

Matériaux Composites (D)

1) Usinage des composites

- * Spécificités à l'usinage
- * Usinage par enlèvement de copeaux
- * Découpe des matières premières
- * Usinage des structures sandwich
- * Découpe au laser

2) Collage des composites → Caractéristiques et choix des adhésifs

- Matériaux à coller,
- Préparation des surfaces
- Caractéristiques des adhésifs structuraux
- Différents types d'adhésifs

1) Usinage des composites

Usinage des composites:

Les matériaux composites se mettent en oeuvre plutôt **par moulage** ; cependant, des usinages sont assez souvent pratiqués pour différentes raisons comme par exemple :

- **perçage** pour assemblage par boulonnage ou rivetage ;
- **détourage** de pièces moulées ;
- **fabrication** de petites séries ;
- **finition**: obtention de cotes extrêmement précises ;
- **découpe** de préforme à mouler ;
- **découpe** à grandes cadences du type « emporte-pièce ».

1) Usinage des composites: Spécificités à l'usinage

Comportements du matériau (1)

— **hétérogénéité** : Il faut usiner simultanément deux matières de natures différentes (résine et fibres), voire trois (des charges minérales). L'usinage classique dit « par enlèvement de copeaux » se traduit en fait **par une création de poudre**. Ces poudres sont propulsées avant de retomber. Ces poudres peuvent être abrasives (fibres de verre) ou conductrices d'électricité et susceptibles de générer un court-circuit (fibres de carbone) ;

— **anisotropie** : pour composites à fibres orientées, la structure est anisotrope (comportement différent selon la direction envisagée), La rigidité, par exemple, sera plus grande dans le sens L que dans le sens T → générer des déformations non souhaitées

1) Usinage des composites: **Spécificités à l'usinage**

Comportements du matériau (2)

- **conductivité thermique** : ce sont des matériaux isolants sauf ceux chargés de particules métalliques ou renforcés de fibres de carbone. La chaleur créée par l'opération d'usinage restant concentrée sur la zone usinée peut entraîner une déformation thermique importante et un risque de dégradation thermique ;
- **usure des outils** : la présence de fibres de verre engendre une usure très rapide des outils traditionnels (acier rapide). Les outils au carbure, voire diamantés, sont impératifs.

1) Usinage des composites: **Spécificités à l'usinage**

Spécificités des techniques d'usinage (1)

le laser ou le jet d'eau est bien adapté

Avec les techniques classiques l'opération peut impliquer des endommagements : arrachement de fibres, délaminage visible (arrachement de couche), délaminage interne (dissociation entre deux couches du matériau), dégradation thermique (échauffement trop important), obtention d'une surface rugueuse car les charges ou les fibres ont été arrachées et non pas coupées

Les composites à matrice polymère ne sont pas conducteurs d'électricité, l'électroérosion est impossible,

→ d'usinage par enlèvement de copeaux, par laser et par jet d'eau

1) Usinage des composites: **Spécificités à l'usinage**

Spécificités des techniques d'usinage (2)

Paramètres	Usinage par outil classique	Usinage par jet d'eau	Usinage par laser
Possibilités	Toutes	Découpe et perçage traversant	Découpe et perçage traversant
Thermique	Échauffement possible	Pas d'échauffement	Dégradation thermique
Résidu	Copeaux et poussières	Poussières emportées par l'eau	Pas de résidus (matière vaporisée)
Fixation	Solide	Légère	Légère
Usure	L'outil	La buse (10 à 200 h)	
Épaisseur	Limitée par la géométrie de l'outil et la puissance de la machine	Limitée par la divergence et la perte de puissance du jet	Limitée par la puissance du rayon et la dégradation thermique du matériau
Machines	Toute une gamme, de l'outil portable manuel à la machine-outil à commande numérique	Compresseur hydraulique et table de découpe avec portique	Générateur laser dans un local clos
Réglages	Puissance de la machine Outil (matériau, géométrie) Avance Vitesse de coupe	Nature du fluide (eau, abrasifs) Diamètre de la buse Pression Distance d'attaque Vitesse de déplacement	Puissance du rayon laser Vitesse de déplacement Gaz d'appoint
Alimentation	Énergie électrique	Pompe HP (énergie électrique, air comprimé) et eau	Énergie électrique, fluide de refroidissement du générateur, gaz d'assistance éventuel
Hygiène et sécurité	Bruit et utilisation de machine (outil classique)	Bruit de groupe hydraulique, sécurité de pompes haute pression	Danger du rayon, gaz toxique, risque d'incendie, réglementation très stricte
Maintenance	Machine-outil (électricité, entretien, graissage...)	Maintenance électrique et hydraulique (pompe, joint...)	Maintenance très spécialisée du générateur laser

Comparaison des procédés d'usinage pour composites

1) Usinage des composites: Spécificités à l'usinage

Outils (1)

- En **acier rapide** :

- * moins chers à l'achat mais une durée de vie moins longue,
- * qualité de coupe est bonne en moyenne.

- En **carbure** :

- * une plus grande résistance à l'abrasion et un bon rapport prix/usure.
- * les carbures métalliques (**de tungstène mais aussi de cobalt, de titane ou de tantale**) sont obtenus par frittage.
- * l'outil peut être entièrement en carbure ou constitué d'une plaquette rapportée et fixée sur un support métallique classique.

1) Usinage des composites: Spécificités à l'usinage

Outils (2)

Diamantés : les plus chers, constitués de grains de diamants fixés sur un support.

La granulométrie est souvent définie par un nombre :

- 40 à 60 sont des valeurs courantes ;
- 100 à 200 et plus sont des granulométries fines à extrafines.

Les nombres correspondent à une norme américaine. La norme de la Fédération Européenne des Producteurs d'Abrasifs (FEPA) et la mesure américaine en mesh corresponde à la grosseur du grain abrasif

FEPA - D602 = 30 à 40 mesh = grain d'environ 0,5 mm ;

FEPA - D252 = 60 à 80 mesh = grain d'environ 0,2 mm ;

100 à 200 mesh = grain d'environ 0,1 mm ;

200 à 400 mesh = grain d'environ 0,05 mm.

1) Usinage des composites: **Spécificités à l'usinage**

Outils (3) Diamantés :

- les **outils à grains fixés** par dépôt électrolytique sur un support métallique à revêtement au nickel. Un outil comportant une simple couche de grains très abrasifs, ce qui implique une durée de vie assez courte car les grains sont plus facilement arrachés lors des usinages ; mais l'outil peut être reconstitué par un nouveau dépôt ;
- les **outils à grains compactés** à l'aide d'un liant sur un support métallique. plus résistants car il y a plusieurs couches, mais ils nécessitent un refroidissement en cours d'usinage ;
- les **outils en diamant massif** fixés sur un support métallique. Les outils diamantés sont utilisés à des très grandes vitesses comparant avec les outils en aciers rapides ou en carbures.

1) Usinage des composites: Spécificités à l'usinage

Outils (4) Revêtements spéciaux anti-usure :

de nombreux R & D pour mettre au point des outils plus résistants à l'usure: des revêtements à base de nitrure de titane qui multiplieraient par 2 à 5 la durée de vie d'un outil de fraisage.

Fluide de refroidissement. Ce peut être :

- l'eau : sous forme de jet liquide continu ou vaporisé en fines gouttelettes
- un mélange eau-huile soluble : dans la mesure où celle-ci ne réagit pas avec le matériau ;
- l'air : soit sous forme d'air comprimé soufflé, soit par aspiration. Dans ce 2e cas, s'il s'agit d'usinage créant de la poudre ou des copeaux très petits, on a l'avantage de les récupérer dès leur formation par l'usinage.

1) Usinage des composites: **Spécificités à l'usinage**

Spécificités de comportement des composites (1)

Pour les **stratifiés en fibres de verre** : le verre est très abrasif.

Les carbures sont préférables et les outils diamantés sont quasiment indispensables.

Utilisation d'un **fluide de refroidissement** pour réduire l'usure et évacuer les fines particules de verre

Pour les **stratifiés en fibres de carbone** : les opérations d'usinage recommandées sont semblables à celles pour les composites verre-résine.

En raison du coût de ces produits, il est essentiel d'utiliser des outils bien affûtés qui assureront une meilleure qualité et éviteront des délaminages impliquant une baisse des performances du matériau. Les fibres de carbone usent moins vite les outils que les fibres de verre.

1) Usinage des composites: **Spécificités à l'usinage**

Spécificités de comportement des composites (2)

Pour les **stratifiés en fibres d'aramide** : la fibre d'aramide est difficile à couper car elle n'est pas fragile ou cassante. Elle « fuit » devant l'outil et il faut, soit la maintenir latéralement, soit donner des mouvements à l'outil pour agir par cisaillement pur, sinon de nombreuses fibres sont arrachées et laissent un aspect pelucheux. Des outils spécifiques « Kevlar » ont donc été développés.

Pour les **stratifiés cellulositiques** : les résines renforcées de fibres cellulositiques (bois, papier, coton) sont usinées à partir de demi-produits (plaque, tube...). Ce sont les stratifiés industriels: les placages pour mobilier de bureau, établi, mobilier de cuisine, etc. **Ils s'usinent facilement avec des outils conventionnels standards. L'usinage peut être fait sans liquide de refroidissement**, mais il est recommandé d'assurer dans tous les cas l'évacuation des copeaux à l'aide d'air comprimé. L'usinage détruit la peau recouvrant le matériau à la suite de la mise en oeuvre,

1) Usinage des composites: Usinage par enlèvement de copeaux

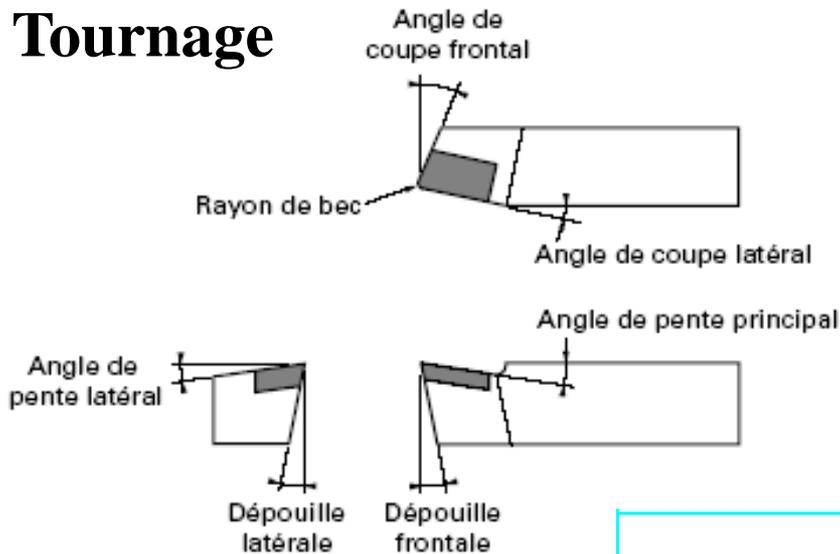
Cisailage, poinçonnage

Le cisailage et le poinçonnage, ou la découpe à l'emporte-pièce, sont applicables aux matériaux composites en épaisseur mince (jusqu'à 2,5 mm).

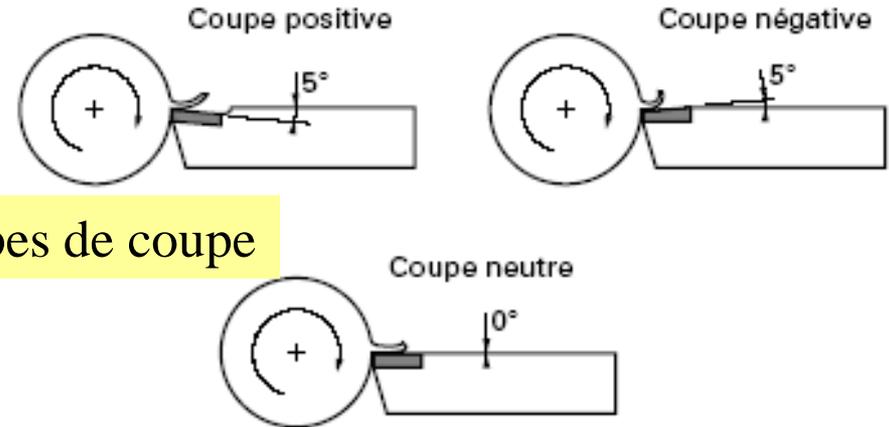
L'outil coupant doit être particulièrement bien affûté. Utiliser une cisaille du type « guillotine » à descente verticale avec lame supérieure en acier traité ayant une pente d'attaque d'environ 0,7 % par rapport à la lame inférieure, jeu réglé au minimum.

1) Usinage des composites: Usinage par enlèvement de copeaux

Tournage



Types de coupe



Géométrie type d'un outil de tournage

paramètres de tournage

Paramètre	Unité	Verre-résine	Aramide-résine	Stratifié cellulosique
Angle de dépouille	degré	10 à 15	5 à 7	15
Angle de coupe	degré	8 à 10	5 à 7	5
Profondeur de passe	mm		0,25 à 0,5	1 à 3
Avance	mm/tr	0,05 à 0,2	0,04 à 0,06	0,1 à 0,5
Vitesse de coupe	m/min	60 (acier rapide) à 200 (carbure)	75 à 150	10 à 100 (500 carbure)

1) Usinage des composites: Usinage par enlèvement de copeaux

Fraisage

On pourrait considérer qu'une fraise est constituée de plusieurs outils de tour fixés sur le bord d'un disque métallique. Au lieu de faire tourner la pièce devant un outil, on fait tourner le disque.

Les paramètres sont les suivants :

- géométrie des arêtes de coupe (ou dents) ;
- nombre de dents de la fraise ;
- vitesse linéaire de coupe ;
- avance : déplacement relatif de la pièce par rapport à la fraise ;
- profondeur de passe : épaisseur de matière enlevée
- sens de fraisage : normal ou « en avalant ».

1) Usinage des composites: **Usinage par enlèvement de copeaux**

Fraisage de stratifié verre-résine

Paramètre	Unité	Valeur
Angle de dépouille	degré	12 à 15
Angle de coupe	degré	7 à 10
Avance	mm/tr	0,01 à 0,03
Vitesse de coupe	m/min	60 (acier rapide) à 200 (carbure) et 1 500 (diamanté 40)

paramètres de fraisage pour verre-résine

1) Usinage des composites: **Usinage par enlèvement de copeaux**

Fraisage de stratifié aramide-résine

Le fraisage est déconseillé, les bords de coupe obtenus sont pelucheux avec les outils traditionnels sauf avec des outils spéciaux

Fraisage de stratifié cellulosique

Il est conseillé d'utiliser **des fraises à grosse denture en acier rapide**, avec des angles de coupe et de dépouille d'environ 5 à 15°, une avance de 1 à 3 mm par tour, une vitesse de coupe de 50 à 300 m/min. Pour le surfacage, des vitesses supérieures, 1 000 à 1 500 m/min, sont nécessaires.

1) Usinage des composites: **Usinage par enlèvement de copeaux**

Perçage et alésage:

Pour les matériaux composites, il faut utiliser les

- foret cylindrique diamanté ;
- foret avec pointe de centrage (de principe similaire à la mèche à bois).

Pour des profondeurs de perçage supérieures à 5 fois le diamètre, il faut retirer le foret plusieurs fois du trou pour bien dégager le copeau.

Pour le perçage de grands diamètres, il est préférable de procéder en plusieurs étapes

Le perçage de trous profonds s'accompagne d'une accumulation de chaleur. Il est recommandé de refroidir le foret par soufflage d'air comprimé

1) Usinage des composites: **Usinage par enlèvement de copeaux**

Perçage et alésage: Perçage de stratifié verre-résine

Paramètre	Unité	Verre-résine	Carbone-résine		Cellulosique
			Foret carbure	Trépan diamanté	
Angle de coupe	degré	8 à 10			4 à 8
Angle d'hélice	degré	25			10
Angle de pointe	degré	120	118		70 à 120
Avance	mm/tr	≤ 0,2	≤ 0,03	0,01 à 0,05	0,2 à 0,5
Vitesse de coupe	m/min	60 à 70	15 à 20	50 à 70	30 à 80

Paramètres de perçage des stratifiés

1) Usinage des composites: **Usinage par enlèvement de copeaux**

Autres procédés (1):

Les opérations de **filetage** et de **taroudage** sont déconseillées dans les matériaux composites.

le limage ou le rabotage → de bons résultats ont été obtenus avec des limes à taille grossière ou des râpes à bois. Le rabotage peut se faire avec les outils usuels pour le travail du bois (riflard et guillaume, outils bien connus des menuisiers) et sur les types classiques de machines à dresser et de raboteuses à cylindres.

Les opérations de **sablage ou ponçage** détruisent la peau superficielle, à l'aspect souvent brillant, du composite et donne un aspect de surface mat et, parfois peu esthétique.

1) Usinage des composites: **Usinage par enlèvement de copeaux**

Autres procédés (2):

Dans le cas d'une pièce en matériau composite à fibres longues (stratifié), l'usinage met les fibres à nu, or le **polissage** ne peut se faire que sur la résine. Il est donc nécessaire de réimprégner la surface usinée d'une mince couche de résine (0,2 à 0,3 mm environ) et de pratiquer le polissage sur cette couche de résine après l'avoir rectifiée pour assurer sa planéité.

Seul le polissage mécanique est applicable.

1) Usinage des composites: Découpe des matières premières

Nappes de fibres

La découpe de tissu préimprégné peut être faite à l'aide de ciseaux classiques, d'une lame coupante (type « cutter »), d'une scie sauteuse ou à l'emporte-pièce.

Renfort	Nombre de plis	Épaisseur lame mm	Vitesse coups/min	Avance m/min
Verre	1	6,5	5 300	15
	4	6,5	3 100	15
Carbone	1	6,5	5 000	23
	5	6,5	5 000	23
	13	6,5	5 500	15
	21	6,5	5 500	15
Aramide	1	6,5	3 700	15
	6	6,5	500	15

Découpe de préimprégné résine-fibres à la scie sauteuse 22

1) Usinage des composites: Découpe des matières premières

Mousses plastiques

les matériaux alvéolaires, très peu denses (10 à 100 kg/m³) se découpent et s'usinent facilement, avec des outils de type «menuiserie». L'un des inconvénients de la découpe de mousses à grande cadence est la gêne causée par les particules de matières qui se «collent» sur les surfaces métalliques par phénomène électrostatique.

- Il faut isoler la zone d'usinage de mousse du reste de l'atelier et à bien protéger l'opérateur.
- Il y a une dégradation très locale du matériau par échauffement, donnant lieu à l'émanation de gaz toxiques

1) Usinage des composites: Découpe des matières premières

Nids-d'abeilles

La difficulté est la faiblesse de rigidité en flexion locale des parois des alvéoles.

dans le cadre d'une opération de fraisage, il faut choisir des vitesses rapides pour découper la paroi plutôt que de l'arracher.

Les paramètres seront adaptés à la nature du matériau constituant le nid-d'abeilles. On trouve dans le commerce, des nids-d'abeilles métalliques (alliage d'aluminium, acier...), plastiques (polypropylène...), en papier Kraft, en papier Nomex, etc.

1) Usinage des composites: Usinage des structures sandwich

* couper le stratifié de la peau (fibres et résine) et la mousse plastique ou le nid-d'abeilles métallique et le panneau de bois, en même temps.

•L'opération la plus fréquente est le **perçage**

→ conserve le même outil pour la peau stratifiée et l'âme alvéolaire, avec des efforts ou des vitesses et avances différentes,

→ ou bien changer de foret.

Au débouché de la 2e peau, il faut ne pas délaminer la peau, soit en soutenant la face arrière sur un support, soit en contreperçant à partir de la face arrière.

Pour un **fraisage** ou un **détourage**, le même outil doit usiner les deux types de matériaux en même temps qui donne un usinage grossier. Il est nécessaire de procéder à une finition pour rendre plus esthétique le bord de coupe si besoin.

1) Usinage des composites: Découpe au laser

Principe

- action thermique qui vaporise la matière.
- Entre la zone « vaporisée » et la zone restée « froide », il y a une zone affectée thermiquement (ZAT). Dans cette ZAT, il peut y avoir une carbonisation partielle de la matière sur les bords de découpe.

La puissance minimale est d'environ **250 W**. La projection d'un gaz d'appoint refroidit la pièce et permet d'obtenir des profils de coupe plus soignés et non oxydés.

La norme NF C 43-801 établit la classification des lasers en **5** catégories correspondant à des classes de risques. Ceux utilisés pour la découpe sont de la classe **4**.

1) Usinage des composites: Découpe au laser

Paramètres (1)

De nombreux matériaux peuvent être découpés par laser et les réglages sont faits vs. de la réflexion du matériau, de la conductibilité et de la diffusion thermique, en particulier.

Stratifié en résine époxyde	Épaisseur mm	Puissance kW	Vitesse m/min
Fibres de verre	6,6	1,1	1,90
	6,35	5	7,87
	6,35	1	2,54
	6,35	5	5,08
Fibres de carbone	0,25	1,2	33,02
	0,25	1,2	15,24
	0,127	1,2	76,2
	0,50	1,2	25,4
Fibres d'aramide	0,9	0,25	3,75
Carbone/aramide	1,6	0,25	0,75
Aramide	3	3	3,0
Carbone	1,7	8	3,0
	5	8	0,76

Découpe au laser CO₂

1) Usinage des composites: Découpe au laser

Paramètres (2)

Renfort	Nombre de plis	Avance m/min	Pression du gaz
Verre	1	7,5	0,5 bar d'azote pour éviter l'oxydation
	2	3,8	
	4	1,5	
Carbone	1	7,5	
	2	3,8	
	3	2,3	
Aramide	1	7,5	
	2	7,5	
	8	2,5	

**Découpe de tissus préimprégnés époxydes par laser CO₂
(250 W, focale : 63 mm, buse $\phi=0,8$ mm)**

1) Usinage des composites: **Usinage par jet d'eau**

Principe (1)

La principale caractéristique est **qu'il assure une découpe à froid, sans endommagement ni déformation thermiques du matériau.**

La technique utilise l'action mécanique d'un jet fin de liquide à forte pression et grande vitesse. Le matériau est découpé par dépassement de sa limite élastique.

Le procédé ne permet que **la découpe et le perçage**. La machine de découpe au jet d'eau se compose de:

- un multiplicateur hydraulique de pression d'eau;
- une conduite de distribution à très haute pression ;
- une (ou plusieurs) tête(s) de travail comportant une buse ;
- un dispositif de récupération et de traitement de l'eau après découpe.

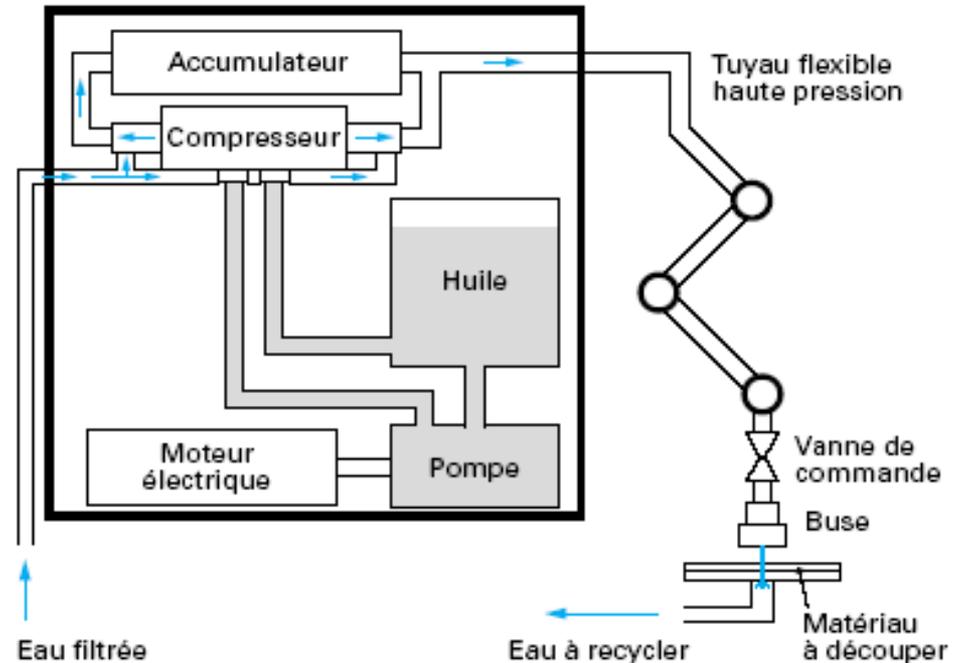
1) Usinage des composites: **Usinage par jet d'eau**

Principe (2)

La pression est générée par un système à deux étages :

— **étage moyenne pression** oléohydraulique dont l'huile est à 100 à 200 bar et agit sur une grande section du piston (puissance 30 à 75 kW) ;

— **étage haute pression** avec vérin double effet pour générer la pression voulue. Un rapport de surface de 40 avec une pression d'huile de 100 bar génère une pression d'eau de 4 000 bar (La compressibilité de l'eau atteint environ 15 %).



Principe du jet d'eau haute pression

1) Usinage des composites: **Usinage par jet d'eau**

Principe (3)

La buse focalise le jet sur la pièce à découper. **La jet est de 0,1 à 0,3 mm, le débit est faible (quelques L/min).**

Selon l'utilisation d'eau pure ou chargée, les paramètres typiques sont — **découpe à l'eau pure ou chargée de polymères**: 2 500 à 4 000 bar (vitesse de sortie de buse supersonique puisque généralement $>$ à 900 m/s), distance buse-pièce : 5 à 10 mm (jusqu'à 80 mm pour les matériaux fibreux), diamètre de buse : 0,1 à 0,3 mm ;

— **découpe à l'abrasif** : 2 000 à 3 000 bar, diamètre de buse : 0,2 à 0,5 mm, distance buse-pièce : 2 à 10 mm, abrasif du type grenat ou olivine à 300 g/min et de granulométrie 0,1 à 0,5 mm.

1) Usinage des composites: Usinage par jet d'eau

Principe (4)

Influence des paramètres de coupe

Paramètre	Vitesse	Largeur de coupe	Rugosité des bords de coupe	Mouillage
Jet d'eau pure				
Pression ↗	↗		↘	
∅ buse ↗	↗	↗		
Distance buse-pièce pour matériaux durs ↗		↗	↘	↗
Vitesse de coupe ↗			↗	↘
Jet d'eau + abrasifs				
Pression ↗	↗		↘	↘
∅ buse saphir ↗	↗		↘	
∅ canon ↗	↘	↗	↗	
Granulométrie abrasif ↗	↗			↘
Débit abrasif ↗	↗	↗	↘	
Distance canon-pièce ↗	↘	↗		
Vitesse de coupe ↗		↘		↗

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Encadré A – Avantages et inconvénients du collage

Avantages

- pas d'affaiblissement des pièces (bonne répartition des contraintes, pas de trou à percer) ;
- protection des tranches des pièces et des fibres, étanchéité ;
- assemblages légers ;
- possibilité d'assembler des matériaux différents (métal sur composites), des pièces très minces ;
- excellente résistance à la fatigue ;
- esthétique, surfaces lisses ;
- pas de risques de corrosion ;
- le collage peut être à volonté souple ou rigide, selon les formulations et les exigences.

Inconvénients

- pas de possibilité de démontage ;
- la technique du collage n'est pas encore bien connue dans les diverses industries ;
- les pièces doivent être conçues spécialement pour le collage ;
- le joint d'adhésif peut être sérieusement dégradé par l'environnement : eau, humidité, chaleur, huiles... ;
- la tenue à la chaleur est limitée à 100 à 250 °C selon les types d'adhésifs (§ 4.3.2) ;
- le collage exige une très bonne préparation de surface ;
- le contrôle non destructif des assemblages nécessite un équipement sophistiqué.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Matériaux à coller (1)

— des peaux de panneaux-sandwichs qui peuvent être :

- en tôles d'aluminium ou d'alliages,
- en stratifiés thermodurcissables (polyester-verre ou graphite-époxyde ou autre phénolique-verre pour avoir une résistance élevée au feu),
- en composites thermoplastiques, plus rarement ;

— des nids d'abeilles divers : aluminium, Nomex (à base de fibres aramides ou Kevlar) ;

— des pièces composites de formes courbes, raidisseurs, profilés pultrudés, réalisés à partir de préimprégnés thermodurcissables, qui doivent être collés ou stratifiés par cocuisson (cuisson simultanée de la résine, du composite et de l'adhésif). Il s'agit de collages composite sur composite ;

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Matériaux à coller (2)

- des pièces composites réalisées avec des polymères thermoplastiques (PE, PP, nylon, polycarbonates, PPS, PEEK...) par exemple en mécanique, électroménager... ;
- des pièces métalliques (cadres, attaches, charnières, inserts, renforts) à coller sur les pièces en composites (en alliages Al, en titane, en acier, en laiton ou duralumin pour les inserts);
- des panneaux-sandwichs à assembler et coller sur eux mêmes, sur des raidisseurs ou sur des cadres ;
- éventuellement on peut coller des composites sur bois dans le bâtiment ou en ameublement, sur béton dans le bâtiment..., sur des hublots en verre ou plastique transparent pour la fabrication de hublots des peaux en composites sur mousses isolantes.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Préparation des surfaces -Élimination des produits de démoulage

Lors de la fabrication des pièces en composites, un agent de démoulage a été utilisé pour faciliter le démoulage. Cet agent est un produit antiadhérent (silicone, stéarate ou autre) qui doit être éliminé complètement sur la zone à coller. Certains produits de démoulage sont incorporés dans la masse de la formule et sont plus difficiles à éliminer.

Pour éliminer les produits de démoulage superficiels, on utilise

- soit des produits détergents puis réaliser un rinçage très soigné
- soit un nettoyage aux solvants (alcool, méthyl-éthyl cétone, solvants de nettoyage chlorés). Le solvant utilisé ne doit pas attaquer le polymère utilisé comme matrice.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Préparation des surfaces - Abrasion

Afin de rendre la surface rugueuse et plus facile à mouiller par l'adhésif, et d'éliminer la couche superficielle qui contient l'agent de démoulage, on procédera à une abrasion de la surface avec **un papier abrasif** dont le grain ne doit pas être trop gros car il ne faut pas aller en profondeur jusqu'aux fibres de renfort.

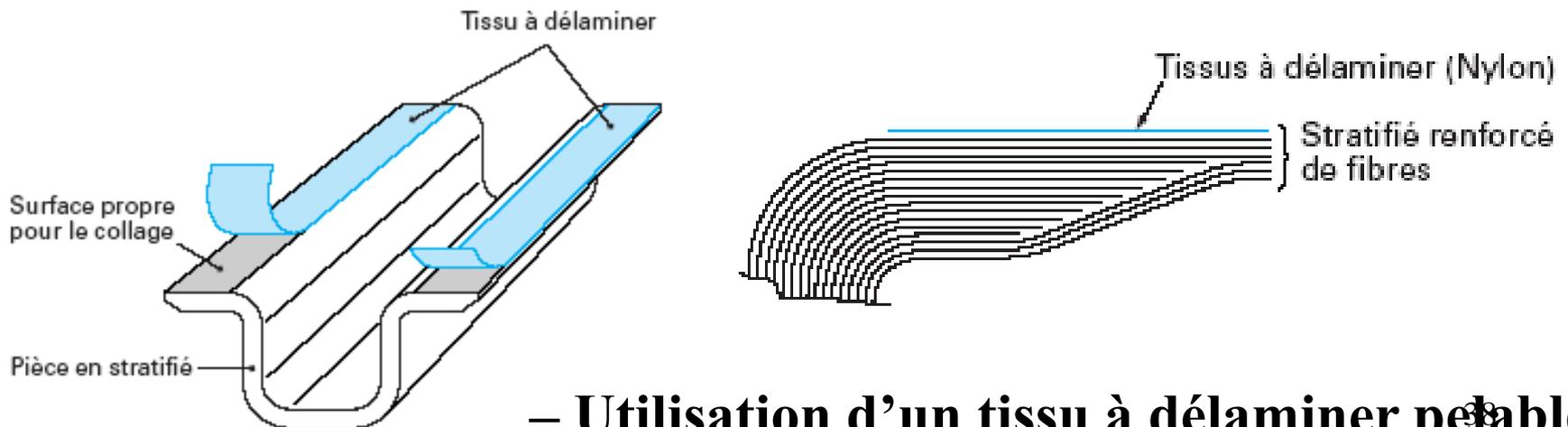
On peut utiliser **un tampon abrasif** (utilisé pour le récurage par exemple), éventuellement imprégné d'un détergent léger pour éliminer les produits de démoulage.

Après abrasion, on doit dépoussiérer et nettoyer soigneusement la surface avec un solvant adapté

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Préparation des surfaces - Système « *Tear ply* » (ou tissu de délamination)

Le système peut être utilisé pour obtenir une surface propre. Ce système consiste à appliquer lors de la fabrication du composite, une feuille de Dacron ou autre textile à la surface externe, dans la couche superficielle de résine. Lorsque l'on doit procéder au collage, il suffit de peler cette feuille pour trouver en dessous un matériau propre, dépourvu de toute pollution ou agent de démoulage.



– Utilisation d'un tissu à délaminer pelable

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Préparation des surfaces - Traitements de surface

Après ces préparations (élimination des produits de démoulage, abrasion), il faut distinguer

-le cas des composites à matrice TD, qui peuvent être facilement collés avec des adhésifs époxydes, méthacryliques ou polyuréthanes et surtout avec des adhésifs de même nature que la résine utilisée comme matrice,

-le cas des composites à matrice TP qui nécessiteront en général un traitement de surface spécialement adapté pour pouvoir obtenir une bonne adhérence (**Traitements physiques, Traitements chimiques**)

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Polymères	Préparations (1)										
	Aucune	Nettoyage	Abrasion	Traitements de surface							
				Plasma		Flamme	Silination	Sulfo-chromique	Sodium naphthalénide	Acide sulfonique de toluène	Résorcinol
				Pression ambiante	Faible pression						
Acrylonitrile - butadiène - styrène (ABS)	●	●	●					●			
Matières plastiques et composites à base de résine époxydique	●	●	●								
Matières plastiques à base de mélamine et d'urée	●	●	●	●	●						
Matières plastiques et composites à base de phénol	●	●	●								
Polyacétal	●	●	●	●	●			●		●	
Polybutylènetéréphtalate (PBT)		●	●	●	●		●				
Polycarbonate (PC)	●	●	●	●	●						
Polyester thermodurcissable		●	●								
PET : polyester thermoplastique				●	●	●					
Polyétheréthercétone				●	●						
Polyéthylène (PE)				●	●	●	●	●	●	●	
Polyimide				●	●						
Polyamide (PA)	●	●	●	●							●
Oxyde de polyphénylène	●	●	●	●	●						
Polypropylène				●	●	●	●	●	●		
Polysulfone	●	●	●	●	●						
Polytétrafluoroéthylène				●	●				●		
Polyuréthane (PU)	●	●	●	●	●						

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Conception, calcul et dimensionnement des joints collés →

Réduction des tensions dans le joint collé (1):

les tensions dans un joint de composites collé peuvent être réduites par les moyens suivants :

- utilisation de deux **matériaux identiques** ;
- **rigidité élevée des matériaux**, qui fait diminuer les efforts de pelage aux bords du joint ;
- **recouvrement des pièces aussi grand que possible**

l'augmentation de la longueur de recouvrement fait abaisser la contrainte de cisaillement moyenne et fait augmenter la résistance totale, au-delà d'une valeur limite les phénomènes de concentration des contraintes aux extrémités deviennent prépondérants (avec un minimum au centre du recouvrement très faible) déterminant la résistance maximale et la longueur optimale du joint;

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Conception, calcul et dimensionnement des joints collés →

Réduction des tensions dans le joint collé (2):

- utilisation d'un **adhésif présentant un module d'élasticité le plus faible possible**, le travail d'adhésion est plus important pour un adhésif élastique présentant une force d'arrachement moyenne que pour un adhésif très rigide présentant une force d'arrachement beaucoup plus élevée ;
- **composite le plus homogène possible, présentant de nombreux plis et fibres du pli en contact avec l'adhésif alignées parallèlement aux sollicitations mécaniques** (si les fibres sont perpendiculaires au sens des efforts, on risque une rupture par arrachement de la première couche du stratifié). Dans le cas de tissus de renfort croisés les deux nappes de fibres sont liées ensemble et cet arrachement ne peut pas se produire.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs structuraux → mise en œuvre:

Viscosité et rhéologie

La **viscosité et la rhéologie** de l'adhésif influent directement sur la méthode d'application. L'application par buse sous pression, sous forme de cordons, nécessite une viscosité de l'ordre de **30 à 80 Pa · s**, et une consistance thixotropique si l'on doit appliquer l'adhésif sur surfaces verticales sans risque de coulure.

L'application au robot exige un adhésif de thixotropie appropriée afin de pouvoir adapter le débit dans les courbes et d'obtenir une coupure nette du dépôt, en fin d'application.

Pour les adhésifs en film, lors de la cuisson à chaud l'adhésif commence par se fluidifier et mouiller les matériaux (il monte par capillarité sur la paroi des cellules du nid d'abeilles par exemple), puis il gélifie et durcit sous l'action de la chaleur.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs structuraux → mise en œuvre:

Proportions de mélange pour les adhésifs à deux composants

Avec ces colles et adhésifs (colles à deux composants : époxydes, PU, thermodurcissables) on doit respecter les proportions de mélange indiquées et qui correspondent aux proportions nécessaires pour la réaction chimique. Ces proportions ne peuvent varier que de $\pm 5\%$ environ, le dosage peut être automatique, avec une pompe ou un système de dosage.

Durée pratique d'utilisation du mélange (DPU) ou « durée de vie en pot »

La durée de vie en pot dépend de la vitesse de prise/durcissement

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs structuraux → mise en œuvre:

Épaisseurs minimale et maximale du joint

Les adhésifs époxydes et méthacrylates peuvent remplir des joints d'épaisseur allant jusqu'à **1 ou 2 mm**, certains adhésifs polyuréthanes souples et polyesters sont même étudiés pour pouvoir remplir des joints de plusieurs millimètres d'épaisseur, nécessaires en particulier en construction navale.

Épaisseur de l'adhésif (mm)	Résistance au cisaillement (MPa)	Mode de rupture
0,5	7,0	dans le matériau collé
4,0	4,1	dans le matériau collé
5,0	4,0	dans le matériau collé

Influence de l'épaisseur d'un adhésif uréthane-acrylate

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs structuraux → mise en œuvre:

Conditions de durcissement

Trois facteurs interviennent dans le durcissement de l'adhésif :

— la température ; — la durée ; — la pression.

* Les adhésifs monocomposants durcissent à des T°C élevées, le plus souvent en 15 à 45 minutes,

* les adhésifs à deux composants peuvent durcir à T°C ambiante, en 12 à 24 heures. Certains composites ne supportent pas des T°C de cuisson élevées. C'est pourquoi on utilise des adhésifs bicomposants durcissant à T°C ambiante ou à T°C modérée.

On relève 2 étapes lors de la prise de la colle :

— durée de prise suffisante pour pouvoir manipuler et transporter;

— durée de prise complète, pour obtenir 90 ou 100 % des performances mécaniques, physiques et chimiques.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs structuraux → mécaniques

Adhérence

L'adhérence sur les matériaux composites dépend de plusieurs facteurs :

- les types d'adhésif.
- la nature de la résine utilisée comme matrice du composite,
- la préparation de surfaces.

Certains polymères sont très difficiles à coller, en particulier le polyéthylène et le polypropylène, et il est préférable, pour les assembler, de les souder (à la chaleur ou par friction) ou de les assembler mécaniquement. Leur collage exige des traitements de surface très actifs.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs structuraux → mécaniques

Adhérence

L'adhérence est mesurée selon diverses normes et tests.

Les résistances au cisaillement des adhésifs structuraux sur matériaux composites varient de 15 à 35 MPa pour les époxydes et de 10 à 25 MPa pour les polyuréthanes et acryliques.

Résistance en traction

On exerce une traction perpendiculaire au plan de collage. Il faut retenir que dans le cas des matériaux composites l'adhérence de la matrice polymère sur les fibres de renforcement peut aussi limiter la résistance mécanique en traction.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs structuraux → mécaniques

Adhérence - Résistance au pelage et au clivage (1)

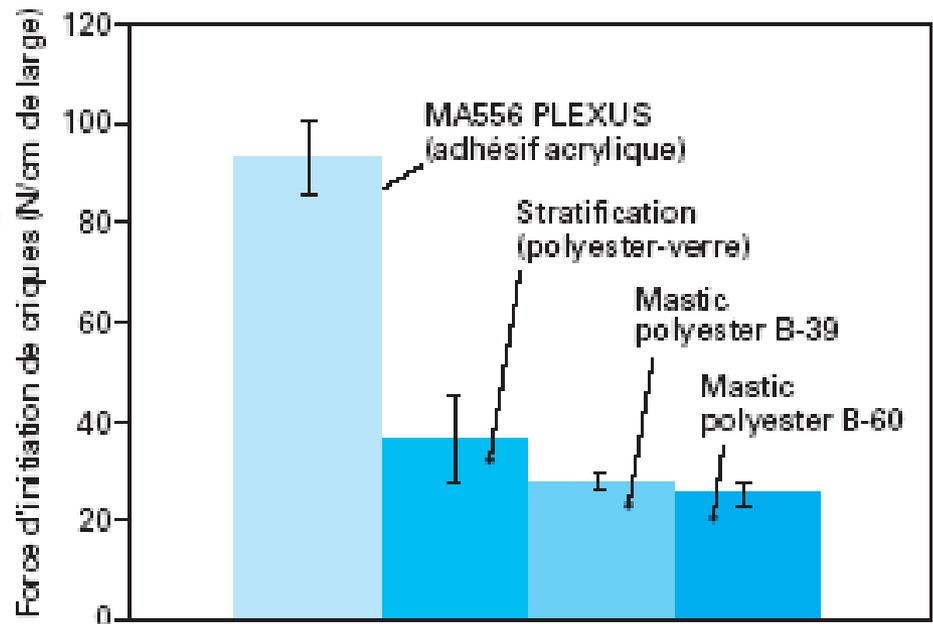
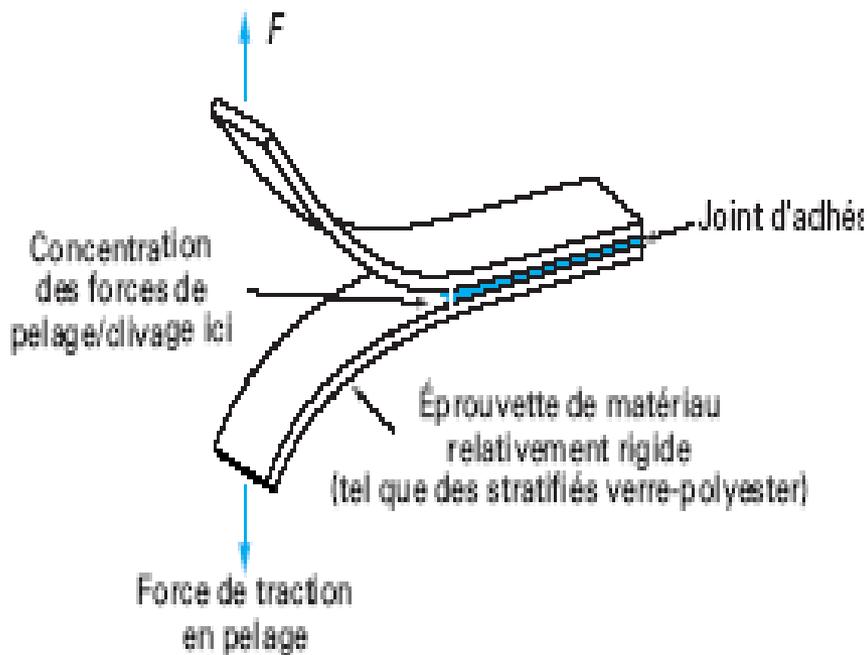
Les matériaux composites étant en général rigides, on ne peut pas réaliser un test de pelage classique comme avec des matériaux souples. Il faut donc adapter le test. La traction est réalisée sous une vitesse de séparation de 12,7 mm par minute, et on enregistre la force nécessaire pour séparer les deux pièces, sur une longueur de 50 mm (force initiale puis force de séparation moyenne).

Du fait des flexions alternées des pièces, il se produit souvent des efforts de pelage qui sont d'autant plus préjudiciables que l'adhésif est plus rigide, car alors les contraintes se concentrent sur la zone étroite soumise au pelage.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs structuraux → mécaniques

Adhérence - Résistance au pelage et au clivage (2)



Test de clivage-pelage en traction

Résultats d'essais de clivage-pelage (collages de stratifiés verre-PE)

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs structuraux → mécaniques

Module d'élasticité

Le module d'élasticité est déterminé à partir de la courbe σ/ε d'un adhésif dans un assemblage collé. Les adhésifs élastiques permettent d'assembler des matériaux de coefficients de dilatation différents, comme par exemple composite et métal.

Allongement à la rupture

L'allongement à la rupture est mesuré à partir de la courbe σ/ε d'un adhésif dans un assemblage collé. L'allongement à la rupture est bien plus élevé pour les adhésifs polyuréthanes et acryliques que pour les époxydes ou polyesters, rigides. Certains adhésifs PU ou acryliques tolèrent des allongements à la rupture de 10 à 100 % selon les formules, et les adhésifs époxydes ne tolèrent que 2 à 20 % d'allongement à la rupture.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

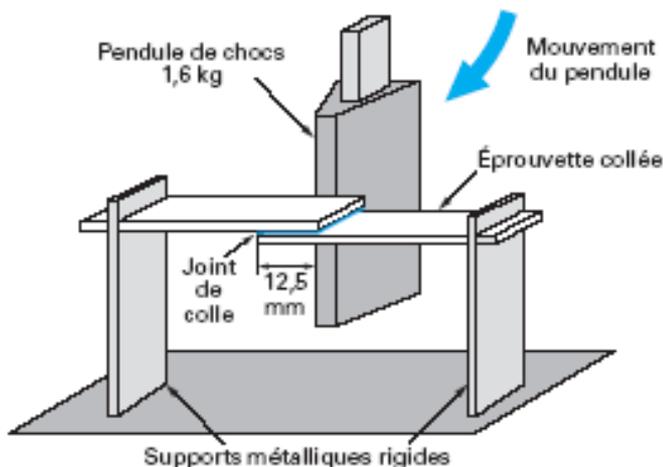
Caractéristiques des adhésifs structuraux → mécaniques

Résistance au choc

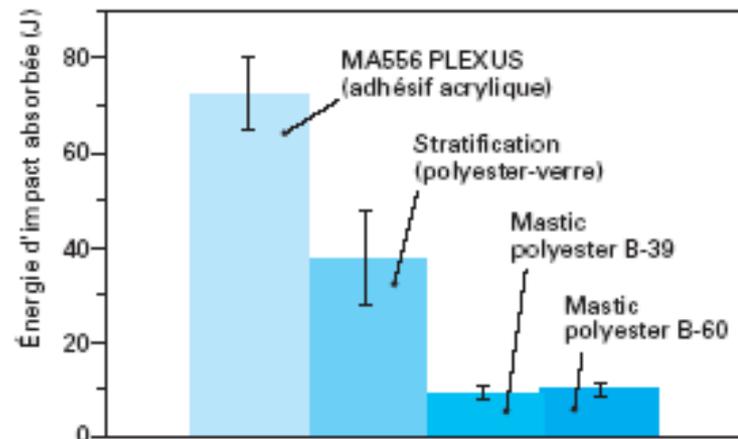
La résistance au choc peut être mesurée par différentes méthodes :

- test d'impact Izod permettant de mesurer l'énergie d'impact absorbée;
- test de tenue au choc par cisaillement.

Elle est importante en mécanique, en construction navale, dans les articles de sport, en construction automobile.



Ⓐ schéma du test izod (énergie d'impact absorbée en J)



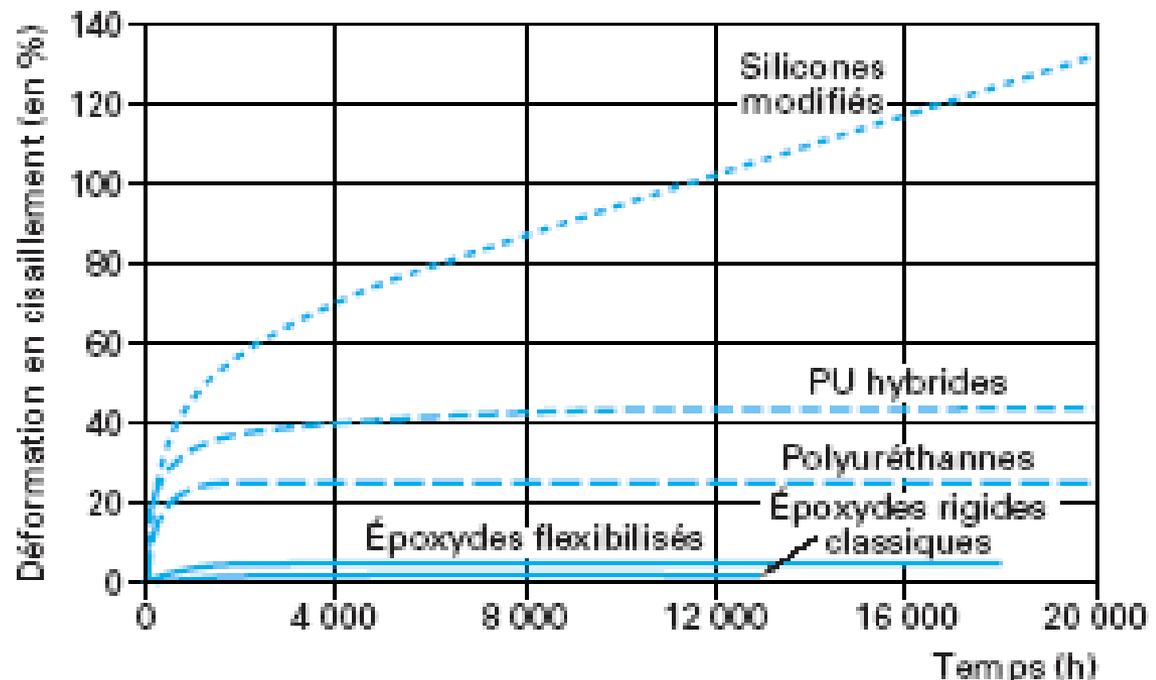
Ⓑ résultats d'essais d'impact par la méthode Izod

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs structuraux → mécaniques

Résistance au fluage

Lorsque les composites sont utilisés pour procurer une grande rigidité des pièces, ils doivent aussi être collés avec des adhésifs résistant au fluage. Les **adhésifs époxydes**, rigides, ne fluent pratiquement pas et c'est pourquoi ils sont préférés pour les applications en aéronautique, par exemple pour les surfaces de contrôle de vol (ailerons, gouvernails, *spoilers*) qui doivent être extrêmement rigides.



2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs structuraux → mécaniques

Résistance à la fatigue

Comparé aux autres fixations mécaniques, le collage présente une meilleure résistance à la fatigue, parce qu'il répartit mieux les contraintes. On soumet les éprouvettes de cisaillement par recouvrement à une charge égale à 50 % de la force de rupture en cisaillement sous une fréquence de 10 cycles par seconde, et l'on mesure le nombre de cycles nécessaires pour obtenir la rupture.

Les adhésifs époxydes, polyuréthanes structuraux et acryliques structuraux peuvent résister à 10^6 ou 10^7 cycles à 30 % de la charge de rupture.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs → physico-chimiques

Résistance à l'eau et à l'humidité

La résistance intrinsèque à l'eau est excellente pour les **adhésifs époxydes**, bonne pour les **PU et les acryliques structuraux**:

— pour le collage des **composites sur métaux**, il faut tenir compte de la préparation de surface des métaux, sinon une corrosion risque d'apparaître à terme à la surface du métal ;

— pour le collage **composite/composite**, il faut tenir compte de la résistance à l'eau du composite stratifié, car l'eau peut parfois cheminer entre les fibres et la matrice et dégrader l'adhérence de la matrice sur les fibres.

L'assemblage des coques de bateaux en polyester par stratification, avec des résines polyester, présente une excellente résistance à l'eau, de longue durée.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs → physico-chimiques

Résistance à la chaleur

La résistance à la chaleur → T°C maximale donnant 25 % de la résistance en traction-cisaillement à 25°C.

Les tenues à la chaleur des adhésifs époxydes pour composites sont similaires à celles des matrices époxydes de ces composites. En aéronautique, on distingue deux classes de résistance à la chaleur qui se distinguent par la T°C de cuisson :

- cuisson à 120°C et tenue à 70°C ;
- cuisson à 175°C et tenue à 120°C ;

et il existe des adhésifs spéciaux résistant à de plus haute T°C: les adhésifs thermostables (polyimides, bismaléimides) mais beaucoup plus onéreux, et qui sont utilisés pour coller des pièces elles-mêmes en polyimides (qui peuvent résister jusqu'à 250 à 350°C selon les types) ou en métaux.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs → physico-chimiques

Résistance aux cycles de température et d'humidité

La résistance aux cycles de T°C et d'humidité est un critère important pour les avions qui subissent de très fortes variations de T°C (par exemple de + 30 à – 60°C) et d'humidité entre le sol et les altitudes de vol (air très sec en altitude), ce qui entraîne de plus des variations dimensionnelles qui viennent s'ajouter aux sollicitations climatiques. C'est aussi important pour les pièces mécaniques collées.

La norme ISO 14-615 décrit une méthode permettant d'évaluer la résistance aux cycles de température et d'humidité des assemblages collés.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs → physico-chimiques

Résistance aux produits chimiques

Dans certains cas (matériel industriel et génie chimique, réservoirs de carburants...) les adhésifs doivent résister à certains produits chimiques.

Les adhésifs pour construction navale doivent, quant à eux, résister à une immersion de longue durée dans l'eau de mer (salée).

De façon générale, les **adhésifs époxydes** sont ceux qui présentent les meilleures caractéristiques de résistance aux produits chimiques.

Pour l'assemblage par stratification, on utilise surtout les résines vinylester, qui servent aussi à fabriquer les pièces résistant à la corrosion et aux produits chimiques.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Caractéristiques des adhésifs → physico-chimiques

Résistance au vieillissement et durabilité

Bien souvent plusieurs types de sollicitations (mécaniques, physiques...) s'additionnent, ce qui est plus sévère.

En combinant les diverses sollicitations (mécaniques, physiques et chimiques) prévues, on peut réaliser des essais complexes de durabilité, avec des équipements de laboratoire spécialement conçus pour cela : *Weather-o-meter*, enceintes climatiques diverses, avec réglage des températures, aspersion d'eau et de produits chimiques, variations de température, rayons UV, etc.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Époxydes et époxydes modifiés

Composition chimique

Il y a des dizaines voire centaines de produits différents, et tous les matériaux peuvent être collés avec des époxydes. On peut distinguer

- les adhésifs époxydes durcissant à chaud ;
- les adhésifs époxydes à deux composants ;
- les adhésifs époxydes spéciaux et alliages de polymères ;
- les époxydes dits flexibilisés (*toughened epoxies*) ;
- les époxydes conducteurs, allégés...

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → **Époxydes et époxydes modifiés**

Composition chimique

Les **adhésifs époxydes à un composant, qui durcissent à chaud** (entre 130 et 180°C) en 20 à 60 minutes, sont assez performants et utilisés pour le collage de grandes pièces, en **aéronautique et automobile**. Leur durée de durcissement est suffisamment courte pour pouvoir les utiliser sur chaînes.

Ils peuvent se présenter sous forme de **pâtes** et de **films solides sur support**. Des films permettent de calibrer précisément l'épaisseur du joint collé ; Ils sont très utilisée en aéronautique. Ces films doivent le plus souvent être conservés à basses températures (de -10 à -20°C) et ils ne se conservent que quelques mois. Leur prix est assez élevé pour les films.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Époxydes et époxydes modifiés

Utilisations

Les adhésifs époxydes peuvent coller tous les matériaux :

- composites TD avec matrices époxydes ou polyester ;
- certains composites thermoplastiques ;
- les métaux et presque tous les autres matériaux : plastiques, verre, bois, céramiques.

Ils sont compatibles avec les composites à matrices époxydes.

Une seule impossibilité : ils ne peuvent pas donner des joints élastiques: des joints souples ou pour le collage du caoutchouc.

Ils présentent des caractéristiques mécaniques et chimiques élevées, avec un grand choix de caractéristiques et de possibilités

Ce sont les principaux adhésifs utilisés pour les **panneaux sandwichs en aéronautique.**

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Polyuréthanes (1)

Il présente de nombreuses possibilités et caractéristiques différentes, grâce à une chimie très riche, avec des molécules et durcisseurs différents, et qui est **très utilisée pour le collage des composites et des plastiques**. Ces adhésifs peuvent être **souples ou rigides**.

Ils sont moins performants sur le plan de la résistance mécanique que les adhésifs époxydes. On peut distinguer plusieurs types d'adhésifs polyuréthanes (PU):

- les PU à deux composants ;
- les PU monocomposants ;
- les PU thermofusibles ;
- les mastics d'étanchéité PU souples.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Polyuréthanes (2)

Les **PU à deux composants**, souples ou rigides, se caractérisent par :

- des résistances au cisaillement: entre 5 à 20 MPa pour les types rigides ;
- des résistances au pelage meilleures que les adhésifs époxydes ;
- des tenues à la chaleur de l'ordre de **80 à 100°C**.

Les **adhésifs PU thermofusibles** sont appliqués d'abord comme des thermofusibles à une température de **100 à 130°C**, puis réticulent et durcissent à la chaleur et sous l'action de l'humidité ambiante : c'est un système mixte très intéressant, qui donne des collages semi-structuraux, et qui est plutôt utilisé dans le collage du bois, du meuble et des plastiques.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Polyuréthanes (3)

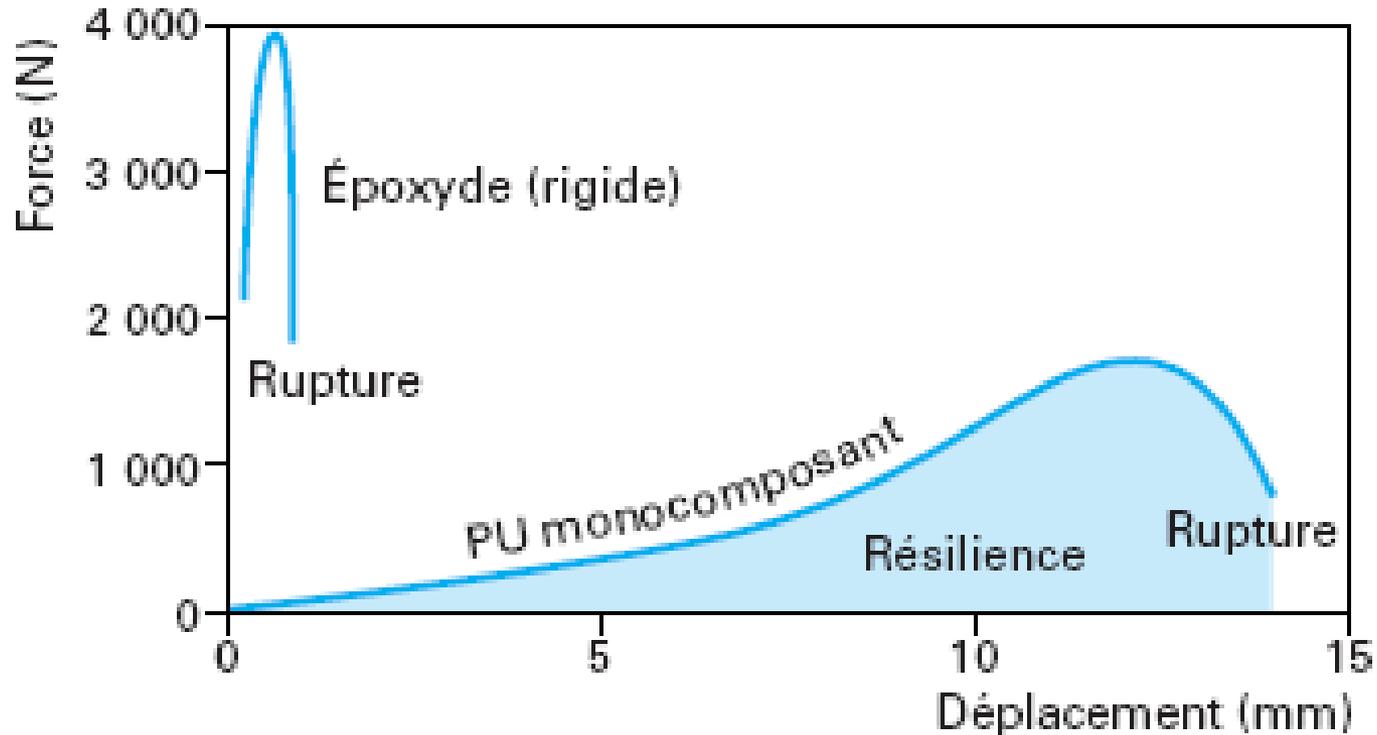
Les **PU monocomposants** réticulent soit par action de l'humidité de l'air ambiant, soit par la chaleur. Ils sont souples ou rigides. Ils sont souvent utilisés comme mastics d'étanchéité mais également pour réaliser des **collages souples**.

Au bout d'un certain temps après l'application, il se forme une peau de surface et il est trop tard pour assembler les pièces.

C'est ce que l'on appelle temps ouvert. Un catalyseur (« *booster* ») peut être injecté au moment de l'application dans la buse d'injection afin d'accélérer le durcissement de l'adhésif PU monocomposant.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Collage souple avec les PU



Surface collée : 25 x 10 mm²

Épaisseur d'adhésif :

- époxydes : 0,5 mm

- polyuréthane : 3 mm

Courbes tension/allongement

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Adhésifs acryliques à un et deux composants et méthacrylates (1)

Les adhésifs acryliques à deux composants et méthacrylates sont très intéressants pour coller les composites car ils donnent des joints souples, avec des résistances au cisaillement et au pelage élevées, et les deux composants n'ont pas besoin d'être mélangés intimement : il suffit par exemple d'appliquer la résine acrylique sur l'un des supports (A) et le catalyseur (en quantités 20 fois plus faible) sur l'autre support ; en pressant ensemble les deux supports, le catalyseur diffuse dans la partie A, et provoque le durcissement rapide et sur une période de temps courte (quelques minutes) à 20°C.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Adhésifs acryliques à un et deux composants et méthacrylates (2)

On distingue plusieurs types d'adhésifs acryliques bicomposants et méthacrylates :

- les adhésifs acryliques à deux composants classiques ;
- les adhésifs acryliques à deux composants résistant à basses T°C ;
- les adhésifs hybrides époxy-acryliques à deux composants ;
- les adhésifs acryliques réticulant aux UV ou à la lumière visible.

Les acryliques à deux composants résistant à basses T°C collent sur surfaces grasses et résistent à des T°C faibles (-25°C).

Les adhésifs **hybrides époxy-acryliques à deux composants** offrent une tenue à la chaleur sur une plage T°C comprise -25°C et 200°C .

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Adhésifs acryliques à un et deux composants et méthacrylates (3)

Les **acryliques à deux composants classiques** conviennent pour coller les matériaux composites (certains thermodurcissables et thermoplastiques), les métaux (acier, aluminium : avec une résistance au cisaillement 20 à 25 MPa), les plastiques (Nylon ou PVC sur acier par exemple avec une résistance au cisaillement de 20 MPa), le verre et le caoutchouc (caoutchouc sur acier par exemple avec une résistance au cisaillement de 5 MPa).

Leur prix est relativement élevé. La tenue à la chaleur peut atteindre jusqu'à 100 à 120°C. L'assemblage présente une résistance au pelage élevée (150 N pour une largeur de 25 mm) et une bonne résistance à l'impact (25 J dans le test d'impact ASTM).

Ces adhésifs sont souvent utilisés en construction navale.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

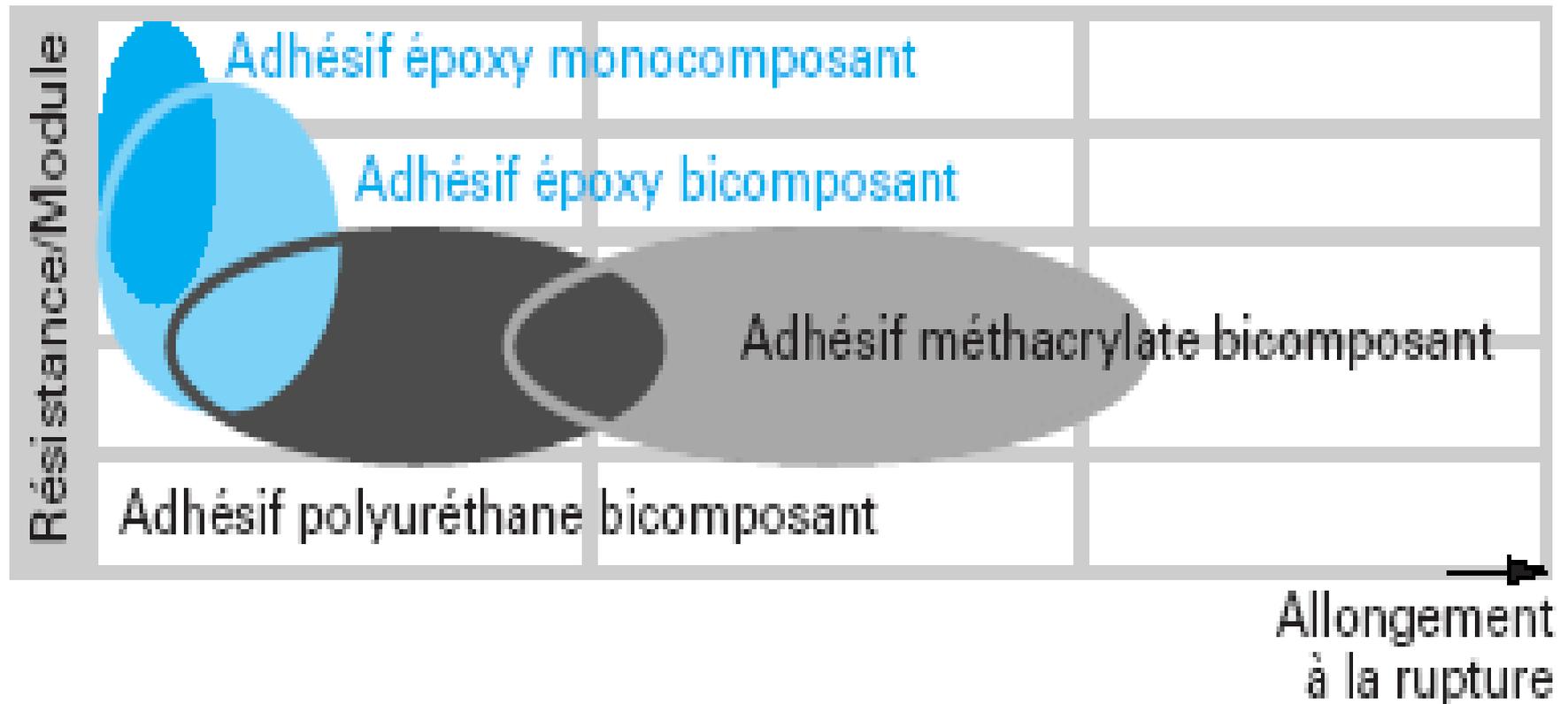
Différents types d'adhésifs → Adhésifs acryliques à un et deux composants et méthacrylates (4)

Les adhésifs **acryliques réticulant aux UV ou à la lumière visible** sont des adhésifs à un seul composant. Ils sont utilisés pour le collage de verre ou des matériaux transparents car la lumière ou les UV doivent parvenir au niveau du film d'adhésif. Ils sont utilisés pour durcir des adhésifs et pâtes composites de reconstitution dentaire : en dirigeant le faisceau d'une lampe UV sur le produit on obtient son durcissement en une minute pour un meilleur confort du patient.

Les acryliques sont très stables aux UV, offrent une excellente résistance à la fatigue et adhèrent sur de nombreux matériau

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → **Comparaison entre les adhésifs époxydes, PU et méthacrylates:** les différences importantes entre époxydes, polyuréthanes et acryliques aux points de vue résistance au cisaillement, souplesse et allongement.



2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Adhésifs uréthane-acrylate (1)

Dans ces adhésifs, la partie uréthane est intégrée dans la chaîne polymère et apporte des propriétés d'adhésion et de flexibilité et la partie acrylate, avec l'agent de réticulation (styrène), apporte la dureté, la résistance mécanique élevée et la réticulation qui se fait sous l'action d'un catalyseur (dosé à 2 %). La résistance chimique est excellente. Les adhésifs uréthane-acrylate présentent une plus grande souplesse et une meilleure résistance aux chocs que les adhésifs polyesters.

Par **exemple**, l'adhésif **uréthane-acrylate** présente d'excellentes performances pour le collage de polyester renforcé par des fibres de verre (PRV) :

- résistance à la traction : 22 MPa; — module de traction : 500 MPa
- élongation à la rupture : 120 % ; — excellente adhérence sur PRV

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Adhésifs uréthane-acrylate (2)

Traitement de surface	Adhésif pour filet (Crestomer 1152 A pour filets)		Mastic de remplissage (Crestomer 1186 A)	
	Résistance mécanique (MPa)	Mode de rupture	Résistance mécanique (MPa)	Mode de rupture
Nettoyage à l'acétone	4,5	dans le bois	2,7	dans le bois
Abrasion humide + nettoyage à l'acétone	6,2	dans le bois et dans le PRV	3,5	dans le bois

Résistance mécanique de collages réalisés avec des adhésifs méthane-acrylates

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Adhésifs polyesters thermodurcissables

Ces adhésifs durcissent par addition à la résine polyester d'un durcisseur du type peroxyde (de benzoyle ou de méthyl éthyl cétone...). Le mélange des deux composants a une DPU courte 10 à 30 minutes et une durée de prise en gel (*gel time*) de l'ordre de 30 minutes. Ils sont surtout utilisés pour le collage de polyester thermodurcissable renforcé par fibres de verre (PRV).

On recense deux utilisations possibles :

- le collage PRV sur PRV avec une pâte polyester;
- l'assemblage par stratification de PRV.

Les adhésifs polyesters ont des caractéristiques physiques et chimiques identiques aux PRV. Ils résistent parfaitement à l'immersion de longue durée dans l'eau de mer.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Adhésifs polyesters thermodurcissables

Les caractéristiques physiques des assemblages collés sont :

- résistances au cisaillement de 6 à 12 MPa pour des collages PRV sur PRV ;
- modules de flexion de 2 à 3 GPa ;
- élongation à la rupture faible : 2 à 3 % ;
- ils sont rigides.

Étant rigides, ils sont de plus en plus remplacés par les adhésifs méthacryliques ou uréthanes-acrylates. Ces adhésifs polyesters sont très utilisés en construction navale où l'on doit assembler des pièces en PRV sur elles-mêmes. On assemble le pont sur la coque, des membrures sur la coque, ou les deux parties galbées d'un gouvernail. Ces produits adhésifs peuvent avoir une consistance de mastic qui leur permet de remplir des interstices de plusieurs millimètres d'épaisseur.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Adhésifs thermostables (1)

On appelle adhésifs thermostables des adhésifs qui résistent à des $T^{\circ}\text{C}$ plus élevées que les adhésifs classiques tels que les époxydes, polyuréthanes. Il existe quelques familles qui sont toutes des **polymères à noyaux aromatiques** : les **polyimides**, les **polybismaléimides**, les **polybenzimidazoles** et les **polyphénylquinoxalines**. Ces adhésifs présentent plusieurs **points communs** :

- ils résistent à des $T^{\circ}\text{C}$ de 250 à 500 $^{\circ}\text{C}$;
- ils sont toujours difficiles à mettre en oeuvre, car ils nécessitent des cuissons à $T^{\circ}\text{C}$ élevées (de 200 à 350 $^{\circ}\text{C}$) sous des pressions élevées sur une durée de une à plusieurs heures ;
- ils sont tous très chers, utilisés rarement et uniquement pour des utilisations de haute technologie que l'aéronautique, l'aérospatial et l'électronique ;

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Adhésifs thermostables (2)

Polyimides

Les adhésifs polyimides peuvent se présenter sous **différentes formes** — **en solution** dans des solvants forts. Ils sont utilisables pour la fabrication et le collage de pièces structurales d'avions (supersoniques) et en aérospatial pour le collage de métaux (titane) et de composites résistant à hautes températures (par exemple des nacelles de réacteurs, pièces de surface d'avions supersoniques, de fusées et lanceurs) ;

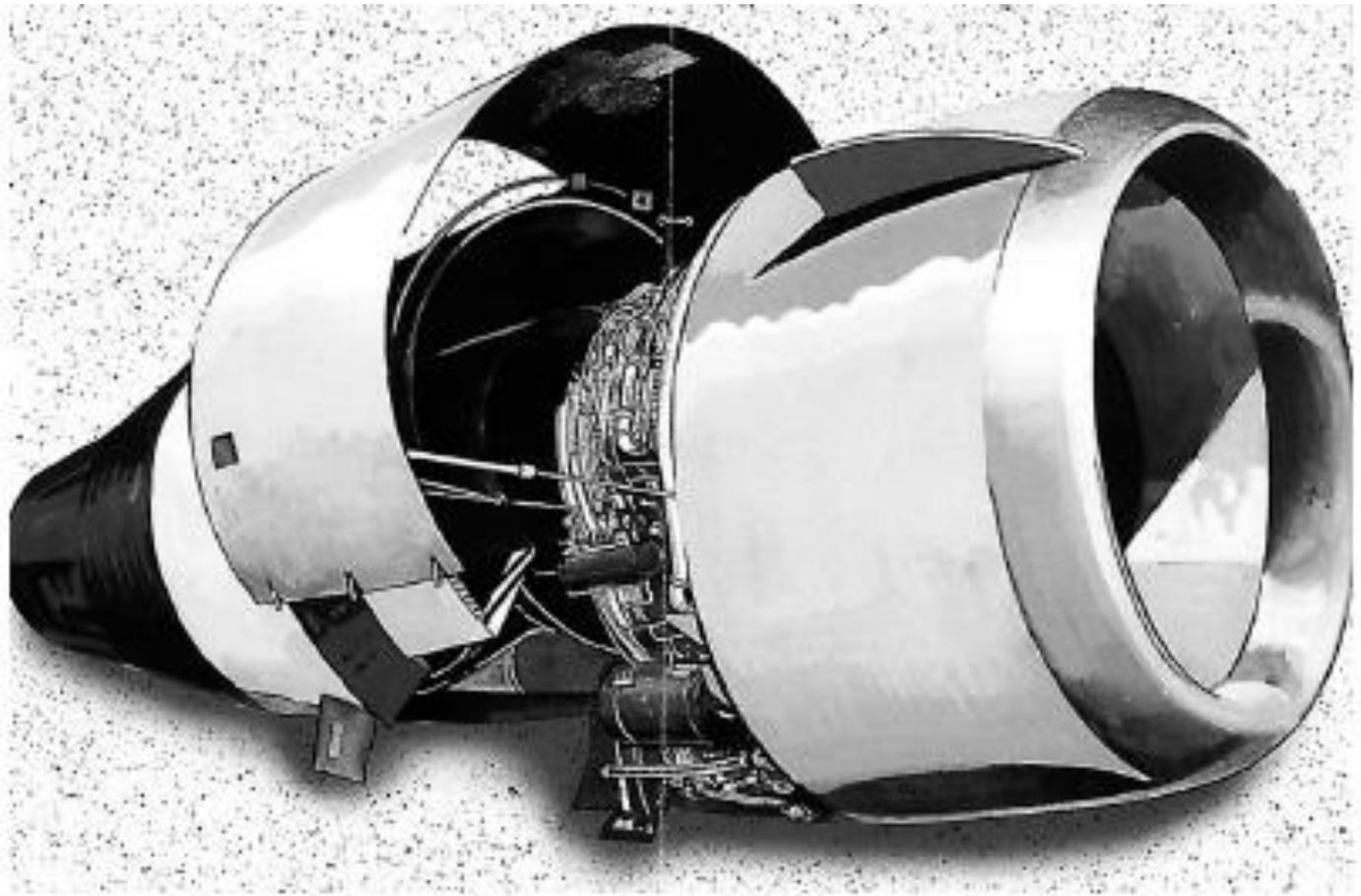
- sous forme de **films** en électronique ;
- polyimides **réticulables aux UV**.

Les adhésifs polyimides résistent à des températures de service de 250 à 300°C.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Adhésifs thermostables (3)

Polyimides



Panneaux de nacelles de réacteurs, collés avec des adhésifs PA

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Adhésifs thermostables (4)

Polybismaléimides

Ces adhésifs sont plus faciles d'emploi que les polyimides car ils réticulent par addition, sans dégagement de produits volatiles, en quelques heures à 175°C, leur tenue à la chaleur est inférieure (200 à 240°C). Ils sont rigides et présentent une faible résistance au pelage.

Polybenzimidazoles

Le principal intérêt des adhésifs polybenzimidazoles est leur résistance à la chaleur très élevée, puisqu'ils présentent encore une résistance au cisaillement de 18 MPa à une T°C de 350 à 370°C, avec aussi une résistance à très basses T°C (– 150°C).

Mais ils demandent une cuisson de plusieurs heures à 300°C sous une pression de 1,4 MPa, et ils donnent des films cassants avec une résistance au pelage assez faible. Ils sont donc uniquement utilisés pour l'aérospatial mais surtout pour l'aéronautique militaire.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Adhésifs thermostables (5)

Polyphénylquinoxalines

Les polyphénylquinoxalines sont utilisés comme des *Hot melts*. Il n'y a pas de réticulation lors de la formation du joint, qui est réalisé en 1 heure à 370°C sous une pression de 1,4 MPa, avec une montée progressive en T°C. La T°C de service peut atteindre 450°C. Ils sont très onéreux et n'ont presque pas de développement commercial actuellement.

Silicones

Souples après polymérisation, certains silicones résistent à des T°C de service de 300°C et sont utilisés pour l'étanchéité ou le collage de vitres de fours de cuisine ou de fers à repasser, ou pour l'étanchéité en construction aéronautique et aérospatiale. Par ailleurs des silicones classiques sont utilisés pour coller des vitrages (verre) sur composites en construction navale ou sur des panneaux latéraux en plastique₈₀ renforcé, d'autobus ou wagons de chemin de fer.

2) Collage des composites: Caractéristiques et choix des adhésifs

Différents types d'adhésifs → Adhésifs thermostables (6)

Phénoliques, nitrile-phénoliques

Les adhésifs phénoliques peuvent résister en continu à 250°C et en pointe (pendant de courtes durées) à 450°C.

Ils résistent également au feu. Ils sont donc utilisés pour coller des panneaux en stratifiés phénoliques dans les cabines d'avion et les trains.

Les adhésifs phénoliques sont également utilisés pour coller des garnitures de freins (adhésifs nitrile-phénoliques) ou parfois des pièces en polyamide.