MON LILI A MOI

L'époxy, théorie et pratique

Après la couture des bordés vient la phase structurelle, qui va faire de tous les éléments un ensemble rigide et résistant. Cette tâche essentielle est confiée à différentes résines époxy, chacune dédiée à un usage spécifique de collage, d'assemblage, de stratification et de finition.

Texte et photos : Jean-Yves Poirier.

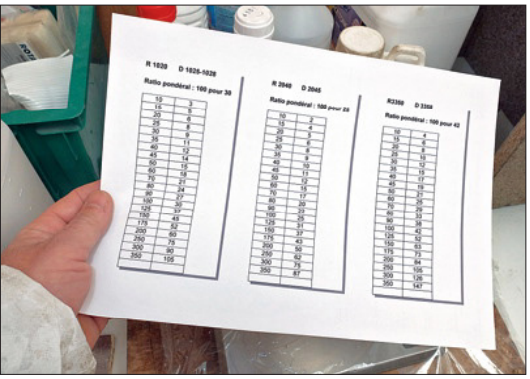
REFERENCE OBLIGEE de tous les bricoleurs de la planète, l'Araldite est sans doute la résine époxyde la plus connue du grand public mais cette famille d'adhésifs est déclinée en milliers de formules, chacune adaptée à un usage ou à des conditions d'emploi spécifiques. Les propriétés physiques et mécaniques de l'époxy ont permis de développer un véritable système polyvalent, capable de résoudre toutes les questions d'assemblage, de renfort, de protection et de finition posées par une construction. Les étonnantes capacités adhésives de l'époxy ont été mises en lumière en 1936 par Pierre Castan, ingénieur de la société Trey Frères à Zurich, spécialisée dans la médecine dentaire. A la même époque, aux USA, le Dr Greenlee faisait aussi des recherches sur la base de la combinaison de l'épichlorhydrine, du bisphénol A et de leur polymérisation (durcisseurs) à l'aide de précurseurs aminés. Le Dr Castan déposera son brevet en 1939, revendu ensuite au groupe Ciba qui développera de nouvelles formules, dont

▲ **Le kit époxy du Lili 6,10 comprend un primaire époxy à l'eau (1010/1014) une résine de stratification bois (1020/1025), un adhésif à congé haute densité (2040/2045G) et un adhésif structurel (3350/3358T).**

la fameuse Araldite, commercialisée dès 1946. Entre-temps, les industries de guerre auront fait grand usage des époxy, en particulier pour le collage des métaux, un casse-tête insoluble avec les colles conventionnelles. Mais les formulations de l'époque restaient très difficiles à utiliser tant leur viscosité était grande et le durcisseur corrosif et toxique. Ce dernier point a d'ailleurs longtemps été le principal obstacle à l'utilisation généralisée de ce type de colle. Dès les années soixante, certains formulateurs, en particulier en Nouvelle-Zélande et aux USA, ont travaillé à fluidifier l'époxy et à diminuer la toxicité des durcisseurs, fortement allergènes, afin d'adapter ces produits à la construction nautique – le premier voilier de série stratifié en époxy fut le Shellfish de 1965, qui emprunta son nom à la firme pétrolière Shell, productrice de la résine Epikote. Aujourd'hui, certaines

L'assemblage de la structure du Lili, légère, rigide et surtout homogène, est exclusivement collé et ne comporte aucune fixation mécanique.

▲ C'est grâce à leurs recherches sur les chars à glace de la fin des années soixante que les frères Gougeon ont contribué à développer, sous le nom de West System, les techniques du composite bois-époxy dans le nautisme.



▲ Un tableau, accroché au-dessus de la balance et rappelant le rapport de mélanges et les valeurs calculées les plus usuelles, évitera bien des erreurs de préparation.

formulations sont presque aussi fluides que l'eau et les précautions habituelles liées à l'utilisation de produits chimiques (combinaison, masque, lunettes et gants) suffisent à sécuriser leur emploi. Le catalogue des fabricants s'enrichit chaque jour avec des formulations alimentaires, des colles sous-marines, des résines moussantes, souples comme du caoutchouc, diluables à l'eau ou résistantes au feu…

Les techniques de construction composites associant du bois, de l'époxy et des renforts ont été popularisées dès la fin des années soixante par les frères Gougeon : Jan, Meade et Joël. Adeptes du char à glace en hiver et du voilier en été sur le lac Michigan, ils avaient ouvert un petit atelier de fabrication de chars à voile à Bay City, sur les rives de la Saginaw River, tout près du siège de la Dow Chemical Corporation, un géant de l'industrie chimique. Son dirigeant, Herb Dow, vint un jour commander un char à glace aux frères Gougeon et les mit en contact avec les chimistes maison. A l'aide de diluants réactifs, ils commencèrent alors à développer des formules époxy fluides, faciles à étaler sur le bois, et à mettre au point un véritable système complet pour coller, assembler, stratifier et protéger n'importe quelle structure en bois, rigide, légère et durable. Le bois/époxy était né…

On sait depuis longtemps que le bois est un excellent matériau d'ingénierie, économique et très résistant à la fatigue et aux contraintes mécaniques. Mais on sait aussi qu'il est très sensible aux variations hygrométriques, qui engendrent des cycles alternés d'expansion et de contraction des fibres, qui se traduisent visuellement par des fentes, des gerces, du vrillage. Et la résistance mécanique du bois diminue de moitié, voire des deux tiers si son taux d'humidité atteint ou dépasse les 25%… Le matériau est également

▲ Point faible de tous les polymères, la résistance aux UV de ces époxy transparents est renforcée par des agents azurants, qui mettent aussi en valeur la couleur du support.

▲ Une échelle suspendue à l'intérieur du Lili permet de se déplacer le long de la coque sans marcher sur les bordés et sans les déformer. Inconvénient : la pose des congés se fait souvent à plat ventre et la tête en bas…

sensible à la moisissure sèche provoquée par des champignons parasites de la cellulose qu'il contient. On sait par ailleurs que, outre d'excellentes propriétés adhésives et d'imprégnation de surface (mouillabilité), les résines époxydes ont une résistance extrêmement élevée au transfert d'humidité sous toutes ses formes, y compris gazeuse. En encapsulant les fibres du bois sous un film étanche, on peut ainsi maintenir le matériau à un taux d'humidité constant, de l'ordre de 5 à 15%, et assembler par collage les différentes pièces de la structure.

Le composite bois/époxy obtenu présente ainsi une résistance mécanique optimale, une stabilité dimensionnelle absolue, une grande homogénéité structurelle et une durabilité au moins équivalente à celle des unités en polyester (44 ans après sa mise en chantier et d'innombrables régates, le trimaran en CP/époxy *Adagio* des frères Gougeon est en parfait état). Seul inconvénient, le coût et la mise en œuvre du composite bois/époxy conviennent mal à la production industrielle,

▲ N'importe quel matériau convient pour confectionner une cale à congé, mais il devra être suffisamment rigide pour pousser le mélange sans plier, présenter un bord parfaitement lisse et résister à l'acétone pour le nettoyage. Ce jeu, de 10 à 40 mm de rayon, a été taillé dans des échantillons de stratifié décoratif.

à l'exception notable de celle des voiliers RM de Fora Marine, le seul chantier au monde à proposer des bateaux de (petite) série dans ce type de matériau.
Contrairement aux produits solvantés, les époxy sont composés de 100% de matières solides et de diluants réactifs, ce qui évite toute rétraction après le durcissement, le volume déposé restant constant. En l'absence d'évaporation de solvants, aucune pression de serrage n'est donc nécessaire : il suffit de mettre les composants en contact pour obtenir un joint fiable et résistant, une performance inaccessible aux colles conventionnelles.
Attention, le ratio résine-durcisseur (100 : 25, 100 : 32, 1:1...), indiqué en pondéral ou en volumique sur les fiches techniques, varie selon les formules et ne doit en aucun cas être modifié en fonction de la température ou de l'âge du capitaine ! Respectez scrupuleusement les proportions indiquées et ne travaillez pas dans une atmosphère froide et humide (18°C ou plus de rigueur) afin de maintenir le bois à un taux hygrométrique le plus faible possible.
Sous réserve d'une formulation à faible exothermie (le phénomène de polymérisation dégage de la chaleur, d'autant plus forte que la masse du mélange est importante), la résine époxyde peut aussi s'utiliser en très forte épaisseur, voire en coulée. De nombreuses charges minérales ou végétales (microfibres, microsphères, microballons ou silice colloïdale) permettent en outre de modifier la plupart de ses caractéristiques physiques : viscosité, résistance mécanique, pouvoir mouillant... On peut ainsi adapter l'époxy à de très nombreux usages, dont l'assemblage par joint congé sur lequel repose toute la structure du Lili.

Le budget

Report : 2 725 € (plans + CP + découpe numérique)
Epoxy : 1 370 € (kit complet)
Total : 4 095 €

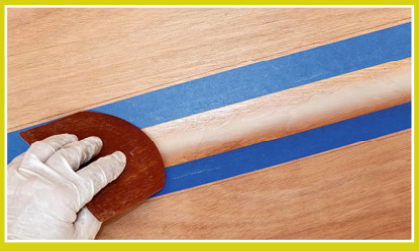
LE JOINT CONGE POUR LES NULS

L'idéal pour déposer les mélanges pâteux est de remplir une poche façon pâtissier. Les sacs de congélation avec un lien de fermeture sont bien adaptés (sauf les Zip-Lock). Pour éviter tout risque d'exothermie, limitez la quantité du mélange à 300-400 g à la fois. Placer un angle du sac à l'intérieur d'une boîte de conserve ouverte aux deux extrémités, son rebord métallique permettant de racler la spatule et de pousser la pâte dans le sac. Le fermer à l'aide du lien fourni et couper l'angle pour laisser sortir la résine. La largeur de l'ouverture, de 5 à 15 mm environ, dépendra de celle du joint ou du collage à réaliser.

▲ Plutôt que de noyer les colliers plastiques dans la résine, d'où ils sont difficiles à extraire, je m'inspire de la technique de chenillage des tôles en vigueur dans la construction métallique. Lissé à la spatule dans le V du bouchain, l'adhésif structurel 3350 remplace ici les points de soudure entre chaque ligature.

▲ Après polymérisation, le collage est si résistant que les colliers peuvent être coupés sans risque. Une bande cache placée de chaque côté du congé permet d'éliminer les surplus de résine et d'obtenir un beau congé de largeur constante. Dépoussiérer et dégraisser la surface de collage. L'acétone est le solvant le plus courant pour cet usage.

▲ Déposer une quantité suffisante de mélange pour remplir le fond de l'angle formé par les bouchains. Mieux vaut en mettre trop que pas assez car, en cas de manque, les reprises sont difficiles à réaliser.



▲ Lisser le mélange en une seule passe régulière sur toute la longueur du congé. Comme l'ouverture des bordés varie de l'étrave au tableau, il faudra jouer sur l'inclinaison de la cale pour maintenir une épaisseur à peu près constante au fond du congé, en principe égale à l'épaisseur du contreplaqué, soit ici 6 mm.

▲ Compte tenu des temps de préparation, masquage et mélange de la pâte, j'ai posé les congés par paires bâbord/tribord, en commençant par la sole. Les bandes cache doivent être retirées immédiatement après la pose du mélange afin d'éviter les déchirures une fois la résine polymérisée.

DIMENSIONS RECOMMANDEES

Epaisseur CP	Congé haute densité	Congé basse densité
	Rayon	Rayon
4 mm	15 mm	20 mm
5 mm	18 mm	25 mm
6 mm	21 mm	30 mm
8 mm	25 mm	40 mm
10 mm	28 mm	50 mm
12 mm	30 mm	60 mm
15 mm	32 mm	75 mm

RESOLTECH, 800 FORMULES AU COMPTEUR

Résoltech trace un chemin singulier dans le monde des composites, plus habitué aux multinationales de la chimie qu'aux petites entreprises spécialistes du sur-mesure. Et pourtant la marque, née en 1996, offre aujourd'hui plus de 800 références...

Dès les années quatre-vingt, du côté d'Aix-en-Provence, l'atelier de fabrication et de réparation de Luc Loriot a commencé à se tailler une belle réputation dans le milieu exigeant des amateurs de planche à voile. Il est vrai que la machine de découpe au fil chaud qu'il a mise au point avec l'aide de son père, ingénieur au CEA, produisait des pains de polystyrène préformés très appréciés des shapers et du réseau Mistral. La préparation et la vente d'un kit de planche résine, tissu et accessoires, permettent à Luc de se rapprocher du dirigeant de Rea, Pierre Faure, formulateur à Marseille de résines époxy, et de développer avec lui des produits spécifiques. Surfant sur la vague de la planche qui, au milieu des années quatre-vingt connaît une croissance exponentielle, la petite entreprise prend une envergure industrielle et noue des partenariats avec des fournisseurs connus, comme le tisseur Stevens-Génin. Installée depuis 1996 à l'Eguilles, Résoltech a aujourd'hui un effectif d'une quinzaine de personnes, dont un tiers au seul bureau d'études. La recherche et le développement font partie de l'ADN de la société, qui apporte une réponse sur mesure au cahier de charges de ses clients. Le produit ainsi créé est ensuite ajouté au catalogue, l'accent étant désormais porté sur des formulations en phase aqueuse, sur des composants d'origine verte et, plus généralement, sur une moindre nuisance environnementale. Pour aller plus loin encore, Resoltech disposera début 2016 d'un nouveau bâtiment ultra-moderne de 1 700 m².

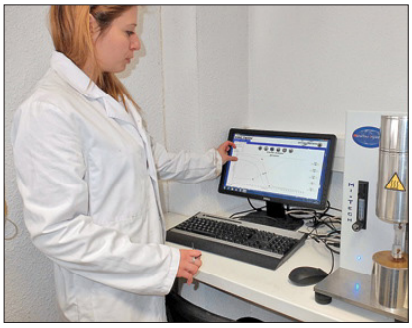
▲ Le mélange des différents composants entrant dans la composition des résines et durcisseurs (de trois à dix selon les formules, parmi une bonne centaine disponibles) et l'action des catalyseurs se font par étapes à l'intérieur d'un réacteur sous vide d'air et à différentes températures. L'ensemble fait partie des recettes propres au formulateur pour obtenir le résultat recherché. Selon les cas, le réacteur peut préparer plusieurs centaines de kilos de mélange en une seule opération.

▲ Les matières pâteuses sont conditionnées à l'aide de cette presse hydraulique, et les produits liquides à l'aide de machines doseuses et de pompes à engrenages.

▲ Une fois pesés, les additifs (ici de la silice colloïdale) sont mélangés à la résine de base à l'aide de puissants malaxeurs. L'entonnoir de l'aspirateur recueille toutes les poussières résiduelles pour éviter de contaminer l'atmosphère ambiante.

▲ Des échantillons sont prélevés régulièrement tout au long de la chaîne de fabrication afin de permettre aux responsables du laboratoire de contrôler la qualité et la régularité du processus.

▲ Le technicien procède à la coulée d'échantillons de résine pure qui serviront aux tests normalisés de résistance mécanique, de caractérisation physique, diélectrique...



▲ Critère très important pour qualifier une résine époxyde, la température de transition vitreuse (ou Tg) est mesurée grâce à cette machine d'analyse thermo-différentielle. Le Tg indique la température à partir de laquelle la résine polymérisée change d'état et commence à fluer et à perdre sa résilience. Pour une formulation courante, elle peut s'évaluer à un peu plus de deux fois la température de polymérisation, soit une cinquantaine de degrés environ pour une cure à température ambiante. Une raison comme une autre de privilégier les finitions claires sur votre bateau...

▲ Le bois-époxy utilisé par Fora Marine pour ses RM (ici un 1350) prouve que cette technologie sait aussi répondre aux exigences de la production de série.

Cette méthode spécifique d'assemblage consiste à appliquer un arrondi dans l'angle formé par deux pièces, un mélange résine-durcisseur, chargé de matières pulvérulentes d'origine végétale (microfibres...) minérale (silice colloïdale, microsphères de verre, talc...) ou synthétique (microballons phénoliques, poudre thermoplastique...). Le choix des charges est lié à la résistance, structurelle ou non, du congé et à la densité correspondante, haute ou basse. Dans le cas du Lili, les congés sont à haute densité car toutes les pièces, y compris les aménagements, participent à la structure. La mise en forme du mastic se fait à l'aide d'une spatule ou d'une cale arrondie. Le mélange pâteux peut être préparé à la demande à partir d'une résine standard dans laquelle on incorpore à la main une ou deux charges adaptées à l'application prévue. Dans la pratique, l'opération, qui doit être répétée à de nombreuses reprises au fur et à mesure de la pose du joint congé, est longue, fastidieuse et, surtout, elle n'offre pas des résultats parfaitement homogènes, surtout si la température varie. Compte tenu de sa très faible densité, il est, par exemple, très difficile de mesurer des quantités exactes de silice colloïdale d'une préparation à une autre. Cet agent de contrôle de la thixotropie (fluidité) a une importance considérable pour obtenir un mélange suffisamment visqueux pour ne pas couler sous l'effet de la gravité mais pas trop pour pouvoir adhérer au support... Cet équilibre délicat ne peut être obtenu qu'avec des produits spécifiques, prémélangés en usine comme ici les formules Résoltech 3350 pour l'adhésif et 2040 pour le joint congé. Démonstration par l'image du collage et de l'assemblage par joint congé des bouchains du Lili.

Sécurité, sécurité...

Comme n'importe quel produit chimique, les résines époxydes ne sont pas des produits anodins et une hygiène de travail aussi rigoureuse que possible évitera les mauvaises surprises, qui se manifestent sous la forme de réactions allergiques, respiratoires et cutanées. Les fabricants ont beaucoup travaillé à diminuer la toxicité des époxy mais on évitera donc tout contact direct de la peau avec le durcisseur et avec un mélange non polymérisé, en portant des gants jetables. En cas de ponçage ou d'usinage, on veillera à brancher les machines sur un aspirateur à poussières, à porter un masque filtrant et, plus généralement, à maintenir un bon état de propreté du local. Autant que faire se peut, on évitera l'accumulation de poussières et de déchets, au sol comme dans le bateau. Si, malgré tout vous vous mettez de la résine sur la peau, résistez à la tentation de l'enlever à l'acétone. En détruisant la protection grasse naturelle de la peau, la dilution facilite la pénétration des amines dans le corps. La meilleure solution est d'utiliser un savon de nettoyage puissant et de bien rincer à l'eau.

Les mots pour le dire

RÉTICULATION : Appliqué à la chimie des polymères, ce terme fait référence à la formation d'un réseau structurel tri-dimensionnel par liaison des molécules entre elles. Ce processus irréversible, désigné plus couramment sous le terme de polymérisation ou plus simplement de durcissement, se traduit dans la pratique par le passage du mélange époxy de l'état liquide à l'état solide.

HYGROMETRIE : Ce terme caractérise la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air ambiant. Plus elle est faible, plus les caractéristiques mécaniques du bois sont élevées et inversement. Un taux hygrométrique faible (moins de 70%) et une température supérieure à 18°C garantissent l'absence de remontées aminées à la surface d'un époxy. Elles sont visibles sous forme d'un voile cireux et gras plus ou moins accentué, susceptible de perturber la bonne adhésion des couches suivantes.

MOUILLABILITE : Il s'agit ici de la capacité de la résine à imprégner les fibres du tissu de renfort et celles du bois. Une résine à forte mouillabilité permet de stratifier un tissu rapidement, sans manques ni excès. Cette caractéristique n'est pas forcément liée à la viscosité, une résine fluide pouvant avoir une mouillabilité faible et inversement.

VISCOSITE : Ce nom désigne la capacité d'un fluide à s'écouler. Ce phénomène très complexe, qui dépend aussi de la densité du liquide, de sa température et de ses charges et additifs, est mesuré en laboratoire dans des conditions standardisées et exprimé en mPa.s ou en centipoise (la viscosité de l'eau à 20°C est de 1 Cp ou 1 mPa.s)

VOLUMIQUE/PONDERAL : Le mélange résine + durcisseur peut être préparé de deux manières. La méthode volumique consiste à mesurer avec précision le volume respectif de chaque produit à l'aide d'une seringue, d'un récipient gradué ou d'une pompe calibrée, mais la résine doit être suffisamment fluide pour pouvoir être aspirée. On peut aussi préparer les produits avec une balance (méthode pondérale) mais la précision diminue avec la quantité à mélanger. Il ne faut jamais changer les proportions indiquées sur les fiches techniques pour modifier le temps de polymérisation et les erreurs doivent rester en deçà de 5% au grand maximum.

EXOTHERMIE : Ce terme fait ici référence au dégagement de chaleur engendré par la réaction chimique de réticulation. Mal contrôlée, en particulier avec une forte masse de résine, elle peut être violente et atteindre plusieurs centaines de degrés. Pour l'éviter, il suffit d'utiliser le durcisseur, lent ou rapide, adapté à la tâche en cours, de placer le mélange dans un récipient plat afin de diffuser les calories et de ne préparer que les quantités de mélange applicables dans un temps donné.