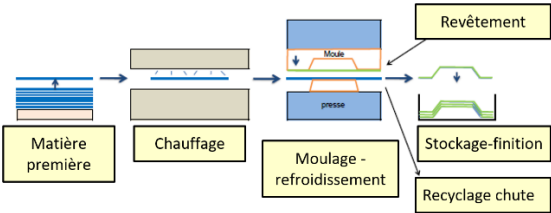

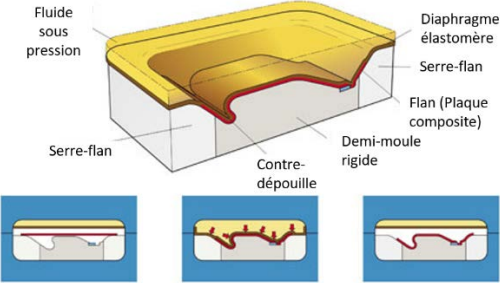
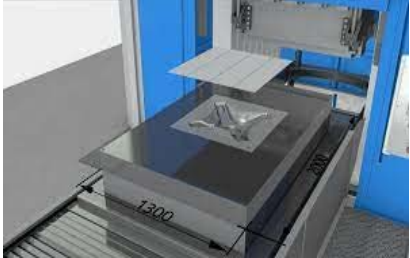


Figure 11 : Ligne QSP (gauche) ; Enroulement filamentaire SPIDE TP (droite) (crédit : CETIM).

Ainsi, de nombreux procédés sont rendus accessibles à la transformation des composites thermoplastiques. Le Tableau 10 reprend une liste non-exhaustive de leur technique de mise en œuvre.

Les méthodes de moulage par transfert de résine (RTM), infusion, etc. ne sont pas présentées dans ce tableau (bien qu'il y ait également la possibilité de les utiliser pour mettre en œuvre les composites thermoplastiques) car elles ont déjà été détaillées dans le Tableau 9.

Procédé de moulage	Comment ?	Quoi ?	Avantages / Limites
<p style="text-align: center;">THERMOCOMPRESSION</p>  <p style="text-align: center;">(crédit : SIA industry)</p>	<p>Technologie de moulage en une seule opération de compression des matériaux entre deux plaques chaudes à des pressions pouvant atteindre 300 bars, permettant ainsi la mise en œuvre de pièces relativement épaisses.</p>	<p>Pièces d'aspect et des pièces structurales</p>  <p style="text-align: center;">(crédit : Renault Trucks)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Une seule opération de mise en œuvre ; • Choix de l'organisation des couches constitutives de la pièce finale ; • Réalisation de structures sandwich ; • Pas de dégagement de solvant. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Investissement moule acier ; • Découpage et/ou pesage matière à automatiser ; • Temps de cycle long (cycle thermique des moules).
<p style="text-align: center;">HYDROFORMAGE</p>  <p style="text-align: center;">(crédit : Hasmak)</p>	<p>Procédé utilisant une membrane flexible disposée de manière étanche dans une enceinte fermée formant ainsi deux volumes. Un premier volume est occupé par un moule rigide contrôlé en température dont l'air emprisonné est évacué par un évent tandis que le deuxième se remplit d'huile sous pression venant appliquer un effort uniforme sur toute la surface du stratifié.</p>	<p>Pièces complexes.</p>  <p style="text-align: center;">(crédit : fluidforming.de)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pièces de forme complexe ; • Un seul moule à usiner ; • Pression uniforme. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Risque de variation d'épaisseur si le choix de la membrane est incorrect ; • Risque de déchirure de la membrane.

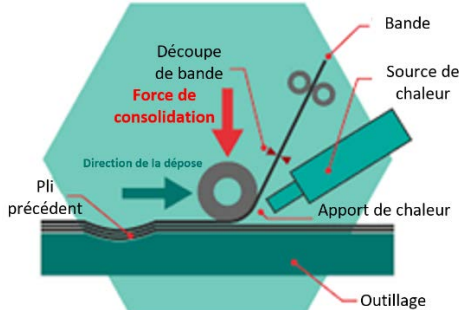

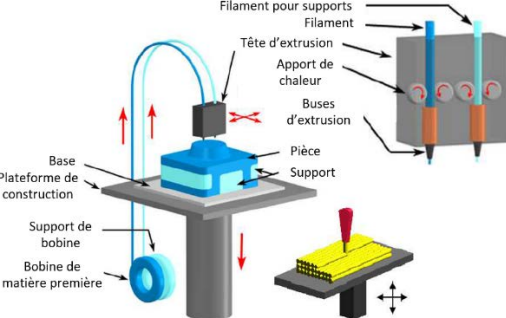

<p>PLACEMENT DE FIBRES (AFP)</p>  <p>(crédit : Composites Evolution)</p>	<p>Combinaison des procédés de placement de bande et de l'enroulement filamentaire. Procédé basé sur le soudage continu par fusion d'un pli composite à matrice thermoplastique sur un substrat [17].</p>	<p>Pièces de grandes dimensions complexes.</p>  <p>(crédit : cdcq.qc.ca)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Regroupe les avantages de l'enroulement filamentaire et du placement de bande (ATL) ; • Pièces aux géométries complexes ; • Orientation des plis, précision de drapage • Reproductibilité ; • Réduction du taux de déchets. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faible cadence ; • Coût.
<p>IMPRESSION 3D</p>  <p>(crédit : aniwaa.fr)</p>	<p>Extrusion d'un filament composite selon le procédé de dépôt de matière fondue (Fused Deposition Modeling). Le filament contient déjà la fibre. En revanche, l'impression 3D de fibres continues est un procédé plus délicat qui nécessite une machine à double extrusion afin d'imprimer simultanément le polymère et la fibre.</p>	<p>Pièces techniques, géométries complexes.</p>  <p>(crédit : 3Dnative.com)</p>	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rapidité de mise en œuvre ; • Pièces aux géométries complexes. <p>Limites :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Taux de déchets ; • Pas de fabrication grande série ; • Propriétés mécaniques encore inférieures à celles des autres procédés de mise en œuvre [18].
<p>METHODES COMMUNES TP/TD</p> <ul style="list-style-type: none"> • Infusion ; • RTM ; • Moulage en autoclave ; • Compression / injection SMC-BMC ; • Enroulement filamentaire ; • Pultrusion. 	<p>Cf. Tableau 9</p>	<p>Cf. Tableau 9</p>	<p>Cf. Tableau 9</p>

Tableau 10 : Les différents procédés de fabrication de composites thermoplastiques.

Remarque : On compte une dizaine de procédés existants pour la mise en œuvre des composites biosourcés. Parmi lesquels on retrouve, le moulage au contact, l'infusion, RTM, le moulage en autoclave, la compression SMC, la thermocompression, etc.

1.3.3. Procédés de fabrication des semi-produits composites

Parmi les semi-produits les plus utilisés, on retrouve des bandes fibrées préimprégnées de résine sous forme de ruban appelé « tapes » ou de tissus appelé « prepreg ». L'imprégnation est un phénomène physique lié notamment aux propriétés de mouillage du renfort textile : il a pour objectif de remplir la structure du renfort fibreux par une quantité définie et contrôlée de résine. La qualité d'imprégnation du renfort fibreux par la résine peut être caractérisée par le taux d'imprégnation, défini par le pourcentage de la résine dans la masse totale du stratifié. Le phénomène d'imprégnation d'un renfort fibreux par une résine se fait à deux échelles : microscopique et macroscopique.

En effet, un renfort fibreux est composé d'un assemblage de fils qui sont à leur tour composés de milliers de filaments (ou fibres). Cela signifie que l'imprégnation d'un renfort par une résine est le résultat d'imprégnation des filaments constituant le fil (micro-imprégnation), et d'imprégnation entre les fils constituant le renfort (macro-imprégnation).

Différentes méthodes d'imprégnation peuvent être trouvées dans l'industrie. Le choix de la méthode dépend des critères suivants :

- Type et structure du renfort fibreux ;
- Type de résine utilisée (solide ou liquide, thermodurcissable ou thermoplastique) ;
- Niveau demandé de polymérisation (partielle ou complète).

Ces méthodes d'imprégnation peuvent être regroupées en quatre catégories ou quatre grandes familles :

- 1- Méthodes d'imprégnation par fusion directe de la résine (« direct melt »). Cette catégorie est souvent utilisée pour produire les préimprégnés thermoplastiques ;
- 2- Méthodes d'imprégnation précédée par un mélange intime des composants de composite (fibres et résines), utilisées souvent pour les composites thermoplastiques avec :
 - o Une imprégnation en poudre (« powder impregnation ») ;
 - o Une imprégnation par superposition de films (« film stacking ») ;
 - o Une imprégnation au moyen de fibres en polymère (fibres comélangées ou « commingled fibers »).
- 3- Méthodes d'imprégnation à l'aide de solvants (« solvent impregnation »), convenant pour les composites thermoplastiques et thermodurcissables ;
- 4- Méthodes d'imprégnation en plein bain (« dip-coating »), où une résine liquide est intégrée directement dans la structure du renfort. Cette méthode est employée pour la fabrication de préimprégnés ou de composites, thermoplastiques ou thermodurcissables.

Ce paragraphe n'étant qu'une introduction, nous ne détaillerons pas l'ensemble de ces procédés de fabrication. Néanmoins, dans la thèse intitulée « Développement d'un pilote de fabrication automatisée de photo-composites semi-ouvrés (pré-imprégnés) », Anwar Shanwan détaille les différentes techniques d'imprégnation [19].

1.4. Les principaux marchés

En 2019, la taille du marché mondial des composites avait été estimée à 89,04 milliards de dollars et les prédictions semblaient confirmer une croissance avec un taux annuel de +7,6 % de 2020 à 2027 [20]. Néanmoins, après six années de croissance continue, le volume de production mondiale a stagné puis chuté pour la première fois, en 2020 (Figure 12). Cette baisse est principalement due à la pandémie de coronavirus / SARS-CoV-2, qui se poursuit depuis février 2020.

Malgré cette chute du volume de production des matériaux composites dans le monde, liée au contexte sanitaire 2020 – 2021, les estimations faites sur les cinq prochaines années ne devraient pas être impactées. Le détail de l'année 2020 indique que les plus grandes croissances se font sur trois secteurs :

- L'aérospatial : 8,9 milliards de dollars, qui a montré une croissance proche de 100 % en 6 ans ;
- La construction : 14,7 milliards de dollars, qui a augmenté de 150 % en 6 ans ;

- Le transport : 22,4 milliards de dollars, qui a augmenté lui aussi de 150 % en 6 ans.

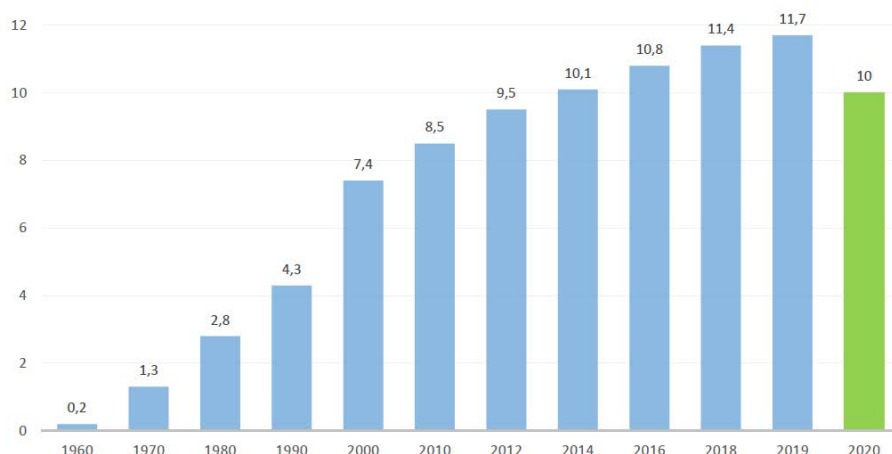


Figure 12 : Taille du marché mondial des composites en volume (Mt) de 1960 à 2020 [22].

1.4.1. Les chiffres clés

Comme il a été indiqué dans la partie précédente, le marché des composites a connu une chute de 14 % de son volume de production en 2020. La crise sanitaire a impacté cette industrie dans divers secteurs d'utilisation telles que l'aérospatiale et la défense, le transport, la construction et l'infrastructure. Les perturbations des chaînes d'approvisionnement ont entraîné des retards de livraisons des matières premières.

Cependant, il semble que le rebond du marché des composites ait déjà été anticipé. En effet, l'hydrogène est prometteur pour la filière des composites puisque jusqu'en 2030, le nombre de véhicules à hydrogène produits devrait progresser de 38 % par an. Une croissance intéressante pour les composites car les véhicules à hydrogène utilisent un nombre de plus en plus important de pièces en composites. Ces matériaux très légers et résistants sont en effet privilégiés pour la conception des réservoirs haute pression. Dans le modèle Honda Clarity, les composites représentent environ 12 % du poids du véhicule.

Le secteur de l'éolien est également jugé très dynamique par le JEC Observer, notamment en ce qui concerne les parcs offshore. « Les composites sont pertinents pour les installations en mer, car les éoliennes sont généralement plus grandes et bénéficient ainsi davantage de la résistance et de la légèreté de ces matériaux » selon WindEurope. La part de l'offshore dans les installations mondiales d'éoliennes devrait ainsi progresser de 11 % entre 2020 et 2024, passant ainsi de 8 % à 20 %.

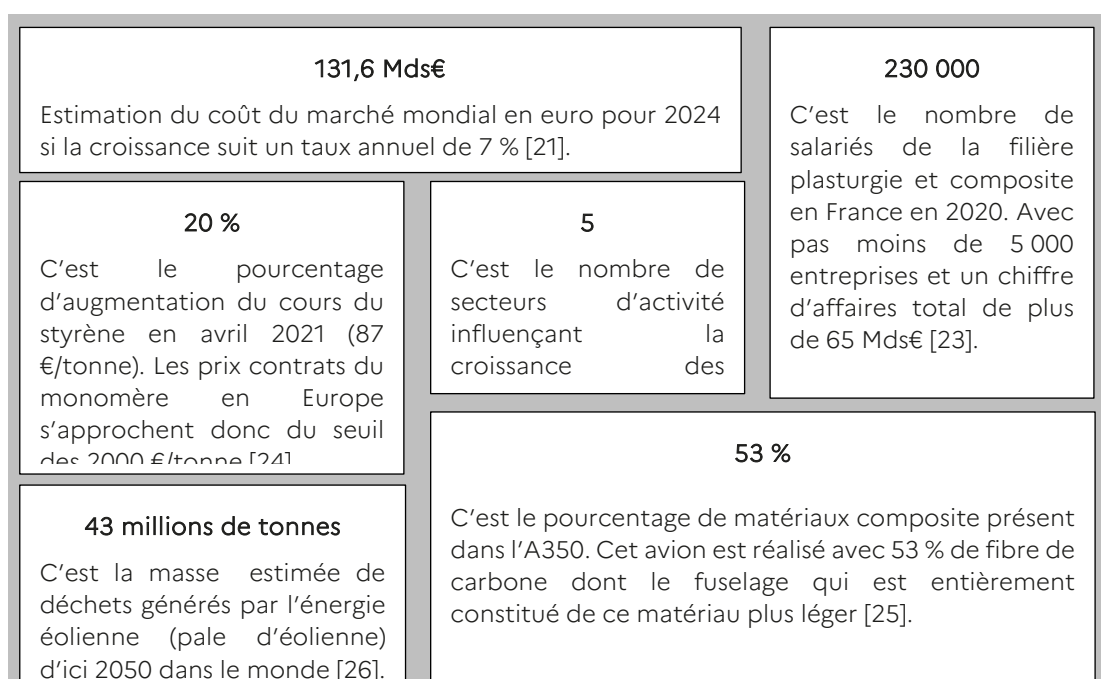


Figure 13 : Chiffres clés des matériaux composites (crédit : CETIM).

1.4.1.1. Aperçu des principaux marchés

JEC Group est une organisation dédiée à l'industrie des matériaux composites, qui met en relation les représentants de la filière, en particulier par l'organisation de salons annuels (tels que le JEC World, JEC Asia, etc.).

En 2017, selon une étude publiée par JEC Group, le marché des composites était partagé entre huit principaux segments qui sont le transport, le BTP, l'électricité – électronique, les biens de consommation, les tuyaux et réservoirs, l'énergie éolienne, l'aéronautique et le nautisme. Leurs parts de marché respectives en tonnage sont illustrées sur la Figure 14.

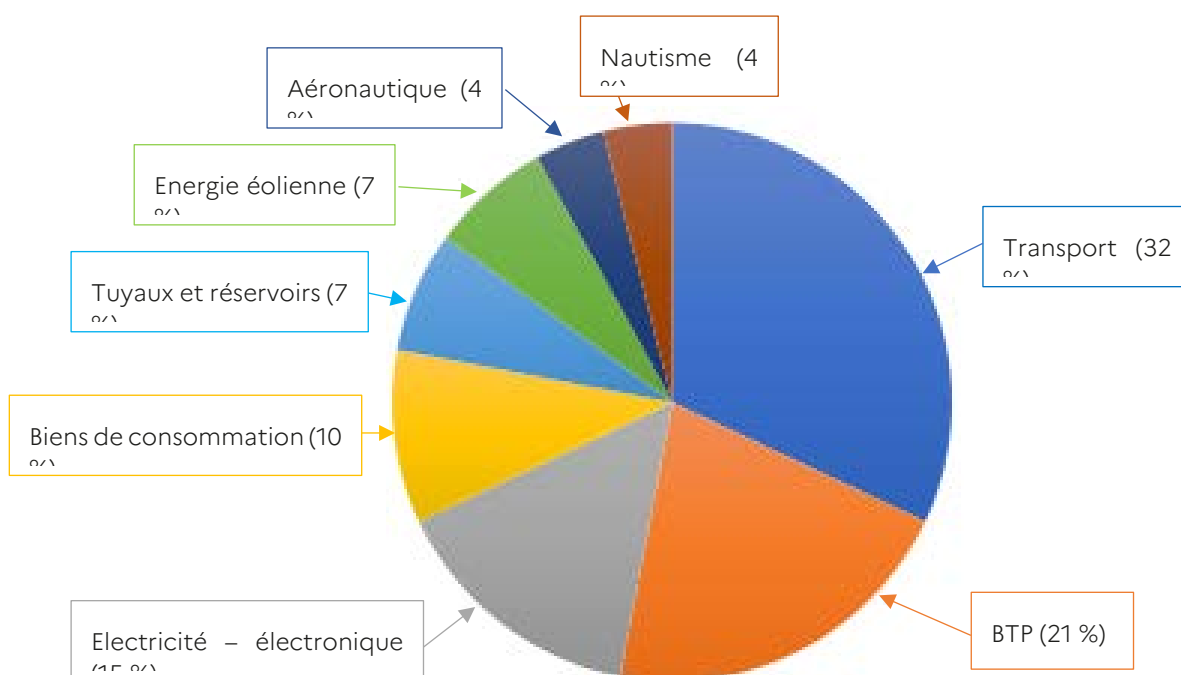


Figure 14 : Pourcentage de poids du marché client (Mt) [21].

Ces chiffres peuvent varier selon les sources, mettant en lumière la difficulté à trouver des données univoques concernant les parts de marché et volumes de production des différents matériaux composites. En effet, les facteurs pris en compte changent en fonction des différentes sources. Tandis que certaines comparent les matériaux composites dans leur ensemble, d'autres séparent les fibres courtes typiques de l'injection plastiques des fibres longues communément utilisées dans les composites.

Le choix des zones géographiques d'étude est également un élément perturbant le recouplement des chiffres.

Toutefois, en croisant plusieurs sources, nous pouvons estimer un volume de production des composites fibres longues en France en 2020 entre 125 et 150 kt. La quantité de composite fibres de verre continues produite en France en 2019 est estimée à 114 kt [27]. D'autre part le JEC estime que le marché de la fibre de verre représente environ 90 % du volume de production de composites en 2020 [22], ce qui donne un marché des fibres longues à 125 kt.

Par ailleurs, dans une étude parue en 2017 [28], le JEC estimait un volume de 490 kt de composites fibres courtes et longues en 2020. Environ 30 % correspondaient à des procédés composites, soit 147 kt.

1.4.1.2. Matériaux associés aux différents marchés

En fonction du marché, les objectifs attendus de l'utilisation des matériaux composites varient. De ce fait, la nature des matrices, des renforts sélectionnés diffère également. En effet, les propriétés recherchées par les industriels dictent le choix des matériaux à mettre en œuvre. La démarche d'écoconception prend également de l'ampleur et influence de plus en plus les décisions en termes de nature des matériaux.

Les matériaux polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) sont de plus en plus nombreux à être utilisés dans un large éventail d'industries, toutefois le transport aérien, terrestre et maritime, les éoliennes, réservoirs de stockage et équipements sportifs [29]. Cette demande croissante de CFRP découle de leur haute résistance spécifique, rigidité spécifique élevée, faible densité, facilité d'intégration pour la pièce consolidation et multifonctionnalité, et liberté de conception. On note que la demande de CFRP mondiale a triplé entre 2010 et 2020 et devrait dépasser 190 000 t d'ici 2050 [29]. La demande mondiale de CFRP en 2018 (Figure 15) montre une utilisation prédominante de CFRP dans l'aérospatiale, les pales d'éoliennes, le sport et les loisirs, et les applications automobiles. Il est intéressant de noter que la mise en œuvre de CFRP dans la fabrication de pales d'éoliennes a entraîné une utilisation de volume plus élevée (34 200 t), dépassant leur utilisation dans les applications aéronautiques traditionnelles (32 800 t). Les applications pour le stockage de gaz et de liquides représentaient 8 % de la demande mondiale, soit 11 400 t. Cependant, lorsqu'on l'analyse en termes de valeur, la répartition sectorielle des CFRP penche vers le secteur aérospatial, qui représente 73 % des ventes de CFRP. Les produits commerciaux de sport et de loisirs représentent 7 % du chiffre d'affaires, dépassant l'utilisation des CFRP dans le secteur automobile (6 %). La fraction des ventes des CFRP dans les secteurs des éoliennes et de l'automobile est relativement faible, en raison de l'utilisation de fibres de carbone à faible coût [30].

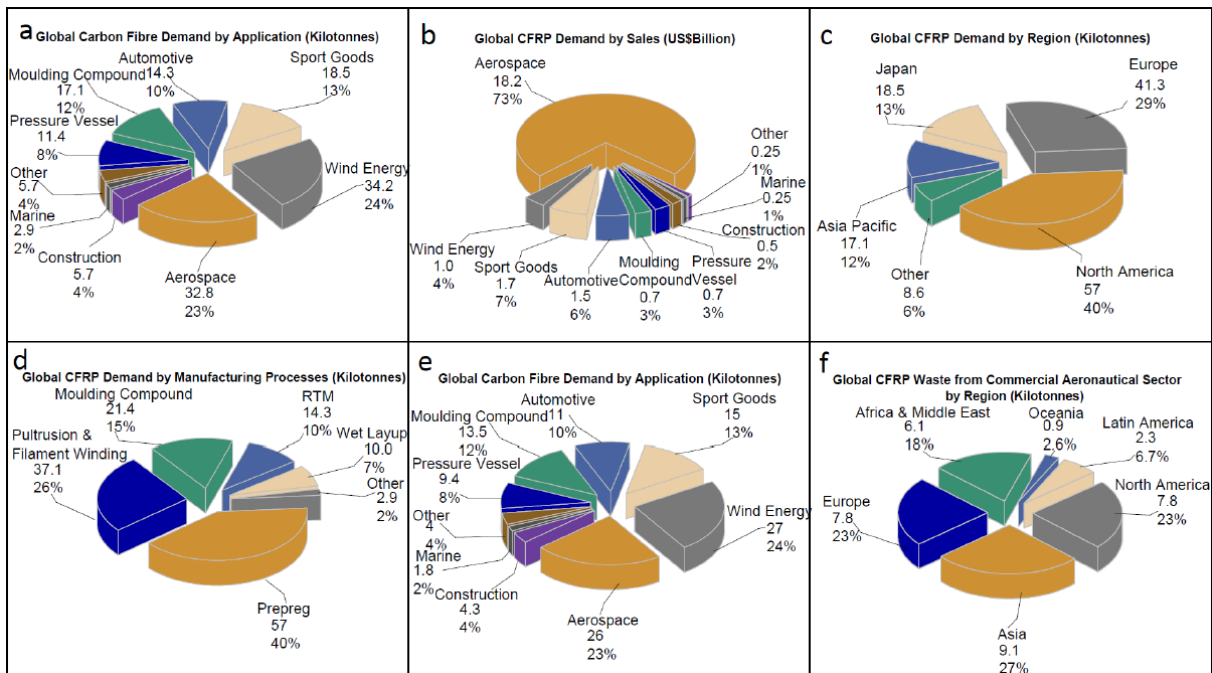


Figure 15 : Marché mondial de CFRP en 2018 [30].

1.4.2. Volumes / coûts par matériaux et marchés

En 2018, les résines thermodurcissables représentaient 61 % du marché mondial en volume tandis que les résines thermoplastiques constituaient seulement 39 %. Du côté des renforts fibreux, les fibres de verre dominent largement le paysage et représentent 88 % de part de marché mondial avec 9,4 millions de tonnes produites.

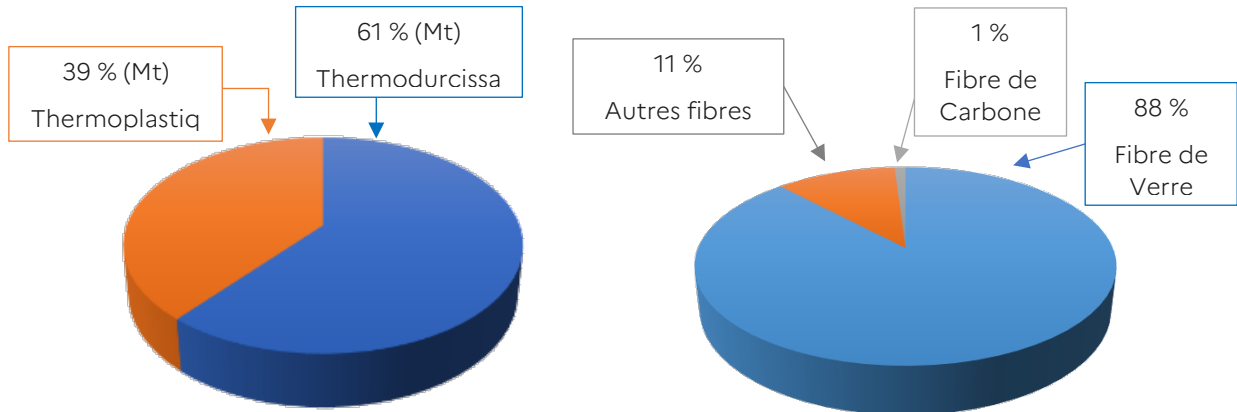


Figure 16 : Parts de marché mondial en volume (Mt) des résines et renforts fibreux en 2017 [22].

A titre d'exemple, la Figure 17 montre les principales étapes du processus, les produits intermédiaires et les prix unitaires approximatifs dans la chaîne de valeur de transformation du pétrole brut en polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP).

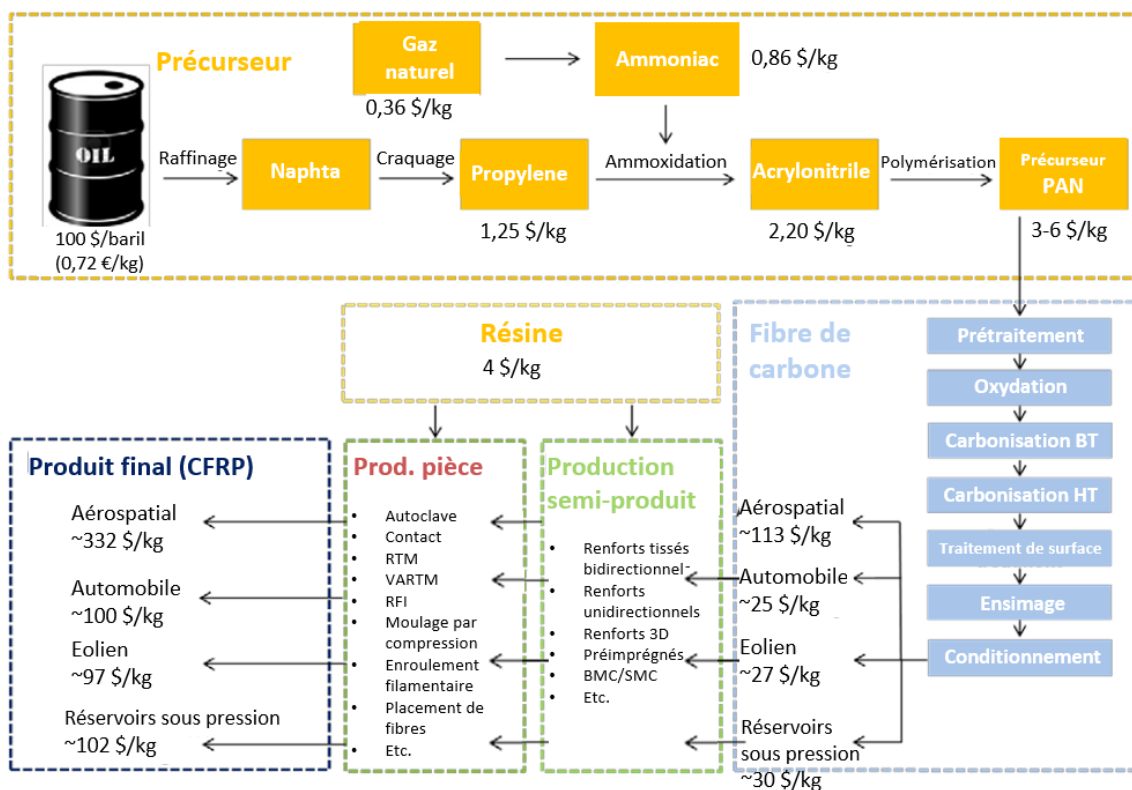


Figure 17 : Chaîne de la valeur des CFRP [29].

1.4.3. Essor des composites thermodurcissables et thermoplastiques

1.4.3.1. Projection sur les volumes futurs

Selon le JEC Observer, après la chute causée par la crise COVID-19, les cinq prochaines années (2021-2025) devraient voir reprendre la croissance du marché mondial des composites à hauteur de 2 % à 9 % par an selon les régions du monde. Les projections de 2020 corroborent cette tendance, avec une croissance mondiale annuelle de 8 % entre 2018 et 2025, et 10 % entre 2018 et 2030. De plus, le marché des composites devrait connaître un essor particulièrement élevé en 2021 pour presque toutes les applications, à l'exception de l'aérospatiale pour qui la reprise sera plus tardive.

La reprise des marchés aéronautique, automobile et énergie, liés aux développements des besoins liés aux enjeux environnementaux (allègement notamment) continuera à alimenter la croissance des matériaux composites, thermodurcissables et thermoplastiques.

1.4.3.2. Cas des composites thermoplastiques

Il suffit de comparer les avantages et les inconvénients des résines thermoplastiques avec ceux des résines thermodurcissables pour comprendre l'intérêt que porte aujourd'hui l'industrie aux thermoplastiques. En effet, l'enjeu majeur de ces dernières années qu'est la réduction de l'impact environnemental (Chapitre 3) fait pencher la balance du côté des thermoplastiques, comme ils ont un potentiel de recyclabilité plus important que les matériaux thermodurcissables. Un autre avantage des matériaux thermoplastiques est qu'ils peuvent présenter des cycles de fabrication rapides permettant la production en grande série. Le graphique présenté en Figure 18 montre l'évolution des parts de marché acquises par les thermoplastiques par rapport aux thermodurcissables entre 1980 et 2018. On remarque une nette évolution positive des thermoplastiques qui sont passés de 2 % en 1980 à 39 % en 2018.

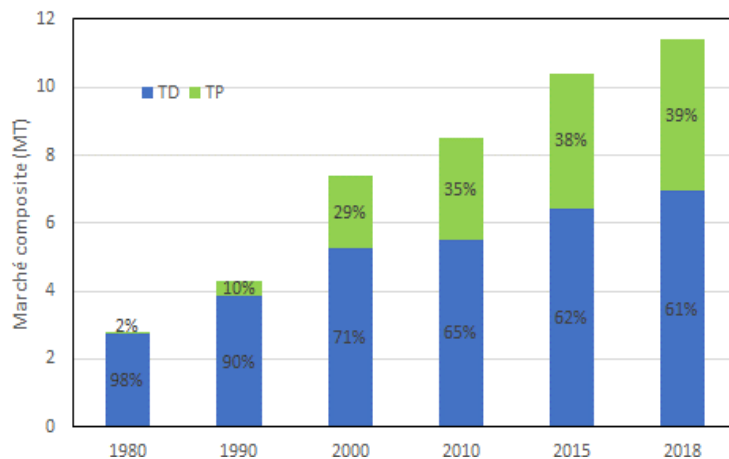


Figure 18 : Evolution des parts de marché des matériaux thermoplastiques entre 1980 et 2018 (crédit : CETIM).

De 2016 à 2020, l'utilisation de thermoplastiques techniques a augmenté à un taux de croissance annuel d'environ 5 %, plastiques et composites confondus. En 2016, le marché a été évalué à environ 201 milliards de dollars. Cependant, l'avènement de la COVID-19 a ralenti le taux de croissance du marché à l'échelle mondiale. Si l'on en croit les estimations, le marché devrait se développer avec un taux de croissance annuel d'environ 6 % au cours des 10 prochaines années (Figure 19). La taille du marché mondial des thermoplastiques techniques devrait donc passer de 246 milliards de dollars en 2020 à 464 milliards de dollars d'ici 2031. Cette croissance est liée à leurs nombreux avantages par rapport à des polymères thermodurcissables. En effet, la domination des thermoplastiques techniques dans de nombreux secteurs telles que l'emballage, l'automobile, et la démarche environnementale qui l'accompagne font des polymères thermoplastiques, un matériau de choix pour les industriels. Ils restent très convoités et de nombreuses études sont en cours pour leur évaluer la substitution des résines thermodurcissables par des résines thermoplastiques. Aujourd'hui, ils ont été largement acceptés dans de nombreux projets industriels tels que les bâtiments « écologiques », en raison de leurs recyclabilité, d'une part et de leurs bonnes performances mécaniques d'autre part [31]. Ils servent également l'électronique grand public, en raison de leurs propriétés de résistance au feu élevées qui assurent la sécurité des utilisateurs [32].

La Figure 19 récapitule les principales informations à retenir concernant l'avenir des composites thermoplastiques dans l'industrie entre 2020 et 2025.



Figure 19 : Tendence du marché des composites thermoplastiques entre 2020 et 2025 [33].

1.5. Références bibliographiques

- [1] V. Serifi, M. Tarić, D. Jevtic, A. Ristovski, et M. Šahinagić-Isović, « Historical development of composite materials », *The Annals of the University of Oradea. Economic Sciences*, vol. XXVII (XVII), janv. 2018, doi: 10.15660/AUOFMTE.2018-3.3392.
- [2] FormuleVerte, « Biocomposites : un bateau en fibres de lin ». Consulté le: 03 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.formule-verte.com/biocomposites-un-bateau-en-fibre-de-lin/>.
- [3] R. R. Nagavally, « Composite materials - history, types, fabrication techniques, advantages, and applications », *International Journal of Current Research*, vol. 8, n° 9, p. 37763-37768, 2016.
- [4] V. Colard, « Plastiques biosourcés et plastiques recyclés dans l'emballage », *Techniques de l'ingénieur*, n° AG6287 v1, 2015, doi: <https://doi.org/10.51257/a-v1-ag6287>.
- [5] Dictionnaireenvironnement, « Ressource biologique ». Consulté le: 12 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: urlr.me/9NTWP.
- [6] Wikipédia, « Ressource renouvelable ». Consulté le: 15 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: urlr.me/W4mYx.
- [7] PlasticsEurope, « Plastics – the Facts 2018 », 2018.
- [8] V. Bourg, « Intégrer des biopolymères ou des polymères biodégradables », *Techniques de l'ingénieur*, n° 0870, 2012, doi: <https://doi.org/10.51257/f-0870>.
- [9] C. Unterweger, O. Brüggemann, et C. Fürst, « Synthetic fibers and thermoplastic short-fiber-reinforced polymers: Properties and characterization », *Polymer Composites*, vol. 35, n° 2, p. 227-236, 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.22654>.
- [10] Fibres Recherche Développement, « La plateforme des valorisations applicatives des fibres végétales ». Consulté le: 14 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.f-r-d.fr/>.
- [11] Vi Vi Do Thi, « Matériaux composites à fibres naturelles / polymère biodégradables ou non. Alimentation et Nutrition », Thèse, Université de Grenoble; Université des Sciences Naturelles d'Ho Chi Minh Ville, 2011.
- [12] F. Ilcyszyn, « Caractérisation expérimentale et numérique du comportement mécanique des agro-composites renforcés par des fibres de chanvre », Thèse, Université de Technologie de Troyes, 2013. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02965743>.
- [13] L. Gélinas, « Plastiques bisourcés: étude de leur performance environnementale comparativement aux plastiques pétrochimiques », Thèse de maîtrise, Université de Sherbrooke, 2013.
- [14] A. R. Rozyanty et Z. Firdaus, « Tensile properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites », in *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Elsevier, 2019, p. 81-102. doi: 10.1016/B978-0-08-102292-4.00005-9.
- [15] Arkema. Rilsan® polyamide 11 (PA11). Consulté le : 10 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.extremematerials-arkema.com/en/product-families/rilsan-polyamide-11-resins/>.
- [16] A. Long, *Composites Forming Technologies*, Woodhead Publishing Series in Textiles. Elsevier, 2007.
- [17] M. Lan, « Étude de l'influence des singularités créées par la technique de placement de fibres automatisé sur les performances des matériaux composites », Theses, Université de Bretagne Sud, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01337616>.
- [18] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, et D. Hui, « 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective », *Composites Part B: Engineering*, vol. 110, p. 442-458, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
- [19] A. Shanwan, « Développement d'un pilote de fabrication automatisée de photo-composites semi-ouvrés (pré-imprégnés) », Thèse, Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2014. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01588342>.
- [20] JEC Group et Estin, « Current trends in the global composites industry, JEC Observer », JEC Group, 2021.
- [21] CRECOF, IPC, et ADEME, « Guide du recyclage des composites », 2017.
- [22] JEC OBSERVER, 2020.
- [23] Emploi plasturgie, « La filière plasturgie & composites : les chiffres clés ». Consulté le: 10 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: urlr.me/PrdyF.
- [24] Polyvia, « Le marché européen des composites lui aussi frappé par de graves pénuries ». Consulté le: 10 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: urlr.me/pcbQg.
- [25] La Dépêche, « Toulouse. Pourquoi l'A350 est révolutionnaire ? » Consulté le: 10 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: urlr.me/M4cqB.
- [26] P. Liu et C. Y. Barlow, « Wind turbine blade waste in 2050 », *Waste Management*, vol. 62, p. 229-240, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007>.

- [27] E. Witten et V. Mathes, « The Market for Glass Fibre Reinforced Plastics (GRP) in 2020. Market developments, trends, outlooks and challenges », AVK, nov. 2020.
- [28] F. Reux, « The Global Composites Market », présenté à JEC Conférences France : Les procédés composites grandes cadences, Nantes, France, 9 février 2017.
- [29] S. Das, J. Warren, et D. West, « Global Carbon Fiber Composites Supply Chain Competitiveness Analysis. Energy and Transportation Science Division », Oak Ridge National Laboratory, University of Tennessee, ORNL/SR-2016/100 | NREL/TP-6A50-66071, 2016.
- [30] J. Zhang, V. S. Chevali, H. Wang, et C.-H. Wang, « Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling », *Composites Part B: Engineering*, vol. 193, p. 108053, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108053>.
- [31] A. E. Krauklis, C. W. Karl, A. I. Gagani, et J. K. Jørgensen, « Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s », *Journal of Composites Science*, vol. 5, n° 1, 2021, doi: 10.3390/jcs5010028.
- [32] Allizé plasturgie, « Innovation et tendances dans les composites : retour sur le salon JEC 2018 ». Consulté le: 1 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: urlr.me/5tb4r.
- [33] Technavio, « Global Thermoplastic Composites Market 2020-2024, Growing Use of Fiber Reinforced Composite Materials in Medical Applications to Boost Growth ». Consulté le: 12 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: urlr.me/Zr7hW.

2. Flux matières dans l'industrie des composites

Cette seconde partie du guide consiste en premier lieu à faire un état de l'art des données publiées concernant les gisements de déchets composites à l'échelle nationale, ainsi qu'une revue critique de ces données. Ces informations ont été consolidées en interrogeant directement les divers protagonistes de la chaîne de valeur des composites.

Ce croisement de données issues de diverses sources a permis de construire une estimation des gisements de déchets composites sur la période 2022 – 2040 et identifier les principaux verrous associés au recyclage des composites.

2.1. Flux de matière : quel enjeu ?

Les matériaux composites représentent une part réduite au sein de la plasturgie. En effet, à l'échelle européenne en 2019, 1,1 million tonnes de matériaux composites à fibres de verre ont été mis sur le marché [1] contre 58 millions de tonnes de matières plastiques [2] (soit 2 %). De plus, les secteurs d'application sont variés, tels que le nautisme, l'énergie, l'aéronautique, le bâtiment, etc. (cf. Chapitre 1 pour un éclairage plus exhaustif sur les applications des matériaux composites).

Dans ce contexte, il semble opportun d'évaluer les volumes des déchets composites par filières, suivant le type de matériaux employés puis d'évaluer les opportunités de massification des gisements de déchets.

Dans ce chapitre, et dans la limite où les données sont accessibles, il s'agira de quantifier de la manière la plus précise possible les volumes associés aux déchets de production, de maintenance et de fin de vie des produits composites pour les différentes filières identifiées au Chapitre 1.

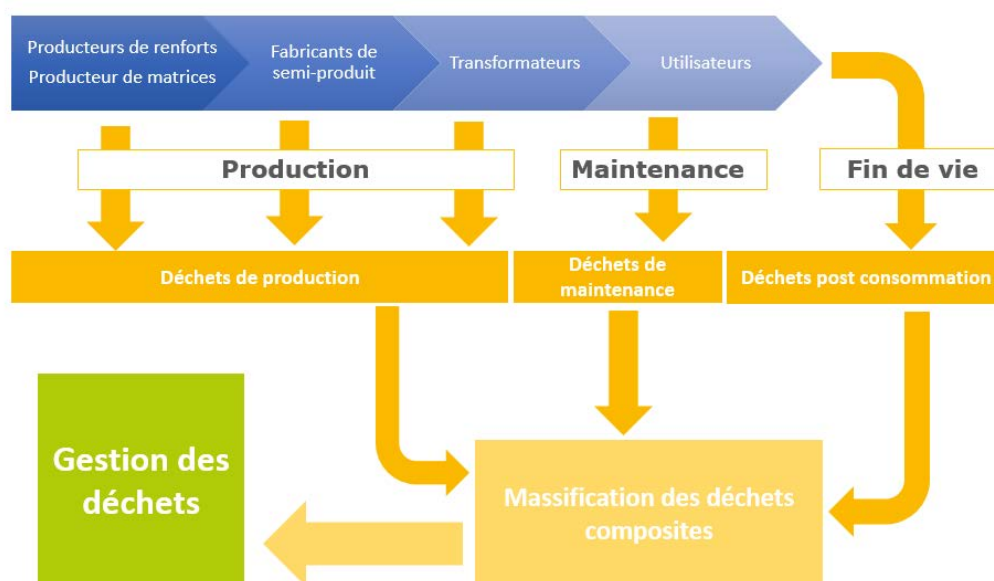


Figure 20 : Massification des déchets de composites en production, en maintenance et en fin de vie (crédit : IPC).

2.2. Marché du nautisme

2.2.1. Le marché français

La France est positionnée comme le leader mondial pour la construction de voiliers, d'équipements de glisse et 4^{ème} producteur de bateaux à moteur. Selon la Fédération des Industries Nautiques (FIN), le chiffre d'affaires de la construction nautique nationale a atteint 1,235 mds€ en 2020 (hors importations), répartis sur un peu plus de 200 entreprises et 9 200 emplois directs [3]. Malgré un repli constaté en 2020 lié à la crise sanitaire, le marché de la production de bateaux de plaisance est dynamique avec une progression ininterrompue de 2013/2014 (Chiffre d'Affaires - CA : 739 M€) à 2018/2019 (CA : 1 343 M€), soit une progression de +82 % sur 6 ans.

L'essentiel des productions sont orientés vers l'export, avec 76 % des produits fabriqués. On note environ 10 100 nouvelles immatriculations de voiliers et de bateaux à moteur en France en 2021. Ce chiffre concerne les bateaux neufs et les bateaux d'occasion immatriculés pour la première fois sur le territoire (par exemple, les bateaux importés) [3].

Le marché de la construction des Bateaux de Plaisance et de Sport (BPS) se compose de 6 catégories (Tableau 11) : les bateaux à moteur rigides, les bateaux à moteur semi-rigides, les bateaux pneumatiques, les véhicules nautiques à moteur, les voiliers monocoques et les voiliers multicoques.

Les bateaux à moteur rigides représentent la majorité des tonnages mis sur le marché en 2020 (46 %), suivis par les voiliers monocoques et multicoques (avec 25 % et 16 % des tonnages respectivement) [4]. Bien que le nombre de voiliers monocoques et multicoques vendus soit faible, le poids moyen élevé de ces bateaux génère des tonnages importants.

En 2020, la masse moyenne de bateaux de plaisance et de sport mis sur le marché était de 1 690 kg [4] contre 1840 kg en 2019.

Une part très importante des nouvelles immatriculations de BPS concerne principalement les régions avec un accès au littoral. Les régions Bretagne, Provence-Alpes-Côte d'Azur, et Nouvelle Aquitaine totalisent respectivement 26 %, 21 % et 15 % des nouvelles immatriculations en 2020 [3].

Les bateaux à moteur rigides	Les bateaux à moteur semi-rigides	Les bateaux pneumatiques
 <p>Tonnage mis sur le marché en 2020 : 6 050 t (46 %)</p>	 <p>Tonnage mis sur le marché en 2020 : 1 050 t (8 %)</p>	 <p>Tonnage mis sur le marché en 2020 : 14 t (0,1 %)</p>
Les véhicules nautiques à moteur	Les voiliers monocoques	Les voiliers multicoques
 <p>Tonnage mis sur le marché en 2020 : 580 t (4%)</p>	 <p>Tonnage mis sur le marché en 2020 : 3 200 t (25 %)</p>	 <p>Tonnage mis sur le marché en 2020 : 2 150 t (16 %)</p>

Tableau 11 : Segmentation du marché des bateaux de sport de plaisance [4] (crédit : FIN).

2.2.2. Les composites sur le marché du nautisme

L'essentiel des volumes de composites (en masse) est localisé au niveau de la coque et du pont des voiliers et des bateaux à moteur rigides. Cette caractéristique fait du composite un matériau très présent pour les BPS. De manière plus marginale, il existe d'autres cas d'emploi pour les matériaux composites tels que les aménagements intérieurs (coffres, tables...) ou les cloisons.

Les coques et les ponts sont majoritairement réalisés en composites à fibres de verre associées à une résine polyester (environ 80 %), vinylester ou époxy. Les panneaux constituant ces structures sont réalisés en composites monolithiques ou sandwichs, renforcés ou non par un réseau de raidisseurs. Le gel-coat est la surface extérieure du composite, assurant la fonction esthétique, d'étanchéité et de résistance à la corrosion du composite.

L'utilisation de matériaux composites à fibres de carbone reste principalement limitée à des applications de niche, telles que les bateaux haut de gamme ou pour les bateaux de compétition.

Qu'il s'agisse du moulage au contact ou de la projection simultanée, les procédés « moules ouverts » sont fréquents en construction navale. Le procédé d'infusion se développe également, particulièrement dans la production de bateaux de grande taille. On note également l'utilisation de matériaux préimprégnés pour des applications spécifiques tels que les mats de voiliers de compétition [5].

Les bateaux actuellement déconstruits présentent une forte proportion de matériaux composites (68 %) et une masse moyenne de 1 300 kg [4]. Les matériaux composites sont la fraction principale pour les voiliers et les bateaux à moteurs, catégories qui concentrent l'essentiel des volumes de déchets traités actuellement. La ventilation des déchets de BPS est présentée sur la Figure 21.

Il s'agit de données relatives à la déconstruction de BPS actuels. Ces bateaux ont un âge moyen de 40 ans et ont donc été construits vers 1980. La proportion de composites pour les BPS mis sur le marché en 2020 peut différer.

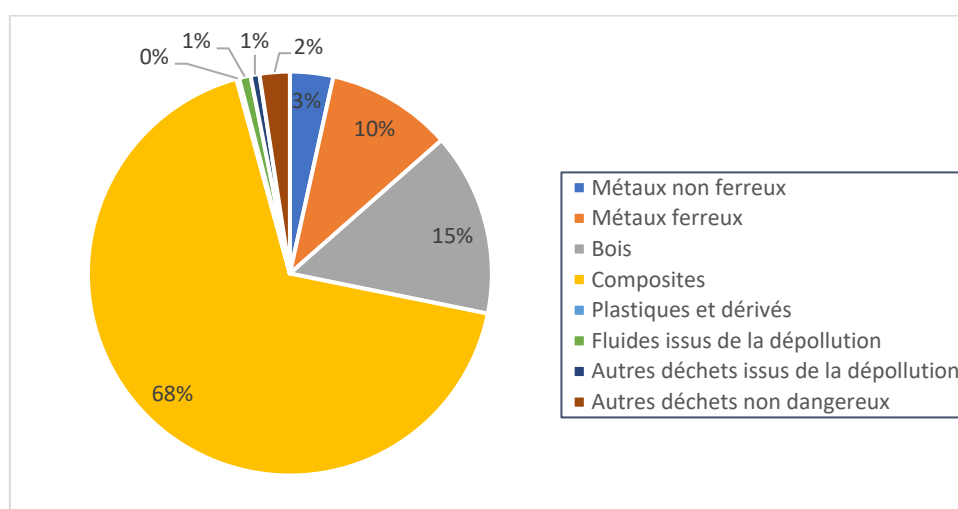


Figure 21 : Répartition des déchets des bateaux de plaisance et de sport déconstruits en 2020 [4].

2.2.3. Estimation des flux de déchets

2.2.3.1. Déchets de production et de maintenance

En phase de production, les déchets composites sont issus des détournages des pièces. Une enquête a été conduite auprès des constructeurs de bateaux de plaisance et de sport par l'APER et la FIN afin de quantifier les gisements de déchets composites. Les résultats sont présentés au paragraphe 2.9, relatif aux déchets générés par l'industrie composite.

2.2.3.2. Traitement des déchets en fin de vie

La France est l'unique pays européen à disposer d'une filière de déconstruction des bateaux de plaisance en fin de vie dans le cadre de la Responsabilité Elargie des Producteurs (REP). Créée par la Fédération des Industries Nautiques (FIN), l'éco-organisme APER gère cette filière dont l'activité a débuté fin 2019. Plus de 4 000 bateaux ont été déconstruits au 31 décembre 2021. En 2020, les déchets composites traités issus de la déconstruction des Bateaux de Plaisance Hors d'Usage (BPHU) ont été orientés vers une filière de valorisation énergétique pour 63 % et un stockage pour 37 % [4]. Il n'y a pas eu de réutilisation ni de recyclage de composites issus de la filière nautique. Cette ventilation est stable entre 2019 et 2020 [4], [6].

En 2020, l'âge moyen des bateaux déconstruits était de 40 ans [4]. Il était de 43 ans en 2019 [6].



Figure 22 : Exemples de déchets composites issus du nautisme, assemblés à des parties métalliques (gauche) et des panneaux en bois (droite) (crédit : IPC).

Des échantillons de déchets composites ont été approvisionnés dans le cadre de cette étude. Les échantillons ont montré qu'une part des matériaux composites étaient assemblés par collage à d'autres matières. Il peut s'agir de mousses, dans le cas de panneaux sandwichs, de métal pour les inserts, ou de bois dans certains cas (Figure 22). Cet assemblage de matière peut apparaître comme une difficulté au recyclage des composites.

2.2.3.3. Quantification du flux de déchets « fin de vie »

Depuis la mise en place de la REP Bateaux de Plaisance et de Sports (BPS), les flux de déchets issus de la filière nautique sont publiés annuellement par l'ADEME, soit en 2019 et en 2020. Les quantifications du gisement traités ont été complétées par des données fournies par l'Association pour la Plaisance Eco-Responsable (APER) pour l'année 2021 et la prévision des volumes pour les années suivantes (Tableau 12, Figure 23).

A l'horizon 2024, il est estimé que le flux de déchets composites pourrait être de 4 000 t/an et continuer à progresser jusqu'à 5 000 t/an en 2026.

	Nombre	Masse unitaire moyenne (kg)		Volume annuel (t)		Source
		Tous matériaux	Taux composites	Tous matériaux	Composite	
2019	363	986	~65 %	358	233	[6]
2020	1 259	1 277	~65 %	1 600	1 045	[4]
2021	2 400	-	~65 %	-	2 000	APER
Objectif en 2024	5 000	-	~65 %	-	4 000	APER

Tableau 12 : Tonnages traités et estimation des gisements de déchets composites fin de vie issus de la filière nautique.

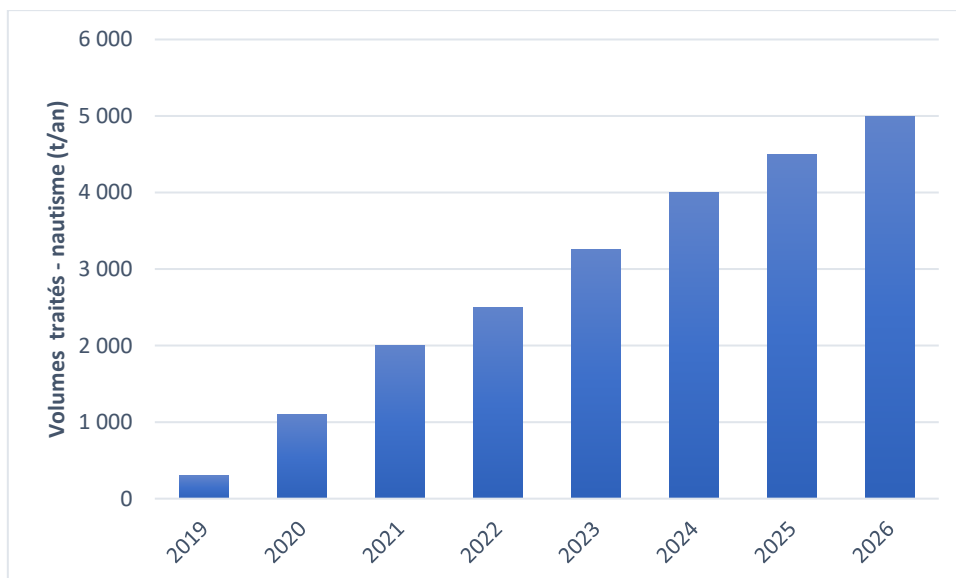


Figure 23 : Volumes de déchets composites traités par la filière du nautisme et prévisions 2022 – 2026 (déchets fin de vie) (sources : [4], [6], APER).

2.2.4. Localisation des gisements de déchets composites

La Figure 24 présente les volumes de déchets composites traités en 2021, suivant l'origine géographique des BPS (données APER).

On note en 2021 une forte concentration des gisements sur le littoral. L'essentiel des gisements de déchets composites sont localisés en Bretagne, et plus spécifiquement dans le Finistère (environ 20 % des volumes de déchets). La région Bretagne concentre environ 40 % des volumes de déchets. Les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur (16 %), Nouvelle Aquitaine (13 %), Pays de la Loire et Normandie se partagent l'essentiel des gisements restants. Cette répartition géographique du traitement des déchets composites issus de la filière BPS est une photographie 2021 et peut évoluer sensiblement dans les prochaines années. Elle dépend du nombre de centres de traitements opérationnels par départements et régions et de la concentration de la flotte de plaisance par zones géographiques. 18 nouveaux centres de traitement ont été validés par l'APER et entreront en activité dès qu'ils seront en conformité avec la réglementation ICPE 2712-3.

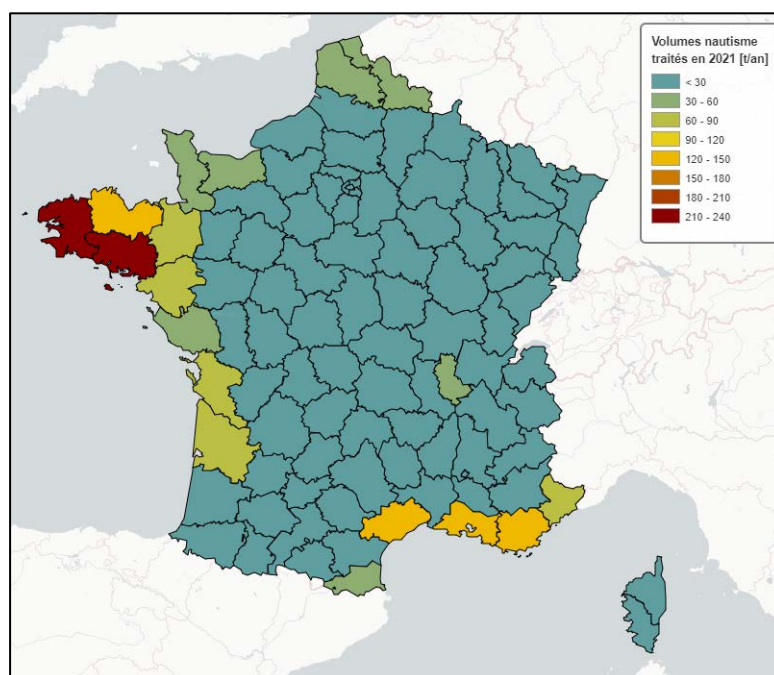


Figure 24 : Localisation des 2000 t de déchets composites traités par la filière BPS en 2021 (déchets fin de vie) (données APER).

2.2.5. Synthèse et observations

Bien que relativement récente, la filière nautique se structure pour la gestion de la fin de vie des BPS. Actuellement, les volumes de déchets traités sont de 2 000 t/an. L'APER prévoit de traiter un volume de composites, majoritairement verre/polyester, de l'ordre de 4 000 t à partir de 2024 en augmentation jusqu'à 2026.

Les gisements actuels sont concentrés sur des zones géographiques bien identifiées, proches du littoral et plus particulièrement pour les régions Bretagne et Provence-Alpes-Côte-d'Azur.

Les principales difficultés pour le recyclage des matières composites issues de la filière nautique résident dans :

- La présence de multimatériaux collés et/ou assemblés (mousses, bois, inserts ...);
- L'absence d'informations sur la nature exacte des composites présents sur les bateaux arrivés en fin de vie et le manque de traçabilité.

Malgré cette limite, les gisements de composites issus du nautisme semblent être d'intérêt pour une potentielle mutualisation de déchets. Actuellement, ces gisements sont majoritairement envoyés vers une filière de Combustible Solide de Récupération (~60 %).

2.3. Marché éolien

2.3.1. **Marché français**

L'énergie éolienne continue de se développer en Europe avec une puissance raccordée de 220 GW en 2020 [7]. La France est le 4ème pays éolien d'Europe (Tableau 13). Le marché éolien a réalisé une belle performance en 2020, malgré la crise sanitaire. En effet, le parc installé à l'échelle nationale représente une puissance électrique raccordée de 18,2 GW en 2021 [8], soit +10 % par rapport à 2019 [9]. 477 nouvelles éoliennes ont été installées en 2020 pour une puissance raccordée supplémentaire de 1,3 GW.

Le marché éolien est segmenté entre éoliennes terrestres et éoliennes en mer. Les éoliennes en mer sont composées d'éoliennes flottantes (technologie en émergence) et d'éoliennes posées (filiale mature). La production électrique française s'appuie aujourd'hui sur l'éolien terrestre (Tableau 13). La réparation des éoliennes terrestres en France métropolitaine est présentée sur la Figure 29.

Concernant l'éolien en mer, on note le lancement de 7 projets pour une puissance totale de 3,5 GW, dont 6 projets ont été autorisés et/ou sont en cours de consultations [9]. Il s'agit des projets : Courseulles-sur-Mer (448 MW), Fécamp (497 MW), Dieppe-Le Tréport (496 MW), Saint-Brieuc (496 MW), Saint-Nazaire (480 MW) et Yeu-Noirmoutier (496 MW). Le projet de Dunkerque (600 MW) a, de son côté, été attribué en juin 2019.

Le chiffre d'affaire national de cette industrie est de 6,6 mds€ en 2020 (éolien terrestre uniquement) [6]. En 2020, la filière éolienne comptabilisait 22 600 emplois directs et indirects (soit +12 % par rapport à 2019), en croissance depuis 7 ans. Le marché de la fabrication d'éoliennes est concentré sur 5 acteurs principaux : Vestas (32 % de la capacité raccordée en juin 2021), Enercon (24 %), Nordex/Acciona (15 %), Sension (13 %) et Siemens-Gamesa (11 %) [9].

Le Tableau 14 présente la segmentation du marché, la puissance actuellement raccordée et les objectifs fixés le Ministère de la Transition Ecologique par les Programmations Pluriannuelles de l'Energie (PPE). Le PPE est l'outil de pilotage de la politique énergétique, ont été créées par la Loi relative à la Transition Energétique pour la Croissance Verte (LTECV).

	Pays	Puissance cumulée à fin 2020 (MW)	Puissance offshore à fin 2020 (MW)	% mix électrique 2020
1	Allemagne	62 627	7 689	27 %
2	Espagne	27 264	5	22 %
3	Royaume-Uni	24 167	10 428	27 %
4	France	17 949	2	9 %
9	Danemark	6 180	1 703	48 %
12	Irlande	4 351	25	38 %

Tableau 13 : Principaux pays européens raccordés – données 2020 (17,6GW raccordés à l'échelle nationale au 31 décembre 2020) [9].


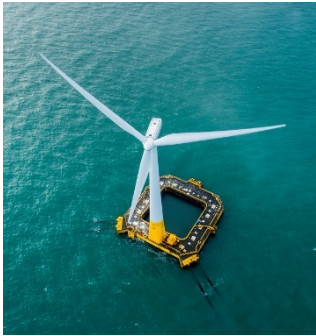
Eoliennes terrestres	Eoliennes offshore	
	Flottantes	Posées
		
Puissance raccordée en 2020 : ~18,2 GW Objectif du PPE en 2028 : 34 GW	Puissance raccordée en 2020 : 2 MW Objectif du PPE en 2028 : 5,7 GW	

Tableau 14 : Segmentation du marché éolien [9] (crédit : Marc Rapin et BW Ideol).

2.3.2. Les composites sur le marché éolien

Pour le marché éolien, les principales applications des matériaux composites sont les pales, le capot de la nacelle et le hub. La composition de chaque turbine varie d'un constructeur à l'autre, ainsi qu'au sein même des gammes. Les matériaux utilisés sont majoritairement des composites fibres de verre/époxy [10]. D'autres matériaux sont également présents sur les pales (Figure 25). Du bois et des mousses polymères sont couramment employés comme âmes de matériaux sandwich. Dans une moindre mesure, on note également la présence de parties métalliques, tels que le parafoudre ou des inserts pour les fixations, ou des parties thermoplastiques, tels que les générateurs de tourbillons collés sur les pales.

Les matériaux composites sont majoritairement présents sur les pales, avec, en moyenne 7,6 t de composite par pale [11]. Une éolienne est généralement constituée de 3 pales. Les fibres de carbone ont été introduites à partir de 2015 sur les zones fortement sollicitées, généralement au pied de pale.

L'innovation sur ce marché est importante et on note la présence de nombreux projets portant sur les développements de nouveaux matériaux. En particulier ces dernières années, les développements se sont portés sur la formulation de résines destinées à faciliter la recyclabilité des pales. A titre d'exemple, le projet ZEBRA (Zero waste Blade ReseArch), dont les partenaires sont Arkema, CANOE, ENGIE, IRT Jules Verne, LM Wind Power, Owens Corning et SUEZ, utilise une résine thermoplastique comme matrice du composite [12].

On note également le projet CETEC (Circular Economy for Thermoset Epoxy Composites), porté par Vestas en partenariat avec Olin, dont l'objectif vise à développer de nouvelles résines époxy, qui seraient dépolymérisables dans des conditions « douces » [13].

Siemens Gamesa a annoncé en septembre 2021 le lancement de la RecyclableBlade, une pale d'éolienne entièrement recyclable. Cette innovation est portée par une nouvelle résine, dont la structure chimique permet de séparer la fibre et la matrice à la fin de la vie de la pale. Siemens Gamesa a annoncé avoir réalisé 6 pales et conclu des accords avec 3 clients.

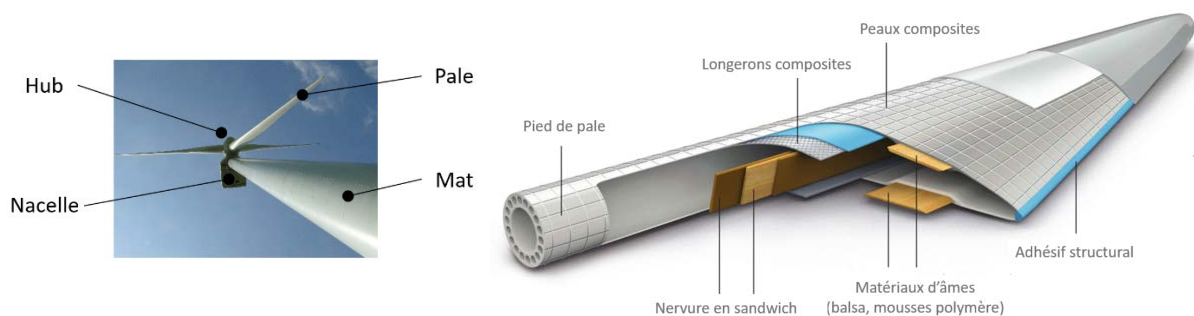


Figure 25 : A gauche : les principaux constituants d'une éolienne (crédit : Marc Rapin) ; A droite : Exemple de configuration structurelle d'une pale éolienne [14].

2.3.3. Estimation des flux des déchets

2.3.3.1. Déchets de production

Le marché éolien est un marché européen, où la France est bien positionnée tant sur l'éolien terrestre que sur le segment de l'éolien en mer, segment en forte croissance, au regard de son potentiel pour les deux filières (espace, gisement...). La France comptabilise 5 des 13 unités européennes de production d'équipement d'éolienne en mer [9]. Il s'agit des sites suivants :

- Le Havre pour la fabrication de pales, nacelles et génératrices pour l'éolien en mer (Siemens-Gamesa 750 emplois directs et indirects) ;
- Cherbourg pour la fabrication de pales (LM Wind Power / GE Renewable Energy, 500 emplois directs) ;
- Montoir de Bretagne pour l'assemblage de nacelles d'éoliennes en mer (GE Renewable Energy, 300 emplois directs) ;
- Nantes pour l'ingénierie, les achats, la qualité et la gestion de projets et service (GE Renewable Energy, 250 emplois directs) ;
- Saint-Nazaire pour la production de fondations de type « Jacket » (Chantier de l'Atlantique, 200 emplois).

Il existe potentiellement des gisements de déchets industriels, en particulier pour les sites du Havre et de Cherbourg, destinés à la production de pales de 75 m et de 107 m de longueur respectivement [15], [16].

Note : La quantification de ces gisements n'a pas été conduite mais cette action semble être une perspective d'intérêt pour une future mise à jour du guide.

2.3.3.2. Estimation des flux de déchets de maintenance

Branner et Ghadirian ont étudié les dommages en service sur les pales d'éoliennes [17]. Les défauts constatés ont été classés suivant leur criticité. Selon les auteurs, la majorité des défauts ne nécessitent ni arrêt de l'éolienne ni changement de pale. Les auteurs estiment également que la probabilité d'apparition des défauts en service est inférieure à 1 % par an. France Energie Eolienne (FEE) confirme que les incidents majeurs conduisant au changement d'une pale sont très rares.

Les opérations de maintenance sur les pales sont illustrées sur la Figure 26, et concernent des zones limitées de la pale. Les volumes de déchets générés sont assez limités et les gisements difficiles à capter. Ces gisements sont supposés négligeables devant la masse de composite produite annuellement et arrivant en fin de vie.



Figure 26 : Illustration d'une opération de réparation de pale d'éolienne (crédit : Alain Guilloteau).

2.3.3.3. Estimation des flux de revamping/repowering

Le revamping consiste à changer certains composants de l'éolienne afin d'augmenter sa capacité de production d'énergie. Le repowering consiste à changer l'ensemble des éléments de l'éolienne pour mettre un nouvel ensemble neuf, d'une puissance supérieure.

Selon les éléments portés à notre connaissance, 6 parcs éoliens ont fait l'objet d'un repowering sur la période de 2008 à 2014 en France, ce qui représente environ 1 parc/an. Les volumes actuels sont assez faibles au regard du nombre de parcs actuellement en service. Malgré cela, le nombre de parc faisant l'objet d'un repowering/revamping pourrait être amené à évoluer positivement sous l'effet combiné de :

- L'augmentation de l'âge de certains parcs ;
- Les contraintes associées à la mise en place de nouveaux parcs éoliens.

2.3.3.4. Estimation des flux de déchets composites « fin de vie »

L'estimation des flux de déchets est basée sur une évolution de la puissance raccordée annuellement et sur les caractéristiques moyennées d'une éolienne de référence, représentative du parc de machines en France vers 2010.

2.3.3.4.1. Evolution de la puissance raccordée

Le programme éolien français (appelé EOLE) a eu 20 ans en 2016. Le programme EOLE 2005 visait à installer entre 250 et 500 MW à l'horizon 2005. À la fin de l'année 2005, la puissance installée était supérieure à 750 MW. Fin 2015, la puissance totale raccordée était d'environ 10 300 MW. Après quelques années de croissance (principalement 2005-2010), l'année 2014 a marqué le début d'une nouvelle phase dynamique, les installations annuelles ont dépassé les 1 000 MW, ce qui a permis à la France de prendre la quatrième place au niveau européen.

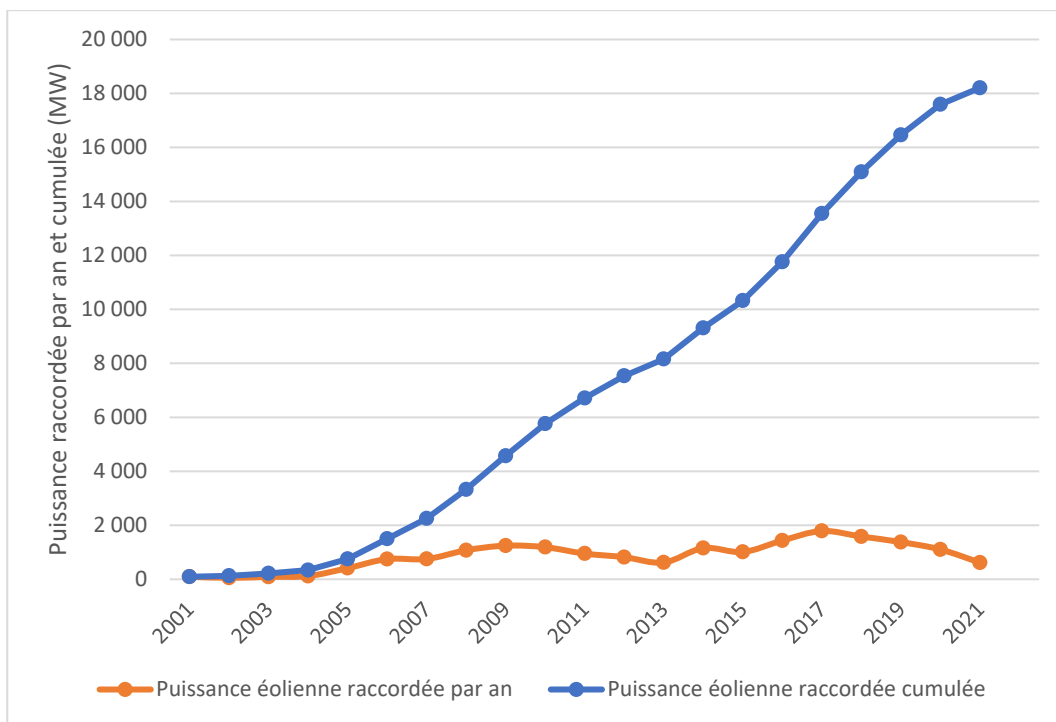


Figure 27 : Puissance éolienne raccordée par an et cumulée en France de 2001 à 2021 [8].

2.3.3.4.2. Éolienne de référence

L'ADEME a défini une « éolienne de référence », basée sur l'analyse de 742 parcs éoliens en 2015 [11]. L'ADEME observe trois phases de déploiement en France, de l'ordre de 1 MW pour celles mises en service avant 2005, 2 MW entre 2005 et 2009 et des turbines supérieures à 2 MW après 2010. Une éolienne de référence a été définie, basée sur les caractéristiques des éoliennes installées entre 2005 et 2009 (Tableau 15). Cette éolienne de référence a une puissance de 2 MW, et est constituée de 25,1 t de matériaux composites (soit 2 % de la masse totale). Chacune des 3 pales a une masse de 7,6 t. Les 2,3 tonnes restantes sont distribuées entre le hub et la nacelle.

Notons que cette éolienne de référence, n'est plus représentative des éoliennes mise en service en 2021, dont la puissance moyenne en France est de 2,7 MW [9]. Cette évolution de puissance s'accompagne d'une augmentation de diamètre des rotors et donc du poids des pales. Ces dernières ne seront toutefois concernées qu'à long terme (20 ans ou plus) par le recyclage des déchets en fin de vie.

Caractéristiques	Caractéristiques		Données	
	Puissance nominale	2 MW		
	Diamètre du rotor	90 m		
	Hauteur moyenne en bout de pale	140 m		
Mat	Métallique			
Matériaux	Matériaux		Volumes (t)	Pourcentage
	Béton	840	72 %	
	Acier	246	21 %	
	Fonte	42	4 %	
	Matériaux composites (verre/époxy)	25,1	2 %	
	Fer	10	1 %	
	Cuivre	4	~0 %	
	Autres	4,2	~0 %	

2.3.3.4.3. Gisements de déchets en fin de vie

Les gisements de déchets en fin de vie sont estimés en supposant :

- Une puissance raccordée annuelle définie sur la Figure 27 ;
- Une éolienne de référence (2 MW, 25,1 t de composites) définie dans le Tableau 15 ;
- Une durée de vie du matériel comprise entre 20 et 25 ans. Cette durée de vie semble cohérente avec les données issues de la littérature [18]–[20]. Il semble alors pertinent d'évaluer l'impact de la durée de vie sur les gisements de déchets composites avec une hypothèse basse sur la durée de vie du matériel (20 ans) et une hypothèse haute (25 ans).

Sous ces hypothèses, les gisements de déchets ont été quantifiés et présentés sur la Figure 29. Sous l'hypothèse d'une durée de vie de 20 ans, le gisement de déchets composites devrait augmenter significativement à partir de 2025. Un gisement de 10 000 t/an à 15 000 t/an devrait être disponible à compter de 2031. Le modèle prévoit une baisse des gisements vers 2033 qui s'explique par la diminution des puissances raccordées en 2012 et 2013.

L'hypothèse d'une augmentation de la durée de vie à 25 ans reporte l'arrivée en fin de vie des éoliennes. Sous cette hypothèse, les volumes de déchets sont très faibles jusqu'à 2030 avant d'augmenter à une moyenne de 10 000 t/an à partir de 2035.

Les matériaux à fibres de carbone ayant été introduits vers 2015, les gisements de déchets sont supposés être majoritairement composés de fibres de verre jusqu'à 2035.

Le gisement de composites est donc estimé à 229 kt sur l'ensemble du parc français sur la période 2022 – 2040, soit environ 12,7 t par MW installé. A titre de comparaison, Volk *et al.* [19] ont estimé un gisement composite de 600 kt en Allemagne sur la même période. Pour le parc allemand, les auteurs obtiennent un gisement compris entre 10 et 12 t/MW. Par ailleurs, Marsh [20] indique que la masse de composites par mégawatt est généralement comprise entre 10 et 15 t. Les résultats obtenus semblent donc en cohérence avec d'autres travaux conduits dans la littérature.

Bien que le gisement soit estimé à 229 kt sur la période 2022 – 2040, la filière observe une part de réemploi et réutilisation dans les premiers démantèlements de parcs, diminuant le gisement de composite à court terme. En France, 10 parcs ont été construits avant le 31 décembre 2001, à l'image du site de Plouarzel I présenté sur la Figure 28. Selon le site thewindpower.net [21], le retour d'expérience sur ces parcs met en évidence que :

- 7 parcs (soit 7/10) ont vu leur durée d'utilisation augmentée et sont toujours en service ;
- Le parc de Plouarzel I a fait l'objet d'un démantèlement complet en 2021. Les pales endommagées ont été réduites en taille pour être recyclées. Les pales non-endommagées ont été vendues pour une seconde vie sur le marché de la pièce de rechange (Figure 28 à droite). Pour ce parc, aucune pale n'a fait l'objet d'un enfouissement ou d'une incinération ;
- Deux parcs ont fait l'objet d'un démantèlement partiel. Il s'agit des parcs de Corbières-Maritimes et de Widehem.

Le retour d'expérience sur ces parcs (10 parcs seulement) semble montrer une tendance à l'augmentation de la durée de vie des parcs au-delà de 20 ans.

Concernant les 8 parcs ayant fait l'objet d'un revamping/repowering identifiés par l'ADEME [11], il existe quelques données publiques sur les exutoires des pales. Le retour d'expérience de l'ADEME est complété par les observations d'IPC sur le parc de Plouarzel I (soit 9 parcs au total). Ce retour d'expérience met en évidence que, sur ces 9 parcs [22], [23], [24], [25], [26] :

- Les pales de 3 parcs ont fait l'objet d'une revente sur le marché de la pièce de rechange ;
- Les pales de 2 parcs ont fait l'objet d'un recyclage ;
- Les pales de 3 parcs ont fait l'objet d'une revalorisation en CSR ;
- Les exutoires pour 3 parcs ne sont pas précisés ;

Généralement, il existe plusieurs exutoires pour un même parc.



Figure 28 : Démantèlement du parc éolien de Plouarzel I en septembre 2021 (crédit : IPC).

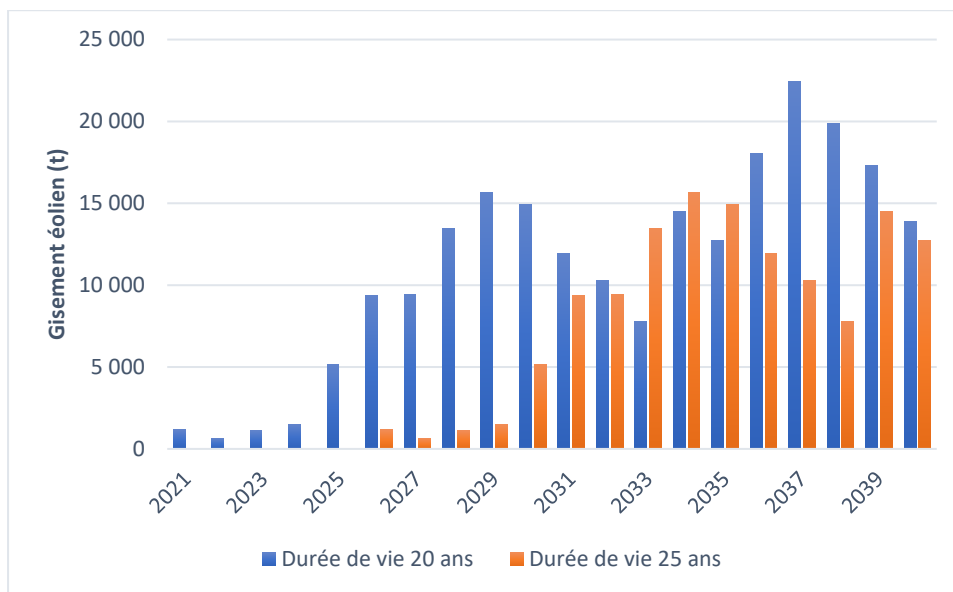


Figure 29 : Gisement de déchets composites issus de la filière éolienne, en fonction de l'hypothèse sur la durée de vie (déchets fin de vie).

2.3.4. Localisation des gisements de déchets composites

Dans le cadre de cette étude, la localisation de chaque parc et son ancienneté ont été extraites du Registre national des installations de production et de stockage d'électricité, mis à disposition par le réseau Open Data Réseaux Énergies (ODRÉ) [27].

Ce jeu de données fournit la localisation des parcs éoliens et leur puissance mis en place avant novembre 2021 en France métropolitaine et DROM-COM, pour une puissance cumulée de 19,0 GW.

Ces données permettent de cartographier le nombre d'éoliennes implantées par département (Figure 30) et les gisements de déchets composites sur la période 2022 – 2040 (Figure 30 B., C. et D.). Il a été choisi de présenter une valeur moyenne sur des périodes de 3 ans, de 2029 à 2031 puis de 2034 à 2036, avec une hypothèse de durée de vie de 20 ans. Cette comparaison permet d'évaluer la dynamique de génération de déchets sur le territoire.

Les Hauts-de-France et le Grand Est sont les premières régions éoliennes. Ces deux régions représentent à elles seules 50 % de la puissance raccordée. Le reste des régions continue de progresser, par exemple, la Nouvelle Aquitaine a raccordé plus de 200 MW entre juin 2020 et juin 2021.

Sur la période 2029 – 2031, les gisements de déchets sont focalisés sur les parcs les plus anciens, en Occitanie, dans les Hauts-de-France, en Bretagne et en région Centre-Val de Loire.

Sur la période 2034 – 2036, l'essentiel des volumes est concentré sur les régions Grand-Est et Hauts-de-France. Des gisements de l'ordre de 1000 t/an peuvent être atteints pour certains départements des Hauts-de-France. Dans une moindre mesure, on note également la présence de gisements en Bretagne, Pays-de-la-Loire et Centre-Val de Loire.

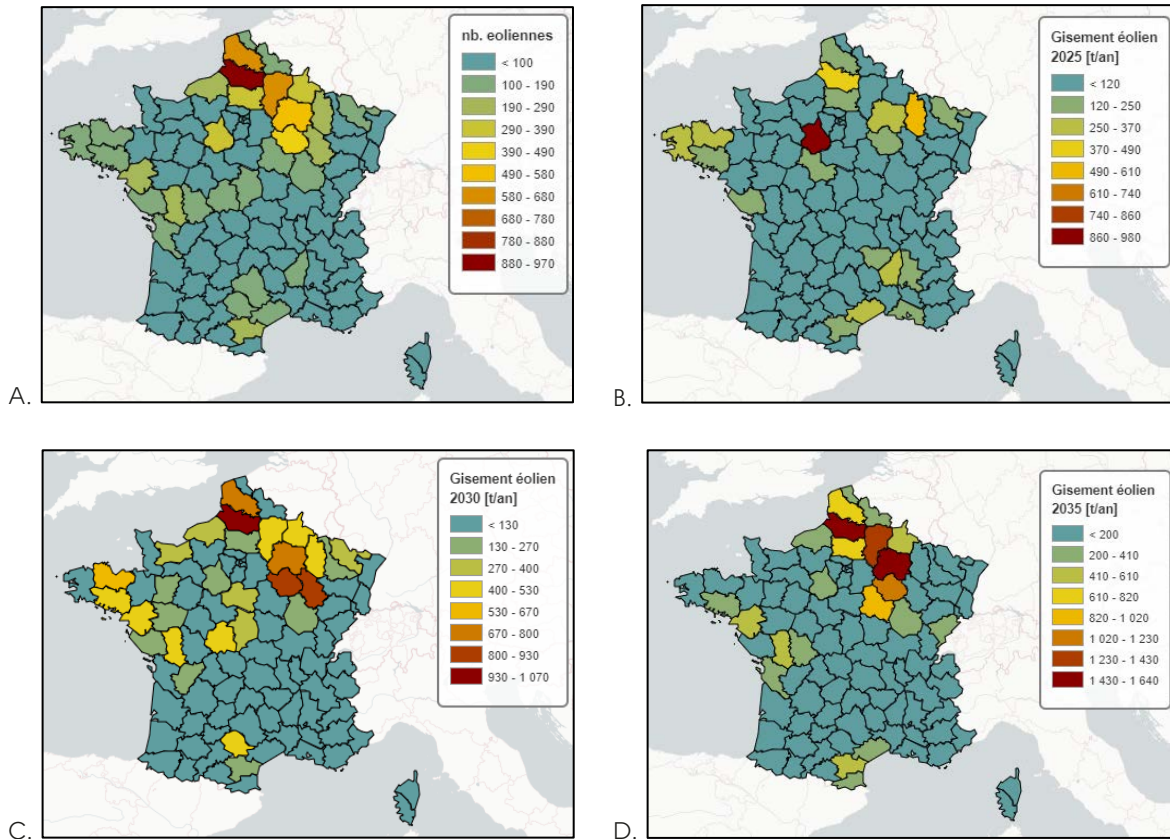


Figure 30 : A. Répartition géographique des éoliennes implantées en France métropolitaine en octobre 2021 par département ; Gisement annuel de déchets composites issus de la filière éolienne en 2025 (B) ; en 2030 (C) et en 2035 (D).

2.3.5. Synthèse

Un gisement de l'ordre de 10 000 t/an a été estimé dans le cadre de cette étude, à partir de 2030. Ce gisement est majoritairement constitué de matériaux composites à base de fibres de verre/époxy. Les déchets composites à fibres de carbone ne sont pas attendus avant 2035.

Le gisement de déchets composites issu de la filière éolienne est intéressant dans une optique de massification de déchets entre filières. En effet, les éoliennes sont essentiellement localisées sur les régions Grand-Est, Hauts-de-France et en Occitanie (parcs les plus anciens). Les gisements sont également concentrés à une échelle très locale où les démantèlements de parcs, constitués de plusieurs éoliennes, génèrent en moyenne 25 t de composites par éolienne.

Le marché éolien est un marché dynamique, les principaux acteurs sont mobilisés pour développer des solutions permettant de réduire l'impact environnemental des éoliennes, à l'image de Siemens Gamesa et la RecyclableBlade (pale recyclable). Cette implication se matérialise par les efforts en recherche et développement importants pour développer des nouveaux matériaux et également pour mieux gérer la fin de vie des produits (Cf. chapitre 4).

Une limite au recyclage des pales résidera dans la présence de multi-matériaux (composites / bois / mousses) limitant les possibilités de recyclage mécanique.

2.4. Marché aéronautique

2.4.1. Le marché français

Airbus et Boeing publient annuellement leurs prévisions sur le marché aéronautique, avec respectivement l'Airbus Market Forecast [28] et le Commercial Market Outlook [29]. Le marché aéronautique a été fortement impacté par la situation sanitaire en 2020. Malgré cela, Airbus prévoit un retour du trafic aérien à son niveau antérieur à la crise sanitaire entre 2023 et 2025. Selon Airbus et Boeing, le trafic aérien devrait

croître de 3,9 % (croissance CAGR - Compound Annual Growth Rate ou Taux de croissance annuel composé) sur la période 2019 – 2040 (3,9 % pour Airbus et 4,0 % pour Boeing). La demande d'avions devrait être de 39 000 nouveaux appareils entre 2019 et 2040, dont 60 % serait porté par la croissance du marché et 40 % par le remplacement des flottes existantes (~43 000 appareils estimés par Boeing sur la même période, porté par la croissance du marché pour 54 %, et par le renouvellement pour 46 %).

La demande en nouveaux appareils est essentiellement localisée en Asie et Pacifique, et plus particulièrement en Chine. La demande européenne sera plus faible. Il est néanmoins prévu que la flotte européenne soit multipliée par 1,7 sur la période 2019 – 2040 (Airbus et Boeing).

Le marché aéronautique peut être segmenté suivant les catégories suivantes (hors spatial) [30] :

- Aéronautique civile : constitué d'avions d'affaires et privées, d'avions régionaux, d'avions court, moyen et long courriers et d'hélicoptères ;
- Aéronautique militaire : constitué d'avions de combat, d'avions ravitailleurs et de transports, de drones et d'hélicoptères militaires.

En prenant 2019 comme année de référence (avant crise COVID) :

- Pour Airbus, 863 appareils ont été livrés à 99 compagnies aériennes et de leasing, dont 48 A220, 112 A350 et 642 monocouloirs de la famille A320 (dont 551 A320neo) ;
- Sur le marché des avions régionaux, ATR a livré 68 avions neufs ;
- Sur le marché des avions d'affaires, Dassault Aviation a livré 40 Falcon. Pour le secteur militaire, Dassault Aviation a livré 26 Rafale à l'exportation. Les deux premiers ATL2 modernisés ont été livrés à la Marine Nationale ;
- Sur le marché des hélicoptères, Airbus Helicopters a livré 332 machines ;
- Daher Aerospace a livré 38 TBM900 en 2019 ;
- En ce qui concerne les moteurs, Safran a livré 2 127 moteurs répartis entre 1 736 LEAP dont la montée en cadence s'est poursuivie, et 391 CFM56.



En 2020, en France, les 4 480 sociétés appartenant à la filière aéronautique et spatiale emploient 263 000 salariés pour leur activité aérospatiale (données INSEE [31]).

2.4.2. Les composites sur le marché aéronautique

Présents depuis le début des années 1960 sur les structures d'avions civils, les composites fibres de verre/résine organique ont été introduits en quantité sans cesse croissante, pour des applications de plus en plus critiques pour les appareils [32], comme illustré sur le Tableau 16.

Pour les produits aéronautiques, la principale motivation à l'utilisation des matériaux composites est essentiellement le gain de masse apporté tout en conservant d'excellentes caractéristiques mécaniques.

Les principaux matériaux utilisés pour la partie renfort sont les fibres de carbone, les fibres de verre et les fibres d'aramide. Les matrices sont principalement des matrices thermodurcissables époxydes pour les structures, des matrices thermodurcissables phénoliques pour les aménagements intérieurs.

Période	Exemples d'avion (Airbus)		Proportion de composite (%)	Utilisation des matériaux composites
1970 – 1980	A300-B2		4,5	Capot Radome
1980 – 1990	A310		5	Volets Spoiler Aérofrenés

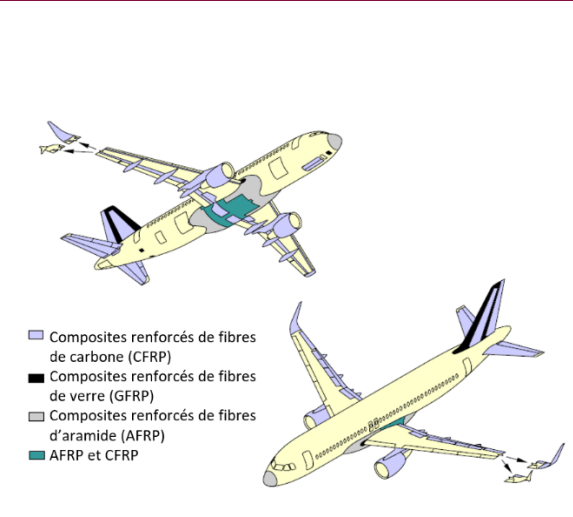
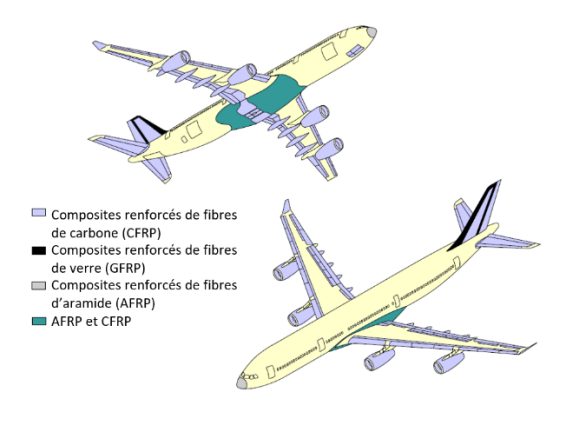
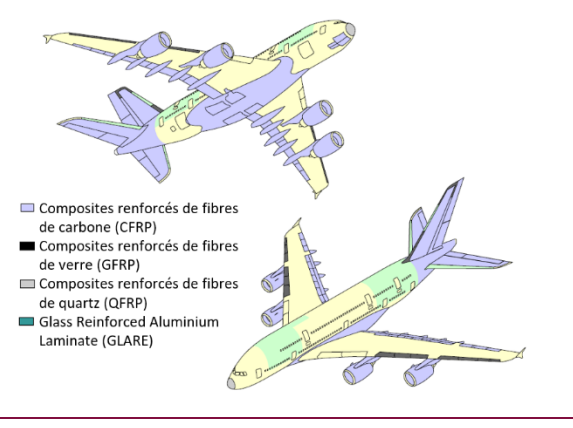
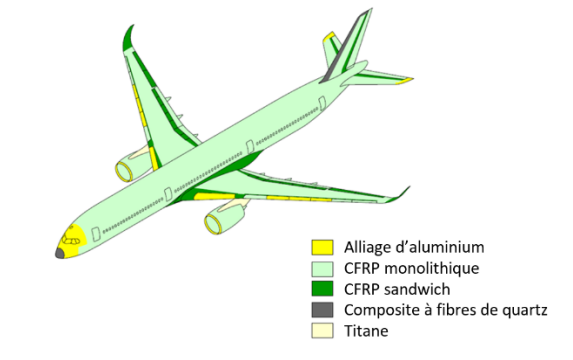
	A320	 <p> ■ Composites renforcés de fibres de carbone (CFRP) ■ Composites renforcés de fibres de verre (GFRP) ■ Composites renforcés de fibres d'aramide (AFRP) ■ AFRP et CFRP </p>	10	Elevons Caisson dérive Caisson interne plan horizontal Trappes de train d'atterrissage Ailerons
1990 – 2000	A330 A340	 <p> ■ Composites renforcés de fibres de carbone (CFRP) ■ Composites renforcés de fibres de verre (GFRP) ■ Composites renforcés de fibres d'aramide (AFRP) ■ AFRP et CFRP </p>	10 – 13	Ailerons Caisson externe Nacelle monolithique Poutre ventrale Fond arrière étanche Fuselage
2000 – 2010	A380	 <p> ■ Composites renforcés de fibres de carbone (CFRP) ■ Composites renforcés de fibres de verre (GFRP) ■ Composites renforcés de fibres de quartz (QFRP) ■ Glass Reinforced Aluminium Laminate (GLARE) </p>	23	Fuselage arrière Cône arrière Caisson central GLARE sur fuselage supérieur
2010 – 2020	A350	 <p> ■ Alliage d'aluminium ■ CFRP monolithique ■ CFRP sandwich ■ Composite à fibres de quartz ■ Titane </p>	53	Fuselage : peaux et cadres Ailes : peaux et longerons

Tableau 16 : Introduction de pièces composites sur les avions moyen/long courrier (crédit : Airbus).

Lefevre *et al.* [33] ont étudié la proportion de matériaux composites GFRP (Glass Fibre Reinforced Plastics – composites à fibres de verre) et CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastics – composites à fibres de

carbone) sur différents appareils. La Figure 31, adaptée de [33], montre la proportion de matériaux composite (en masse) de quelques avions commerciaux mis en service sur la période 1970 – 2020. Il est observé que le taux de composites à fibres de verre a peu évolué en proportion sur cette période. L'essor des composites est porté par les CFRP dont la proportion suit une croissance forte sur la période 1970 – 2010. L'accélération est encore plus rapide sur les dernières générations d'appareils tels que l'Airbus A350 et le Boeing 787.

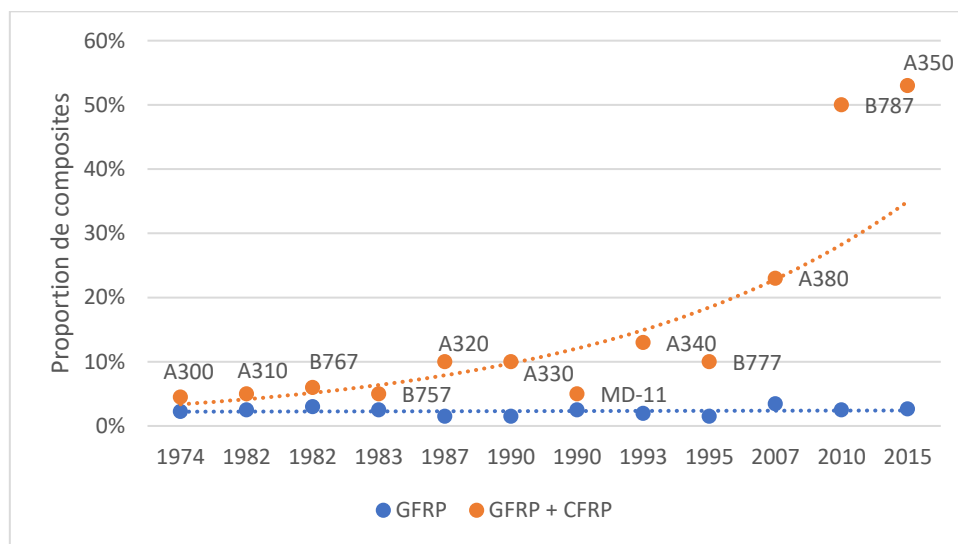


Figure 31 : Proportion de composites sur les avions commerciaux [33].

2.4.3. Flux des déchets composites

2.4.3.1. Situation actuelle

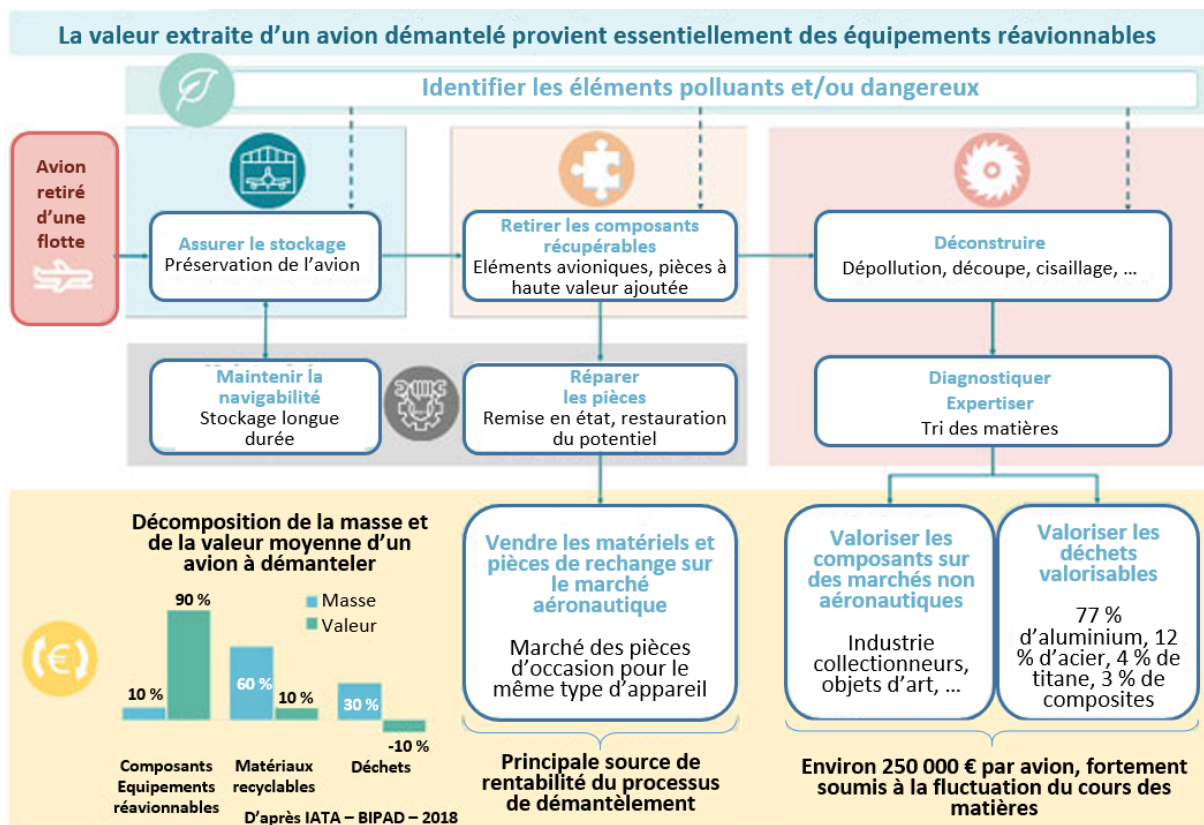
Une filière de stockage/démantèlement des appareils en fin de vie se structure en France depuis une dizaine d'années. Cette filière est présentée sur la Figure 32, extraite de [34]. Tarmac Aerosave (actionnaires : Airbus 33,6 %, Safran 32,8 %, Suez 33,6 %) apparaît comme un acteur de premier plan pour le démantèlement des appareils (leader européen sur le stockage d'appareils et leader mondial pour le démantèlement et la revalorisation des appareils et moteurs).

Pour l'activité de démantèlement de Tarmac Aerosave, les actions suivantes sont conduites :

- Mise en sécurité / décontamination : enlèvement des équipements armés (bouteilles d'oxygène, gilets de sauvetage, toboggans...);
- Démantèlement : démontage des pièces, équipements et éléments identifiés comme récupérables issus des aéronefs. Ces équipements pourront faire l'objet d'un contrôle puis d'une remise en état afin d'alimenter un marché de la pièce de rechange ;
- Déconstruction : les éléments ne pouvant pas faire l'objet d'une revente sur le marché de l'occasion pourront faire l'objet d'une valorisation matière ou énergétique. De ce fait, ceux-ci sont triés afin de les valoriser.

Le marché de la pièce de rechange constitue la principale source de revenu selon le cabinet Kairn [34]. Les appareils déconstruits actuellement ont une fraction métallique importante (77 % d'aluminium, 12 % d'acier) et encore peu de matériaux composites sont présents (seulement 3 %).

Actuellement, 92 % de la masse totale de l'appareil est valorisée.



©2020 | KAIRN Strategy Consulting

KAIRN

Figure 32 : Processus de démantèlement des avions commerciaux [34].

2.4.3.2. Perspectives concernant le gisement aéronautique

Bien que ce projet soit focalisé sur les déchets à une échelle nationale, il a été choisi de considérer une quantification des volumes de déchets à une échelle globale. Les raisons sont les suivantes :

- Les appareils utilisés actuellement en France pourront avoir une seconde vie (voire une troisième vie) hors d'Europe. Il n'est pas à exclure que les appareils reviennent sur le territoire pour leur démantèlement ;
- Il est imaginé une filière, a minima européenne, basée sur quelques acteurs tels que Tarmac Aerosave ou Martin Recycling. Le scénario national (une filière de démantèlement par pays de l'UE) n'est pas envisagé à ce jour.

Cette étude se base sur les données Europe, comme étant un marché potentiellement adressable par les acteurs français (Tarmac Aerosave à Tarbes ou Martin Recycling à Châteauroux et leurs partenaires). Les chiffres ci-après sont issus de la littérature, en particulier des travaux de Lefeuvre *et al.* [33]. En 2017, les auteurs ont étudié les flux de déchets composites CFRP générés par l'industrie de l'aviation commerciale civile, par régions (ie. à l'échelle continentale). Les avions régionaux et les moyens/longs courriers sont considérés. Les auteurs se basent sur les hypothèses suivantes :

- Seuls les avions contenant des CFRP sont considérés ;
- Le démantèlement des avions en fin de vie est de la responsabilité des pays où il est enregistré. Le démantèlement de l'appareil est affecté au continent où l'appareil est enregistré ;
- Une durée de vie de 25 ans est supposée, suivant les travaux de Forsberg [35] ;
- Les auteurs considèrent qu'un taux de déchets CFRP post-production est égal à 30 % de la masse de composites présents sur les aéronefs. Ces déchets sont affectés aux régions disposant d'une industrie aéronautique.

Sur la base de ces hypothèses, les auteurs ont quantifié les gisements de déchets composites générés annuellement à l'échelle mondiale, concernant les déchets post-production et post-consommateur (Figure 33). Les flux de déchets CFRP générés et les stocks associés par le secteur aéronautique vont croître rapidement du fait de l'arrivée en fin de vie des nouvelles générations d'avions. Il est estimé qu'en 2050 près d'un demi-million de tonnes de déchets CFRP auront été générés au total, la plupart des déchets seront localisés en Amérique du Nord et en Europe avec environ 162 kt et 145 kt respectivement. Un gisement de déchets de l'ordre de 10 000 t/an a été estimé jusqu'en 2035. Ce gisement augmente rapidement à partir de cette date pour atteindre une masse estimée à 30 000 t/an en 2050, suite aux premiers démantèlements des Airbus A350 et Boeing 787.

De même, les auteurs estiment le gisement de déchets CFRP par région, en 2015 et en 2050. En 2015, les principales régions génératrices de déchets CFRP sont l'Amérique du Nord et l'Europe avec respectivement 33 % et 31 % des volumes générés. L'Asie devrait être la principale région génératrice de déchets CFRP en 2050 avec 27 %, due à la forte croissance du marché dans cette partie du monde. Les régions Amérique du Nord et Europe devraient voir leurs volumes de déchets augmenter d'un facteur 1,7 et 1,9 respectivement. Malgré cette augmentation importante, les régions Amérique du Nord et Europe devraient voir leurs parts de marché se réduire à 23 %.

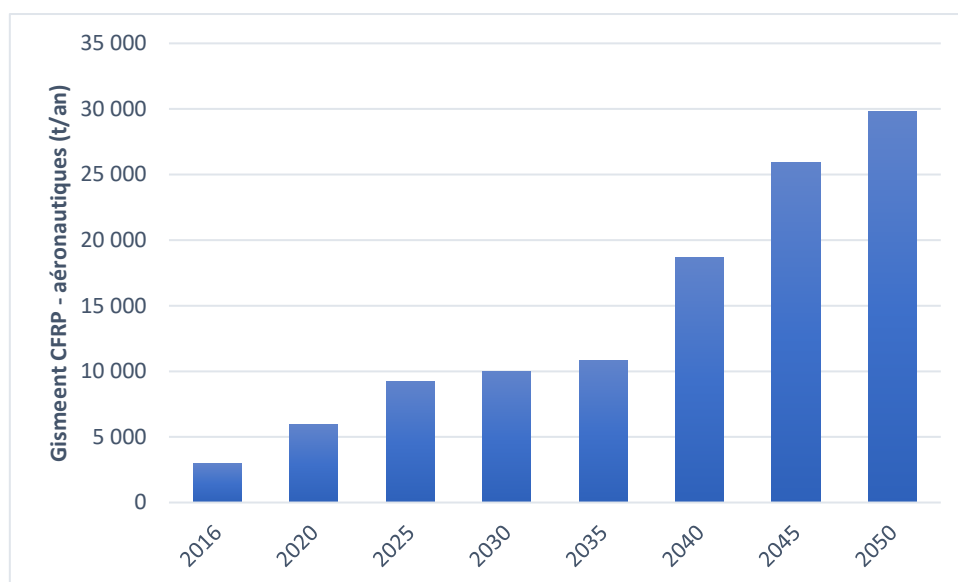


Figure 33 : Gisement de déchets composites CFRP post-production et post-consommateur générés mondialement [33].

	Europe	Asie	Amérique du Nord	Amérique Latine	Océanie	Afrique et Moyen-Orient	Total
2015 (t)	4 130	2 555	4 483	933	138	1 167	13 406
%	31 %	19 %	33 %	7 %	1 %	9 %	
2050 (t)	7 864	9 180	7 864	2 287	886	6 141	34 222
%	23 %	27 %	23 %	7 %	3 %	18 %	

Tableau 17 : Estimation des gisements de déchet CFRP en 2015 et en 2050 en tonnage [33].

2.4.4. Synthèse et discussion

Le marché aéronautique présente un intérêt fort, avec une structuration de la filière sur le territoire et un gisement de composites constitué majoritairement de CFRP. Le gisement CFRP européen aurait été de l'ordre de 4 100 t en 2015. Une croissance est attendue dans les prochaines années et devrait porter ce gisement à 7 800 t en 2050.

Ce gisement européen est présenté comme un marché adressable pour la filière française. Il devrait se répartir entre un nombre limité d'acteurs européens. Les gisements de déchets à l'échelle nationale devraient dépendre de la performance des acteurs de la filière française et également de leur capacité à capter des marchés hors Europe. Notons que Tarmac Aerosave apparaît comme un acteur d'intérêt pour capter une partie de ces gisements de déchets.

Deux perspectives d'intérêt ont été identifiées pour la quantification des gisements de déchets CFRP :

- La mise à jour des données présentées : en effet, les données utilisées ont été publiées en 2017 et il semble intéressant d'actualiser les données plus récentes. Par exemple, l'émergence d'une industrie aéronautique plus sobre accélère le renouvellement des flottes, les motivations étant économiques et écologiques ;
- La quantification des gisements CFRP s'est focalisée sur les avions régionaux et les moyens/longs courriers représentant l'essentiel des gisements de composites. La quantification des flux de déchets composites issues de la filière hélicoptère pourrait également représenter une perspective d'intérêt, les composites représentant entre 25 % et 30 % de la masse de la structure [32].

2.5. Marché transport terrestre – hors ferroviaire

2.5.1. Le marché français

En France métropolitaine et en 2020, le parc du matériel roulant hors ferroviaire est estimé à environ 43,7 millions d'unités par l'INSEE [36]. Ce parc est divisé en quatre catégories : les voitures particulières, les véhicules utilitaires légers, les poids lourds et les bus et cars (Tableau 18).

Les effectifs sont dominés par les voitures particulières à hauteur de 85 %. Selon les données le Comité des Constructeurs Français d'Automobiles (CCFA), 2 742 000 véhicules ont été immatriculés en France en 2019 (+2 % par rapport à 2018) [37]. Sur les 2,7 millions de véhicules neufs mis sur le marché en 2019, 5,7 % étaient des voitures hybrides et 1,9 % des voitures électriques. Les mises sur le marché de voitures particulières électriques et hybrides sont en forte hausse en France par rapport à 2018 (+17 % de hausse pour l'électrique et +37 % de hausse pour l'hybride). Les ventes de véhicules à motorisation diesel sont actuellement en fort repli (-39 % entre 2012 et 2019), au profit des voitures à motorisation essence (+8,3 % entre 2018 et 2019), hybride ou électrique.





Voitures particulières	Véhicules utilitaires légers	Poids lourds	Bus et cars
			
Part des effectifs du parc moyen : 85%	Part des effectifs du parc moyen : 13%	Part des effectifs du parc moyen : 1,3%	Part des effectifs du parc moyen : 0,2%

Tableau 18 : effectifs du parc moyen de véhicule en France en 2020 [36].(crédit : Renault, Gruau, Renault Trucks, RATP).

2.5.2. Les composites sur le marché automobile

Les matériaux composites sont apparus dans l'industrie automobile au milieu des années 1950. Ces matériaux sont principalement utilisés pour la fabrication de panneaux de carrosserie (capot, hayon, ailes avant et arrière, panneaux de portes, etc.), les accessoires extérieurs (becquets, les ailerons et les poignées de porte, les enjoliveurs et passages de roues, etc.) et les des pièces d'habitacle (les sièges, la tablette arrière, la planche de bord, les garnitures de toit, etc.) [38].

Les matrices peuvent être thermoplastiques (polypropylène, polyamide, polyuréthane, etc) ou thermodurcissables (polyester, vinylester, époxy, etc). Les fibres de renforcement peuvent être en verre, aramide, carbone voire thermoplastique. Selon le type de matrices utilisées, TP ou TD, les procédés de mise en œuvre sont variés (injection, compression, pultrusion, enroulement filamentaire et infusion sous vide pour les plus petites séries).

Encore aujourd'hui, les performances des procédés de fabrication des pièces en matériaux composites sont bien adaptées aux petites et moyennes séries de véhicules. Une infographie présentée dans le JEC Observer de 2020 [39] montre le pourcentage de composites dans les véhicules de particuliers. Il est mis en évidence que le taux de matériaux composites peut être de l'ordre de 8 à 10 % en masse pour les véhicules produits à une cadence de 100 pièces/an (véhicule premium) et décroît rapidement lorsque les cadences de production de véhicules augmentent.

Sur cette infographie, il est également notable que les véhicules à hydrogène incorporent davantage de composites que les véhicules thermiques, à cadence de production équivalente [39]. Pour certains véhicules à moteur hydrogène, la masse de composites peut atteindre 12 % de la masse totale du véhicule, principalement du fait du réservoir en composite. A titre d'exemple, la Toyota Mirai en 2015 affichait un réservoir de 43 kg à vide pour 60 litres utiles [40].

2.5.3. Fin de vie des véhicules de particuliers

En 2019, 1 623 522 véhicules ont été déclarés pris en charge par les centres Véhicules Hors d'Usage (VHU) agréés, représentant 1,8 Mt [41]. L'âge moyen des VHU pris en charge s'établit à 19,2 ans. Le poids moyen des VHU est de 1 118 kg. Les cinq modèles les plus déconstruits en 2019 sont la Peugeot 206, la Renault Clio II (1998-2005), la Renault Clio I (1998-98), la Renault Mégane I et la Peugeot 306.

Le Tableau 19 présente la composition moyenne d'un VHU en 2019. L'essentiel de la masse des VHU est composé de matériaux métalliques. On compte environ 200 kg de matières plastiques diverses en moyenne par véhicule. Les composites à fibres longues et les matériaux à matrice thermodurcissable n'apparaissent pas de manière visible dans ce tableau.

Matière	Part de chaque matière %	Masse de chaque matière kg/VHU
Métaux ferreux	70 %	782,6
Polypropylène (PP) autres pièces	4,4 %	49,2
Métaux non ferreux (hors faisceaux électriques)	4,0 %	44,7
Pneus	3,4 %	38,0
Verre	3,0 %	33,5
ABS, PVC, PC, PMMA, PS, etc.	2,2 %	24,6
Mousses polyuréthanes	2,0 %	22,4
Textiles, autres	1,6 %	18,4
Batterie de démarrage au plomb	1,4 %	15,6

Autres caoutchoucs	1,1 %	12,3
Polypropylène (PP) parechocs	1,1 %	12,3
Total		1 118

Tableau 19 : Composition moyenne d'un VHU en 2019, pour les matières présentes à plus de 1 % [41].

2.5.4. Fin de vie des poids-lourds

Actuellement, il n'existe pas de filière structurée pour le recyclage des poids lourds. En 2020, Renault Trucks, Indra Automobile Recycling et l'ADEME ont annoncé le lancement d'une étude préalable à la mise en place d'une filière de recyclage et de réutilisation de pièces pour poids lourds [42], pilotée par Renault Trucks. Dans cette étude, le gisement des véhicules en fin de vie est estimé en considérant les immatriculations de véhicules neufs et les évolutions du parc de poids lourds [43]. Il est constaté que :

- Lorsqu'ils sont mis sur le marché, les poids lourds sont exploités par leur premier propriétaire. On parle de première vie du véhicule. Les poids lourds sont généralement vendus sur le marché de l'occasion après quelques années de service et on parle alors de seconde vie. La première vie des poids lourds est supposée être de 5 ans pour les tracteurs routiers et de 9 ans pour les camions porteurs (pour les porteurs, la caisse et la cabine du camion sont solidaires) ;
- En 2019, le gisement potentiellement exploitable sur le territoire national est de 33 880 véhicules dont 13 000 camions porteurs ;
- Actuellement 25 % des véhicules arrivés en fin de première vie restent sur le territoire national, 75 % sont exportés généralement à destination de l'Afrique et de l'Europe de l'Est ;
- Le gisement de véhicules à recycler va augmenter de manière importante en 2025, avec la réduction inéluctable des débouchés export. En effet, les nouveaux moteurs Euro6 imposent une qualité de carburant et une utilisation importante d'urée (AdBlue), qui ne sera pas toujours compatible avec les infrastructures africaines ou asiatiques.

Dans ce contexte, il semble opportun d'évaluer les gisements de déchets composites issus de la filière poids-lourds à compter de 2025. Ce travail de quantification a été conduit conjointement avec l'entreprise Carlier Plastiques (carlier-plastiques.com/). Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- Les tracteurs ne sont pas considérés : des pièces composites sont présentes (face avant, déflecteurs, etc). Il est supposé que ces pièces seront principalement destinées à un marché de la pièce de remplacement ;
- Les semi-remorques ne sont pas considérées : elles resteront probablement orientées vers l'export, ces remorques n'étant pas concernées par les nouvelles motorisations Euro6.

Seuls les porteurs (la caisse et la cabine sont solidaires) sont considérés. Les porteurs frigorifiques (12 % des immatriculations en 2010) et les porteurs-fourgons (15,9 % des immatriculations) utilisent des matériaux composites pour les caisses. Les autres catégories de porteurs (bennes, rideaux et autres) n'utilisent pas ces matériaux.

Les applications sont les suivantes :

- Composites sandwich verre/polyester avec une âme en mousse polymère pour les camions frigorifiques ;
- Composites sandwich verre/polyester avec une âme en contreplaqué pour les camions fourgons.

Sous l'hypothèse d'un effectif de 13 000 camions porteurs en fin de vie en 2025, les effectifs de porteurs frigorifiques et fourgons sont supposés être de l'ordre de 1 500 et 2 000 unités respectivement. En concertation avec l'entreprise Carlier Composites, le gisement composite est estimé être de 2 000 t/an. Ce chiffre constitue probablement une hypothèse haute. En effet certains porteurs resteront certainement orientés vers une filière export.

Les immatriculations de porteurs neufs sont globalement en augmentation sur la période 2010 – 2019 (Figure 34), laissant supposer une augmentation des effectifs de porteurs à traiter dans les années à venir.

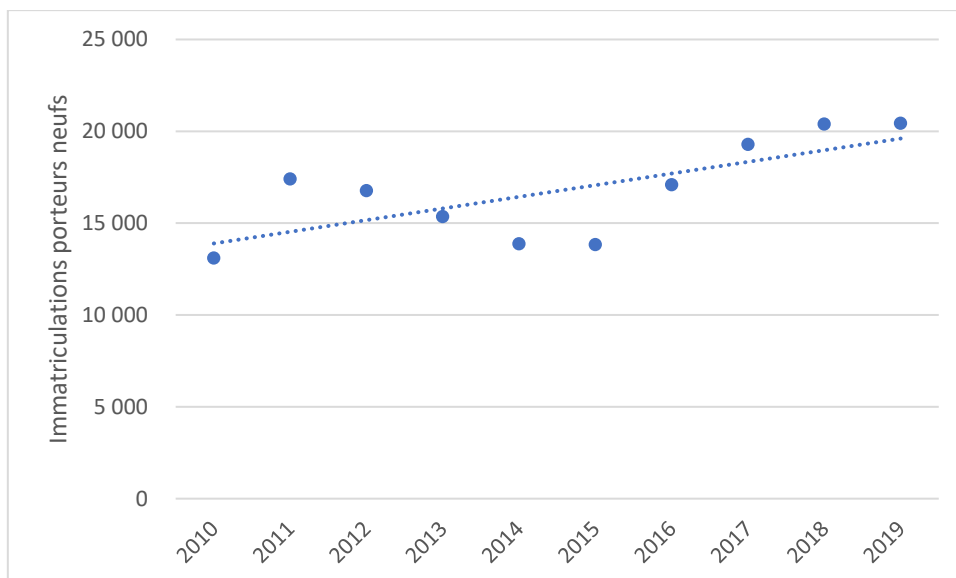


Figure 34 : Evolution des immatriculations de porteurs neufs sur la période 2010 – 2019 [44].

Le gisement composite est supposé être réparti de manière homogène entre les 15 centres de traitements de VHU avec une activité poids lourds identifiés par l'ADEME [43].

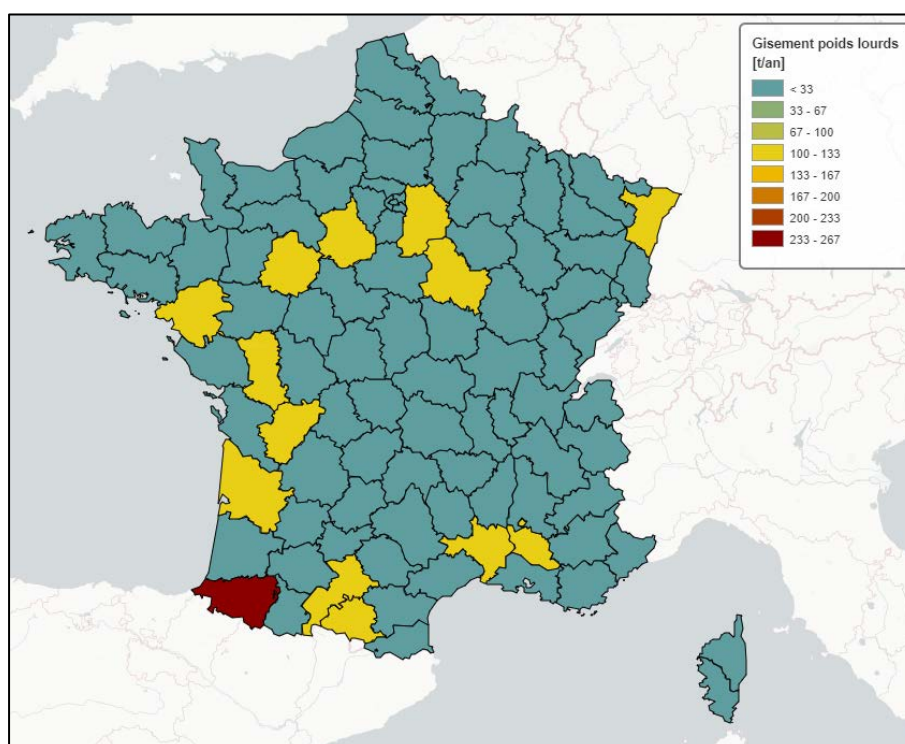


Figure 35 : Localisation des gisements de déchets composites disponibles vers 2025 sur la filière poids-lourds.

2.5.5. Fin de vie des autres véhicules roulants hors ferroviaire : utilitaires légers, bus et cars

La quantification des gisements de déchets automobiles a été centrée sur les véhicules de particuliers, constituant 85 % du parc français. Les véhicules utilitaires légers représentent une part importante du parc français avec 13 % des effectifs. Les cadences de production de ce type de véhicules sont plus adaptées aux procédés composites que les véhicules de particuliers. En France en 2019, environ 130 000 utilitaires ont été déconstruits par la filière VHU [41], soit 8 % des véhicules pris en charge dans cette filière.

2.5.6. Synthèse

Les volumes de déchets issus de la filière automobile sont importants avec 1,8 Mt de déchets générés en 2019. Les matériaux composites n'apparaissent pas de manière visible sur les véhicules de particuliers déconstruits actuellement. Sur ce segment de marché, les volumes de composites pourraient augmenter dans les années avenir du fait de :

- L'essor des véhicules à hydrogène, dont la proportion de matériaux composites est plus importante que sur les véhicules à moteur à explosion ;
- Les développements actuels concernant les composites thermoplastiques, dont les procédés ont des temps de cycles plus courts et pourraient être compatibles des cadences requises pour ce marché.

Le marché des poids lourds est à envisager, du fait de la structuration de la filière et d'un volume estimé à environ 2 000 t/an. Il a été supposé que les pièces de la cabine feraient l'objet d'un réemploi sur le marché de l'occasion. Les pièces composites sujettes à recyclage sont présentes sur les caisses de porteurs. Il s'agit de panneaux constitués de matériaux sandwich verre/polyester, avec des âmes en bois ou en mousse polymère. Ces matériaux sandwichs sont présents sur le marché des poids-lourds et n'ont pas été observés sur le marché automobile.

Une évaluation des gisements de composites sur les utilitaires semble également être une perspective d'intérêt, du fait du parc important et des volumes de production compatibles avec les procédés de fabrication des composites.

2.6. Marché ferroviaire

2.6.1. Le marché français

L'industrie ferroviaire française est un des leaders mondiaux depuis plus de trente ans. Son activité s'étend des infrastructures ferroviaires au matériel roulant, en passant par la signalisation, le design et la maintenance. L'activité de l'industrie se concentre sur :

- Le transport de voyageurs (train grande vitesse, train régional, métro, RER, métro automatique, tramway, tram-train) ;
- Le transport de marchandises (le fret).

Le réseau ferroviaire français est également le deuxième réseau d'Europe, en longueur avec 28 120 km après l'Allemagne [45].

Le marché est segmenté en trois catégories : le réseau national, le fret et le transport collectif urbain. Les équipements utilisés pour chaque segment sont différents et illustrés sur le Tableau 20.

La quantification de chaque segment s'appuie sur les données relatives au parc de machines en service. Concernant le réseau national, SNCF Voyageurs diffuse librement les informations sur son matériel roulant [46] pour les composantes Voyages SNCF, TER et Transilien hors filiales. Le matériel roulant ferroviaire est composé de l'ensemble des véhicules, moteurs (locomotives) ou remorqués (voitures). 6 300 matériels roulants (voitures ou locomotives) sont référencés dont environ 350 TGV, 2 300 TER, voitures et trains intercités et environ 900 transiliens.

Concernant les réseaux de transport collectif urbain, et selon le Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés (STRMTG), en 2019, le parc de tramways en service sur le territoire national était de 1 493 rames, réparties sur 29 agglomérations [47]. La taille moyenne d'un parc de tramway est de 51 rames, variant de 8 (Aubagne) à 278 (Paris / IDF).

Le STRMTG indique également qu'en 2019, 6 agglomérations étaient équipées en métros et RER (hors réseau ferré national). Il s'agit des agglomérations de Paris, Lille, Lyon, Marseille, Rennes, Toulouse [48]. Il existe 32 lignes commerciales, totalisant 364 km de métro et 115 km de RER. La ville de Paris / IDF comptabilise environ 720 rames de métro [49]. Le commissariat général au développement durable

dénombrer 398 métros pour la province en 2017 [45]. Même si le chiffre de 2017 semble ancien, ce chiffre est assez stable sur la période 2012 – 2017 (< 1 %).

De même, la ville de Rennes comptabilise 30 rames de métro, introduite à partir de 2002 [50].



Réseau national		Fret	
TGV	TER / Intercités		
			
Effectifs : 350 (Périmètre SNCF Voyageurs)	Effectifs : 2 300 motrices et automoteurs	Effectifs : NC	
Réseaux de transport collectif urbain			
Train	RER	Métro	Tramway
			
Effectifs : 890	Effectifs : ~290 (Périmètre RATP)	Effectifs : 1 120 unités	Effectifs : 1 493 unités

Tableau 20 : Segmentation du marché ferroviaire (crédit : SNCF et RATP).

2.6.2. Les composites sur le marché ferroviaire

Les applications des matériaux composites dans le domaine ferroviaire sont présentées sur la Figure 36. Ces matériaux sont majoritairement employés pour les habillages intérieurs des rames et pour les carénages extérieurs. Pour ces deux applications, les matériaux prédominants sont le verre/polyester et le verre/vinylester. Les pièces utilisées en construction ferroviaire sont chargées en agents ignifugeants, pour les pièces intérieures et extérieures.

Il est également à noter que les infrastructures ferroviaires sont également utilisatrices de matériaux composites, pour les passages à niveau, les signalisations voire certaines structures de ponts.

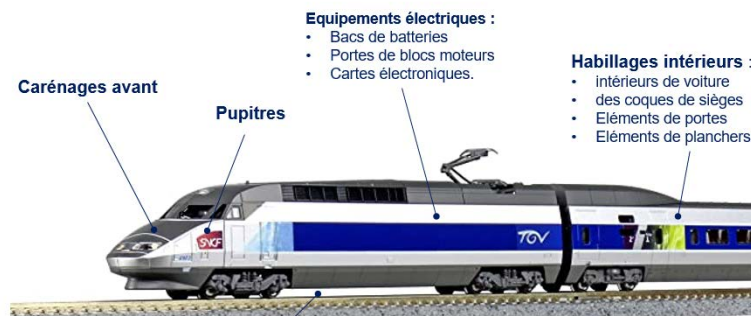


Figure 36 : Application des composites pour la construction ferroviaire.

En 2000, Guillemot et Grunevald ont quantifié la masse de composite pour 10 modèles de matériel roulant [51], représenté sur la Figure 37. Les auteurs considèrent que ces 10 modèles sont assez représentatifs de l'ensemble du marché ferroviaire au début des années 2000.

Généralement, un TGV est composé de 2 motrices et 8 voitures, la masse de composites pour un TGV et un TGV Duplex est supposée être respectivement de 3,2 t et 3,7 t. La masse moyenne sur un métro est supposée être de 1,05 t. Sur le périmètre Voyageur SNCF, les composites sont essentiellement concentrés sur les TGV, représentant la moitié de la masse de composites sur le parc complet de machines.

Sous ces différentes hypothèses, en considérant le parc global français, hors fret et filiales SNCF (Thalys...), il est estimé que les composites sont présents pour moitié sur les trains du réseau national et pour moitié sur les trains des différents réseaux urbains (Tableau 21).

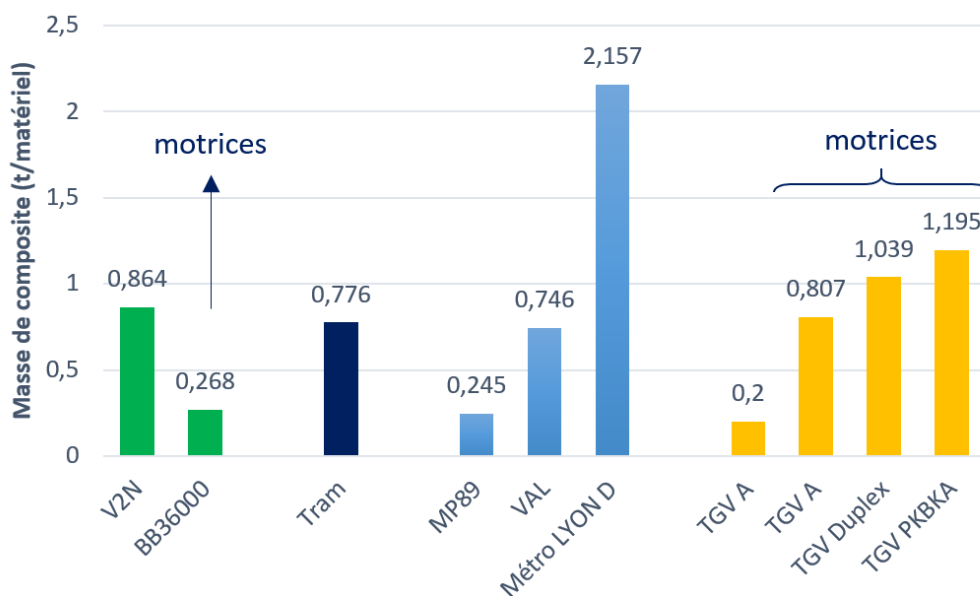


Figure 37 : masse de composites pour différentes natures de matériel ferroviaire, adapté de [51].

Segment	Effectifs	Masse composites par unité (t)	Estimation de la masse de composites sur le parc français (t)
SNCF Voyageurs, hors filiales	6 302	Variable suivant engin	2 400
Métros	1 120	1,05	1 200
Tramways	1 493	0,776	1 150
RER (périmètre RATP)	290	NC	NC
Fret	NC	NC	NC
Total (hors fret, RER et filiales SNCF) – Estimation guide GREC			4 750
Total parc SNCF – Estimation SNCF			~10 000

Tableau 21 : estimation du volume de composites sur le parc ferroviaire français.

2.6.3. Flux des déchets

2.6.3.1. Flux de déchets de production et de maintenance

Les pièces composites à destination du marché ferroviaire sont réalisées par des sous-traitants, transformateurs de composites. Les déchets de production sont comptabilisés par le secteur industriel (section 2.9).

Ainsi, la SNCF indique que les déchets de maintenance sont de deux types :

- Il s'agit de pièces consommables, par exemple dans le cas d'impact sur les carénages extérieurs. Ce flux de déchet est estimé par la SNCF à 50 t/an et ;
- Opération à demie-vie des engins roulants : après 15 ans de service, une rénovation des pièces intérieures des trains est assurée et concerne donc les pièces d'habillage d'intérieur. Ces opérations s'opèrent de 1 à 2 fois dans la vie du matériel. Le volume de déchets composites associés n'a pas été quantifié.

2.6.3.2. Flux de déchets fin de vie

Méthode Calculatoire

Le flux de déchets fin de vie est quantifié sur la base du parc de véhicules SNCF Voyageurs hors fret, RER et filiales SNCF (Tableau 21). Pour chaque matériel moteur identifié dans le parc SNCF Voyageurs, les dates de livraison, et les masses de véhicules ont été reportées par Redoutey dans l'ouvrage « Le matériel moteur de la SNCF » [52]. Les masses de composites par matériel ont été estimées sur la base des travaux de Guillemot et Grunevald [51] et des développements présentés au paragraphe 2.6.2. Une durée de vie de 40 ans a été supposée pour le matériel, suivant les indications fournies par la SNCF.

Sur la base de ces hypothèses, les résultats du modèle de prévision de déchets fin de vie sont présentés sur la Figure 38. On note un flux de déchets compris entre 20 t/an et 100 t/an avec une moyenne de 45 t/an. La masse de composites est estimée à 0,3 % de la masse du parc de machines, tous matériels confondus.

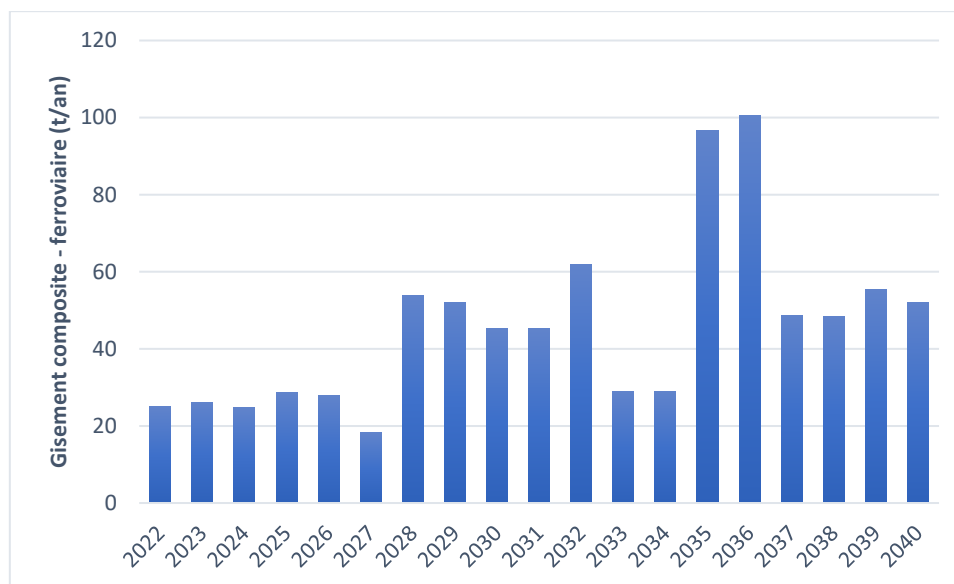


Figure 38 : Estimation de la masse de déchets de composites pour le secteur ferroviaire (périmètre matériel roulant SNCF Voyageurs uniquement) à comparer aux 150 – 200 t/an estimés par la SNCF sur l'intégralité du parc de matériels roulants.

Estimations SNCF

La méthode calculatoire a été confrontée aux estimations de la SNCF, sur l'ensemble du parc matériels roulants. Il est estimé que le gisement de déchets composites est actuellement de l'ordre de 150 à 200 t/an en considérant que :

- Environ 1200 matériels roulants (voitures ou locomotives) démantelés par an avec une masse moyenne de composite de l'ordre de 100 kg par matériel ;
- 24 TGV sont démantelés annuellement soit environ 60 t/an.

Actuellement, environ 3500 matériels roulants, principalement des locomotives, sont en attente de démantèlement soit 400 tonnes environ.

2.6.4. Répartition spatiale des déchets composites issus du ferroviaire

Il existe 7 sites de démantèlement pour les matériels ferroviaires à voyageurs de SNCF, présentés sur le Tableau 22. Le gisement de déchets composites en fin de vie a été estimé à 50 et 200 t/an, soit 7 à 28 t/an en moyenne par site.

Sous-traitant	Site	Matériel démantelé
DIE	Saintes (17)	Matériel de banlieue parisienne à 2 niveaux
SNADEC	Grémonville (76)	TGV 1 niveau / Matériel 1 niveau inox
WIG	Baroncourt (55)	Locomotives / Matériel 1 niveau inox
WIG	Romilly sur Seine (10)	Matériel 1 et 2 niveaux TER et banlieue parisienne
DIE	Chalindrey (52)	Voitures corail
NEOM	Ambronay (01)	TGV 1 niveau
SME	Culoz (01)	Matériels divers

Tableau 22 : Les sites de démantèlement pour les matériels ferroviaires à voyageurs de la SNCF.

En première approximation, les déchets composites issus de la maintenance, estimés à 50 t/an, peuvent être répartis de manière uniforme sur les 26 technicentres SCNF, en charge de la maintenance du matériel roulant de la SNCF. Le gisement des déchets de maintenance est donc de l'ordre de 2 t/an par technicentre.

2.6.5. Synthèse pour le marché ferroviaire

Le gisement de déchets composites en fin de vie est estimé être de l'ordre de 50 à 200 t/an pour le parc des matériels roulants de la SNCF, essentiellement constitué du matériau verre/polyester. A ce gisement, il convient d'ajouter :

- Les déchets de maintenance, estimés à 50 t/an (gisement probablement sous-estimé car ne prenant pas en compte les opérations à mi-vie des matériels roulants) ;
- La contribution des tramways et des métros, également utilisateurs de composites, qui pourrait être équivalent au volume généré par SNCF Voyageurs.

Ce gisement est faible au regard des volumes de déchets générés par les autres secteurs. Les matériaux composites utilisés sur le marché ferroviaire sont majoritairement chargés d'agents ignifuges. Il s'agira de vérifier leur conformité à la réglementation sur les Polluants Organiques Persistants (POP) avant d'envisager un recyclage de ces matériaux.

Les infrastructures ferroviaires, utilisatrices de matériaux composites pour les passages à niveau, les signalisations voire certaines structures de ponts, constituent potentiellement un gisement intéressant. En effet, ces matériaux ne sont pas chargés en agents ignifuges, leur recyclage pourrait être plus facile que pour les matériaux utilisés pour le matériel roulant.

2.7. Marché des articles de sport et loisirs

2.7.1. Le marché français

Le marché des Articles de Sport et de Loisirs (ASL) est le troisième marché de biens de consommation en France, avec un chiffre d'affaires de plus de 11,5 milliards d'euros en 2018, en croissance continue depuis 2010 [53]. Ce marché comprend plusieurs catégories de produits, allant des équipements dédiés à la pratique d'un sport collectif ou individuel aux vêtements et chaussures. Les mises sur le marché national représentent 186 460 t globalement (toutes matières confondues) en 2018 [53], réparties en 8 catégories : cycles et trottinettes, sports d'équipes, sports individuels, sports et loisirs d'hiver, sports et loisirs nautiques, sports et loisirs extérieurs hors sports mentionnés dans une autre catégorie, pêche et chasse et tir. La ventilation en tonnage est présentée sur le Tableau 23.

Selon Mason [54], qui s'appuie sur une étude de marché publiée en 2020 par le cabinet Lucintel, l'utilisation de matériaux composites dans l'industrie mondiale des articles de sport continue de croître pour atteindre un montant estimé à 579 millions de dollars d'ici 2023 et devrait connaître une croissance de 3,2 % (CAGR) de 2018 à 2023. Selon l'autrice, les skis et snowboards devraient rester les applications principales des composites en volume, les clubs de golf les plus importantes en valeur et les cannes à pêche enregistrent la plus importante croissance sur la période.

Cycles et trottinettes	Sports d'équipes	Sports individuels	Sports et loisirs d'hiver
 <p>Part de mises sur le marché : 30 %</p>	 <p>Part de mises sur le marché : 5 %</p>	 <p>Part de mises sur le marché : 37 %</p>	 <p>Part de mises sur le marché : 15 %</p>
Sports et loisirs nautiques	Sports et loisirs extérieurs hors sports mentionnés dans une autre catégorie	Pêche	Chasse et tir
 <p>Part de mises sur le marché : 4 %</p>	 <p>Part de mises sur le marché : 6 %</p>	 <p>Part de mises sur le marché : 1 %</p>	 <p>Part de mises sur le marché : 1 %</p>

Tableau 23 : Segmentation du marché des sports et loisirs et parts de mises sur le marché en tonnage, adapté de [53] (crédit : Décathlon).

2.7.2. Les composites dans le marché du sport et loisirs

Les matériaux composites sont présents sur la plupart des segments du marché des ASL. A titre d'exemple, des cadres de vélos, des cannes à pêche, des kayaks ou des skis sont des produits pouvant intégrer des matériaux composites.

En fonction de l'application, les matériaux employés peuvent varier. Pour les applications grand public, des matériaux verre/polyester peuvent être utilisés. Pour des applications premium ou compétition, des matériaux carbone/époxy sont disponibles [55].

La Figure 39 montre la répartition des matériaux qui composent les articles de sports et de loisirs mis sur le marché en France en 2017. Il faut noter que la catégorie « composites et autres » représente 7 % des mises de la masse selon l'ADEME [53]. D'après la société Décathlon, le taux de composites sur les articles de sports et loisirs pourraient être de l'ordre de 1 %.

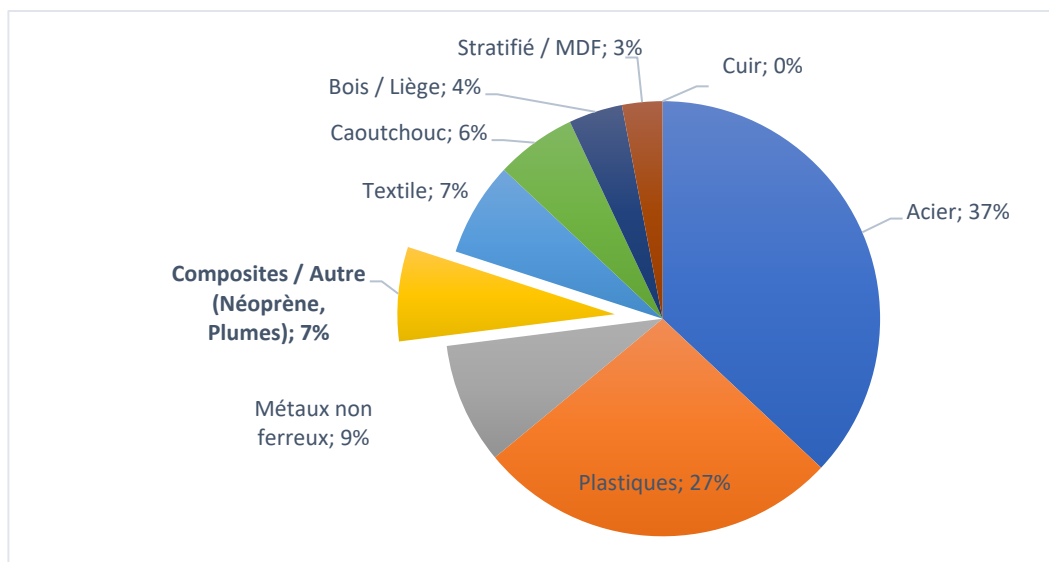


Figure 39 : Répartition des mises en marché d'ASL par matériaux en poids [53].

2.7.3. REP articles de sports et de loisirs

Une nouvelle filière REP dédiée aux Articles de Sports et de Loisirs (REP ASL) a été mise en place le 01 janvier 2022, filière dans laquelle le Ministère de la Transition Ecologique vient d'agréer l'éco-organisme ECOLOGIC [56]. L'objectif de cette nouvelle filière porte notamment sur l'allongement de la durée de vie des articles de sports et de loisirs en contribuant à leur réparation et au doublement des quantités d'articles réutilisés.

Avec la création de cette nouvelle filière, ce sont près de 100 millions d'euros qui seront annuellement alloués pour [56] :

- Développer l'écoconception des articles de sports et de loisirs ;
- Soutenir le réemploi, la réutilisation et la réparation des articles de sports et de loisirs ;
- Reprendre les articles de sports et de loisirs usagés ;
- Recycler les articles de sports et de loisirs usagés qui ne peuvent être réemployés ou réutilisés.

2.7.4. Flux des déchets

Seuls les flux de déchets composites en fin de vie ont été quantifiés dans ce guide. Selon l'ADEME [53], le volume de déchets de la filière ASL est de 104 000 t/an. Le taux de composites dans la filière ASL étant estimé être de l'ordre de 1,0 % de la masse totale, ceci représente un volume de déchets composites de 1 000 t pour 2022. A compter de 2023, une croissance annuelle de 3 % est attendue, en supposant que les volumes de déchets vont croître dans les mêmes proportions que les mises sur le marché. Ce chiffre de 3 % de croissance semble confirmé pour le marché français sur la période 2012 – 2017 par l'union sport et cycles [57].

Actuellement, 6,4 % des déchets de la filière ASL feraient l'objet d'un réemploi par les acteurs de l'économie sociale et solidaire. Le potentiel de réemploi est estimé par l'ADEME à environ 50 % des déchets générés. Les catégories de produits où les composites sont fortement représentés (vélos, skis, clubs de golf, etc...) sont considérés par l'étude préalable à la mise en place de la REP ASL comme « à fort potentiel de réemploi ».

L'étude souligne également que le réemploi sur le marché de l'occasion est une pratique ancrée en France, grâce à des sites d'annonces (Le Bon Coin, Troc-Vélo, etc), ou des réseaux de professionnels (Trocathlon, Padd@Troc, etc). Les articles consommateurs de composites sont également concernés en premier lieu par ce marché de l'occasion.

2.7.5. Localisation des gisements de déchets composites

Pour la répartition géographique, il est supposé que les déchets composites suivent statistiquement la même distribution que la densité de population française. La population par département est extraite des données INSEE [58]. Les 1000 t de déchets composites sont repartis proportionnellement à la densité de population par département (Figure 40).

Les déchets composites issus de la filière ASL sont importants dans les départements disposant de pôles urbains développés. Le gisement est diffus sur le territoire avec des volumes estimés compris entre 2 et 40 t/an par département, avec une moyenne à 10 t/an et par département.

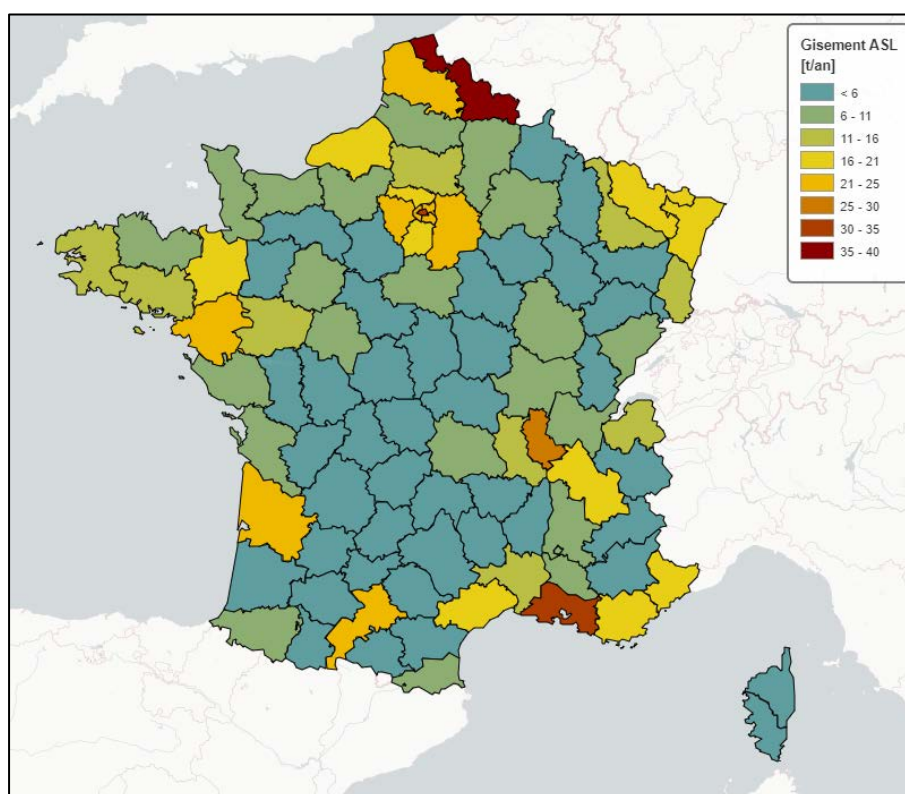


Figure 40 : Répartition géographique des déchets composites issus de la filière ASL.

2.7.6. Synthèse et discussions

Les déchets issus de cette filière peuvent contenir une proportion importante de fibres de carbone, à plus haute valeur que les fibres de verre. Les volumes sont de l'ordre de 1000 t/an. En revanche, le gisement est très diffus sur le territoire et sa collecte et son transport peuvent s'avérer complexe à mettre en œuvre dans une optique de recyclage.

La filière REP ASL, en place depuis le 01 janvier 2022, devrait privilégier la réparation et le réemploi des articles de sports et de loisirs. Les articles contenant des matériaux composites ont globalement été considérés comme « à fort potentiel de réemploi » par l'ADEME. En conséquence, l'essentiel des 1000 t/an de déchets composites devrait être orienté vers une filière réparation/réemploi et seulement une fraction vers une filière de recyclage. La mise en place de la REP ASL devrait permettre à court/moyen terme d'obtenir des données plus quantitatives sur les exutoires des articles de sports et loisirs contenant des composites.

2.8. Electricité et électronique

Les composites sont présents sur le marché de l'électricité et de l'électronique pour plusieurs applications. On retrouve ces matières pour les pièces d'isolation électrique (coffrets, interrupteurs, etc..) mais également pour les cartes électroniques, pour lesquelles le substrat est généralement constitué de verre/époxy.

Ce paragraphe s'intéresse à cette seconde application du fait des volumes importants mis sur le marché annuellement.

2.8.1. Le marché français

Les produits de ce marché sont couverts par la REP DEEE (Déchets d'équipements électriques et électroniques). En 2019, 1,2 milliard d'équipements électriques et électroniques toutes catégories confondues ont été mis sur le marché (+ 25 % par rapport à 2018), ce qui représente une masse de 2 100 kt (+7 % par rapport à 2018) [59]. En tonnage, les mises sur le marché sont en augmentation sur la période 2014 – 2019 (+ 33 % sur cette période).

2.8.2. Les composites sur le marché des cartes électroniques

Les cartes de circuits imprimés se présentent généralement sous la forme d'un composite laminé plat fabriqué à partir de matériaux de substrat non conducteurs avec des couches de circuits en cuivre conducteur imprimées ou à l'intérieur du substrat [60]. La surface composite plate est idéale pour supporter les composants qui sont soudés et fixés aux cartes de circuits imprimés, tandis que les conducteurs en cuivre relie électriquement les composants entre eux.

Les substrats de cartes électroniques sont constitués d'un mélange de résine phénolique/cellulose (de couleur jaune/marron) ou de composites verre/époxy (de couleur vert/jaune). La composition des cartes électronique est présentée sur le Tableau 24.

Actuellement, une carte électronique contient environ 40 % de résine et de plastique, 30 % de fibres de verre et céramique et 30 % de métaux [60], [61]. La masse de composite est donc supposée être des 2/3 de la masse de la carte électronique.

Les résines utilisées pour la fabrication des cartes électroniques sont fortement chargées en agents ignifuges.

Métal jusqu'à 40%	Pourcentage (%)	Céramiques jusqu'à 30%	Pourcentage (%)	Matières plastiques jusqu'à 30%	Pourcentage (%)
Cu	6 – 31	SiO2	15 – 30	PE	10 – 16
Fe	0.7 – 15.2	Al2O3	6.0 – 9.4	PP	4.8
Al	1.3 – 11.7	Oxydes alcalino-terreux (BeO)	6.0	PS	4.8
Sn	0.7 – 7.4	Titanates-micas	3.0	Epoxy	4.8
Pb	0.8 – 6.7			PVC	2.4
Ni	0.2 – 5.4			PTPE	2.4
Zn	0.2 – 2.2			Nylon	0.9
Sb	0.2 – 0.4				
Au (ppm)	9.0 – 2050				
Ag (ppm)	110 – 5700				

Tableau 24 : Composition des cartes électroniques [60].

2.8.3. Estimation des flux des déchets

2.8.3.1. Flux de déchets

La fin de vie de ces produits est prise en charge par la filière DEEE. En 2019, 11 750 t de cartes de circuits imprimés ont été traités par la filière DEEE, en incluant les déchets de professionnels et de particuliers [59]. La masse de résine et de fibres de verre est estimée être des 2/3 de la masse de la carte, le flux de composites sur ce marché est supposé être de 7 800 t/an en 2019.

	Masse DEEE généré	Masse déchets cartes électroniques	Source

	(t)	%variation année précédente	(t)	%variation année précédente	
2017	751 000	-	10 050	-	[62]
2018	796 000	+6,1 %	12 200	+21,8 %	[63]
2019	855 000	+7,3 %	11 750	-3,9 %	[59]
2020	849 000	-0,7 %	10 050	-14,9 %	[64]

Tableau 25 : Masse de déchets composite issus de cartes électroniques sur la période 2017 – 2020.

2.8.3.2. Traitement actuel des cartes électroniques

Le démantèlement des DEEE est variable suivant le flux considéré. Il consiste très souvent en une opération de broyage, précédé d'un tri manuel [65]. Les cartes électroniques sont traitées spécifiquement. Actuellement, l'enjeu sur ces déchets porte sur la récupération des métaux stratégiques contenus dans les cartes, présentés sur le Tableau 24.

Il existe diverses techniques pour la récupération des métaux stratégiques. Le procédé utilisé est souvent un traitement de pyrométallurgie puis d'hydrométallurgie [61]. La majorité des cartes électroniques sont aujourd'hui traitées par pyrométallurgie [62]. Une dizaine de fonderies dans le monde peuvent traiter les cartes (ex : WEEEcycling, Umicore). Le broyat est introduit dans des fours de grande capacité, en mélange dosé avec des déchets métallurgiques et des minerais. Les cartes sont montées en température, de 500 °C à 1 100 °C pour la pyrolyse et la pyrométallurgie. La résine est calcinée, et les métaux récupérés.

La fibre se retrouve dans les résidus de pyrolyse aussi appelés scories, aujourd'hui considéré comme déchet ultime [62]. Il est possible que les agents ignifuges se retrouvent dans les scories ou dans les fumées générées durant la pyrolyse. Les fibres sont également probablement très dégradées par le procédé. En supposant 30 % de fibres de verre, la masse actuelle de fibres de verre disponible est de 3 500 t/an.

2.8.4. Répartition géographique des déchets de cartes électroniques

Dans son rapport annuel du registre des déchets DEEE [59], l'ADEME diffuse la répartition par région des tonnages d'équipements ménagers collectés en 2019. Dans le cadre de ce développement, les déchets composites issus des cartes électroniques sont supposés suivre cette même répartition spatiale. Il a été supposé 7 800 t/an de composites, suivant les développements du paragraphe 2.8.3.1. La répartition spatiale est présentée sur la Figure 41.

Les déchets DEEE sont fortement concentrés sur les départements disposant de pôles urbains importants.

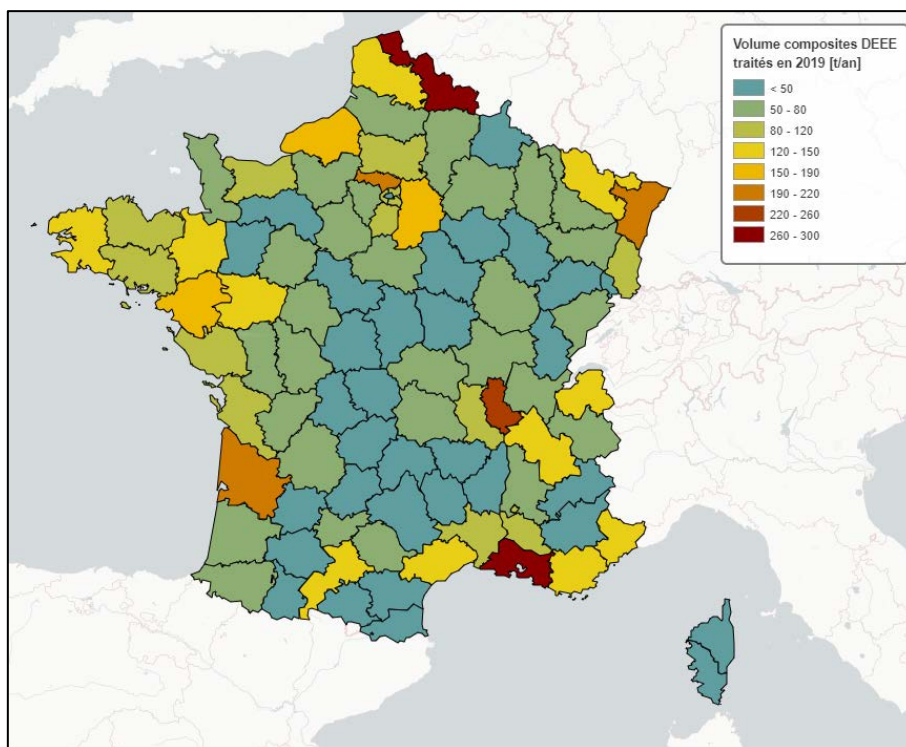


Figure 41 : Localisation des 7 800 t de déchets composites traités par la filière DEEE (déchets fin de vie).

2.8.5. Synthèse et discussions sur les déchets de cartes électroniques

Le volume de composites sur ce marché a été estimé à 7 800 t/an en 2019. Le gisement est constitué de composites verre/epoxy chargés en agent retardant à la flamme. Sur ces 7 800 t/an, seuls 3 500 sont accessibles, sous forme de fibres de verres, mélangées aux résidus de pyrolyse.

Malgré les volumes importants de déchets composites sur ce marché, l'exploitation du gisement apparaît comme étant très délicate. En effet, les fibres se retrouvent probablement mélangées avec les agents retardant à la flamme et les propriétés des fibres sont probablement fortement dégradées par la pyrolyse. Ce constat ne permet pas d'entrevoir une exploitation aisée du gisement.

2.9. Déchets de production de composites

En 2010, Le Groupement de la Plasturgie Industrielle et des Composites (GPIC) avait estimé le gisement national de déchets composites issu de la filière plasturgie et composites à 30 000 t/an. La mise à jour de ces données a été conduite dans le cadre de ce guide.

Pour la rédaction de ce guide, un questionnaire a été adressé auprès des adhérents/ressortissants de Polyvia, la FIN et IPC. On estime entre 400 et 450 le nombre d'entreprises impliquées dans la production de pièces composites. Les industries représentées par les adhérents de la FIN, Polyvia et d'IPC sont essentiellement des transformateurs de matériaux à fibres logues et résines thermodurcissables. En conséquence, la taille du marché a été comprise entre 125 et 147 kt (Chapitre 1).

Les principales questions du questionnaire ont porté sur la masse de composites produits par les entreprises et les masses de déchets afin de calculer un taux de rebut moyen.

2.9.1. Résultats enquête nautisme

Les principaux chantiers français ont été questionnés sur la consommation, la production et les déchets de production. L'échantillon des entreprises ayant répondu au questionnaire représente 75 % de la production française. Les données pour l'industrie nautique française ont été obtenues en extrapolant

les résultats de l'enquête (consommation/production : Tableau 26 et génération de déchets : Tableau 27). Les données donnent un taux de rebut de 13,9 % pour l'industrie nautique française.

Ces données ont été collectées et analysées par l'APER et la FIN.

En tonnes	Consommation fibres	Consommation résine et gelcoat	Total consommation composites	Production composites
Industrie nautique française	4 700	7 500	12 200	10 500

Tableau 26 : Consommation et production de l'industrie nautique française issues de l'enquête APER/FIN.

En tonnes	Déchets fibres seules (découpes)	Déchets résine et gelcoat	Déchets composites après réaction	Total déchets composites
Industrie nautique française	380	320	1 000	1 700

Tableau 27 : Déchets générés par l'industrie nautique française issues de l'enquête APER/FIN.

2.9.2. Résultats enquête plasturgie et composites

37 entreprises ont répondu à l'enquête IPC/Polyvia, soit 9 % des effectifs nationaux (400 à 450 entreprises). 84 % des entreprises ont renseigné les volumes de production de l'entreprise, représentant 16 800 t/an (soit 12 % des 136 kt).

La ventilation des entreprises par marché est présentée sur la Figure 42. Il s'agit du marché principal renseigné par les sondés. La répartition est assez cohérente avec la réparation nationale présentée au Chapitre 1.

76 % des entreprises déclarent travailler principalement de la fibre de verre et 22 % annoncent travailler principalement de la fibre de carbone. Concernant les matrices, 70 % déclarent travailler la résine polyester, 22 % la résine époxy, 3 % une résine vinylester et 5 % une autre résine.

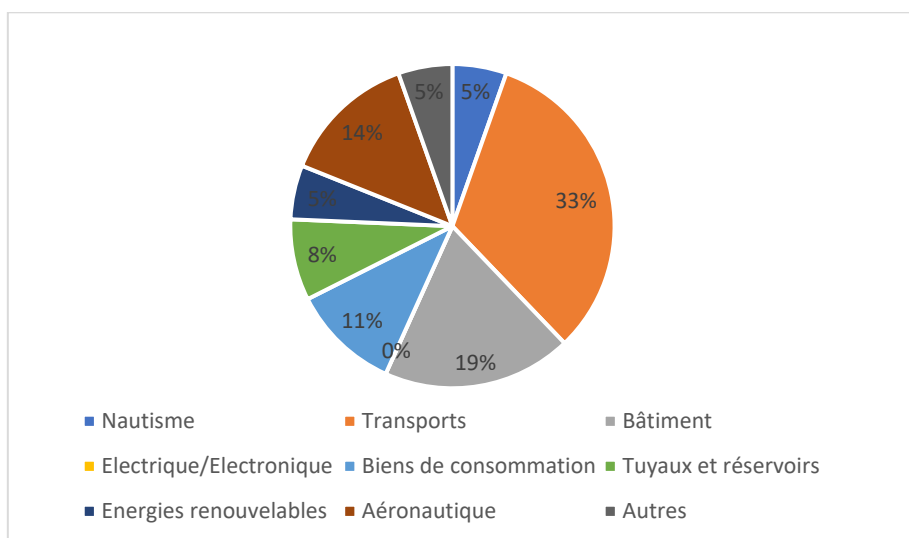


Figure 42 : Ventilation des réponses à l'enquête par marchés.

Sur l'ensemble des questionnaires, 19 réponses ont été jugées exploitables sur les 400 à 450 entreprises du composite (soit 4,5 %). La masse de composite produite par ces 19 entreprises est de 12,3 kt (soit 9 % du marché). Le taux de rebut moyen sur ces 18 entreprises est de 11,1 %. L'écart-type sur les taux de rebuts est de presque 6 % indiquant une forte disparité dans les réponses fournies.

2.9.2.1. Estimation des taux de rebuts et quantification des déchets industriels

Un taux de rebut de 11,1 % a été calculé pour l'industrie hors nautisme et 13,9 % pour l'industrie nautique. En pondérant ces résultats par les parts pour chaque marché (cf. Figure 14), un taux de rebut de 11,2 % est obtenu.

En supposant un marché à 136 kt, le volume de déchets de l'industrie du composite en France est de l'ordre de 15 200 t/an.

Par ailleurs, le marché des composites était en croissance avant la crise sanitaire. Le taux de croissance CAGR sur la période antérieure à 2020 est variable suivant les sources et les périmètres étudiés. Les croissances CAGR sont calculées en volumes (t) :

- AVK [1] a constaté une croissance (CAGR) de 1,8 % sur la période 2012 – 2019 à l'échelle européenne pour des composites à fibres de verre continues ;
- JEC [66] a prévu en 2017 une croissance (CAGR) de 5,0 % sur la période 2010 – 2020 à l'échelle nationale, pour des composites à fibres longues et fibres courtes ;
- Le JEC Observer [67] a constaté une croissance (CAGR) de 4,6 % sur la période 2012 – 2019 à l'échelle mondiale, pour des composites à fibres longues et fibres courtes ;

Le taux de croissance de 1,8 % a été retenu, le périmètre de l'étude AVK étant plus proche de cœur de cible du guide GREC.

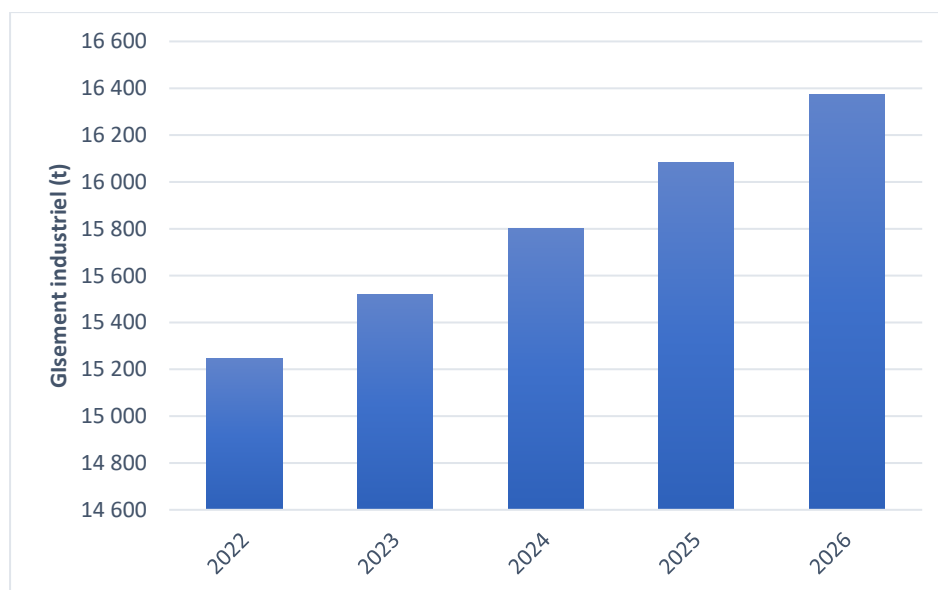


Figure 43 : Evolution du gisement de déchets industriels sur la période 2022 – 2026.

2.9.3. Localisation des déchets composites

La carte de répartition spatiale des déchets composites pré-consommation n'a pas été réalisée dans le cadre de ce guide. En effet, deux options ont été envisagées présentant des limites dans les deux cas :

- Supposer que ces déchets post-industriels sont répartis uniformément sur chaque entreprise répondant au classement ICPE 2661 (Transformation de polymères) ;
- Supposer que les déchets sont répartis uniformément sur chaque entreprise répondant au code APE 2229A (Fabrication de pièces techniques à base de matières plastiques).

Les deux options conduisent à considérer les transformateurs de la plasturgie et des composites dans leur ensemble. Les transformateurs de la filière plasturgie étant plus nombreux que les transformateurs de la

filière composite, ces deux options ne permettent pas de considérer quantitativement la réparation spatiale des déchets composites post-industriels.

2.9.4. Synthèse et discussion

Cette étude se base sur un échantillon de 9 % des entreprises du composite. Les réponses aux questionnaires indiquent un taux de rebuts de 11,1 %, essentiellement constitués de composites verre/polyester. Le volume de déchets, a été réévalué à 15 100 t/an sur le territoire national avec un taux de croissance qui pourrait être de l'ordre de 1,8 %.

En perspectives, le gisement de déchets composites post-industriels représente une part importante des volumes générés annuellement. Il semble important de quantifier plus précisément ce gisement, en termes de qualité et de matières générées. Il semble aussi intéressant d'évaluer la répartition spatiale de ces déchets.

2.10. Autres secteurs et perspectives

D'autres secteurs sont également consommateurs de composites et n'ont pas été cartographiés. Les marchés/applications pour lesquels une attention particulière est attendue pour les prochains exercices sont les suivants :

- **Le bâtiment** : Avec 21% du marché, le bâtiment est fortement concerné par ces matériaux. La collecte des informations sur ce marché s'est avérée difficile. La mise en place de la REP bâtiment, devrait permettre de mieux cartographier les flux de déchets sur ce marché ;
- **Les tuyaux et réservoirs** : Ce marché représente 7 %. En particulier avec les développements récents autour de l'hydrogène terrestre, les volumes de composites sur ce marché pourraient augmenter fortement [68] ;
- **Eolien en mer** : Avec l'implantation récente de Siemens-Gamesa et de GE Renewable Energy pour la fabrication des pales offshore au Havre et à Cherbourg, des gisements de déchets industriels pourraient être générés par cette industrie et mutualisés avec les autres déchets composites ;
- **Automobile** : Les utilitaires pourraient constituer des gisements intéressants et une quantification plus fine semble être d'intérêt pour ce segment de marché.

Dans une moindre mesure, il semblerait également intéressant d'approfondir les gisements pour les applications suivantes :

- **Moyens de transport aériens** : Cette étude est centrée sur les avions commerciaux. Il semble pertinent d'étudier plus attentivement les gisements issus de l'aviation générale, des ULM et des hélicoptères ;
- **Electricité et électrotechnique** : Eléments d'isolation électrique et coffrets électriques [69].

2.11. Synthèse

Il est proposé de considérer les filières suivantes pour une potentielle massification de filières :

- Gisement issu de la filière du nautisme de plaisance ;
- Gisement de déchets industriels ;
- Gisement éolien ;
- Gisement des articles de sports et loisirs (ASL) ;
- Gisement poids lourds.

Il est également à noter que les filières suivantes sont essentiellement constituées de déchets composites à fibres de verre :

- Nautisme (majoritairement associées à une matrice polyester) ;
- Déchets industriels (majoritairement associées à une matrice polyester) ;
- Eolien (majoritairement associées à une matrice époxy) ;
- Poids-lourds (majoritairement verre/polyester).

Les déchets issus des filières aéronautiques et ASL intègrent des composites à fibres de carbone. La répartition géographique des déchets post-consommateurs – c'est-à-dire hors déchets industriels – est représenté sur la Figure 45, Figure 46 et la Figure 47 en 2025, 2030 et 2035 respectivement.

Le marché aéronautique présente un intérêt fort, avec une structuration de la filière sur le territoire et un gisement de composites constitué majoritairement de CFRP. Le gisement CFRP européen aurait été de l'ordre de 4 100 t en 2015. Une croissance est attendue dans les prochaines années et devrait porter ce gisement à 7 800 t en 2050.

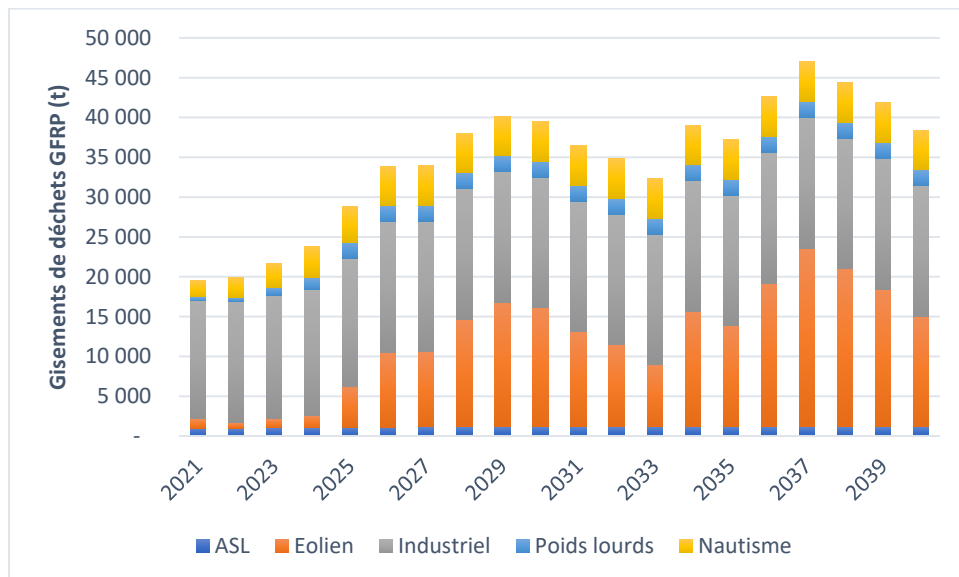


Figure 44 : Gisement de déchets composites hors aéronautique à l'échelle nationale.

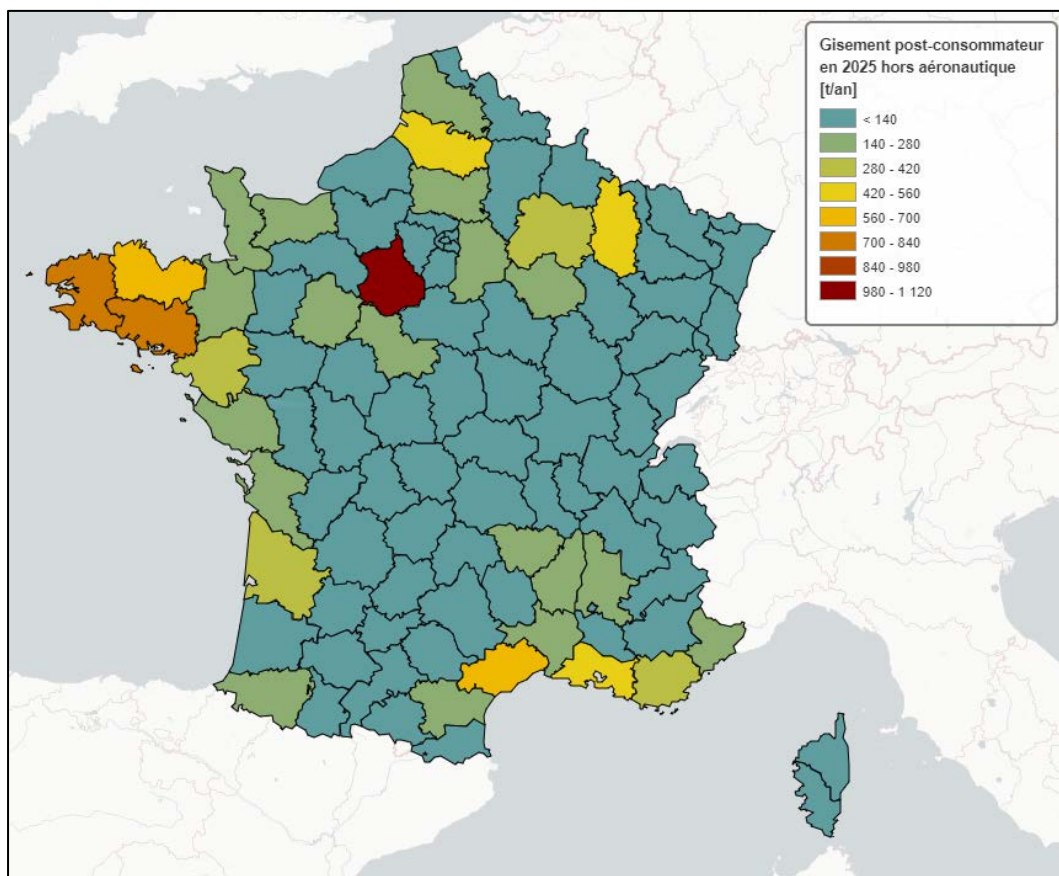


Figure 45 : Gisement cumulé de matériaux composites vers 2025, hors aéronautique.

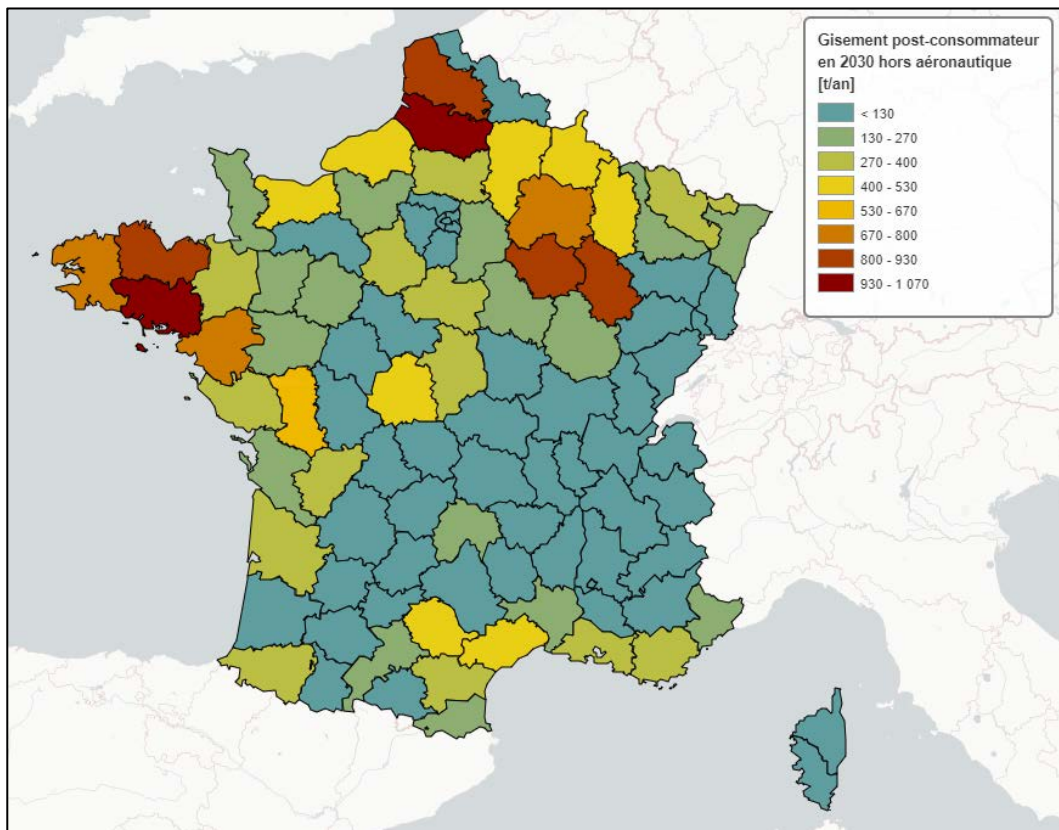


Figure 46 : Gisement post-consommateur de matériaux composites vers 2030, hors aéronautique.

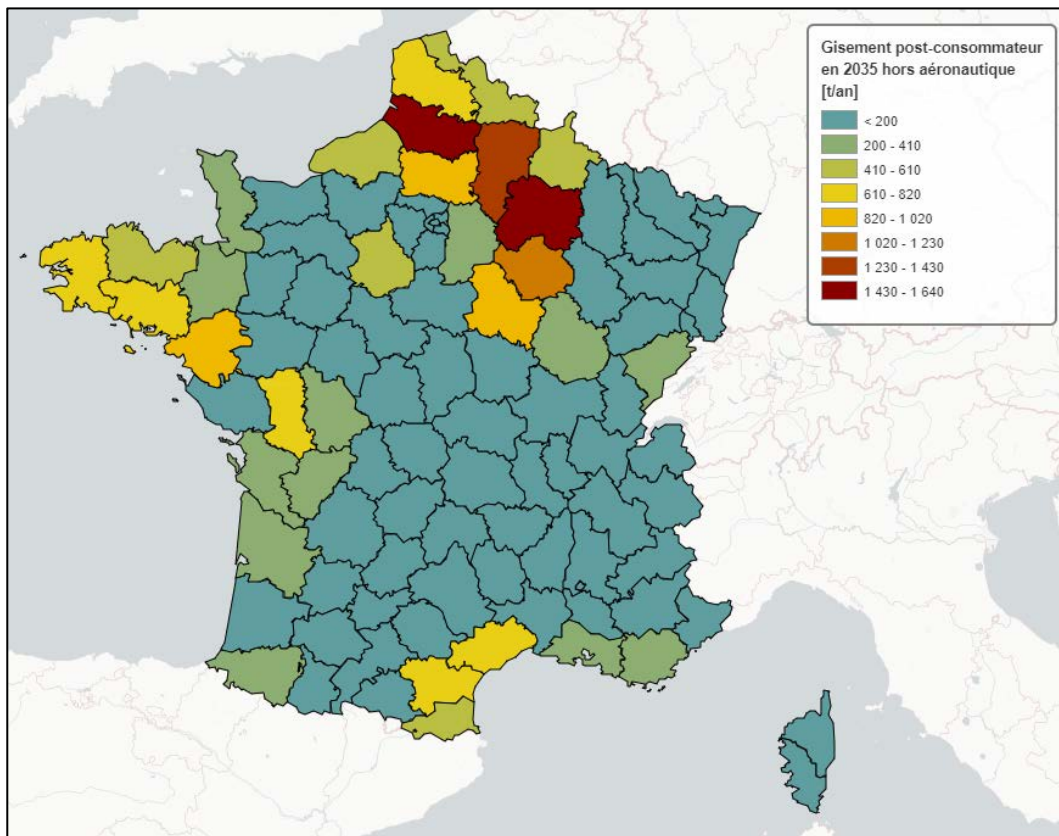


Figure 47 : Gisement post-consommateur de matériaux composites vers 2035, hors aéronautique.

2.12. Références bibliographiques

- [1] E. Witten et V. Mathes, « The Market for Glass Fibre Reinforced Plastics (GRP) in 2020. Market developments, trends, outlooks and challenges », AVK, nov. 2020.
- [2] PlasticsEurope, « Plastics – the Facts 2020 », 2020.
- [3] Fédération des Industries Nautiques (FIN), « Les chiffres clés du nautisme 2019-2020 > Édition 2021 », juill. 2021.
- [4] In Extenso Innovation Croissance, A. Deprouw, A. Robin, ADEME, et C. Lang, « Bateaux de plaisance et de sport : données 2020 – Rapport annuel », ADEME, déc. 2021.
- [5] P. Casari, D. Choqueuse, P. Davies, et H. Devaux, « Applications marines des matériaux composites Cas des voiliers de compétition », *Techniques de l'ingénieur Les grands événements de l'année*, vol. base documentaire : TIB625., n° ref. article : am5655. Editions T.I., 2008. doi: 10.51257/a-v1-am5655.
- [6] ADEME *et al.*, « Bateaux de plaisance et de sport – données 2019 - Rapport annuel », ADEME, 2020.
- [7] Wind Europe, « Wind energy in Europe 2020 - Statistics and the outlook for 2021-2025 », 2021.
- [8] Agence ORE, Enedis, RTE, et Syndicat des Énergies Renouvelables, « Panorama de l'électricité renouvelable », juin 2021.
- [9] Capgemini Invent et France Energie Eolienne, « Observatoire de l'éolien 2021 - Analyse du marché, des emplois et des enjeux de l'éolien en France », sept. 2021.
- [10] M. Rapin et J.-M. Noël, *Énergie éolienne - 3e édition Du petit éolien à l'éolien offshore*, Dunod. 2019.
- [11] ADEME *et al.*, *Renouvellement de l'éolien Quelles stratégies possibles et envisageables en fin d'exploitation pour les parcs éoliens terrestres ?* ADEME, 2020.
- [12] IRT Jules Verne, « L'IRT Jules Verne et un consortium d'acteurs industriels lancent le projet ZEBRA dédié au développement de pales éoliennes en matériaux composites 100% recyclables. », *Communiqué de presse*, 23 septembre 2020. Consulté le: 14 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.irt-jules-verne.fr/wp-content/uploads/06_IRT-JULES-VERNE_CP-ZEBRA_FR_vfinale.pdf
- [13] A. Poulsen, « CETEC – Circular Economy for Thermoset Epoxy Composites », présenté à EOLIS2021, Bruxelles, nov. 2021.
- [14] S. Grunewald, « New 3D Printing Material Mimics Light Weight Balsa Wood for use in Wind Turbine Construction », 4 juillet 2014. Consulté le: 12 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-material-light-weight-balsa-wood-29265/>
- [15] C. Garnier, « A Cherbourg, l'usine LM Wind Power, filiale de GE Renewable Energy, tourne à plein régime », *L'Usine Nouvelle*, 14 octobre 2021. Consulté le: 11 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.usinenouvelle.com/article/a-cherbourg-l-usine-lm-wind-power-filiale-de-ge-renewable-energy-tourne-a-plein-regime.N1150072>
- [16] V. Groizeleau, « Le Havre : arrivée des moules de pales de la future usine d'éoliennes », *Mer et Marine*, 20 décembre 2020. Consulté le: 11 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.meretmarine.com/fr/content/le-havre-arrivee-des-moules-de-pales-deoliennes-de-la-future-usine-siemens-gamesa>
- [17] K. Branner et A. Ghadirian, « Database about blade faults », DTU Wind Energy, No. 0067, 2014.
- [18] V. Sommer, J. Stockschröder, et G. Walther, « Estimation of glass and carbon fiber reinforced plastic waste from end-of-life rotor blades of wind power plants within the European Union », *Waste Management*, vol. 115, p. 83-94, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.043>.
- [19] R. Volk, C. Stallkamp, M. Herbst, et F. Schultmann, « Regional rotor blade waste quantification in Germany until 2040 », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 172, p. 105667, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105667>.
- [20] G. Marsh, « What's to be done with 'spent' wind turbine blades? », *Renewable Energy Focus*, vol. 22-23, p. 20-23, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2017.10.002>.
- [21] thewindpower.net, « Parcs éoliens ». Consulté le: 25 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.thewindpower.net/windfarms_list_fr.php?
- [22] Kallista Energy, « Le parc éolien de Plouyé en Bretagne : 1er renouvellement avec démantèlement complet des anciennes éoliennes en France ». Consulté le: 22 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.kallistaenergy.com/energies-renouvelables/demantelement-renouvellement/>
- [23] Quadran, « Le renouvellement de la centrale éolienne de Goulien », *Bulletin d'information communal*, 2018. [En ligne]. Disponible sur: https://goulien.fr/wp-content/uploads/sites/248/2018/07/A4-4pages_Bulletin-d'information-commune_180703.pdf
- [24] B. Clarke, « Le parc éolien de Cham Longe, un des premiers chantiers de repowering en France », *Actu-Environnement.com*, 12 juin 2020. Consulté le: 22 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.actu-environnement.com/ae/news/parc-eolien-repowering-chamlonge-35641.php4>

- [25] net-wind.com, « Parc éolien de Lastours : première opération de démantèlement pour Net-Wind, une belle réussite ! », 22 mars 2018. Consulté le: 22 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.net-wind.com/actualites-net-wind/net-wind-nouvel-acteur-du-demantelement-eolien-en-france/>
- [26] Kallista Energy, « Des éoliennes plus performantes pour les communes de Trébry et de Lanfains en Bretagne », 12 octobre 2020. Consulté le: 22 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.kallistaenergy.com/des-eoliennes-plus-performantes-pour-les-communes-de-trebry-et-de-lanfains-en-bretagne/>
- [27] Open Data Réseaux Énergies (ODRÉ) et Producteurs : RTE, Enedis, EDF SEI, ELD, « Registre national des installations de production et de stockage d'électricité (en cours 2021) », 17 décembre 2021. Consulté le: 13 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://opendata.reseaux-energies.fr/explore/dataset/registre-national-installation-production-stockage-electricite-agrege/>
- [28] Airbus, « Airbus Global Market Forecast 2021 - 2040 », 2021.
- [29] Boeing, « Commercial Market Outlook 2021–2040 », sept. 2021.
- [30] Xerfi France, P. Patrel, L. Delbos, et G. Giraud, « L'industrie aéronautique et spatiale », 7MTR01, 2017.
- [31] INSEE, « La filière aéronautique et spatiale en France en 2020 », n° No 1882, 1 décembre 2021. Consulté le: 8 février 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5896539>
- [32] J. Cinquin, « Les composites en aérospatiale », *Techniques de l'ingénieur Systèmes aéronautiques et spatiaux*, vol. base documentaire: TIP603WEB., n° ref. article: am5645. Editions T.I., 2002. doi: 10.51257/a-v1-am5645.
- [33] A. Lefeuvre, S. Garnier, L. Jacquemin, B. Pillain, et G. Sonnemann, « Anticipating in-use stocks of carbon fiber reinforced polymers and related waste flows generated by the commercial aeronautical sector until 2050 », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 125, p. 264-272, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.023>.
- [34] C. Göthberg et Kairn Strategie consulting, « Les nouveaux défis liés au stockage et au démantèlement d'avions commerciaux », 16 juillet 2020. Consulté le: 8 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.journal-aviation.com/actualites/44865-les-nouveaux-defis-lies-au-stockage-et-au-demantelement-d-avions-commerciaux>
- [35] D. Forsberg, « Aircraft Retirement Trends & Outlook », Avolon, sept. 2012.
- [36] INSEE, « Véhicules en service - Données annuelles de 2012 à 2020 », 24 septembre 2021. Consulté le: 5 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2045167>
- [37] Comité des Constructeurs Français d'Automobiles (CCFA), « L'industrie automobile française, analyse et statistiques, édition 2020 », 2020.
- [38] N. Piccirelli et A. Giocosa, « Les composites dans l'industrie automobile », *Techniques de l'ingénieur Véhicule et mobilité du futur*, vol. base documentaire: TIP601WEB., n° ref. article: am5600. Editions T.I., 2011. doi: 10.51257/a-v2-am5600.
- [39] JEC Group et Estin, « Current trends in the global composites industry, JEC Observer », JEC Group, 2021.
- [40] A. Yamashita, M. Kondo, S. Goto, et N. Ogami, « Development of High-Pressure Hydrogen Storage System for the Toyota "Mirai" », *SAE Technical Paper*, n° 2015-01-1169, 2015, doi: 10.4271/2015-01-1169.
- [41] In Extenso Innovation Croissance, A. Deprouw, D. Gaillard, A. Robin, ADEME, et E. Lecointre, « Automobiles – Données 2019 – Rapport annuel », ADEME, oct. 2021.
- [42] P. Collet, « Renault, Indra et l'Ademe lancent une étude sur le recyclage des poids lourds hors d'usage », *Actu-Environnement.com*, 28 janvier 2020. Consulté le: 26 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.actu-environnement.com/ae/news/renault-indra-ademe-recyclage-poids-lourds-34875.php4>
- [43] L. Colpier, B. Chazalotte, O. Gaudeau, et O. Cor, « Etude recyclage poids lourds », Renault Trucks, INDRA Automobile Recycling, ADEME, nov. 2020.
- [44] SDES-RSVERO, « Données sur les immatriculations des véhicules », 17 mai 2021.
- [45] Commissariat général au développement durable, « Chiffres clés du transport Édition 2020 », mars 2020.
- [46] SNCF Voyageurs, « Nombre de matériels roulants voyageurs SNCF exploitables par série et transporteur », janvier 2020. Consulté le: 15 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://ressources.data.sncf.com/explore/dataset/nombre-de-materiels-roulants-sncf-voyageurs-exploitable-par-serie-activite/>
- [47] Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés (STRMTG), « Rapport annuel 2019 sur le parc, le trafic et les événements d'exploitation tramways », Ministère chargé des transports, 2021.

- [48] Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés (STRMTG), « Rapport annuel du STRMTG sur les événements d'exploitation des métros et RER (hors RFN) pour l'année 2019 », Ministère chargé des transports, déc. 2020.
- [49] Observatoire de la mobilité en Île-de-France (OMNIL), « Matériel roulant ferroviaire et routier », 4 février 2021. Consulté le: 6 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.omnil.fr/spip.php?article120>
- [50] Rennes Métropole, « Rames de métro utilisées sur le réseau STAR ». Consulté le: 6 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/rames-de-metro-utilisees-sur-le-reseau-star/>
- [51] J.-M. Guillemot et Y.-H. Grunevald, « Les composites en construction ferroviaire », *Techniques de l'ingénieur Systèmes ferroviaires*, vol. base documentaire: TIP602WEB., n° ref. article: am5650. Editions T.I., 2000. doi: 10.51257/a-v1-am5650.
- [52] D. Redoutey, *Le matériel moteur de la SCNF*. Vie Du Rail, 2016.
- [53] ADEME, TERRA, Philgea, Moringa, et Ressourcesys, « Étude préalable à la mise en place de la filière REP Articles de Sport et Loisirs », ADEME, déc. 2020.
- [54] H. Mason, « Composites end markets: Sports and recreation (2022) », 12 janvier 2021. Consulté le: 4 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-end-markets-sports-and-recreation-2022>
- [55] M. Reyne, « Les composites dans les sports et les loisirs », *Techniques de l'ingénieur Plastiques et composites*, vol. base documentaire: TIP100WEB., n° ref. article: am5630. Editions T.I., 1998. doi: 10.51257/a-v1-am5630.
- [56] Ministère de la Transition écologique, « Articles de sport et de loisirs : Ecologic est agréé pour la mise en oeuvre d'une nouvelle filière pollueur-payeur », 31 janvier 2022. Consulté le: 2 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ecologie.gouv.fr/articles-sport-et-loisirs-ecologic-est-agree-mise-en-oevre-dune-nouvelle-filiere-pollueur-payeur>
- [57] J.-P. Frey, « Bilan 2017 du commerce d'articles de sport », présenté à AG de l'union sport et cycle 2018, 2018.
- [58] INSEE, « Populations légales des départements en 2019 - Recensement de la population », 29 décembre 2021. Consulté le: 5 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6013867>
- [59] ADEME *et al.*, « Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques - données 2019 », ADEME, 2020.
- [60] M. Kaya, *Electronic Waste and Printed Circuit Board Recycling Technologies*. Springer, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26593-9>
- [61] C. Thomas, « Recyclage des cartes électroniques : un aperçu de l'état de l'art », *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, vol. 82, n° 2, p. 57-61, 2016, doi: 10.3917/re1.082.0057.
- [62] ADEME *et al.*, « Rapport Annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques - données 2017 », ADEME, 2018.
- [63] ADEME, E. Fangeat, Groupement Deloitte Développement Durable, A. Deprouw, M. Jover, et M. Borie, « Rapport Annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques – données 2018 », 2019.
- [64] In Extenso Innovation Croissance, M. Jover, M. Borie, ADEME, et S. Moriceau, « Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques - données 2020 », ADEME, nov. 2021.
- [65] Ecosystem, « Comprendre le recyclage des produits afin d'améliorer leur conception ». Consulté le: 18 février 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ecosystem.eco/fr/article/comprendre-recyclage-produits>
- [66] F. Reux, « The Global Composites Market », présenté à JEC Conférences France : Les procédés composites grandes cadences, Nantes, France, 9 février 2017.
- [67] Jec Observer, « Overview of the global composites market in 2019-2024. », 2020.
- [68] P. Krawczak, « Réservoirs haute pression en composites », *Techniques de l'ingénieur Plastiques et composites*, vol. base documentaire: TIP100WEB., n° ref. article: am5530. Editions T.I., 2002. doi: 10.51257/a-v1-am5530.
- [69] G. Teyssedre et L. Boudou, « Polymères et composites pour l'électrotechnique », *Techniques de l'ingénieur Matériaux isolants en électrotechnique*, vol. base documentaire: TIB255DUO., n° ref. article: d2335. Editions T.I., 2010. doi: 10.51257/a-v1-d2335.

3. Écoconception des composites

3.1. Les enjeux de l'écoconception

3.1.1. Enjeux environnementaux

La prise de conscience de l'impact des activités humaines sur l'environnement s'est développée progressivement depuis les années 70. Aujourd'hui, le sujet a pris une place importante et de nombreuses déclarations se font entendre, comme celle, bien connue, du président français en 2002 : « notre maison brûle et nous regardons ailleurs », en ouverture de son discours devant l'assemblée plénière du IVe Sommet de la Terre à Johannesburg en Afrique du Sud. En 2011, Ban Ki-moon évoque à l'assemblée générale de l'ONU les limites planétaires comme outil de mesure scientifique.

Le graphe des limites planétaires a été publié en 2009 par une équipe de chercheurs pilotée par John Rockström. Sa dernière mise à jour date de 2015. C'est un outil utile pour visualiser les impacts environnementaux et comprendre où nous en sommes par rapport aux limites planétaires [1].

Le graphe décrit 9 processus avec la limite à ne pas dépasser si nous voulons éviter des changements brutaux du fonctionnement de notre planète. Certains processus sont décrits avec deux éléments : biodiversité et flux biochimiques. En 2022, le Stockholm Resilience Center a diffusé une mise à jour du graphique et a ajouté une dixième limite : la pollution par des substances nouvelles [2].

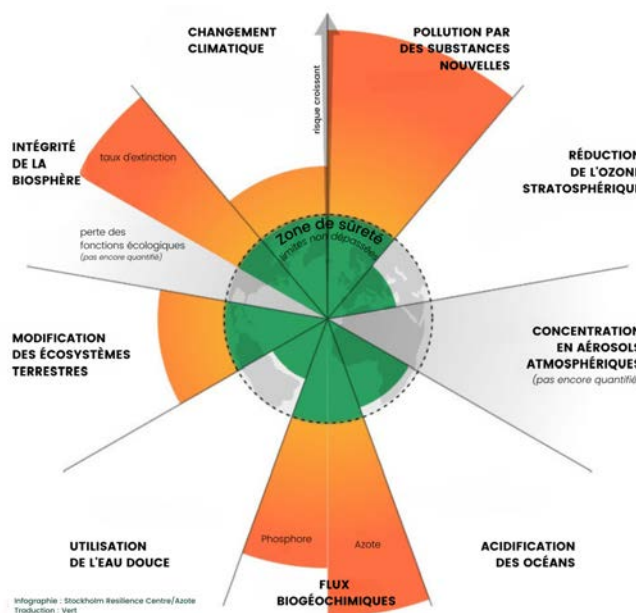


Figure 48 : Franchissement des limites planétaires [2].

En ce qui concerne les activités industrielles, la prise en compte des enjeux planétaires se fait notamment par l'écoconception. L'industrie des pièces plastiques et composites est concernée par ces enjeux. Aujourd'hui, les plastiques et composites sont au cœur de ces enjeux concernant :

- Le changement climatique de par leur contribution aux émissions de gaz à effet de serre ;
- L'épuisement des ressources minières et fossiles. A ce jour la majeure partie des plastiques et composites sont produits avec des ressources fossiles en utilisant des procédés consommateurs d'énergie (et donc des énergies fossiles) ;
- La diminution des déchets : le volume des plastiques et composites mis sur le marché augmente alors que seule une minorité des volumes est recyclée ;
- L'introduction de nouvelles entités dans l'environnement avec les dizaines de milliers de formulations créées dans ce domaine.

3.1.2. Éléments sur les enjeux réglementaires

Une présentation exhaustive du contexte réglementaire présenté au Chapitre 4, il est rappelé ici quelques éléments sur la réglementation européenne, relative à l'écoconception. Actuellement, le contexte

réglementaire évolue vite afin de répondre aux défis environnementaux tels que : la disponibilité des ressources (minerais, énergies fossiles, eau), le changement climatique, ou la perte de biodiversité. Deux documents sont pris en exemple afin d'illustrer cette tendance :

1. Le plan d'action Economie Circulaire du Pacte Vert européen vise à :

- Mobiliser l'industrie pour une économie propre et circulaire ;
- Faire en sorte que les produits durables deviennent la norme dans l'UE ;
- Donner aux consommateurs les moyens de choisir ;
- Mettre l'accent sur les secteurs utilisant le plus de ressources et dont le potentiel de contribution à l'économie circulaire est élevé ;
- Garantir moins de déchets.



2. La Feuille de Route Economie Circulaire (FREC) française dresse 50 mesures pour mieux produire, mieux consommer, mieux gérer nos déchets et mobiliser tous les acteurs. Les principaux objectifs sont :

- Réduire la consommation de ressources liée à la consommation française de 30 % d'ici à 2030 par rapport à 2010 ;
- Réduire de 50 % les quantités de déchets non dangereux mis en décharge en 2025 par rapport à 2010 ;
- Tendre vers 100 % de plastiques recyclés en 2025 ;
- Réduire les émissions de gaz à effet de serre de 8 Mt de CO₂ supplémentaires chaque année grâce au recyclage du plastique.



Le contexte réglementaire européen est présenté ici selon 6 thématiques : matières premières, transport, production, communication, utilisation, fin de vie. La Figure 49 recense les principales réglementations en vigueur en lien avec l'écoconception selon ces 6 thématiques.

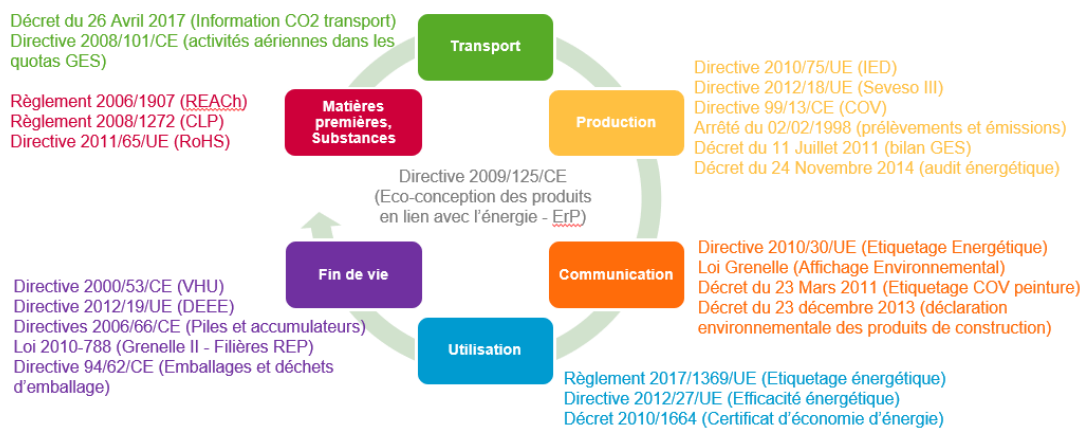


Figure 49 : Principales réglementations liées à l'activité d'écoconception (crédit : CETIM).

Les conséquences pour les entreprises sont importantes. Par exemple, l'interdiction de substances signifie trouver des solutions de substitution, les obligations en matière d'efficacité énergétique signifient réduire la consommation du produit en phase d'utilisation, les obligations de durabilité signifient assurer la réparabilité et garantir la disponibilité de pièces de rechanges, enfin la responsabilité élargie du producteur pour certaines filières impose de concevoir son produit en tenant compte de la fin de vie et d'assurer la recyclabilité du produit.

Les réglementations autour des produits vont s'intensifier au cours de années à venir, comme le montre l'exemple de la mise en place des filières REP (cf. chapitre 4 relatif aux opportunités de valorisation des déchets composites).

Notons également que l'ADEME intègre également l'écoconception dans les 7 piliers de l'économie circulaire, organisés en 3 axes (Figure 50) :

- Agir sur l'offre ;
- Agir sur la demande et les comportements des consommateurs ;
- Agir sur la gestion des déchets.

L'écoconception fait partie de l'axe « agir sur l'offre ».



Figure 50 : Les 7 piliers de l'économie circulaire [3].

3.1.3. Enjeux économiques

L'écoconception permet une vision globale sur le cycle de vie du produit. Elle est souvent associée à une analyse des coûts sur le cycle de vie pour prendre en compte non seulement les coûts liés à la fabrication du produit mais aussi les coûts liés à la maintenance, l'utilisation et l'élimination du produit en fin de vie. L'exemple de la Figure 51 montre le résultat d'une écoconception sur une caméra de surveillance.



Figure 51 : Résultats d'une écoconception sur une caméra de surveillance (crédit : CETIM).

Dans cet exemple, les résultats se traduisent directement en réduction des coûts : moins de matières premières, moins de composants à acheter et à gérer dans l'entreprise, réduction de taille et de masse ayant de nombreux impacts positifs. Ces résultats sont atteints grâce à la vision globale proposée par l'écoconception. Cette nouvelle façon d'appréhender un produit ou service permet de « penser cycle de vie », de combiner les approches du type *Life Cycle Cost* (LCC) et les méthodes d'innovation frugale, « faire mieux avec moins », « privilégier la valeur pour l'utilisateur plutôt que la sophistication technologique ».

L'ADEME publie régulièrement des études sur la performance économique des entreprises qui appliquent l'écoconception. Dans l'étude présentée en Figure 52, 116 entreprises ont été interrogées indiquent à 96 % que l'écoconception a eu un effet positif ou neutre sur leurs profits.

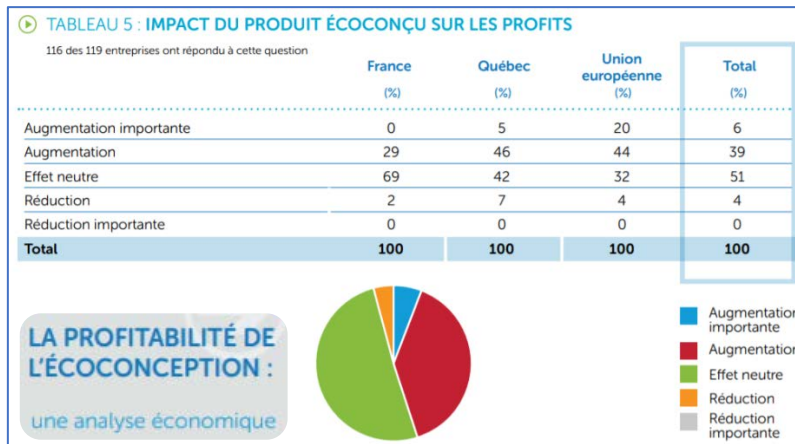


Figure 52 : Impact économique de l'écoconception pour l'entreprise [4].

Une autre étude [5] (Figure 53) analyse les retours économiques et financiers engendrés par la mise en place de démarches d'écoconception dans les entreprises. L'échantillon d'entreprises étudié fait ressortir des retours positifs de façon systématique. Les trois types de bénéfices apportés par la mise en place d'une démarche d'écoconception sont :

- L'écoconception permet d'augmenter le chiffre d'affaires de façon significative, (jusqu'à une multiplication par un facteur 5 pour le cas le plus marqué, +7 à 18 % en valeurs médianes selon les hypothèses) ;
- L'écoconception peut permettre de réduire les coûts de production de façon tangible (jusqu'à -20 % dans le cas le plus prononcé) ;
- L'écoconception permet de renforcer l'engagement des salariés et d'améliorer le fonctionnement interne de l'entreprise.

L'analyse menée a aussi permis d'identifier différents types de positionnement d'entreprises et d'axes stratégiques susceptibles d'être déployés pour valoriser ces retours positifs. 10 fiches de retours d'expériences ont été produites, présentant les enseignements clés propres à chaque entreprise, ainsi que 3 témoignages vidéo, pour les entreprises Altinnova, Areco et Savoie.

Cette étude montre non seulement l'évolution du produit, mais aussi les changements dans le positionnement du produit sur le marché. De plus, elle présente deux analyses Forces, Faiblesses, Opportunités et Menaces (SWOT).

- Une première analyse correspondant à la situation de l'entreprise avant la mise en place de l'écoconception ;
- Une seconde analyse SWOT mettant en valeur l'impact de l'écoconception, mise en évidence

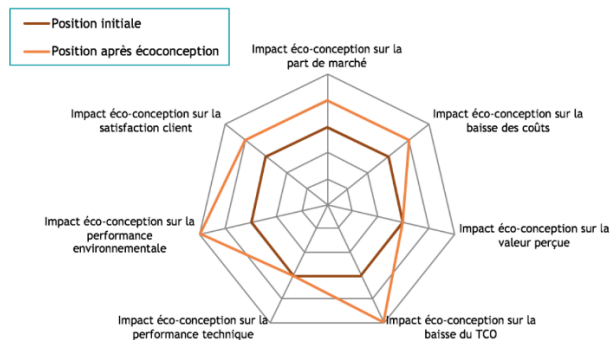


Figure 53 : Evolution des indicateurs d'impact produit avant et après la démarche d'écoconception [5].

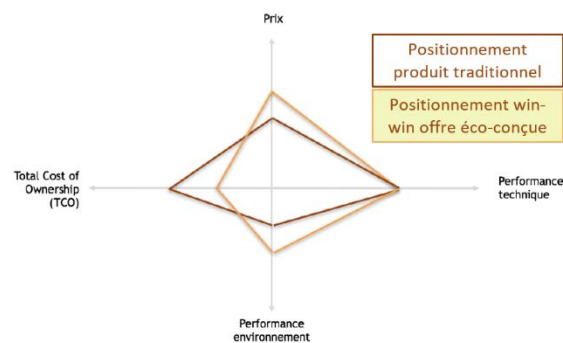


Figure 54 : Evolution du positionnement marché du produit avant et après la démarche d'écoconception [5].

par les éléments barrés/ajoutés sur la Figure 55.

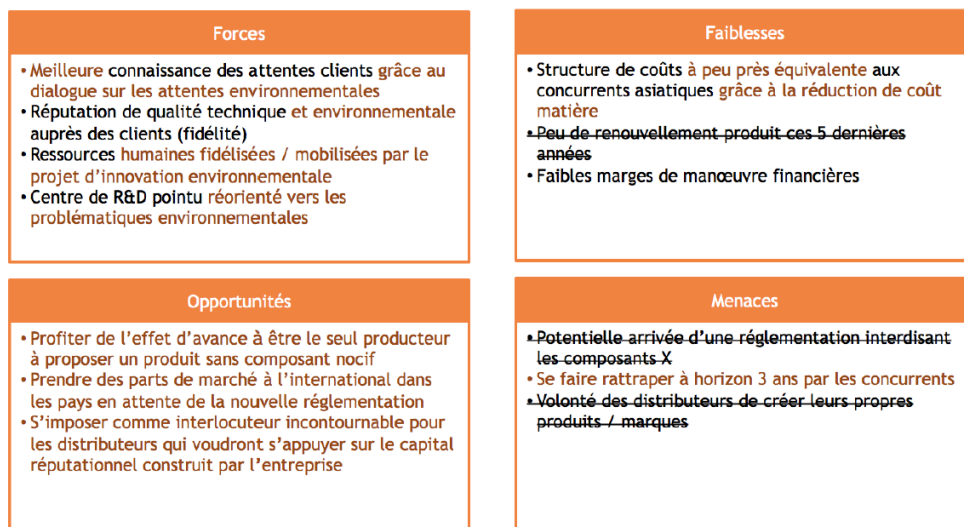


Figure 55 : Evolution des Forces, Faiblesses, Opportunités et Menaces avant et après la démarche d'écoconception [5].

Dans le dernier baromètre écoconception [6], l'ADEME recense les motivations des entreprises pour écoconcevoir de nouveaux produits. Si les convictions personnelles du dirigeant jouent un rôle prépondérant, l'anticipation de la réglementation, la recherche de nouveaux marchés et d'économies sont également régulièrement citées.



Figure 56 : Extrait du baromètre écoconception [6].

3.1.4. Enjeux techniques : matière première, énergie et déchets

L'évaluation de l'impact d'un processus passe par une bonne compréhension de ses interactions avec l'environnement. L'écoconception est une approche « produit » et différente de l'approche « site ». L'approche « site » est liée à la politique environnementale d'un site (groupe, société, établissement) pour réduire ses impacts environnementaux (gestion des déchets occasionnés, économie d'énergie, gestion des substances chimiques, etc.). L'entreprise peut implémenter un Système de Management Environnementale (SME) selon les lignes directrices de la norme ISO 14001, permettant la reconnaissance internationale de son entreprise en termes de management des impacts environnementaux.

L'approche « produit » (écoconception) se définit par la prise en compte des aspects environnementaux engendrant des impacts négatifs sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit et ce à travers plusieurs sites (par exemple : site d'extraction de la matière première, site d'assemblage, site de traitement des déchets, etc.).

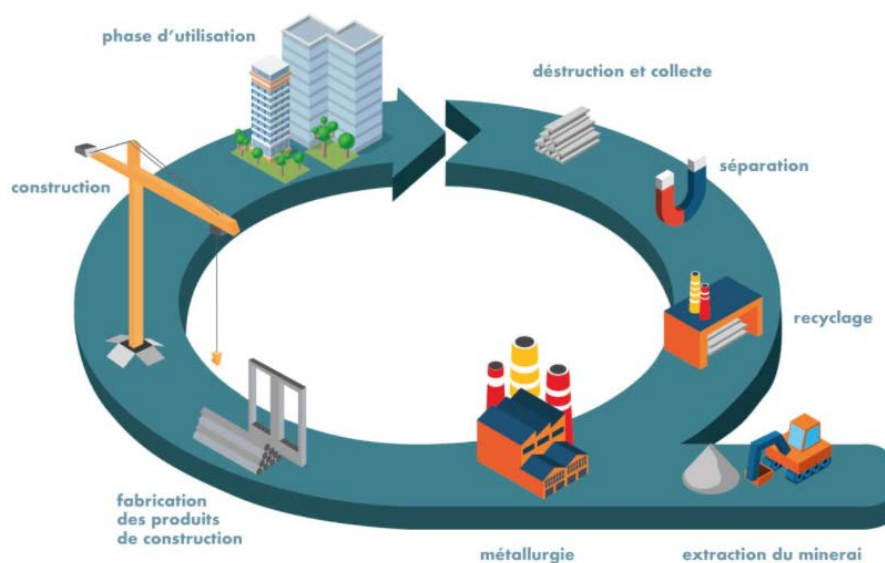


Figure 57 : Etapes du cycle de vie : exemple de l'acier de construction [7].

Dans l'exemple de l'acier présenté en Figure 57, la production peut se faire de deux manières : par réduction de minerai de fer avec du coke, ou par fonte de ferrailles recyclées. Dans le premier cas de figure, les émissions de CO₂ sont essentiellement engendrées par l'oxydation du carbone (du coke) lors de la réduction du minerai de fer, ainsi que par la combustion du gaz de cokéfaction (qui contient beaucoup de monoxyde de carbone). Dans le deuxième cas de figure, la production de l'électricité utilisée est la plus impactante. L'énergie nécessaire à la fabrication d'une tonne d'acier vierge est de 6 248 kWh contre 3 763 kWh pour la filière recyclage, soit une réduction de 40 % de la consommation énergétique et de 58 % les émissions de CO₂, en faveur de la matière recyclée.

Résultats par tonne collectée	Matière primaire (kWh)	Matière de recyclage (kWh)	Matière primaire (kg eq. CO ₂)	Matière de recyclage (kg eq. CO ₂)
Ferraille / Acier	6 248	3 763	2 211	938

Figure 58 : Impact du recyclage de l'acier sur la consommation d'énergie et l'émission de CO₂ [8].

3.2. Présentation de la démarche d'écoconception

La directive 2009/125/CE définit l'écoconception pour les produits liés à l'énergie comme « l'intégration des caractéristiques environnementales dans la conception du produit en vue d'améliorer la performance environnementale du produit tout au long de son cycle de vie ».

Cette démarche préventive et systématique peut être qualifiée de :

- Multicritère : prise en compte de plusieurs impacts environnementaux potentiels et permet d'évaluer les risques de transferts d'impact présentés au paragraphe 3.3.1.2 ;
- Multi-étapes : prise en compte de toutes les étapes du cycle de vie du produit, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie du produit en passant par la fabrication, la distribution et l'utilisation ;
- Multi-acteurs : l'écoconception doit être intégrée tout au long du processus de conception du produit, c'est pourquoi il est nécessaire que toute l'équipe de développement du produit soit sensibilisé à l'écoconception afin d'en appliquer tous les principes.

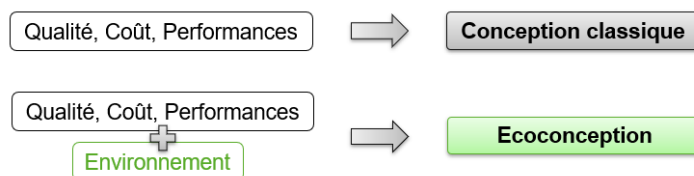


Figure 59 : Principe de l'écoconception : à service identique, un produit éco-conçu est source de moins d'impacts sur l'environnement que le produit de référence (crédit : CETIM).

La notion d'écoconception est connexe à la notion d'éco-efficacité, définie ci-dessous par le WBCSD (World Business Council for Sustainable Development).

« L'éco-efficacité consiste à offrir des biens et services à des prix compétitifs qui répondent aux besoins [...] tout en réduisant progressivement les impacts environnementaux et la quantité de ressources naturelles nécessaires tout au long du cycle de vie. »

$$\text{« Eco-efficacité »} = \frac{\text{Satisfaction des besoins}}{\text{Impacts}}$$

L'écoconception intègre également une ambition d'augmenter les services rendus par :

- Une améliorer la durée de vie ;
- La fourniture d'un service de réparation ;
- Une conception nécessitant moins d'entretien et de maintenance.

Pour l'entreprise, les principaux enjeux de l'écoconception sont l'anticipation de la réglementation, les gains économiques, les réponses aux attentes du marché et des clients et l'innovation par l'environnement. Les différents impacts du produit sont très dépendants des phases amonts comme le montre la Figure 60.

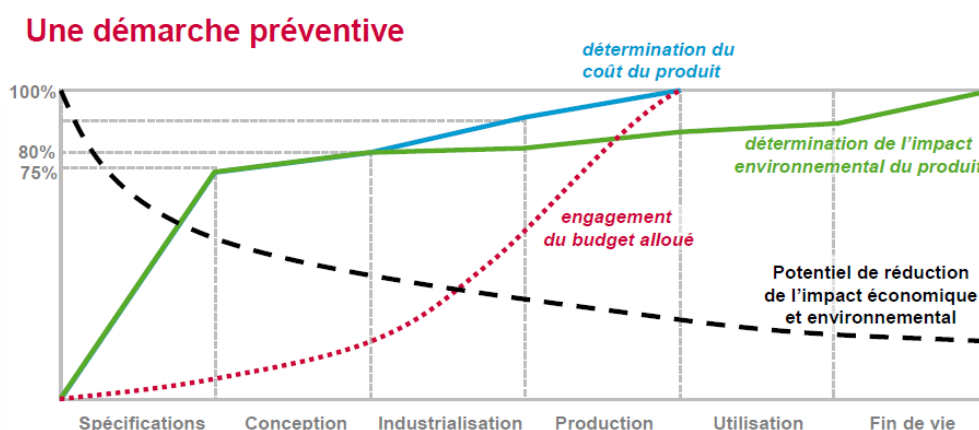


Figure 60 : Taux de détermination des impacts finaux du produit en fonction du cycle de vie produit (crédit : CETIM).

La courbe bleue indique le taux de détermination de l'impact économique final du produit, c'est-à-dire le potentiel de réduction de coût en fonction de la phase de Cycle de Vie du Produit (ou PLM pour Product Life Management). 75 % de ce coût est figé dès la phase de spécifications (cahier des charges). L'impact environnemental du produit (courbe verte) suit exactement la même tendance. Le potentiel maximum de réduction de l'impact économique et environnemental (courbe noire) se trouve donc très en amont dans le cycle de vie du produit. Une démarche d'écoconception, pour être efficace, doit être initiée dès le lancement d'un nouveau projet.

La démarche d'écoconception s'appuie sur la norme européenne NF EN 16524 – applicable aux produits mécaniques – et suit les étapes suivantes (Figure 61) :

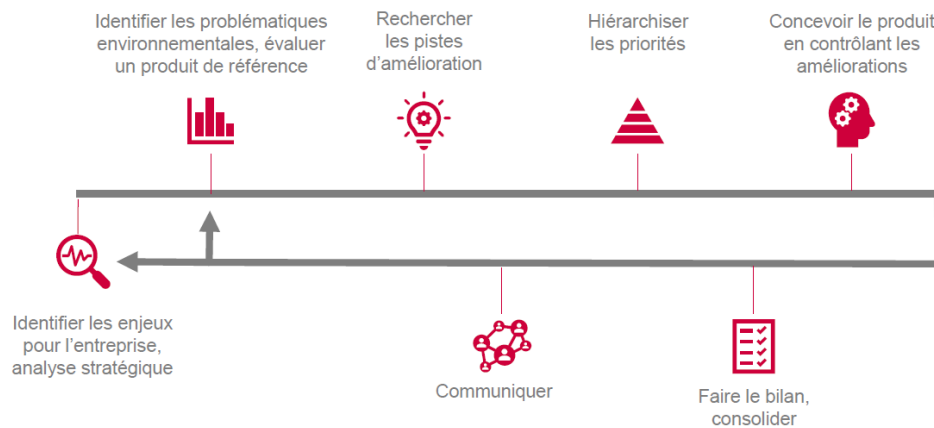


Figure 61 : Déroulement global d'une démarche d'écoconception (crédit : CETIM).

On y retrouve comme pour un processus de conception classique un cadrage (enjeux pour l'entreprise), un premier bilan de l'impact environnemental, puis une recherche de voies d'améliorations, dont les plus prometteuses sont explorées plus en détail puis implémentées, avant une consolidation et une capitalisation. Cette démarche peut se résumer en 5 étapes, comme l'illustre la Figure 62.

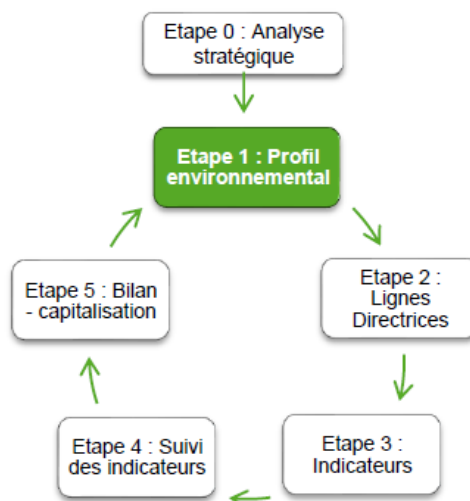


Figure 62 : Représentation cyclique des étapes d'écoconception (amélioration continue) (crédit : CETIM).

Dans ce processus, deux types d'approches d'évaluation des impacts environnementaux sont envisageables.

- L'approche qualitative des impacts :
 - Profil environnemental produit : méthode algorithmique proposée dans la norme NF EN 16524 pour évaluer les impacts environnementaux du produit selon 7 thématiques (matières, fabrication, utilisation, fin de vie, substances dangereuses, transport et distribution, emballage) ;
 - Liste d'impacts environnementaux : effets négatifs du produit sur l'environnement, jugés significatifs et priorisés pour la suite de la démarche ;
 - Lignes directrices en conception : nom donné aux pistes d'amélioration dans la norme NF EN 16524, exprimées de façon générale (« utiliser des matériaux renouvelables », « réduire la masse », « utiliser des matériaux à moindre contenu énergétique », ...). Elles sont hiérarchisées en fonction de la pertinence technico-économique et de la stratégie d'entreprise.
 - L'approche quantitative des impacts : Analyse de Cycle de Vie, ACV simplifiée, bilan carbone, etc. Le paragraphe suivant présentera la méthode ACV et sa version simplifiée.

Ces deux approches peuvent fournir une évaluation ou simplement établir des préconisations, comme illustré dans la Figure 63.

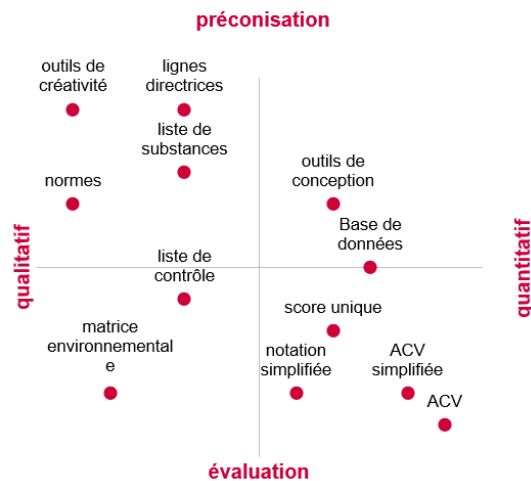


Figure 63 : Présentation des différentes méthodes d'évaluation ou d'amélioration environnementale de produits (crédit : CETIM).

Enfin, ces approches peuvent être :

- Monocritère : prise en compte d'un seul indicateur d'impact environnemental (par exemple le réchauffement climatique dans le cas du bilan carbone) ;
- Multicritères : prise en compte de plusieurs indicateurs d'impacts environnementaux.

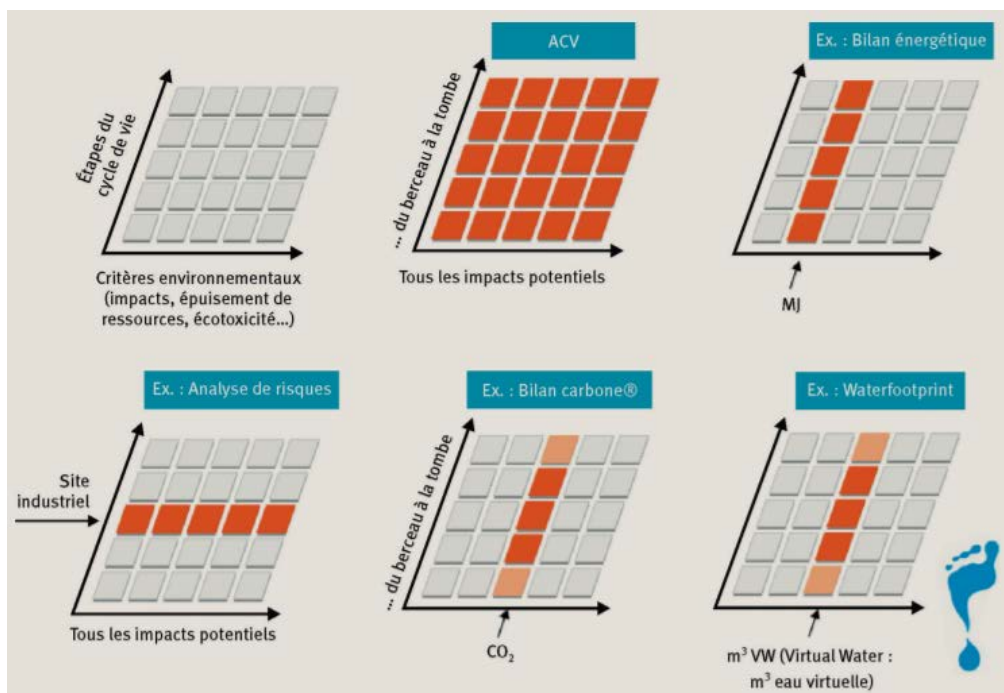


Figure 64 : Différentes approches de l'écoconception en fonction des étapes et critères retenus [9].

Enfin, la démarche d'écoconception peut mener à des évolutions variées, allant de l'amélioration simple à une reformulation complète du système et de sa réponse au cahier des charges. On distingue ainsi quatre niveaux d'écoconception conduisant à quatre niveaux d'impacts sur les produits :

- Niveau 1 - Amélioration du produit ;
- Niveau 2 - Reconception du produit ;
- Niveau 3 - Innovation fonctionnelle ;
- Niveau 4 - Innovation du système produits/services.




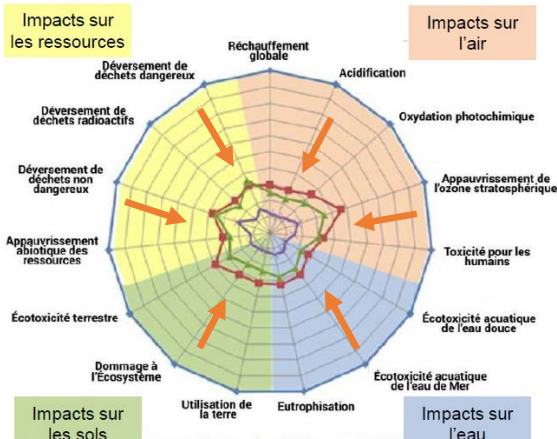
Le tableau suivant (Tableau 28) donne quelques exemples illustrant ces 4 niveaux.

L'amélioration de l'image de l'entreprise et de ses produits et la réduction de l'impact environnemental sont des éléments qui peuvent se valoriser dans le cadre d'une politique RSE (Responsabilité Sociétale des Entreprises) d'entreprise.

Notons toutefois que, selon l'ADEME, la communication sur l'écoconception est cadrée par la réglementation. A titre d'exemple, quand elle utilise le terme « produit écoconçu », l'entreprise doit être en mesure de « fournir des éléments pertinents, significatifs, vérifiables et concrets démontrant qu'elle a mis en place une démarche d'écoconception ». Les informations que l'on doit trouver sur le produit où est apposée cette mention sont :

- Une définition de l'écoconception (issue de la directive 2009/125 ou de la norme ISO 14062) ;
- Des précisions sur ce qui est écoconçu : le produit, l'emballage ou un composant ;
- Les principales caractéristiques environnementales du produit et/ou de son emballage ;
- La nature et, si possible, l'ampleur des réductions d'impacts environnementaux résultant de la démarche d'écoconception (ces informations peuvent figurer sur un autre support approprié, comme un site internet).

Pour plus d'informations sur l'impact du choix de la méthode, voir les travaux de Albane Guibert « L'impact des outils d'écoconception sur le degré d'innovation des entreprises » [10].

Écoconception	Cas d'application	Impact
Niveau 1	 <p>Amélioration de valve</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Jusqu'à -60 % d'impacts environnementaux • Jusqu'à -40 % sur le coût de revient • Nombre de composants : -20 % • Masse : -30 %
Niveau 2	 <p>Reconception de siège</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Siège économique le plus léger pour les courts et moyens courriers • 7,5 kg / passager (-2 kg / concurrence) • 30 % de composants en moins • 85 % de composants recyclables • Espace de vie plus important
Niveau 3	 <p>Innovation fonctionnelle dans l'éclairage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Par rapport à la référence (ampoule à incandescence en bleu), l'impact des éclairages LED est 50 % à 90 % plus faible. 





<p>Niveau 4</p>	 <p>Innovation du système pneumatiques/service de transport</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Certains professionnels achètent des kilomètres et non plus un pneu ; • Augmentation de durée de vie de 150 %, 
<p>Niveau 4</p>	 <p>Innovation du système copieur/service d'impression</p>	<ul style="list-style-type: none"> • On vend une solution pour réaliser des copies et les diffuser ; • Prolongation de la durée de vie et maintenance limitée qui profite à l'entreprise. 

Tableau 28 : Exemples de niveau d'amélioration en écoconception (source CETIM).

3.3. Méthodologie de l'analyse du cycle de vie

L'ACV permet d'évaluer les impacts environnementaux de matières, produits ou assemblages et de leurs substitutions et ainsi être un outil d'aide à la décision basé sur des indicateurs d'impact environnementaux.

La préoccupation environnementale est en augmentation constante et répond à des demandes sociétales de plus en plus fortes. Elle se structure au travers de normes et d'outils se développant ou déjà existants. Cette sous-partie s'axe sur la méthodologie de l'ACV en commençant par les catégories d'impacts courants avec les éventuels risques de transferts d'impacts, puis détaille le déroulement de la démarche de l'ACV selon la norme et enfin, elle s'achèvera par un focus sur l'ACV simplifiée, elle-même comparée à une ACV complète.

3.3.1. Catégorie d'impacts et risque de transferts

3.3.1.1. Catégories d'impacts

Le Tableau 29 passe en revue les catégories des principaux indicateurs environnementaux. Ces indicateurs sont issus de différents modèles mathématiques. Le Joint Research Centre (JRC) de l'Union Européenne a proposé en 2010 un manuel (Handbook) des meilleurs modèles suivant l'impact choisi (International Reference Life Cycle Data). Depuis, Sphéra, créateur du logiciel Gabi, a participé à la mise à jour de ces méthodes avec le JRC sous la méthode EF (Environmental Footprint) qui reprend en grande partie ce que la méthode ILCD couvrirait. Elle fait désormais partie des méthodes européennes de référence et englobe les méthodes des différents impacts ci-après. La robustesse est notée de I à III ; avec I la meilleure robustesse. Le détail de la méthode EF 3.0 est donné dans le Tableau 29 et les explications sur la robustesse dans le Tableau 30.

Catégorie d'impact	Détails	Unité	Modèle de caractérisation	Robustesse
Changement climatique, total	Correspond à la modification du climat, affectant l'écosystème global	kg CO ₂ eq.	IPCC 2013	I

Destruction de la couche d'ozone	Son appauvrissement augmente l'exposition de l'ensemble des êtres vivants aux radiations ultra-violetes	kg CFC-11 eq.	WMO 2014+	I
Toxicité humaine, cancérigène ou non	Indicateurs de toxicité via la contamination de l'homme	CTuh	USEtox 2.1	III
Particules fines	Les particules fines pénètrent les organismes. Elles ont un effet sur la santé humaine	Incidence sur les décès	Fantke <i>et al.</i> , 2016	I
Radiation ionisante	Correspond aux effets de la radioactivité	kBq U ²³⁵ eq.	Frischknecht <i>et al.</i> , 2000	II
Formation d'ozone photochimique	Correspond à une dégradation de la qualité de l'air, principalement via la formation de brouillard de basse altitude nommé « smog »	kg NMVOC eq.	Van Zelm <i>et al.</i> , 2008 implémenté dans ReCiPe 2008	II
Acidification	Résulte d'émissions chimiques dans l'atmosphère qui se redéposent dans les écosystèmes	mol H+ eq.	Posch <i>et al.</i> , 2008	II
Eutrophisation, terrestre	Correspond à un enrichissement excessif du milieu conduisant à un déséquilibre et un appauvrissement de l'écosystème	mol N eq.	Posch <i>et al.</i> , 2008	II
Eutrophisation, eau douce	Correspond à un enrichissement excessif des milieux naturels en nutriments, ce qui conduit à une prolifération et une asphyxie	kg P eq.	Struijs <i>et al.</i> , 2009, implémenté dans ReCiPe	II
Eutrophisation, marine	Correspond à un enrichissement excessif des milieux naturels en nutriments, ce qui conduit à une prolifération et une asphyxie	kg N eq.	Struijs <i>et al.</i> , 2009, implémenté dans ReCiPe	II
Utilisation des sols	Cette catégorie reflète l'impact d'une activité sur la dégradation des terres, en référence à « l'état naturel »	Sans dimension Ou points (Pt)	Index de la qualité des sols basé sur le modèle LANCA	III
Utilisation de l'eau	Correspond à la consommation d'eau et son	m ³ world eq.	Available Water REmaining (AWARE)	III

	épuisement dans certaines régions. Cette catégorie tient compte de la rareté		comme recommandé par l'UNEP, 2016	
Épuisement des ressources – minéraux et métaux	Correspond à l'épuisement des ressources minérales et métalliques non renouvelables	kg Sb eq.	Modèle CML 2002	III
Épuisement des ressources fossiles	Correspond à l'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables	MJ	Modèle CML 2002	III

Tableau 29 : Principaux indicateurs et méthodes et méthodes de calculs, adaptés de [11] et [12].

Robustesse de l'inventaire Qualité des données, évaluées en considérant à la fois différentes sources et les stratégies d'extrapolation	I	Élevée – Données provenant de sources de données officielles, soumises à une procédure d'assurance qualité et à une utilisation limitée de méthodes d'extrapolation, c'est-à-dire < 20 % de l'impact dérivé de l'extrapolation
	II	Moyen – Ensemble de données non accessibles au public ou examinés par des pairs et/ou utilisation de méthodes d'extrapolation pour plus de 20 % mais moins de 80 % de l'impact.
	III	Faible – Utilisation de méthodes d'extrapolation pour plus de 80 % de l'impact

Tableau 30 : Explication de la robustesse des modèles de caractérisation [13].

3.3.1.2. Risque de transferts

Lors d'une comparaison entre deux produits, l'ACV peut mettre en évidence qu'un produit a moins d'impact qu'un autre sur un critère (le changement climatique, par exemple), mais en a davantage sur un autre critère (l'utilisation de l'eau, par exemple).

Dans l'exemple de la Figure 65, un produit A est plus impactant sur l'effet de serre et la consommation d'énergies non renouvelables. Une substitution par le produit B permet de réduire l'impact sur ces deux indicateurs. Cependant celui-ci est plus impactant que A sur l'acidification, la consommation de ressources et la toxicité. En remplaçant A par B il y a donc un transfert d'impacts.

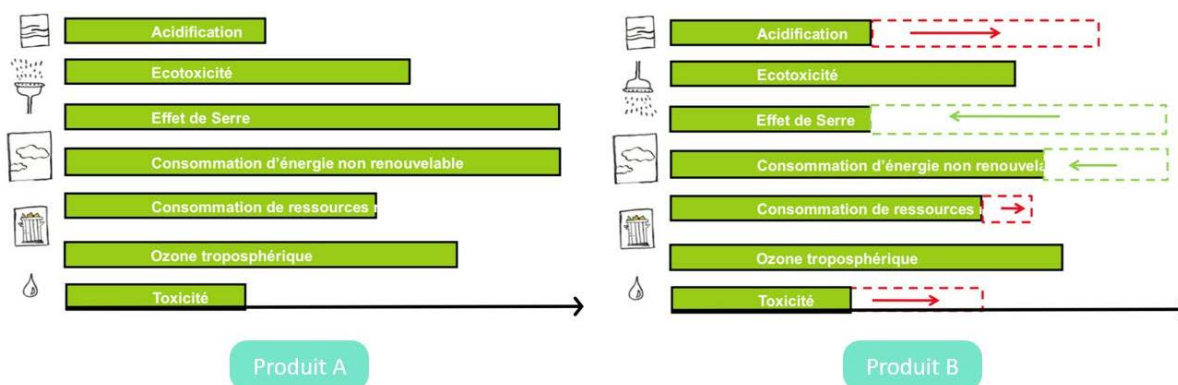


Figure 65 : Exemples de transferts d'impacts entre un produit A et un produit B (crédit : eco-conception.fr).

Dans le cas des matériaux, notamment les polymères biosourcés ou fibres naturelles, on observe fréquemment des transferts d'impacts. En effet, les polymères biosourcés et les fibres naturelles

impactent généralement moins sur le changement climatique et l'épuisement des ressources fossiles, mais plus la consommation en eau, l'occupation des sols et la pollution des sols.

3.3.2. Déroulement de la démarche

L'ACV est une démarche normalisée NF EN ISO 14040 (management environnemental : analyse du cycle de vie). Elle consiste, pour un produit donné, en la collecte et la quantification, pour l'ensemble du cycle de vie d'un produit, des flux entrants (énergies, matières premières, etc.) et sortants (CO₂, eau, chaleur, etc.) afin d'en évaluer les impacts au regard d'indicateurs environnementaux (changement climatique, acidification...), puis d'interpréter les résultats en fonction d'objectifs que l'on fixe. Cette démarche peut être itérative pour mettre en évidence l'influence de modification d'un produit sur l'environnement. La Figure 66 présente les différentes normes liées à l'ACV.

Ref Norme		Titre court
ISO 14040	Octobre 2006	Analyse de cycle de vie – principes et cadre
ISO14041	Décembre 1998	[obsolète] Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse
ISO 14042	Mai 2000	[obsolète] Evaluation de l'impact du cycle de vie
ISO 14043	Mai 2000	[obsolète] Interprétation du cycle de vie
ISO 14044	Octobre 2006	Exigences et lignes directrices (remplace 14041, 14042 et 14043)
Normes plus éloignées mais en relation avec le sujet		
ISO 14050	Aout 2020	Management environnemental – vocabulaire
ISO/TR 14062	Janvier 2003	Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit
XP ISO/TS 14071	Octobre 2014	Revue critique et compétences des vérificateurs : complémentaire à l'ISO 14044:2006
ISO TS 14048	Février 2003	Formats de documentation des données
ISO TR 14049	Juillet 2012	Exemples illustrant la définition de l'objectif et du champ de l'étude, et l'analyse des inventaires selon l'ISO 14044
NF EN 16760	Décembre 2015	Produits biosourcés – analyse du cycle de vie

Figure 66 : Normes liées à l'ACV.

Le cycle de vie est défini comme l'ensemble des actions liées à un produit depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie. Cette notion de cycle de vie est souvent illustrée par l'expression du « berceau à la tombe ». Il est construit en prenant en compte six phases du cycle de vie, détaillées dans le Tableau 31.

Phase du cycle de vie	Étapes	Exemples
-----------------------	--------	----------

Matières premières	Extraction ou production de matières premières, Transport des matières premières	Extraction du lithium pour les batteries, Extraction du pétrole pour les polymères pétrochimiques
Fabrication	Productions des différents composants, Transports des composants, assemblage des composants,	Production des composants électroniques d'un smartphone et assemblage
Distribution	Emballage, Transport du produit fini	Distribution du point de fabrication vers son lieu de vente Europe vers marché mondial
Installation	Préparation à l'utilisation	Mise en place d'une excavatrice à godet
Utilisation	Usage, entretien/maintenance	Carburant par km parcouru Révision d'un véhicule Contrôle technique
Fin de vie	Enfouissement, incinération, recyclage, Transport vers la structure de prise en charge du produit	Démantèlement d'un véhicule Réparation avant revente Recyclage (pièces détachées) Enfouissement

Tableau 31 : Les étapes d'un cycle de vie.

L'ACV est définie selon 6 étapes au sens de la norme 14044 :

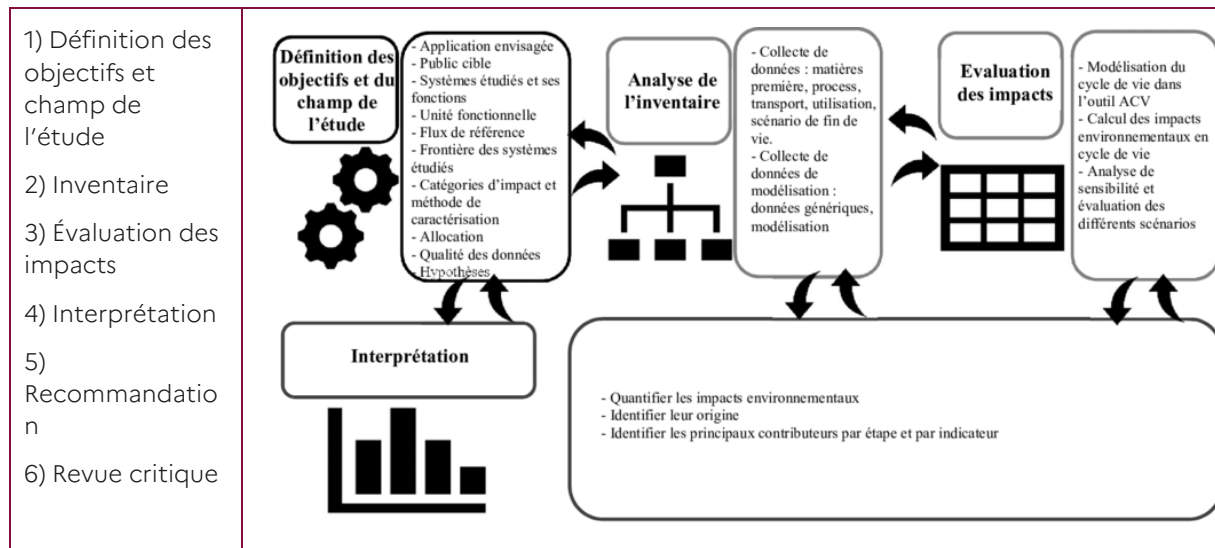


Figure 67 : Les différentes étapes d'une ACV [14].

Les quatre premières étapes sont inhérentes à l'étude de l'ACV, les étapes 5 et 6 sont modulables selon la portée de l'étude et du public visé. La Figure 68 ci-après illustre l'interaction entre les quatre premières étapes.

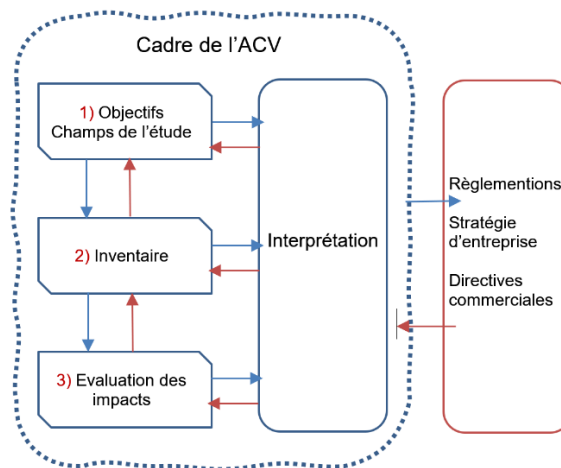


Figure 68 : Interactions entre les quatre principales étapes de l'ACV.

3.3.2.1.Étape 1 : Définitions du champ de l'étude et des objectifs

« Cette étape permet de définir quels sont les objectifs de l'ACV, en précisant quelle application il en sera faite : écoconception, comparaison ou déclaration environnementale. La cible de l'étude (interne ou externe à l'entreprise) est précisée à ce stade, ainsi que la manière dont seront divulgués les résultats (pour des affirmations comparatives par exemple). Le champ de l'étude doit par ailleurs préciser les fonctions du produit étudié, l'unité fonctionnelle choisie, les frontières du système étudié et les limites de l'étude » [15].

3.3.2.1.1. Unité fonctionnelle et flux de référence

L'unité fonctionnelle est définie par la norme ISO 14040 comme la « performance quantifiée d'un système de produits, destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie ».

Il s'agit donc de choisir l'unité fonctionnelle faisant l'objet de l'ACV à l'aide de 3 critères : sa fonction (ce pour quoi il est produit), son niveau de performance avec des grandeurs mesurables et objectives et sa durée d'utilisation dans ses conditions normales d'utilisation.

L'unité fonctionnelle peut donc s'écrire : *Unité fonctionnelle = Fonction + Performance + Durée.*

Le flux de référence découle de l'unité fonctionnelle et est défini comme la quantité de produit étudié et de matière consommée par ce produit nécessaires à la réalisation de la fonction de l'unité fonctionnelle. Dans le cas de l'exemple précédent, pour la peinture, le flux de référence est la quantité de peinture (Kg) pour revêtir 1 m² avec une opacité de 100 %.

3.3.2.1.2. Frontières du système

Les frontières du système définissent l'étendue des processus pris en compte et sur lesquels sont calculés les flux entrants et sortants durant toutes les étapes du cycle de vie du flux de référence. Le choix des frontières doit être cohérent avec les objectifs visés. Les critères utilisés quant à la définition de ces frontières doivent être clairement identifiés et expliqués. Suivant le système étudié ainsi que le champ de l'étude défini et les données collectées, il existe plusieurs frontières possibles, schématisées sur la Figure 69 :

- Du berceau à la porte (cradle to gate) : extraction jusqu'à la sortie d'usine ;
- Du berceau à la tombe (cradle to grave) : cycle complet ;
- Du berceau à la tombe (réduit) : transport et utilisation du produit non pris en compte ;
- Du berceau au berceau (cradle to cradle) : intègre à tous les niveaux, de la conception, de la production et de la réutilisation du produit, une exigence écologique dont le principe est zéro pollution et 100 % réutilisé. C'est le label C2C.

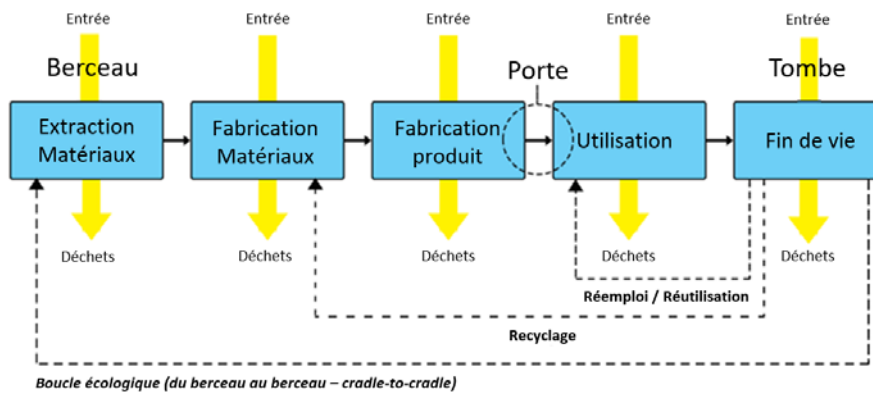


Figure 69 : Les différents systèmes de frontières possibles [16].

Les frontières utilisées fréquemment sont du berceau jusqu'à la sortie d'usine (cradle to gate) et cradle to grave (cycle complet de l'extraction jusqu'à la fin de vie).

Les limites aux frontières prenant en compte tous les flux entrants (intrants) ou sortants (extrant) liés à une unité fonctionnelle peut générer une quantité très importante d'informations à collecter pour des impacts pouvant être non significatifs. En conséquence il est possible de définir des bornes à la collecte des données et d'exclure certains flux. Ces restrictions doivent cependant être clairement exprimées de façon permettre une analyse constructive des résultats.

3.3.2.2. Étape 2 : Inventaire des données sur le cycle de vie (ICV)

Cette étape consiste dans une comptabilité analytique des flux entrants et sortants (matière, énergie, effluents...) pour chacun des processus intégrés aux frontières du système. Ces données sont de préférence à mesurer spécifiquement pour le produit étudié, on les appelle alors des données primaires, mais peuvent être également disponibles dans des bases de données. Il est possible que des données soient manquantes. Dans ce cas des approximations pourront être faites mais seront à noter comme limite d'utilisation des données en cohérence avec les objectifs visés, la qualité et la représentativité définis au champ de l'étude. La Figure 70 propose une représentation schématique de l'ICV d'un système.

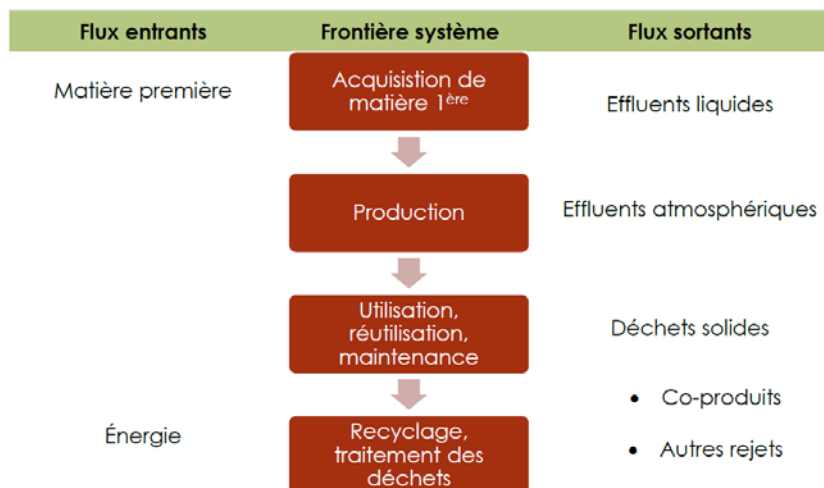


Figure 70 : Représentation schématique des flux d'un Inventaire du Cycle de Vie [17].

Les flux entrants et sortants font partie d'un processus élémentaire qui peut se définir comme la plus petite partie quantifiable que l'on peut prendre en compte dans l'inventaire du Cycle de Vie (ICV) pour laquelle les données d'entrée et de sortie sont quantifiées.

Quelques exemples :

- Les intrants énergétiques, c'est-à-dire les éléments entrant dans la production d'énergie (par exemple : le pétrole) ;

- Les intrants de matières premières (par exemple : le cuivre) ;
- Les intrants auxiliaires (matière utilisée dans un processus élémentaire de production du produit mais qui ne fait pas partie du produit (par exemple : un solvant utilisé en phase de fabrication) ;
- Les produits, coproduits et déchets relatifs au produit final considéré ;
- Les émissions polluantes dans l'air, l'eau et le sol.

Les données de flux associées à ces processus élémentaires sont concaténées dans différentes bases de données, utilisables via les logiciels permettant l'ACV d'un produit, sous forme de modules unitaires.

3.3.2.3. Étape 3 : Évaluation des impacts ou indicateurs

Cette étape a pour but de traduire les consommations et rejets recensés lors de l'inventaire (ICV) en impacts environnementaux.

Les impacts environnementaux correspondent à un changement d'état d'un système cible (homme, faune, flore) par l'action d'un système source (activité humaine). Les processus élémentaires permettent de quantifier les intrants et sortants d'un système, il s'agit ensuite de traduire ces données d'inventaire en données d'impacts par le biais de méthodes de calcul, afin de les exprimer sous forme de catégories d'impacts dans une unité commune (par exemple : le changement climatique, exprimé en équivalent kg CO₂). C'est par le biais des logiciels d'ACV que ces calculs sont réalisés. Le détail de la démarche est illustré dans la Figure 71.

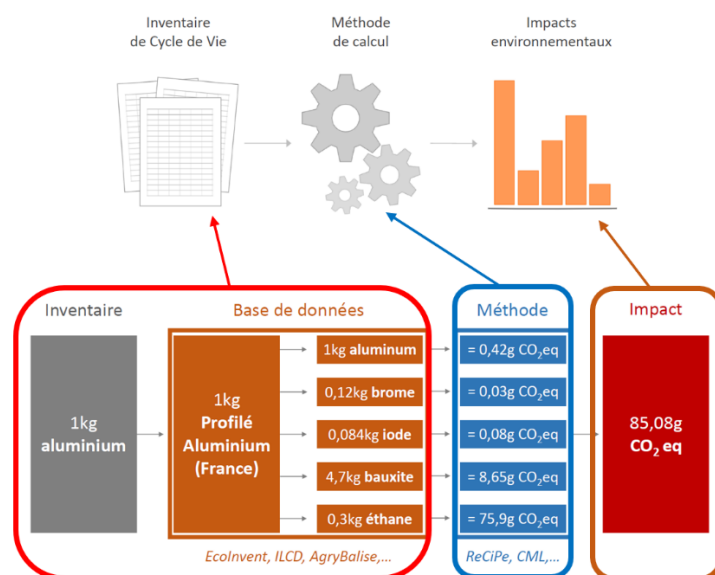


Figure 71 : Représentation schématique du calcul de données d'impact (exemple sur la catégorie du changement climatique) à partir de données d'inventaire par le biais de méthodes de calculs, adapté de [18].

Les différentes catégories d'impacts et les modèles utilisés ont été décrits au paragraphe 3.3.1.1 Catégories d'impacts.

Il existe deux types de catégories d'impacts : les impacts midpoint et les impacts endpoint. Ils sont définis de la manière suivante et illustrés suivant la Figure 72 :

- **Impact de type midpoint (orienté problèmes) :** Quantifie les conséquences liées à des substances émises ou consommées. Ils sont destinés aux concepteurs souhaitant ajouter la prise en compte d'une préoccupation environnementale aux produits (écoconception) ;
- **Impact de type endpoint (orienté dommages) :** Indique les préjudices qui pourraient résulter de l'effet des midpoints. Ils sont destinés soit au grand public (sensibilisation) soit à des décideurs (gouvernement, direction d'entreprise, marketing).

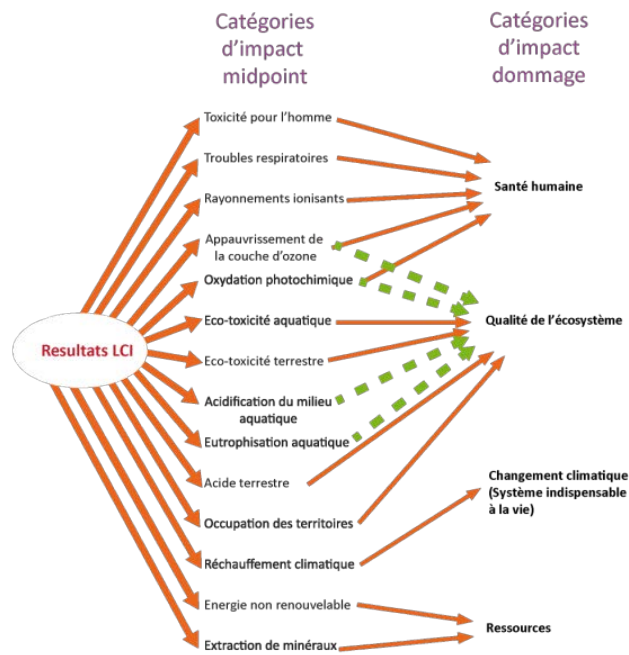


Figure 72 : Représentation schématique de la traduction des données d'inventaire en catégories d'impacts midpoint et endpoint [17].

3.3.2.4. Étapes 4 et 5 : Interprétation et recommandations

Une fois les données collectées et la modélisation réalisée, il faut interpréter les résultats obtenus. Le but est de dégager les principales actions à mener pour la réduction des impacts environnementaux, mais aussi de vérifier la cohérence des résultats par rapport aux objectifs et champ de l'étude définis en amont.

Il existe trois manières d'exprimer et d'interpréter les résultats avec les logiciels d'ACV.

- La caractérisation : les entrants et les sortants sont affichés en fonction de leur degré de contribution à un impact, par exemple en pourcentage de leur contribution individuelle par rapport à l'impact de l'ensemble du cycle de vie ou alors servant à comparer différents matériaux entre eux. Pour chaque indicateur, le précédé ou l'étape du cycle de vie la plus impactante est mise à 100 % et sert de référence. La Figure 73 donne un exemple ;

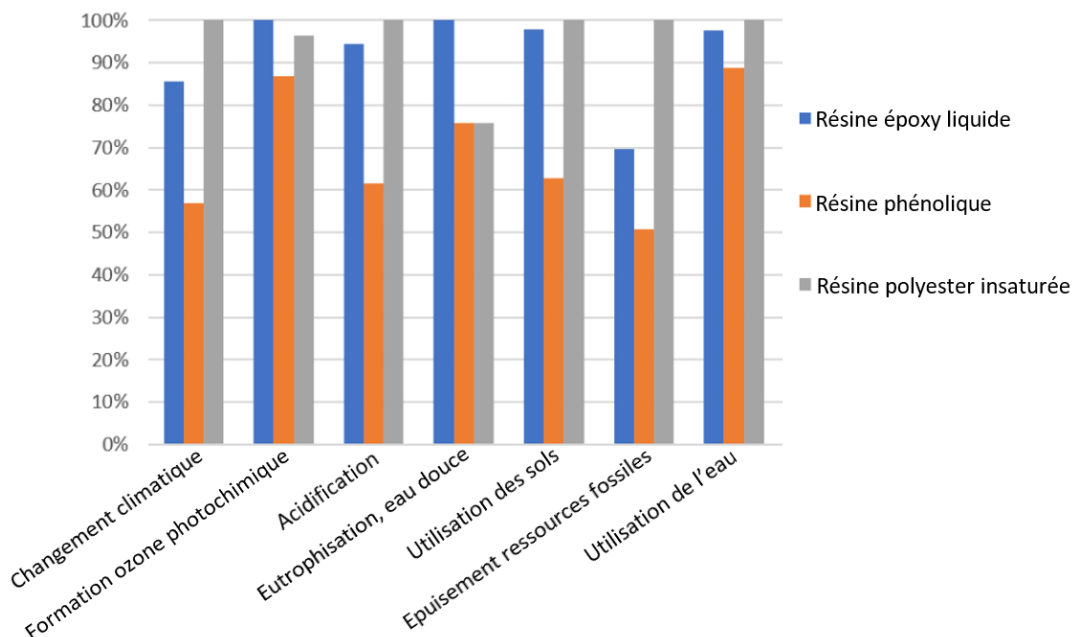


Figure 73 : Exemple de résultats selon la méthode de caractérisation.

- La normalisation : selon la norme NF EN ISO 14044, elle correspond à l'obtention de valeurs normées rendue comparables grâce à une référence : l'impact environnemental d'un européen

moyen, comme le montre l'exemple de la Figure 74. On l'exprime en Points (Pt) ou micro-points (μ Pt). L'échelle est choisie pour que 1 Pt soit représentatif de l'impact environnemental annuel de 1000 habitants européens (1 habitant pour 1 mPt). Certaines ACV définissent le point différemment : 1 habitant pour 1 Pt ;

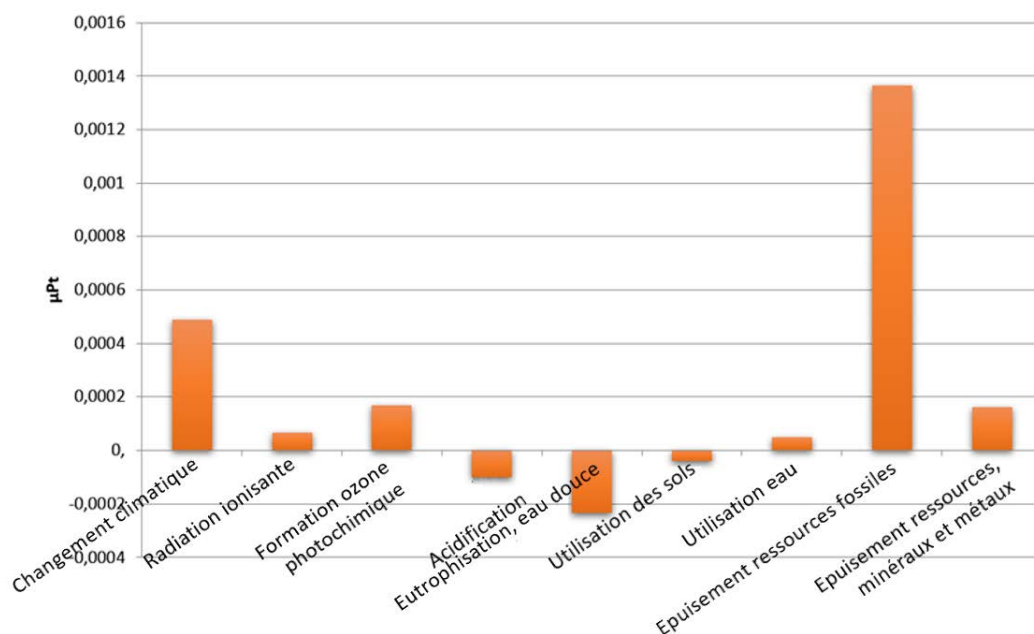


Figure 74 : Exemple de résultats pour 1 kg de résine époxy en utilisant la normalisation (avec le logiciel SimaPro).

- La pondération : elle consiste à attribuer un indice d'importance à chaque critère environnemental. Ces critères peuvent alors être additionnés en vue d'obtenir un score unique. Un exemple est donné en Figure 75. Selon les recommandations de l'union européenne, le critère changement climatique compte pour 21 % du score unique, alors que l'épuisement des ressources fossiles compte pour 8,3 %. La pondération donne donc plus d'importance au critère changement climatique, car celui-ci a été jugé plus problématique par le panel consulté pour ces recommandations et constitué de 2400 citoyens et de 518 experts scientifiques.

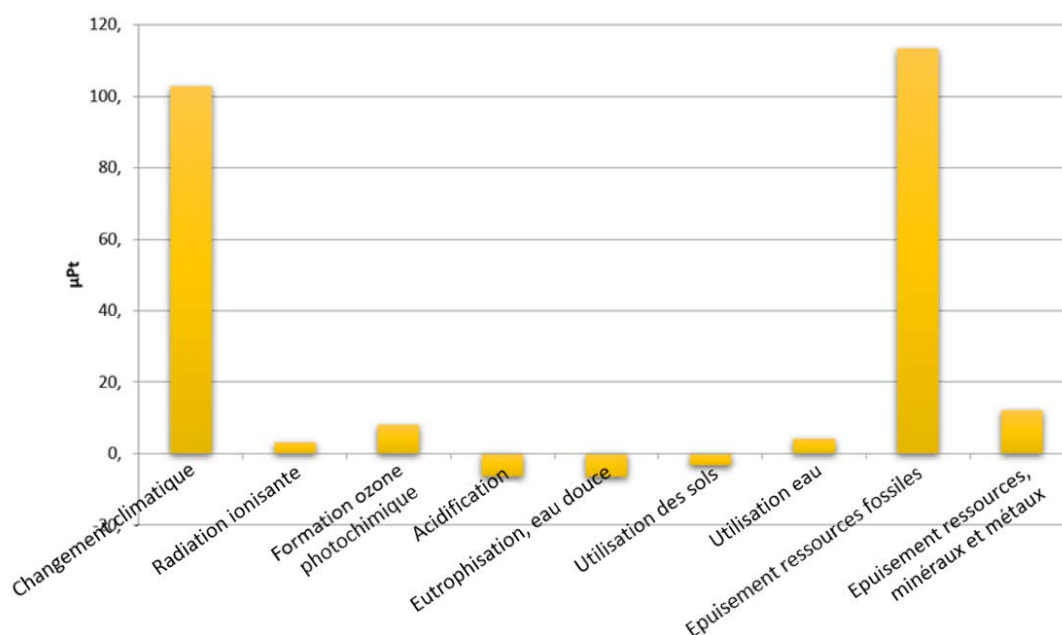


Figure 75 : Exemple de résultats pour 1 kg de résine époxy en utilisant la méthode de pondération, méthode EF3.0.

Les recommandations doivent se baser sur les conclusions finales de l'étude et représenter une conséquence logique et raisonnable des conclusions et peuvent être vues comme des pistes d'améliorations. La Figure 76 propose un exemple de recommandations d'une étude ACV d'un panneau de porte [19].

Etape	Piste	Faisabilité technique	Bénéfices estimés		Commentaires
			Hypothèse	Potentiel	
Production	1. Améliorer l'efficacité de la production chez Ecotechnilin en réduisant les ruptures de charge (nécessitant d'éteindre et de rallumer les équipements de production)	Bonne	-20 % de consommation électrique lors de la fabrication du non-tissé	Faible	L'influence n'est que de l'ordre de 1% sur les différents indicateurs.
	2. Recyclage des chutes de production (projet Recytal)	Projet en phase de prototype	Réincorporation de l'ensemble des chutes (39 % des quantités de non-tissé)	Important	Cette technique est en cours de développement et expérimentation dans le cadre du projet Recytal, auquel participe Ecotechnilin. Une ACV dédiée sera réalisée dans le cadre de ce projet.
	3. Remplacer le PP utilisé par du PP recyclé	Bonne	PP incorporant 30 % de recyclé	Faible	L'influence influe à moins de 5% les différents indicateurs.
	4. Optimisation de la production des granules PP	Non évaluée	Utiliser un PP plus performant d'un point de vue environnemental	Non évalué	L'impact provient essentiellement de la production de granules. La production du PP est issue de la pétrochimie, qui présente a priori un niveau d'optimisation important des modes de production (quantités importantes, maturité des procédés). De plus, Plastics Europe (fabricants européens de plastiques) communique les informations environnementales agrégées (sans possibilité de « zoomer » davantage) et moyennées sur les principaux producteurs, ce qui limite l'identification de pistes plus précises.

Figure 76 : Exemples de recommandations [19].

3.3.2.5. Etape 6 : Revue critique

La revue critique est définie selon la norme ISO 14044 comme « un processus permettant de vérifier si une analyse du cycle de vie a satisfait aux exigences de méthodologie, de données, d'interprétation et de communication et si elle est conforme aux principes de l'analyse du cycle de vie ».

Le recours à une revue critique doit garantir :

- La cohérence des méthodes utilisées par rapport aux normes en vigueur ;
- La validité scientifique et technique des méthodes utilisées ;
- Le fait que les données utilisées sont appropriées et raisonnables par rapport aux objectifs de l'étude ;
- Le reflet des interprétations au vu des limitations identifiées et des objectifs de l'étude ;
- La transparence et la cohérence du rapport d'étude.

Cette revue critique est réalisée par un expert indépendant qui certifie que l'étude est conforme à la norme.

3.3.3. ACV simplifiée

3.3.3.1. Définitions

L'ACV simplifiée (ACVS), est une démarche orientée vers l'écoconception pour une amélioration continue d'un produit. C'est une version allégée de l'ACV, permettant d'obtenir des résultats rapidement, mais avec des incertitudes plus importantes qu'en ACV complète.

Ce n'est pas un outil normalisé et de fait l'utilisation des résultats à des fins de communication est difficile. Cet outil consiste à adapter la méthodologie et à en simplifier l'utilisation au début de la conception. Il n'est pas possible de récupérer les détails des résultats comme le permet l'ACV complète. La Figure 77 illustre les différentes approches pour la réalisation d'une démarche d'évaluation des impacts environnementaux d'un système donné.



Figure 77 : Les différentes approches, de gauche à droite : ACV complète, ACV mono-indicateur, ACV simplifiée ; outils disponibles en fonction du périmètre de la démarche [20].

La principale particularité de l'ACV Simplifiée est d'utiliser des données d'impact en lieu et place des données d'inventaire. Il s'ensuit que la méthode de calcul est intégrée à la base de données.

La différence entre des données d'impact et des données d'inventaire est illustrée ci-après dans la Figure 78.

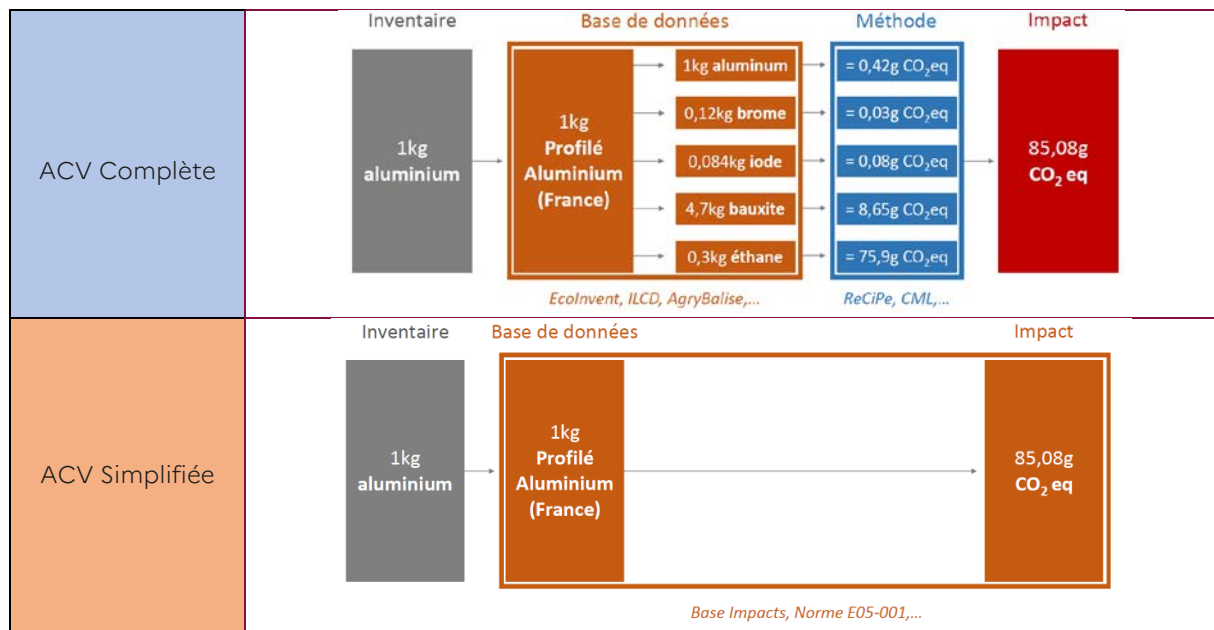


Figure 78 : Différence de conception entre une ACV complète et ACV simplifiée [21].

On s'aperçoit donc qu'en fonction de la base de données utilisée il n'y a peu de possibilité de remonter à l'origine de la donnée et d'avoir un avis critique. La donnée d'impact est précalculée dans la base de données, et n'offre pas la possibilité de modifier certaines données d'entrée ou de les croiser avec d'autres éléments de la littérature.

3.3.3.2. Exemple d'outil : Ecocalculator de l'EUCIA

L'European Composites Industry Association (EUCIA) a mis à disposition des transformateurs de composites un logiciel pour quantifier l'impacts environnementaux de leurs produits. Il s'agit du logiciel Ecocalculator, disponible gratuitement depuis le site de l'EUCIA (ecocalculator.eucia.eu/). L'impact environnemental du produit est estimé en « cradle-to-gate », c'est-à-dire depuis l'extraction des ressources jusqu'à la fabrication de la pièce (les phases d'usage et de fin de vie ne sont pas prises en compte).

Une grande variété de procédés a été implémentée tels que la pultrusion, l'infusion, le procédé Resin Transfer Molding (RTM), le Long Fiber Thermoplastic (LFT), le Sheet Molding Compound (SMC), l'injection thermoplastique. Un grand nombre de matériaux ont également été intégrés dans l'outil, tels que des renforts (fibres de verres sous différentes présentations et fibres de carbone), des résines (polyester, époxy, PP, etc.), des matériaux d'âme et des matériaux auxiliaires (tels que l'agent de démoulage, solvants ou la bâche en plastique pour le procédé d'infusion).

L'impact environnemental du produit est calculé par la méthode ILCD 2011 midpoint. Les contributions sur 16 indicateurs sont données. Une note de synthèse peut être téléchargée au format.

3.3.3.3. ACV complète et ACV simplifiée : comparaison

Le Tableau 32 compare les avantages et inconvénients des deux méthodes d'ACV.

	Avantages	Inconvénients
ACV complète	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode la plus robuste • Analyse exhaustive : composants, phases du cycle de vie, • Utilisable pour des documents réglementaires • Possibilité de communiquer 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisés par des experts et pour des experts • Complexité de la collecte de données • Exploitation des données fastidieuse • Analyse compliquée
ACV simplifiée	<ul style="list-style-type: none"> • 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 	<ul style="list-style-type: none"> • 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 procédé par exemple), les données sont moyennées. • Implique plus d'incertitudes dans les résultats

Tableau 32 : Tableau de comparaison entre l'ACV complète et l'ACV simplifiée.

L'ACV simplifiée peut constituer une bonne alternative à l'ACV complète, notamment si elle permet une première évaluation de l'impact environnemental d'un processus ou d'un produit en l'absence de données plus complètes, notamment en relatif.

Ces outils (ACV et ACV simplifiée) doivent être utilisés avec discernement et toujours avec le souci de bien comprendre les hypothèses sur laquelle ils reposent, et leurs limites intrinsèques : périmètre du cycle de vie, prise en compte des spécificités sur les sources d'approvisionnement, etc. De plus leurs résultats doivent être utilisés avec prudence tant que l'outil n'est pas validé par une instance scientifique reconnue, et avec un souci de transparence vis-à-vis des limites de l'analyse.

3.4. Grandeurs types pour les matériaux polymères et composites

Ce chapitre donne des ordres de grandeur et des éléments de comparaisons sur les impacts des matériaux composites (matrices et renforts), sur les solutions classiques et des pistes d'alternatives. En synthèse, on peut retenir que :

- Les analyses d'impact sont généralement complexes car comportent de nombreux paramètres : étendue du cycle de vie, des 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 ;
- Les fibres synthétiques sont plus impactantes à produire que les fibres naturelles sur l'utilisation des ressources non-renouvelables et le changement climatique (à masse équivalente). La fibre de carbone est significativement plus impactante à produire que la fibre de verre, à l'exception de l'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 de moindres impacts environnementaux. 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 recyclable 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 PLLA/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.

3.4.1. Comparaison des constituants par catégorie d'impact

3.4.1.1. Impacts environnementaux des fibres

Les fibres de renforts présentées ici sont affichées comme « market for », c'est-à-dire que la donnée englobe l'extraction, la production et le transport. Ici les données présentées sont globales, c'est-à-dire agglomérées au niveau mondial, sauf la fibre de carbone qui est une donnée européenne. La méthode utilisée est la méthode EF 3.0 avec 8 indicateurs sélectionnés : le changement climatique, la formation d'ozone photochimique, l'acidification, l'épuisement des ressources fossiles, l'épuisement des ressources minières et métalliques. En effet, ce sont des catégories d'impacts très couramment utilisées dans la littérature. L'utilisation de l'eau, des sols et l'eutrophisation sont pertinentes dans le contexte des fibres naturelles, car issues de la culture des sols. Les résultats sont présentés dans la Figure 79.

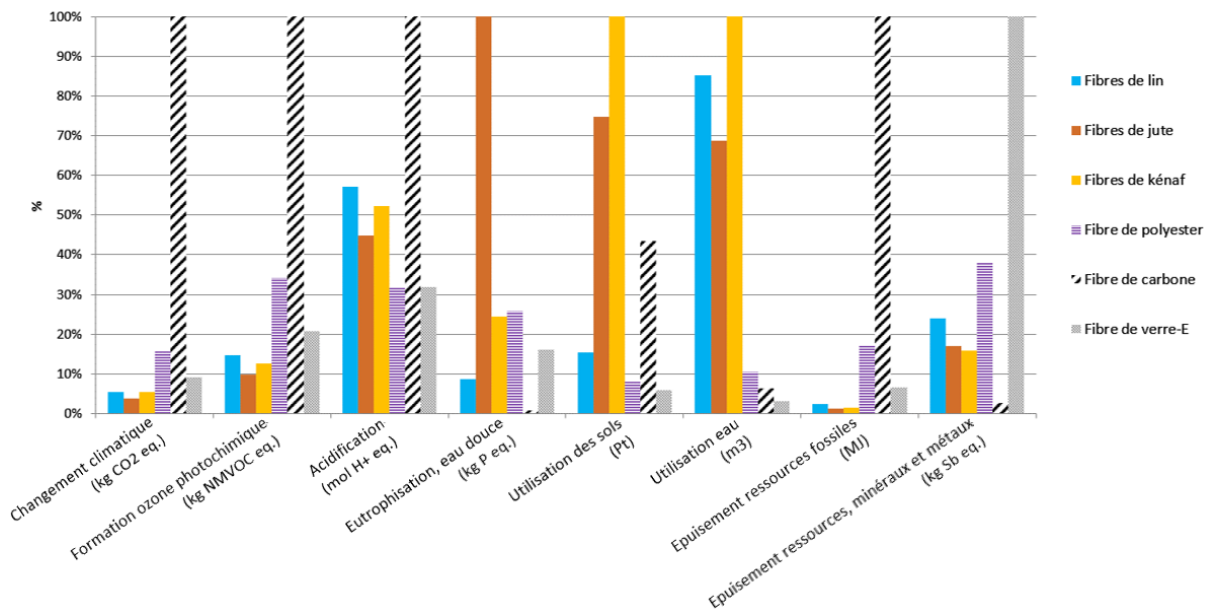


Figure 79 : ACV comparative entre différentes fibres, à isomasse (1 kg), données Ecoinvent, logiciel Simapro et méthode EF 3.0.

Il en ressort que sur quatre des huit impacts choisis, la fibre de carbone est la plus impactante en termes de changement climatique, de formation d'ozone photochimique, d'acidification et d'utilisation de ressource fossiles. Ceci s'explique par la consommation énergétique importante requise à sa production. La fibre de verre est moins impactante que la fibre de carbone de l'ordre de 70 % et 90 %. En revanche, la fibre de verre est la plus impactante sur les ressources minières et métalliques. Cela est dû à l'extraction des différents composés nécessaires à l'obtention du verre (carbonate de sodium, carbonate de calcium) en plus de la collecte du sable nécessaire à la fabrication du verre.

Les fibres naturelles permettent de réduire d'un facteur proche de 10 les impacts sur le changement climatique, la formation d'ozone photochimique et l'épuisement des ressources fossiles par rapport à la fibre de carbone, et d'un facteur d'environ 2 par rapport à la fibre de verre. En contrepartie elles sont les plus impactantes sur l'eutrophisation, l'utilisation de l'eau et de l'occupation des sols.

Pour résumer, les fibres synthétiques (carbone, verre et polyester) sont plus impactantes sur les consommations des ressources, les pollutions aériennes et le changement climatique alors que les fibres naturelles sont plus impactantes sur l'utilisation de l'eau et des sols et la pollution de ces derniers.

3.4.1.2. Impacts environnementaux des matrices polymères

De manière identique aux fibres, les données présentées pour les matrices polymères (thermodurcissables et thermoplastiques) sont des données « market for ». Le périmètre d'analyse s'arrête donc à l'extraction et à la production de matière.

Ici, seules les matrices courantes utilisées dans la composition de composites pétrosourcés et biosourcés ont été retenues, à savoir le PA 6,6, le PA 6, le PC, le PPS, le PP, le PLA (plastique biosourcé et peu biodégradable), l'ABS, la résine polyester (désignée par UP sur la Figure 80) et la résine époxy. Seuls les matériaux vierges, c'est-à-dire non recyclés, sont considérés dans ce paragraphe. L'effet du recyclage sur l'impact environnemental est regardé au paragraphe 3.4.2.1.

Les indicateurs choisis ici sont les mêmes que pour les fibres. Les résultats sont présentés dans la Figure 80.

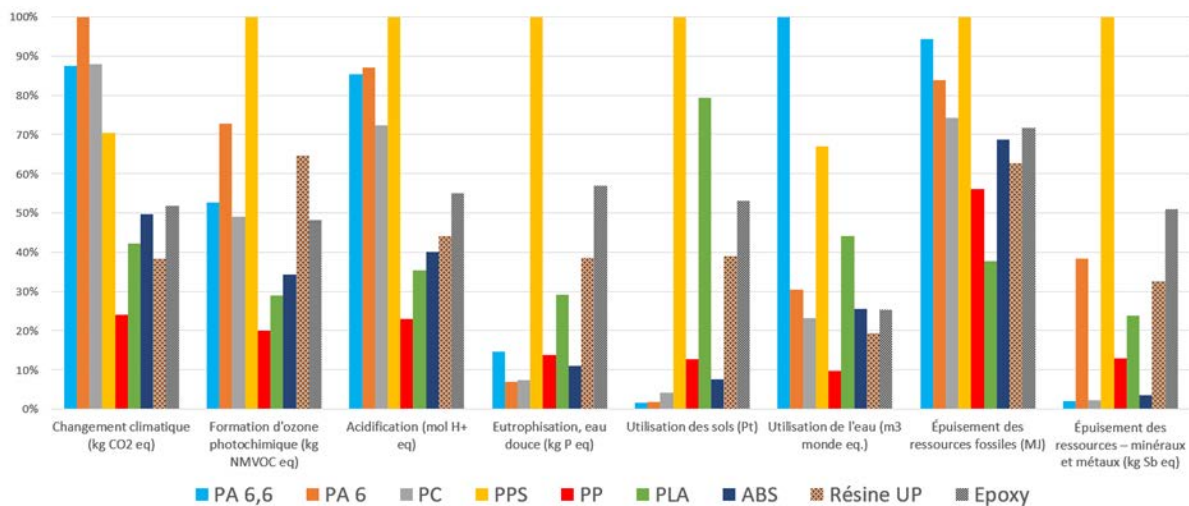


Figure 80 : ACV comparative entre différentes matrices thermodurcissables et thermoplastiques, à isomasse (1 kg), logiciel Simapro et méthode EF 3.0.

Sur le périmètre présenté, il est constaté une certaine homogénéité sur les impacts changement climatique, formation d'ozone photochimique et épuisement des ressources (fossiles et minéraux), entre les matrices TP et TD, les plus techniques étant globalement les plus impactantes, d'un facteur de 1 à 4 en moyenne.

Sur six des huit indicateurs choisis, le PPS arrive comme le plus impactant. Son impact élevé est notamment dû à l'utilisation du sulfure de sodium utilisé lors de la polycondensation avec le butane-1,4-diol. Le sulfure de sodium est issu en grande partie de l'exploitation minière, qui génère des rejets importants dans l'atmosphère, une utilisation importante de ressources fossiles et de fortes émissions de CO₂ par les engins de chantier. Le PPS est un polymère dit technique et hautes performances. En règle générale, les polymères dits de commodité (PP, PE, etc.) sont généralement les moins impactants. Les polymères techniques présentent le plus souvent des cycles aromatiques, appartiennent à la famille des halogénés (PVC, PTFE, PVDF, etc.) ou des soufrés (PPS, PSU, etc.) et leur mise en œuvre demande des composés à fort impact pour l'environnement. A cela s'ajoute l'énergie supérieure requise à la rupture des cycles aromatiques, faisant augmenter l'impact global du polymère.

On remarque que, globalement, le PPS, le PA 6,6, le PA 6 sont plus impactants que les résines thermodurcissables étudiées ici.

Cependant on rappelle que ces chiffres ne prennent pas en compte la fin de vie du produit. L'impact de la recyclabilité ou du caractère biosourcé sont étudiés dans le paragraphe 3.4.2.

3.4.2. Pistes techniques pour la réduction des impacts

3.4.2.1. Utilisation de polymères recyclés

L'utilisation de matières vierges conduit à une raréfaction constante des ressources et à des impacts environnementaux élevés. Une première possibilité consiste à utiliser de la matière recyclée. En effet, les matrices thermoplastiques permettent une réutilisation pour une même fonction ou une fonction différente. Une comparaison entre deux matières a été réalisée : du PET et du PEHD avec une version

recyclée pour chacun, notée respectivement r-PET et r-PEHD. Les données proviennent de la base de données Ecoinvent et d'une modélisation sous SimaPro. De manière identique aux précédentes modélisations, les données sont ici « market for », c'est-à-dire de l'extraction à la livraison au client. Les 8 indicateurs sont les mêmes que ceux sélectionnés précédemment. Les données sont des données globales pour les pétrosourcés et Europe pour les versions recyclées. La Figure 81 illustre la comparaison.

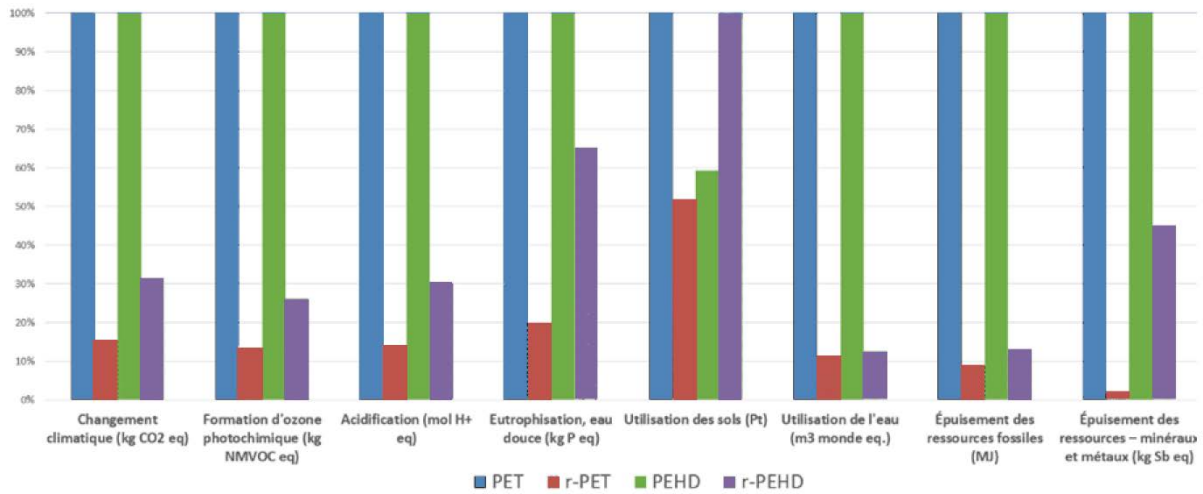


Figure 81 : Comparaison de deux polymères en versions vierge et recyclée.

L'utilisation de matières recyclées en lieu et place de matières vierges réduit de manière considérable quasiment tous les impacts environnementaux. En moyenne, il est constaté une réduction des impacts de 80 % pour le r-PET et près de 70 % en moins pour le r-PEHD.

Une exception à cette tendance est que le r-PEHD est plus impactant que le PEHD vierge pour l'utilisation des sols. Les hypothèses pour expliquer ce résultat sont :

- La provenance de la donnée : les données sur la production des polymères n'ont pas les mêmes lieux de production (mondiale pour les polymères pétrosourcés et européenne pour les recyclés) ;
- Les mix énergétiques différent pour les deux modélisations.

La Figure 82 illustre cette explication avec un exemple du r-PEHD modélisé pour différentes régions : la Suisse, l'Europe sans la Suisse, les Etats-Unis et le reste du monde, sans l'Europe. On observe alors un écart important sur les impacts pour un même matériau et la même méthode mais avec des origines géographiques différentes.

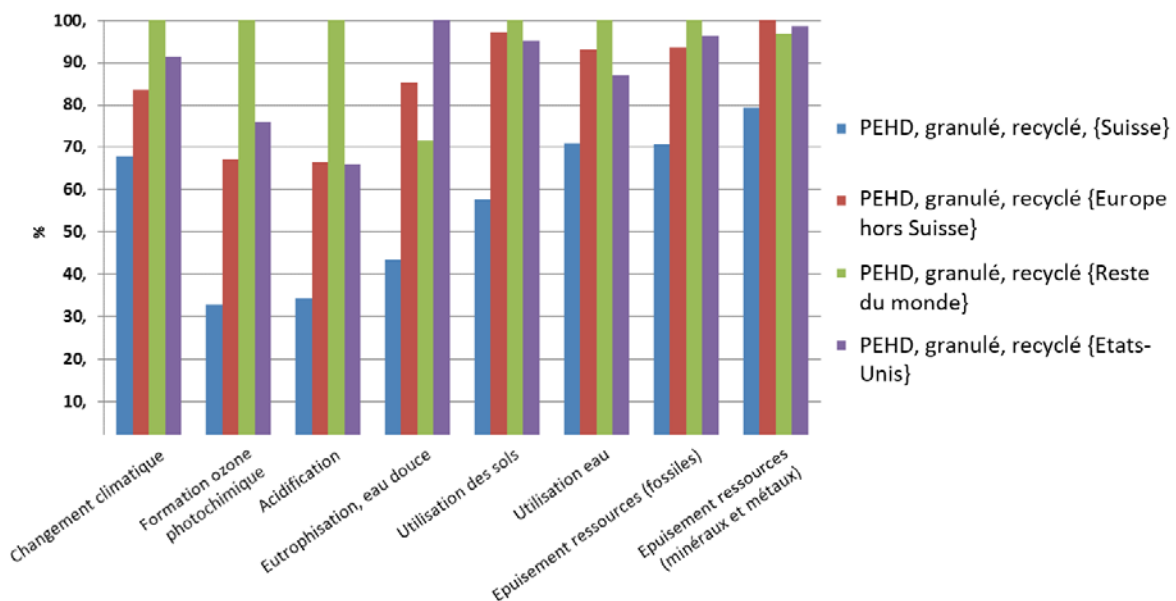


Figure 82 : modélisation « market for » de 4 r-PEHD issus de différentes régions géographiques.

Il faut cependant tenir compte que l'utilisation de matière recyclée (potentiellement de nombreuses fois) implique une diminution de propriétés mécaniques et physico-chimiques sur le long terme, comme ont pu le montrer Oblak *et al.* [22] (Figure 83). L'évolution des propriétés mécaniques après 100 recyclages sans ajout de matière vierge est observé. On constate que les propriétés diminuent au fil des recyclages.

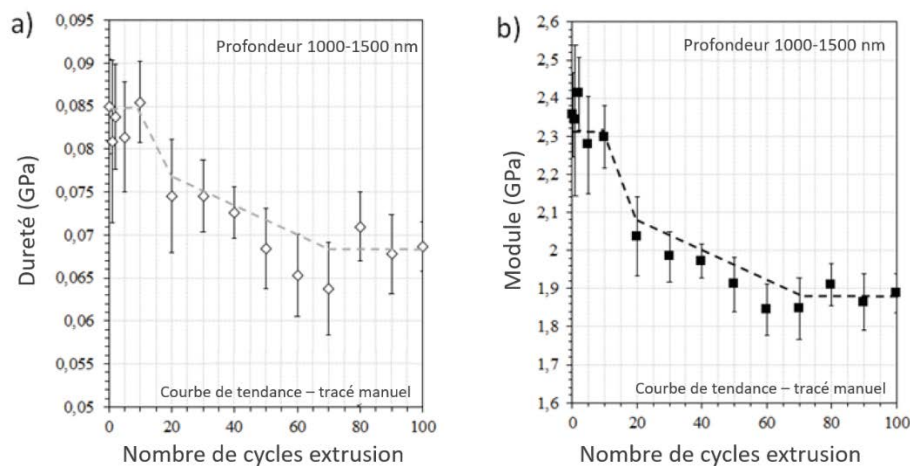


Figure 83 : Dépendance de la dureté et du module de traction du PEHD en fonction du nombre de cycles d'extrusion [22].

Pour remédier à ce phénomène, deux solutions sont utilisées couramment :

- Les matières recyclées sont quasi systématiquement réhaussées de quelques pourcents de matières vierge ;
- La matière recyclée est utilisée sans additifs pour des applications moins exigeantes.

3.4.2.2. Utilisation de plastiques biosourcés comme matrice

Les plastiques biosourcés sont relativement prisés depuis plusieurs années désormais. L'impact sur l'environnement des polymères biosourcés est évalué dans ce paragraphe par des analyses ACV.

On appelle plastique biosourcé un polymère qui a été en partie ou complètement fabriqué à partir de ressources issues de la biomasse (résidus de cultures agricoles, canne à sucre, pomme de terre, etc.). Cette caractéristique ne présume en rien du devenir du déchet en fin de vie, qui peut pas être biodégradable. De plus, la proportion de matière biosourcée dans le produit peut varier d'un produit à l'autre, et la provenance des matières premières utilisées peut nuancer fortement le bilan environnemental. Par exemple, certains polymères biosourcés viennent de pays lointains par rapport à la France et/ou l'Union Européenne, ce qui implique dans certains cas, des impacts très importants liés au transport.

Dans ce paragraphe, les données complète sur les matrices composites biosourcées du berceau à la tombe étant à ce jour rares, deux cas d'utilisation de plastiques biosourcés sont présentés à titre d'illustration : des bouteilles d'eau et des gobelets. Le premier cas compare un PET pétrosourcé avec différents PET biosourcés provenant de différentes régions du monde. Le second cas compare des gobelets PLA à des gobelets en PP, bio-PP et PET. Ces cas d'applications sont issus d'une étude ACV publiée par le Directorate-General for Research and Innovation de l'Union Européenne, COWI et l'Université d'Utrecht [23] sur 7 cas d'applications de polymères biosourcés.

On note également que les polymères biosourcés présentent les mêmes caractéristiques mécaniques et physico-chimiques que leurs pendants pétrosourcés à iso-référence : seule l'origine des molécules change, mais la formulation reste la même.

3.4.2.2.1. Cas des bouteilles en PET

Pour les bouteilles d'eau en PET considéré, l'unité fonctionnelle est : « Conditionnement d'eau en 100 bouteilles de 0,5 L offrant une durée de conservation d'au moins 9 mois, achetées et consommées en Europe », ce qui correspond à 100 bouteilles de 10 g, donc 1 kg de PET.

Les matériaux comparés sont :

- Référence : PET biosourcé à base de canne à sucre provenant du Brésil (culture et conversion en éthanol au Brésil) ;

- Alternative 1 : PET biosourcé à base de blé (37 %), maïs (36 %) et de betterave sucrière d'origine européenne (27 %) (conversion éthanol européenne également) ;
- Alternative 2 : PET biosourcé à base de paille de blé d'origine européenne (conversion éthanol européenne également) ;
- Pétrochimie : PET pétrosourcé issu du mix énergétique européen.

Les résultats sont présentés sur la Figure 84 et tiennent compte d'un cycle du berceau à la tombe avec une fin de vie en supposant 60 % de recyclage, 20 % d'incinération et 20 % orienté vers l'enfouissement.

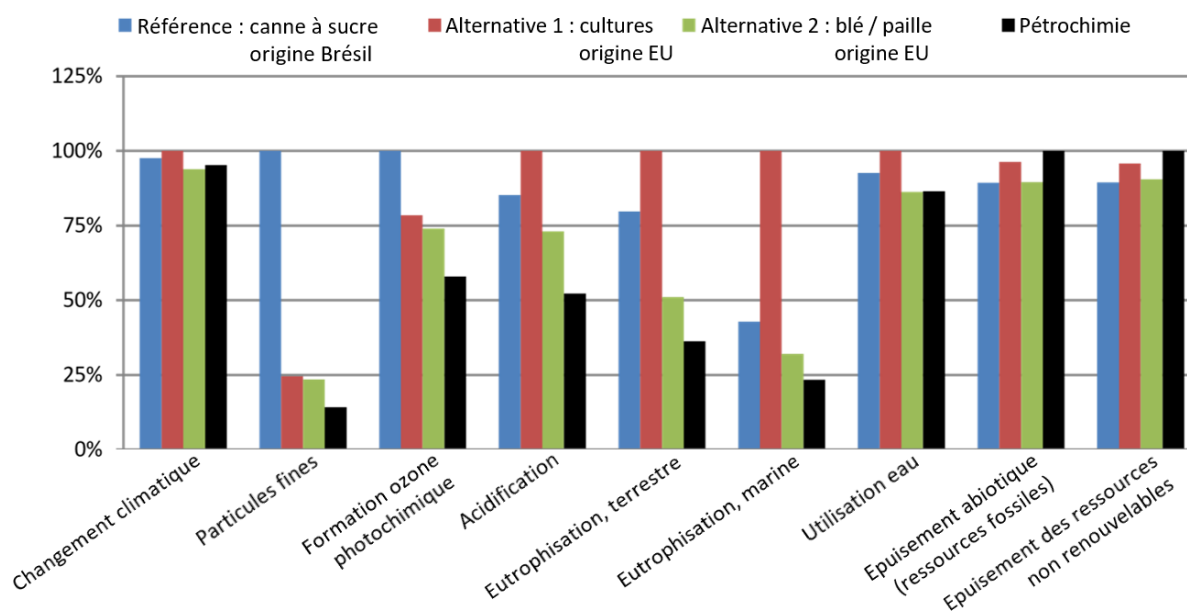


Figure 84 : ACV comparative berceau à la tombe de bouteilles en PET de différentes natures [22].

Dans ce cas, les avantages des plastiques biosourcés ne sont pas évidents : le gain est faible, voire négatif sur les impacts changement climatique, ou utilisation d'énergie non renouvelables, et pâtissent des inconvénients de l'agriculture sur les impacts acidification, eutrophisation terrestre et marine notamment (énergie nécessaire à l'agriculture, émissions des fertilisants, l'incinération et le transport des déchets et de la bagasse (résidus de cannes à sucre) et l'incinération des déchets au cours de la récolte). Ce dernier point est à l'origine des fortes émissions de particules fines observées pour le PET biosourcé issu du Brésil.

Dans ce cas, l'utilisation de PET biosourcé a un intérêt limité en termes d'impacts. Cependant, cela évite en partie l'utilisation de ressources fossiles.

3.4.2.2. Cas des gobelets en plastique

Pour le cas des gobelets, l'unité fonctionnelle est la suivante : « 1 000 gobelets à usage unique utilisés pour les boissons froides, chacun d'un volume de 200 ml », soit 4,59 g pour un gobelet en PLA, 3,88 g pour un gobelet en PP et 5,51 g pour un gobelet en PET.

Les matériaux comparés sont :

- Référence : PLA à base de maïs cultivé aux États-Unis et de la canne à sucre de Thaïlande (Natuworks aux USA et Total-Corbion en Thaïlande) ;
- Alternative 1 : PLA à base de maïs cultivé en Europe (cas fictif) ;
- Alternative 2 : PP biosourcé à base d'huile de cuisson ;
- Référence 1 : PP pétrosourcé, mix de consommation allemand ;
- Référence 2 : PET pétrosourcé (identique à celui du cas 1), mix énergétique européen.

Les résultats sont donnés dans la Figure 85 et tiennent compte d'un cycle du berceau à la tombe avec les fins de vies suivantes :

- Pour référence et l'alternative 1 : 15 % de recyclage, 15 % de compost industriel, 39 % d'incinération et 31 % de mise en décharge ;
- Pour le PP biosourcé, le PP et le PET pétrosourcés : 30 % de recyclage, 39 % d'incinération et 31 % de mise en décharge.

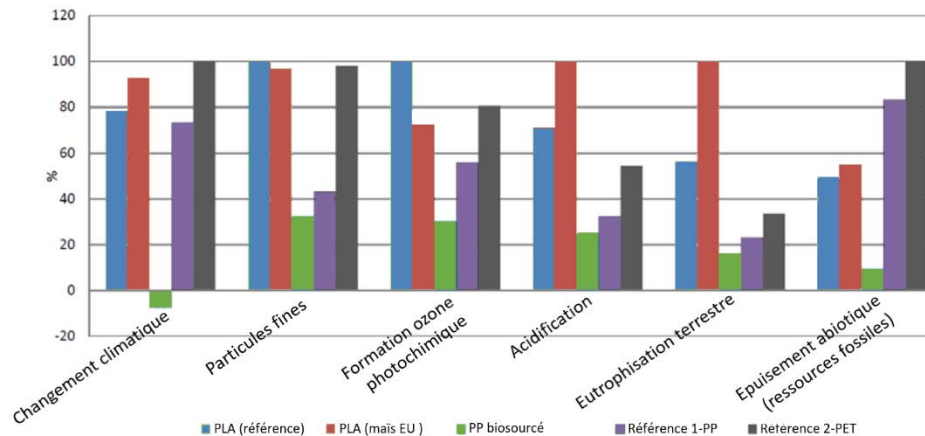


Figure 85 : ACV comparative berceau à la tombe de gobelets de différentes natures [22].

Les tendances sont similaires à celles de l'étude précédente. Le PLA (biosourcé) diminue l'impact sur le changement climatique de 10 à 20 % par rapport au PET, mais l'augmentent par rapport au PP pétrosourcé. Ils présentent un mauvais bilan sur l'eutrophisation, l'acidification due aux effets de l'agriculture. En revanche ils diminuent l'impact sur les ressources fossiles de 35 à 50 %.

Le produit le plus intéressant sur cette application est le PP à base d'huile de cuisson, car il est non seulement biosourcé mais également issu du recyclage. Cela lui permet d'afficher un impact positif sur le changement climatique, car la part de CO₂ séquestré par l'utilisation du carbone de l'huile de cuisson est plus important que tout le CO₂ émis durant l'ensemble du cycle d'après l'étude.

Pour de plus amples informations sur la méthodologie complète et des détails sur les différents cas, il est conseillé de se référer au document de l'Union Européenne : « *Environmental impact assessments of innovative bio-based product : Task 1 of "Study on Support to R&I Policy in the Area of Bio-based Products and Services"* » [24].

Ces deux cas d'applications mettent en avant que l'utilisation de polymères biosourcés peut s'avérer une solution d'intérêt pour réduire l'impact environnemental des produits de la plasturgie et des composites, mais nécessite des connaissances sur l'origine et le mode de culture des agroressources (processus, mécanisation, traitements reçus, gestion des déchets agricoles etc.). Le PLA est un polymère biosourcé largement étudié dans la littérature, mais son bilan d'impact environnemental est à nuancer, en raison des impacts liés à l'agriculture. Les performances affichées par le polypropylène biosourcé à base d'huile de cuisson recyclée montrent à nouveau l'intérêt du recyclage.

On notera cependant que l'utilisation d'agroressources permet de diminuer la part d'utilisation liée aux ressources fossiles dans de proportions généralement modérées.

3.4.2.3. Utilisation de fibres naturelles

Comme il a été mentionné dans le paragraphe 3.4.1.1, les fibres naturelles permettent de réduire d'un facteur environ 2 les impacts sur le changement climatique, la formation d'ozone photochimique et les ressources fossiles par rapport à la fibre de verre, et d'un facteur proche de 10 par rapport à la fibre de carbone. En contrepartie elles sont les plus impactantes sur l'eutrophisation, l'utilisation de l'eau et de l'occupation des sols tout simplement à cause de leur culture.

Sur le plan mécanique, les fibres naturelles présentent des caractéristiques intéressantes en moyenne si on les rapporte à leur densité, qui peuvent faire de variétés comme le lin ou le chanvre des alternatives crédibles à la fibre de verre (voir Tableau 33).

Les tableaux de la partie 1.2.2 donnent les valeurs des principales fibres, dont nous pouvons extraire les modules et résistances spécifiques, définies par commodité comme le rapport entre module d'Young (respectivement résistance à la rupture en traction) et la densité de la fibre.

		Verre E	Carbone (haute résistance)	Chanvre	Lin
Module spécifique E/d	GPa	29	128	47	21
Résistance spécifique σ/d	MPa	984	1 944	267 – 600	238 – 1 034

Tableau 33 : Comparaison des propriétés de quelques fibres naturelles et synthétiques à iso-masse.

Les fibres naturelles présentent néanmoins une variabilité importante dans leurs propriétés, du fait de leur essence de produit naturel :

- La reprise en humidité des fibres brutes est significative, et diminue fortement les propriétés mécaniques ;
- Le diamètre des fibres peut varier, et tend à diminuer les propriétés mécaniques ;
- L'angle des microfibrilles de la structure interne de la plante varie selon les variétés. Les angles faibles (5 à 10 %) du chanvre, de la ramie, et du lin donnent lieu à de bonnes propriétés.

Le mode de production influe également sur les propriétés :

- Les variétés de plante ;
- La zone de prélèvement de la fibre dans la plante ;
- Les conditions de culture et de croissance de la plante (météo, ensoleillement, qualité du sol, etc.) ;
- Les conditions d'extraction des fibres ;
- Les traitements qu'on peut recevoir les fibres ;
- La maturité de la plante.

On note toutefois que l'utilisation de ces fibres comme renforts de matériaux composites sont encore récentes, et des progrès sur les plans de la production et des traitements appliqués sont encore à envisager.

D'un autre côté, l'exploitation agricole nécessaire à la production de ces fibres génère des impacts environnementaux, notamment via l'utilisation de pesticides et engrais, la consommation d'énergie pour les nombreuses opérations de culture, l'incinération de coproduits ou sous-produits. Les traitements nécessaires à l'optimisation des performances de la plante doivent donc être étudiés également afin de minimiser l'impact global de ces fibres.

3.4.2.4. Utilisation de composites biosourcés

Les composites biosourcés sont définis comme l'assemblage d'au moins deux matériaux dont au moins un des constituants est partiellement ou totalement biosourcé.

Concernant l'ACV de composites et plus particulièrement la comparaison entre plusieurs composites, les données issues de la littérature sont peu nombreuses. Le Duigou *et al.* [24] [25] proposent une étude ACV entre un composite verre/polyester et un composite lin/PLLA biosourcé avec un taux volumique de fibres de 26,5 % pour chacun. La comparaison se fait à iso performances mécaniques. Les frontières du système

sont présentées dans la Figure 86. L'étude se fait en deux étapes : une première du berceau jusqu'au produit et la seconde sur le cycle de vie complet.

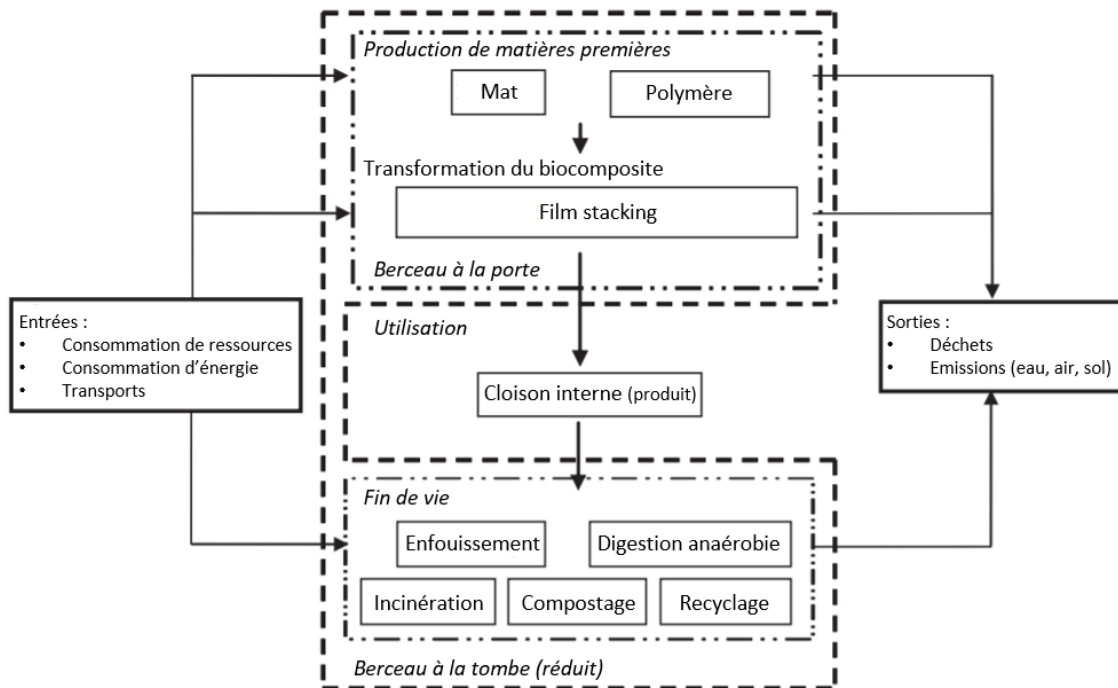


Figure 86 : Frontières du système de l'étude de Le Duigou et al. [24].

La Figure 87 illustre les résultats du berceau au produit de l'étude [24], [25].

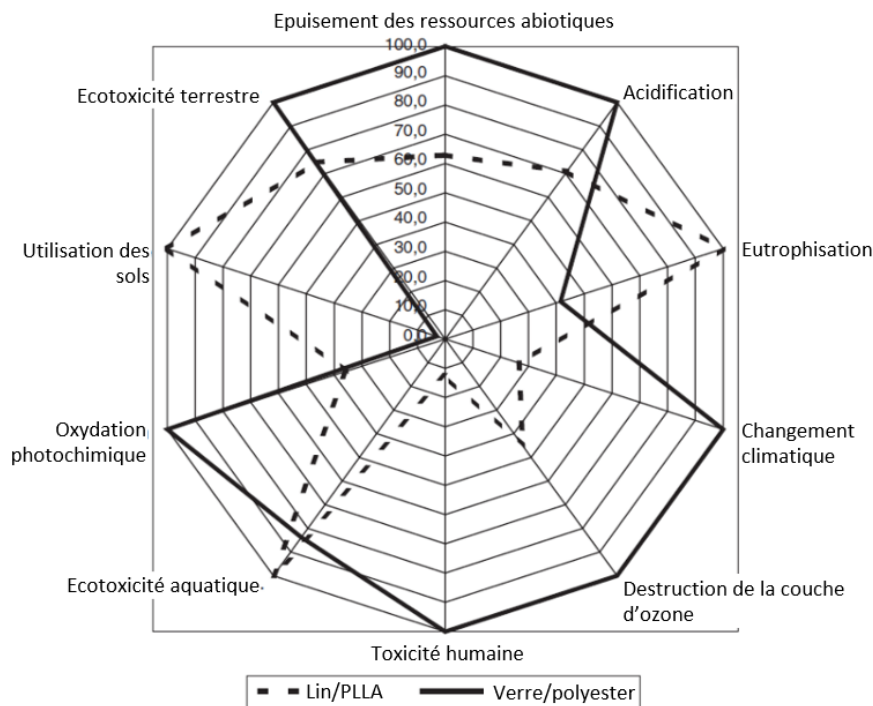


Figure 87 : ACV berceau au produit entre un composite polyester/verre et un composite PLLA/lin [24].

Sur ce périmètre, le composite PLLA/lin est 4 fois moins impactant sur le réchauffement climatique, près de 3 fois moins impactant pour la formation d'ozone photochimique et 30 % moins impactant sur l'acidification. Sur cet exemple, la baisse d'impacts lié à l'utilisation d'un matériau PLLA/lin est notable.

En revanche, le composite PLLA/lin est le plus impactant sur l'eutrophisation (+150 %), l'écotoxicité marine (+20 %) et l'utilisation des sols (facteur très élevé), dues à la pollution locale de la culture du lin et du maïs (plante dont est issu le PLLA) [25].

Enfin la Figure 88 compare les impacts environnementaux sur l'intégralité du cycle de vie, donc du berceau à la tombe pour les composites PLLA/lin et le polyester/verre [25] en fonction des scénarii de fin de vie.

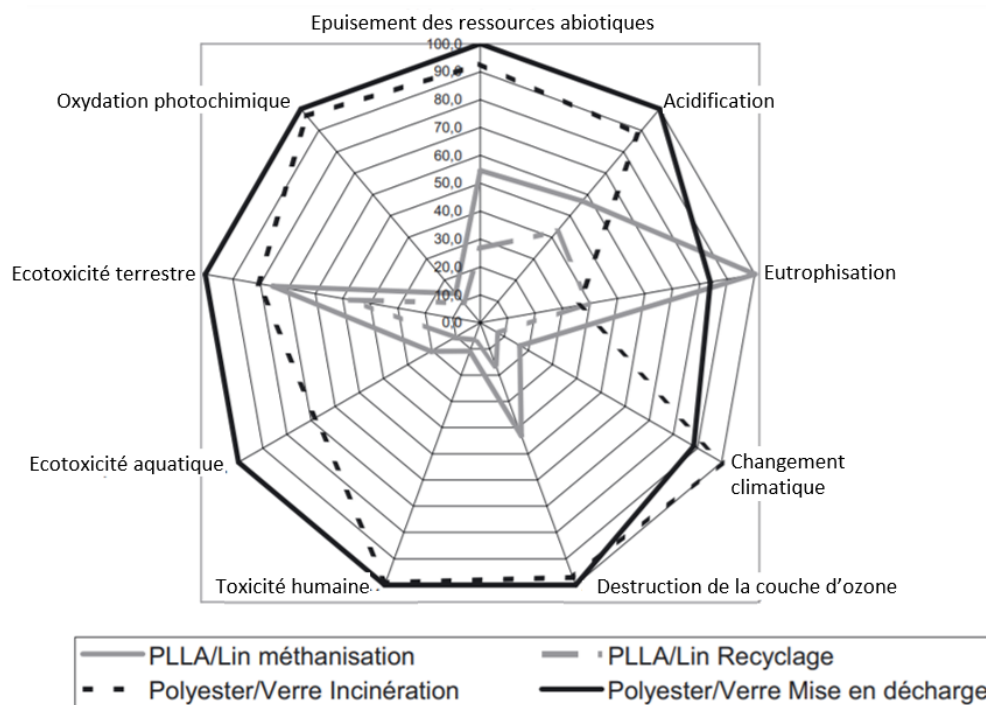


Figure 88 : Différents scénarii de fin de vie pour les deux composites [25].

En prenant en compte le cycle de vie complet, le composite PLLA/lin prend l'avantage en termes d'impact : ainsi l'impact toxicité de l'eau, qui était défavorable au lin/PLLA sur le périmètre berceau au produit, devient 5 fois moins impactant en prenant en compte la fin de vie. L'impact sur l'eutrophisation de l'eau est réduit également d'un facteur 2 à 1.3 pour le PLLA méthanisé. L'impact sur le changement climatique est significativement réduit.

Le composite PLLA/lin est alors globalement moins impactant que le composite polyester/verre. Cet exemple illustre l'intérêt de mener l'analyse sur le cycle de vie complet du produit, et met en avant les avantages des solutions de fin de vie à faible impact, comme le recyclage..

3.4.2.5. Transition composites thermodurcissables/thermoplastiques

L'utilisation de matrices et/ou de renforts biosourcés et/ou biodégradables est une voie envisageable pour la réduction des impacts, mais l'utilisation de renforts et matrices recyclables mécaniquement amène également à une baisse drastique des impacts, comme cela a été montré dans le paragraphe 3.4.2.1. Le monde des composites voit émerger depuis plusieurs années une compétition entre matrices thermodurcissables (TD) et thermoplastiques (TP).

Les premières sont utilisées depuis très longtemps et offrent des propriétés mécaniques de premier ordre (composites carbone/époxy, verre/polyester) au détriment d'un recyclage quasi inexistant et plus proche du stade de la recherche que de l'applicatif. Face aux composites TD, les composites TP ont connu un intérêt depuis quelques années notamment pour leur réutilisation, permise par le caractère fusible de la matrice. Les TP offrent désormais des performances mécaniques et physico-chimiques équivalentes, voire supérieures aux TD pour certains. Citons notamment les matrices polyetheretherketone (PEEK), Polyéthercétone (PEK), Polysulfure de phénylène (PPS), Polysulfone (PSU), polyamideimide (PAI) et Polyimide (PI). Ce dernier peut offrir une température de service de l'ordre de 300 à 400°C et donc, pouvant être très intéressant pour des applications à fortes températures.

Le Tableau 34 détaille les avantages et inconvénients des TP par rapport aux TD de manière générale.

Avantages des TP	Limites des TP
Stockage et conservations illimités	Coût d'investissements machines importants
Soudables, cycles de transformation rapides	Prix matière encore important
Pas d'émanation de solvant lors de la mise en œuvre	Température de transformation importante
Possibilités de de recyclage plus importantes	Moins adapté aux petites séries ou prototypes
Tenue aux chocs et à l'impact améliorée	
Propreté de l'environnement de production	

Tableau 34 : Avantages et inconvénients des thermoplastiques sur les thermodurcissables.

Une des freins des composites thermoplastiques réside dans les conditions de mise en œuvre. Du fait de la haute température de fusion de ces polymères, et de leur forte viscosité, l'imprégnation des renforts n'est pas aisée. En comparaison, pour la majeure partie des composites TD, la mise en œuvre se fait à température ambiante ou modérée, et est donc bien plus facile et accessible en termes d'équipements, comme le montre la Figure 89. Les TP hautes performances impliquent une forte consommation énergétique afin d'atteindre la température de fusion, mais aussi une forte énergie mécanique pour l'imprégnation des fibres.

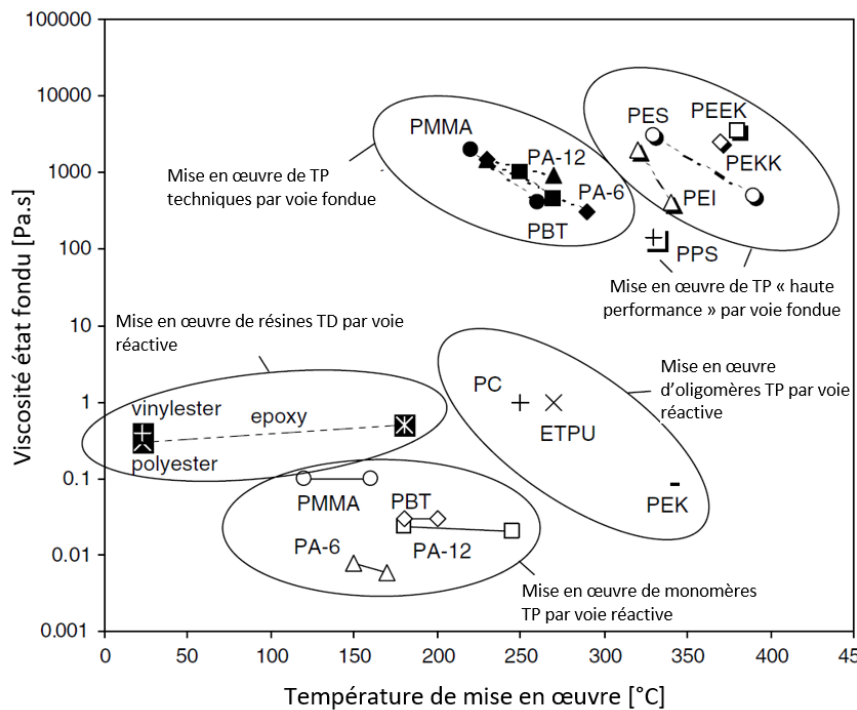


Figure 89 : Viscosité à l'état fondu en fonction de la température de procédé de résines thermoplastiques et thermodurcissables [26].

Seules les résines TP dites réactives offrent une gamme de viscosités et de températures de mise en œuvre similaires à celles des résines TD. A ce jour, seule la résine acrylique Elium® commercialisée par Arkema est réellement accessible en grande quantité.

Cependant, la promesse de la capacité à recycler les matériaux TP permet de diminuer l'impact initial. A défaut d'une comparaison directe entre des composites TD et TP à performances équivalente, les données présentées au §3.4.2.1 et au §3.4.2.4 donnent une tendance :

- Le PET recyclé et le PEHD recyclés affichent en moyenne 70 % à 80 % d'impacts en moins que les matériaux vierges, pour un taux de recyclage de 95 % ;

- Le recyclage du lin/PLLA à hauteur de 50 % permet de réduire les impacts environnementaux de ce composite entre 25 et 30 % par rapport à la sortie d'usine.

3.4.2.6. Résine sans styrène

Le styrène est un monomère utilisé en synthèse organique et principalement pour la fabrication de matières plastiques et caoutchoucs [27] tels que :

- Le polystyrène ;
- Les copolymères acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS), styrène-acrylonitrile (SAN), méthacrylate de méthyle-butadiène-styrène (MBS) ;
- Les caoutchoucs synthétiques styrène-butadiène (SBR) ;
- Les polyesters insaturés et polyesters insaturés renforcés (par exemple aux fibres de verre ou GFRP).

Cette substance est enregistrée en vertu du règlement REACH (REgistration, Evaluation and Authorisation of Chemicals) et est fabriquée et /ou importée dans l'espace économique européen, à l'échelle de plus de 1 000 000 tonnes par an [28]. L'utilisation du styrène est soumise à réglementation puisqu'il s'agit d'une espèce toxique et inflammable. Par ailleurs, depuis 2019, le CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) a classé le styrène dans le groupe 2A des agents probablement cancérogènes pour l'homme [27]. Il n'existe pas à ce jour de preuve de lien de cause à effet entre la toxicité du styrène et le cancer chez l'homme, mais, une exposition aiguë à des vapeurs de styrène peut provoquer des défaillances neurologiques (troubles de l'équilibre, malaises, vertiges, etc.), une irritation des voies respiratoires supérieures, une irritation oculaire, des nausées, etc. [29].

Aujourd'hui encore, les résines polyester insaturées contiennent en moyenne 30 à 50 % de styrène [30]. Ce monomère a pour rôle d'ajuster la viscosité en tant que solvant et de participer à la polymérisation en tant que réactif. Les émissions de styrène ont lieu lors de la polymérisation.

De nombreux industriels souhaitent en réduire les émissions en substituant le styrène dans la formulation des polymères concernés. Les solutions de substitutions (Tableau 35) sont issues de la littérature [31] :

Applications		Solutions de substitution
Agents de réticulation	Résine Polyesters Insaturés (UP)	Propényl éther, divinyl éther, (méthyl)acrylates, etc.
	Résine Vinyl Ester (VE)	
Monomères pour	Polystyrène (PS)	Pas de substitution du monomère possible. Cependant, d'autres polymères aux propriétés similaires synthétisés à partir d'un autre monomère peuvent être utilisés.
	Copolymères (ABS, SAN, SBR, SBL, ASA, etc.)	

Tableau 35 : Application et solutions de substitutions des styrènes [31].

Comme le montre le Tableau 35, des solutions de substitution au styrène comme agent de réticulation dans les résines polyester insaturé et vinylester existent avec du propényl éther ou divinyl éther. Le premier est plus simple à manipuler mais est moins réactif que le second. De plus, le divinyl éther est préférable pour des réticulations sous radiations et utilisations en revêtement.

Des travaux sont également menés pour développer d'autres solutions de substitution. Ainsi, Wu, Yuchao, *et al.* [32] ont présenté des développements récents concernant les dérivés de la lignine, car ils ont une structure similaire à celle du styrène. Après l'introduction des groupes de vinyles, ils sont considérés comme la meilleure alternative au styrène. Néanmoins, il ne s'agit pas encore d'une solution économiquement viable.

Une autre stratégie pour diminuer l'impact du styrène est de l'emprisonner dans le matériau lors de la polymérisation. C'est le principe des résines dites « à faible émission de styrène », qui furent introduites industriellement il y a plus de vingt ans et utilisaient de la paraffine comme agent filmogène. Le film formé par la migration du produit à la surface de la résine diminue l'évaporation du styrène. Cependant des

problèmes de délamination seraient apparus selon certains auteurs. Depuis, diverses autres formulations ont été mises au point, basées sur l'ajout d'additifs variés, notamment des produits filmogènes, dont l'effet est de diminuer l'évaporation du styrène sans pour autant compromettre les performances des produits finaux.

L'utilisation d'initiateurs est également possible. Leur rôle est de favoriser la formation rapide d'une peau étanche au styrène sur la surface après exposition à un rayonnement ultraviolet.

Néanmoins, il est important de noter que toutes ces modifications peuvent entraîner de nouvelles contraintes techniques de production, et que si elles limitent les émissions à la production, elles stockent le styrène dans le produit fabriqué, qui pourra toujours être disséminé en fin de vie et donc ne résout pas la problématique environnementale autour de l'utilisation du styrène.

3.5. Références bibliographiques

- [1] W. Steffen *et al.*, « Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet », *Science*, vol. 347, n° 6223, p. 1259855, 2015, doi: 10.1126/science.1259855.
- [2] Stockholm Resilience Center, « Planetary boundaries », 2022. ». Consulté le: 14 avril 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>.
- [3] ADEME, « Economie Circulaire ». Consulté le: 12 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ademe.fr/expertises/economie-circulaire>.
- [4] Institut de développement de produits (IDP) et Pôle Éco-conception et Management du Cycle de Vie, « La profitabilité de l'écoconception : une analyse économique ». 2014. [En ligne]. Disponible sur: <https://grand-est.ademe.fr/sites/default/files/profitabilite-ecoconception-analyse-economique.pdf>.
- [5] ADEME *et al.*, « Analyse des bénéfices économiques et financiers de l'éco-conception pour les entreprises », 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://librairie.ademe.fr/produire-autrement/1264-analyse-des-benefices-economiques-et-financiers-de-l-eco-conception-pour-les-entreprises.html>.
- [6] S. Coussement, N. Porge, M. Soulard, et E. Autret, « Baromètre écoconception 2020, pratiques et positionnement des entreprises françaises », ADEME, 2020.
- [7] OPEO et Institut National de l'Économie Circulaire, « Pivoter vers l'industrie circulaire : Quels modèles ? Comment accélérer ? », 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://institut-economie-circulaire.fr/publication-etude-pivoter-vers-lindustrie-circulaire-quels-modeles-comment-accelerer/>.
- [8] Construiracier, « Eco-construction : l'acier matériau de l'excellence ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.construiracier.fr/choisir-lacier/construire-durable/>.
- [9] ADEME, « Bilans GES - Données acier ». [En ligne]. Disponible sur: https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?acier.htm.
- [10] E. Risch, P. Roux, C. Boutin, et A. Héduit, « L'analyse de cycles de vie (ACV) des systèmes d'assainissement : un outil complémentaire d'aide à la décision », *Revue Science Eaux & Territoires*, n° 09, p. 82-91, 2012, doi: 10.14758/SET-REVUE.2012.9.13.
- [11] A. Guibert, « L'impact des outils d'éco-conception sur le degré d'innovation des entreprises », présenté à RIODD 2016, Saint-Étienne, France, juill. 2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-0135000>.
- [12] Sphera, Commission Européenne, SGS, « Impact Methods, Data Collection and Data Requirements », 2020.
- [13] Agribalyse, "Méthode de l'Analyse du Cycle de Vie," 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://doc.agribalyse.fr/documentation/methodologie-acv>.
- [14] S. Sala, E. Crenna, M. Secchi, et R. Pant, « Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment », *Publications Office of the European Union*, n° KJ-NA-28984-EN-N, 2017, doi: 10.2760/88930.
- [15] M. Nouri, « Développement d'éléments en biocomposite à base de fibre végétale pour la réhabilitation énergétique des bâtiments. », Theses, École centrale de Nantes, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03178355>.
- [16] ADEME, « L'analyse du cycle de vie ». Consulté le: 02 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/comment-realise-t-acv>.
- [17] Wikipédia, « Life Cycle Assessment ». [En ligne]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/wiki/Life-cycle_assessment#/media/File:Example_Life_Cycle_Assessment_Stages_diagram.png.
- [18] UVED, « Démarche de l'Analyse du Cycle de Vie », Juin 2012. [En ligne]. Disponible sur: http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03_030_1-3.html.

- [19] Altermaker, « Le calcul d'impact en Analyse du Cycle de Vie ». [En ligne]. Disponible sur: <https://altermaker.fr/articles/>.
- [20] ADEME, Quantis, FRD, et EcoTechnilin, « Analyse de cycle de vie comparative de panneaux de porte biosourcé (PP/fibres de lin et chanvre) et pétrosourcé (ABS) », ADEME, 2016.
- [21] P. Roux, J. F. Patingre, F. Giroux, et O. Naud, « Eco-technologies, éco-conception, évaluation intégrée », in *Académie d'Agriculture de France*, PARIS, France, mai 2005, p. 31 p. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00468030>.
- [22] Altermaker, « Perspectives de l'Analyse du Cycle de Vie ». [En ligne]. Disponible sur: <https://altermaker.fr/articles/>.
- [23] P. Oblak, J. Gonzalez-Gutierrez, B. Zupančič, A. Aulova, et I. Emri, « Processability and mechanical properties of extensively recycled high density polyethylene », *Polymer Degradation and Stability*, vol. 114, janv. 2015, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.01.012.
- [24] Commission européenne et Direction générale de la recherche et de l'innovation, *Environmental impact assessments of innovative bio-based product. Task 1 of "Study on Support to R&I Policy in the Area of Bio-based Products and Services"*. Publications Office, 2019. doi: 10.2777/251887.
- [25] A. Le Duigou, P. Davies, et C. Baley, « Replacement of Glass/Unsaturated Polyester Composites by Flax/PLLA Biocomposites: Is It Justified? », *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, vol. Volume 5, n° 4, p. 466-482, 2011.
- [26] Le Duigou, A., Davies, P., et Baley, C., « Analyse du cycle de vie d'un biocomposite », *Matériaux & Techniques*, vol. 98, n° 2, p. 143-150, 2010, doi: 10.1051/mattech/2010021.
- [27] K. van Rijswijk et H. E. N. Bersee, « Reactive processing of textile fiber-reinforced thermoplastic composites – An overview », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, n° 3, p. 666-681, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.05.007>.
- [28] INRS, « Styrène - fiche toxicologique n°2 », Novembre 2019. [En ligne]. Disponible sur: www.inrs.fr/fichetox.
- [29] ECHA, « Substance Infocard », 4 Juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://echa.europa.eu/fr/substance-information/-/substanceinfo/100.002.592>.
- [30] A. Troise, A. Gouzy et N. Houeix, « INERIS - Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, » 2011, INERIS-DRC-11-117259-01616A.
- [31] Nord Composites, « Moins de styrène ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nord-composites.com/2-actualites/6-moins-de-styrene.html>.
- [32] CETIM, « Fiche Substance Styrene VF », 2019.
- [33] Y. Wu, M. Fei, R. Qiu, W. Liu, et J. Qiu, « A Review on Styrene Substitutes in Thermosets and Their Composites », *Polymers*, vol. 11, n° 11, 2019, doi: 10.3390/polym11111815.
- [34] E. Benetto, « Analyse du cycle de vie Réalisation de l'inventaire », *Techniques de l'ingénieur Chimie verte*, vol. base documentaire: TIP142WEB., n° ref. article: g5510. Editions T.I., 2005. doi: 10.51257/a-v1-g5510.
- [35] République Française, « Notre-environnement.gouv.fr ». Consulté le: 11 octobre. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.notre-environnement.gouv.fr/rapport-sur-l-etat-de-l-environnement/themes-ree/defis-environnementaux/limites-planetaires/concept/article/presentation-du-concept-des-limites-planetaires>.
- [36] A. Léonard, S. Belboom, S. Gerbinet, S. Gros Lambert, et A. Merchan, « L'analyse du cycle de vie : un outil multicritères et quantitatif pour l'évaluation des impacts environnementaux », *Bulletin de la Société Royale des Sciences, Liège*, 2019, vol. 88, p. 73-81.
- [37] G. Wypych, « Handbook of Polymers, Second Edition », *ChemTec Publishing*. 2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01462-9>.
- [38] A. Geremew, P. De Winne, T. A. Demissie, et H. De Backer, « Treatment of Natural Fiber for Application in Concrete Pavement », *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, p. 6667965, févr. 2021, doi: 10.1155/2021/6667965.
- [39] C. Baley, « Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites », *Techniques de l'ingénieur Plastiques et composites*, vol. base documentaire: TIP100WEB., n° ref. article: am5130. Editions T.I., 2020. doi: 10.51257/a-v3-am5130.

3.6. Glossaire du chapitre 3

- **Analyse de Cycle de Vie** : Compilation et évaluation des intrants, des extraits et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie

- **Berceau à la porte (« cradle-to-gate »)** : Cycle de vie qui va de la production des matières premières et s'arrête à la sortie d'usine
- **Berceau à la tombe (« cradle-to-grave »)** : Cycle de vie qui va de la production des matières premières jusqu'à la fin de vie
- **Catégorie d'impact** : Classe représentant les points environnementaux étudiés à laquelle les résultats de l'inventaire du cycle de vie peuvent être affectés
- **Champ de l'étude** : Consiste à préciser la (les) fonction(s) et les systèmes de produits à étudier, comprenant les processus liés au produit, service ou procédé considéré, et cela en fonction des objectifs de l'étude.
- **Donnée d'impact /EICV (évaluation des impacts du cycle de vie)** : Résultat de la transformation d'une donnée d'inventaire à l'aide d'une méthode et directement exploitable pour une ACV simplifiée
- **Inventaire du cycle de vie** : Phase de l'analyse du cycle de vie impliquant la compilation et la quantification des intrants et des extrants, pour un système de produits donné au cours de son cycle de vie
- **Méthodes/facteurs de caractérisation** : Facteur établi à partir d'un modèle de caractérisation qui est utilisé pour convertir les résultats de l'inventaire du cycle de vie en unité commune d'indicateur de catégorie
- **Donnée d'inventaire** : Data utilisée pour l'inventaire d'une ACV complète. Elle est non agrégée et provient de la prise en compte de l'impact des tous les constituants nécessaires à la fabrication d'un composant. Elle permet de générer une donnée d'impact en faisant la somme de la contribution de chaque élément.
- **Phase du cycle de vie** : Phase de l'analyse du cycle de vie impliquant la compilation et la quantification des intrants et des extrants pour un produit donné au cours de son cycle de vie
- **Unité fonctionnelle** : performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie
- **Flux de référence** : Mesure des extrants des processus, dans un système de produits donné, nécessaire pour remplir la fonction telle qu'elle est exprimée par l'unité fonctionnelle
- **Processus élémentaire** : Plus petite partie prise en compte dans l'inventaire du cycle de vie pour laquelle les données d'entrée et de sortie sont quantifiées.

4. Opportunités de valorisation des déchets de composites

Ce chapitre est dédié à l'élaboration d'un état de l'art exhaustif des possibilités de revalorisation actuelles. Tout d'abord, quelques éléments réglementaires sont rappelés (statut et classification des déchets, traitements des déchets, etc.). Ensuite, les différentes technologies disponibles actuellement pour traiter les chutes de production (résines seules, renforts seuls, et composites) et les objets en fin de vie sont listés. Enfin, les aspects économiques, fondamentaux quant à l'évaluation de la viabilité des solutions sont abordés.

4.1. Le contexte réglementaire

Les dispositions relatives à la classification des déchets se trouvent aux articles R. 541-7 à R. 541-11 et aux annexes à l'article R. 541-8 du Code de l'environnement.

Le contexte réglementaire est défini au paragraphe 4.1.1. En préambule, le premier paragraphe est consacré à définir les termes sur lesquels le législateur s'appuie pour préciser le périmètre des textes réglementaires. Les paragraphes suivants 4.1.2 et 4.1.3 sont respectivement consacrés aux filières REP (Responsabilité Elargie du Producteur), qui vont contribuer à cadrer la fin de vie des déchets composites, et la sortie du statut de déchet.

4.1.1. Définitions

Ce paragraphe est consacré à définir les termes sur lesquels le législateur s'appuie pour préciser le périmètre des textes réglementaires. Certains termes n'ont pas été définis par le législateur. Dans ce cas, il est proposé des définitions normatives.

4.1.1.1. Qu'est ce qu'un plastique ?

Le terme « *Plastique* » est défini à l'article D541-330 du code de l'environnement, comme « un matériau constitué d'un polymère tel que défini à l'article 3, point 5, du règlement (CE) n° 1907/2006 (règlement REACH - Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals), auquel des additifs ou autres substances peuvent avoir été ajoutés, et qui peut jouer le rôle de composant structural principal de produits finaux, à l'exception des polymères naturels qui n'ont pas été chimiquement modifiés et des peintures, encres et adhésifs. »

Le terme « *Polymère* » est défini à l'article 3, point 5, du règlement (CE) n° 1907/2006 (règlement REACH), comme « une substance constituée de molécules se caractérisant par la séquence d'un ou de plusieurs types d'unités monomères. Ces molécules doivent être réparties sur un éventail de poids moléculaires, les écarts de poids moléculaire étant dus essentiellement aux différences de nombres d'unités monomères. Un polymère comprend :

- Une simple majorité pondérale de molécules contenant au moins trois unités monomères liées par covalence à au moins une autre unité monomère ou à une autre substance réactive ;
- Une quantité inférieure à une simple majorité pondérale de molécules présentant le même poids moléculaire.

Au sens de la présente définition, on entend par « unité monomère », la forme réagie d'une substance monomère dans un polymère.

A ce jour, le législateur n'a pas défini le terme de « *matériau composite* ». A défaut de définition réglementaire, il est proposé d'utiliser la définition présente dans la norme NF EN ISO 472, définition n° 2.182.1, « produit solide comportant au moins deux phases distinctes comprenant un matériau de liaison (matrice), et un matériau sous forme particulière ou fibreuse ».

4.1.1.2. Qu'est-ce qu'un déchet ?

Le code de l'environnement précise un certain nombre de définitions, dont les principales sont reprises ici :

- **Déchet** : toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire (article L. 541-1-1) ;
- **Détenteur de déchets** : producteur des déchets ou toute autre personne qui se trouve en possession des déchets ;
- **Déchets dangereux** : les « déchets dangereux » contiennent, en quantité variable, des éléments toxiques ou dangereux qui présentent des risques pour la santé humaine et l'environnement. Ces déchets sont définis à l'article R541-8 du code de l'environnement ;
- **Déchet non dangereux** : tout déchet qui ne présente aucune des propriétés qui rendent un déchet dangereux (article R. 541-8) ;
- **Déchet inerte** : tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine (article R. 541-8) ;
- **Déchet d'activités économiques** : tout déchet, dangereux ou non dangereux, dont le producteur initial n'est pas un ménage (article R. 541-8).

4.1.1.1. Qu'est-ce qu'une Matière Plastique Recyclée (MPR) ?

La norme NF EN ISO 14021 de 2016, intitulée « Marquage et déclarations environnementaux – Auto déclarations environnementales (Étiquetage de type II) » précise les définitions suivantes :

- **Contenu recyclé** : proportion, en masse, de matériau recyclé dans un produit ou un emballage. Seuls les matériaux « préconsommateurs » et « postconsommateurs » doivent être considérés comme un contenu recyclé, conformément à l'usage suivant des termes ;
- **Matériau « préconsommateur »** : matériau détourné du flux de déchets pendant un procédé de fabrication. Est exclue la réutilisation de matériaux tels que ceux issus du retraitement, du rebroyage ou les résidus générés pendant un procédé donné et pouvant être récupérés [pour valorisation] au sein de ce même procédé qui les a générés ;
- **Matériau « postconsommateur »** : matériau généré par les ménages ou par les installations commerciales, industrielles ou institutionnelles dans leur rôle d'utilisateur final du produit qui ne peut plus servir à l'usage pour lequel il a été conçu. Ceci comprend les retours de matériau de la chaîne de distribution ;
- **Matériau recyclé** : matériau régénéré à partir d'un matériau récupéré [pour valorisation] au moyen d'un procédé de fabrication, et transformé en produit final ou en composant destiné à être intégré à un produit ;
- **Matériau récupéré** [pour valorisation] : matériau qui aurait autrement été éliminé comme déchet ou utilisé pour la valorisation énergétique, mais qui, au lieu de cela, a été collecté et récupéré [pour valorisation] comme matériau entrant, à la place d'une nouvelle matière première, dans un procédé de recyclage ou de fabrication.

4.1.2. Contexte juridique

4.1.2.1. Contexte général et politique nationale de prévention et de gestion des déchets

La politique nationale de prévention et de gestion des déchets est un levier essentiel de la transition vers une économie circulaire, défini par l'article L541-1 du code de l'environnement. Quelques objectifs de cette politique sont présentés ci-après et préfigurent les évolutions réglementaires à venir sur le marché des composites :

- La mise en décharge des déchets non dangereux valorisables est progressivement interdite. A ce titre, notons que la loi Anti-Gaspillage pour une Economie Circulaire (AGEC) impose une réduction des quantités de déchets ménagers et assimilés admis en installation de stockage en 2035 à 10 % ;
- Réduire de 50 % les quantités de produits manufacturés non recyclables mis sur le marché avant 2020 ;
- Assurer la valorisation énergétique d'au moins 70 % des déchets ne pouvant faire l'objet d'une valorisation matière d'ici 2025 ;
- La commande publique durable est mise au service de la transition vers l'économie circulaire.

4.1.2.1.1. Principe de hiérarchie de gestion des déchets

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 établit également les concepts et définitions de base relatifs à la gestion des déchets et développe un principe appelé « Responsabilité Élargie au Producteur » (ou REP), présenté en détail au paragraphe 4.1.3.

Cette directive demande aux états membres de l'UE d'appliquer une hiérarchie de gestion des déchets, suivant les modes de gestion qui place en tout premier lieu la prévention notamment par le réemploi, puis la réutilisation, le recyclage, la valorisation et enfin l'élimination. Elle définit les conditions de gestion des déchets, dont leur recyclage. Elle définit le recyclage comme étant « toute opération de valorisation par laquelle les déchets de matériaux sont retraités en produits, matériaux ou substances soit dans le processus de production d'origine, soit à d'autres fins. Cela inclut le retraitement de la matière organique mais exclut la valorisation énergétique et la transformation en matériaux utilisés comme carburants ».

Cette hiérarchie a été transposée en droit français par l'Ordonnance n° 2010-1579 du 17 décembre 2010 et le Décret n°2011-828 du 11 juillet 2011, et codifié au chapitre R.541 du code de l'environnement.

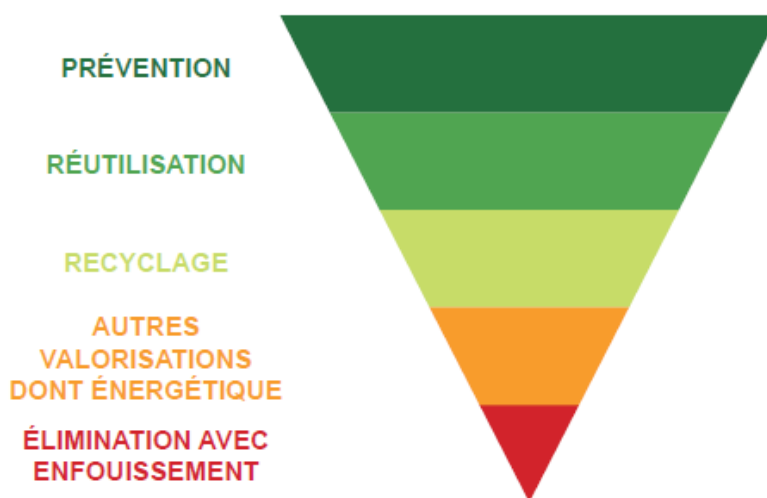


Figure 90 : Hiérarchisation réglementaire de la gestion des déchets [1].

4.1.2.1.2. Loi AGEC et composites

La législation s'est renforcée en 2020 par la loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire loi dite AGEC. Bien que cette loi soit majoritairement centrée sur le plastique à usage unique, l'industrie du composite se retrouve impactée à plusieurs égards :

- Cette réglementation, ainsi que ses décrets d'application, définissent la mise en place de nouvelles REP (présentées au paragraphe 4.1.3) ;
- Par ailleurs, l'article 58 de de la loi AGEC précise « qu'à compter du 1er janvier 2021, les biens acquis annuellement par les services de l'Etat et les collectivités territoriales sont issus du réemploi ou de la réutilisation ou intègrent des matières recyclées dans des proportions de 20 % à 100 % selon le type de produit. Les taux pouvant être issus du réemploi, de la réutilisation ou du recyclage correspondant à ces produits sont définis dans le décret n° 2021-254 du 9 mars 2021 relatif à l'obligation d'acquisition par la commande publique de biens issus du réemploi ou de la réutilisation ou intégrant des matières recyclées. Quelques exemples sont repris dans le Tableau 36.

Produits ou catégories de produits	% issu du réemploi ou de la réutilisation ou intégrant des matières recyclées	dont % issu du réemploi ou de la réutilisation
Équipement de transport et produits auxiliaires pour le transport / Véhicules à moteur / Carrosseries de véhicules	20	0

Jeux, jouets	20	5
Mobilier urbain	20	5
Bâtiments préfabriqués / Bâtiments modulaires préfabriqués	20	20

Tableau 36 : Extrait de la liste des produits pour lesquels sont fixées des proportions minimales de montant annuel d'achat de biens issus du réemploi ou de la réutilisation ou intégrant des matières recyclées.

4.1.2.2. Eléments de réglementation par marché

Ce paragraphe est destiné à recenser les principales réglementations en vigueur et à venir pour les principaux marchés utilisateurs de matériaux composites.

4.1.2.2.1. Nautisme

La Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) du 20 juin 2016 a créé une filière REP pour les déchets de bateaux de plaisance ou de sport (DBPS) par l'article L541-10-10 du code de l'environnement. Les metteurs sur le marché doivent assurer le traitement des déchets issus des bateaux de plaisance ou de sport qu'ils ont mis sur le marché national [2]. La filière des déchets issus des bateaux de plaisance et sport est opérationnelle depuis le 1er janvier 2019. Elle est gérée par l'éco-organisme APER (Association pour la Plaisance Eco-Responsable), créé par la Fédération des industries nautiques (FIN). Il s'agit de la première filière REP au monde pour les bateaux de plaisance.

L'article R543-297 de code de l'environnement précise le terme de bateau de plaisance ou de sport. Il s'agit de [2] :

- Bateaux de plaisance (voiliers à moteur, bateaux pneumatiques, etc.) dont la coque a une longueur allant de 2,5 mètres à 24 mètres ;
- Véhicules nautiques à moteur dont la longueur de la coque est inférieure à 4 mètres et qui sont équipés d'un moteur à propulsion.

4.1.2.2.2. Automobile

La directive européenne sur les Véhicules Hors d'Usage (VHU) / End-of-Life-Vehicles (ELV) (2000/53/CE) précise les règles de démantèlement, réutilisation, recyclage et valorisation des composants de véhicules en fin de vie. Depuis 2006, 80% de la masse des nouveaux véhicules doit être réutilisée ou recyclée, 5% valorisée énergétiquement, et la mise en décharge n'est autorisée que pour 15% de la masse totale. Depuis 2015, les pourcentages passent respectivement à 85% (réutilisation ou recyclage), 10% (valorisation énergétique) et 5% (mise en décharge).

Trois types de véhicules sont concernés par la réglementation VHU : les véhicules particuliers, les camionnettes avec un poids total autorisé en charge de moins de 3,5 tonnes et les véhicules à moteur à trois roues. La plupart des véhicules traités par les centres VHU sont des véhicules particuliers. Cette définition exclut donc les poids lourds, les motos, les cycles et les voiturettes mais comprend les camping-cars.

La loi AGECE prévoit également la mise en place d'une REP sur les voitures, camionnettes, véhicules à moteur à 2 ou 3 roues et les quadricycles à moteur à compter du 1er janvier 2022.

Au niveau européen, la Commission européenne a engagé une procédure de révision de la directive 2000/53/CE qui devrait déboucher sur une proposition en 2022. Cette révision, toujours en cours de discussion, pourrait porter sur l'augmentation de l'emploi de matières plastiques recyclées et l'écoconception des nouveaux véhicules.

4.1.2.2.3. Eolien

L'arrêté du 22 juin 2020, portant sur la modification des prescriptions relatives aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de

l'environnement (ICPE), fixe des obligations de recyclage [3]. En effet, à partir du 1er juillet 2022, pour toutes les éoliennes faisant l'objet d'un démantèlement :

- Au minimum 90 % de la masse totale des éoliennes devront être recyclés ou réutilisés, fondations incluses ;
- Ainsi qu'au minimum 35% de la masse des rotors.

L'arrêté du 22 juin 2020 prévoit également une augmentation du taux de recyclabilité des éoliennes. Les dossiers d'autorisation complets déposés après les dates suivantes doivent avoir au minimum :

- Après le 01.01.2024, 95 % de leur masse totale, tout ou partie des fondations incluses, réutilisable ou recyclable ;
- Après le 01.01.2023, 45 % de la masse de leur rotor réutilisable ou recyclable, pales incluses ;
- Après le 01.01.2025, 55 % de la masse de leur rotor réutilisable ou recyclable, pales incluses.

4.1.2.2.4. Bâtiment

La nouvelle réglementation RE 2020, en remplacement de la RT 2012, est entrée en vigueur à compter du 1er janvier 2022 [4]. La RE 2020 répond à la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte et à la loi Évolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique (ELAN 2018) à travers :

- La poursuite des objectifs d'amélioration de la performance énergétique des bâtiments neufs ;
- La réduction l'impact des nouveaux bâtiments sur le climat. Une évaluation environnementale est requise et intègre les impacts sur le changement climatique du bâtiment et des aménagements de la parcelle. Cette évaluation se base sur le principe de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), dont les indicateurs sont calculés sur l'ensemble du cycle de vie du produit (Figure 91). Le principe des ACV est présenté dans le Chapitre 3.

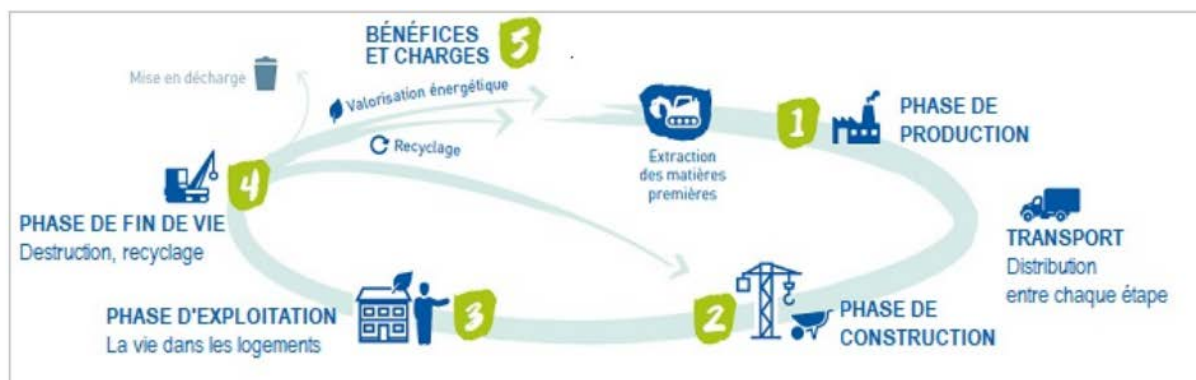


Figure 91 : Les étapes de l'ACV suivant la réglementation RE 2020 [4].

Pour qu'un produit de construction ou un équipement puisse être pris en compte dans le calcul RE 2020, il doit faire l'objet d'une déclaration environnementale, fournies par les fabricants [4], sous la forme de FDES ou de PEP :

- Les FDES (Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire) : individuelles ou collectives. Elles présentent les résultats de l'analyse de cycle de vie d'un produit ainsi que des informations sanitaires dans la perspective du calcul de la performance environnementale et sanitaire du bâtiment pour son écoconception ;
- Les PEP (Profils Environnementaux Produit) : individuels ou collectifs pour les équipements couverts par la RT 2012. Ils renseignent sur les contributions aux impacts sur l'environnement du produit.

De plus, la filière du bâtiment va prochainement être dotée d'une REP, prévue dans le cadre de la loi, afin de développer la collecte et la valorisation des déchets générés lors des opérations de déconstruction et de rénovation des bâtiments.

La mise en place de la REP bâtiment est initialement prévue pour démarrer en 2022, devrait être décalée au plus tard le 1^{er} janvier 2023.

4.1.2.2.5. Secteur industriel

Plusieurs réglementations sont actuellement en application ou en préparation pour réduire l'impact de l'industrie sur l'environnement :

- *Bilan carbone* : l'article L.229-25 (article 75 – section 4) précise que toutes les personnes morales de droit privé de plus de 500 salariés en France métropolitaine et de 250 salariés dans les régions et départements d'outre-mer, ainsi que les personnes morales de droit public de plus de 250 salariés et les collectivités de plus de 50 000 habitants sont assujetties à l'obligation de réalisation d'un bilan d'émissions de gaz à effet de serre ;
- *Réglementation audit énergétique* : Le principe ayant été fixé au niveau européen, la mesure a été transposée en droit français par une loi portant sur Diverses Dispositions d'Adaptation au Droit de l'Union Européenne (dite DDADUE) du 16 juillet 2013, portant sur diverses dispositions d'adaptation au droit de l'Union Européenne dans le domaine du développement durable. Sont obligées de réaliser un audit énergétique les entreprises répondant à l'une des conditions suivantes pour les deux derniers exercices comptables :
 - Avoir un effectif supérieur à 250 salariés ;
 - Ou déclarer un chiffre d'affaires supérieur à 50 millions d'euros et un bilan supérieur à 43 millions d'euros.
- *Décret 7 flux* : Décret n° 2021-950 du 16 juillet 2021 relatif au tri des déchets de papier, de métal, de plastique, de verre, de textiles, de bois, de fraction minérale et de plâtre. Depuis le 17 juillet 2021, il y a obligation de tri à la source et de collecte séparée des déchets de papier, de métal, de plastique, de verre, de bois, aux déchets de fraction minérale et aux déchets de plâtre (« 7 flux »). Dès le 1er janvier 2025 : cette obligation de tri des déchets concernera également les déchets textiles ;
- *Réglementation styrène et plan de prévention des solvants* : Pour rappel, différentes réglementations sont actuellement en vigueur concernant les solvants, susceptibles de générer des Composés Organiques Volatils (COV). A titre d'exemple, les réglementations styrène et plan de prévention des solvants peuvent s'inscrire dans ce cadre. La réglementation styrène est précisée par différents articles du code du travail, en particulier :
 - Les dispositions générales sur l'aération/assainissement des locaux de travail : article R. 4221-1 et suivants ;
 - La prévention du risque chimique : article R. 4412-1 et suivants ;
 - La conception des lieux de travail en matière de prévention des explosions : articles R. 4216-31 et R. 4227-42 à R. 4227-54.

Outre l'aspect réglementaire il existe également des démarches volontaires pour la réduction de l'impact environnemental de l'industrie. A titre d'exemple, il peut être fait mention des normes suivantes :

- La norme ISO 14001 – management environnemental : cette norme propose un cadre que les entreprises peuvent appliquer pour mettre en place un système de management environnemental ;
- La norme ISO 50001 – management de l'énergie : cette norme propose des modalités pratiques visant à réduire la consommation d'énergie par la mise en œuvre d'un système de management de l'énergie.

4.1.3. Les Responsabilités Elargies des Producteurs et leur impact sur le marché des composites

Le recyclage des composites est encadré par les filières Responsabilités Elargies des Producteurs (ou REP). Ces filières permettent d'organiser la prévention et la gestion des déchets pour certains types de produits. Le dispositif implique que les acteurs économiques (fabricants, distributeurs, importateurs) sont responsables de l'ensemble du cycle de vie des produits qu'ils mettent sur le marché, de leur écoconception jusqu'à leur fin de vie.

En France, le principe de la REP existe dans la loi depuis 1975 (article L. 541-10 du code de l'environnement). Il est notamment précisé qu'« *il peut être fait obligation aux producteurs, importateurs et distributeurs de ces produits ou des éléments et matériaux entrant dans leur fabrication de pourvoir ou de contribuer à l'élimination des déchets qui en proviennent.* »

Dans le cadre de la REP, les fabricants, distributeurs pour les produits de leurs propres marques et importateurs, qui mettent sur le marché des produits générant des déchets, doivent prendre en charge la gestion de ces déchets, notamment financièrement. La REP peut être assurée par les metteurs sur le marché de manière individuelle, ou collective au travers d'un éco-organisme (tels que l'APER, CITEO, etc.).

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.

La Figure 92 montre les filières REP existantes et en projet (figure adaptée de [5]). Les filières potentiellement utilisatrices de matériaux composites ont été encadrées en rouge.

On note que les déchets composites issues du nautisme et de l'automobile sont respectivement gérés par les filières « Déchets de Bateaux de Plaisance ou de Sport » (ou DBPS) et « Véhicule Hors d'Usage » (ou VHU) respectivement. On note également l'arrivée en 2022 des filières « Articles de Sports et Loisirs » (ou ASL), « bâtiment » et « Articles de Bricolage et de Jardin » (ou ABJ) également utilisatrices de matériaux composites.

A noter également qu'Eco-Mobilhome a été contacté dans le cadre de cette étude. Cet éco-organisme est en charge de la fin de vie des mobil-homes. Les caravanes et camping-cars ne sont pas gérés par cet éco-organisme. Eco-Mobilhome indique, qu'à ce jour, les matériaux composites n'apparaissent pas de manière visible sur les mobil-homes.

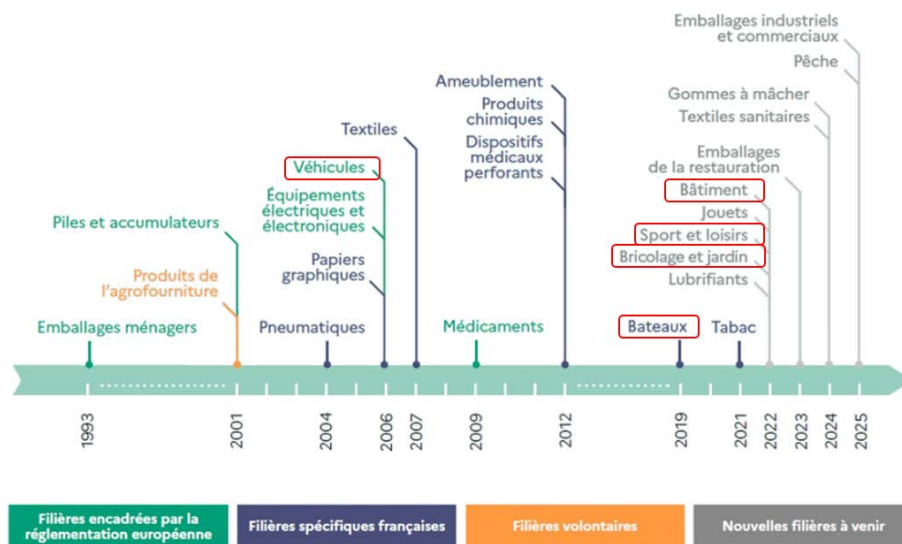


Figure 92 : Filière REP et date de mise en œuvre opérationnelle, adaptée de [5].

Il est également à noter qu'une écocontribution est prévue dans le cadre des REP (article L 541-10-3 du code de l'environnement). Il s'agit de la mise en place d'un bonus-malus sur des critères de performance environnementale. Cette écocontribution est plafonnée à hauteur de 20 % du prix HT du produit.

4.1.4. Recyclage et statut de déchet

Le « statut de déchet » est un statut juridique. Pour qu'un déchet plastique ou composite puisse être réincorporé dans la production d'une nouvelle pièce, la « sortie du statut de déchet » doit être opérée. L'article L. 541-4-3 au code de l'environnement introduit la possibilité pour un déchet de sortir du statut de déchet et de redevenir un produit sous réserve des critères définis par les autorités.

4.1.4.1. La sortie du statut de déchet

Le déchet dispose d'un statut juridique spécifique – le statut de déchet – qui a pour objectif d'éviter les risques pour l'environnement et la santé publique qui pourraient être liés au fait que le déchet a été abandonné. La qualification de déchet entraîne l'obligation de respecter un certain nombre de précautions nécessaires pour assurer la bonne gestion, des déchets, c'est-à-dire leur collecte, transport, valorisation et élimination dans le respect de l'environnement et de la santé humaine.

Afin d'encourager la valorisation des déchets, la directive cadre sur les déchets 2008/98/CE ouvre la possibilité, dans certains cas précis, d'une « sortie du statut de déchet ». Elle pose les bases d'un processus réglementaire qui peut permettre à un déchet de quitter le statut de déchet. Il est nécessaire que le déchet remplisse 4 conditions :

- La substance ou l'objet est utilisé à des fins spécifiques ;
- Il existe un marché ou une demande pour une telle substance ou un tel objet ;
- La substance ou l'objet remplit les exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et les normes applicables aux produits ;
- L'utilisation de la substance ou de l'objet n'aura pas d'effets globaux nocifs pour l'environnement ou la santé humaine.

D'un point de vue réglementaire, le passage par le statut du « statut de déchet » et par « une sortie du statut de déchet » sont des étapes nécessaires pour pouvoir qualifier de « recyclage » toute opération de valorisation.

Par ailleurs, pour une sortie du statut de déchet, le producteur de matière régénérée doit se conformer au règlement européen REACH, en vigueur depuis 2007. Il s'agit de recenser, d'évaluer et de contrôler les substances chimiques fabriquées, importées, mises sur le marché européen. Lorsque la matière régénérée est issue de déchets post-consommateur, pour lesquels l'historique n'est pas connu a priori, le recensement de substances contenues peut s'avérer être délicat.

4.1.4.2. Déchet vs co-produit ?

A noter, l'Article L. 541-1-1 du code de l'environnement définit le recyclage par « toute opération de valorisation par laquelle les déchets [...] sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins ». Pour qu'une matière puisse être considérée comme recyclée, il est nécessaire *i.* qu'elle ait pris le statut de déchet ; *ii.* qu'elle soit sortie du statut de déchet par la procédure présentée au paragraphe précédent.

Certaines matières peuvent dans certains cas être considérés comme des coproduits (et non des déchets). A titre d'exemple, il peut s'agir de renforts ou de préimprégnés TD non-réticulés potentiellement réutilisables dans la production de nouvelles pièces composites. L'utilisation de coproduits dans un procédé composite ne nécessite pas de « sortir du statut de déchet ». En revanche, l'utilisation de coproduits n'est pas considéré comme un recyclage.

4.2. Les solutions techniques

4.2.1. Collecte et tri des composites

Selon l'article L.541-1-1 du code de l'environnement, la collecte se définit comme « toute opération de ramassage des déchets en vue de leur transport vers une installation de traitement des déchets ».

Les flux de déchets industriels proviennent de déchets de production et maintenance. Toutes matières confondus, plus de 90 % des déchets industriels sont orientés vers des filières de valorisation (67 % vers le recyclage). Cette performance s'explique par le fait que les déchets des entreprises sont généralement produits de façon moins diffuse, générant des gisements importants de matières homogènes (massification), et dont la collecte et la récupération peuvent être optimisées et rentables.

Pour autant, la situation est très différente en fonction des secteurs, des types de déchets ou de la taille des entreprises. La marge de progrès reste dans certains cas très conséquente.

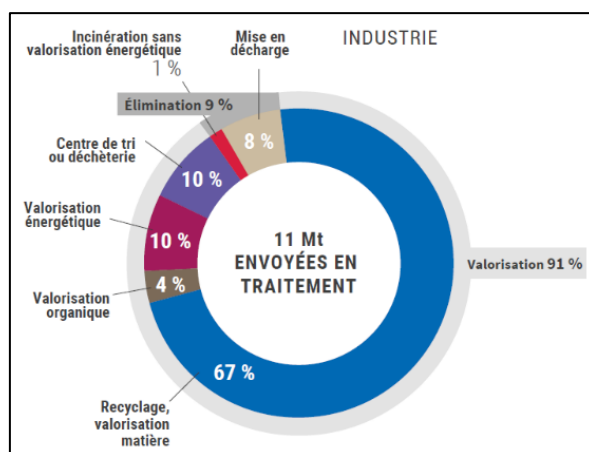


Figure : Destination des déchets non dangereux des industries, chiffres de 2018 [6].

La collecte des déchets est actuellement réalisée selon 3 types d'organisation :

- Le service public : organise la collecte des déchets ménagers et assimilés ;
- Les entreprises productrices de déchets : responsables de leur traitement et de leur acheminement vers les sites de traitement ;
- Les filières REP : éco-organismes créés pour organiser la collecte des déchets pour le compte des producteurs.

Ces éléments législatifs, associés à des flux de déchets s'annonçant très importants dans les prochaines décennies, sont des éléments capitaux dans l'élaboration de filières de collecte des déchets, notamment composites.

4.2.1.1. Etat des lieux et perspectives d'évolution des filières de collecte

Matériau hétérogène dans sa composition et ses configurations, les composites ne disposent à ce jour pas d'une filière massive de collecte et de traitement. Deux filières se structurent actuellement dans ce sens, poussées par l'émergence de gisements de déchets composites conséquents : le nautisme et l'éolien. D'autres, comme l'automobile et l'aéronautique, pourraient se développer également, en s'appuyant sur leurs structures déjà en place pour les autres matériaux.

4.2.1.2. Retour d'expérience sur la filière nautique

Depuis janvier 2019, la législation impose à toute entreprise mettant sur le marché français des navires de plaisance ou de sport, de contribuer ou de pourvoir au traitement des déchets issus de ces produits.

L'APER est l'éco-organisme national dont la mission est d'organiser, gérer et financer la déconstruction des bateaux de plaisance en fin de vie sur l'ensemble des territoires français (métropole et outremer). Cet organisme travaille avec un réseau de professionnels intervenant dans la déconstruction et le recyclage des Déchets de Bateaux de Plaisance et de Sport (DBPS). Le principe de fonctionnement mis en place par l'APER consiste en la gratuité de la déconstruction des Bateaux de Plaisance Hors d'Usage (BPHU) pour leurs propriétaires (dépollution, déconstruction, recyclage). En revanche, le transport de ces bateaux vers le centre de déconstruction n'entre pas à ce jour dans le champ de compétence et d'action de l'éco-organisme.



Figure 93 : Schématisation du périmètre d'action de l'APER [7].

Le coût moyen de la prise en charge et de la déconstruction complète d'un bateau de plaisance est de 1200 € environ (variant de 400 € à plus de 3000 € en fonction de la taille du bateau), et se décompose ainsi : 30 % pour le transport, 50 % pour la dépollution/déconstruction, et 20 % pour le traitement et élimination des déchets [8].

Le démantèlement d'un bateau par un déconstructeur agréé débute par l'inspection du navire (état, accessibilité) pour établir un devis de transport et organiser la prestation. Lorsque les bateaux à déconstruire sont coulés, un renflouage est nécessaire (opération sous-traitée et onéreuse, qui peut dépasser le coût de l'ensemble des autres opérations).

Les bateaux sont en majorité acheminés intacts sur le site de déconstruction, et nécessitent des moyens adaptés pour le levage et le transport. Pour le grutage, plusieurs méthodes existent : utilisation des grues des ports, d'un camion grue ou d'une grue extérieure lorsque le site ne dispose pas de moyen de levage et que le bateau à déconstruire est trop important pour un camion grue.

L'acheminement des petits bateaux (le cœur du marché), s'effectue selon 3 modalités :

- Transport avec une remorque et un véhicule léger des bateaux unitairement ;
- Transport d'un lot de bateaux dans un camion benne, avec réduction du volume par tassement des bateaux ;
- Transport en sous-traitance, avec poids lourds (plus onéreux).

Pour les plus gros bateaux, nécessitant un transport par poids lourds (voire un convoi exceptionnel), tous les déconstructeurs sous-traitent la prestation à des transporteurs du nautisme.



Figure 94 : Exemples des différents engins de transport utilisés pour la collecte des BPHU [9].

Une réglementation spécifique encadre depuis 2018 les opérations de stockage et de déconstruction des bateaux de plaisance. Il s'agit de la réglementation ICPE 2712-3. Aucune entreprise n'est autorisée à

déconstruire des bateaux de plaisance en France sans être en conformité avec cette réglementation, qui fonctionne sous le régime de l'enregistrement.

Le réseau de centres de déconstruction est situé naturellement près des bassins de navigation, de manière à limiter le transport (Figure 95).



Figure 95 : Carte des centres de déconstruction des BPHU en France [7].

4.2.1.3. Filière éolienne

Il n'existe aujourd'hui pas de filière structurée pour la valorisation matière des pales éoliennes, du fait d'un gisement encore confidentiel (Chapitre 2), et de pièces aux dimensions importantes, que des voies logistiques habituelles ne peuvent traiter. Cependant, la logistique de ce gisement de déchets est un des enjeux de la filière actuellement.

En France, l'arrêté du 22 juin 2020 du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire précise que l'exploitant d'un site éolien est responsable de la remise en état du site. Les promoteurs doivent donc, au moment de la construction d'un parc, provisionner une somme de 50 k€ par éolienne pour son futur démantèlement.

La mission d'établir une filière dédiée à la fin de vie des parcs éoliens et à leur démantèlement a été attribuée à l'AD3R (Association pour le Démantèlement, Recyclage, Reconditionnement et Revente d'éolienne) : cette association est unique en Europe, et située dans le Grand-Est de la France. L'AD3R réunit 7 sociétés dont le chef de file est la société française Netwind, qui est le leader des sociétés de services indépendantes du monde de l'éolien. L'objectif de cette structure est d'élaborer une offre clé en mains de démantèlement des éoliennes, incluant le traitement aval des matériaux et composants d'éoliennes, pour être un véritable support pour l'ensemble des entreprises françaises.

En parallèle de ces actions, une solution de collecte et de traitement des déchets éolien a vu le jour récemment, proposée par la start-up espagnole Reciclalia, en partenariat avec le groupe français Veolia-Suez. Cette innovation unique s'appuie sur deux technologies performantes : le procédé Constrictor, qui permet de découper et broyer la structure de la pale, suivie de la technologie CRS (Composite Recycled System), qui permet de revaloriser, une fois séparées, la résine et la fibre de verre.

Le procédé Constrictor permet une découpe et une compression des pales sur le site même du démantèlement éolien, puis un transport vers le site de recyclage. Les coûts du transport et de stockage des pales à recycler en sont donc fortement diminués. Ce procédé a permis à la start-up espagnole d'être finaliste du « prix start-up EDF Pulse » en 2020.



Figure 96 : Procédé Constrictor (Reciclalia) [10].

Le coût de la collecte et du traitement sur site par ces méthodes reste inconnu à ce jour. Toutefois, à court ou moyen terme, ces innovations logistiques semblent les plus appropriées : au vu des flux de déchets de pales attendus dans les années et décennies à venir, ces procédés devront bien évidemment être étoffés et mis en œuvre à grand échelle, sur tout le territoire français.

4.2.1.4. Filière automobile et filière aéronautique

Les domaines de l'automobile et de l'aéronautique ne présentent que très peu de données spécifiques aux composites. Ceci sera très probablement amené à évoluer rapidement dans les années à venir, avec l'arrivée de véhicules et avions de dernières générations, comportant une proportion de matériaux composites beaucoup plus importante. A l'heure actuelle, il n'existe pas de filière de collecte et de recyclage spécifique aux composites dans ces domaines : ces déchets devraient à l'avenir être traités par les filières existantes.

En faisant abstraction de la partie composite, le secteur automobile possède toutefois une structure de collecte et de recyclage des véhicules en fin de vie (VHU), mise en place et gérée par l'Industrie Nationale de Déconstruction et de Recyclage Automobile (INDRA). Cet organisme national a mis en place un réseau de récupération des VHU auprès de concessionnaires automobiles, fourrières, garages, suivi d'opérations de démantèlement et de recyclages de tous ses constituants (métaux, plastique, fluides, batteries, pneumatiques etc.). Actuellement, 95 % de la masse d'un VHU est recyclée par valorisation énergétique, valorisation matière, ou réutilisation en tant que pièces d'occasion.

Les déchets de la filière aéronautique présentent actuellement des proportions de matériaux composites encore faibles sur les avions en fin de vie. Toutefois, l'acteur français Tarmac Aerosave (créé par les grands groupes Airbus, Suez et Safran) se place aujourd'hui comme le leader européen du stockage et de la maintenance d'avions civils, ainsi que du recyclage et de la valorisation des avions en fin de vie. Tarmac Aerosave parvient ainsi à recycler plus de 85 % de la masse des avions, avec un objectif fixé à plus de 90 % dans les prochaines années.

4.2.2. Les solutions techniques

On désigne par « solution technique », une technologie disponible sur le marché pour le recyclage des matériaux composites. Cette désignation s'oppose aux « Innovations » présentées dans le paragraphe suivant, pour lesquels il a été identifié des développements à une échelle laboratoire ou pré-industrielle.

Les solutions techniques sont présentées en respectant la hiérarchie de gestion des déchets, présentée sur la Figure 90.

4.2.2.1. Réemploi

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. A ce titre, 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. ».

Il s'agit là de la première et la plus simple des solutions pour la gestion de fin de vie des matériaux composites. En effet, si le réemploi est adapté à tous les types de matières et matériaux, cette voie est particulièrement intéressante pour la valorisation des matériaux composites consolidés. Plus particulièrement, le réemploi présente un vif intérêt pour les composites à matrice therm durcissable

renforcés de fibres de verre dont le recyclage par les voies classiques (décrites ci-après) présente de nombreuses limites liées notamment à des aspects technico-économiques. En effet, la notion de réemploi peut revêtir différentes formes telles que l'achat/revente vers un marché de l'occasion, la réparation et/ou la remise en service de pièces composites.

A 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 éoliennes peut être prolongée avec une remise en service dans un marché de seconde main [11]. La procédure comprend notamment une évaluation analytique (comparaison des charges de fonctionnement avec les charges de conception), la vérification de la stabilité structurelle (partie porteuse et pièces de sécurité, calcul de la durée potentielle de fonctionnement en continu) et une inspection sur site pour documenter les éventuels dommages ou usures inhabituelles [12]. Une remise à neuf peut également permettre d'augmenter la taille des pales, améliorer les paramètres structurels et supprimer les défauts [13], [14]. Ainsi, environ 20 % des pales présentes aux Pays Bas sont remises à neuf et revendues à des acheteurs à l'intérieur et à l'extérieur de l'UE par des revendeurs tels que Green-Ener-Tech ou WindTurbines-MarketPlace [15].



Figure 97 : Exemples de réemploi de semi-produits composites par l'entreprise Lavoisier Composites (à gauche) et la société Hopper (à droite) (crédit : Lavoisier Composites et Hopper).

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 le secteur des composites, les coproduits se présentent généralement sous la forme de produits ou semi-produits secs et préimprégnés non consolidés thermoplastiques ou thermodurcissables.

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 pour le 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 aux rebuts, pour la fabrication de lames de course, destinées au marché handisport. Il est également possible de citer l'activité de l'entreprise Apply Carbon du groupe Procotex qui est spécialisée dans la coupe de précision et le broyage de fibres de carbone et fibres d'aramide provenant de coproduits industriels qui après traitement peuvent être réintégrées comme renfort dans de nouveaux matériaux composites ou autres.

4.2.2.2. Réutilisation

La réutilisation est également l'une des voies les plus vertueuses pour la revalorisation des matières catégorisées en tant que déchets. A la différence du remploi, 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. ». 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. Par ailleurs, si d'un point de vue technique la réutilisation peut être appliquée à l'ensemble des matériaux composites, la réutilisation reste une solution idéale pour la gestion des composites à matrice thermodurcissable renforcées de fibres de verre. En effet, le recyclage par les voies classiques (décrites ci-après) étant limité pour cette catégorie de matière, la réutilisation est une solution avantageuse car elle permet de conserver les propriétés originales du matériau.



Figure 98 : Exemples de réutilisation de composites thermodurcissable, conversion d'un bateau de plaisance en hébergement insolite. (à gauche, crédit : Bathô) et création d'aires de jeux à partir d'éolienne [16] (à droite).

A titre d'exemple, il est possible de citer l'activité de l'entreprise française Bathô qui transforme des voiliers et des vedettes de plaisance hors d'usage et qui ne peuvent plus naviguer, en gîtes sur terre ferme pour les particuliers, en hébergements insolites pour l'hôtellerie de plein air, en salles de réunion pour les entreprises ou en aires de jeux pour les collectivités. De la même façon, le collectif néerlandais SuperUse studio a contribué à la réutilisation de pales d'éoliennes en les transformant en aires de jeux ou en mobilier urbain [17]. Une autre initiative provenant du Queen's University Belfast a également proposé de réutiliser des pâles d'éolienne déclassées pour la fabrication d'un pont pédestre [18].

4.2.2.3. Recyclage

Du point de vue de la réglementation, 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. »

De ce postulat, le recyclage des composites renforcés de fibres peut être réalisé de différentes façons notamment en termes de procédés et de technologies. Ainsi, il existe plusieurs voies de traitement parmi lesquels les procédés mécaniques, thermiques et chimiques sont les plus avancés en termes de maturité technologique. De ce fait, le choix de la méthodologie de recyclage va dépendre de la nature des différents constituants du matériau que ce soit la matrice (thermoplastique ou thermodurcissable), le renfort (fibres de verre, basalte ou carbone) ou encore l'application visée pour l'utilisation du recyclat [19].

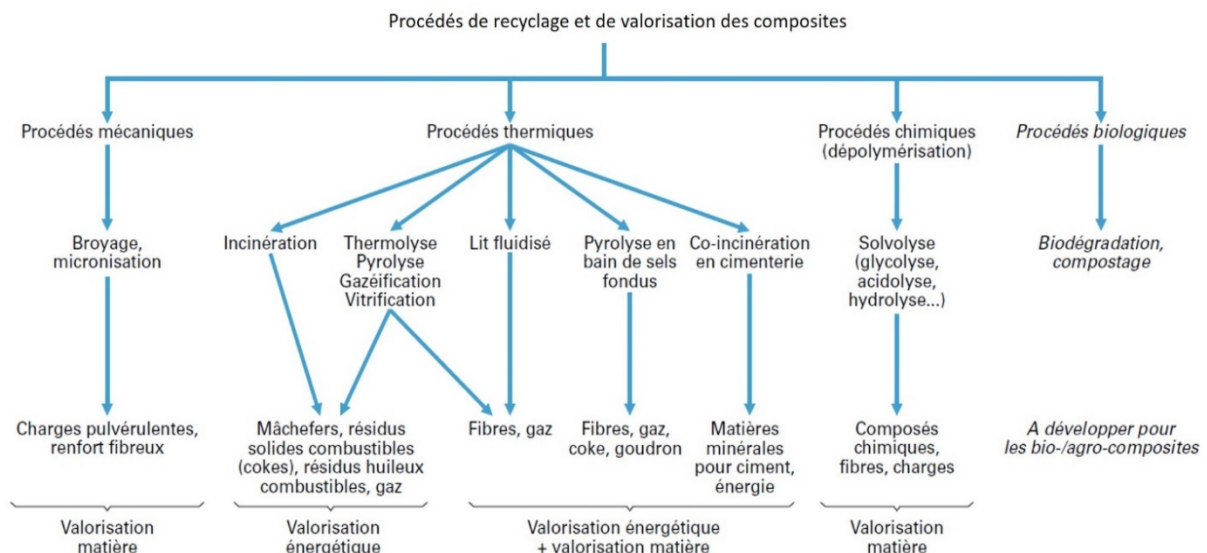


Figure 99 : Procédés de recyclage et de valorisation des matériaux composites à matrices organiques, adapté de [20].

4.2.2.3.1. 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 [21]. Initialement, cette voie a été privilégiée pour la transformation des composites à matrice thermodurcissable renforcés de fibres de verre courtes (SMC - Sheet Molding Compound et BMC – Bulk Molding Compound) et fibres de verre longues. Cette voie de recyclage peut également être appliquée aux composites renforcés de fibres de carbone mais le coût très élevé de ces dernières et leurs très hautes performances mécaniques conduisent à privilégier une forme de fibres continues car l'étape de broyage leur fait perdre de fait une grande partie de leur intérêt.

Le processus de traitement passe généralement par une réduction initiale de la taille des déchets composites (déchiquetage). 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 [20].

Dans ce procédé, tous les constituants originaux des matériaux composites sont broyés et restent présents dans les recyclats résultants qui se présentent sous la forme d'un mélange de polymères, de fibres et de charges. De façon générale, les fractions tamisées les plus fines sont des poudres et contiennent une proportion de charges et de polymères plus élevées que dans le composite d'origine. Les fractions tamisées les plus grossières ont tendance à être de nature plutôt fibreuse, avec des particules ayant un facteur de forme et un taux de fibres plus élevés.

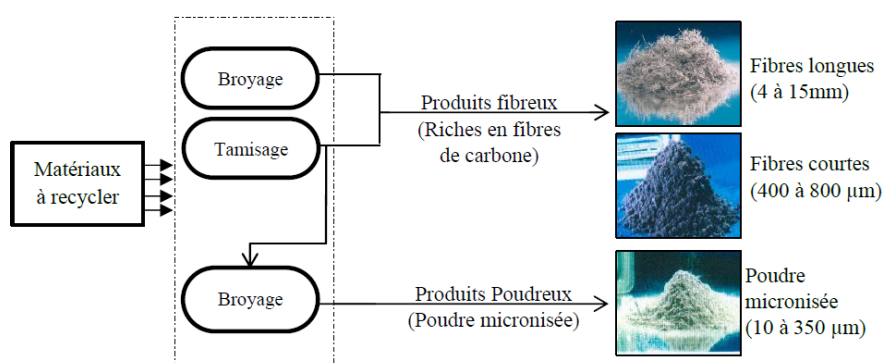


Figure 100 : Schéma du principe du recyclage mécanique des composites par broyage [22].

Sous la forme de poudre, les recyclats peuvent être utilisés en boucle fermée comme charge en substitution aux charges minérales telles que le carbonate de calcium ou la silice. Toutefois, le taux d'incorporation de ces derniers est limité (moins de 10 % en poids) en raison de la détérioration des propriétés mécaniques du matériau final et des problèmes de mise en œuvre accrues (augmentation de la viscosité du compound à mouler) [23].

Néanmoins, un avantage de l'utilisation de recyclats est que ces derniers disposent d'une densité plus faible que le carbonate de calcium (de l'ordre de 2,7), ce qui fait qu'un SMC contenant 10 % en masse de recyclat substituant les charges minérales peut être jusqu'à 5 % plus léger que son homologue chargé uniquement de carbonate de calcium [24]. Toutefois, le très faible coût des charges vierges comme le carbonate de calcium ou la silice vient concurrencer de façon très forte l'utilisation de recyclats, limitant ainsi le volume de valorisation.

En ce qui concerne les fractions fibreuses, ces dernières sont plus difficiles à réutiliser, en particulier comme renfort (même en faible taux de réincorporation) car les propriétés mécaniques des matériaux composites résultants sont significativement altérées. Cet effet est attribué d'une part à un manque d'adhésion entre le recyclat et la matrice polymère, et d'autre part au fait que les recyclats de tailles importantes peuvent être des lieux de concentrations de contraintes dans le composite [23]. De la même façon, le broyage reste une technique de recyclage très agressive qui peut provoquer une dégradation des fibres de renfort. Du fait de la faible longueur (inférieure à 25 mm) et de la disparité d'orientation des fibres produites, l'exploitation du recyclat en tant que renfort reste limité pour les matériaux de seconde génération [25].

Toutefois, des études ont montrées que lorsque des fractions fibreuses (provenant de SMC en fibres de verre) similaires aux faisceaux de fibres vierges étaient incorporées dans des BMC à environ 10 % en masse, le temps de mélange pouvait affecter positivement les propriétés mécaniques des matériaux résultants et permettre d'atteindre des propriétés comparables au matériau standard. Ceci s'explique par une meilleure interface entre le recyclat et la nouvelle résine [26].

D'autres études ont également démontré 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 [27], [28]. De la même façon, des recyclats sous la forme de broyats ont pu être utilisés en boucle ouverte dans l'industrie automobile sous forme de charges dans des parties non structurales [29].

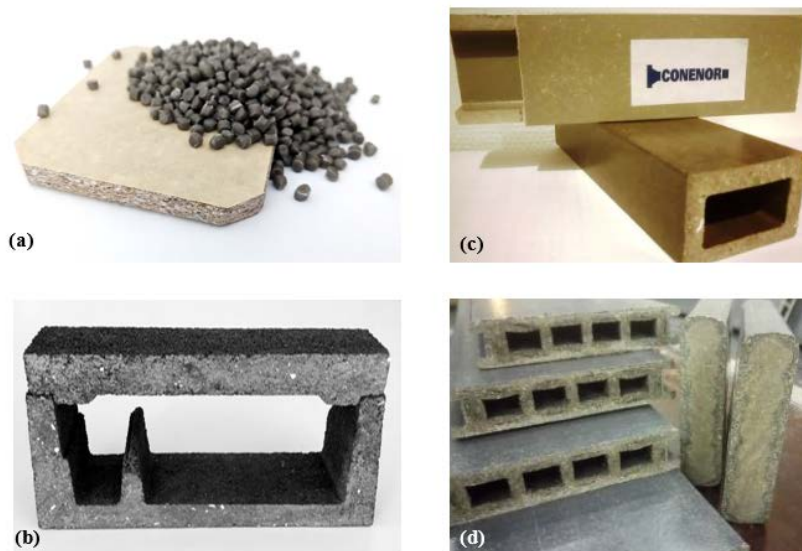


Figure 101 : Exemples de produits intégrant des déchets issus de matériaux composites thermodurcissables renforcés de fibres de verre, (a) : Global Fiberglass solutions [30]; (b) Reprocover [31]; (c-d) Conenor [32] (crédit : Global Fiberglass solutions , Reprocover et Conenor).

Plusieurs sociétés européennes telles que l'entreprise Reprocover, située en Belgique, et l'entreprise finlandaise Conenor ou 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 (Figure 101).

Produits	Applications	Quantité introduite	Remarques
Poudre micronisée	Introduction comme charge dans des SMC/BMC	5 à 10 % en masse	Peu compétitif vis-à-vis du coût du broyage par rapport au coût des charges naturelles
Fibres	Remplacement des fibres vierges dans les SMC/BMC	5 à 10 % en masse	Faible volume recyclé

Fibres longues	Béton de dallage	1 à 4 kg/m ³	Marché très concurrentiel avec d'autres types de fibres
Fibres longues	Enrobés routier	0,3 à 0,6 % en masse	Très concurrentiel avec des fibres de cellulose, polyamide et laine de roche
Fibres + poudre micronisée	Composite ciment/verre Bétons ultra-haute performance	0,11 % en vol.	Substitution sans surcoût des adjuvants des bétons
Fibres courtes ou longues	Renforts dans les thermoplastiques	10 à 40 %	Nécessite un traitement de surface pour optimiser la compatibilité fibres/matrice

Tableau 37 : Applications possibles pour les produits issus du broyage de composites thermodurcissables, adapté de [20].

Dans le cas du recyclage mécanique de composites thermoplastiques, le broyage permet l'obtention des recyclats qui ont la possibilité d'être retransformés sous la forme de granulés ou paillettes réintégrables en boucle fermée, et ce plusieurs fois, dans des cycles d'extrusion ou d'injection.

4.2.2.3.2. Recyclage thermique des fibres

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. A 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 [33].

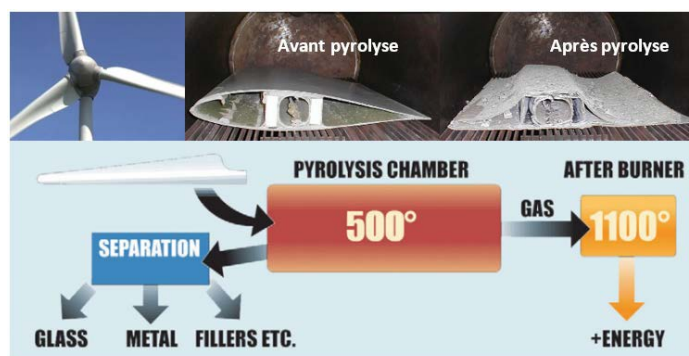


Figure 102 : Schéma du processus de pyrolyse d'une pale d'éolienne [34].

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 tandis que la rigidité des fibres n'est pas affectée par le traitement thermique [35]. A 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 [36]. Toutefois, il convient de préciser qu'un traitement permettant de conserver à la fois de bonnes propriétés mécaniques et un bon état de surface des fibres ne peut être obtenu qu'à partir d'un juste compromis au niveau des conditions opératoires (température/atmosphère). Par ailleurs, les conditions de traitement peuvent également être fortement influencées par la nature, l'origine et les caractéristiques des composites à traiter (matrice époxy, matrice

polyester, renfort en fibres de verre, carbone Haut Module, carbone Haute Résistance, etc.) qui vont nécessiter des ajustements spécifiques pour permettre un traitement optimal [37].

Une fois récupérées et séparées, les fibres de renfort peuvent être réutilisées comme matériaux d'isolation ou fibres de renfort [11]. A titre d'exemple, la société danoise ReFiber ApS proposait des mats de fibres de verre issus de la pyrolyse de pâles d'éoliennes. De la même façon, l'entreprise Gen2Carbon commercialise des structures non-tissés (100 % fibres de carbone recyclées ou en mélange avec des fibres thermoplastiques) destinées à être utilisées dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile ou encore dans les applications de sports et loisirs (Figure 102).



Figure 103 : Illustration de mats issus de fibres de verre (crédit : ReFiber ApS à gauche) et fibres de carbone recyclées (crédit : Gen2Carbon à droite).

Si le recyclage par pyrolyse reste relativement onéreux pour justifier le recyclage des fibres de verre, ce procédé reste cependant compétitif dans le cas du traitement des composites renforcés par des fibres de carbone où les fibres obtenues conservent une valeur économique supérieure [38]. Le procédé de traitement a par ailleurs atteint l'échelle industrielle chez différents acteurs tels que l'entreprise Procotex Corp. SA (anciennement ELG Carbon Fiber Ltd).

4.2.2.3.3. Recyclage chimique

Le recyclage chimique également appelé solvolyse s'opère essentiellement dans le cadre des composites thermosensibles 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 à 374 °C et 221 bars) [37]. 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. De la même façon, des additifs ou catalyseurs peuvent être ajoutés dans le but d'optimiser la cinétique du procédé. Utilisés en milieu acide (acides nitrique, sulfurique ou acétique), le traitement solvolytique peut être réalisé à une température inférieure à 200 °C et à pression atmosphérique. Toutefois, l'emploi de catalyseurs et acides forts peut être préjudiciable aux propriétés mécaniques des fibres, de même que sur des aspects environnementaux et de sécurité au travail [37]. L'élimination de ces derniers peut également nécessiter plusieurs étapes complémentaires de lavage, ce qui peut être un frein économique [39].

Selon la nature de la résine utilisée, des températures et pressions plus ou moins élevées sont nécessaires pour dégrader la résine. A ce titre, les résines polyester sont généralement plus faciles à solvolyser que les résines époxy qui nécessitent des températures plus élevées pour être dégradées. Au cours de la dernière décennie, ce procédé a été étudié de façon plus intensive pour le recyclage des composites CFRP et permettre notamment la récupération des fibres de carbone qui suscitent un intérêt commercial.

En fonction de la quantité de solvant et de la température appliquée, le fluide peut se présenter sous la forme de vapeur, liquide biphasique ou supercritique. Lorsque le fluide est en phase vapeur ou à une densité semblable à celle d'un gaz à l'état de fluide supercritique, le procédé peut être davantage assimilé à un processus thermique qu'à une solvolyse tel que le montre certaines études traitant de la dégradation de composite CFRP par un procédé hydrothermique utilisant l'eau comme solvant [40].

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 [41]. 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 (Figure 104). La longueur des fibres traitées dépend généralement des dimensions de la pièce composite à recycler et de celles du réacteur de traitement. 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 [42].

Il convient donc de noter que le coût des installations rend l'exploitation de ce procédé viable uniquement pour le recyclage des fibres à haute valeur ajoutée telles que les fibres de carbone [37].

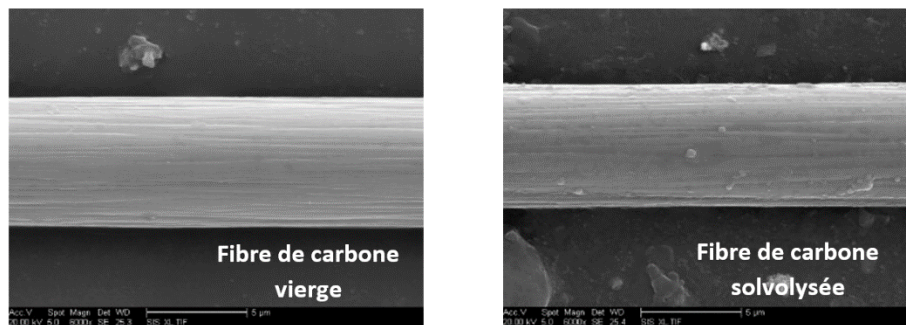


Figure 104 : Comparaison de l'état de surface d'une fibre de carbone vierge (à gauche) et d'une fibre de carbone après traitement hydrolytique (à droite) [43].

Comparativement aux procédés de pyrolyse, des températures plus basses sont nécessaires pour dégrader les polymères (polyester et époxy en particulier) et le potentiel de récupération de la valeur chimique de la résine est plus élevé. Néanmoins, cette voie de recyclage nécessite un tri rigoureux des déchets à la source, la coexistence de déchets composites de nature chimique différente empêchant un recyclage optimum.

Si jusqu'à présent les technologies de traitement par voie chimique étaient à des niveaux de maturité technologique relativement modérés, certaines entreprises proposent aujourd'hui des traitements à l'échelle semi-industrielle. Ainsi, la société Alpha Recyclage Composites dispose depuis 2019 d'un pilote de traitement pré-industriel par vapohermolyse dont la capacité de production peut avoisiner les 300 t de fibres de carbone recyclées par an. De la même façon, l'entreprise Extractive propose un procédé de traitement par solvololyse qui permettra d'ici 2023 de traiter des volumes de fibres équivalents.

4.2.2.4. Valorisation énergétique

Vis-à-vis de la réglementation, selon l'article L. 541-1-1 du code de l'environnement, la valorisation énergétique est définie 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. »

4.2.2.4.1. 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. Il est à noter que le pouvoir calorifique d'une matière peut être distingué selon deux critères, le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) et le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI). Il s'agit pour les deux de l'énergie thermique libérée par la combustion d'un kilogramme de combustible. Dans le cas du PCS l'énergie de vaporisation de l'eau présente en fin de réaction est prise en compte, contrairement au PCI. 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 (exemples : phase de tri préalable pour éliminer la présence éventuelle de PVC et conserver une production stable en terme de PCI).

Largement développé à l'échelle européenne, le cahier des charges pour les CSR est défini par l'Arrêté du 23 mai 2016 relatif à la préparation des combustibles solides de récupération en vue de leur utilisation

dans des installations relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

Ainsi d'après l'article 3, les CSR doivent être préparés à partir de déchets non dangereux, doivent présenter un PCI (pouvoir calorifique inférieur) sur CSR brut supérieur ou égal à 12 MJ/kg et doivent avoir fait l'objet d'un tri dans les meilleures conditions technico-économiques disponibles des matières indésirables à la combustion, notamment les métaux ferreux et non ferreux ainsi que les matériaux inertes. A titre d'exemple, le charbon présente un PCI d'environ 30 MJ/kg, et le bois un PCI d'environ 20 MJ/kg.

Il n'existe pas de composition type de CSR et cette dernière varie en fonction des pays, des sites de production et des utilisations qui en sont faites. Généralement produits directement sur les sites de tri et de traitement de déchets, les CSR ont une composition qui est liée au rebus des filières de valorisation matière. De manière générale, la valorisation matière conduit à des produits dont les valeurs financières sont comprises entre quelques centaines d'euros à quelques milliers d'euros la tonne, soit jusqu'à un ordre de grandeur au-dessus d'un produit à vocation énergétique. Ainsi, la valorisation énergétique est à l'origine davantage perçue comme une voie d'élimination pour valoriser des produits permettant de limiter le recours à l'enfouissement [44]. Ainsi, ces déchets combustibles sont essentiellement utilisés dans des fours adaptés (cimenteries en général) et dans des chaudières de production d'énergie (vapeur et/ou électricité) dans les collectivités locales et industries.

De cette façon, au vu de leur composition, la transformation des déchets composites thermoplastiques et thermodurcissables en CSR peut être une voie intéressante si aucune des solutions de recyclage présentées précédemment ne peut être appliquée. Toutefois, plusieurs aspects doivent être pris en compte notamment pour la transformation CSR des composites de type polyester renforcés de fibres de verre. En effet, la présence de fibres de verre peut conduire à une usure prématurée (abrasion) des installations de type broyeurs. De la même façon, si la partie organique des matériaux composites présente généralement une énergie de combustion importante (Tableau 38), la forte proportion de fibres de verre dans ces mêmes matériaux peut réduire de façon significative le pouvoir calorifique global.

Matériau	Energie de combustion (MJ/kg)	Source
Polyethylene (PE)	48	[45]
Polypropylene (PP)	46	[45]
Polyvinyl Chloride (PVC)	18	[46]
Epoxy Novolac, catalytic cure (phenoxy-N)	31	[45]
Polyester insaturé	26	[46]
Charbon, Anthracite	33	[46]
Lignite	28	[46]
Papier, journaux	20	[46]

Tableau 38 : Pouvoir calorifique inférieur de certains polymères et matériaux utilisés en CSR¹.

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 [47]. Une liste exhaustive des préparateurs de CSR actifs en France est présentée au Chapitre 5. Le Chapitre 5 présente une liste exhaustive des cimenteries française. En effet, les cimenteries consistent l'exutoire majoritaire pour le CSR.

¹ Note : Les données indiquées dans le tableau ci-dessus sont fournies à titre informatif pour des besoins de comparaison entre matières

4.2.2.4.2. 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. A 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.

Ainsi, il est possible de citer l'exemple des composites thermodurcissables en particulier, qui peuvent être utilisés comme combustibles de substitution en cimenterie. En effet, au vu de leur composition riche en matières minérales (carbonate de calcium, alumine et silice, constituant de base des fibres de verre) ces derniers disposent d'une excellente compatibilité avec les matrices cimentaires. Ainsi, le traitement en cimenterie permet de réaliser à la fois un recyclage matière des charges minérales (≈ 40 à 70 %) et une valorisation énergétique de la partie organique. Il n'y a donc pas de résidu secondaire dans ce cas.

Il s'agit actuellement de la méthode la plus viable économiquement pour les composites renforcés de fibres de verre.

4.2.2.5. Stockage

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 dans des Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND – anciennement appelées centres 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 [20]. Par ailleurs, la loi AGEC impose une réduction des quantités de déchets ménagers et assimilés admis en installation de stockage en 2035 à 10 %.

La réglementation s'applique aussi bien aux déchets de production qu'aux produits en fin de vie. Les premiers sont plus faciles à gérer (identification de leur typologie, tri et collecte à la source, absence de pollution par association à d'autres matériaux ou composants...). Cela peut notamment être le cas de la fabrication des semi-produits thermodurcissables dont le fabricant industriel maîtrise la composition de la résine et la nature du renfort. Les seconds nécessitent quant à eux la mise en place de véritables filières de démantèlement, collecte, tri avant recyclage/valorisation par des solutions technologiques en cours de développement à l'échelle industrielle dont la viabilité économique repose en premier lieu sur l'évaluation du flux de déchets composites à traiter [20]. En effet, c'est notamment le cas des assemblages multi-matériaux qui peuvent être composés d'un mixte entre des parties en matériaux composites et des parties métalliques (inserts, éléments de renfort, etc...).

4.3. L'innovation

Par opposition aux « solutions techniques », ce paragraphe se concentre sur les technologies en cours de maturation. Il s'agit de technologies en développement ou proches du marché, qui pourraient préfigurer de l'avenir du recyclage des matériaux composites en Europe.

Les technologies innovantes ont été regroupées suivants trois familles :

- Un axe procédé, relatif aux nouvelles techniques en maturation pour le recyclage des composites ;
- Un axe matériau, concernant les nouvelles résines en développement pour l'amélioration de la recyclabilité des composites ;
- Un axe sur le contrôle des pièces réceptionnées avant recyclage, à la fois pour séparer les matériaux suivant leur composition et également identifier la présence de particules reconnues comme POP (Polluants Organiques Persistants) tels que les agents bromés utilisés pour améliorer la tenue au feu des matériaux.

Notons que SUSCHEM – la plateforme technologique européenne pour une chimie durable – a présenté un état de l'art récent des principaux projets adressant la circularité des composites en Europe au cours des dernières décennies [48].

4.3.1. Axe procédé

4.3.1.1. Procédé Thermosaïc®

Dans un contexte général de raréfaction des ressources accessibles en matières comme en énergies, le CETIM Grand Est a développé deux éco-procédés de valorisation des déchets plastiques et composites thermoplastiques, pour contribuer à réduire l'empreinte environnementale des matériaux et accompagner les entreprises dans leurs mutations technologiques et écologiques.

Concernant les composites thermoplastiques, les procédés actuels de mise en œuvre (thermo-estampage...) génèrent au passage de nombreux déchets, qui peinent à trouver des voies de valorisation performantes, sur le plan économique, technique et environnemental. Le procédé Thermosaïc® propose une voie originale de recyclage pour les chutes de production et produits en fin de vie ou d'usage.

Schématiquement, les déchets, après différentes étapes de tri et de déchetage, sont agglomérés sous forme de panneaux. La structure originale de ces derniers leur confère des caractéristiques particulières (haute formabilité, isotropie des propriétés mécaniques, etc.) qui peuvent être mises à profit dans de nombreux domaines (off-road, bâtiment, équipements industriels, etc.).

Concernant les plastiques, le procédé ThermoPRIME® (Thermo Plastic Recycling for Innovative Material and Eco-design), permet de convertir les déchets de production comme les produits en fin de vie ou d'usage, en semi-produits (panneaux de stratifiés) à haute valeur ajoutée, par l'adjonction d'un renfort fibreux long ou continu.

Contrairement aux approches habituelles, les procédés Thermosaïc® et ThermoPRIME® permettent de produire, à partir de déchets, des panneaux de grande taille (700 mm de large sur plusieurs mètres de long) avec des propriétés intéressantes. En effet, les semi-produits générés à partir de ces deux procédés sont performantes :

- Sur le plan environnemental, car issus de déchets (en partie ou en totalité) ;
- Sur le plan mécanique, car constitués de fibres longues ou continues.

Enfin, concernant le procédé Thermosaïc®, les semi-produits présentent un haut potentiel de formabilité, compte tenu de leur morphologie.

Les deux modes de production, Thermosaïc® et ThermoPRIME®, sont possibles à partir de la même ligne. Seuls les systèmes d'alimentation de la matière, placés en amont, diffèrent.

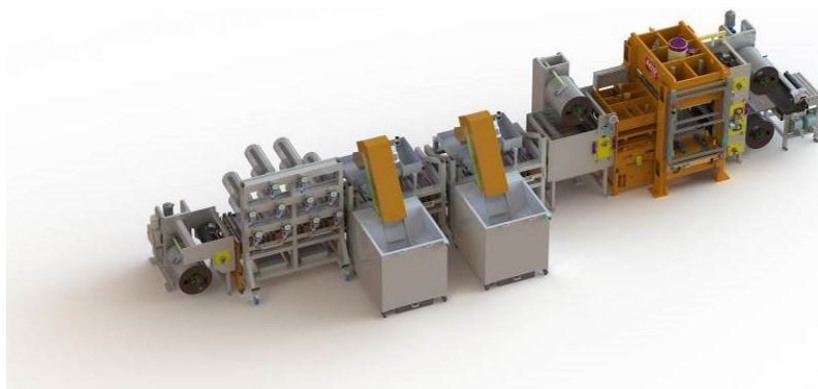


Figure 105 : Ligne pilote Thermosaïc® et ThermoPRIME® pré-industrielle (crédit : CETIM).

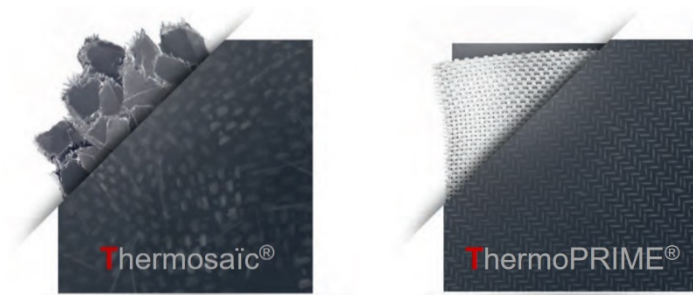


Figure 106 : Semi-produits (panneaux) obtenus par les procédés Thermosaïc® et ThermoPRIME® (crédit : CETIM).

Ces procédés sont basés sur une hybridation originale de technologies conventionnelles, représentant un investissement initial et un coût d'exploitation inférieurs à ceux d'une ligne de production continue (par exemple une ligne avec presse à double bande). La flexibilité de la ligne (recyclage de deux typologies de déchets) permet le traitement de tous types de résines thermoplastiques (PP, PA, PPS, PEEK, etc.) associées à tous types de renforts (verre, lin, chanvre, carbone, etc.).

Lien : <https://youtu.be/Ga-Pm9KJ6ms>

4.3.1.2. Lit fluidisé

Le recyclage par lit fluidisé est un procédé de combustion qui a été initialement étudié par Stephen J. Pickering [49],[50]. Il est dédié spécifiquement au recyclage des composites à matrice organique.

Un schéma représentant les différentes étapes du recyclage des composites avec un lit fluidisé est indiqué en Figure 107. Dans ce procédé, les pièces composites doivent avoir été préalablement broyées, afin d'obtenir des tailles caractéristiques de 25 mm [49], [51]. Un flux d'air chauffé à 500 °C est acheminé avec un débit allant de 0,4 à 1 mètre par seconde jusqu'à la première chambre de recyclage (①), où se trouve le lit fluidisé. Ce lit est constitué de grains de silice (SiO_2) de 0,85 mm. Les copeaux de composite à recycler sont introduits au-dessus du lit, de manière lente, afin que la matrice soit séparée des fibres. L'air chaud va ensuite acheminer les fractions légères, constituées de particules solides de matrice et de fibres vers le haut. Les polluants plus lourds, comme les métaux, sont piégés en raison de leur densité dans le lit de silice.

Les constituants légers sont acheminés par le flux d'air chaud vers la deuxième chambre (②) où la température avoisine les 1000 °C et permet l'oxydation complète des éléments de matrice par pyrolyse. Les fibres sont ainsi débarrassées de toute trace de résine. Le flux d'air chaud ascendant dans la chambre de pyrolyse produit un cyclone qui entraîne les gaz, sous-produits d'oxydation issus de la pyrolyse, vers le système d'échappement. Les fibres propres sont entraînées vers le bas pour être récupérées.

Le système d'échappement permet la filtration de l'air sortant mais aussi la récupération de la chaleur contenue dans l'air, ce qui permet une optimisation de la quantité d'énergie à apporter au système.

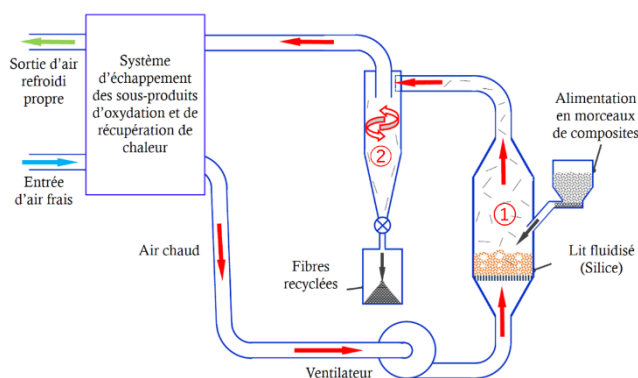


Figure 107 : Schéma des différentes étapes du procédé de recyclage des composites par lit fluidisé [29].

A la sortie de la deuxième chambre, les fibres sont exemptes de toutes traces de matrices résiduelles. Le procédé permet l'élimination de toute contamination et constitue une bonne alternative aux méthodes actuellement utilisées comme la pyrolyse. Meng *et al.* [52] ont montré que les composites en fibres

recyclées de cette manière consomment moins d'énergie et impactent moins le réchauffement climatique que l'utilisation de matière vierge (Figure 108). Les réductions d'énergie sont obtenues sur la production de fibres. Il a été en effet estimé que le recyclage de fibres de carbone par lit fluidisant consommait 7,7 MJ par kilogramme de fibre, contre une consommation comprise entre 198 et 595 MJ pour la fabrication d'un kilogramme de fibre vierge [53].

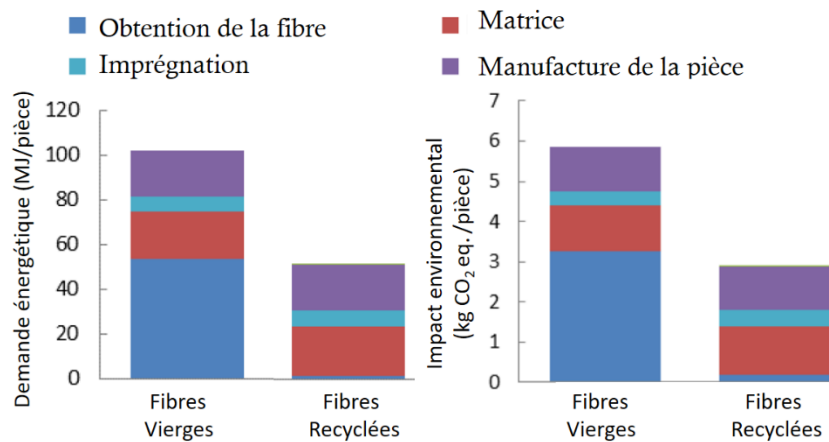


Figure 108 : Impact environnemental de composite à fibres de carbone vierges comparées à des fibres recyclées - gauche : Impact sur la dépense énergétique ; droite : potentiel impact sur le réchauffement climatique [52].

Il reste encore un certain nombre d'obstacles pour l'essor du recyclage par lit fluidisé. Tout d'abord, les composites à recycler doivent être réduits en copeaux de taille inférieure à 2,5 cm, ce qui peut engendrer une diminution de la taille des fibres et entraîner une forte diminution des propriétés mécaniques du matériau recyclé. Ensuite, les fibres obtenues se présentent sous la forme de pelotes, aux longueurs aléatoires, ce qui les prédétermine à être utilisées dans des composites à fibres non-orientées. Par ailleurs, les recherches actuelles portent essentiellement sur les fibres de carbone, qui conservent leurs propriétés mécaniques après le procédé [54], alors que les fibres de verre ont très peu été étudiées [50]. La seule étude portant sur ces fibres a été menée en 1998 à l'invention de procédé, avec une perte de 50 % des propriétés mécaniques.

Technologie	Résistance à la traction (MPa)	Module d'Young (GPa)	Longueur de fibre (mm)
Composite vierge	172	20	12
Composite recyclé par lit fluidisé	150 (-13 %)	17 (-15 %)	1,5

Tableau 39 : Comparaison des propriétés mécaniques de composites à fibre de carbone vierge et issues du recyclage par lit fluidisé [52].

4.3.1.3. Chauffage par micro-ondes

La pyrolyse assistée par micro-ondes est un procédé dans lequel le matériau composite est chauffé par des micro-ondes pour séparer la fibre de la matrice. Ce procédé de pyrolyse est effectué dans un four à micro-ondes à des températures entre 400 et 600 °C pendant une durée pouvant varier de quelques centaines de secondes à environ 30 minutes. Les fréquences appliquées aux matériaux se situent entre 915 MHz et 2,45 GHz [55], [56]. Lors du traitement, les micro-ondes créent un champ magnétique, induisant un courant de Foucault dans la matière. Cette activité électrique génère une montée en température par effet Joule. Cette technologie permet un chauffage rapide et à cœur du matériau. En raison de ces températures élevées, la matrice se dégrade permettant sa séparation avec les fibres de carbone.

Les rayonnements micro-ondes sont adaptés aux matériaux diélectriquement actifs, c'est-à-dire capables d'une bonne conduction électrique. C'est pourquoi ce traitement est particulièrement efficace pour des fibres de carbone (conductivité électrique d'environ 1.10^5 S/m à 25 °C) et inefficace pour les fibres de verre (conductivité électrique d'environ 1.10^{-13} S/m à 25 °C).

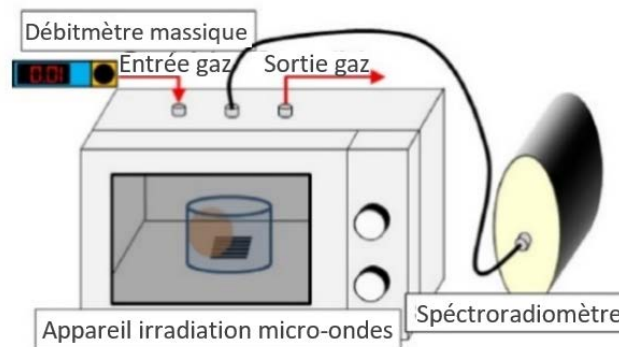


Figure 109 : Schéma de principe du procédé de chauffage par micro-onde [57].

Il a été montré que l'atmosphère de pyrolyse avait une grande importance sur la qualité du recyclage. En effet, Obunai *et al.* [57] ont étudié l'impact de l'atmosphère de traitement sur le taux de résidu de résine sur les fibres. La Figure 110 montre le taux d'élimination de la résine en fonction du temps d'irradiation sous différentes atmosphères (air, azote et argon). Les résultats des tests montrent que l'élimination de la résine du composite carbone/époxy a augmenté rapidement jusqu'à 60 s d'irradiation, puis le taux d'élimination de la résine était presque constant à 90 %. Cependant, sous atmosphère air, le taux d'élimination de la résine augmente jusqu'à 100 %. Ce résultat suggère que la combustion de la résine gazéifiée est totale en raison de la température élevée en présence d'oxygène.

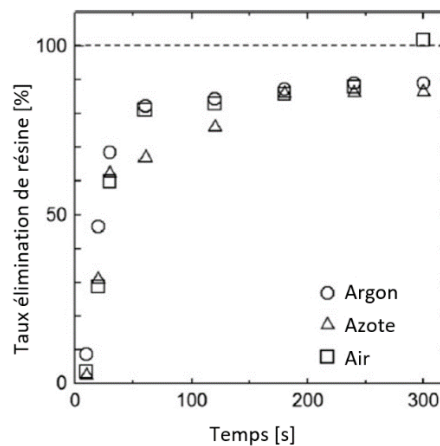


Figure 110 : Ratio d'élimination de la résine en fonction du temps de radiation sous trois atmosphères différentes (Argon/Azote et Air) [57].

La Figure 111 montre des images MEB (Microscopie Electronique à Balayage) des fibres de carbone traitées par irradiation micro-ondes pendant 300 s sous différentes atmosphères. Des fibres de carbone vierges sont également observées pour comparaison. Les résultats des tests montrent que les fibres de carbone ont des surfaces lisses avec peu de résidus de résine sous atmosphère d'azote ou d'argon. Cependant, des défauts sur les fibres de carbone après irradiation sous atmosphère air sont observés. Ces défauts sont dus à la combustion de la matrice thermodurcissable. Cette combustion vient endommager et altérer les fibres recyclées et donc diminuer leur qualité. Ainsi, l'irradiation par micro-ondes sous atmosphère inerte est la plus efficace pour extraire les fibres de carbone avec la meilleure qualité possible (l'absence de comburant (O_2) rendant la combustion impossible et préservant donc les fibres).

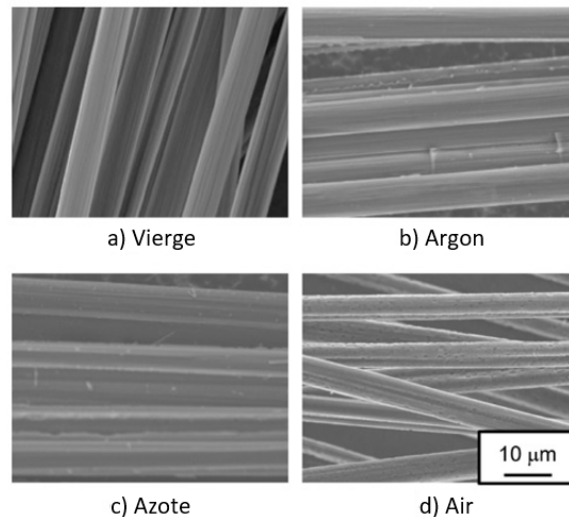


Figure 111 : Observation de l'élimination de la résine époxy sous trois atmosphères différentes (argon/azote et Air) [57].

Lester *et al.* [58] ont soumis un composite carbone/époxy à ce type de traitement par micro-onde à 2,94 MHz sous atmosphère inerte (azote) puis ont soumis les fibres résiduelles à des tests de traction afin de les comparer au procédé de recyclage par lit fluidisé. De façon encourageante, les fibres du processus de chauffage par micro-ondes semblent conserver une résistance à l'allongement légèrement supérieure (3,26 GPa pour le chauffage micro-ondes contre 3,05 GPa pour le traitement en lit fluidisé). Il peut également être intéressant de noter que le module d'Young des échantillons chauffés aux micro-ondes est légèrement réduit (12 %) par rapport aux échantillons vierges et des échantillons de lit fluidisé. Cela peut être dû à des températures plus élevées et/ou mal adaptées lors du traitement micro-onde, prouvant que ce procédé nécessite encore des ajustements pour augmenter son efficacité.

	Fibres vierges		Fibres recyclées	
	Données fournisseur*	Données expérimentales	Lit fluidisé	Micro-ondes
Résistance max (GPa)	4,50	4,09	3,05 (-25 %)	3,26 (-20 %)
Module d'Young (GPa)	234	242	243 (0 %)	210 (-13 %)

*Issus de la fiche technique des fibres de carbone vierges Grafil 34-700 standard

Tableau 40 : Comparaison des propriétés mécaniques de fibres de carbone recyclées issues de composites époxy/fibre de carbone selon deux procédés de recyclage (micro-onde et lit fluidisé) avec des fibres de carbone vierges [58].

Cette étude conclut sur la faisabilité du recyclage des matériaux composites fibreux (carbone) à matrice thermoscurissable. Il reste encore des optimisations à apporter sur les paramètres du procédé (temps d'irradiation optimal, contrôle de la température du matériau pendant le processus). C'est pourquoi l'étude de Rybicka *et al.* [19] a considéré cette technologie au niveau de maturité de TRL3 en 2016. A ce jour, aucune société exploitant cette technologie n'a pu être identifiée.

4.3.1.4. Fragmentation haut voltage / hydraulique

La Fragmentation Haut Voltage (FHV), ou fragmentation haute tension, est traditionnellement utilisée pour des applications minières et ce depuis les années 1960. L'objectif de ce procédé est de désagréger les roches en constituants individuels afin de séparer et récupérer les fractions à haute valeur, telles que les minéraux et les cristaux. L'appareil de FHV utilise des décharges électriques à impulsions répétitives dans un environnement liquide diélectrique, couramment de l'eau, pour désintégrer la matière solide. Les impulsions sont déchargées dans une période de temps très courte et entre deux électrodes. Le matériau

solide est maintenu dans l'écart entre les électrodes. Lors de l'application de hautes tensions (100-200 kV) à un temps de montée d'impulsion inférieur à 500 nanosecondes, cette puissance restituée se transforme en une énergie mécanique sous forme d'onde de choc intense à haute pression (supérieure à 10^9 Pa) et une température élevée (supérieure à 10^4 K) induisant des contraintes mécaniques internes qui dépassent la résistance à la traction des matériaux solides, permettant la séparation de ses constituants. Cela conduit finalement à une désintégration partielle du matériau [59], [60].

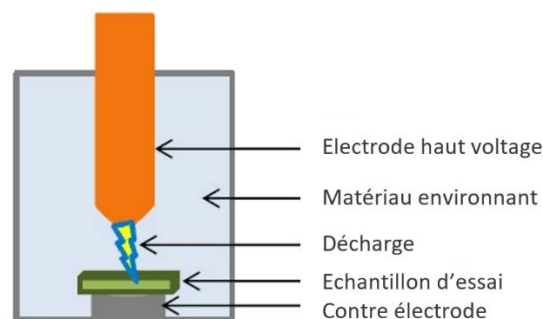


Figure 112 : Schéma du procédé de Fragmentation Haut Voltage [61].

En 2014, Rouholamin *et al.* [61] ont adapté ce procédé de FHV aux matériaux composites thermodurcissables chargés en fibre de verre afin d'observer son impact sur les propriétés mécaniques des fibres (module d'Young et résistance maximale). En effet, ce procédé est destiné au recyclage de la fraction fibreuse du matériau composite. Ainsi des panneaux composites fibres de verre/époxy réalisés en SMC ont été soumis à cette technique FHV ainsi qu'au processus de broyage mécanique pour comparaison. Des tests micromécaniques ont ensuite été effectués pour comparer les propriétés des fibres obtenues avec ces deux processus de recyclage. Les résultats sont reportés dans le Tableau 41. Les fibres obtenues lors du processus de FHV possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles recyclées mécaniquement.

Fibre	Résistance max (GPa)	Module d'Young (GPa)	Elongation à la rupture (%)	Diamètre (μm)
Vierge	$2,14 \pm 0,81$	$63,48 \pm 26,68$	$6,73 \pm 2,81$	$15,91 \pm 1,73$
Fragmentation Haut Voltage	$1,89 \pm 0,53$	$55,65 \pm 15,83$	$3,98 \pm 1,67$	$15,57 \pm 1,09$
Recyclage mécanique	$1,73 \pm 0,66$	$39,1 \pm 17,78$	$3,96 \pm 1,75$	$15,58 \pm 1,68$

Tableau 41 : Propriétés mécaniques et diamètre des fibres vierges et recyclées par le procédé de FHV et le procédé mécanique [61].

Mativenga *et al.* [62], utilisent également ce procédé sur matériaux composites thermodurcissables chargés en fibres de carbone. Cette méthode a ensuite également été comparée aux procédés de recyclage mécanique déjà existants. Pour des matériaux en polyester insaturé et renforcé à 30 % en fibre de carbone. Les conclusions sont les suivantes :

- Un taux résiduel de résine inférieur pour le procédé FHV comparé au taux obtenu par recyclage mécanique ;
- Cette teneur en résine résiduelle dans le FHV dépend du nombre d'impulsions électriques appliquées. Le plus grand nombre d'impulsions, conduit à un résidu de résine plus faible ;
- Une longueur de fibre moyenne supérieure pour le procédé de FHV ;
- La qualité de la surface des fibres après recyclage est supérieure avec le procédé de FHV (Figure 113).

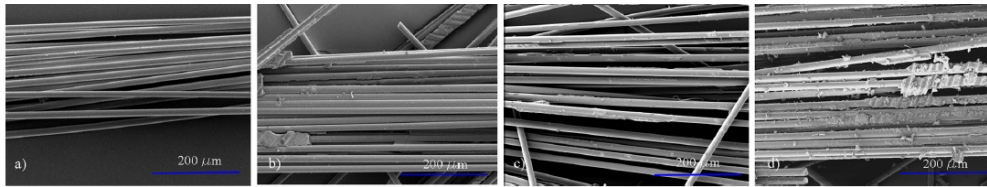


Figure 113 : (a) Fibres vierges, (b) fibres traitées à 500 impulsions en 500 ns, (c) fibres traitées à 2000 impulsions en 500 ns (d) fibres traitées mécaniquement [62].

Le procédé de FHV possède de nombreux avantages quant à la qualité des fibres issues du recyclage mais aussi de leurs propriétés mécaniques. Cependant, sa réalisation au niveau industriel reste encore difficile notamment à cause de la quantité d'énergie nécessaire pour détruire, via les impulsions de l'électrode, le réseau tridimensionnel des résines thermodurcissables. En effet, d'après Shuaib *et al.* [63], dans leur étude sur l'analyse de l'impact environnemental des différents procédés de recyclage des matériaux composites, le procédé de FHV consomme environ 20 MJ/kg de fibres recyclées contre environ 1 MJ/kg pour le procédé de recyclage mécanique. Ces chiffres peuvent également être comparés à l'énergie nécessaire à la production de fibres. En effet, la production de fibres de carbone vierge consomme entre environ 183 et 286 MJ/kg et celle de fibre de verre entre 13 et 32 MJ/kg [64].

La société Xcrusher, startup française a bénéficié de partenariats public-privé, du soutien de l'ADEME, du Secrétariat général pour l'investissement, afin de promouvoir cette technologie et ses potentialités dans une optique d'économie circulaire. Après plusieurs années de recherche et développement, la technologie Xcrusher a atteint une maturité industrielle dans plusieurs applicatifs tels que le recyclage de composites thermodurcissables mais aussi de films multicouches.

4.3.2. Axe matériau

4.3.2.1. Résine Elium®

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 mis en œuvre mais également de propriétés.

En effet, les propriétés mécaniques de la résine Elium® peuvent dans une certaine mesure s'approcher des propriétés des résines thermodurcissables de type époxy. A titre d'exemple, Monti [65] a obtenu des résultats analogues pour le module d'Young et la contrainte à rupture comparée à une résine époxy commerciale (Figure 114).

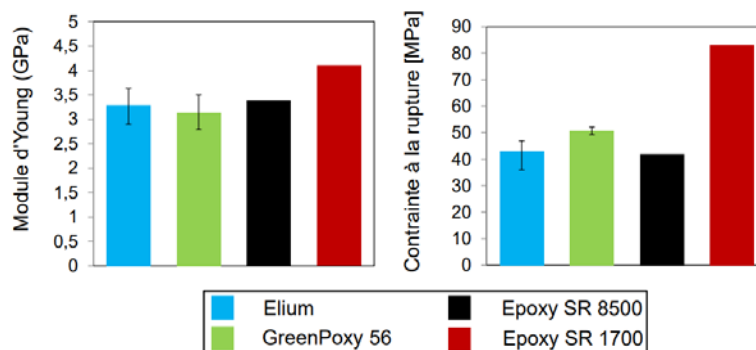


Figure 114 : Comparaison des principales propriétés mécaniques de la résine Elium® et de résines époxy commerciales [65].

Plus récemment, Arkema a développé différents grades pour cette résine afin de s'adapter aux différents procédés de mise en œuvre des matériaux composites (infusion, RTM, SMC, pultrusion, etc.). Les différents produits de la gamme Elium® sont présentés sur la Figure 115, adaptée de [66].

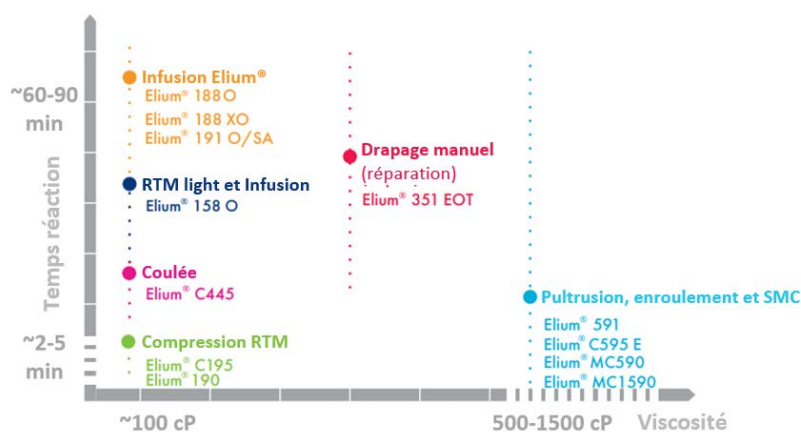


Figure 115 : Présentation des différents grades de résine Elium®, adapté de [66].

Dans sa communication, Arkema indique que les pièces composites à matrice Elium® peuvent être recyclées de deux façons :

- Par un broyage/compoundage (décrit au paragraphe 4.2.2.3.1) ;
- Par un traitement procédé de thermolyse (décrit au paragraphe 4.2.2.3.2).

4.3.2.2. Vitrimères

Aujourd'hui, la majorité des matériaux composites à matrice polymère sont réalisés à partir de résines thermodurcissables, apportant de meilleures propriétés mécaniques et chimiques que les thermoplastiques. Elles se différencient par leur structure à l'échelle moléculaire organisée en un seul réseau réticulé tridimensionnel. Cela leur apporte de meilleures propriétés mécaniques et les rend insolubles, qualités très recherchées en matière de matériaux (augmentation de la résistance mécanique et de la durée de vie).

Ces résines se présentent la plupart du temps sous forme liquide lors de la fabrication des composites et de l'imprégnation des renforts. Ce n'est qu'une fois les renforts imprégnés par le liquide que la réaction chimique permettant la formation de ces réseaux est amorcée. Cependant, le réseau tridimensionnel formé par les matrices thermodurcissables est qualifié de « permanent » ; c'est à dire que les matrices ne peuvent ni être fondues ni être solubilisées. C'est notamment cette caractéristique propre aux matrices thermodurcissables qui rend les composites si difficiles à recycler.

Ainsi, depuis 2011, le laboratoire de l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris (ESPCI Paris), sous la direction de Ludwik Leibler, s'est penché sur la question de la recyclabilité des composites, ce qui a donné naissance à une toute nouvelle classe de polymères, appelée « vitrimères » [67], [68].

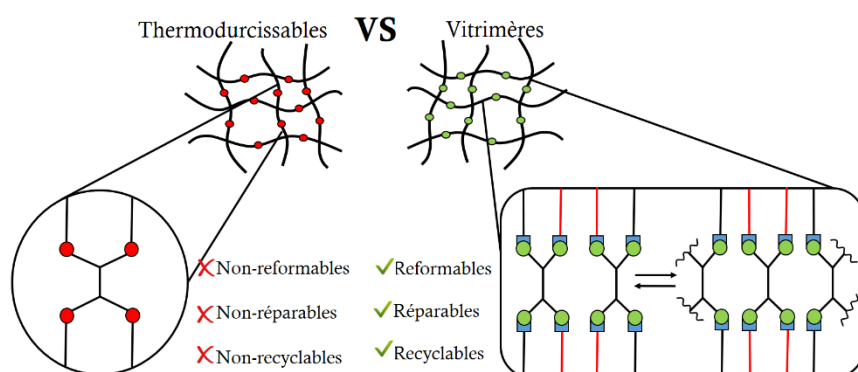


Figure 116 : Différences de fonctionnement et de propriétés entre les nœuds de réticulation pour les thermodurcissables et les vitrimères [73].

Ces nouveaux polymères possèdent les mêmes caractéristiques que les thermodurcissables et génèrent des réseaux tridimensionnels très résistants lorsque la réaction chimique est amorcée. A l'inverse, et

contrairement aux thermodurcissables, les « nœuds » de réticulation formant le réseau ont la capacité de se dissocier et de se recombinaison en continu, cela par une simple augmentation de température (de 100 à 200 °C) [69], [70]. Ces réseaux possèdent des fonctions chimiques particulières et contiennent souvent des catalyseurs dans leur formulation [71]. Le schéma de la Figure 116 montre la différence entre les réseaux de thermodurcissables et les réseaux vitrimères. Ainsi, les réseaux des vitrimères ont la capacité de se réorganiser en fonction de la température, sans modifier le nombre de liaisons intramoléculaires ni se dépolymériser. En effet, avec l'augmentation de la température, des réactions d'échange vont avoir lieu entre les différents nœuds du réseau, dont le nombre va globalement rester constant (points verts représentés sur le schéma en Figure 116). La cohésion au sein du vitrimère va alors diminuer, ce qui tend à rendre le vitrimère malléable et autorise donc une certaine remise en forme. Cette propriété place les vitrimères à la frontière entre les résines thermodurcissables et les thermoplastiques. Une fois le procédé terminé, le matériau va retrouver sa structure tridimensionnelle et ses propriétés.

Cette réversibilité du réseau permet à ces polymères de faire chuter fortement leur viscosité avec l'élévation de température et donc de posséder des caractéristiques analogues à celles des thermoplastiques lors de leur fabrication [72]. Cette aspect permet donc aux vitrimères d'être mis en œuvre par les procédés conventionnels tels que le thermoformage voire même l'extrusion/injection, déjà largement rependues dans l'industrie de la plasturgie. Cette propriété permet également aux vitrimères d'envisager une certaine recyclabilité.

Par ailleurs, des études ont montré que les vitrimères peuvent également présenter une capacité d'auto-réparation [73]. Aussi, il est possible d'imaginer qu'après avoir été soumis à une forte sollicitation mécanique, les endommagements matriciels engendrés sur un matériau composite tels que des fissures et des délaminages pourraient être réparés en appliquant un stimulus thermique [74], [75]. La capacité des vitrimères à réarranger leurs réseaux pourrait ainsi permettre d'effacer ces défauts et récupérer les propriétés initiales de la pièce. De la même façon, la suppression d'une fissure voire la recombinaison de la matière vitrimère après rupture peut être envisagée [76], [77]. Il en est de même pour le soudage de deux pièces entre elles qui par élévation de température pourrait permettre aux composites de s'affranchir des problématiques de collage et d'utilisation de rivets (Figure 117).

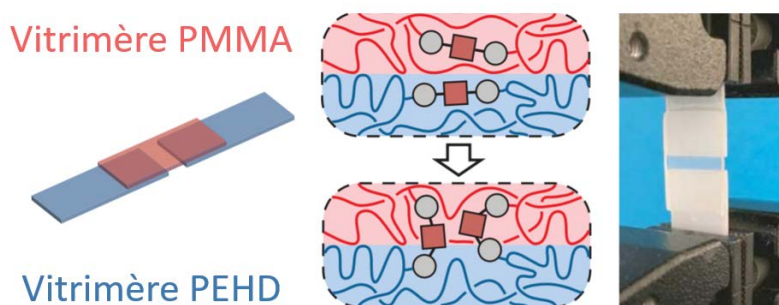


Figure 117 : échantillons de deux polymères thermoplastiques modifiés en vitrimères (PMMA et HDPE) soudés l'un à l'autre [72].

Actuellement, les vitrimères développés présentent une contrainte maximale à rupture similaire aux résines époxy commerciales mais présentent un module en traction plus faible (Tableau 42).

	Module en traction (GPa)	Contrainte à rupture en traction (MPa)	Allongement à la rupture	Source
Epoxy SR 8500 / SD 1213 (Sicomim)	2,6 – 2,9	49 – 57	3,5 – 5,8	[78]
PP homopolymère générique	1,2 – 1,9	29 – 40	6,5 – 11,0	[79]
Nylon 6 générique	1,5 – 3,7	44 – 91	1,5 – 7,5	[79]

Vitrimère	0,6 – 1,8	42 – 67	3,0 – 9,8	[75], [77], [80]
-----------	-----------	---------	-----------	---------------------

Tableau 42 : Propriétés mécaniques des vitrimères comparées à d'autres polymères TD / TP.

Ces dix dernières années, des études ont été menées afin d'amorcer la transition des réseaux thermodurcissables vers des réseaux vitrimères [72], [81]. Cette nouvelle classe de polymères se trouve dans sa période de maturité où ses principaux enjeux permettant son entrée dans le domaine industriel sont encore à l'étude. Les vitrimères doivent notamment proposer des matières premières abordables [82], [83], et surtout des procédés de fabrication et de mise en œuvre à grande échelle en utilisant des outils existants.

L'application à l'échelle industrielle se limite notamment sur leur cadence de production, inférieure à celle des composites conventionnels. Les vitrimères ont en effet des temps de relaxation plus lents que les résines thermodurcissables, du fait de la vitesse de réactions d'échanges entre les nœuds évoqués plus tôt. Cela a notamment pour effet de diminuer la cadence de production. La difficulté d'atteindre des échanges rapides, avec une viscosité assez faible et sans dégradation thermique, reste à ce jour une limitation considérable pour les applications industrielles. La baisse de viscosité et le thermoformage avec une bonne imprégnation des renforts est généralement atteinte pour des températures avoisinant 200 °C [81], ce qui implique une éventuelle dégradation thermique de la matrice et donc une grande diminution des propriétés du matériau.

La société américaine Mallinda (Denver, Colorado, U.S.A.) a commencé à appliquer les vitrimères aux composites de manière industrielle, avec la fabrication de résines réactives ou de préimprégnés [84], [85]. Leurs deux résines, Vitramax® T60 et T180 sont respectivement dédiées aux domaines du sport (ski, surf) et de l'automobile (pièces de structure).

4.3.3. Axe contrôle

En réponse à la complexification des gisements de déchets, les avancées technologiques permettent d'aller toujours plus loin dans la séparation et le tri des flux complexes. Les centres de recherche travaillent depuis de nombreuses années à l'amélioration et au développement de procédés innovants, dont les principales techniques sont les spectroscopies NIR (Near Infra Red), Raman et la LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy). Les filières de recyclage industriel des composites étant à ce jour peu développées (TRL faible), ces techniques sont pour le moment principalement appliquées au tri et à l'identification des plastiques.

Déjà utilisée depuis de nombreuses années pour le tri des plastiques, la spectrométrie NIR est largement présente sur les lignes de tri industriel automatisées. Basée sur l'analyse d'un spectre de réflexion dont la signature révèle la structure des molécules, cette technologie permet d'identifier les phases organiques des matériaux. Elle se limite toutefois à une analyse de surface, et est difficilement applicable aux matériaux sombres (noirs).

La spectroscopie Raman est très similaire et complémentaire à la NIR. Cette technologie repose sur l'analyse des vibrations moléculaires (diffusion Raman), après excitation de la surface du matériau par un faisceau lumineux. Largement utilisée par les laboratoires d'analyse de matériaux, des travaux se poursuivent pour pouvoir trier à grande vitesse toutes les natures et couleurs de plastiques. Son coût élevé reste toutefois un frein à son déploiement à grande échelle.

Technologie complémentaire au NIR et au Raman, la LIBS est une technique d'analyse chimique rapide par spectrométrie d'émission optique de plasma induit par laser. Elle permet de fournir très rapidement des informations très précises sur la nature et la composition des matériaux. Cette technologie est aujourd'hui considérée comme porteuse dans de nombreux domaines. Particulièrement adaptée aux matériaux contenant des hétéroatomes. Dans l'industrie des plastiques, elle peut par conséquent présenter un intérêt pour l'identification de certaines matières (chlore dans le PVC), de certaines charges ou additifs (chlore, brome, phosphore, présents dans les retardateurs de flamme...). Elle permet également de répondre à certaines réglementations (métaux lourds, RoHS), en offrant par ailleurs l'avantage de pouvoir traiter des matières de couleur sombre.

4.4. Synthèse des technologies de revalorisation des matériaux composites

Le Tableau 43 présente les principales solutions de recyclage des composites.

Technologie	Avantages	Limites	Indication de coûts ²
Réemploi	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation de l'intégralité du matériau 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de transport pour des pièces de grande envergure 	Variable suivant application
Réutilisation	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité de valorisation de l'assemblé du matériau - Large spectre d'utilisation pour les produits non-consolidés 	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - Faible coût de mise en œuvre - Recyclage intégral du matériau composite - Versatilité du procédé - Capacité à traiter de grande quantité de matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> - 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 [86]
Recyclage thermique	<ul style="list-style-type: none"> - 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 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de mise en œuvre - Production de gaz (CO et CO₂) - Détérioration des propriétés des fibres de verre 	De l'ordre de 11-17 €/Kg [86]
Recyclage chimique	<ul style="list-style-type: none"> - 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 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de mise en œuvre - Utilisation de solvant pouvant présenter des risques de toxicité et une gestion de fin de vie - Détérioration des propriétés de la fibre de verre 	De l'ordre de 11-17 €/Kg [86]

² Les montants indiqués dans ce tableau sont extraits d'une publication dans le JEC Observer. Ces valeurs indiquées sont issues d'estimations, présentées afin d'évaluer l'attractivité relative des différentes solutions.

	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		
Valorisation énergétique	- Faible coût de mise en œuvre - Recyclage intégral du matériau composite - Valorisation possible de l'ensemble des produits générés (cendres et fibres)	- Production de gaz (CO et CO ₂) - 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 (TGAP)	0,12-0,18 €/Kg (TGAP incluses)

Tableau 43 : Synthèse des technologies de revalorisation des composites.

Le Tableau 44 donne, de manière indicative, la consommation énergétique pour différentes technologies de revalorisation. Cette consommation énergétique est un indicateur important pour le coût environnementale et économique de la technologie.

Les coûts énergétiques ont été largement étudiés sur les composites renforcés par des fibres de carbone. Les techniques de recyclage visent à séparer la fibre de la résine. En conséquence, pour un procédé donné, un coût énergétique équivalent est attendu pour les CFRP et les GFRP.

Fibre concernée	Procédé	Coût énergétique (MJ/kg)	Source
Carbone	Fabrication	200 – 600	[52], [53]
	Recyclage mécanique	0,3 – 2	[87]
	Pyrolyse	3 – 30	[88], [89]
	Solvolyse	19,2	[90]
	Lit fluidisé	7,7	[52]
Verre	Fabrication	14 – 35	[86]

Tableau 44 : Coût énergétique pour l'obtention de fibres de carbone pour différentes techniques de recyclage ou de fabrication.

4.5. L'équilibre économique

L'équilibre économique est basé sur les filières de gestion de la fin de vie des composites actuellement en place en France. A ce jour, il s'agit essentiellement de l'enfouissement et de la valorisation en CSR.

4.5.1. Enfouissement

L'enfouissement est soumis à la Taxe Générale sur les Activités Polluantes (TGAP). La trajectoire d'augmentation de la TGAP prévoit une taxation à un taux unique de 65 € la tonne réceptionnée en stockage en 2025 contre 25 à 42 €/t en 2020. A cette hausse de la fiscalité doit également être intégrée la pression financière résultant de la hausse des tarifs de stockage induite dès 2019 par la diminution de l'offre face à la demande.

Actuellement, le coût du stockage est de 120 et 180 €/t selon les régions, TGAP comprise, auxquels il faut ajouter les frais de transport des déchets. A noter que les frais de transport pour les déchets sont estimés à 90 €/h de transport, selon le magazine « recyclage et récupération » d'octobre 2021.

La Figure 118 montre la chaîne de la valeur de la gestion de la fin de vie des matériaux composites par enfouissement en Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND). L'exemple d'un bateau de plaisance ou de sport géré par l'APER est utilisé. Notons que, pour les déchets industriels, un centre de stockage/tri peut se substituer au centre agréé par l'APER.

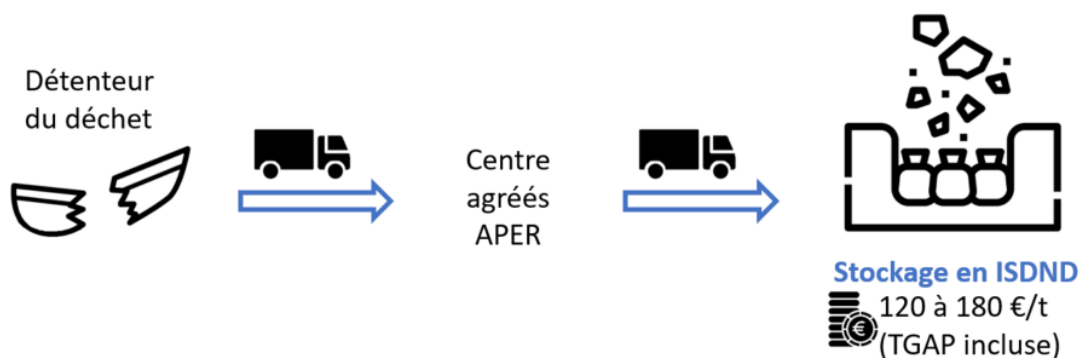


Figure 118 : Chaîne de la valeur pour les techniques d'enfouissement. Exemple d'un bateau de plaisance ou de sport. (crédit : IPC)

4.5.2. Valorisation en CSR

En 2021, l'association AMORCE a identifié 36 installations de production de Combustible Solide de Récupération (CSR) à partir de déchets non dangereux, sur l'ensemble du territoire national, hors résidus de broyage automobiles. L'étude montre que 84 % des tonnages de CSR produits sont ainsi orientés vers les cimenteries pour seulement 8% en chaufferie et 2 % en four à chaux [91]. Les sites de CSR français sont présentés au Chapitre 5.

Un peu plus de la moitié de la matière est valorisée, soit sous forme de valorisation matière (15 %) soit sous forme de valorisation énergétique (37 %). Il est également présenté que 47 % de la matière est envoyée en refus. A 90 %, l'exutoire pour les refus de CSR est le stockage en Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND, anciennement appelée centre d'enfouissement technique).

Le coût total de préparation d'une tonne de CSR prend en compte l'ensemble des charges liées à l'unité, des investissements et des recettes. L'enquête AMORCE indique que ce coût s'échelonne entre 39 € et 150 € HT la tonne, la moyenne étant située à environ 100 €/t. Il faut également noter que les unités de préparation de CSR payent une redevance auprès de l'exutoire de valorisation pour la reprise de leurs CSR, qui s'ajoute au coût de transport. La redevance est comprise entre 3 et 55 € la tonne pour une moyenne à 21 €/t. Les coûts de transport vers la filière cimentière et chaufferies varient quant à eux de 10 à 55 € HT/t pour une moyenne de 26 €/t.

La chaîne de la valeur de la valorisation en CSR est présentée sur la Figure 119. L'exemple d'un bateau de plaisance ou de sport géré par l'APER est utilisé.

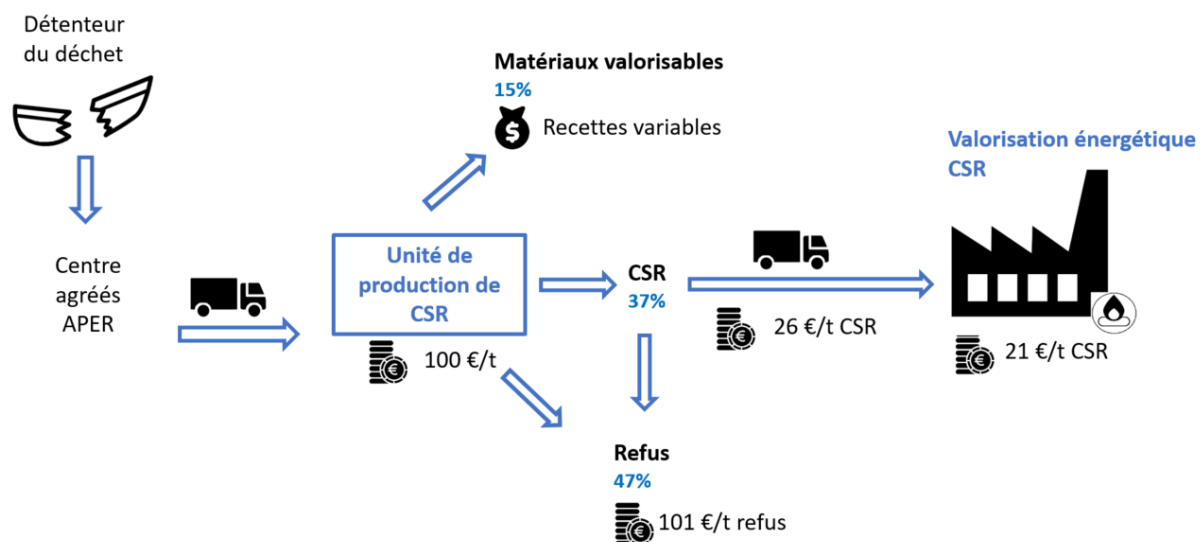


Figure 119 : Chaîne de la valeur de la filière CSR, adapté de [91]. Exemple d'un bateau de plaisance ou de sport.

Sur la base des éléments collectés par l'étude [91], le coût moyen de traitement du CSR est de 165 €/t, calculé comme une moyenne pondérée des deux exutoires suivants :

- 150 €/t pour la matière valorisée énergétiquement ;
- 200 €/t pour les refus de tri.

Les recettes associées à la valorisation des matières n'ont pas été prises en considération, car elles sont difficilement quantifiables a priori. Les frais de gestion des déchets en amont de l'unité de production du CSR n'ont pas non plus été considérés dans l'étude AMORCE (frais de collecte et de transport).

4.6. Références bibliographiques

- [1] CRECOF, IPC, et ADEME, « Guide du recyclage des composites », 2017.
- [2] ADEME *et al.*, « Bateaux de plaisance et de sport – données 2019 - Rapport annuel », ADEME, 2020.
- [3] Capgemini Invent et France Energie Eolienne, « Observatoire de l'éolien 2020 Analyse du marché, des emplois et des enjeux de l'éolien en France », sept. 2020.
- [4] DHUP et CEREMA, « guide RE 2020 ». Consulté le: 25 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: http://www.rt-batiment.fr/IMG/pdf/guide_re2020_dhup-cerema.pdf
- [5] ADEME, « Mémo REP 2021, Données 2019 », ADEME, 2021.
- [6] ADEME, « Déchets Chiffres-clés - L'essentiel 2018 », ADEME, 2019.
- [7] APER, « Site internet ». Consulté le: 4 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: www.recyclermonbateau.fr
- [8] Deloitte Développement Durable *et al.*, « Etude préalable à la mise en place de la filière de collecte et de traitement des navires de plaisance ou de sport hors d'usage sous la responsabilité des producteurs REP », ADEME, 2016.
- [9] S. Papin, « Matériaux composites et solutions durables: de la conception à la fin de vie », Arc Environnement, 2020.
- [10] D. Romero, « Recycling blades session 2: making the most of the existing solutions », présenté à EOLIS2021, Bruxelles, nov. 2021.
- [11] L. Mishnaevsky, « Sustainable End-of-Life Management of Wind Turbine Blades: Overview of Current and Coming Solutions », *Materials*, vol. 14, n° 5, 2021, doi: 10.3390/ma14051124.
- [12] C. Schumacher, « How to extend the lifetime of wind turbine », *Renewable Energy World*, 2019.
- [13] P. Dvorak, « Repower or Refit? That is the question », *Wind Power Engineering*, 2014.
- [14] K. Ortegon, L. F. Nies, et J. W. Sutherland, « Preparing for end of service life of wind turbines », *Journal of Cleaner Production*, vol. 39, p. 191-199, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.022>.
- [15] I. Joeman, « Alternatives on afterlife use of amortized wind turbine blades in the Netherlands ». août 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://essay.utwente.nl/79590/>
- [16] J. Joustra, B. Flipsen, et R. Balkenende, « Structural reuse of high end composite products: A design case study on wind turbine blades », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 167, p. 105393, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105393>.

- [17] J. Beauson et P. Brøndsted, « Wind Turbine Blades: An End of Life Perspective », in *MARE-WINT: New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology*, W. Ostachowicz, M. McGugan, J.-U. Schröder-Hinrichs, et M. Luczak, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2016, p. 421-432. doi: 10.1007/978-3-319-39095-6_23.
- [18] R. Suhail, J.-F. Chen, R. Gentry, B. Taristro-Hart, Y. Xue, et L. Bank, « Analysis and Design of a Pedestrian Bridge with Decommissioned FRP Windblades and Concrete », juin 2019.
- [19] J. Rybicka, A. Tiwari, et G. A. Leeke, « Technology readiness level assessment of composites recycling technologies », *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, p. 1001-1012, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.104>.
- [20] P. Krawczak, « Recyclage des composites », *Techniques de l'ingénieur*, n° AM5895 V1, 2011.
- [21] X. Li, R. Bai, et J. McKechnie, « Environmental and financial performance of mechanical recycling of carbon fibre reinforced polymers and comparison with conventional disposal routes », *Journal of Cleaner Production*, vol. 127, p. 451-460, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.139>.
- [22] S. Jlassi, « Composites à fibres de carbone recyclés: Variabilité des sources et optimisation des performances mécaniques », Thèse, Université de Toulouse, 2019.
- [23] S. J. Pickering, « Recycling technologies for thermoset composite materials—current status », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, n° 8, p. 1206-1215, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.030>.
- [24] J. Scheirs, *Polymer Recycling: Science, Technology and Applications*, Wiley, 1998.
- [25] JEC Group, « JEC Composites, un projet pour recycler les fibres de carbone en nouveaux matériaux composites », 2015. Consulté le: 26 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.jeccomposites.com/news/un-projet-pour-recycler-les-fibres-de-carbone-en-nouveaux-materiaux-composites/>
- [26] J. Palmer, O. R. Ghita, L. Savage, et K. E. Evans, « Successful closed-loop recycling of thermoset composites », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, n° 4, p. 490-498, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.02.002>.
- [27] C. E. Kouparitsas, C. N. Kartalis, P. C. Varelidis, C. J. Tsenoglou, et C. D. Paspaspyrides, « Recycling of the fibrous fraction of reinforced thermoset composites », *Polymer Composites*, vol. 23, n° 4, p. 682-689, 2002, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.10468>.
- [28] 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, n° 2, p. 121-131, 2007, doi: 10.1051/mattech:2007037.
- [29] S. Pimenta et S. T. Pinho, « Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook », *Waste Management*, vol. 31, n° 2, p. 378-392, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.019>.
- [30] J. Paben, « Company expands wind turbine recycling operation », 27 mars 2019. Consulté le: 20 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://resource-recycling.com/plastics/2019/03/27/company-expands-wind-turbine-recycling-operation/>
- [31] Innovatech, « Une nouvelle matière créée à partir de la revalorisation des plastiques thermodurcissables, Salon des Innovations Wallones, 2020 ». Consulté le: 23 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.innovationswallones.be/fr/innovations/une-nouvelle-matiere-creee-partir-de-la-revalorisation-des-plastiques#no-back>
- [32] M. Vilkki, « Volume opportunities for remanufacturing GFRP-waste; test results & applications », présenté à Wind Turbine Blade Manufacture 2019, Allemagne, déc. 2019.
- [33] Y. Yang, R. Boom, B. Irion, D.-J. van Heerden, P. Kuiper, et H. de Wit, « Recycling of composite materials », *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 51, p. 53-68, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.09.007>.
- [34] K. Larsen, « Recycling wind », *Reinforced Plastics*, vol. 53, févr. 2009, doi: 10.1016/S0034-3617(09)70043-8.
- [35] A. M. Cunliffe, N. Jones, et P. T. Williams, « Pyrolysis of composite plastic waste », *Environmental Technology*, vol. 24, n° 5, p. 653-663, 2003, doi: 10.1080/09593330309385599.
- [36] 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, n° 9, p. 1121-1132, 2009, doi: 10.1177/0021998308097737.
- [37] G. Oliveux, L. O. Dandy, et G. A. Leeke, « Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties », *Progress in Materials Science*, vol. 72, p. 61-99, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>.
- [38] R. Bernatas, S. Dagreou, A. Despax-Ferreres, et A. Barasinski, « Recycling of fiber reinforced composites with a focus on thermoplastic composites », *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 5, p. 100272, déc. 2021, doi: 10.1016/j.clet.2021.100272.

- [39] G. Oliveux *et al.*, « Recyclage par solvolysé des matériaux composites thermodurcissables du transport de surface », présenté à EventMateriaux 2010, Nantes, France, 2010.
- [40] J. Onwudili, E. Yildirim, et P. Williams, « Catalytic Hydrothermal Degradation of Carbon Reinforced Plastic Wastes for Carbon Fibre and Chemical Feedstock Recovery », *Waste and Biomass Valorization*, vol. 4, mars 2013, doi: 10.1007/s12649-013-9204-4.
- [41] 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, n° 11, p. 1809-1818, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.06.008>.
- [42] 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>.
- [43] L. Yuyan, S. Guohua, et M. Linghui, « Recycling of carbon fibre reinforced composites using water in subcritical conditions », *Materials Science and Engineering: A*, vol. 520, n° 1, p. 179-183, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.05.030>.
- [44] FEDEREC et COMPTE-R, « Combustibles solides de récupération (CSR), Caractérisation et évaluation de leurs performances en combustion », ADEME, 2015.
- [45] R. N. Walters, S. M. Hackett, et R. E. Lyon, « Heats of combustion of high temperature polymers », *Fire and Materials*, vol. 24, n° 5, p. 245-252, 2000, doi: [https://doi.org/10.1002/1099-1018\(200009/10\)24:5<245::AID-FAM744>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/1099-1018(200009/10)24:5<245::AID-FAM744>3.0.CO;2-7).
- [46] P. A. Kittle, « Alternate daily cover materials and subtitle D - the selection technique », Rusmar Incorporated West Chester, PA, juin 1993.
- [47] C. Moncel, « CSR : une production française de 2,5 millions de t/an d'ici 2025 », *L'écho circulaire*, 1 juillet 2021. Consulté le: 16 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://lecho-circulaire.com/la-france-produira-25-mt-an-de-csr-dici-a-2025/>
- [48] Suschem, Cefic, et Bax & Company, « Polymer Composites Circularity - White paper », Suschem, White paper, 2018.
- [49] S. J. Pickering, R. M. Kelly, J. R. Kennerley, C. D. Rudd, et N. J. Fenwick, « A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites », *Composites Science and Technology*, vol. 60, n° 4, p. 509-523, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00154-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00154-2).
- [50] J. R. Kennerley, R. M. Kelly, N. J. Fenwick, S. J. Pickering, et C. D. Rudd, « The characterisation and reuse of glass fibres recycled from scrap composites by the action of a fluidised bed process », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 29, n° 7, p. 839-845, juill. 1998, doi: 10.1016/S1359-835X(98)00008-6.
- [51] S. Pickering *et al.*, « Developments in the fluidised bed process for fibre recovery from thermoset composites », présenté à 2nd Annual Composites and Advanced Materials Expo, CAMX 2015, Dallas, Texas USA, oct. 2015.
- [52] 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.
- [53] W. Carberry, « Airplane Recycling Efforts, aero quarterly », vol. aeromagazine, 2008.
- [54] H. L. H. Yip, S. J. Pickering, et C. D. Rudd, « Characterisation of carbon fibres recycled from scrap composites using fluidised bed process », *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 31, n° 6, p. 278-282, juin 2002, doi: 10.1179/146580102225003047.
- [55] E. Pakdel, S. Kashi, R. Varley, et X. Wang, « Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 166, p. 105340, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105340>.
- [56] E. Seiler, H. Urban, et U. Teipel, « Mikrowellenpyrolyse von carbonfaserhaltigen Kunststoffen als Recyclingoption », *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 92, mars 2020, doi: 10.1002/cite.201900133.
- [57] K. Obunai, T. Fukuta, et K. Ozaki, « Carbon fiber extraction from waste CFRP by microwave irradiation », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 78, p. 160-165, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.012>.
- [58] E. Lester, S. Kingman, K. Wong, C. Rudd, S. Pickering, et N. Hilal, « Microwave heating as a means for carbon fibre recovery from polymer composites: A technical feasibility study », *Materials Research Bulletin*, vol. 39, p. 1549-1556, août 2004, doi: 10.1016/j.materresbull.2004.04.031.
- [59] H. Bluhm, W. Frey, H. Giese, P. Hoppe, C. Schultheiss, et R. Strassner, « Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7, n° 5, p. 625-636, 2000, doi: 10.1109/94.879358.
- [60] H. Sun *et al.*, « Recycling of carbon fibers from carbon fiber reinforced polymer using electrochemical method », *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 78, p. 10-17, août 2015, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.07.015.

- [61] D. Rouholamin, T. Shyng, L. Savage, et O. Ghita, « A comparative study into mechanical performance of glass fibres recovered through mechanical grinding and high voltage pulse power fragmentation », *16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014*, janv. 2014.
- [62] P. T. Mativenga, N. A. Shuaib, J. Howarth, F. Pestalozzi, et J. Woidasky, « High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite », *CIRP Annals*, vol. 65, n° 1, p. 45-48, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.107>.
- [63] N. A. Shuaib et P. T. Mativenga, « Carbon Footprint Analysis of Fibre Reinforced Composite Recycling Processes », *Procedia Manufacturing*, vol. 7, p. 183-190, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.046>.
- [64] M. Rani, P. Choudhary, V. Krishnan, et S. Zafar, « A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades », *Composites Part B: Engineering*, vol. 215, p. 108768, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108768>.
- [65] A. Monti, « Élaboration et caractérisation mécanique d'une structure composite sandwich à base de constituants naturels », Theses, Université du Maine, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01442610>
- [66] Arkema, « Elium by Arkema, Liquid thermoplastic resin for tougher composites ».
- [67] D. Montarnal, M. Capelot, F. Tournilhac, et L. Leibler, « Silica-Like Malleable Materials from Permanent Organic Networks », *Science*, vol. 334, n° 6058, p. 965-968, nov. 2011, doi: 10.1126/science.1212648.
- [68] E. Chabert, J. Vial, J.-P. Cauchois, M. Mihaluta, et F. Tournilhac, « Multiple welding of long fiber epoxy vitrimer composites », *Soft Matter*, vol. 12, n° 21, p. 4838-4845, 2016, doi: 10.1039/C6SM00257A.
- [69] W. Alabiso et S. Schlögl, « The Impact of Vitrimers on the Industry of the Future: Chemistry, Properties and Sustainable Forward-Looking Applications », *Polymers*, vol. 12, n° 8, 2020, doi: 10.3390/polym12081660.
- [70] K. Baumgarten et B. P. Tighe, « Viscous forces and bulk viscoelasticity near jamming », *Soft Matter*, vol. 13, n° 45, p. 8368-8378, 2017, doi: 10.1039/C7SM01619K.
- [71] W. Denissen, J. M. Winne, et F. E. Du Prez, « Vitrimers: permanent organic networks with glass-like fluidity », *Chem. Sci.*, vol. 7, n° 1, p. 30-38, 2016, doi: 10.1039/C5SC02223A.
- [72] M. Röttger, T. Domenech, R. van der Weegen, A. Breuillac, R. Nicolaÿ, et L. Leibler, « High-performance vitrimers from commodity thermoplastics through dioxaborolane metathesis », *Science*, vol. 356, n° 6333, p. 62-65, avr. 2017, doi: 10.1126/science.aah5281.
- [73] 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, n° 3, p. 241-247, 2016, doi: 10.1039/C6MH00029K.
- [74] M. R. Wisnom, « The role of delamination in failure of fibre-reinforced composites », *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 370, n° 1965, p. 1850-1870, 2012, doi: 10.1098/rsta.2011.0441.
- [75] M. Kamble *et al.*, « Reversing fatigue in carbon-fiber reinforced vitrimer composites », *Carbon*, vol. 187, p. 108-114, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.10.078>.
- [76] R. L. Snyder, D. J. Fortman, G. X. De Hoe, M. A. Hillmyer, et W. R. Dichtel, « Reprocessable Acid-Degradable Polycarbonate Vitrimers », *Macromolecules*, vol. 51, n° 2, p. 389-397, janv. 2018, doi: 10.1021/acs.macromol.7b02299.
- [77] Z. Yang, Q. Wang, et T. Wang, « Dual-Triggered and Thermally Reconfigurable Shape Memory Graphene-Vitrimer Composites », *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 8, n° 33, p. 21691-21699, août 2016, doi: 10.1021/acsami.6b07403.
- [78] Sicomin, « Fiche technique SR 8500 / SD 7160 / SD 1213 », janv. 2014.
- [79] UL Prospector, « Extrait de la base de données Prospector Pro IDES », 2022.
- [80] W. Zhao *et al.*, « Vitrimer-Cellulose Paper Composites: A New Class of Strong, Smart, Green, and Sustainable Materials », *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, n° 39, p. 36090-36099, oct. 2019, doi: 10.1021/acsami.9b11991.
- [81] M. M. Obadia, A. Jourdain, P. Cassagnau, D. Montarnal, et E. Drockenmuller, « Tuning the Viscosity Profile of Ionic Vitrimers Incorporating 1,2,3-Triazolium Cross-Links », *Adv. Funct. Mater.*, vol. 27, n° 45, p. 1703258, déc. 2017, doi: 10.1002/adfm.201703258.
- [82] S. Binauld, D. Dameron, T. Hamaide, J.-P. Pascault, E. Fleury, et E. Drockenmuller, « Click chemistry step growth polymerization of novel α -azide- ω -alkyne monomers », *Chem. Commun.*, n° 35, p. 4138-4140, 2008, doi: 10.1039/B805164J.
- [83] J. Bernard, E. Drockenmuller, E. Fleury, J.-P. Pascault, et L. Fontaine, « "La chimie click" : Quelles perspectives pour les polymères ? », *L'Actualité Chimique, Société chimique de France*, p. 51-56, 2010.
- [84] J. Sloan, « Vitrimers: The Reprocessable Thermoset ». Consulté le: 18 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.compositesworld.com/articles/vitrimers-the-reprocessable-thermoset>

- [85] D. A. Kissounko, P. Taynton, et C. Kaffer, « New material: vitrimers promise to impact composites », *Reinforced Plastics*, vol. 62, n° 3, p. 162-166, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.repl.2017.06.084>.
- [86] JEC Group et Estin, « Current trends in the global composites industry, JEC Observer », JEC Group, 2021.
- [87] 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.
- [88] 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, n° 8, p. 1257-1265, août 2009, doi: 10.1016/j.compositesa.2009.05.020.
- [89] 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, n° 11, p. 1694-1709, nov. 2011, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.07.024.
- [90] 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.
- [91] AMORCE, « État des lieux national des unités de préparation de Combustibles Solides de Récupération », DT-126, mai 2021.

5. Annuaire des acteurs du traitement des déchets composites

Cette dernière partie consiste en la consolidation d'un annuaire exhaustif des entreprises françaises capables de traiter des déchets composites (ou de leurs éléments constitutifs). Nous y mentionnons également les acteurs nationaux de R&D les plus dynamiques. Par ailleurs, les fournisseurs de solutions les plus attractives hors du territoire national sont listés, ainsi que les exutoires les plus intéressants connus dans le reste du monde.


Les informations présentées dans ce chapitre ont été collectées sur la base d'entretiens, d'articles de presse, d'articles de revue et sur les sites des différents acteurs. Les informations présentées dans ce chapitre sont une synthèse des éléments collectés ou portés à notre connaissance, sur un domaine – le recyclage des composites – très dynamique. De nombreux projets se lancent actuellement sur le recyclage des composites. La liste des acteurs va probablement évoluer rapidement à court/moyen terme.

Toutes les sociétés ont été classées par ordre alphabétique. Les acteurs présents sur les fibres de verre ont été colorés afin de faciliter leur identification.

5.1. Entretiens avec les acteurs français de la fin de vie des composites

La plupart des acteurs de la fin de vie des composites a été interviewé dans le cadre de cette étude. Cette section vise à restituer de façon synthétique les solutions proposées par ces industriels.

Société : Alpha Recyclage Composite (ARC)	Matériaux : CFRP
Marché(s) : Nautisme, automobile, aéronautique, éolien, sport & loisirs	Maturité : Pilote industriel TRL8-9 Capacité de traitement : 1 tonne/j
<p>Concept : ARC est positionné comme un valorisateur de fibres carbone recyclées grâce à la technologie de vapo-thermolyse. 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.</p> <p>Matériaux traités en entrée : Fibres sèches ensimées jusqu'aux composites à base thermodurcissable (déchet d'usage, raté de fabrication, fin de vie, démantèlement).</p> <p>Produits vendus : Fibres en vrac : fibres broyées, fibres courtes et fibres longues. Semi-produits : mat de 200 à 500gsm en fibres de carbone recyclées, éventuellement comélées.</p>	 <p>ALPHARECYCLAGE COMPOSITES</p>
<p>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 autres solutions de traitement et rester compétitif par rapport aux produits renforcés de fibres de carbone vierges.</p> <p>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.</p>	

Société : Apply Carbon	Matériaux : CFRP
Marché(s) : Automobile, coating, renfort cimentaire, impression 3D, textiles techniques	Maturité : Echelle industrielle TRL 9 Production : Jusqu'à 2000 t fibres/an
<p>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.</p> <p>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.</p> <p>Produits vendus : Fibres broyées (75 à 300 µm), fibres coupées (300 µm à 120 mm), fibres surensimées et coupées (6mm).</p>	
<p>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.</p> <p>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.</p> <p style="text-align: right;">Contact : contact@apply-carbon.fr, +33 (0)2 97 65 10 89</p>	

Société : Bathô	Matériaux : GFRP
Marché(s) : Tourisme, particuliers, entreprises, commerces, collectivités	Maturité : 25 bateaux/an ; 100 bateaux/an 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 fibré de 6 à 16 m.

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



Modèle économique : 70% de coûts de main d'œuvre (combinée avec une activité de formation). Statut ESS.
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 fondations 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

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
<p>Concept : Extractive propose une technologie de traitement des matériaux composites thermodurcissables et thermoplastiques basée sur le procédé de solvolyse. 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.</p> <p>Matériaux traités en entrée : Matériaux composites thermodurcissables et quelques thermoplastiques renforcés de fibres de carbone de tout format (fibres longues, courtes, etc...).</p> <p>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.</p>	  www.extractive-industry.com


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 : 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
<p>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 a minima 55% de la performance du composite recyclé.</p> <p>Matériaux traités en entrée : Composites à base de fibres de carbone sous forme de préimprégnés crus ou cuits, de semi-produits consolidés, pièces finies.</p> <p>Produits vendus : Vente de produits qui incorpore de la matière composite recyclée sous forme de laminés et vente de copeaux.</p>	
<p>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.</p> <p>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.</p>	
Contact : sales@fairmat.tech	

Société : Hopper	Matériaux : CFRP / GFRP
Marché(s) : Handisport	Maturité : Commerciale TRL 9 Volume réemploi : Actuellement 350 kg/an

<p>Concept : 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.</p> <p>Matériaux utilisés en entrée : Fin de bobines de préimprégnés therm durcissables à base de fibres de carbone et fibres de verre (dans une moindre mesure).</p> <p>Produits vendus : Lames de course disponibles d'ici le printemps 2022.</p>	 <p>The image shows a curved black component with 'HOPPER' written on it, flanked by two circular images of carbon fiber material. Below is the Hopper logo with the tagline 'INNOVATION SPORT ACCESSIBILITY'.</p>
<p>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.</p> <p>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.</p> <p style="text-align: right;">Contact : direction@hopper-accessibility.com</p>	

<p>Société : Lavoisier Composites</p>	<p>Matériaux : CFRP</p>
<p>Marché(s) : Pièces d'aspect (luxe, hifi, automobile, aéronautique) et pièces de structures</p>	<p>Maturité : Technologie disponible Capacité de production : Séries > 15 000 pc dès 2022</p>
<p>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 œuvre pour la fourniture de pièces moulées.</p> <p>Matériaux traités : Sous-produits de préimprégnés therm durcissables (non réticulés) et thermoplastiques disposant d'une traçabilité.</p> <p>Produits vendus : Développement et fabrication de pièces composites associant performances mécaniques et environnementales pour des applications d'aspect et de structure.</p>	 <p>The image shows two dark composite parts. Logos for AIRBUS BizLab Aerospace Accelerator, Lavoisier, and a circular award from 'L'ESPRIT' 2019 are visible.</p>
<p>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.</p> <p>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.</p> <p style="text-align: right;">Contact : bonjour@lavoisier-composites.com, +33 (0)4 81 68 11 67</p>	

Société : Recycling-Carbon	Matériaux : CFRP
Marché(s) : tous marché – focalisé sur la fibre de carbone	Maturité : variable suivant maturité du projet client
<p>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.</p> <p>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.</p> <p>Produits vendus : Analyse de faisabilité, par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réemploi pour la structure d'un drone ; • Vélo cargo à partir de chutes de production. 	
<p>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.</p> <p>Réduction de l'impact environnemental : La réduction de l'impact environnemental est au cœur de l'action de Recycling-Carbon. Les 4 piliers de l'association sont tous orientés en faveur de l'économie circulaire.</p> <p style="text-align: right;">Contact : contact@recycling-carbon.org</p>	

Société : Vanheede Environnement SAS	Matériaux : GFRP
Marché(s) : CSR à haut PCI	Maturité : production 140 000 t/an
<p>Concept : Vanheede gère la logistique du déchet, la préparation et l'expédition chez le client.</p> <p>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%)</p> <p>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).</p>	 
<p>Modèle économique : La prestation d'enlèvement des déchets est facturée à l'émetteur de déchet. Vanheede est facturé par le cimentier pour réincorporer le CSR. Tous les coûts de traitement du déchet sont supportés par l'émetteur du déchet.</p> <p>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.</p> <p style="text-align: right;">Contact : offre.fr@vanheede.com +33 (0)3 21 18 17 62</p>	

5.2. Principaux acteurs – France

Entité	Pays	Type de revalorisation	Activités de recyclage et d'écoconception des composites	Matériaux	Applications	Site internet / contact
Alpha Recyclage Composite	FR	Recyclage chimique	Recyclage de fibres sèches ensimées jusqu'aux composites à base therm durcissable ; recyclage par une technologie de vapo thermolyse	CFRP	Fibres broyées et fibres longues pour non-tissés (comelés, surpiqués), filature, fibres en vrac et mise en œuvre sous forme structurée.	http://www.arcomposites.com/
Apply Carbon (Procotex)	FR	Recyclage mécanique	Recyclage de fibres de carbone/aramide sèches à destination des marchés suivants : Automobile, coating, renfort cimentaire, impression 3D, textiles techniques	CFRP	Fibres broyées (75 à 300 µm), fibres coupées (300 µm à 120 mm), fibres surensimées et coupées (6mm)	http://apply-carbon.com/
Bathô	FR	Réutilisation	Réutilisation de bateaux hors d'usage	GFRP	Fabrication d'hébergements insolites à destination du marché du plein air	https://www.batho.fr/
ETIA	FR	Recyclage thermique	Fabrication d'équipements de pyrolyse	GFRP / CFRP		https://etia-group.com/
Extractive	FR	Recyclage chimique	Traitement par thermosolvolyse de matériaux composites therm durcissables renforcés de fibres de carbone de tout format (fibres longues, courtes, etc...)	CFRP	Une commercialisation de la production de fibres est prévue dès 2023	https://www.extractive-industry.com/

Fairmat	FR	Recyclage mécanique	Recyclage de composites à base de fibres de carbone sous forme de préimprégnés crus ou cuits, semi-produits consolidés, pièces finies.	CFRP	Produits semi-finis consolidés à plat ou en forme et produits finis	https://www.fairmat.tech/recycling/
Hopper	FR	Réemploi	Fabrication d'articles de sport et loisirs à partir de chutes de production aéronautiques	CFRP	Fabrication d'articles de sport et loisirs	https://hopper-accessibility.com/
Lavoisier Composites	FR	Réemploi	Revalorisation (réemploi) de chutes de production destinées au marché aéronautique	CFRP	Fabrication de pièces composites à haute valeur ajoutée.	https://www.lavoisier-composites.com/
Mixt Composites Recyclables (MCR)	FR	Recyclage mécanique	Broyage de pièces composites, utilisées comme renforcement dans des nouvelles structures composites	GFRP	Nouvelles pièces SMC avec charges issues du recyclage	https://www.m-c-r.com/fr/
Notox	FR	Réemploi / Réutilisation	Fabrication de planches de surf à partir de matériaux recyclés	Tous types	Fabrication de planches de surf	https://notoxsurf.com/
Petit Breton	FR	Réemploi	Revalorisation (réemploi) chutes de production destinées au marché aéronautique	CFRP	Fabrication de vélos	https://www.petit-breton.fr/
Recycling Carbon	FR	Réutilisation	Upcycling de structures composites carbone	CFRP	Proposition de solutions customisées suivant le besoin client et le gisement de déchets identifié	https://www.recycling-carbon.org/
Reuse Composites Innovation	FR	Réemploi	u-carbon, un matériau fabriqué à partir de chutes de fibres de carbone préimprégnées (chutes de production aéronautique)	CFRP	Semi-produits à destination des marchés : Drone civil, Nautisme, Design et architecture d'intérieur, Bâtiment, Luxe	http://u-carbon.fr/

SACMO	FR	Recyclage chimique	Fabrication d'équipements de solvolyse	CFRP		http://sacmo.fr/atomeca.php
Squid Surfboards	FR	Réemploi / Réutilisation	Fabrication et recyclage de planches de surf à partir de matériaux recyclés	Tous types	Fabrication de planches de surf biosourcées, recyclées et recyclages	https://www.squid-surfboards.com/
Tarmac Aerosave	FR	Démantèlement	Stockage et démantèlement d'aéronefs	CFRP	Eléments d'aérostructures à recycler/réemployer	https://www.tarmacaerosave.aero/
Vanheede	FR	Valorisation énergétique et matière	Déchets composites divers et valorisation en cimenterie (co-incinération)	GFRP	Production de CSR	www.vanheede.com
Xcrusher	FR	Recyclage mécanique	Recyclage de déchets composites par fragmentation haut voltage	GFRP / CFRP	Non précisé	https://www.xcrusher.fr/fr/presentation/

Tableau 45 : Principaux acteurs de la fin de vie des composites français identifiés dans le cadre de l'étude.

5.3. Principaux acteurs universitaires et centres techniques – France

Entité	Pays	Type de revalorisation	Activités de recyclage et d'écoconception des composites	Matériaux	Applications	Site internet / contact
CANOE	FR	Recyclage mécanique	Recyclage de composites fibres de verre/matrice Elium (thermoplastique)	GFRP	Fabrication de granulés PMMA/Elium/fibres de verre et filaments pour impression 3D	http://www.plateforme-canoe.com/
CETIM Grand Est	FR	Recyclage mécanique	Recyclage de composite thermoplastiques (précédé ThermoSaic)	GFRP	Semi-produits pour mise en œuvre par thermoformage	https://www.cetimgrandest.fr/

I2M	FR	Innovation matériau	Détissage et réalignement de fibres	CFRP	Etudes sur les procédés de génération de renforts continus à partir de fibres discontinues.	https://www.i2m.u-bordeaux.fr/en/Research/Platforms/Plateforme-de-recyclage-de-fibres-de-carbone
ICAM Nantes	FR	Recyclage chimique principalement	Solvolyse sur matériaux composite à fibres de carbone ; recyclage mécanique	GFRP / CFRP	Etudes sur les procédés de recyclage mécanique et par solvolyse des composites GFRP et CFRP	https://www.icam.fr/recherche-developpement/thematiques/
IFTH	FR	Innovation textile	Préparation, découpe, effilochage et transformation de structures textiles	Tous types	Fibres et textiles techniques	https://www.ifth.org/
IMT Mines Albi-Carmaux	FR	Recyclage chimique	Vapothermolyse sur composites à fibres de carbone	CFRP	Etudes sur le procédé de vapothermolyse	https://www.imt-mines-albi.fr/rapsodee
IMT Nord Europe	FR	Recyclage mécanique	Broyage / compoundage de composites TP	GFRP / CFRP	Valorisation sous forme de semi-produits matrice TD/TP ou minérale	https://imt-nord-europe.fr/domaines-excellence/plasturgie-et-les-materiaux-composites/
Institut Clément Ader	FR	Réemploi	Réparation des composites	GFRP / CFRP	Etudes sur la réparation des composites majoritairement à destination du marché aéronautique	https://ica.cnrs.fr/home/
IPC	FR	Recyclage mécanique	Broyage / compoundage de composites TP	GFRP / CFRP	Compound chargés à destination de l'injection de matière TP	https://ct-ipc.com/
IRT Jules Verne	FR	Innovation matériaux	Utilisation de résine thermoplastique pour l'obtention d'une pale recyclable (Projet Zebra, résine Elium d'Arkema)	GFRP	Etude sur la mise en œuvre d'une résine TP	https://www.irt-jules-verne.fr/

Tableau 46 : Principaux laboratoires et centres techniques français impliqués sur de la fin de vie des composites identifiés dans le cadre de l'étude.

5.4. Principaux acteurs – hors territoire national

Entité	Pays	Type de revalorisation	Activités de recyclage et d'écoconception des composites	Matériaux	Applications	Site internet / contact
Adherent Technologies	US	Recyclage chimique	Procédé en trois étapes combinant pyrolyse et solvolyse	CFRP	Récupération des fibres de carbone	https://www.adherent-tech.com/
Aditya Birla Advanced Materials (ex Connora Technologies)	Thaïlande	Innovation matériau	Durcisseur Amine pour résine époxy, permettant à la résine époxy de devenir recyclable. Compatible avec les procédés de mise en œuvre par infusion, RTM	GFRP / CFRP	Résine pour applications composites générales	https://www.adityabirlachemicals.com/brand/recyclamine
Altex	DE	Recyclage mécanique	Recyclage de chutes de production de fabricants de matériaux composites hors CFRP	GFRP	Fibres coupées	http://www.altex.de/de/textil-recycling/produkte/glasfaser
Bcircular	SP	Recyclage thermique	startup ; pyrolyse de pales d'éolienne et autres déchets composites fibres de verre/carbone ; 90% de la tenue initiale de la fibre	GFRP / CFRP	Fourniture de fibres de carbone coupées / micronisées ; plaques composites ; préimprégnés.	https://www.bcircular.com/
Carbon Conversions Inc. (ex MIT-RCF)	US	Recyclage thermique	Pyrolyse de déchets composites divers (production 2000 t/an [1])	CFRP	Fibres coupées, renforts non-tissés ; comelés	https://carbonconversions.com/
Carbon Fiber Recycle Industry Co. Ltd	JP	Recyclage thermique	Décomposition thermique des déchets CFRP par un procédé d'auto-combustion	CFRP	Fournisseur de fibres de carbone recyclées	https://cfri.co.jp/en/
Carbon Fiber Recycling, Inc	US	Recyclage thermique	Pyrolyse de déchets composites	CFRP	Fibres coupées, fibre micronisée ; compounds	http://carbonfiberrecycling.com/index.html

Carbon Fiber Remanufacturing	US	Recyclage mécanique	Déchets de production : rebuts de fabrication et chutes de découpe	CFRP	Fibres coupées, voiles, mat	https://carbonfiberremanufacturing.com/
CFK Valley Stade Recycling / carboNXT	DE	Recyclage thermique	Pyrolyse de CFRP (production > 1000 t/an, lancé en 2011 [1])	CFRP	Large gamme de semi-produits (renforts, fibres coupées, compounds...)	https://www.carbonxt.de/en/company/
Catack-H	Corée	Recyclage chimique	Décomposition chimique de déchets composites à fibres de carbone ; Catack-H annonce également récupérer la résine epoxy	CFRP	Fibres coupées, Renforts, non tissés, Pellets	http://catack-h.com/?lang=en
Composite recycling	CH	Recyclage thermique	Equipement de pyrolyse mobile pour le recyclage de composites GFRP issus du nautisme ou de l'éolien	GFRP	Récupération de la fibre de verre	https://composite-recycling.ca/
Comppair	CH	Innovation matériaux	Composite auto-cicatrisant après chauffage de la matière. Préimprégné compatible avec un procédé de drapage.	GFRP / CFRP	Pré-imprégné disponible avec différentes architectures et types de fibres	https://comppair.ch/
Conenor	NO	Recyclage mécanique	Broyage de GFRP et incorporation dans structures profilées	GFRP	Profilés, panneaux obtenus par extrusion à destination du bâtiment	http://www.conenor.com/
Eco-Wolf, inc.	US	Recyclage mécanique	Fabricant d'équipements pour le broyage de pièces composites et réincorporation dans produits propres	GFRP	Réintégration de déchets composites à fibres de verre dans produits propres	https://www.ecowolfinc.com/
Elevated Materials	US	Non précisé (probablement du réemploi)	Pré-imprégnés carbonés issus du marché aéronautique	CFRP	Plaques de carbone de différentes épaisseurs et différentes tailles (dimension catalogue)	https://www.elevatedmaterials.com/

Extreme Eco Solutions	NL	Recyclage mécanique	Broyage et réincorporation dans nouveaux produits GFRP (silos, pales d'éolienne, bateaux hors d'usage...)	GFRP	Fabrication de produits propres (tuiles ornementales)	http://extreme-ecosolutions.com
Formoso Technologies Group	SP	Recyclage thermique	Traitement de déchets composites post-industriels (renforts préimprégnés...) et les pièces polymérisées.	GFRP / CFRP	Récupération des fibres pour revente et des huiles de pyrolyse pour valorisation énergétique	https://www.formosotech.com/
Gees Recycling	IT	Recyclage mécanique	Broyage et réincorporation dans pièces moulées et fabrication de granulés TP. GFRP uniquement.	GFRP	Pièces moulées (panneaux sanitaires, meubles de salle de bain) ou granulés pour injection TP	http://www.geesrecycling.com
Gen2Carbon (ex ELG Carbon fiber)	UK	Recyclage thermique	Pyrolyse de produits à base de fibres de carbone et déchets en fin de vie (production > 2000 t/an [1])	CFRP	Fibres coupées, Renforts, non tissés, Pellets	https://www.gen2carbon.com/
Geocycle	BE	Valorisation énergétique et matière	Déchets composites divers et valorisation en cimenterie (co-incinération)	GFRP	Production de CSR	https://www.geocycle.com/
Global Fiberglass Solutions, inc.	US	Recyclage mécanique	Recyclage mécanique de déchets composites à fibres de verre variés, dont les pales d'éoliennes	GFRP	Panneaux pour le bâtiment ou granulés pour injection TP	https://www.globalfiberglassinc.com/
HADEG Recycling Ltd.	DE	Recyclage thermique	Matériaux composites divers, issues de différentes industries	CFRP	Renforts fibres de carbone (mèche, renforts tissés, pré imprégnés, fibres coupées)	http://www.hadeg-recycling.de/
Hambleside Danelaw	UK	Recyclage mécanique	Broyage et réincorporation dans nouveaux produits GFRP	GFRP	GFRP réincorporé en charge dans produits propres (essentiellement marché du bâtiment)	https://www.hambleside-danelaw.co.uk/

Hitachi Chemical Company, Ltd	JP	Recyclage chimique	Décomposition chimique des composites fibres de carbone renforcées époxy par solvolysé à basse température	CFRP	Récupération de la fibre sous différentes formes (non-tissés, et...)	https://www.mc.showadenko.com/english/report/056/56_sou01.pdf
Karborek	IT	Recyclage thermique	Pyrolyse de déchets composites pour recyclage de la fibre (production 1000 t/an [2])	CFRP	Renforts : fibres coupées et micronisées ; Panneau d'isolation thermique ; Feutre 95% carbone multicouche	http://www.karborekrf.it/
KoRec	IT	Recyclage thermique	Fabrication d'équipement pour la récupération de la fibre et de la résine. Intérêt pour la résine polyester.	GFRP	Applications composites verre/polyester. Les résidus de pyrolyse sont réincorporés dans la matrice polyester	http://www.ko-rec.com/
Lorenz	DE	Recyclage mécanique	Broyage (léger) de déchets BMC/SMC	GFRP	Broyats à intégrer dans SMC / BMC	https://www.lomix.de/en/recycling/
Mallinda	US	Innovation matériau	Développement de matériaux vitrimères comme matrice de composites	GFRP / CFRP	Applications composites général	https://www.mallinda.com/
Miljøskærm Ap	DK	Recyclage mécanique	Broyage de pales d'éoliennes	GFRP	Production de barrières anti-bruit, et panneaux d'isolation intégrant les broyats de composites	https://miljoskarm.dk/en/
Neocomp	DE	Valorisation énergétique et matière	Déchets composites divers et valorisation en cimenterie (co-incinération)	GFRP	Production de CSR	http://www.neocomp.eu
Reciclalia	SP	Recyclage thermique	Recyclage fibres de verre issues du marché éolien et moyen mobile pour le	GFRP	Roving et Compound pour moulage	http://reciclaliacomposite.com

			broyage de pales composites sur site de déconstruction			
Refiber ApS	DK	Recyclage thermique	Pyrolyse de pales éoliennes pour former des panneaux d'isolation ou récupérer la fibre	GFRP	Panneaux d'isolation	http://www.refiber.com/
Reprocover	BE	Recyclage mécanique	Broyage de déchets composites à fibres de verre et réincorporation dans produits propres	GFRP	Produits propres : couvercles composites, mobilier urbain	https://reprocover.eu/
Roth International	DE	Recyclage mécanique	Broyage de composites, issus de marchés variés	GFRP / CFRP	Récupération de la fibre	https://www.roth-international.de/recycling/cfk-gfk-recycling/
Rymyc S.R.L.	IT	Non communiqué	Recyclage de composites fibres de carbone	CFRP	Feutre de carbone ; fibres coupées ; plaques imprégnées avec une résine vinylester	www.rymyc.it
Shocker Composites LLC	US	Recyclage chimique	Recyclage de préimprégnés aéronautique CFRP par un procédé de solvolysse	CFRP	Pellet TP PP/PA6 et filaments ABS/Carbone	https://www.shockercomposites.com/
Selfrag	CH	Fournisseur d'équipement - fragmentation haut voltage	Fragmentation Haut voltage de déchets composites pour séparation de la matrice et de la fibre.	GFRP / CRFP		http://www.selfrag.com/
Sigmatex	UK	Réemploi	Réemploi de fibres de carbone issues de déchets de production	CFRP	Renfort unidirectionnel ou multi-axial / Comelés carbone PP ou PA	https://www.sigmatex.com/
SuperUse studio	NL	Réutilisation	Design d'aires de jeux à partir de pales d'éoliennes	GFRP	Aires de jeux / mobilier urbain	https://www.superuse-studios.com/en/about-us/

Tepro Kunststoff recycling	DE	Recyclage mécanique	Broyage et extrusion dans un matériau TP	GFRP	Profilés extrudés à destination du bâtiment	https://www.tepro-trimax.de/eng/homepage/
Vartega Inc.	US	Recyclage chimique	Déchets composites sous forme de préimprégnés ou fibres sèches	CFRP	Fibres coupées ; poudre micronisée ; granulé TP ; pellets	https://www.vartega.com/
Wimao	FI	Recyclage mécanique	fournisseur d'équipements pour le recyclage de plastiques en mélange, pouvant inclure des composites à fibres de verre	GFRP	Applications variées	https://www.wimao.fi/
Wind Turbine Global Marketplace	DE	Réemploi	Revente de pales d'éoliennes de seconde main	GFRP		https://windturbines-marketplace.com/
Wipag	DE	Recyclage mécanique	Recyclage de compound en boucle ouverte ou fermée	CFRP	Compound pour moulage par injection fibre de carbone / Matrices : PP, PA6, PA66	http://www.wipag.de/Kunststoffrecycling/Carbon-Compoundierung

Tableau 47 : Principaux acteurs de la fin de vie des composites identifiés dans le cadre de l'étude, hors territoire national.

5.5. Principaux acteurs universitaires et centres techniques – hors territoire national

Entité	Pays	Type de revalorisation	Activités recyclage et éco-conception des composites	Matériau	Application	Site internet / contact
Composite Recycling Technology center	US	Non précisé	Recyclage de composites à fibres de carbone et fibres de verre (production 150 t/an [2])	GFRP / CFRP	Incorporation des déchets composites en charges dans des produits propres (bancs, panneaux, sanitaires)	https://compositerecycling.org/

Deutsche Institute for Textile and Fiber Research (DITF)	DE	Innovation textile	Préparation de mèches à partir de fibres de carbone recyclées. Des applications structurelles sont visées	CFRP	Etude de faisabilité pour la préparation de mèches à partir de fibres de carbone recyclées pour applications structurelles	https://www.ditf.de/en/
Fraunhofer ICT	DE	Recyclage thermique	Pyrolyse de CFRP combiné à des microondes	CFRP	Récupération de fibres de carbone, fabrication de filaments pour impression 3D.	https://www.ict.fraunhofer.de/en.html
Institut polymère et composites de Naples (IPCB CNR)	IT	Recyclage mécanique	Incorporation de déchets composites dans une matrice polystyrène	GFRP	étude de faisabilité de la réincorporation de composites dans une matrice TP	http://www.ipcb.cnr.it/index.php/en/ricerca/sustainability/355-riciclo-di-compositi-termoindurenti-e-imbballaggi-espansi-2
Institute of Textile Machinery and High Performance Material Technology (ITM)	DE	Innovation textile	Préparation de mèches à partir de fibres de carbone recyclées. Des applications structurelles sont visées	CFRP	Etude de faisabilité pour la préparation de mèches à partir de fibres de carbone recyclées pour applications structurelles	https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/itm/forschung/forschungsfelder/textile-prozesse/repair-und-recyclingtechnologien
MAI Carbon / Composites United	DE	Techniques de recyclage variées	Incorporation de la fibre de carbone dans des produits composites. La pyrolyse est fréquemment employée.	CFRP	Faisabilité de l'utilisation de fibres de carbone recyclées sur les coûts de fabrication et sur les procédés de fabrication	https://composites-united.com/en/cluster/mai-carbon/
Saxon Textile Research Institute (STFI)	DE	Innovation textile	Préparation de fibres de carbone discontinues pour générer des non-tissés. La préparation inclut la découpe, adhésion entre fibres et contrôle qualité	CFRP	Renforts non-tissés isotropes et non-isotrope à fibres de carbone	https://www.stfi.de/en/research/textile-recycling

TPAC	NL	Recyclage mécanique	Développement de solutions de recyclage des déchets thermoplastiques renforcés post-consommation et post-industriels par un recyclage mécanique	GFRP / CFRP	Etudes de faisabilité pour la réincorporation de déchets composites TP (chargés/non chargés)	https://thermoplasticcomposites.nl/research-areas/recycling/
Université de Bologne	IT	Recyclage mécanique	Incorporation de préimprégnés carbone époxy dans une matrice minérale	GFRP / CFRP	Bétons renforcés	https://www.unibo.it/en/homepage
Université de Nottingham	UK	Recyclage chimique	Large variété de procédés pour la récupération des fibres de carbone par les procédés de solvolysse à basse pression et de lit fluidisé ; collaboration avec plusieurs sociétés sur les marchés automobile et aéronautique	CFRP	Etudes de faisabilité pour investiguer le potentiel du lit fluidisé et de la solvolysse à basse pression pour le recyclage des composites à fibres de carbone	https://www.nottingham.ac.uk/research/groups/composites-research-group/research/recycling-of-composites/recycling-of-composites.aspx
Université de Strathclyde	UK	Recyclage thermique / chimique	Récupération de fibres de verre par pyrolyse ou solvolysse	GFRP	Etudes R&D sur les procédés de recyclage	https://www.strath.ac.uk/engineering/mechanicalaerospaceengineering/advancedcompositesgroup/ourresearch/recyclingprocessingandmanufacturingresearch/
Windesheim University of Applied Sciences	NL	Recyclage mécanique	Broyage composites fibres de verre et incorporation comme "âme" d'un profilé pultrudé	GFRP	Etude de faisabilité pour la réincorporation de composites en charge dans des matériaux à destination du BTP	https://www.windesheim.com/

Tableau 48 : Principaux centres techniques et universités impliqués sur la fin de vie des composites hors territoire national, identifiés dans le cadre de l'étude.

5.6. Les acteurs de la filière CSR française

Cette section est dédiée à la filière CSR, qui semble actuellement être la plus mature pour la gestion des déchets composite, et pour les marchés à volumes.

Le détenteur de déchets composites, s'il souhaite valoriser son déchet en cimenterie, devra s'adresser à un préparateur de CSR, dont la liste exhaustive est présentée au paragraphe 5.6.1. Ce préparateur de CSR a la charge de générer un combustible dont l'exutoire final est essentiellement une valorisation en cimenterie. La liste des cimenteries du territoire national est présentée au paragraphe 5.6.2.

Enfin, ces différents sites ont été positionnés sur la carte du territoire. Le transport des déchets devient un frein économique important lorsque les distances à parcourir deviennent importantes.

5.6.1. Sites de préparation du CSR

Dans une étude publiée récemment, l'AMORE a identifié 36 sites de production du CSR sur le territoire national [3], dont nous reprenons une partie du tableau ci-après.

Société/Exploitant	Nom du site	Commune (Département)
SERRAND	Site de Serrand	Dortan (01)
VEOLIA	CTHP Valazur	Nice (06)
VEOLIA	Centre de tri de villeneuve - Loubet	Villeeneuve-Loubet (06)
SMED06	Centre de valorisation organique	Cannes la bocca (06)
GRAND NARBONNE	Ecopole Narbonne	Narbonne(11)
SUEZ PROVENCE VALORISATION	Provence Valorisation	Istres (13)
EPUR	Usine de Gignac-La-Nerthe	Gignac-La-Nerthe (13)
BOURGOGNE RECYCLAGE	Site de Beaune	Ruffey les Beaume (21)
KERVAL	UTVME=Unité de Tri-Valorisation matière Energie	Ploufragan (22)
NPC	Unité d'Alizay	Alizay (27)
RECYCLEURS BRETONS	CTHP St Thudon	Guipavas (29)
GUYOT ENVIRONNEMENT	Site de St Martin	Saint-Martin des-Champs (29)
GUYOT ENVIRONNEMENT	Site de Brest	Brest (29)
PAPREC	Site de Bruières PAPREC	Bruguières (31)
GROUPE PENA	CORIS	Mérignac (33)
SERMACO	Plateforme d'activités de SERMACO	Ricamarie (42)
3WAYSTE	Ecopôle ALTRIOM	Polignac (43)
NANTES METROPOLE	CTHP du site Arc en Ciel	Coueron (44)
BARBAZANGES TRI OUEST	Site Tri OUEST	Chateaubriant (44)
ENVIRONNEMENT MASSIF CENTRAL	Site d'Environnement Massif Central	Mende (48)
BRANGEON RECYCLAGE	CDT de Cholet	Cholet (49)
SECHE	Pole multi-filière de Changé	Changé (53)
VEOLIA	CTHP de Ludres	Ludres (54)
EQIOM	Plateforme intégrée sur la cimenterie de Heming	Heming (54)

VTB	Site de Longeville	Longeville-lès-Saint-Avoid (57)
BAUDELET	Centre de Préparation Matières (CPM) et fabrication de CSR	Blaringhem (59)
SYMEVAD	TVME	Evin Malmaison (62)
OPALE ENVIRONNEMENT (Séché)	Centre de tri de Calais	Calais (62)
VANHEEDE ENVIRONNEMENT SAS	Site VANHEEDE	Billy Berclau (62)
Bluepaper	Bluepaper	Strasbourg (67)
Cernay Environnement	Cernay Environnement	Cernay (68)
BIOVAL	BIOVAL (anciennement site de SIBUET)	Chamoux sur Gelon (73)
EXCOFFIER	Centre de tri haute performance d'Excoffier	Villy-le-Pelloux (74)
VEOLIA	Propreté Nord Normandie (VEOLIA)	Oissel (76)
SCLAVO ENVIRONNEMENT	Ecopôle SOFOVAR DND	Fréjus (83)
SEMARDEL	SEMAVAL	Echarcon (91)

Tableau 49 : Les 36 sites de préparation du CSR identifiés par l'AMORCE [3].

5.6.2. Cimenteries en France

En concertation avec le Syndicat Français de l'industrie cimentière, une liste des 29 cimenteries françaises a été dressée et est présentée dans le Tableau 50.

Société/Exploitant	Nom du site	Commune (Département)
EQIOM	Cimenterie de Rochefort-sur-Nenon Eqiom	Rochefort-sur-Nenon (39)
EQIOM	Cimenterie de Lumbres Eqiom	Lumbres (62)
EQIOM	Cimenterie de Héming Eqiom	Héming (57)
Calcia	Cimenterie d'Airvault Ciments Calcia	Airvault (79)
Calcia	Cimenterie de Beaucaire Ciments Calcia	Beaucaire (30)
Calcia	Cimenterie de Beffes Ciments Calcia	Beffes (18)
Calcia	Cimenterie de Bussac Ciments Calcia	Bussac-Forêt (17)
Calcia	Cimenterie de Couvrot Ciments Calcia	Vitry-le-François (51)
Calcia	Cimenterie de Cruas Ciments Calcia	Cruas (07)
Calcia	Cimenterie de Gargenville Ciments Calcia	Gargenville (78)
Calcia	Cimenterie de Ranville Ciments Calcia	Ranville (14)
Calcia	Cimenterie de Villiers-au-Bouin Ciments Calcia	Villiers-au-Bouin (37)
VICAT	Cimenterie de Montalieu - Usine Vicat	Montalieu-Vercieu (38)
VICAT	Cimenterie de Créchy - Usine Vicat	Créchy (03)
VICAT	Cimenterie de Peille - Usine Vicat	Blausasc (06)
VICAT	Cimenterie de Xeuilley - Usine Vicat	Xeuilley (54)
VICAT	Cimenterie de Saint-Égrève - Usine Vicat	Saint-Egrève (38)
VICAT	Cimenterie de Perelle - Usine VICAT	Saint-Laurent-du-Pont (38)
Lafarge	Lafarge Usine de la malle, Lafarge ciments	Bouc-bel-air (13)
Lafarge	Lafarge Usine de Val d'Azergues	Chatillon (69)
Lafarge	Lafarge Ciments, Route de Bréal	Saint-Pierre-la-Cour (53)
Lafarge	Lafarge Ciments, usine de Port-la-Nouvelle	Port-la-Nouvelle (11)
Lafarge	Lafarge Ciments, usine de Martres-Tolosane	Martres-Tolosane (31)
Lafarge	Lafarge Ciments, usine de Altkirch	Altkirch (68)
Lafarge	Lafarge Ciments, usine de Contes	Contes (06)

Lafarge	Lafarge Ciments, usine du Teil	Le Teil (07)
Imerys aluminates	Imerys aluminates, usine de Mardyck	Dunkerque (59)
Imerys aluminates	Imerys aluminates, usine de Fos-sur-Mer	Fos-sur-Mer (13)
Imerys aluminates	Imerys aluminates, usine du Teil	Le Teil (07)

Tableau 50 : Les 29 cimenteries identifiées sur le territoire national.

5.6.3. Carte des acteurs de la filière CSR française

La carte ci-après présente les principaux acteurs de la filière CSR (préparateurs CSR et cimenteries).

Afin de présenter une chaîne de la valeur complète, les sites agréés par l'APER ont été représentés. Ces sites APER représentent les détenteurs de déchets sur la carte de la Figure 120, à titre d'exemple.

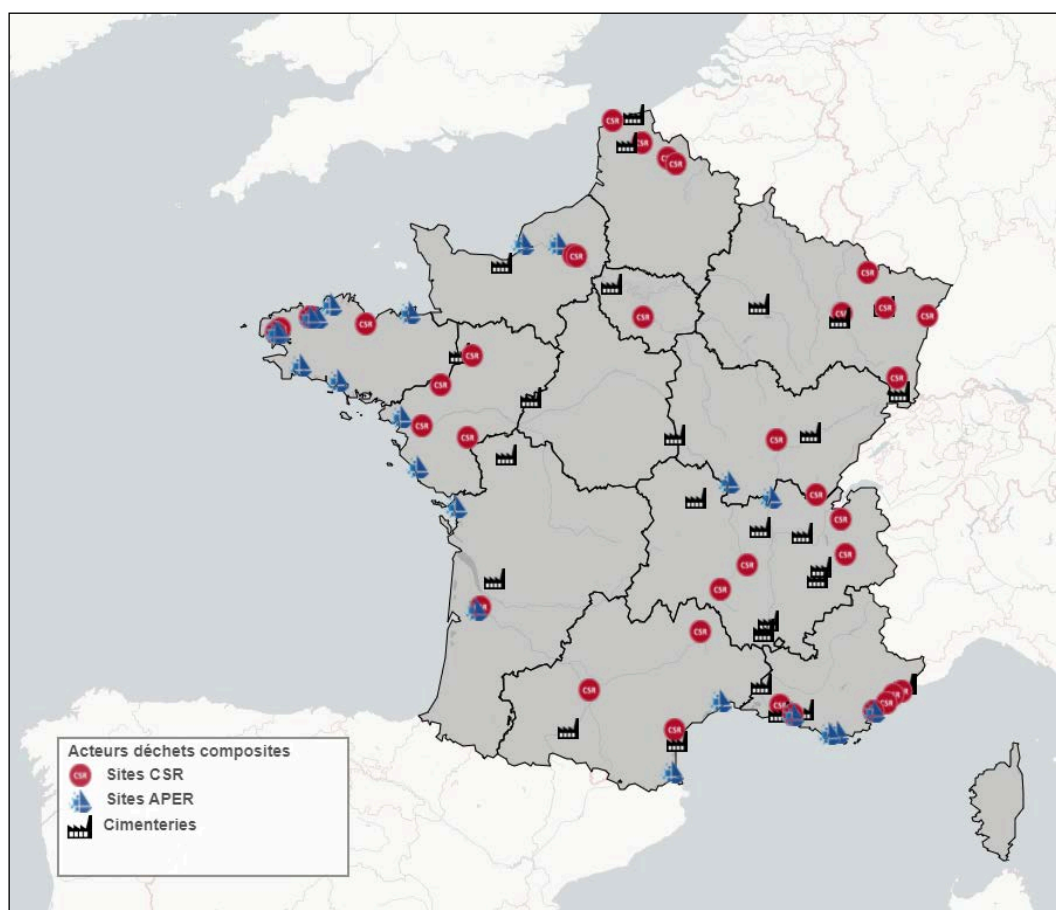


Figure 120 : carte des acteurs de la filière CSR française (crédit : IPC).

5.7. Références bibliographiques

- [1] S. Job, « Recycling composites commercially », *Reinforced Plastics*, vol. 58, n° 5, p. 32-38, 2014, doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(14\)70213-9](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(14)70213-9).
- [2] J. Zhang, V. S. Chevali, H. Wang, et C.-H. Wang, « Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling », *Composites Part B: Engineering*, vol. 193, p. 108053, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108053>.
- [3] AMORCE, « État des lieux national des unités de préparation de Combustibles Solides de Récupération », DT-126, mai 2021.

6. Conclusion / Perspectives

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 Habillement (IFTH) et le Centre Technique Industriel de la Plasturgie et des Composites (IPC).

L'initiative du présent projet, piloté par IPC, est donc commune aux trois centres techniques. 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.

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 Extractive, 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 réglementaire (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 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.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Mise en évidence des similitudes entre composite biosourcé et composite synthétique.	13
Tableau 2 : Avantages et limites des matériaux composites.....	15
Tableau 3 : Caractéristiques de tenue thermique/chimique et de prix des résines thermodurcissables (CETIM).....	16
Tableau 4 : Caractéristiques de tenue thermique/chimique et de prix des résines thermoplastiques (CETIM).....	17
Tableau 5 : Exemples de fibres synthétiques (CETIM).....	19
Tableau 6 : Propriétés mécaniques de quelques composites biosourcés.....	20
Tableau 7 : Exemple de fibres naturelles [14].....	20
Tableau 8 : Semi-produits composites à partir de matrices thermodurcissables et thermoplastiques. ...	22
Tableau 9 : Les différents procédés de fabrication de composites thermodurcissables.	29
Tableau 10 : Les différents procédés de fabrication de composites thermoplastiques.	33
Tableau 11 : Segmentation du marché des bateaux de sport de plaisance [4] (crédit : FIN).....	44
Tableau 12 : Tonnages traités et estimation des gisements de déchets composites fin de vie issus de la filière nautique.....	46
Tableau 13 : Principaux pays européens raccordés – données 2020 (17,6GW raccordés à l'échelle nationale au 31 décembre 2020) [9].....	49
Tableau 14 : Segmentation du marché éolien [9] (crédit : Marc Rapin et BW Ideol).....	49
Tableau 15 : Caractéristiques de l'éolienne de référence définie par l'ADEME [11].....	53
Tableau 16 : Introduction de pièces composites sur les avions moyen/long courrier (crédit : Airbus).....	57
Tableau 17 : Estimation des gisements de déchet CFRP en 2015 et en 2050 en tonnage [33].....	60
Tableau 18 : effectifs du parc moyen de véhicule en France en 2020 [36].(crédit : Renault, Gruau, Renault Trucks, RATP).....	61
Tableau 19 : Composition moyenne d'un VHU en 2019, pour les matières présentes à plus de 1 % [41] .	63
Tableau 20 : Segmentation du marché ferroviaire (crédit : SNCF et RATP).....	66
Tableau 21 : estimation du volume de composites sur le parc ferroviaire français.....	67
Tableau 22 : Les sites de démantèlement pour les matériels ferroviaires à voyageurs de la SNCF.....	69
Tableau 23 : Segmentation du marché des sports et loisirs et parts de mises sur le marché en tonnage, adapté de [53] (crédit : Décathlon).....	70
Tableau 24 : Composition des cartes électroniques [60].....	73
Tableau 25 : Masse de déchets composite issus de cartes électroniques sur la période 2017 – 2020.....	74
Tableau 26 : Consommation et production de l'industrie nautique française issues de l'enquête APER/FIN.....	76
Tableau 27 : Déchets générés par l'industrie nautique française issues de l'enquête APER/FIN.....	76
Tableau 28 : Exemples de niveau d'amélioration en écoconception (source CETIM).....	94
Tableau 29 : Principaux indicateurs et méthodes et méthodes de calculs, adaptés de [11] et [12].....	96
Tableau 30 : Explication de la robustesse des modèles de caractérisation [13].....	96
Tableau 31 : Les étapes d'un cycle de vie.....	98
Tableau 32 : Tableau de comparaison entre l'ACV complète et l'ACV simplifiée.....	106
Tableau 33 : Comparaison des propriétés de quelques fibres naturelles et synthétiques à iso-masse. ...	113
Tableau 34 : Avantages et inconvénients des thermoplastiques sur les thermodurcissables.....	116
Tableau 35 : Application et solutions de substitutions des styrènes.....	117
Tableau 36 : Extrait de la liste des produits pour lesquels sont fixées des proportions minimales de montant annuel d'achat de biens issus du réemploi ou de la réutilisation ou intégrant des matières recyclées.....	124
Tableau 37 : Applications possibles pour les produits issus du broyage de composites thermodurcissables, adapté de [20].....	137
Tableau 38 : Pouvoir calorifique inférieur de certains polymères et matériaux utilisés en CSR.....	140
Tableau 39 : Comparaison des propriétés mécaniques de composites à fibre de carbone vierge et issues du recyclage par lit fluidisé [52].....	144
Tableau 40 : Comparaison des propriétés mécaniques de fibres de carbone recyclées issues de composites époxy/fibre de carbone selon deux procédés de recyclage (micro-onde et lit fluidisé) avec des fibres de carbone vierges [58].....	146
Tableau 41 : Propriétés mécaniques et diamètre des fibres vierges et recyclées par le procédé de FHV et le procédé mécanique [61].....	147
Tableau 42 : Propriétés mécaniques des vitrimères comparées à d'autres polymères TD / TP.....	151
Tableau 43 : Synthèse des technologies de revalorisation des composites.....	153

Tableau 44 : Coût énergétique pour l'obtention de fibres de carbone pour différentes techniques de recyclage ou de fabrication.	153
Tableau 45 : Principaux acteurs de la fin de vie des composites français identifiés dans le cadre de l'étude.	169
Tableau 46 : Principaux laboratoires et centres techniques français impliqués sur de la fin de vie des composites identifiés dans le cadre de l'étude.....	170
Tableau 47 : Principaux acteurs de la fin de vie des composites identifiés dans le cadre de l'étude, hors territoire national.	176
Tableau 48 : Principaux centres techniques et universités impliqués sur la fin de vie des composites hors territoire national, identifiés dans le cadre de l'étude.....	178
Tableau 49 : Les 36 sites de préparation du CSR identifiés par l'AMORCE [3].....	180
Tableau 50 : Les 29 cimenteries identifiées sur le territoire national.....	181

FIGURES

Figure 1: Construction en terre crue (crédit : Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble - ENSAG).....	11
Figure 2: IMOCA l'Occitane en Provence (crédit : Black Pepper Yachts).	11
Figure 3 : Illustration guerrier mongol et son arc (crédit : Wikipedia).	11
Figure 4 : Cycle de vie des matériaux de construction à base de terre (crédit : Anger & Fontaine).....	13
Figure 5 : Cycle de formation du pétrole, première étape de fabrication des polymères de synthèse (crédit : Schoolmouv).....	13
Figure 6 : Le Gwalaz, premier trimaran éco-conçu [2].	14
Figure 7 : Principales matrices, fibres de renforcement utilisés pour les CMO [21].	15
Figure 8 : Exemple de matrices biosourcées [4].	18
Figure 9 : Préimprégné FLAXPREG® commercialisé par EcoTechnilin (crédit : EcoTechnilin).....	23
Figure 10 : Les différents procédés de fabrication des matériaux composites (crédit : Compositec/IPC).	23
Figure 11 : Ligne QSP (gauche) ; Enroulement filamentaire SPIDE TP (droite) (crédit : CETIM).....	30
Figure 12 : Taille du marché mondial des composites en volume (Mt) de 1960 à 2020 [22].	35
Figure 13 : Chiffres clés des matériaux composites (crédit : CETIM).	35
Figure 14 : Pourcentage de poids du marché client (Mt) [21].	36
Figure 15 : Marché mondial de CFRP en 2018 [30].	37
Figure 16 : Parts de marché mondial en volume (Mt) des résines et renforts fibreux en 2017 [22].	38
Figure 17 : Chaîne de la valeur des CFRP [29].	38
Figure 18 : Evolution des parts de marché des matériaux thermoplastiques entre 1980 et 2018 (crédit : CETIM).	39
Figure 19 : Tendances du marché des composites thermoplastiques entre 2020 et 2025 [33]	40
Figure 20 : Massification des déchets de composites en production, en maintenance et en fin de vie (crédit : IPC).	43
Figure 21 : Répartition des déchets des bateaux de plaisance et de sport déconstruits en 2020 [4].....	45
Figure 22 : Exemples de déchets composites issus du nautisme, assemblés à des parties métalliques (gauche) et des panneaux en bois (droite) (crédit : IPC).	46
Figure 23 : Volumes de déchets composites traités par la filière du nautisme et prévisions 2022 – 2026 (déchets fin de vie) (sources : [4], [6], APER).	47
Figure 24 : Localisation des 2000 t de déchets composites traités par la filière BPS en 2021 (déchets fin de vie) (données APER).....	47
Figure 25 : A gauche : les principaux constituants d'une éolienne (crédit : Marc Rapin) ; A droite : Exemple de configuration structurelle d'une pale éolienne [14].	50
Figure 26 : Illustration d'une opération de réparation de pale d'éolienne (crédit : Alain Guilloteau).....	51
Figure 27 : Puissance éolienne raccordée par an et cumulée en France de 2001 à 2021 [8].	52
Figure 28 : Démantèlement du parc éolien de Plouarzel I en septembre 2021 (crédit : IPC).	54
Figure 29 : Gisement de déchets composites issus de la filière éolienne, en fonction de l'hypothèse sur la durée de vie (déchets fin de vie).	54
Figure 30 : A. Répartition géographique des éoliennes implantées en France métropolitaine en octobre 2021 par département ; Gisement annuel de déchets composites issus de la filière éolienne en 2025 (B) ; en 2030 (C) et en 2035 (D).....	55
Figure 31 : Proportion de composites sur les avions commerciaux [33].	58
Figure 32 : Processus de démantèlement des avions commerciaux [34].	59
Figure 33 : Gisement de déchets composites CFRP post-production et post-consommateur générés mondialement [33].	60
Figure 34 : Evolution des immatriculations de porteurs neufs sur la période 2010 – 2019 [44].	64

Figure 35 : Localisation des gisements de déchets composites disponibles vers 2025 sur la filière poids-lourds.....	64
Figure 36 : Application des composites pour la construction ferroviaire.	66
Figure 37 : masse de composites pour différentes natures de matériel ferroviaire, adapté de [51].	67
Figure 38 : Estimation de la masse de déchets de composites pour le secteur ferroviaire (périmètre matériel roulant SNCF Voyageurs uniquement) à comparer aux 150 – 200 t/an estimés par la SNCF sur l'intégralité du parc de matériels roulants.	68
Figure 39 : Répartition des mises en marché d'ASL par matériaux en poids [53].	71
Figure 40 : Répartition géographique des déchets composites issus de la filière ASL.....	72
Figure 41 : Localisation des 7 800 t de déchets composites traités par la filière DEEE (déchets fin de vie).	75
Figure 42 : Ventilation des réponses à l'enquête par marchés.	76
Figure 43 : Evolution du gisement de déchets industriels sur la période 2022 – 2026.	77
Figure 44 : Gisement de déchets composites hors aéronautique à l'échelle nationale.	79
Figure 45 : Gisement cumulé de matériaux composites vers 2025, hors aéronautique.	79
Figure 46 : Gisement post-consommateur de matériaux composites vers 2030, hors aéronautique.....	80
Figure 47 : Gisement post-consommateur de matériaux composites vers 2035, hors aéronautique.....	80
Figure 48 : Franchissement des limites planétaires [2]. [2]	84
Figure 49 : Principales réglementations liées à l'activité d'écoconception (crédit : CETIM).	85
Figure 50 : Les 7 piliers de l'économie circulaire [3].	86
Figure 51 : Résultats d'une écoconception sur une caméra de surveillance (crédit : CETIM).	86
Figure 52 : Impact économique de l'écoconception pour l'entreprise [4].	87
Figure 53 : Evolution des indicateurs d'impact produit avant et après la démarche d'écoconception [5].	87
Figure 54 : Evolution du positionnement marché du produit avant et après la démarche d'écoconception [5].	87
Figure 55 : Evolution des Forces, Faiblesses, Opportunités et Menaces avant et après la démarche d'écoconception [5].	88
Figure 56 : Extrait du baromètre écoconception [6].	88
Figure 57 : Etapes du cycle de vie : exemple de l'acier de construction [7].	89
Figure 58 : Impact du recyclage de l'acier sur la consommation d'énergie et l'émission de CO ₂ [8].	89
Figure 59 : Principe de l'écoconception : à service identique, un produit éco-conçu est source de moins d'impacts sur l'environnement que les produits similaires (crédit : CETIM).	90
Figure 60 : Taux de détermination des impacts finaux du produit en fonction du cycle de vie produit (crédit : CETIM).	90
Figure 61 : Déroulement global d'une démarche d'écoconception (crédit : CETIM).	91
Figure 62 : Représentation cyclique des étapes d'écoconception (amélioration continue) (crédit : CETIM).	91
Figure 63 : Présentation des différentes méthodes d'évaluation ou d'amélioration environnementale de produits (crédit : CETIM).	92
Figure 64 : Différentes approches de l'écoconception en fonction des étapes et critères retenus [9].	92
Figure 65 : Exemples de transferts d'impacts entre un produit A et un produit B (crédit : eco-conception.fr).	96
Figure 66 : Normes liées à l'ACV.....	97
Figure 67 : Les différentes étapes d'une ACV [14].	98
Figure 68 : Interactions entre les quatre principales étapes de l'ACV.....	99
Figure 69 : Les différents systèmes de frontières possibles [16].	100
Figure 70 : Représentation schématique des flux d'un inventaire du Cycle de Vie [17].	100
Figure 71 : Représentation schématique du calcul de données d'impact (exemple sur la catégorie du changement climatique) à partir de données d'inventaire par le biais de méthodes de calculs, adapté de [18].	101
Figure 72 : Représentation schématique de la traduction des données d'inventaire en catégories d'impacts midpoint et endpoint [17].	102
Figure 73 : Exemple de résultats selon la méthode de caractérisation.....	102
Figure 74 : Exemple de résultats pour 1 kg de résine époxy en utilisant la normalisation (avec le logiciel SimaPro).	103
Figure 75 : Exemple de résultats pour 1 kg de résine époxy en utilisant la méthode de pondération, méthode EF3.0.	103
Figure 76 : Exemples de recommandations [19].	104
Figure 77 : Les différentes approches, de gauche à droite : ACV complète, ACV mono-indicateur, ACV simplifiée ; outils disponibles en fonction du périmètre de la démarche [20].	105
Figure 78 : Différence de conception entre une ACV complète et ACV simplifiée [21].	105
Figure 79 : ACV comparative entre différentes fibres, à isomasse (1 kg), données Ecoinvent, logiciel Simapro et méthode EF 3.0.	107
Figure 80 : ACV comparative entre différentes matrices, à isomasse (1 kg), logiciel Simapro et méthode EF 3.0.	108

Figure 81 : Comparaison de deux polymères en versions vierge et recyclée.	109
Figure 82 : modélisation « market for » de 4 r-PEHD issus de différentes régions géographiques.	109
Figure 83 : Dépendance de la dureté et du module de traction du PEHD en fonction du nombre de cycles d'extrusion [22].	110
Figure 84 : ACV comparative berceau à la tombe de bouteilles en PET de différentes natures [22].	111
Figure 85 : ACV comparative berceau à la tombe de gobelets de différentes natures [22].	112
Figure 86 : Frontières du système de l'étude de Le Duigou et al. [24].	114
Figure 87 : ACV berceau au produit entre un composite polyester/verre et un composite PLLA/lin [24].	114
Figure 88 : Différents scénarii de fin de vie pour les deux composites [25].	115
Figure 89 : Viscosité à l'état fondu en fonction de la température de procédé de résines thermoplastiques et thermodurcissables [26].	116
Figure 90 : Hiérarchisation réglementaire de la gestion des déchets [1].	123
Figure 91 : Les étapes de l'ACV suivant la réglementation RE 2020 [4].	125
Figure 92 : Filière REP et date de mise en œuvre opérationnelle, adaptée de [5].	127
Figure 93 : Schématisation du périmètre d'action de l'APER [7].	130
Figure 94 : Exemples des différents engins de transport utilisés pour la collecte des BPHU [9].	130
Figure 95 : Carte des centres de déconstruction des BPHU en France [7].	131
Figure 96 : Procédé Constrictor (Reciclalia) [10].	132
Figure 97 : Exemples de réemploi de semi-produits composites par l'entreprise Lavoisier Composites (à gauche) et la société Hopper (à droite) (crédit : Lavoisier Composites et Hopper).	133
Figure 98 : Exemples de réutilisation de composites thermodurcissable, conversion d'un bateau de plaisance en hébergement insolite. (à gauche, crédit : Bathô) et création d'aires de jeux à partir d'éolienne [16] (à droite).	134
Figure 99 : Procédés de recyclage et de valorisation des matériaux composites à matrices organiques, adapté de [20].	135
Figure 100 : Schéma du principe du recyclage mécanique des composites par broyage [22].	135
Figure 101 : Exemples de produits intégrant des déchets issus de matériaux composites thermodurcissables renforcés de fibres de verre, (a) : Global Fiberglass solutions [30] ; (b) Reprocover [31] ; (c-d) Conenor [32] (crédit : Global Fiberglass solutions, Reprocover et Conenor).	136
Figure 102 : Schéma du processus de pyrolyse d'une pâle d'éolienne [34].	137
Figure 103 : Illustration de mats issus de fibres de verre (crédit : ReFiber ApS à gauche) et fibres de carbone recyclées (crédit : Gen2Carbon à droite).	138
Figure 104 : Comparaison de l'état de surface d'une fibre de carbone vierge (à gauche) et d'une fibre de carbone après traitement hydrolytique (à droite) [43].	139
Figure 105 : Ligne pilote ThermoSaic® et ThermoPRIME® pré-industrielle (crédit : CETIM).	142
Figure 106 : Semi-produits (panneaux) obtenus par les procédés ThermoSaic® et ThermoPRIME® (crédit : CETIM).	143
Figure 107 : Schéma des différentes étapes du procédé de recyclage des composites par lit fluidisé [29].	143
Figure 108 : Impact environnemental de composite à fibres de carbone vierges comparés à des fibres recyclées - gauche : Impact sur la dépense énergétique ; droite : potentiel impact sur le réchauffement climatique [52].	144
Figure 109 : Schéma de principe du procédé de chauffage par micro-onde [57].	145
Figure 110 : Ratio d'élimination de la résine en fonction du temps de radiation sous trois atmosphères différentes (Argon/Azote et Air) [57].	145
Figure 111 : Observation de l'élimination de la résine époxy sous trois atmosphères différentes (argon/azote et Air) [57].	146
Figure 112 : Schéma du procédé de Fragmentation Haut Voltage [61].	147
Figure 113 : (a) Fibres vierges, (b) fibres traitées à 500 impulsions en 500 ns, (c) fibres traitées à 2000 impulsions en 500 ns (d) fibres traitées mécaniquement [62].	148
Figure 114 : Comparaison des principales propriétés mécaniques de la résine Elium® et de résines époxy commerciales [65].	148
Figure 115 : Présentation des différents grades de résine Elium®, adapté de [66].	149
Figure 116 : Différences de fonctionnement et de propriétés entre les nœuds de réticulation pour les thermodurcissables et les vitrimères [73].	149
Figure 117 : échantillons de deux polymères thermoplastiques modifiés en vitrimères (PMMA et HDPE) soudés l'un à l'autre [72].	150
Figure 118 : Chaîne de la valeur pour les techniques d'enfouissement. Exemple d'un bateau de plaisance ou de sport. (crédit : IPC).	154
Figure 119 : Chaîne de la valeur de la filière CSR, adapté de [91]. Exemple d'un bateau de plaisance ou de sport.	155
Figure 120 : carte des acteurs de la filière CSR française (crédit : IPC).	181

SIGLES ET ACRONYMES

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
ATL	Automated Tape Laying
BMC	Bulk Molding Compound
BPHU	Bateaux de Plaisance Hors d'Usage
BPS	Bateau de Plaisance et de Sport
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CAN	Covalent Adaptable Networks (ou réseaux covalents adaptables en français)
CETIM	Centre technique des industries mécaniques
CFRP	Composite Fiber Reinforced Polymer
CIRC	Centre International de Recherche sur le Cancer
CMC	Composite à Matrice Céramique
CMM	Composite à matrice métallique
CMO	Composite à Matrice Organique
COV	Composé Organique Volatil
CSR	Combustible Solide de Récupération
DBPS	Déchets de Bateaux de Plaisance ou de Sport
DEEE	Déchet d'Équipement Électrique et Électronique
ELV	End-of-Life-Vehicles (VHU en français)
FDES	Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire
FEE	France Énergie Éolienne
FHV	Fragmentation Haut Voltage
FIN	Fédération des Industries Nautiques
FRP	Fiber Reinforced Plastic
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastic
GREC	Guide du Recyclage et de l'Ecoconception des Composites
ICPE	Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
ICV	Inventaire des données du Cycle de Vie
IFTH	Institut Français du Textile et de l'Habillement
INDRA	Industrie Nationale de Déconstruction et de Recyclage Automobile
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
IPC	Centre Technique Industriel de la Plasturgie et des Composites
ISDND	Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux
MEB	Microscopie Électronique à Balayage
MPR	Matière Plastique Recyclée
PA	Polyamides
PAN	Polyacrylonitrile
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur
PE	Polyéthylène
PEHD	Polyéthylène Haute Densité
PET	Polyéthylène Téréphtalate
PLM	Cycle de Vie du Produit (Product Life Management)
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle

POP	Polluants Organiques Persistants
PP	Polypropylène
PPE	Programmations Pluriannuelles de l'Energie
PVC	Polychlorure de vinyle
QSP	Quilted Stratum Process
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
REP	Responsabilité Elargie des Producteurs
RSE	Responsabilité Sociétale des Entreprises
RTM	Resin Transfer Molding
SMC	Sheet Molding Compound
TD	Thermodurcissable
TGAP	Taxe générale sur les activités polluantes
TP	Thermoplastique
TRL	Technologie Readiness Level (niveau de maturité technologique)
VHU	Véhicule Hors d'Usage

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

Guide pour le recyclage et l'écoconception des composites (GREC)

Le présent rapport présente un état des lieux exhaustif sur le recyclage des composites en France en 2022. Ce travail est motivé par la volonté grandissante des industriels de la filière plasturgie et composites d'engager une dynamique d'économie circulaire.

Ce guide ambitionne de couvrir les principaux objectifs suivants : *i.* Cartographier qualitativement et quantitativement les flux matières et gisements de déchets dans l'industrie française des composites; *ii.* Dresser un état de l'art des solutions composites à faible impact environnemental; *iii.* Elaborer un état de l'art des possibilités de revalorisation actuelles des déchets composites, incluant des éléments de réglementation.

*Compte tenu de l'évolution constante de l'industrie et des enjeux liés à l'écoresponsabilité, IFTH, CETIM et IPC, trois centres techniques industriels actifs dans le domaine des composites, ambitionnent de livrer un **Guide sur le Recyclage et l'Ecoconception des Composites (GREC)** à partir des dernières données marchés et avancées techniques.*

