

Matériaux de spécialité pour une économie circulaire : illustration sur le recyclage des pales d'éoliennes

Armand Ajdari, vice-président R&D du groupe Arkema

Introduction

Nous commencerons par une promenade sur le recyclage dans le contexte des « matériaux de spécialité », des matériaux d'un niveau de performance¹ élevé et donc des matériaux de valeur. Ils se distinguent des matériaux de commodité², qui font le gros des volumes à recycler comme cela est présenté

1. La performance d'un matériau correspond à sa capacité à remplir un cahier des charges donné.

2. Matériaux très courants comme l'acier, le béton, le bois, le PVC, souvent en raison de leurs très bas coûts de production et de leurs bonnes propriétés mécaniques.

dans le chapitre de Jean-François Gérard³. Ils ne sont pas non plus nécessairement des matériaux stratégiques⁴ où l'accès à la matière elle-même est un enjeu clé. Puis nous nous focaliserons sur la problématique du « recyclage des pales d'éoliennes ».

3. Recycler les matériaux, une des réponses pour une économie circulaire. Illustration pour les polymères.

4. Matériaux au cœur du fonctionnement de la société auxquels il est nécessaire d'avoir accès afin de maintenir le bon fonctionnement de la société. Par exemple : les terres rares utilisées dans la fabrication de batteries ou d'appareils électroniques.

La société Arkema est un leader mondial des matériaux de spécialité avec plus de 20 000 personnes dans le monde, et à peu près un tiers de la production en Amérique, un tiers de la production en Europe et un tiers de la production en Asie. La signature « des matériaux innovants pour un monde durable » (Figure 1) illustre l'importance dans la stratégie du groupe des problématiques de développement durable. Arkema sert beaucoup de marchés : la mobilité, l'énergie, le bâtiment, l'électronique, la vie quotidienne (emballages alimentaires, articles de sport, etc.), et ce, à travers

une combinaison unique de compétences (Figure 2) : de l'expertise sur les matériaux eux-mêmes et les façons de les renforcer, de l'expertise sur les façons de les assembler, et enfin de l'expertise sur leur revêtement et protection. Arkema mobilise cette combinaison unique pour répondre aux problématiques de ses clients qui demandent à la fois beaucoup de performance et des solutions aux exigences du développement durable.

Cela conduit Arkema, d'une part, à orienter la plupart de ses efforts de recherche vers l'émergence de solutions plus vertes : il y a dans beaucoup de batteries 1 % ou 2 % de nos matériaux organiques. Nous servons le marché du photovoltaïque, le marché de l'hydrogène et le marché de l'éolienne. Ces marchés sont à la fois des opportunités de croissance et des défis en adéquation avec notre stratégie.

D'autre part, la deuxième partie de nos efforts concerne l'amélioration de la gestion



Figure 1

Logo et signature du groupe Arkema (Innovative materials for a sustainable world : Des matériaux innovants pour un monde durable).

Source : https://www.arkema.com/files/live/sites/shared_arkema/files/downloads/investorrelations/en/finance/ARKEMA_CMD%202023_version%20definitive%2026.09.2023.pdf



Figure 2

Les trois principaux secteurs de compétences du groupe Arkema.

Source : https://www.arkema.com/files/live/sites/shared_arkema/files/downloads/investorrelations/en/finance/ARKEMA_CMD%202023_version%20definitive%2026.09.2023.pdf

des ressources : ce sont les deux gros piliers des problématiques environnementales. L'économie circulaire est donc un enjeu majeur pour Arkema.

1 La recyclabilité

Rappelons que le recyclage n'est pas le but en soi. Le but, c'est d'utiliser le moins de matériaux pour avoir le plus d'usages, donc il faut toujours commencer par réfléchir à comment réduire la quantité de matériaux que l'on utilise, comment allonger la durée de vie ou réutiliser au maximum, et, quand on n'a pas d'autre choix, comment recycler. En effet, faire un tour de la boucle dans la **Figure 3**, coûte de l'énergie, du CO₂⁵, de l'argent et soulève de nombreuses problématiques technologiques qui sont mentionnées dans d'autres chapitres de cet ouvrage. Le but n'est donc absolument pas de faire le plus de tours ! C'est vrai en général, et en particulier dans le contexte des matériaux polymères⁶ (**Figure 3**), où l'on retrouve ces mêmes problématiques avec le recyclage mécanique et le recyclage chimique.

Comme acteur des matériaux de spécialité, Arkema développe et propose deux grands

5. CO₂ est la formule chimique du dioxyde de carbone, un des principaux gaz responsables du réchauffement climatique.

6. Les polymères sont de longues chaînes moléculaires qui ont la capacité de former un réseau tridimensionnel. Par extension, on appelle aussi polymères les matériaux formés principalement de ces molécules particulières.

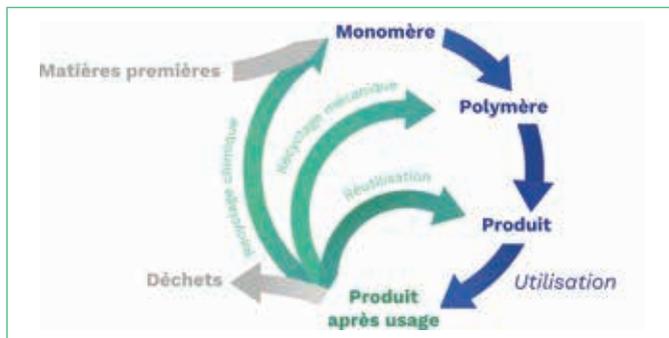


Figure 3

La règle des « 3R » appliquée aux polymères. Ce diagramme illustre la règle des 3R : Réduire, Réutiliser, Recycler. Chaque flèche représente un apport d'énergie nécessaire à la transition.

types de solutions pour l'économie circulaire :

- des solutions qui permettent ou facilitent le recyclage des polymères de grande diffusion ;
- des matériaux avancés de haute performance intrinsèquement recyclables.

1.1. L'exemple des emballages alimentaires

La **Figure 4** illustre le cas d'un adhésif pour emballage alimentaire flexible, une thématique de la vie quotidienne.



Figure 4

Emballage alimentaire en mono-matériau

Source : Arkema

*Il s'agit d'un adhésif placé entre plusieurs couches de matériaux pour les coller entre elles. Ici, l'adhésif « SF10M » permet de maintenir entre elles les différentes couches de polyéthylène.

Une des approches pour l'emballage alimentaire, contrairement à ce qui a été historiquement réalisé pour améliorer les propriétés, consiste à opter pour des emballages alimentaires mono-matériau⁷ car cela simplifie les étapes de tri et facilite le recyclage. La première fonction d'un bon emballage est de conserver les aliments longtemps pour éviter le gaspillage, ce qui nécessite en général plusieurs couches collées entre elles (auparavant de matériaux différents, dans le futur en utilisant une seule base chimique pour permettre le recyclage). De plus, l'emballage doit être scellé, ce qui nécessite l'utilisation d'un adhésif pour coller les bords ou le couvercle. Cependant les adhésifs, qui ne représentent qu'environ 1 % de la masse du produit final, ne doivent pas compromettre la recyclabilité de tout le reste qui est en mono-matériau. Il est donc nécessaire de développer des adhésifs qui soient aussi

performants que les adhésifs précédents en termes d'adhésion dans différentes conditions de température, qui restent adaptés aux procédés industriels, et qui en plus favorisent la recyclabilité de l'ensemble du produit.

La **Figure 5** présente une autre innovation qui remonte à plusieurs dizaines d'années, à savoir un emballage refermable grâce à un système d'adhésif adapté. Nous travaillons également à son évolution vers des solutions compatibles avec le recyclage de la barquette dans des environnements mono-matériau.

Ce type de travaux est réalisé dans le cadre de consortia⁸. Il est essentiel de collaborer avec les fabricants d'emballages, les grandes marques et tous les acteurs de la chaîne, pour que la solution proposée soit validée. Ainsi, un produit affirmé recyclable dans un environnement mono-polyéthylène⁹ par exemple doit être validé par un ensemble d'acteurs respectant des standards préalablement définis. L'une de ces initiatives européennes est « Recyclclass » qui gère ce type de sujets.

7. Composé d'un seul matériau.



Figure 5

Barquette refermable de la marque Bostik du groupe Arkema.

1.2. Des matériaux haute performance pensés pour la circularité : une chaussure de course éco conçue

Passons maintenant à une autre innovation pour laquelle

8. Pluriel de consortium. Cela désigne la réunion de différentes parties prenantes à des fins de coopération.

9. Le polyéthylène est un polymère formé à partir de la molécule d'éthylène de formule C_2H_4 .

Arkema a obtenu le ICIS Innovation Awards en 2023. Le matériau est un polyamide¹⁰, donc un plastique à longue chaîne, de haute performance, totalement biosourcé car issu de l'huile de ricin. Depuis plusieurs décennies, Arkema a développé des compétences pour transformer cette matière en l'adaptant afin qu'elle puisse être utilisée par des procédés de filage, d'injection ou de formage différents, et pour en faire potentiellement des mousses, des pièces très dures et des parties de fibres textiles.

Dans l'exemple présenté, nous avons travaillé en partenariat – partenariat étant un mot clé – avec la société suisse On Running pour concevoir et créer une chaussure de sport de haute performance et ultra-légère (<https://www.on.com/fr-fr/products/cloudneo-42cloudneo>) (Figure 6). Elle pèse environ 200 g par chaussure et est conçue dès le départ pour pouvoir être recyclée sans être désassemblée. Cette chaussure est 100 % recyclable mécaniquement : elle peut être mise dans une broyeuse, Arkema récupère le broyat et en fait un autre matériau haute performance utilisable.

Ce qui est très intéressant dans cet exemple, en dehors du fait que des années de recherche ont permis de créer ce matériau qui simplifie finalement une des étapes du désassemblage, c'est qu'elle permet à On Running d'évoluer dans son modèle économique. Cette chaussure n'est plus proposée

à la vente, mais en abonnement. Vous payez une certaine somme par mois, et quand cette chaussure est usée, vous la renvoyez à On Running, qui se charge du broyage et nous renvoie le broyat.

L'avantage est que ce système résout le problème de la collecte. C'est possible parce que cette chaussure a une certaine valeur, étant une chaussure de haute performance dont les coûts associés sont importants. Les clients sont intéressés par ce modèle économique, car ils s'approprient la démarche en même temps que la chaussure, et peuvent raconter à leurs proches comment ils sont acteurs de la circularité. Pour On Running, cela permet d'avoir des relations avec ses clients non seulement au moment de l'achat, mais aussi par une relation continue. C'est une situation où une transformation du modèle



Figure 6

Chaussure de la marque On Running conçue en partenariat avec Arkema.
Source : <https://www.on.com/fr-ch/collection/cyclon>

10. Le polyamide est un polymère contenant des fonctions amide de formule (CO)NH.

économique est permise par la technologie. Sans être (encore ?) de grande diffusion, c'est un exemple inspirant.

2 Le recyclage des éoliennes : un pilier de la transition énergétique

Les éoliennes sont un pilier essentiel et une nécessité indiscutable de la transition énergétique pour obtenir davantage d'électricité à faible émission de carbone. Elles connaissent une croissance sur tous les continents. Pour éviter un prisme trop européen, il est bon de rappeler que la Chine est de loin le leader en termes de volumes et de capacités industrielles dans le domaine éolien. Jusqu'à présent, elle a principalement servi son marché intérieur, mais on observe de plus en plus d'exportations vers l'Europe et les États-Unis (à bas prix). Malgré le caractère intermittent de l'électricité produite, les coûts de l'électricité fournie par les parcs éoliens modernes sont désormais relativement compétitifs par

rapport à d'autres offres. Nous avons une industrie qui, *stricto sensu*, n'a pas nécessairement besoin de subventions pour subsister. En revanche, c'est une économie fortement soumise à des pressions sur les marges. Et, sans ressources financières et profits, il est difficile d'innover et d'assumer les changements nécessaires pour tendre vers un modèle circulaire.

2.1. Défis actuels et futurs du recyclage des pales d'éoliennes

Lorsque l'on observe une éolienne, on constate la présence de trois pales. La fabrication de ces pales en composite représente une démarche d'allègement, utilisant ainsi le matériau de manière optimale. C'est le meilleur matériau, mais chaque pale pèse néanmoins approximativement plusieurs dizaines de tonnes, ce qui implique des quantités de matière absolument considérables, et qui engendrent des déchets. Le graphique de la **Figure 7** illustre

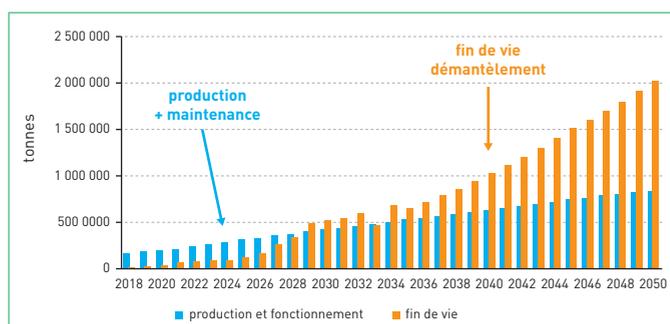


Figure 7

Prévisions d'évolution des masses de déchets générés lors de la production et utilisation des éoliennes (en bleu) et les déchets générés lors de la fin de vie des éoliennes (en orange).

en bleu les déchets générés lors de la fabrication des pales (les « chutes de production »). Pour l'industrie du composite, cela représente environ 8 à 10 % de pertes à chaque étape, ce qui n'est pas si mal. En comparaison, la production de bateaux entraîne généralement des pertes plus importantes. Les pertes surviennent aussi pendant la production et l'entretien du produit manufacturé. Les barres orange représentent, elles, le tsunami à venir des déchets à la fin de vie des éoliennes massivement installées depuis le début des années 2000. Typiquement conçues pour durer 20 ans, ces éoliennes vont arriver en fin de vie et générer une masse significative de déchets, même en tenant compte des reports et extension de leurs durées de service.

Pour donner un ordre de grandeur, diverses extrapolations estiment que l'on atteindra environ un million de tonnes de déchets générés par an d'ici une dizaine d'années et cette quantité continuera de croître de manière significative par la suite. Il est important de rappeler que les déchets des plastiques polymères en général s'élèvent à environ 400 millions de tonnes par an. Les déchets de pales d'éolienne n'en représenteront donc qu'une petite proportion (1 sur 400), mais à partir de matériaux de haute performance avec une forte valeur ajoutée.

2.2. Gestion actuelle des déchets de pales d'éoliennes

Le mode de gestion actuelle de ces déchets de fin de vie est l'enfouissement comme

représenté sur la **Figure 8**, sur laquelle on distingue clairement l'engin de chantier qui tente de pousser des tronçons d'éoliennes pour les enfouir sous terre. Tel est le destin actuel des éoliennes aujourd'hui, ce qui n'est pas enthousiasmant.

Parmi les mesures visant à lutter contre cela, avant d'aborder la question du recyclage toujours coûteux, il y a la règle des « 3R » : Réduire, Réutiliser, Recycler.

Allonger la durée de vie est la première étape pour repousser le problème, et pour cela il faut optimiser l'utilisation et surveiller l'état d'usure. Certains composants s'usent plus rapidement, par exemple les bords des éoliennes, ce qui constitue un enjeu technique majeur. L'autre aspect est d'examiner l'économie dans son ensemble et, sur ce point, il y a plutôt une convergence entre les considérations environnementales et les considérations économiques. L'idée est de produire des éoliennes plus grandes (**Figure 9**) qui



Figure 8

Photographie d'un site d'enfouissement de pales d'éoliennes. Casper Regional Landfill, Wyoming, États-Unis.

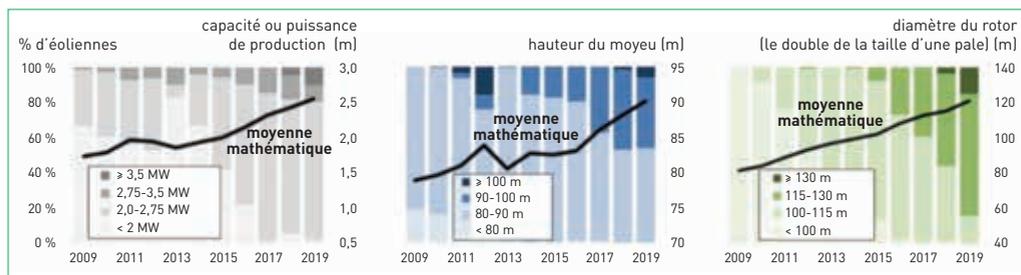


Figure 9

Graphes représentant l'évolution moyenne de la puissance de production (à gauche), de la hauteur du moyeu de l'éolienne (au centre), de la taille des pales (à droite).

Source : Berkeley Lab, Wind Energy Technology Data Update: 2020 Edition, Page 37. Note that rotor diameter (shown here in meters) is slightly more than twice the length of the blades



Figure 10

Photographie d'une éolienne dont les pales mesurent 110 mètres de long.

Source : d'après <https://www.bbc.com/news/business-51325101>

sont plus rentables financièrement et plus efficaces en termes d'utilisation des matériaux. Ainsi, au cours des 10 ou 15 dernières années, et cela va se poursuivre, les éoliennes sont devenues de plus en plus grandes comme sur l'exemple de la *Figure 10* d'une éolienne de 12 mégawatts¹¹ avec trois pales mesurant presque 110 mètres de long chacune. C'est la direction prise pour les 10 prochaines années : cette augmentation de la taille permettra de réduire la consommation de matériaux, même si cela ne résout pas le problème du recyclage des éoliennes précédentes et de celles que nous continuons d'installer.

2.3. Recyclage des pales d'éolienne

Une caractéristique très particulière du recyclage recherché est liée à la taille des éoliennes. Ce sont des objets gigantesques qu'il est nécessaire de déposer, tronçonner,

broyer, ramener. Ces étapes sont effectuées à différentes échelles, et, à la fin, on peut introduire le matériau final dans une broyeuse et obtenir cette sorte de poudre que l'on voit dans les deux mains de la *Figure 11*, mélange de résine plastique et de fibres de verre ou de carbone. Le problème est alors de valoriser ce mélange sous cette forme.

Peut-on les introduire dans une extrudeuse pour en créer quelque chose ? Pour l'instant, la réponse est « non », comme dans le cas des pneus, qui sont également des composites : on les incinère dans des cimenteries, considérant que c'est une meilleure option que l'enfouissement, si cela est fait dans de bonnes conditions.

En effet, les composites sont obtenus par imprégnation d'un réseau de fibres par une résine. Le recyclage de ces composites est très difficile en raison de l'abondance de fibres et surtout dépend de la nature de la résine. Actuellement, on utilise principalement des résines **thermodurcissables** (époxy et polyesters). L'injection des

11. Unité de puissance pour mesurer la quantité d'énergie produite.

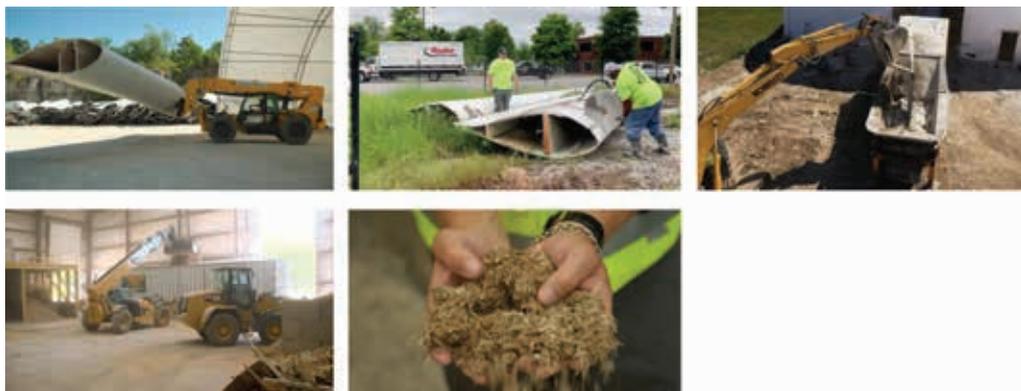


Figure 11

Les diverses étapes du démantèlement et broyage pilote mené par Véolia aux États-Unis.

Source : <https://www.businessinsider.com/recycle-wind-turbine-blades-veolia-north-america-waste-landfills-2023-2?r=US&IR=T>

fibres se fait avec une résine liquide qui est réticulée, créant ainsi de nombreuses liaisons chimiques dans toutes les directions, formant une sorte de réseau complexe de liaisons chimiques dans toute la matrice et qui enserré les fibres. Le problème est que ces liaisons chimiques sont omniprésentes, rendant l'objet figé et les fibres emprisonnées. Un peu comme un blanc d'œuf cuit, qui ne peut plus être modifié en termes de forme.

Une des approches explorées pour les composites consiste à remplacer ces résines entièrement réticulées par ce que l'on appelle des **résines thermoplastiques**, comme cela est présenté dans le chapitre de Jean-François Gérard. Dans ce cas, on a plutôt des chaînes longues ressemblant à des spaghettis qui s'entrelacent et qui, lorsqu'on les chauffe, peuvent glisser les unes par rapport aux autres, permettant ainsi de dénouer l'ensemble et

éventuellement de récupérer séparément les fibres et les chaînes.

Cependant, les procédés actuels de fabrication, notamment pour de grands objets, présentent un problème majeur : avec les résines thermoplastiques, quand le liquide est injecté, la viscosité est beaucoup trop élevée et la résine ne pénètre pas entre les fibres, ce qui entraîne des interfaces de mauvaise qualité et conduit à un matériau de mauvaise qualité, inacceptable.

Parmi les approches explorées pour permettre une recyclabilité efficace, Arkema a développé il y a plus d'une décennie une voie utilisant son expertise dans les matériaux de type acrylique pour proposer une nouvelle **résine « Elium »** : c'est une résine réactive (qui contient monomère, polymères, amorceurs, additifs) et permet une imprégnation facile. La résine à l'état liquide est coulée entre

les fibres, puis polymérisée *in situ*. Dans ces conditions, la chimie du mélange permet la formation de longues chaînes linéaires, non entrecroisées. Cela permet d'obtenir des matériaux composites possédant des propriétés mécaniques, de densité et de durabilité appréciables. Tout comme les autres thermoplastiques, l'avantage est que ce matériau peut être formé, réparé et soudé.

Cette approche permet surtout techniquement de valoriser les pales en fin de vie, que ce soit par recyclage mécanique ou chimique. Elle a été récompensée par le Prix Pierre Potier de l'innovation en chimie en faveur du développement durable.

Si on opte pour le recyclage mécanique, au broyage, la plasticité de la matrice autour des fibres permet de recomposer et potentiellement d'ajouter d'autres polymères, permettant ainsi de créer d'autres matériaux composites valorisables à un niveau assez élevé. Il est essentiel d'éviter le *downcycling*¹².

Le recyclage chimique est également possible, car il permet de récupérer séparément les fibres, qui représentent une partie importante de la valeur. Et si ce sont des fibres de carbone, elles ont une empreinte carbone notable. La résine récupérée

séparément peut, elle, être distillée¹³ pour refaire du monomère, dont nous avons démontré qu'il permet de recréer de la résine Elium¹⁴ de même performance (Figure 12), refermant ainsi la boucle du diagramme des 3R.

Les études à l'échelle laboratoire ont démontré que cela permettait effectivement de produire à nouveau des matériaux performants. C'est la même chimie que celle mentionnée pour le PMMA¹⁵, dans le chapitre de Jean-François Gérard, évoquant certaines chaînes polymères qui, lorsqu'elles sont chauffées, reviennent facilement au monomère¹⁶. Ces matrices, non seulement sont thermoplastiques, mais en plus possèdent une chimie¹⁷ qui permet leur décomposition facile à chaud pour récupérer le monomère avec une empreinte carbone relativement faible. En conséquence, il est possible de réaliser un recyclage chimique ou mécanique de haut niveau depuis quelques années.

13. Processus chimique permettant la séparation de différentes espèces chimiques, par différence de volatilité.

14. Résine développée par Arkema.

15. PMMA ou poly méthacrylate de méthyle est un polymère notamment connu comme étant le Plexiglas.

16. Le monomère est le motif moléculaire minimal qui se répète pour former la chaîne de polymère.

17. Bien que le terme chimie corresponde à la science des interactions, configurations et transformations des molécules, le terme est employé ici pour faire référence aux propriétés globales du matériau induites par le changement de température.

12. Littéralement : recyclage par le bas. Cela consiste à recycler un matériau de haute performance en un matériau à faible valeur ajoutée. Par exemple : broyer les pales d'éoliennes pour en faire un matériau de remblayage pour du ballast, comme évoqué dans la suite de la conférence.

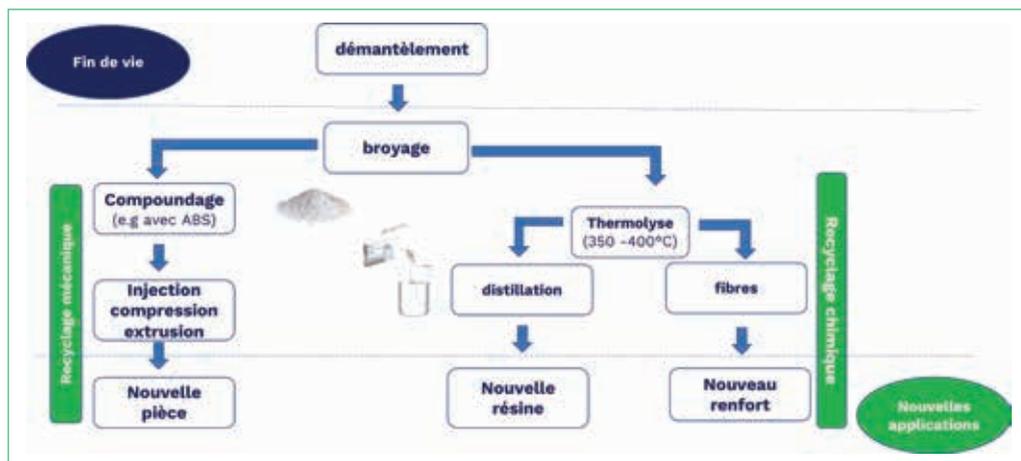


Figure 12

Les voies de recyclage possibles pour la résine Elium développée par Arkema.



Figure 13

Photographie aérienne d'une pale d'éolienne.

Source : https://www.governova.com/news/sites/default/files/2022-03/zebra_3.jpg

Grâce à des partenariats, nous avons démontré qu'il est possible de fabriquer de vraies pales avec ce type de solution. Un exemple datant du début de l'année 2022 (Figure 13) rappelle la taille impressionnante de ces objets.

Deux points méritent d'être mentionnés. Il y a environ une tonne d'adhésifs sur une pale. Nous produisons désormais

des adhésifs compatibles avec notre résine, ce qui évite d'avoir à les retirer au moment du recyclage, puisque l'adhésif est maintenant compatible avec le recyclage, un peu comme dans l'exemple des barquettes alimentaires.

Ensuite, la mention « 100 % recyclable » qui est présentée sur la Figure 13 indique la possibilité technique de recycler,

mais pas que la chaîne de recyclage soit en place. Elle ne dit pas non plus quel est le niveau du recyclage, ce qui est un élément clé pour faire progresser les réglementations sur le recyclage.

2.4. Autres utilisations de la résine Elium

La résine Elium n'a pas vocation à servir uniquement les éoliennes : on l'utilise aussi pour faire des réservoirs d'hydrogène haute pression (jusqu'à 700 bars) avec

des fibres de carbone. Dans ce cas de recyclage, l'objectif est d'abord de récupérer la fibre de carbone qui a une empreinte carbone élevée et beaucoup de valeur. De nouveau, Elium est un candidat qui peut se substituer dans les procédés existants aux solutions actuelles.

Nous avons aussi des collaborations dans le nautisme. Par exemple, le Groupe Beneteau a mis à sa gamme commerciale deux bateaux qui sont fabriqués avec la résine Elium (*Figure 14*).



Figure 14

Voilier de la marque Beneteau, réservoir à hydrogène fait en résine Elium.

Conclusion : éoliennes et circularité

Alors quelles perspectives pour le recyclage des éoliennes et de leurs pales ?

En matière de recyclage, les éoliennes ont comme spécificité leur taille, mais également leur durée de vie. On ne peut pas avoir le même raisonnement, peut-être même pas le même langage, quand on parle du recyclage d'objets comme un bateau qui a une durée de vie de 40 ans ou d'une éolienne avec 20 ou 30 ans, et quand on parle d'emballages qui seront à recycler au bout de quelques semaines. La durée

de vie impacte la mise en place de la chaîne de recyclage. Alors que pour de nouveaux emballages alimentaires on peut lancer « en même temps » les produits et les usines de recyclage, pour des objets de longue durée c'est impossible. Même si les fabricants de pales adoptaient aujourd'hui la solution Elium, on ne pourra pas installer maintenant une chaîne de recyclage d'Elium à l'échelle, parce que de toute façon, le marché ne viendra que dans 20 ans. Cette problématique peut conduire à de l'immobilisme, ce qu'il faut éviter.

L'autre problème est que les fabricants d'éoliennes sont actuellement très pressurisés sur les marges, et donc peu enclins à adopter des innovations qui pourraient entraîner des surcoûts, pour faire le changement de technologie ou de façon durable.

Parmi les actions ou les messages nécessaires pour sortir de cette impasse, il faudrait des réglementations pour guider et prescrire le bon niveau de circularité pour ce type d'industrie, dans la durée. En particulier, il faudra prescrire le niveau de recyclage demandé, expliciter ce que veut dire « recyclable ». N'importe qui peut mettre du broyat d'éolienne (**Figure 11**) et s'en servir pour en faire du ballast pour construire des autoroutes, mais ce n'est pas du recyclage à la hauteur de la valeur de ces matériaux. Ainsi la Commission européenne pourrait revoir les appels d'offres sur les éoliennes pour être plus précis dans la dénomination. Les critères environnementaux gagneraient aussi à être précisés pour que cela motive l'industrie dès aujourd'hui, afin que, dans 30 ans, les pales en fin de vie soient effectivement recyclables.

La deuxième chose, c'est que les acteurs doivent avancer et continuer d'explorer des solutions plus disruptives. Avancer sur le recyclage en utilisant une source de matière qui est

utilisable pour commencer à petite échelle, à savoir les chutes de production. Nous y travaillons sur différentes chaînes de valeur, dans le nautisme, dans l'hydrogène, dans l'éolien.

Mais c'est aussi regarder des solutions plus disruptives pour la fabrication des pales. Pour l'instant, les solutions proposées comme Elium sont adaptables aux procédés que les industriels qui fabriquent des pales d'éoliennes utilisent. Peut-être qu'il existe des solutions technologiques qui impliqueraient d'autres procédés de fabrication de ces composites qui mériteraient d'être revisités pour trouver de nouvelles idées.

Les problèmes sont si complexes et difficiles qu'il faut les aborder non seulement avec tous les acteurs, mais aussi avec des points de vue différents pour imaginer, créer des solutions qui apportent de la valeur quelque part, sinon, on ajoute simplement des surcoûts. Les partenariats sont essentiels, que ce soit entre les industriels, mais aussi avec le monde académique et avec les start-up pertinentes. C'est un chemin à parcourir collectivement.