

~95%

des composites époxy finissent dans des décharges.

73%

des consommateurs sont prêts à payer un prix plus élevé pour des matériaux durables.

41%

des matériaux biosourcés proviennent de biodéchets.

## Impact de l'embout composite des chaussures de sécurité sur l'environnement

*Ce document évalue les matériaux des embouts composites non pas sur leur biodégradabilité – limitée pour l'ensemble des matériaux structuraux – mais sur l'origine du carbone, l'énergie de procédé, la recyclabilité et la résilience réglementaire.*

La politique environnementale européenne vise la neutralité climatique d'ici 2035, en mettant l'accent sur les énergies renouvelables, la réduction des déchets, le recyclage et l'utilisation de matériaux durables au moyen de réglementations strictes et d'engagements nationaux de réduction des émissions.

Les embouts de sécurité conventionnels sont généralement fabriqués en fibre de verre renforcée par une résine époxy. Bien qu'efficaces sur le plan mécanique, ces composites à base d'époxy sont non recyclables, non décomposables et associés à une forte consommation d'énergie ainsi qu'à des émissions significatives de dioxyde de carbone tout au long de leur cycle de vie.

Afin de répondre à ces limites, Bio-Toe est présenté comme une alternative durable. Fabriqué à partir d'une formulation de polyamide contenant 41 % de nylon biosourcé issu de biomasse non alimentaire, Bio-Toe offre des émissions de carbone sur le cycle de vie réduites, une recyclabilité mécanique et le potentiel d'atteindre une performance carbone négative dans des conditions définies de production et de recyclage.

**Les composites courants à base d'époxy utilisés aujourd'hui comprennent:**

- la fibre de verre
- la fibre de carbone

**Matériaux innovants Kessin:**

- mélanges de polymères biosourcés PA56



**BIO&TOE**

# Défis environnementaux des composites à base d'époxy

## Difficultés de recyclage et de circularité

Les résines époxy utilisées dans les composites traditionnels en fibre de verre et en fibre de carbone forment, une fois durcies, des structures thermodurcissables irréversibles. Ces réseaux réticulés ne peuvent pas être fondus ni remodelés comme les thermoplastiques. La plupart des composites époxy en fin de vie sont mis en décharge ou incinérés, car les méthodes de recyclage conventionnelles ne permettent pas une récupération économiquement viable des matériaux.

Le recyclage mécanique (par exemple le broyage en charge) dégrade fortement les propriétés mécaniques, ce qui limite considérablement la valeur de réutilisation du matériau recyclé.

Des technologies de recyclage chimique existent au stade de la recherche, mais elles sont actuellement très énergivores, coûteuses et peu déployées d'un point de vue environnemental.

## Empreinte de production et émissions de COV

La production de fibres de verre et la fabrication de résines époxy sont des procédés très énergivores, impliquant des températures élevées et des matières premières pétrochimiques. La production des résines, en particulier, peut émettre des composés organiques volatils (COV) ainsi que des gaz à effet de serre.

Cela se traduit par une empreinte environnementale globale élevée lorsqu'elle est évaluée sur l'ensemble du cycle de vie — de la production des matériaux jusqu'à la fin de vie.

Les composites en fibre de verre ne sont pas biodégradables et peuvent persister dans les décharges pendant des décennies, voire des siècles. La séparation des fibres de verre et de la résine est techniquement possible, mais coûteuse et peu efficace sur le plan énergétique.

## Attributs environnementaux du nylon PA56 biosourcé

Le PA56 biosourcé intègre du carbone issu de sources de biomasse renouvelables dans sa matière première. Cela signifie qu'une partie de l'empreinte carbone du polymère provient de CO<sub>2</sub> atmosphérique séquestré plutôt que de combustibles fossiles, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre du berceau à la sortie d'usine par rapport aux polymères entièrement pétrochimiques.

Contrairement aux époxydes thermodurcissables, les polyamides thermoplastiques tels que le PA56 peuvent être refondus et reformés en fin de vie, favorisant la circularité des matériaux plutôt que l'élimination, ou être recyclés mécaniquement en nouveaux produits sans dégradation des performances aussi sévère que celle observée pour les composites époxy.

Ce comportement thermoplastique confère au PA56 un avantage environnemental distinct par rapport aux résines époxy, qui ne disposent aujourd'hui d'aucune méthode de recyclage industriel réellement viable.

Des recherches indiquent que les fibres de polyamide biosourcé (telles que le PA56) présentent une biodégradabilité notable dans certaines conditions, tandis que de nombreux polymères d'origine pétrolière persistent beaucoup plus longtemps dans l'environnement.

Tableau 1 — Récupérabilité en fin de vie des embouts composites à base d'époxy

Comparaison des voies de récupération de la matrice époxy et des fibres, de leur évolutivité et de leur maturité industrielle

Méthode	Peut-elle récupérer l'époxy ?	Peut-elle récupérer les fibres ?	Évolutivité ?	Remarques
Chimique	X (l'époxy est dégradé)	✓ (retraitement nécessaire)	! (coûteux, toxique)	Utilisée en laboratoire/essais pilotes
Thermique	X (l'époxy est brûlé)	! (fibres affaiblies)	✓ (industriel)	Utilisée dans les fours à ciment
Broyage mécanique	X (l'époxy est perdu)	X (fibres déchetées)	✓	

Tableau 2 — Comparaison des performances de recyclage et de l'impact environnemental : PA56 biosourcé vs embouts composites à base d'époxy

Rendement de récupération des matériaux, demande énergétique, coût, maintien de la qualité et potentiel de circularité

Critère	41 % bio-PA56 / 59 % petro-PA cap	Bouchon en composite thermodurcissable à base d'époxy
Forme des déchets	Une seule famille de polymères	Bouchon en composite thermodurcissable à base d'époxy
Voie principale de recyclage	Rebroyage → fusion → moulage par injection de nouveaux bouchons (boucle fermée)	Époxy réticulé + mat de verre/ carbone
Rendement typique de récupération	80–90 % de la masse de polymère réintégrée dans des pièces de même qualité	Seules les fibres sont récupérables
Demande énergétique par kg récupéré	≈ 15 MJ (refonte)	50–60 % de la masse des fibres ; 0 % de la matrice époxy
Perte de qualité après 1 cycle	< 10 % en résistance aux chocs Izod	35–55 MJ (solvolyse / pyrolyse)
Nombre de boucles à haute valeur	5–7 fois (données industrielles pour PA)	1 fois (les fibres nécessitent un retraitement)
Option de recyclage en cascade	PA → attaches automobiles, serre-câbles	Époxy broyé → charge pour béton / asphalte
Sensibilité à la contamination	Faible – la filtration à l'état fondu élimine les pigments	Élevée – doit séparer la résine, la fibre, le métal
Infrastructure requise	Chaînes standards de recyclage du PA (existantes dans le monde entier)	Usine spécialisée pour les thermodurcissables (< 10 dans le monde)
Coût de récupération	Environ 0,3 € kg <sup>-1</sup> (compoundage + énergie)	1,5–3 € kg <sup>-1</sup> (produits chimiques + haute température)
Crédit environnemental (PRG)	Environ –1,8 kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup> par rapport au PA vierge	Environ –0,4 kg CO <sub>2</sub> -éq kg <sup>-1</sup> (uniquement les fibres)

**Tableau 3 — Avantages fonctionnels et de durabilité du PA56 biosourcé dans les applications d'embouts de sécurité**

*Implications pour l'empreinte des gaz à effet de serre, l'énergie de transformation, la sécurité des travailleurs et la conformité réglementaire*

<b>Avantages de l'embout de sécurité en bio-PA56</b>	<b>Pourquoi cela reste important même si la durée de mise en décharge est identique</b>
Environ 40 % de carbone fossile en moins dans le granulé	Réduction directe de l'empreinte en gaz à effet de serre de la résine elle-même
Matière première renouvelable	Protège la marque contre la volatilité des prix du pétrole et la pression liée au reporting Scope 3
Cycle de moulage par injection d'environ 65 secondes contre 30 minutes de polymérisation pour l'époxy	Consommation d'énergie 9x plus faible lors de l'étape de formage ; principal facteur de l'écart de potentiel de réchauffement global (PRG)
Re-fondable (thermoplastique)	Le recyclage mécanique est possible ; l'époxy est irréversiblement réticulé
Aucune émission de COV de type styrène / amines lors de la transformation	Meilleure qualité de l'air intérieur et réduction de l'exposition des travailleurs
Conforme aux futures exigences de teneur biosourcée (UE, réglementation fédérale américaine)	Pérennise le produit face aux frais liés à la responsabilité élargie du producteur

**Tableau 4 — Demande énergétique primaire indicative pour les matériaux d'embouts (du berceau à la sortie d'usine)**

*Les valeurs représentent des plages typiques de l'industrie pour la production de matières vierges ; les valeurs réelles dépendent du fournisseur, de la localisation géographique et du mix énergétique. Les valeurs sont destinées à une analyse comparative préliminaire plutôt qu'à une ACV précise au niveau du produit.*

<b>Catégorie de Matériau</b>	<b>Matériau Typique pour les Coques de Protection</b>	<b>Demande Énergétique Primaire (MJ/kg)</b>	<b>Principaux Facteurs Énergétiques</b>	<b>Notes pour l'Application en Chaussure</b>
Fibre de Verre	Verre E + époxy	45–65 (fibre de verre) + 70–90 (résine époxy)	Fusion de la fibre (~1500 °C), synthèse de la résine pétrochimique	La matrice époxy empêche le recyclage en boucle fermée
Fibre de Carbone	Fibre de carbone à base de PAN + époxy	250–300 (fibre de carbone) + 70–90 (résine époxy)	Stabilisation du PAN et carbonisation	Énergie grise la plus élevée ; réutilisation limitée
Biosourcé	PA56 (41% biosourcé)	60–80	Fermentation + polymérisation	Apport énergétique fossile réduit ; recyclabilité thermoplastique

Tableau 5 — Comparaison de la récupérabilité

Critère	Composite d'époxy	Métaux	Bio-PA56
Recyclage en boucle fermée	Non	Rare	Oui
Réutilisation multi-cycle	Non	Limité	Oui (5–7 fois)
Infrastructure	Spécialisée	Industrie lourde	Lignes PA existantes
Rétention de la valeur	Faible	Moyenne	Élevée

## Récupérabilité des matériaux et performance en circularité:

- **Embouts en PA56 biosourcé**

Le matériau PA56 biosourcé permet un recyclage mécanique avec une rétention élevée de matière, récupérant typiquement plus de 80 % de la masse de polymère, et supporte le recyclage en boucles multiples (5 à 7 cycles) avec une dégradation limitée des propriétés mécaniques.

Le recyclage est économiquement viable (en utilisant des lignes de recyclage de polyamide standard largement disponibles dans le monde) tout en conservant une valeur matérielle élevée. Les composants recyclés peuvent être réutilisés dans des chaussures de sécurité ou être réaffectés à d'autres applications industrielles en cycle inférieur.

- **Embouts composites à base d'époxy**

Seules les fibres de renforcement peuvent être partiellement récupérées, généralement une seule fois, et avec une perte de résistance significative. La matrice époxy elle-même n'est pas récupérable et est détruite lors du recyclage.

Les procédés de recyclage nécessitent un apport énergétique élevé, des infrastructures spécialisées et la manipulation de produits chimiques, entraînant des coûts élevés et une faible évolutivité.

La circularité globale est faible, la majorité des matériaux étant finalement éliminés.

- **Santé, sécurité et considérations réglementaires**

Le principal risque professionnel des systèmes à base d'époxy se situe lors de la fabrication et de la réparation, nécessitant le port strict d'EPI, une ventilation appropriée et des contrôles d'exposition.

Une grande partie de la production d'embouts à base d'époxy a lieu en dehors de l'UE, où l'application des réglementations et les normes professionnelles varient, mais les produits restent soumis aux restrictions du marché européen. Les évolutions réglementaires en cours dans l'UE pourraient encore restreindre certaines chimies époxy, augmentant le risque à long terme pour les composants de chaussures de sécurité à base d'époxy.

## Principales conclusions et observations

- **Contexte du marché et réglementaire**

Environ 73 % des consommateurs sont prêts à payer un prix plus élevé pour des matériaux durables, ce qui indique une demande croissante pour des solutions de chaussures de sécurité à impact réduit.

La feuille de route réglementaire de l'UE (à partir de 2026) continue de renforcer les restrictions sur les substances dangereuses, y compris certains durcisseurs époxy et des produits chimiques classés CMR, augmentant le risque de conformité à long terme pour les systèmes à base d'époxy.

- **Limites en fin de vie des composites à base d'époxy**

Environ 95 % des produits composites à base d'époxy sont actuellement mis en décharge ou incinérés en raison de la réticulation irréversible des matrices thermodurcissables.

Des méthodes de recyclage avancées existent à l'échelle laboratoire ou pilote, mais restent énergivores, coûteuses et économiquement non viables pour l'industrie de la chaussure. En pratique, la recyclabilité des composants à base d'époxy (fibre de carbone, fibre de verre) a un impact environnemental positif minimal à l'échelle industrielle.

- **Complexité au niveau du système des embouts à base d'époxy**

Les résines époxy sont généralement utilisées en combinaison avec des fibres de verre ou de carbone, créant des structures multi-matériaux. Même lorsque des variantes « bio-époxy » sont employées, la structure composite empêche une séparation et une récupération efficaces, rendant le recyclage en boucle fermée peu pratique pour les applications chaussure.

- **Avantage environnemental des embouts en PA56 biosourcé**

Les embouts en PA56 biosourcé tirent 41 % de leur contenu polymère de matières premières issues de déchets de biomasse, réduisant la dépendance au carbone fossile. Contrairement aux composites époxy, les embouts PA56 appartiennent à une seule famille de polymères thermoplastiques, réduisant considérablement la complexité du démontage et du recyclage.

L'infrastructure existante de recyclage du polyamide permet un recyclage en boucle fermée pratique dans l'industrie de la chaussure et les secteurs adjacents.

- **Précision sur la biodégradabilité**

Le PA56 biosourcé n'est pas biodégradable dans des conditions réelles de mise au rebut.

L'avantage environnemental par rapport aux composites époxy ne réside donc pas dans la dégradation en décharge, mais dans l'origine du carbone, l'énergie de production, la sécurité des travailleurs, la recyclabilité et la résilience réglementaire.

## Évaluation globale et principales conclusions

Lorsqu'ils sont évalués selon l'empreinte carbone, l'énergie de production, la sécurité des travailleurs, la résilience réglementaire, les performances mécaniques et la récupérabilité en fin de vie, les embouts en PA56 biosourcé offrent l'équilibre le plus favorable actuellement réalisable parmi les matériaux d'embouts disponibles dans le commerce, sans compromettre les performances de sécurité certifiées.

Les embouts en PA56 biosourcé optimisent le ratio protection/impact en combinant des performances mécaniques certifiées avec une réduction de l'apport en carbone fossile, une moindre consommation d'énergie lors de la fabrication, une sécurité professionnelle améliorée pendant le traitement et une recyclabilité pratique en boucle fermée — des avantages que ni les systèmes métalliques ni les composites à base d'époxy ne peuvent offrir simultanément.



<https://www.kessin.eu>

[contact@kessin.eu](mailto:contact@kessin.eu)

+49 (0) 151 262 35 428

Berlin, Germany, 11 Décembre 2025

---

Sources:

<https://eureka.patsnap.com/report-how-recyclable-epoxy-composites-are-redefining-material-science>

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10889868.2025.2565253?af=R>

<https://www.vertecbiosolvents.com/traditional-vs-bio-based-resin-comparing-the-alternatives>

[https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2003/87-7972-683-6/html/helepubl\\_eng.htm](https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2003/87-7972-683-6/html/helepubl_eng.htm)

<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.iecr.4c03321>

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-09240-x>