

Anne-Marie HAGHIRI-GOSNET  
Promo 82

# Un nouveau plastique biodégradable qui peut nourrir la vie marine

**T**ous les produits en plastique que nous retrouvons sur terre ou dans les océans sont d'origine humaine. Le plastique, qui est bon marché et facile à fabriquer, ne se recycle pas totalement et se décompose en fragments, que l'on retrouve en grand nombre flottants à la surface des océans.

Malgré les efforts mondiaux visant à réduire la production et l'utilisation du plastique, ce matériau est encore omniprésent dans notre quotidien et sa production ne cesse d'augmenter chaque année. Son rejet dans les décharges et les océans impacte de manière dramatique non seulement l'environnement, mais également la santé publique.

Dans ce contexte, le développement de nouveaux matériaux biodégradables est un enjeu actuel majeur. Très récemment, des chercheurs japonais ont développé un nouveau type de matériau polymère « vert » très résistant, facilement décomposable, capable de s'autoréparer et de reprendre sa forme d'origine par une légère augmentation de la température. Cerise sur le gâteau, il peut se bio-dégrader dans l'eau de mer et se transformer en nourriture pour la vie marine. Ses applications vont de l'ingénierie à la médecine en passant par la mode durable.

Un matériau polymère vert se doit d'être durable, recyclable chimiquement et biodégradable.

Les vitrimères, développés pour la première fois dans les années 2010 par Leibler et al., sont les seuls matériaux organiques connus présentant des propriétés viscoélastiques semblables à celles du verre. Un vitrimère a donc la propriété d'être malléable tel du caoutchouc au contact de la chaleur et, une fois refroidi, d'assurer une résistance aux chocs qui s'apparente à celle du verre. S'ils sont bien moins vulnérables aux solvants que les plastiques thermodurcissables,

ils présentent la particularité de restaurer leur forme et de s'autoréparer en chauffant. Le réseau réticulé peut en effet se réorganiser au-dessus de 150 °C. Les vitrimères sont toutefois fragiles et peuvent facilement se rompre sous étirement. En ajoutant une molécule appelée polyrotaxane, des chercheurs japonais de l'Université de Tokyo ont créé un matériau alternatif plus résistant. Le nouveau matériau, baptisé vitrimère incorporé au polyrotaxane (VPR), possède la résistance mécanique faisant défaut aux vitrimères conventionnels. Les polyroxatanes sont des assemblages de supramolécules imbriquées en forme de collier avec de nombreuses molécules cycliques enroulées sur des polymères axiaux (Figure 1A). Le polyroxatane est incorporé

grâce à une réaction d'estérification (Figure 1B). Dans cette réaction, un groupe OH activé catalytiquement réagit avec un fragment ester. Le polyroxatane est composé d' $\alpha$ -cyclodextrines (CD) sous forme cyclique, de polyéthylène glycol (PEG) comme axe, et de polycaprolactone (PCL) sous forme de chaînes de greffage sur les cyclodextrines. Il est intégré facilement parce que le polyroxatane possède d'abondantes liaisons ester et de nombreux groupes OH libres aux extrémités du PCL.

La résistance du matériau final vitrimère incorporé au polyrotaxane (VPR) est très fortement augmentée. Cette propriété est due à la capacité des molécules cycliques à coulisser sur leurs axes.

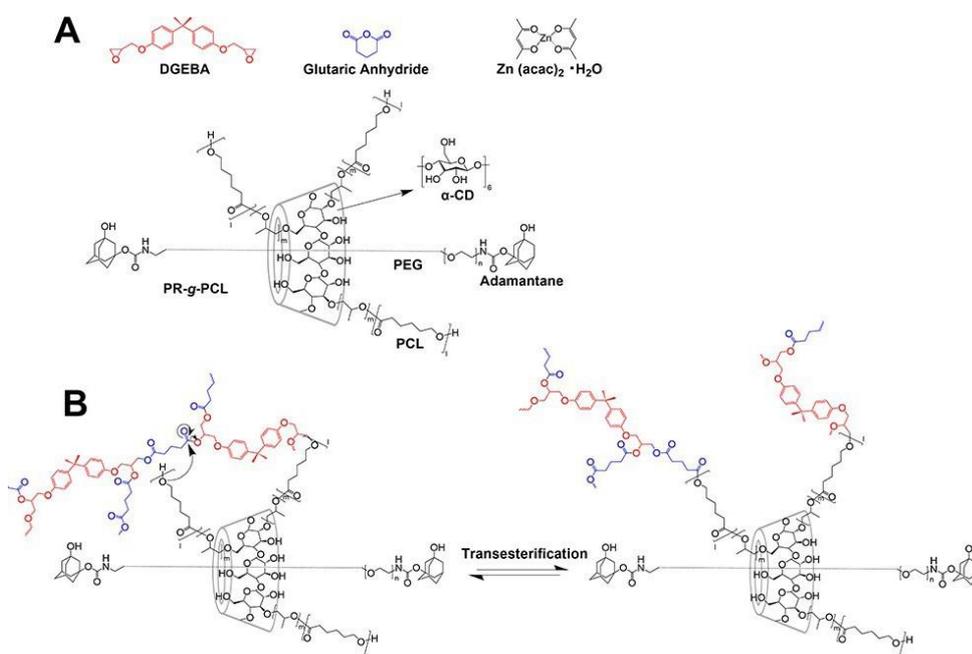


Figure 1 A – les structures chimiques des molécules composant le vitrimère (en haut) et le polyroxatane (en bas) ; et B – la réaction d'estérification permettant de greffer le polyroxatane au vitrimère. [Référence : ACS Materials Lett. 2023, 5, 3156–3160]

## Une faculté à s'autoréparer

Les résines époxy vitrimères sont une nouvelle catégorie de plastiques rigides à température ambiante qui peuvent être remodelés à volonté en étant chauffés. L'échange de liaisons ainsi que les changements dans la topologie du réseau réticulé du matériau sont activés au-dessus de 150 °C. Ainsi, le matériau gagne en malléabilité, mais ne fond pas, ce qui lui confère un fort potentiel en tant que polymère durable et respectueux de l'environnement.

L'ajout du polyrotaxane a permis au nouveau matériau de conserver même les formes les plus complexes à température ambiante.

« Le VPR est plus de cinq fois plus résistant à la rupture qu'un vitrimère de résine époxy classique », explique dans un communiqué le directeur adjoint du projet à l'Université de Tokyo, Shota Ando.

Ce matériau, qui peut être remodelé à volonté à partir de 150 °C, s'autorépare 15 fois plus vite qu'un vitrimère classique et retrouve sa forme originale 2 fois plus rapidement.

Pour démontrer cette facilité à retrouver sa forme originale, les chercheurs japonais ont effectué une expérience amusante. Ils ont réalisé, dans ce nouveau matériau VPR, un origami en forme d'oiseau (une grue). Après avoir été complètement aplati, l'objet a rapidement repris sa forme initiale en l'exposant à une température de 150 °C (pistolet à air chaud) (voir Figure 2). La fonction d'autoréparation en seulement 60 secondes à 150 °C a aussi été démontrée sur des échantillons entaillés avec un scalpel :

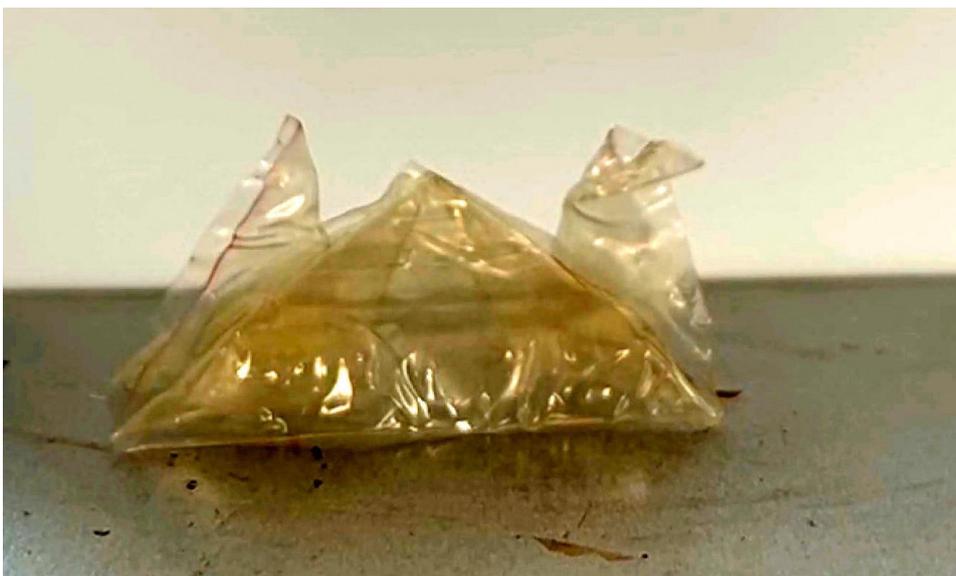


Figure 2 : L'origami VPR en forme de grue reprend sa forme initiale après avoir été chauffé.

© Université de Tokyo

[https://pubs.acs.org/doi/suppl/10.1021/acsmaterialslett.3c00895/suppl\\_file/tz3c00895\\_si\\_010.mp4](https://pubs.acs.org/doi/suppl/10.1021/acsmaterialslett.3c00895/suppl_file/tz3c00895_si_010.mp4)

## Une biodégradabilité en milieu marin

De plus, il est possible de décomposer ce nouveau polymère dans un solvant spécifique à chaud. On peut ainsi récupérer ses composants bruts et donc le recycler chimiquement. « Bien que cette résine soit insoluble dans divers solvants à température ambiante, elle peut être facilement décomposée au niveau de la matière première lorsqu'elle est immergée dans un solvant spécifique et chauffée », explique Ando.

Si les vitrimères conventionnels ne subissent aucune biodégradation dans l'eau de mer,

le nouveau vitrimère avec 10 % en poids de polyrotaxane incorporé a entraîné une biodégradation de 25 % en poids sur 30 jours. Une décomposition rapide a été observée pendant la première semaine au cours des tests de biodégradabilité dans l'eau de mer. Cette constatation est probablement due au fait que le polyrotaxane attire les bactéries en décomposition, car il est composé de CD, PCL et PEG, qui sont des composants dégradables en milieu marin. Les bactéries ont formé un biofilm à la surface du VPR, favorisant ainsi la biodégradation progressive, qui commence avec la dégradation des PR. Ce matériau est donc un plastique vert et durable qui remplit presque toutes les fonctions requises par une économie circulaire, permettant ainsi le retraitement, l'utilisation à long terme de résines thermodurcissables rigides durables.

## Des applications à la fois pratiques et ludiques

Ses caractéristiques en font un matériau idéal pour la société actuelle, exigeant notamment un recyclage des ressources et la création d'alternatives au plastique plus respectueuses de l'environnement. Les perspectives d'applications vont de l'ingénierie robotique à la mode durable, en passant par la médecine, les revêtements pour voitures et les infrastructures en tout genre. Sa capacité de mémoire et de modification de forme pourrait également intéresser les designers de mode, en remodelant par exemple la forme d'un vêtement à l'aide d'un simple sèche-cheveux ou d'un fer à repasser. Les textiles synthétiques étant responsables de 35 % des rejets microplastiques dans les océans, ce nouveau matériau durable, pourrait contribuer à réduire les impacts du secteur.

