

# INNOVATIVE

*with*

LE MAGAZINE QUI CONNECTE LES IDÉES D'AVENIR #02

## ÉOLIEN

ARKEMA RELÈVE  
LE PARI DE PALES  
D'ÉOLIENNES  
RECYCLABLES

P. 12

## HYDROGÈNE

DES RÉSERVOIRS  
À HYDROGÈNE  
EN RÉSINE ELIUM®  
RECYCLABLES  
ET COMPÉTITIFS

P. 20

## RENFORTS BÉTON

CONSTRUCTION :  
ELIUM® VA ACCÉLÉRER  
LE DÉPLOIEMENT  
DES RENFORTS BÉTON  
EN COMPOSITES

P. 26

## NAUTISME

AVEC LE  
RECYCLAGE,  
UNE NOUVELLE  
FILIÈRE  
SE PROFILE

P. 32

## DOSSIER

# RÉSINE ELIUM® : UNE INNOVATION DE RUPTURE DANS LE MONDE DES COMPOSITES

Simplicité d'utilisation, performance, gains de productivité et recyclabilité... La résine Elium® dispose de réels atouts sur les composites thermodurs.

**ARKEMA**  
INNOVATIVE CHEMISTRY

## Coup d'œil

p. 2-3 Elium® : mieux comprendre une résine d'avenir

## Dossier

p. 4-11 Résine Elium® : une innovation de rupture dans le monde des composites

## Décryptage

p. 12-19 Arkema relève le pari de pales d'éoliennes recyclables

## Focus


p. 20-25 Des réservoirs à hydrogène en résine Elium® recyclables et compétitifs

## En lumière

p. 26-31 Construction : Elium® va accélérer le déploiement des renforts béton en composites

## Dixit

p. 32-36 Nautisme : avec le recyclage, une nouvelle filière se profile

 **GLOSSAIRE** : le lecteur trouvera en fin de document un recueil des termes techniques présentés dans ce magazine.

**ELIUM®** by Arkema



YouTube

+ 2 minutes pour comprendre le recyclage de nouvelles résines composites



**Résine Elium® !** Explorez cette innovation majeure issue de la R&D d'Arkema dans notre seconde édition d'*Innovative with*. Clients, partenaires industriels et académiques... ils témoignent abondamment des avancées que représente cette nouvelle résine thermoplastique : des gains de productivité prouvés qu'elle apporte dans sa mise en œuvre, des caractéristiques de solidité et de durabilité des pièces composites obtenues, mais surtout de leur recyclage qu'elle rend enfin possible. Une rupture technologique d'autant plus attractive pour la filière des composites qu'elle s'appuie sur les mêmes outils de fabrication que ceux utilisés pour les résines thermodurcissables, toujours très dominantes dans l'univers des composites.

Découvrez la révolution Elium® dans les pales d'éoliennes, dans la construction et le génie civil avec les renforts béton, dans le transport avec les réservoirs à hydrogène, dans le nautisme avec une nouvelle génération de voiliers. Elium®, c'est littéralement un verrou que l'on fait sauter dans le monde des composites. Alors que les enjeux de l'économie circulaire cristallisent d'importants efforts de recherche dans toutes les filières industrielles, nous sommes fiers de vous présenter les performances et les promesses de ce nouveau matériau qui porte en lui l'avenir de composites – enfin – recyclables.

**BONNE LECTURE !**

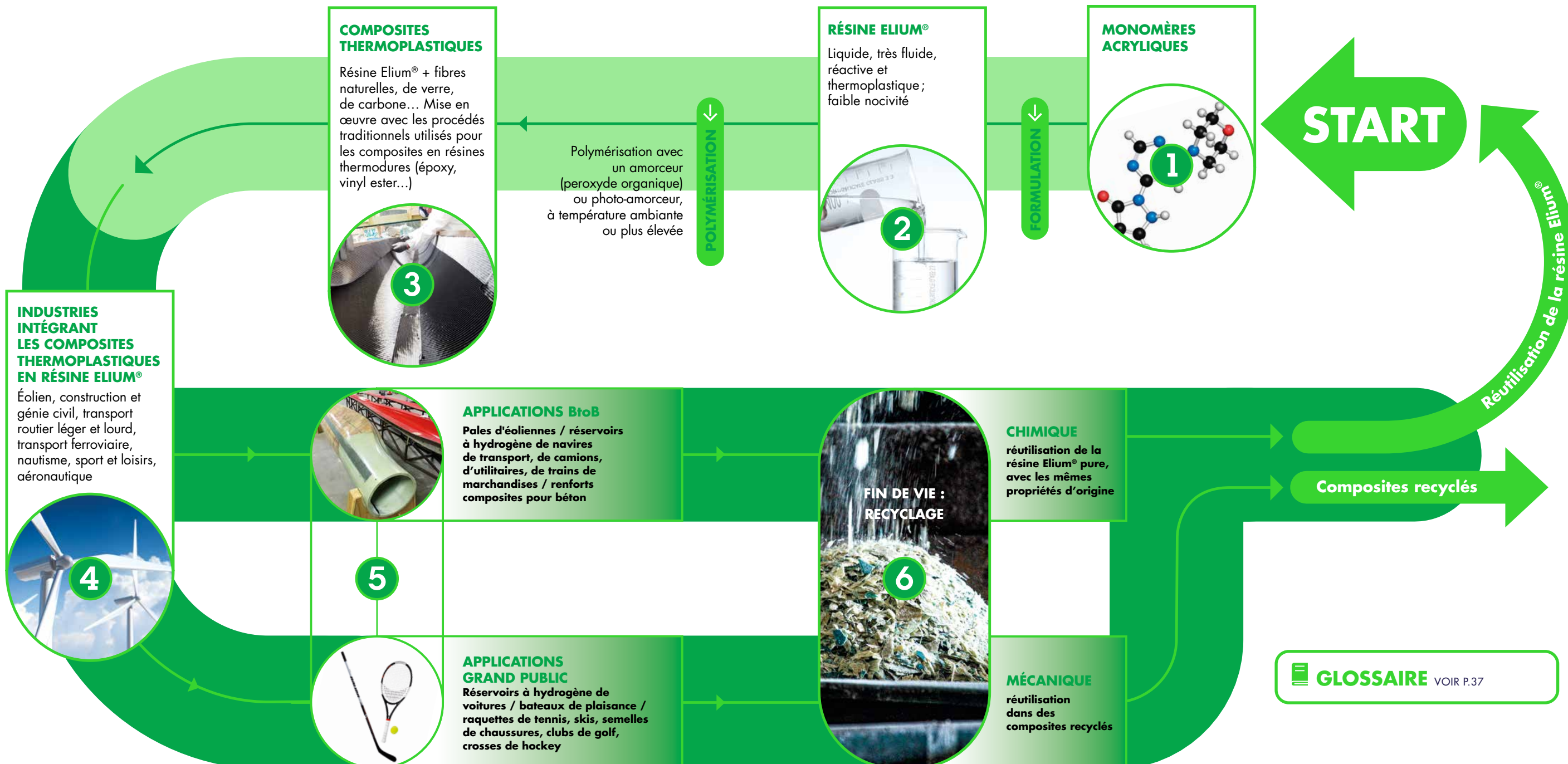


**DENIS BORTZMEIER**

Directeur des partenariats R&D

# ELIUM® : MIEUX COMPRENDRE UNE résine d'avenir

Spécialiste des Matériaux de Spécialités, Arkema pousse toujours plus loin sa quête d'innovation, en lien avec les enjeux économiques et environnementaux. Ainsi en est-il avec Elium®, une résine aux propriétés inédites, ouvrant la voie du recyclage aux produits et dispositifs qui l'intègrent, et offrant un niveau de performance similaire à celui des résines traditionnelles. Six étapes pour mieux comprendre son potentiel.





# RÉSINE ELIUM® : UNE INNOVATION DE RUPTURE DANS LE MONDE *des composites*

## RENCONTRE AVEC...

**GUILLAUME CLÉDAT**, Directeur du *business* et du développement pour la résine Elium®

**Avec sa résine thermoplastique Elium®, Arkema offre une solution unique sur le marché pour fabriquer des pièces composites selon les mêmes procédés de fabrication que ceux utilisés pour les pièces en résines thermodures. Mais avec les atouts majeurs de la recyclabilité, d'une production moins énergivore et des possibilités de thermoformage.**

**De nombreux secteurs pourraient bénéficier de ces points forts : l'éolien, l'automobile mais aussi la construction et le nautisme.**



Guillaume Clédat

## Pourquoi avoir développé la résine Elium® ?

**Guillaume Clédat** – Nous voulions rendre les composites thermoplastiques plus accessibles pour nos clients, plus simples à utiliser. Pari réussi avec cette résine, facile à mettre en œuvre car liquide comme les autres résines très largement utilisées aujourd'hui mais avec l'avantage de pouvoir polymériser à température ambiante et durcir plus vite. Une vraie rupture technologique par rapport aux résines thermodures époxy par exemple, qui nécessitent des procédés de mise en œuvre souvent plus coûteux et énergivores puisqu'elles doivent être chauffées pour leur durcissement.

## Quelles applications visez-vous ?

**G.C.** – Les usages sont larges, du fait même des qualités intrinsèques de la résine Elium®. Elle peut rentrer dans la composition de nombreux matériaux composites – chargés en fibres de verre, de carbone, de fibres naturelles – et avec un taux de fibres très élevé. Arkema est un leader mondial des Matériaux de Spécialités, et notre force de frappe nous permet de viser avec Elium® de nombreux usages dans l'industrie.

## Quelles sont les filières industrielles concernées par Elium® ?

**G.C.** – Les filières de l'éolien, de la construction et du génie civil, du transport et du stockage de l'hydrogène, ainsi que le nautisme sont les plus concernées par les avantages de cette résine. Elium® rentre dans la composition des pales d'éoliennes, des barres de renfort composites pour le béton (rebars) dans le secteur du génie civil, dans les réservoirs à hydrogène, dans les coques des voiliers... (voir double suivante).



Simplicité d'utilisation, performance, gains de productivité et recyclabilité... Elium® est la seule résine sur le marché à offrir toutes ces caractéristiques.

## UNE INNOVATION QUI FAIT DU BRUIT DANS LE MONDE DES COMPOSITES DEPUIS SA MISE SUR LE MARCHÉ.

**2012**

Dépôt des premiers brevets sur les formulations des résines Elium®

**2014**

Démarrage de la production industrielle sur le site Arkema de Mollet del Vallès (Espagne), aux États-Unis, en Corée du Sud et en Chine

**2016**

Mise à l'eau et première compétition du voilier *Arkema 3 Mini 6.50*, dont la coque et le pont sont réalisés en résine Elium®

**2017**

Récompense d'Arkema par le JEC Asia Innovation Awards pour l'utilisation des résines Elium® dans l'éolien

**2019**

Récompense d'Arkema par le JEC World Innovation Awards pour l'utilisation des résines Elium® pour la fabrication de renforts béton cintrables

**2020**

Démarrage du projet Zebra (*Zero waste Blade ReseArch* – Recherche sur les pales zéro déchet)



Chaque filière a ses raisons de recourir à Elium®, mais nos principaux clients rapportent, au-delà de la simplicité d'utilisation pour un composite thermoplastique, trois arguments forts : la performance, les gains de productivité dans la mise en œuvre de la résine, et la recyclabilité.

### À quel stade de développement en êtes-vous ?

**G.C.** – Nous avons démarré la production industrielle en 2014 sur trois continents (Europe, Amérique du Nord et Asie). De leur côté, nos clients commencent à l'intégrer à leurs produits. Je pense aux pales d'éoliennes de LM Wind Power ou aux voiliers de la start-up Northern Light, et de façon imminente aux réservoirs à hydrogène et aux barres de renfort en composites de Sireg. Sur tous ces marchés, les ventes d'Elium® sont en forte croissance ; Arkema triple ses ventes annuelles depuis 2016.

### Des motifs de fierté dans cette invention ?

**G.C.** – En effet, nos équipes sont très fières à plus d'un titre. Déjà pour les raisons énoncées ci-dessus, mais également en raison de notre sélection des matières premières rentrant dans la formulation de la résine Elium® : pas d'utilisation de sels de cobalt, catalyseur classique pour initier la polymérisation radicalaire des résines, mais souvent classés cancérigènes en Europe (substances CMR ■), ni de styrène, toxique pour la reproduction, classé également parmi les substances dangereuses pour la santé humaine.

### Comment Arkema met-il en œuvre ce marché ?

**G.C.** – Nous avons deux challenges : maintenir un rythme de production élevé, porté par une demande forte, tout en garantissant une qualité uniforme. Aussi développons-nous une chaîne d'approvisionnement mondiale, en installant nos sites de production sur trois continents. Mais il est essentiel d'accompagner nos clients et nos partenaires dans la mise en place d'une filière industrielle de production de composites incluant de cette nouvelle résine Elium®. Objectif : leur donner la vision la plus complète du produit pour leurs applications. Pour Arkema, cela constitue un motif supplémentaire de fierté.

### Au-delà des clients, qui sont les partenaires participant à cette entreprise ?

**G.C.** – Nous travaillons avec des partenaires académiques, des institutionnels, des centres de recherche, afin de créer un écosystème complet autour de la résine Elium®. Ils nous accompagnent dans sa mise en œuvre sur des marchés spécifiques : exemples avec l'Eolien National Energy Lab aux États-Unis ou en France au sein du projet Zebra (Zero waste Blade ReseArch), coordonné par l'IRT Jules Verne pour développer des pales d'éolienne zéro déchet. L'ensemble des acteurs est nécessaire à la mise en place de cette nouvelle filière industrielle. ■

**+400 %**  
de hausse des ventes  
de résine Elium® entre 2019 et 2020



Avec son partenaire Lalou Multi, Arkema a construit en 2015 le premier monocoque en résine Elium® recyclable.

## QUATRE MARCHÉS PRINCIPAUX, UNE AMBITION MONDIALE

### Éolien



**PRODUITS CONCERNÉS :** pales d'éoliennes.

**AVANTAGES D'ELIUM® :**

- permet des gains de productivité et de coûts lors de la fabrication par rapport aux résines thermodures : production plus rapide et moins énergivore.
- assure la recyclabilité des pales, pour des performances similaires aux résines thermodures, voire

supérieures en matière de résistance à l'endommagement.

**STADE DE DÉVELOPPEMENT :** en cours de test dans le cadre du projet Zebra (Zero waste Blade ReseArch – Recherche sur les pales zéro déchet), phase de production industrielle en 2022.

**CLIENTS :** fabricants de pales d'éoliennes, de composites ; énergéticiens ; entreprises de recyclage.

**DYNAMIQUE :** 60,4 GW de capacité d'énergie éolienne installée en 2019 dans le monde, soit 19% d'augmentation des installations par rapport à 2018 (sur une capacité totale de 651 GW). Plus de 355 GW supplémentaires prévus d'ici à 2024.

Source : Global Wind Report 2019

### Renforts béton



**PRODUITS CONCERNÉS :** barres de renfort béton composites ou FRP rebars ■

**AVANTAGES D'ELIUM® :**

- gains de productivité, de flexibilité et de réactivité par rapport aux renforts composites thermodures époxy.
- les renforts en Elium® sont cintrables à chaud et sectionnables au juste moment sur chantier, contre un

calibrage et un cintrage de 6 à 7 semaines à l'avance en usine pour les renforts composites thermodures présentant un risque d'obsolescence.

- limitation des pertes et recyclabilité.

**CLIENTS :** fabricants de renforts, entreprises du BTP (routes, ouvrages d'art, bâtiments).

**DYNAMIQUE :** le marché mondial des renforts composites s'élevait à 480 millions d'euros en 2015 et connaît un taux de croissance annuel de 8,5 % entre 2016 et 2024. Le revenu global s'élèvera à 1,02 milliard d'euros en 2024.

Source : Global Market Insights.

### Nautisme



**PRODUITS CONCERNÉS :** coque, pont des voiliers de plaisance.

**AVANTAGES D'ELIUM® :**

- gain de productivité : production moins énergivore au moment de la production du bateau.
- durabilité performance du composite en Elium®.
- recyclabilité.

**STADE DE DÉVELOPPEMENT :** premiers modèles commercialisés à la mi-2021.

**CLIENTS :** fabricants de composites, constructeurs de bateaux, équipementiers.

**DYNAMIQUE :** marché du nautisme de plaisance évalué à 33,3 milliards d'euros en 2020, et à 44,7 milliards d'euros en 2027. Taux de croissance annuel de 4,1 % entre 2020 et 2027.

Source : Grand View Search

### Stockage de l'hydrogène



**PRODUITS CONCERNÉS :** réservoirs composites à hydrogène des véhicules.

**AVANTAGES D'ELIUM® :** gain de productivité pour la fabrication du réservoir.

- même niveau de sécurité et de performance que les réservoirs en résines thermodures époxy.
- recyclabilité.

**STADE DE DÉVELOPPEMENT :** en phase de test, mise sur le marché en 2024.

**CLIENTS :** équipementiers, motoristes, énergéticiens.

**DYNAMIQUE :**

▪ en 2020, 75 prototypes de voitures à hydrogène chez les motoristes, 6 000 réservoirs composites à hydrogène produits pour les voitures particulières.

▪ objectifs monde de la filière en 2030 : production annuelle de 6 millions de réservoirs. Potentiel de la demande entre 10 et 15 millions de voitures et 500 000 camions.

▪ objectif France de la filière en 2030 : 342 000 t d'H<sub>2</sub> décarboné pour 300 000 véhicules légers, 5 000 véhicules lourds, 250 trains, 1 000 bateaux.

Sources : Hydrogen Council ; FW Engineering in JEC Composites Magazine – Sept 2018 ; Programmation pluriannuelle de l'Énergie.

# LA RÉSINE ELIUM® : UNE EMPREINTE INDUSTRIELLE MONDIALE DÈS L'ORIGINE



## Légende

- Sites de production de la résine Elixir®
- Sites de R&D sur la résine Elixir®
- Capacités de production à venir
- Premiers marchés sur la capacité installée du parc éolien
- Principaux producteurs de rebarbs composites
- Principaux producteurs de réservoirs à hydrogène composites
- Principaux producteurs de bateaux de plaisance



## Composites en résine Elium®

## LES VOIES DU RECYCLAGE

Grâce à la résine Elium®, les matériaux composites thermoplastiques peuvent être recyclés. Deux procédés de recyclage, mécanique et chimique, sont en cours de test. Pour en parler, Jean-François Devaux, ingénieur de recherche expert chez Arkema, et Clément Callens, responsable pôle Industrie du Futur & Procédés thermoplastiques au CETIM Grand Est.



**Jean-François Devaux**  
Senior Research Scientist,  
Arkema



**Clément Callens**  
Responsable pôle Industrie  
du Futur, CETIM Grand Est

Les matériaux composites croissent de 4 % par an depuis 2016, avec une montée en puissance des composites thermoplastiques par rapport aux thermodurs. Or la gestion de leur fin de vie reste peu aboutie. Si plusieurs facteurs rentrent en ligne de compte, la nature thermodurcissable des résines les composant rend très complexe leur recyclage. En conséquence, les composites en fin de vie et les déchets de production sont majoritairement enfouis, faute de valorisation techniquement ou économiquement viable, ou alimentent les cimenteries sous la forme de combustibles solides de récupération.

## RÉVOLUTION ELIUM®

Dans un marché monopolisé par les composites thermodurs, la résine Elium® représente une innovation sans précédent. Elle combine les avantages de mise en œuvre d'un matériau thermodur avec la caractéristique de recyclabilité d'un matériau thermoplastique. Son potentiel est énorme, d'autant que 38 000 tonnes de déchets composites sont générées annuellement en France, sur une production totale de 380 000 tonnes. Mais si les matériaux composites thermoplastiques sont

rentables à mettre en œuvre, l'absence de filière de recyclage peut constituer un frein à leur utilisation massive. C'est pourquoi Arkema, aux côtés de partenaires industriels et académiques, œuvre au développement de ces filières au sein de différents projets et via la mise au point de deux procédés différents, mais complémentaires.

## RECYCLAGE MÉCANIQUE

Il s'agit de la première solution industrielle réaliste de recyclage de matériaux composites thermoplastiques, en particulier ceux en résine Elium®. Pour la développer, Arkema collabore au projet REVEL avec le Centre technique des industries mécaniques (CETIM) Grand Est et l'Institut de Recherche Technologique M2P. Pour Clément Callens, responsable pôle Industrie du Futur & Procédés thermoplastiques du CETIM, « l'objectif est de positionner la démarche de revalorisation des composites vis-à-vis des applications futures, et donc de projets industriels à venir. Pour ce faire, nous évaluons la recyclabilité par voie thermomécanique de chutes de production ou de pièces en fin de vie en composites à base de résine Elium®. » Concrètement, les pièces sont broyées, chauffées puis le matériau obtenu est transformé sous forme de panneaux à la résistance mécanique élevée. Ces composites ainsi recyclés, qui comprennent les fibres et la résine, pourront être utilisés dans le BTP, les transports, la production de biens d'équipements industriels... des secteurs en recherche de solutions d'allègement, de gains de performances mécaniques et de simplification de conception. « Cette solution présente l'intérêt d'être implantable chez des acteurs de la filière recyclage avec des procédés standards, à petite et moyenne échelle et dans une optique moins énergivore que les procédés chimiques complexes », conclut Clément Callens.

« Cette solution présente l'intérêt d'être implantable chez des acteurs de la filière recyclage avec des procédés standards. »

## RECYCLAGE CHIMIQUE

Il s'agit du second type de recyclage des composites en résine Elium®. Ce procédé consiste à broyer le composite et à le chauffer à environ 400 degrés afin de faire passer la résine solide à un monomère gazeux. « Celui-ci peut être récupéré, purifié et reformulé en résine utilisable dans des applications avec le même niveau de performance que la résine vierge, précise Jean-François Devaux, ingénieur de recherche expert chez Arkema. Le recyclage chimique permet également aux opérateurs d'accepter de plus gros volumes, et les composites très abîmés et/ou en fin de vie ne représentent pas un obstacle pour récupérer la résine. Nous pouvons ainsi garantir une circularité, avec un matériau réutilisable pour des applications multiples. » Pour les fibres de carbone ou de verre récupérées, le recyclage est également possible, mais pour des applications différentes de l'usage d'origine.

## EFFORT COLLECTIF

Afin de mettre en œuvre ces deux filières de recyclage à une échelle industrielle viable, Arkema travaille étroitement avec ses partenaires. S'agissant du recyclage mécanique, le projet REVEL en est à un stade avancé, avec l'élaboration par le CETIM Grand Est de sa solution technologique Thermosaïc® de recyclage des composites en résine Elium®. Le recyclage chimique quant à lui fait l'objet de plusieurs collaborations d'envergure : le projet MMAtwo sur le recyclage des PMMA et bientôt des composites Elium® (voir encadré), ainsi que le programme Zebra\*, focalisé sur les pales d'éoliennes (voir double suivante).

## ANTICIPER LES NOUVEAUX COMPOSITES

Si les composites en Elium® en fin de vie vont arriver sur le marché dans les décennies à venir, l'industrie se mobilise dès à présent pour anticiper cette phase afin d'être prête à recevoir ces matériaux et en tirer le meilleur profit en matière de recyclage ou de réutilisation. « En attendant leur fin de vie, nous pouvons compter sur l'arrivée de consommables en composites Elium® dès 2024-2025, avec les chutes de production issues de la fabrication des bateaux, des pales d'éoliennes... », indique Jean-François Devaux. Ils représentent 5 à 10 % de la masse des composites que vous fabriquez, et ces déchets contiennent des volumes significatifs de résine Elium®, précieuse à récupérer pour de nouvelles utilisations ». D'où l'importance de démontrer la faisabilité des procédés de recyclage aux opérateurs spécialisés, et sa viabilité économique.

\* Zero waste Blade ReseArch, hors-texte – Encadré MMAtwo

## ZOOM

LE MMAtwo,  
QU'EST CE QUE C'EST ?

MMAtwo est un projet ambitieux qui réunit industriels et académiques autour de la mise en place d'une large filière de recyclage des PMMA. Il est financé dans le cadre du plan européen de recherche et d'innovation Horizon 2020 et comprend 13 partenaires de 6 pays différents, qui représentent tous les stades de la chaîne de valeur des PMMA. Arkema est fortement impliqué dans MMAtwo, et compte aller plus loin en proposant, toujours dans le cadre de ce projet, un démonstrateur de recyclage des composites en résine Elium®. Échéance prévue pour 2022.



En savoir plus  
sur MMAtwo





ARKEMA RELÈVE  
*le pari de pales d'éoliennes*  
**recyclables**

À ce jour, les pales des 20 000 éoliennes – soit environ 550 000 tonnes de composites – installées en moyenne chaque année dans le monde sont en composites thermodurs base résines époxy/fibres de carbone ou de verre. Leurs propriétés de solidité et de résistance aux chocs en font des matériaux de choix. Un seul inconvénient, et de taille : ils ne peuvent être refondus et leur fin de vie pose un sérieux problème environnemental. Sur ce marché en plein essor, la résine thermoplastique Elium® permet de fabriquer pour la première fois des pales en composites recyclables.



**659 GW**

de capacité mondiale d'énergie éolienne en 2019

**60,4 GW**

de capacité nouvelle en 2019 avec l'installation de nouvelles éoliennes, soit 19 % de plus qu'en 2018. Il s'agit du deuxième meilleur résultat de l'histoire après l'année 2015.

**1 000 GW**

de capacité globale d'énergie éolienne prévue en 2024, soit une hausse de 54 % des installations par rapport à 2019

**15 et 20 %**

Croissance annuelle du parc mondial des éoliennes

Source : Global Wind Energy Council



## Pales d'éolienne : Elium® au service DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Leader de l'éolien en France, ENGIE se veut également prescripteur au sujet du cycle de vie des éoliennes. Responsable de la Stratégie, de la RSE et de l'Innovation pour ENGIE France Renouvelables, Vianney de Lavernée nous précise comment le Groupe et ses partenaires, dont Arkema, travaillent à renforcer leur durabilité et recyclabilité.



Vianney de Lavernée

« La résine thermoplastique Elium® est le chaînon manquant pour assurer la recyclabilité des pales. »

Objectif de recyclabilité des pales d'éolienne

100 %

Budget global du projet Zebra

18,5 M€

### Quel lien existe-t-il entre ENGIE et Arkema au sujet des éoliennes ?

**Vianney de Lavernée** – ENGIE comme Arkema sont tous deux acteurs dans la chaîne de valeur de l'éolien en France. ENGIE est exploitant de parcs éoliens terrestres et en mer, et Arkema agit en amont en fabriquant la résine qui rentre, avec les fibres, dans la composition des pales d'éolienne. D'un bout à l'autre de cette chaîne, nous sommes liés par des objectifs d'amélioration des procédés industriels, en lien avec les enjeux environnementaux. C'est ainsi qu'ENGIE et Arkema se sont rencontrés afin de mettre sur pieds et initier le projet Zebra en 2020.

### Qu'est-ce que le projet Zebra ?

**V.d.L.** – Zebra signifie *Zero waste Blade ReseArch*, soit la « recherche sur les pales zéro déchet ». Pour ce projet lancé en septembre 2020, nous avons réuni et mobilisé les participants de la chaîne de fabrication, d'exploitation et de démantèlement des éoliennes, afin de démontrer la recyclabilité des pales d'éoliennes en utilisant la résine Elium®. En tant qu'acheteur important d'éoliennes en Europe et dans le monde, ENGIE joue un rôle d'aiguillon vis-à-vis de ses fournisseurs, et Arkema propose une solution d'avenir permettant de recycler les pales à 100 %. Face à l'enjeu, les autres participants de Zebra se sont mobilisés, parmi lesquels le producteur de fibres Owens Corning, le fabricant de pales IM Wind Power, SUEZ pour le recyclage et l'éco-conception des matériaux. Sans oublier nos partenaires académiques et chercheurs, l'IRT Jules Verne et la plateforme CANOE.

6 tonnes

de résine Elium® rentrent dans la composition d'une pale d'éolienne, soit 18 tonnes par éolienne.



### Quid des générations de pales actuelles ?

**V.d.L.** – Les pales des générations fabriquées jusqu'à maintenant sont constituées de résine thermodure, comme l'époxy, et ne sont pas techniquement recyclables de façon satisfaisante. La résine n'est pas réexploitable et les fibres récupérées ne sont pas d'une qualité optimale. En soi, les pales ne représentent que 4 % du poids de l'éolienne, le reste – dalle béton, mât en acier, une partie de la nacelle – est recyclé. Mais chez ENGIE, nous voulons passer à quasiment 100 % de recyclage. En 2019, nous avons démantelé notre premier parc éolien français datant de 1991. Avec SUEZ et d'autres partenaires, nous sommes parvenus à recycler 96 % des matériaux et nous avons démontré que l'industrialisation du recyclage était possible. Il reste à trouver une solution pour les pales, actuellement valorisées sous forme de combustibles solides de récupération.

### Quel intérêt à utiliser Elium® ?

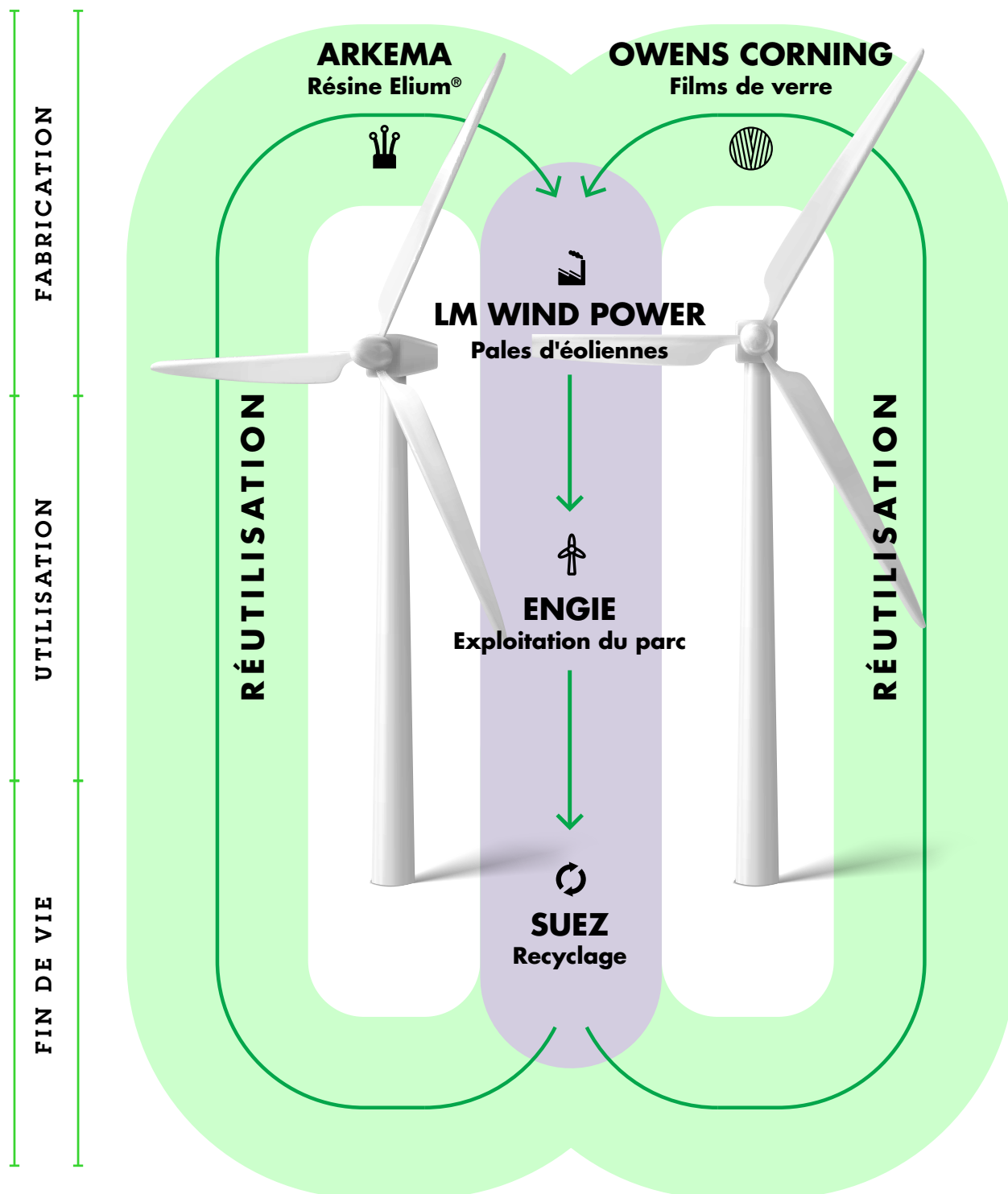
**V.d.L.** – La résine thermoplastique Elium® est le chaînon manquant pour assurer la recyclabilité des pales, du fait de ses propriétés de recyclage par dépolymérisation ou dissolution. C'est ce que Zebra entend prouver, tout en démontrant une similitude des performances avec les pales en résine thermodure. La recyclabilité est donc un objectif central, mais chacun des partenaires du projet doit entériner la pertinence de l'utilisation industrielle de cette nouvelle résine.





# Cycle de vie d'une pale d'éolienne

PARTENAIRES DU PROJET ZEBRA



## ... À quand remonte votre volonté de recycler les pales ?

Il y a 4 ans, nous avons mis en place chez ENGIE une entité dédiée au développement et à l'exploitation des énergies renouvelables en France. À partir de là, nous avons recueilli au sein des territoires de nombreux questionnements relatifs à la fin de vie des éoliennes, émanant des riverains, des élus locaux et de l'administration. Pour y répondre, nous avons engagé une démarche globale, visant à susciter l'émergence d'une filière du démantèlement éolien économiquement et environnementalement pertinente. Concrètement, cela passe par une mobilisation des différents corps de métiers concernés – spécialiste des matériaux, fabricants, grutiers, exploitants, entreprises du recyclage.

« Elium® a le potentiel pour permettre le recyclage à 100 % d'une éolienne. »

Vianney de Lavernée

## Cela a donc abouti à Zebra. Quelles sont les prochaines étapes du projet ?

**V.d.L.** – En partie en effet, car d'autres pistes ont été explorées sur le recyclage des éoliennes à pales en composites thermodurs. Zebra quant à lui est la résultante de deux étapes majeures : la mise au point d'Elium® en 2014 et un gros travail en amont de rassemblement des partenaires représentatifs de la chaîne de valeur de l'éolien. Le projet a officiellement démarré en septembre 2020 et nous nous donnons 3 ans et demi pour démontrer la faisabilité de la recyclabilité des pales.

## Comment se traduit pour ENGIE ce virage stratégique dans les énergies renouvelables ?

**V.d.L.** – C'est d'abord le résultat de notre réorientation stratégique pour accélérer la transition énergétique vers une économie bas carbone. ENGIE est ainsi le leader des énergies renouvelables en France et notamment le premier acteur dans l'éolien, avec 15 % des capacités installées à date (2,6 GW). Le Groupe porte également une ambition mondiale pour les énergies renouvelables, en projetant d'accroître de 3 à 4 GW ses capacités installées

Durée du projet Zebra, entre le lancement et la livraison mi-2023 :

# 42 mois

Partenaires industriels et centres de recherche :

# 7



chaque année. Ce marché est mature, compétitif et exigeant, et les attentes d'intégration des éoliennes dans les écosystèmes sont élevées, tout comme la qualité de leur cycle de vie. D'où l'importance de travailler ensemble sur ces sujets avec nos partenaires : pour mettre en place dès à présent une filière efficace de démantèlement des parcs installés, et pour assurer la durabilité des parcs futurs grâce à des innovations comme Elium® et un outil industriel adéquat. ■



## Aux États-Unis, le pari d'une filière transformée PAR LA RÉSINE ELIUM®

Fabrication, usage, fin de vie... l'arrivée de la résine Elium® est envisagée par le secteur de l'éolien américain comme une innovation véritablement disruptive. C'est cette vision que porte Derek Berry, ingénieur au National Renewable Energy Laboratory (NREL) dans le Colorado et directeur du département Éolien au sein de l'Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation (IACMI), deux organismes publics dont Arkema est partenaire.



### En quoi consiste votre collaboration avec Arkema ?

**Derek Berry** – La raison pour laquelle nous nous sommes intéressés à la résine Elium® est simple : au sein du Laboratoire national des énergies renouvelables (NREL), qui dépend du Département de l'Énergie américain, nous cherchions une façon d'introduire la recyclabilité dans les matériaux composites utilisés dans l'éolien, et plus particulièrement dans les pales. Depuis 5 ans, nous collaborons ainsi étroitement avec Arkema et des partenaires industriels, institutionnels et académiques, afin de faire émerger cette innovation. Dans le cadre de ce partenariat public-privé, le laboratoire fournit son expertise de recherche, ses équipements d'évaluation et d'analyse.

« En plus de rendre recyclables les pales d'éoliennes, la résine Elium® révolutionne notre façon de les produire plus vite et en utilisant moins d'énergie puisque qu'il n'est pas utile de chauffer la résine. »

**Derek Berry**



Derek Berry

### Comment accompagnez-vous concrètement vos partenaires ?

**D.B.** – Nous agissons à plusieurs niveaux : les tests grandeur nature, sur de petites quantités de composites Elium®, comme des pales de 13 mètres, afin d'en évaluer les performances mécaniques structurelles. Autre aspect important de notre action : déterminer, en mesurant l'ensemble des coûts de fabrication et d'exploitation, la viabilité économique de l'éolienne avec des pales en composites Elium® par rapport à celles en résines thermodures. Arkema mène ses propres tests en parallèle et nous partageons nos résultats. Ainsi nous sommes plus légitimes à proposer cette innovation aux fabricants et aux exploitants, aux États-Unis et à l'échelle internationale.

### Pouvez-vous préciser l'apport de la résine Elium® ?

**D.B.** – La promesse d'origine est la recyclabilité de la pièce, une innovation de rupture car le recyclage est très difficile à mettre en œuvre avec les composites en résines thermodures (époxy, polyester...). Mais aussi brillante soit-elle, une innovation doit être viable économiquement et sa fabrication simple à mener. Or nos tests ont montré que c'était le cas : la fabrication des pales en composites Elium® est proche de celle en composites thermodurs utilisés depuis 40 ans. Sa nature liquide facilite sa mise en œuvre mais en plus la possibilité qu'elle offre de recourir à la thermosoudure ouvre des perspectives très attractives pour les fabricants : elle remplace le collage utilisé pour les pales en composites thermodurs, un procédé onéreux et qui alourdit les pièces. Cela sans sacrifier les performances d'usage de l'éolienne.

### Comment cette innovation soutient-elle le secteur de l'éolien ?

**D.B.** – L'éolien américain connaît depuis 20 ans une croissance régulière et constitue une source d'énergie économiquement viable et de plus en plus attractive. La résine Elium® contribue à rendre la production d'éoliennes plus compétitive, performante et vertueuse au plan environnemental avec une meilleure gestion de la fin de vie des pales. C'est un enjeu essentiel pour les États-Unis, notamment pour soutenir les entreprises de la chaîne de valeur de l'éolien, comme General Electric, maison mère du producteur de pales LM Wind Power. ■



DES RÉSERVOIRS À HYDROGÈNE EN RÉSINE ELIUM®

*recyclables et*  
**compétitifs**

Les fabricants de réservoirs composites à hydrogène ont actuellement recours aux résines thermodures. Quel est l'intérêt d'utiliser la nouvelle résine Elium® ? Les performances sont-elles équivalentes ? Le processus de fabrication en sera-t-il amélioré, ainsi que la durée et la fin de vie du réservoir ? Arkema, en collaboration avec des partenaires reconnus de la filière hydrogène en France et en Corée, mène plusieurs projets de R&D afin de démontrer les bénéfices d'Elium® tant sur les procédés de fabrication des réservoirs que sur leur durabilité.

+

**6 millions**

de réservoirs à hydrogène seront produits chaque année à partir de 2030 dans le monde

Une prévision de :

**342 000 T**

d'H<sub>2</sub> décarboné produites en France en 2030, pour 300 000 véhicules légers, 5 000 véhicules lourds, 250 trains, 1 000 bateaux

Sources : Hydrogen Council ; FW Engineering in JEC Composites Magazine - Sept 2018 ; Programmation pluriannuelle de l'Énergie

**H<sub>2</sub>**  
**Hydrogen**



## Des réservoirs à hydrogène recyclables, COMPÉTITIFS EN ELIUM®

**Qu'apporte la résine Elium® aux réservoirs à hydrogène composites ? À quel stade de développement en est-on ? Quels acteurs sont impliqués dans son élaboration ? Les réponses avec Patrice Gaillard, Directeur scientifique chez Arkema et Président de l'association CANOE.**

« Avec Elium®, les réservoirs à hydrogène composites deviennent plus résistants, recyclables et plus simples à produire. » **Patrice Gaillard**



Patrice Gaillard

### Quelles sont les perspectives de développement du marché des réservoirs à hydrogène composites ?

**Patrice Gaillard** – Prometteuses ! Les pouvoirs publics européens et un certain nombre dans le monde mettent l'hydrogène vert – produit à partir d'énergies renouvelables – dans leurs priorités pour diversifier leurs sources de production d'énergie. L'objectif est d'émettre moins de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement climatique, et cela concerne tout particulièrement le secteur des transports. Ainsi, la production de véhicules à hydrogène va décoller. En 2030 en France, on prévoit 300 000 véhicules légers, 5 000 véhicules lourds, 250 trains, 1 000 bateaux, fonctionnant à l'hydrogène. Au niveau mondial, on estime qu'entre 10 et 15 millions véhicules légers pourraient passer à l'hydrogène d'ici à 2030.

### Quels types de réservoirs existent actuellement sur le marché ?

**P.G.** – Le matériau majoritairement utilisé est la résine époxy. Cette résine thermodure offre de belles résistances mécaniques pour contenir la pression de l'hydrogène et contribue à alléger le poids des réservoirs, en métal dans ses générations précédentes. On a à faire aujourd'hui à un réservoir de type 4, composé de fibres de carbone et de

résine époxy bobinées sur un *liner*. Mais l'époxy, comme tous les composites thermodurs, a aussi ses inconvénients, principalement sa non-recyclabilité.

### Qu'apporte la résine Elium® aux réservoirs ?

**P.G.** – Recyclabilité et gains de productivité. La recyclabilité d'un réservoir est très intéressante. Actuellement, les réservoirs usagés à résine époxy, non recyclables, sont enfouis ou valorisés comme combustibles solides de récupération, notamment pour chauffer les cimenteries. La résine Elium® quant à elle n'endommage pas les fibres de carbone du réservoir au cours de sa fabrication et de son utilisation. En phase de recyclage, on récupère ainsi par dissolution d'une part la résine, d'autre part les fibres de carbone, ce qui n'est pas rien car elles représentent 77 % du prix du réservoir. Ainsi un réservoir en résine Elium® offre de réels atouts : des gains de productivité en phase de fabrication du réservoir, le recyclage, mais aussi de réelles performances de solidité et durabilité.

### Précisément en quoi les performances d'un réservoir en résine Elium® sont-elles meilleures qu'un réservoir en époxy ?

**P.G.** – La performance est un point sur lequel il est impossible de transiger, sécurité oblige. Le mélange de résine Elium® avec le carbone assure la même imperméabilité au réservoir que celui comprenant la résine époxy. L'enjeu est d'assurer la résistance mécanique à la pression de l'hydrogène, qui s'élève à 700 bars. Nous sommes même parvenus à fabriquer des réservoirs en Elium® qui résistent à une pression supérieure à 1 500 bar, c'est-à-dire qu'ils peuvent contenir une plus grande quantité d'hydrogène. La résine Elium® amène également une amélioration des propriétés mécaniques du réservoir, en augmentant notamment sa durée d'utilisation. Un réservoir à hydrogène composite Elium® doit tenir 30 ans théoriquement.

ZOOM

### CANOE EN BREF

Association créée en 2008 en Nouvelle-Aquitaine, composée en 2020 de 45 membres (docteurs, ingénieurs, techniciens...) travaillant au développement de matériaux avancés et à l'amélioration des procédés de fabrication de produits finis et semi-finis. Parmi ses clients, 114 PME et des grands groupes. Ses partenaires historiques : la Région Nouvelle-Aquitaine, Arkema. Ses collaborations nombreuses avec le monde académique, dont l'Institut polytechnique de Bordeaux, l'IRT Jules Verne de Nantes, l'université Pau-Pays de l'Adour.

### À quel stade de développement en est-on ?

**P.G.** – En phase d'essais, avec une mise sur le marché des réservoirs prévue pour 2024. Les équipes Arkema basées au centre de recherche de Lacq, dans les Pyrénées-Atlantiques, mènent ces essais avec l'association scientifique CANOE, experte dans les différentes technologies de fabrication de composites, et des industriels du bobinage des réservoirs. CANOE s'occupe spécifiquement de la formulation des résines Elium® et du bobinage. Cette étape est décisive : en assurant le fonctionnement de l'enroulement filamentaire des fibres de carbone et de la résine Elium® sur le *liner* par un robot de bobinage, nous allons ouvrir la voie à l'industrialisation de la nouvelle génération de réservoirs composites de type 5.

### Comment Arkema collabore-t-il avec CANOE ?

**P.G.** – Arkema est partenaire fondateur de CANOE et également un client. Pour attirer d'autres partenaires de taille, notre adossement avec le premier chimiste français nous offre de véritables possibilités de développement technologique de matériaux de pointe et innovants. Nous mettons également notre expertise au service de nombreuses entreprises, pour les accompagner dans les phases de tests de leurs produits finis et semi-finis. L'indépendance de CANOE est une force, tout comme notre ancrage dans le tissu économique local et académique de Nouvelle-Aquitaine (voir encadré ci-contre).

### Pensez-vous que la résine Elium® a le potentiel de transformer le marché des réservoirs ?

**P.G.** – Absolument. Ces réservoirs seront plus simples à produire et moins coûteux. Par rapport à la résine époxy, on réduit considérablement la phase de fabrication des réservoirs, principalement le temps de bobinage et la post-cuisson. Le fabricant peut ainsi abaisser ses coûts d'investissements et augmenter ses cadences de production. En fin de vie du réservoir, il récupère les onéreuses fibres de carbone pour d'autres usages, ainsi que la résine. Elium® est à ce titre bienvenue au regard du durcissement de la réglementation en matière d'enfouissement des déchets industriels et des obligations croissantes de recyclage en Europe. ■

\* Sources : Hydrogen Council ; FW Engineering in JEC Composites Magazine – Sept 2018 ; Programmation pluriannuelle de l'Énergie



## Mise au point des procédés de fabrication de réservoirs en Elium® : DES PARTENARIATS CLÉS

Pour optimiser la technologie de fabrication des réservoirs à hydrogène composites en résine Elium®, Arkema s'appuie sur des expertises universitaires reconnues mondialement dans la filière des composites. Témoignage de deux spécialistes.



« Nous aidons Arkema à améliorer la vitesse de production du réservoir en résine Elium® en recourant à une photo-activation par UV. »

**Jacques Lalevée**

« Notre expertise à l'Institut de Science des Matériaux de Mulhouse porte sur le développement de nouvelles résines photopolymérisables. Au cours de la fabrication des réservoirs à hydrogène composites, lors du bobinage des fibres de carbone et de la résine Elium® sur le liner, la polymérisation de la résine est activée sous ultra-violet, grâce à ses propriétés photosensibles.

Cette réaction de photopolymérisation est plus avantageuse que des procédés de polymérisation conventionnels, car elle permet d'obtenir un matériau doté d'excellentes propriétés finales en un temps resserré – quelques secondes d'exposition – et dans des conditions de polymérisation douces, c'est-à-dire à température ambiante et sans émission de composés organiques volatils. Nous aidons ainsi Arkema à améliorer la vitesse de production du réservoir en recourant à cette photo-activation.

Arkema est un acteur international majeur dans notre domaine de recherche, c'est pourquoi nous collaborons étroitement et activement depuis plusieurs années, sur Elium® et d'autres résines photosensibles nouvelles. Cette collaboration s'étend d'un rôle de conseil à une participation active, jusqu'à la réalisation de thèses en laboratoire sur des problématiques de l'entreprise. Nos travaux réalisés en lien direct avec Arkema ont enfin permis de déposer différents brevets permettant de valoriser les innovations proposées. »

**PROFESSEUR JACQUES LALEVÉE**, professeur d'université et responsable de l'équipe « Chimie Radicalaire et Matériaux CRM » à l'Institut de Science des Matériaux de Mulhouse.  
Université de Haute-Alsace, Mulhouse, France  
**DOMAINE DE RECHERCHE** : photopolymérisation



« J'insiste sur le mot "inédit" bien employé pour une fois car ce que propose Elium® est totalement nouveau. »

**Professeur Sung Kyu Ha**



et l'utilisation de fibres hybridées. En effet, c'est en améliorant ces deux points qu'Arkema obtiendra la certification nécessaire à l'utilisation de la résine Elium® dans les réservoirs commercialisés.

Notre collaboration est fructueuse et essentielle car le rôle de l'hydrogène sera très important dans le futur et son approvisionnement est appelé à devenir un énorme marché, poussant de fait la production de réservoirs à hydrogène composites. Et c'est aujourd'hui que l'élan doit se prendre. Le monde ne doit pas manquer cette occasion unique de faire de l'hydrogène la part importante d'un futur énergétique décarboné et sûr. Ce changement de paradigme est déjà à l'œuvre en Corée du Sud, soutenu par le gouvernement et par de grandes entreprises comme Hyundai, et attendu par la population pour alimenter les maisons, les usines, les voitures... en électricité verte. C'est pourquoi Arkema et ses partenaires – chercheurs, clients, fabricants de réservoirs... – doivent tout faire pour ne pas manquer cette opportunité de développer une chaîne de production de réservoirs recyclables, durables et aux performances élevées. »

« Le Laboratoire Structures et Composites d'Hanyang collabore avec Arkema depuis 2014 dans le cadre d'un programme de recherche fondamentale de caractérisation des composites en Elium®. Parmi nos objectifs communs, l'étude des comportements sur le long terme des composites thermoplastiques, notamment ceux avec la résine Elium®. Nous avons notamment créé en 2020 le centre d'excellence sur les composites Elium® (Center of excellence for Elium® composites, CEEC), afin d'étendre les champs d'innovations utilisant ce matériau innovant.

Parmi nos travaux, nous mesurons et caractérisons des propriétés mécaniques des réservoirs à hydrogène composites Elium® / carbone. Pour cela, nous simulons et reproduisons l'étape de fabrication et de moulage des contenants pour la production automobile. Notre valeur ajoutée pour Arkema se situe notamment sur le conseil que nous apportons sur le design des réservoirs

L'hydrogène est souvent considéré comme une énergie verte dans une optique de zéro émission de CO<sub>2</sub>. Paradoxalement, les réservoirs à hydrogène sont pour l'instant non recyclables, car ils sont fabriqués à base de résine époxy thermodure, et ils finiront par devenir des déchets automobiles. Hanyang et Arkema se sont donc attelés à concevoir des réservoirs recyclables et à remplacer les matériaux non recyclables des véhicules à hydrogène par des composites thermoplastiques Elium®. »

**PROFESSEUR SUNG KYU HA**, département d'ingénierie mécanique, directeur du Laboratoire Structures et Composites d'Hanyang. Université d'Hanyang, Séoul, Corée du Sud

**DOMAINE DE RECHERCHE** : applications innovantes des composites : réservoirs à hydrogène, éoliennes et systèmes de stockage de l'énergie



CONSTRUCTION : ELIUM® VA ACCÉLÉRER LE DÉPLOIEMENT

# des renforts béton en composites

Et si le recours à la résine Elium® pour les renforts béton constituait le déclic pour les acteurs du génie civil ? Dans un marché dominé par les renforts en acier, comment ce nouveau matériau thermoplastique facilite-t-il la fabrication de renforts composites et améliore considérablement leur utilisation sur les chantiers et leur approvisionnement ? Arkema et ses partenaires accompagnent le secteur du bâtiment pour les initier aux avantages clés des renforts composites en Elium® : inoxydables, mais surtout thermoformables, c'est-à-dire cintrables directement sur les chantiers. Cette dernière caractéristique, impossible avec les renforts en composites thermodurs, fait toute la différence !



## 8,5%

de croissance annuelle pour les renforts composites entre 2016 et 2024

## 1,02 milliard

d'euros de revenu global pour les renforts composites prévus en 2024 (contre 480 millions d'euros en 2015)

Source : Global Market Insights



# Renforts composites pour béton LA RÉVOLUTION ELIUM®

**Des renforts béton cintrables au dernier moment, ultra-résistants et recyclables ? Telle est l'innovation majeure proposée par les fabricants de barres de renfort thermoplastiques, en collaboration avec Arkema. Explications avec Sonja Blanc, PDG du fabricant de produits techniques pour le bâtiment italien Sireg Geotech.**

**Pourquoi travaillez-vous avec Arkema ?**  
**Sonja Blanc** – Sireg Geotech a 30 ans d'expérience dans la production de matériaux composites pour le secteur de la construction. Nous sommes un partenaire et un client d'Arkema, et travaillons ensemble à l'élaboration de la prochaine génération de renforts composites thermoplastiques pour le béton, composés de fibres de verre et de résine Elium®. Les enjeux sont très stimulants ! Le recours à cette nouvelle armature promet de fluidifier la chaîne d'approvisionnement et d'apporter aux bâtiments et ouvrages d'art des performances mécaniques et de durabilité élevées.

**Quelles sont les perspectives de développement de ce marché ?**  
**S.B.** – Elles sont très prometteuses. Actuellement, les renforts en acier sont majoritaires sur ce marché. Les armatures en composites thermodurs ont jusqu'à présent émergé timidement en raison d'un manque de standardisation dans leur conception, d'un vide

« Avec la résine Elium®, les obstacles de production des renforts en résines thermodures sont levés. »

**Sonja Blanc, PDG Sireg Geotech**

normatif et d'une communication sous-développée. Mais l'utilisation de la résine Elium® change la donne, l'innovation est prête à conquérir le marché. Ainsi d'ici 5 à 10 ans, au niveau mondial, nous tablons sur 10 % de part de marché pour les armatures en composites renforcés de fibres. À notre niveau, croître juste de 1 % sur le marché américain serait un succès considérable, cela représenterait la livraison de 300 millions de mètres de nos renforts en composites renforcés de fibres de verre.

## Qu'apporte la résine Elium® à un renfort composite thermoplastique ?

**S.B.** – En premier lieu, des gains de productivité importants au niveau de la chaîne d'approvisionnement. Actuellement, la *supply chain* des renforts en résines thermodures est peu réactive et peu flexible : les armatures doivent être fournies à la bonne forme et longueur depuis l'usine du fabricant jusqu'au chantier. Cela peut prendre six à sept semaines en moyenne, et les livraisons se font souvent sur de longues distances. Conséquences : des pertes adviennent régulièrement dans ce laps de temps, au gré de l'évolution du chantier. Or, en utilisant la résine Elium® d'Arkema, Sireg a développé un dispositif et un procédé de cintrage à chaud pouvant être réalisé à proximité du chantier. Résultat : les coûts de transport sont considérablement réduits, puisque les renforts sont livrés droits et à plat, et il n'y a pas ou peu de pertes, car les armatures sont cintrées sur le chantier au dernier moment, à la longueur et à la forme désirées. Sireg Geotech conseille et accompagne les centres de pliage et les constructeurs de chantier lors de cette étape.

## Les performances sont-elles similaires à celles des renforts en acier ?

**S.B.** – Absolument, c'est un point fondamental pour parvenir à convaincre l'industrie de la construction de s'emparer de cette nouvelle technologie, maintenant que l'obstacle de la complexité de production est levé. J'irais même plus loin sur la question des performances, puisque les renforts composites ne sont pas menacés par l'usure que le métal peut connaître. Pour des sites tels que les ponts – ou les édifices littoraux davantage exposés à la corrosion – cela peut s'avérer précieux en termes de sécurité, de durabilité mais aussi de coûts : un pont armé de renforts composites peut fonctionner sans coûts de maintenance pendant 100 ans. Enfin pour en revenir au stade de la production, nous pouvons envisager d'inclure de l'eau de mer dans le processus de production des bétons qui utilisent des renforts thermoplastiques sans que cela ne pose problème.

## Qu'en est-il de leur recyclabilité ?

**S.B.** – Avec la résine Elium®, nous pouvons prétendre à une production zéro déchet. Toutes les chutes de production sont broyées et réutilisées pour d'autres applications. Mais l'apport majeur de cette innovation n'est pas tant le recyclage que la limitation



**SONJA BLANC est directrice générale de Sireg Geotech.** Depuis 2009, elle a entrepris un renforcement de la R&D du Groupe et favorise son expansion à l'international. Sireg Geotech est spécialisé dans la fabrication de produits en matériaux thermoplastiques, thermodurcissables et composites pour la consolidation du sol lors de l'excavation des tunnels, pour le renforcement et la restauration des infrastructures ainsi que les constructions historiques endommagées. Durabilité et prise en compte de l'environnement sont centrales dans sa stratégie. Ses efforts de R&D ont été récompensés ces dernières années par la remise de nombreux prix, dont le JEC Innovation Awards à Paris en 2019, dans la catégorie « Constructions & Infrastructure », pour son projet « Renfort composite thermoplastique cintrable pour béton », mené en partenariat avec Arkema, l'université de Miami et le National Cooperative Highway Research Program aux États-Unis.

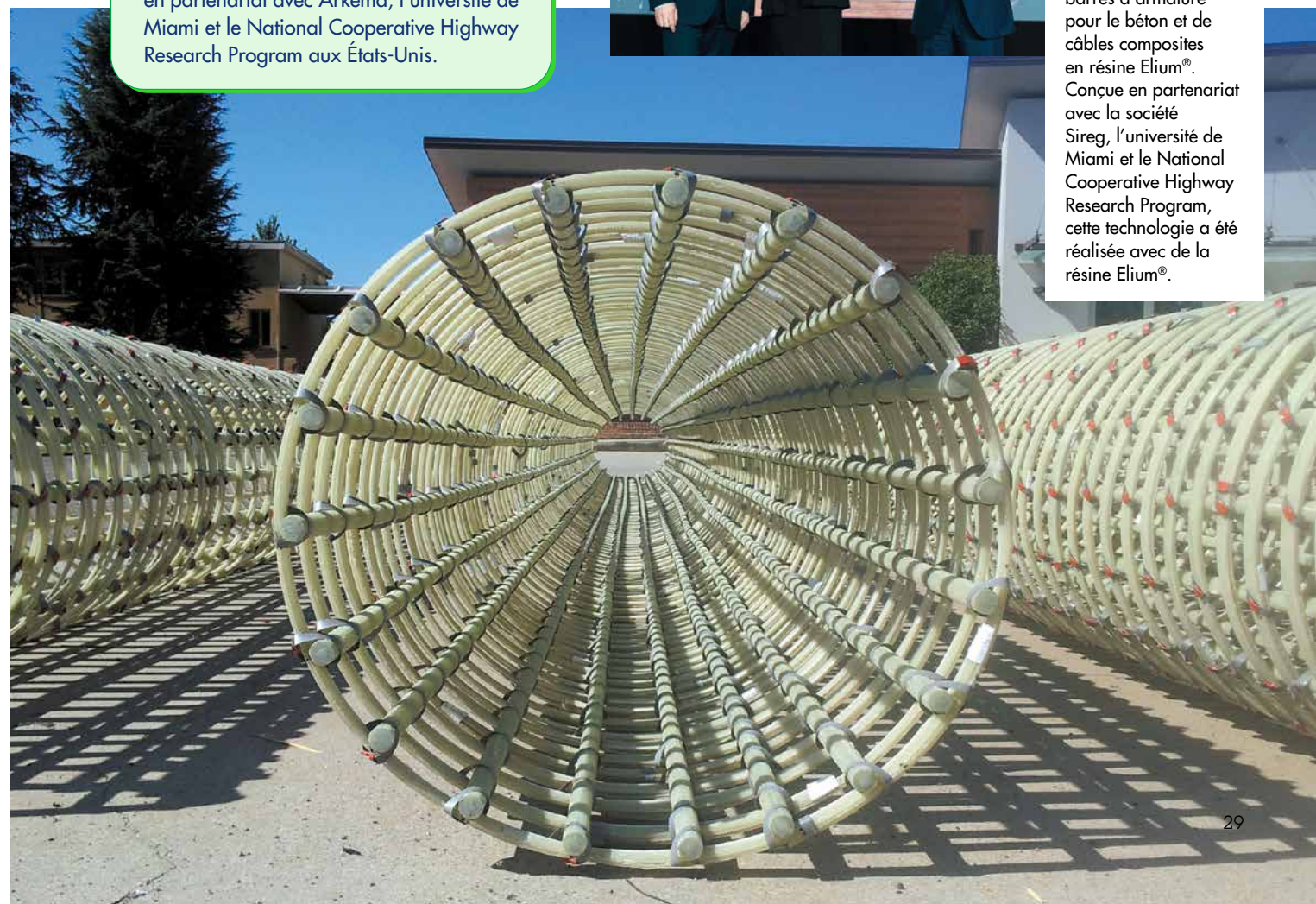
des pertes au stade de la production, grâce à la flexibilité apportée par le façonnage des renforts au plus proche du chantier, au moment désiré.

## Comment collaborez-vous avec Arkema pour faire émerger cette innovation ?

**S.B.** – Notre collaboration se déroule à plusieurs niveaux : en R&D afin d'identifier la formulation adéquate de la résine Elium® pour donner aux renforts thermoplastiques les propriétés mécaniques et de durabilité attendues ; en phase de test de fabrication pour parfaire et améliorer cette étape. Enfin la dimension promotion et communication est incontournable, et le soutien d'un spécialiste mondial des matériaux composites comme Arkema est indispensable pour convaincre la communauté du génie civil de la pertinence de cette innovation de rupture. ■



En 2019, à l'occasion, des JEC Innovation Awards, Arkema et SIREG ont été récompensés dans la catégorie "Construction" pour le développement de barres d'armature pour le béton et de câbles composites en résine Elium®. Conçue en partenariat avec la société Sireg, l'université de Miami et le National Cooperative Highway Research Program, cette technologie a été réalisée avec de la résine Elium®.





## Renforts composites : entre normalisation et innovations, UN EFFORT COLLECTIF

La résine Elium® utilisée dans les renforts composites génère des innovations en chaîne. Afin de les faire aboutir et d'en maximiser les effets, Arkema travaille étroitement avec ses partenaires universitaires et industriels.



« En rendant possible le cintrage des renforts composites sur le site du fabricant ou du distributeur, la résine Elium® ouvre des perspectives décisives pour la filière. »

**Antonio Nanni**

« Nous sommes au point de bascule du déploiement des renforts en polymères renforcés de fibres pour le béton. Pour les professionnels de la construction, il faut trouver une solution au problème de la corrosion des renforts en acier. L'industrie des composites a l'occasion d'apporter toute sa puissance d'innovation et de création technologique. Mais pour réussir, elle doit démontrer les performances de ces nouveaux types de renforts, et prouver que leur production industrielle peut être extensible et compétitive.

Le recours aux renforts composites thermoplastiques comme alternative viable aux renforts en acier n'est plus à démontrer dans les environnements agressifs : comme les zones côtières ou en présence d'agrégats à forte teneur en sel. Néanmoins, cette nouvelle génération de renforts plus résistante, performante et durable doit pouvoir être approvisionnée et façonnée efficacement pour avoir une chance de s'imposer.

Mon rôle en tant que professionnel et chercheur indépendant à l'université de Miami est d'aider Arkema à identifier les opportunités et les contraintes de ces technologies, également à tester, optimiser et valider ses produits, ainsi qu'à contribuer au développement des standards de ce marché. J'interviens à ce propos au sein des comités techniques de plusieurs organisations américaines et internationales qui développent les spécifications des matériaux, les protocoles de test, les codes et guides de conception. Actuellement, les guides et spécifications concernent les renforts composites utilisant de la résine époxy ou du vinyl ester, mais nous envisageons d'inclure dans ces documents d'autres matériaux, tels que la résine Elium®, sur la base de leurs performances. » ■

**ANTONIO NANNI**, professeur et directeur du département de génie civil, architectural et environnemental, université de Miami, États-Unis

**DOMAINE DE RECHERCHE** : matériaux de construction (composites avancés et béton), performances structurelles et applications industrielles, incluant leur contrôle et renouvellement, avec une attention à la durabilité des bâtiments et infrastructures civiles



« J'ai la conviction que nous avons réussi à présenter le concept qui emportera les dernières réticences : une technologie comprenant un procédé de cintrage à un coût compétitif et délivrant des renforts en composites thermoplastiques performants. »

**Ronald Müller**

« Arkema a montré dès le début un fort intérêt pour la technologie développée par notre *start-up high-tech*. De façon générale, nous nous focalisons sur la production de produits semi-finis pour le secteur du bâtiment, comme les tiges, tubes et bandes thermoplastiques renforcés de fibres. Cela comprend les renforts composites thermoplastiques en fibres de verre, pour lesquels nous développons une technologie de cintrage. Notre objectif est de partager notre expertise pour aider les entreprises qui souhaitent développer des renforts cintrables ou améliorer la flexibilité de leurs renforts.

À ce titre, la résine Elium® ouvre notre champ des possibilités : ses propriétés mécaniques sont équivalentes à celles de la résine époxy, mais elle se révèle être unique en matière d'additivation ■ : sa grande fluidité autorise l'ajout de particules variées et assure leur répartition uniforme dans le produit fini, dont les propriétés peuvent être modifiées aisément. On peut le cintrer, le souder, l'injecter dans un moule, le fondre... Selon moi, l'ensemble de ces avantages est de nature à contrebalancer un coût éventuellement supérieur à ceux des autres résines thermoplastiques.

J'ai la conviction que nous avons réussi à présenter le concept qui emportera les dernières réticences : une technologie comprenant un procédé de cintrage à un coût compétitif et délivrant des renforts en composites thermoplastiques performants. Arkema nous accompagne dans le développement de ce concept, que nous comptons présenter en juillet 2021. » ■

**RONALD MÜLLER**, dirigeant-fondateur de Carbon Armors GmbH (Plochingen, Allemagne), fabricant d'équipements industriels





# 33,3 Mds €

marché du nautisme  
de plaisance en 2020

# +4,1%

de croissance annuelle entre 2020  
et 2027 avec un marché s'élevant  
à 44,7 milliards d'euros en 2027

Source : Grand View Search

**NAUTISME : AVEC LE RECYCLAGE,**  
*une nouvelle filière*

# se profile

**Avec une flotte de voiliers dont les coques et mâts sont actuellement non recyclables, le marché du nautisme de plaisance cherche des voies pour responsabiliser la production de ses bateaux, poussé par des attentes sociétales croissantes. Le résine Elium® représente un matériau susceptible de révolutionner leur fabrication et leur fin de vie sans amoindrir leurs performances. Arkema œuvre depuis plusieurs années – notamment grâce au retour d'expérience du trimaran qu'il sponsorise et qui utilise ses matériaux – pour porter cette innovation auprès des constructeurs de voiliers.**



### Dates clés

- 2007** – Création de *Lalou Multi*, constructeur et écurie de course au large, par Lalou Roucayrol
- 2013** – Début du sponsoring de l'écurie par Arkema et du partenariat technique
- 2017** – Mise à l'eau du Mini 6.50 *Arkema 3*
- 2020** – Mise à l'eau d'*Arkema 4*, trimaran Ocean Fifty



« Construire un voilier en composite thermoplastique recyclable est une première mondiale. »


**Lalou Roucayrol**



## Avec la résine Elium®, cap sur LA RECYCLABILITÉ !

**Le skipper Lalou Roucayrol et son écurie Lalou Multi sont impliqués dans l'aventure de la résine Elium® depuis ses débuts. À travers la réalisation du prototype Arkema 3, un monocoque dont la coque et le pont étaient entièrement en Elium® et le nouveau Ocean Fifty Arkema 4, véritable laboratoire flottant qui a fait appel aussi aux atouts de cette résine, il nous livre son regard d'expert sur un matériau susceptible de révolutionner le nautisme.**

« Au sein de la *Team Lalou Multi*, nous travaillons avec les ingénieurs d'Arkema du Groupement de Recherche de Lacq. Ils nous aident à concevoir, fabriquer et améliorer nos modèles de bateaux de course. Notre collaboration s'étend au-delà du *sponsoring* de l'écurie, et c'est un privilège en tant qu'armateur et skipper professionnel de pouvoir interagir sur les matériaux avec les personnes qui les élaborent. C'est dans ce cadre que nous avons testé la résine Elium® depuis 2014, début de sa production. En six ans, nous avons clairement identifié des perspectives très intéressantes de l'emploi de ce matériau dans le nautisme.

Tout a commencé avec l'*Arkema 3*, un mini-6.50 construit en 2016 en vue d'une transatlantique. Hors mât et appendices de type quille, safran et foils, tout le bateau a intégré la résine Elium®, notamment la coque et le pont. Il s'agissait là du tout premier prototype de voilier réalisé dans ce matériau, et les enjeux étaient de taille : les pièces allaient-elles être aussi solides que les composites en résines thermodures qui constituent le marché actuel ? Les performances de navigation seraient-elles équivalentes ? Un rendez-vous en terre inconnue d'autant plus excitant que la résine Elium® promettait d'apporter une nouveauté par rapport aux thermodures, – époxy, polyester, vinyl ester –, à savoir la recyclabilité. Car il faut imaginer ce que représente la fin de vie des flottes de bateaux en composites thermodurs : non-recyclables, ils finissent broyés, enfouis ou valorisés sous forme de combustibles solides de récupération .

Bonne nouvelle, nos nombreux essais se sont révélés concluants. *Arkema 3* a montré des performances mécaniques équivalentes à celles de nos modèles en époxy, le haut de gamme des résines thermodures. La résine Elium® apporte même un léger avantage au bateau : elle accepte un peu plus de déformation par rapport à l'impact – vagues, bout de bois... – pour revenir à sa forme initiale sans perdre en qualité mécanique en matière de restitution de l'énergie.

Une fois le volet des performances établi, vient l'aspect fin de vie du bateau, et la résine Elium® apparaît comme révolutionnaire dans le secteur du nautisme de plaisance, et même des bateaux de transports.

« Produire de façon raisonnée des voiliers de course sans sacrifier les performances connues. »

Fort de ces résultats encourageants, nous avons conçu et fabriqué *Arkema 4*, un autre prototype de trimaran intégrant la résine Elium®. L'objectif était de démontrer au marché que la technologie était viable de A à Z et la recyclabilité exceptionnelle et unique de cette résine. Ainsi, nous avons réalisé 30 % des pièces en résine Elium® recyclée. Les moules de bras par exemple ont été réalisés en composites à base d'Elium®. Ils ont été découpés, puis broyés avant les phases de dépolymérisation et de purification qui ont permis de récupérer le monomère. Ce dernier a servi à la formulation d'une nouvelle résine Elium® dite « recyclée » mais aux propriétés inchangées.

La résine régénérée a été introduite dans le processus de construction pour la réalisation de nouvelles pièces composites. C'est le cas du cockpit ou rouf\* ainsi qu'une partie du carénage avant de bras, des zones où la résistance à l'impact sont précieuses, qui ont été réalisés à base de résine recyclée.

Une première mondiale réalisée fin 2020 et un véritable déclic. Désormais, l'utilisation de ce matériau dans la plaisance démarre, mais on peut également envisager son usage pour des bateaux d'exploitation, type cargos à voile, qui gagneraient en légèreté avec une coque en aluminium et une super-structure\*\* en composite Elium®. Les perspectives sont donc très encourageantes pour notre industrie qui, une fois acclimatée à l'usage de cette nouvelle résine, pourra se lancer dans une production raisonnée. »

\* Toutes les parties sises au-dessus de la coque (pont, passerelle, poste de pilotage...)  
\*\* Superstructure sur le pont d'un navire qui correspond au "toit" de la cabine.



### OCEAN FIFTY ARKEMA 4 : DU RÊVE À LA RÉALITÉ !

Découvrez en avant-première le film de la genèse du projet Ocean Fifty *Arkema 4* : du rêve à la réalité !





## Avec Northern Light, Elium® est DANS LA COURSE

Grâce à des fibres naturelles et à des résines écodurables telles qu'Elium®, l'objectif de Fabio Bignolini et Andrea Paduano, fondateurs de la start-up italienne Northern Light, est de révolutionner le secteur du nautisme avec des innovations technologiques permettant la réutilisation des matières premières et la réduction des déchets. Leur rêve : résoudre l'un des plus gros problèmes du secteur, les bateaux en composites abandonnés en fin de vie qui traînent sur les chantiers, dans les ports ou à la campagne.



### Quelles parties de vos bateaux sont faites avec de la résine Elium® ?

**Fabio Bignolini & Andrea Paduano** – La coque et le pont sont composés de fibres naturelles et de résine Elium®. Cela contribue à rendre nos bateaux recyclables à 90 % ! Aujourd'hui, la flotte traditionnelle du nautisme de plaisance et de course est composée de fibres de verre et de résines thermodurcissables, un mélange non recyclable.

### La recyclabilité est-elle votre argument numéro 1 ?

**F.B. & A.P.** – Absolument ! Nous sommes tous deux jeunes créateurs de Northern Light – notre start-up a un peu plus d'un an – et nous sommes sensibles à l'argument de la recyclabilité. Et c'est la résine Elium®, qui fait partie intégrante de notre projet entrepreneurial depuis sa création, qui nous apporte la solution. L'écoconception passe donc par la recyclabilité, la durabilité des matériaux et une baisse de la consommation d'énergie au stade de la production.

### Quels sont les challenges liés à cette innovation ?

**F.B. & A.P.** – Clairement convaincre nos clients que nos modèles sont aussi performants que les modèles traditionnels qu'ils connaissent en résines thermodurcissables. On parle ici de résistance, de raideur... Le challenge est énorme, car nous sommes les premiers à proposer cette offre sur le marché. C'est pourquoi nous souhaitons tester l'un de nos modèles dans les courses. En cas d'essais concluants, les skippers professionnels valideront et légitimeront nos choix d'options et de matériaux, Elium® en tête.

### Quelle est l'offre proposée par Northern Light ?

**F.B. & A.P.** – Deux bateaux vont bientôt sortir de nos ateliers : l'Ecoprimum, un petit dinghi destiné aux enfants, et l'Ecoracer 769, notre 9 mètres sport qui va concourir aux régates. L'Ecoprimum sera sur l'eau en mai ; les premiers prototypes sont déjà à l'eau. Nous sommes tous jeunes mais nous avons une ambition forte. Nous prévoyons de construire d'autres modèles écoconçus, comme un voilier de plaisance de 10 mètres et un petit foiler\*. Dans notre viseur : le marché de masse de la plaisance.

« Nous proposons une bascule : partir de la recyclabilité pour concevoir nos voiliers. »

### Fabio Bignolini et Andrea Paduano

### Northern Light et Arkema, une collaboration durable ?

**F.B. & A.P.** – En effet, de par l'importance que revêt la résine Elium® pour nos bateaux, mais pas uniquement. Arkema nous accompagne aussi pour concevoir des moules de fabrication de coques en résine Elium®, toujours dans la même optique, et nous envisageons un partenariat pour développer de nouveaux matériaux recyclables. Enfin, Arkema est une source d'inspiration, car l'entreprise a conçu le tout premier prototype en Elium®, le Mini 6.50 Arkema 3. Un démonstrateur éclairant construit il y a 4 ans avec le chantier naval Lalou Multi, du skipper Lalou Roucayrol.

\* Foiler : voilier monocoque ou multicoque qui utilise la portance dynamique de plusieurs foils (ailes immergées ou plans porteurs profilés et immergés) en remplacement ou en complément de la portance archimédienne de la coque ou des coques.

**FABIO BIGNOLINI**, chef des opérations de Northern Light, co-fondateur de l'équipe de voile, navigateur primé aux championnats européens et italiens ORC (Offshore Racing Congress)

**ANDREA PADUANO**, directeur technique de Northern Light et navigateur

## GLOSSAIRE

### A

**Amorceur** : composé chimique qui permet de démarrer la réaction de polymérisation, sous l'action d'un catalyseur, de la chaleur ou d'émissions UV.

**Additivition** : fait de placer des additifs dans un plastique pour améliorer sa mise en œuvre au moment de sa fabrication ou des propriétés finales de solidité, souplesse ou dureté.

### C

**CMR** : désigne les substances cancérigènes, mutagènes et toxiques pour la reproduction humaine.

**Combustibles solides de récupération** : matériaux majoritairement composés de bois, de papiers, de cartons, de plastiques issus de déchets d'activités économiques. Non recyclés, faute de filières dédiées. Enfouis ou valorisés dans des usines d'incinération ou de co-incinération, afin de produire de la chaleur et/ou de l'électricité pour l'industrie, en substitution partielle ou totale des ressources fossiles.

**COV** : les composés organiques volatils se caractérisent par leur grande volatilité et se répandent aisément dans l'atmosphère, des ateliers et des bureaux, entraînant ainsi des impacts directs et indirects sur les êtres vivants et l'environnement. Ils regroupent une multitude de substances, qui peuvent être d'origine biogénique (naturelle) ou anthropique (humaine).

### F

**FRP (Fiberglass Reinforced Polymer) Rebar** : c'est le terme anglais couramment utilisé dans le secteur de la construction pour désigner les renforts à destination du béton, en plastique composite et fibres de verre.

### J

**JEC World** : premier salon international dédié aux matériaux composites et ses applications. Il accueille tous les acteurs majeurs de l'industrie dans un univers d'innovation, de business et d'échange, et récompense les innovations par différents prix.

### M

**Monomère** : molécule qui, par enchaînements successifs avec des molécules identiques ou différentes, donne naissance à une structure polymère.

### P

**Photopolymérisable** : transformation moléculaire (polymérisation, réticulation ou dépolymérisation) sous l'action de la lumière, souvent des rayons ultraviolets.

**PMMA** : polyméthylméthacrylate, ou verre acrylique. Plastique transparent par nature, appelé couramment plexi, plexiglas ou Altuglas.

**Polymère** : molécule de masse élevée généralement organique ou semi-organique (ex : bois, collagène, amidon, matériaux thermoplastiques, élastomères...).

**PVDF** : résines et copolymères de polyfluorure de vinylidène. Ils présentent une grande stabilité et durabilité dans les environnements extrêmes (hautes températures, abrasion, agression chimique) et des propriétés de retardateurs de fumées et de flammes.

### R

**Résine thermoplastique réactive** : basée sur la polymérisation du monomère caprolactame, qui permet de faire du polyamide 6. Un procédé compliqué à mettre en œuvre, nécessitant des conditions d'anaérobie (absence d'oxygène), une absence d'humidité, et dont la polymérisation n'est pas robuste.

### S

**SMC** : le *sheet molding compound* est utilisé pour le moulage en compression – souvent des grandes pièces – où de hautes résistances mécaniques sont exigées. Le SMC est un mélange de résine polyester, de charges inertes, de fibres de renfort, de catalyseurs, de colorants et d'inhibiteurs, d'agents de démoulage et d'épaississants. Le SMC peut être utilisé pour le moulage de formes complexes. De hautes propriétés mécaniques, un excellent aspect de surface et une isolation électrique importante, font du SMC le matériau idéal pour les panneaux de carrosserie automobile Class A, les pièces électriques à hautes résistances, les coffrets électriques industriels et diverses pièces structurelles.

www.arkema.com



### Direction communication corporate

Arkema France  
Société anonyme immatriculée  
au RCS de Nanterre (France)  
sous le numéro 319 632 790

### Siège social

420 rue d'Estienne d'Orves  
92700 Colombes - France  
Tél. : 33 (0)1 49 00 80 80  
Fax. : 33 (0)1 49 00 83 76

Dircom 4732F/05.2021/3

Crédits photos : Bruno Mazodier, Getty Images, Arkema,  
Service communication du CETIM Grand-Est.  
Conception et réalisation : TERRE DE SIENNE





**INNOVATIVE**

**ARKEMA**  
INNOVATIVE CHEMISTRY