

RÉSINES ÉPOXY DANS LES APPLICATIONS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

ÉVALUATION DES ÉMISSIONS POTENTIELLES DE BISPHÉNOL A



Les recherches sur les émissions potentielles de bisphénol A (BPA) provenant de la fabrication, de l'utilisation et de l'élimination des résines époxy utilisées pour les applications dans le domaine de l'énergie éolienne ont été menées par l'organisme *Beratungsgesellschaft für integrierte Problemlösungen* (BiPRO), mandaté par le Comité européen des résines époxy (CRE). Ce projet, intégré dans un programme plus large, est destiné à analyser les cinq secteurs d'application principaux des résines époxy en Europe. Pour de plus amples informations, veuillez nous contacter à l'adresse suivante : info@epoxy-europe.eu ou visiter le site www.epoxy-europe.eu.

UTILISATIONS ET TENDANCES

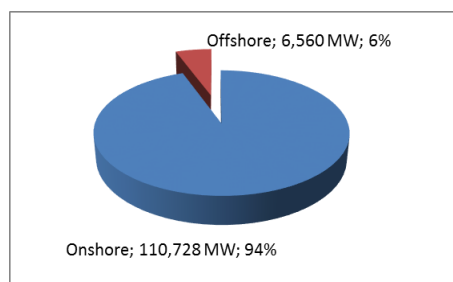
La majeure partie des résines époxy utilisées dans le secteur de l'énergie le sont dans les éoliennes. Utilisées depuis les années 1980 dans la conception des éoliennes, les résines époxy sont appliquées en grande partie aux matériaux composites et aux adhésifs nécessaires à la fabrication des pales et d'autres éléments structurels.

Selon les estimations établies par le CRE et l'organisme BiPRO, les pales de rotor des éoliennes aujourd'hui en activité contiennent un total de 249 365 tonnes de résines époxy à base de BPA, ce qui représente une utilisation annuelle de 24 162 tonnes de résines époxy.¹ Les pales de rotor consomment environ 2/3 de l'intégralité des résines époxy utilisées dans les éoliennes. Il est donc logique que l'analyse se porte sur ces composants. Grâce aux résines époxy, le diamètre des [pales d'éoliennes](#) a pu être augmenté de façon significative ces vingt dernières années (de ± 15 m dans les années 1980 à ± 160 m à l'heure actuelle).

La quantité estimée de résines époxy à base de BPA utilisées dans les pales de rotor correspond parfaitement aux résultats d'une récente étude portant sur les [avantages socioéconomiques](#) de ces résines. Établi sur demande du CRE, ce rapport indique que 24 000 tonnes de résines époxy à base de BPA sont utilisées dans les pales de rotor chaque année en Europe (sur les 52 000 tonnes de résines époxy appliquées au total pour la conception des éoliennes). Ces chiffres ne comptabilisent pas les importations et les exportations d'éoliennes au sein de l'Union européenne ; par conséquent, l'utilisation réelle d'époxy dans ce domaine d'application pourrait être encore supérieure.

De nos jours, [jusqu'à 50 %](#) des fabricants européens de pales optent pour les résines époxy en raison de leurs nombreuses qualités : légèreté, résistance à l'usure, bonne adhérence et absence de rétrécissement après refroidissement de la matière. Ces résines sont souvent associées à des matériaux en fibre, comme la fibre de verre ou de carbone, destinés à la production de pales. Elles jouent également le rôle de revêtement et protègent d'autres composants tels que les isolateurs, les enroulements du stator ou les bobines de champ pour les supports du rotor. De même, elles conviennent parfaitement pour le revêtement des tours d'acier et

PUISSANCE DES ÉOLIENNES EUROPÉENNES JUSQU'EN 2013



¹ La consommation totale a été calculée en prenant en compte les quantités potentielles de résines époxy durcies utilisées pour les pales de taille moyenne des 50 331 installations éoliennes terrestres et des 1 822 installations en mer d'Europe. Ainsi, la capacité de production électrique totale s'élève à 110 728 MW.

de béton des éoliennes, en vue d'accroître leur durée de vie. Enfin, l'enveloppe de protection du compartiment du moteur (nacelle) est composée d'un matériau composite en fibre de verre imprégné de résine époxy.

FABRICATION (RÉSINES ÉPOXY SOLIDES ET LIQUIDES)

La fabrication des pales de rotor des éoliennes peut se faire à l'aide de deux technologies différentes : l'infusion sous vide et la « pré-imprégnation ». La première technique est la plus fréquemment utilisée, comptant pour environ 65 % des installations d'éoliennes en Europe (162 087 tonnes), tandis que la seconde technique est employée dans 35 % des cas (87 278 tonnes).



Avec la technique d'infusion sous vide, la résine époxy liquide (LER) est mélangée avec un durcisseur et aspirée dans le moule de la pale par une pompe à vide, permettant ainsi aux fibres composites de s'imprégner de la résine. Une fois les étapes de chauffe et de [polymérisation](#) terminées, le moule est ouvert et dévoile la forme d'une demi pale de rotor. Deux coques de pale, produites séparément, sont alors collées ensemble à l'aide de colles époxy.

Avec la technique de pré-imprégnation, les fibres sont préalablement imprégnées de résines époxy à base de BPA avant tout traitement ultérieur. Les résines époxy sont généralement à l'état semi-solide (SsER) à température ambiante, afin d'offrir plus de robustesse au revêtement. La fabrication débute par l'application manuelle du revêtement sur la couche externe du moule de la pale. Les fibres pré-imprégnées sont ensuite placées dans le moule, avant d'être chauffées et collées à une autre coque de pale et à une poutre en vue d'accroître la résistance. Quand des résines à haute viscosité sont nécessaires, les SsER constituent le choix idéal.

Les résines époxy utilisées pour les deux techniques requièrent l'utilisation de bisphénol A (BPA) et d'épichlorhydrine (ECH) pour déclencher la première réaction du processus de fabrication. Ces deux substances ne sont pas utilisées dans une même proportion : 45 % de BPA et 55 % d'ECH pour l'infusion sous vide ; 61 % de BPA et 39 % d'ECH pour la pré-imprégnation. Les études ont démontré que les LER peuvent contenir jusqu'à 10 ppm de BPA intact (non polymérisé), tandis que ce chiffre s'élève à 65 ppm pour les SsER. Bien que les fournisseurs de résines époxy du CRE aient indiqué que ces proportions étaient inférieures pour ces deux techniques, l'étude a pris en compte les estimations les plus élevées ainsi que la quantité maximale d'émissions potentielles de BPA intact. Dans cette optique, l'analyse a permis de calculer une quantité maximale de 7 294 kg de BPA résiduel dans les pales de rotor actuellement en activité en Europe (1 621 kg dans la LER et 5 673 kg dans la SsER).

Évaluation des émissions de BPA : une fois la réaction permettant de produire la résine époxy survenue, les excédents d'ECH et d'autres substances sont rincés à l'eau. D'après les informations fournies par le secteur, entre 5 et 19 g de BPA par tonne de résine époxy produite sont éliminés de la sorte. En imaginant un scénario fondé sur des estimations élevées (19 g) et sur une élimination par système de traitement des eaux usées sur site moindre, on estime que sur les 249 365 tonnes de résines époxy présentes sur les pales d'éoliennes aujourd'hui, environ 4 738 kg de BPA pourraient se répandre dans les eaux usées après l'étape de production. En imaginant un traitement supplémentaire par les systèmes de traitement des eaux usées communales, 3 790 kg de BPA en plus seraient éliminés, laissant un total de 948 kg de BPA non traité pénétrer dans les plans d'eau. Ces émissions représenteraient une quantité annuelle de 92 kg. Le BPA ainsi libéré pourrait être soumis à une dégradation biotique et abiotique dans l'eau et être ainsi éliminé de l'environnement. Les concentrations de BPA observées au cours du processus de fabrication de la résine époxy de base utilisée pour les pales de rotor des éoliennes seraient dès lors négligeables.

FABRICATION (PALES DE ROTOR DES ÉOLIENNES)

La fabrication de pales de rotor d'éoliennes pourrait entraîner d'autres émissions de BPA durant certaines étapes de production :

- Mélange de la résine époxy avec le durcisseur : la résine époxy et le durcisseur sont généralement livrés dans des récipients en plastique contenus dans un support en métal pour plus de stabilité. Une fois le mélange terminé, les récipients sont récupérés par le fournisseur qui assure leur élimination par incinération ou qui les nettoie en vue d'une utilisation ultérieure. Les résidus de résines époxy présents

dans ces récipients, et sur les outils utilisés pour le mélange, doivent être incinérés, assurant ainsi la destruction de toute trace de BPA.

- Infusion sous vide et pré-imprégnation : des excédents de matière pourraient subsister lors de la découpe de fibres pré-imprégnées utilisées dans la production des pales. Avec la technique sous vide, les emballages, les mailles et les canaux d'acheminement permettant de transporter la LER dans les moules terminent sous la forme de déchets plastiques solides destinés à être incinérés. Les résines époxy risquent parfois de s'échapper du moule ou de générer des déchets solides lors du collage de deux pales. Enfin, on peut s'attendre à des émissions d'échappement lors du meulage, même si aucune donnée n'est disponible pour permettre de quantifier cette dispersion de particules.

Évaluation des émissions de BPA : les données manquantes ont nui à la bonne conduite de l'analyse portant sur ces étapes de production. Les recherches ont indiqué qu'une pale de 7 tonnes, produite grâce à la technique d'infusion sous vide, générerait 4 tonnes de déchets en tout, dont 0,4 tonne de résines époxy. De nos jours, les 249 365 tonnes de résines époxy à base de BPA comptabilisées dans les applications éoliennes en Europe pourraient avoir généré un maximum de 10 473 tonnes de déchets de résines époxy à base de BPA. La majeure partie de ces déchets seraient composés de résine époxy durcie, dont les concentrations de BPA pouvant être libérées dans l'environnement restent très faibles (environ 306 kg). Parmi les méthodes de mise au rebut, citons l'incinération – favorisant la destruction du BPA – ainsi que l'enfouissement, lequel ne permet pas d'analyser correctement ce qu'il advient du BPA. Notons également que cette hypothèse repose sur des recherches portant sur l'infusion sous vide, et non sur la méthode de pré-imprégnation (pour laquelle les mêmes estimations en termes de production de déchets ont été réalisées).

DURÉE DE VIE

La durée de vie moyenne d'une éolienne tourne autour des 20 ans, mais peut être étendue grâce à une maintenance appropriée. Comme mentionné précédemment, les structures des pales sont revêtues de couches de matériaux autres que les résines époxy, ce qui leur assure une meilleure protection contre les conditions météorologiques défavorables (pluie, neige, sable, rayons du soleil, vitesse, etc.).

Évaluation des émissions de BPA : les émissions potentielles de BPA devraient être minimales durant le cycle de vie. Les contraintes mécaniques et les rayures au niveau du revêtement de protection constituent les seuls facteurs pouvant entraîner la libération de particules d'époxy à partir de pales d'éoliennes en fonctionnement, car ils exposent la résine appliquée en dessous du revêtement.

FIN DE VIE

Quant aux autres applications d'époxy, l'analyse portant sur l'étape de mise au rebut a souligné de nombreuses incertitudes en matière de manipulation et de classification des déchets :

- Réglementation : aucune réglementation ne régit actuellement les méthodes d'élimination des parcs éoliens, en ce compris, des éoliennes (l'étape de mise au rebut ne constitue pas encore un sujet de préoccupation). Certains pays européens ont décidé que les composants inflammables ne devraient pas être éliminés dans des décharges. Étant donné que les résines époxy sont inflammables, d'autres méthodes d'élimination devront voir le jour à l'avenir.
- Procédures actuelles de mise au rebut : d'après une étude menée par l'Institut de technologie chimique allemand *Fraunhofer*, le nombre de parcs éoliens démantelés reste encore très faible. À ce jour, rares sont les cas de traitement de pales d'éoliennes en fin de vie revêtues de résines époxy. Mais les difficultés ne se limitent pas à ce manque d'expérience. En effet, la présence d'un marché d'éoliennes d'occasion pose problème en Europe et encore plus en dehors du continent.
- Méthodes de mise au rebut : la plupart des composants peuvent être recyclés, mais ce n'est pas le cas des pales de rotor. Les pratiques actuelles de mise au rebut comprennent l'enfouissement et l'incinération, parfois même en produisant de l'électricité. On déplore l'absence de statistiques disponibles pour les pales mises au rebut ou incinérées.

Évaluation des émissions de BPA : aucune donnée n'était disponible pour cette étape. Cependant, il s'est avéré possible d'estimer que l'Europe devra éliminer, entre 2020 et 2034, environ 1 million de tonnes de

déchets de pales en fin de vie. Dans le pire des cas, 162 778 tonnes de déchets de résines époxy à base de BPA – tant sous la forme liquide que sous la forme semi-solide – produiront 4 761 kg de BPA. Toutefois, la proportion de ces déchets détruits par incinération ou pénétrant dans les plans d'eau quand ils sont enfouis ne peut être calculée avec précision. En outre, la détérioration et le déversement de BPA dans les décharges pourraient générer des émissions en faible quantité étant donné que les déchets de résines époxy sont sujets à la dégradation et à la photooxydation suite à l'exposition directe aux rayons du soleil ou aux averses. Les méthodes de récupération et les réactions de pyrolyse sont étudiées, mais présentent de multiples obstacles tant sur le plan pratique qu'économique (p. ex. : la taille des résines solides).

CONCLUSIONS

Au maximum, 948 kg de BPA pourraient être libérés dans l'environnement en raison de l'utilisation actuelle de résines époxy dans les pales de rotor des éoliennes (92 kg max. par an). La plupart des émissions de BPA proviendraient de la production de résine époxy de base. Au cours de la durée de vie des pales, aucune perte significative de BPA n'était à prévoir. L'étape de mise au rebut présente de trop grandes incertitudes pour permettre de quantifier de manière fiable les pertes de BPA.

Pales de rotor des éoliennes

Utilisation totale d'époxy	Émissions totales de BPA rejetées dans l'environnement				
	Production	Application	Durée de vie	Mise au rebut	Total
249 365 t	948 kg	Indéfinies	Négligeables	Indéfinies	> 948 kg

Utilisation annuelle d'époxy (2013)	Émissions annuelles de BPA rejetées dans l'environnement				
	Production	Application	Durée de vie	Mise au rebut	Total
24 162 t	92 kg	Indéfinies	Négligeables	Indéfinies	> 92 kg

ANNEXE : étapes du cycle de vie et émissions de BPA correspondantes relatives aux pales de rotor des éoliennes à base d'époxy

