

Collage et étanchéité industriels

DANIEL SPENLÉ¹

Ce dossier est un large extrait du chapitre « Introduction au collage » présenté au stage PAF (IUFM) qui se déroule chaque année depuis 1996 au lycée Robert-Doisneau de Corbeil-Essonnes pour l'académie de Versailles, puis, plus récemment, pour celles de Créteil et de Paris. D'abord présenté sous forme de transparents, son contenu s'est régulièrement enrichi grâce à la société Henkel Loctite France, son partenaire industriel.

MOTS-CLÉS liaison, procédé, matériaux

LE COLLAGE

Qu'est-ce que le collage ?

Le collage est une méthode d'assemblage remontant aux premiers hommes, qui utilisaient des colles d'origines végétale, animale, minérale... Des fouilles de 1939 permettent de découvrir en Basse-Égypte et en Irak des objets ressemblant à des outils agricoles construits à partir de bois ou d'os et de silex, assemblés par du brai de bouleau (obtenu lors de la calcination de son écorce, figure 1) ou maintenus par du bitume (figure 2).

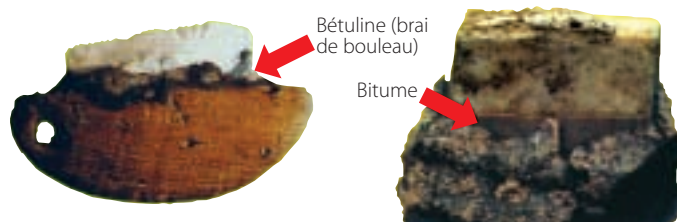


Figure 1. Couteau à moissonner

Figure 2. Tribulum, pour battre les céréales

Ses performances se sont accrues avec les colles d'origine synthétique :

- colles phénoliques au début du xx^e siècle ;
- colles époxydiques au cours de la Seconde Guerre mondiale ;
- colles acryliques dans les années 50-60.

Il s'est développé avec les industries de pointe comme l'aéronautique et le spatial. Il se développe actuellement dans de nombreux secteurs d'activité :

- automobile, ferroviaire, mécanique ;
- électronique ;
- électroménager, loisirs ;
- médical (dentaire, chirurgie).

Son développement s'est réalisé grâce à :

- une meilleure compréhension des phénomènes d'adhésion ;
- la mise au point et la commercialisation de produits spécifiques aux besoins des marchés ;
- l'apparition de moyens de calculs et de conception ;
- des moyens de dépose des adhésifs et de contrôle des collages ;
- une formation des concepteurs et opérateurs.

Il est maintenant construit sur un cédérom contenant de nombreuses animations (diaporama et vidéos).

Le cédérom 2000-2001 a reçu en novembre un 3^e prix au Cirec (Concours international de recherches éducatives et de créations).

Nous engageons vivement les collègues qui se sentent concernés à s'inscrire à ce stage, car ils y trouveront, outre l'introduction – présentée ici, rappelons-le, pour l'essentiel –, de nombreuses applications pratiques, assisteront à des démonstrations et effectueront des essais normalisés.

Pourquoi coller ?

Le collage respecte matériaux et structures. En effet, sa mise en œuvre à la température ambiante ou à des températures inférieures à 200 °C ne modifie pas la nature de la plupart des matériaux. De plus, il respecte l'intégrité des structures : pas de perçage ni d'effet d'entaille (concentration de contraintes). Enfin, l'esthétique est préservée.

Il réalise une liaison homogène et continue, caractérisée par :

- une meilleure répartition des contraintes ;
- une bonne tenue aux chocs et aux vibrations ;
- une meilleure tenue à la fatigue ;
- une réduction des bruits.

La figure 3 met en évidence la répartition des contraintes dans la zone d'assemblage de deux tôles par soudage, rivetage et collage.

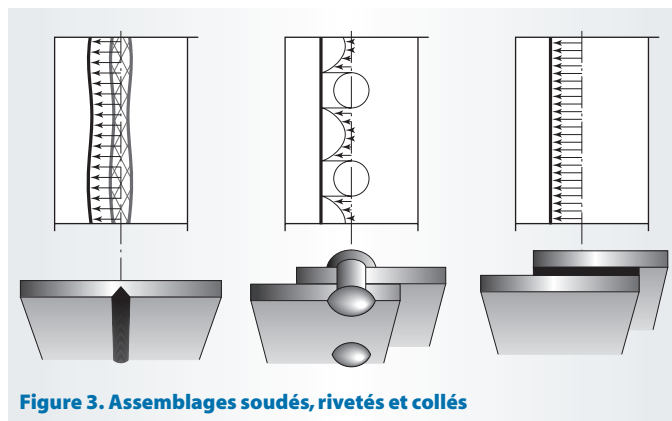


Figure 3. Assemblages soudés, rivetés et collés

On constate que la solution par soudage ne réalise pas une répartition homogène. Elle engendre en outre des zones de fragilité. La solution par rivetage entraîne des concentrations de contraintes et une répartition discontinue en raison des trous. La solution collée est homogène et continue.

1. Professeur agrégé de mécanique au lycée Robert-Doisneau de Corbeil-Essonnes.

Le collage protège les interfaces grâce à la suppression de la corrosion galvanique et à l'étanchéité de la liaison.

Il allège les structures car le poids propre de l'adhésif est négligeable par rapport à celui d'une vis ou d'un rivet. De plus, une réduction des épaisseurs est possible.

Méthode d'assemblage quasi universelle, il convient à un grand nombre de matériaux et permet l'association de matériaux différents (étain sur verre par exemple...).

C'est un procédé économique (figure 4), qui :

- réalise diverses fonctions (fixation, étanchéité...);
- permet des gains de matière;
- autorise un élargissement des tolérances (en supprimant des pièces);
- supprime des opérations d'usinage et de reprise.

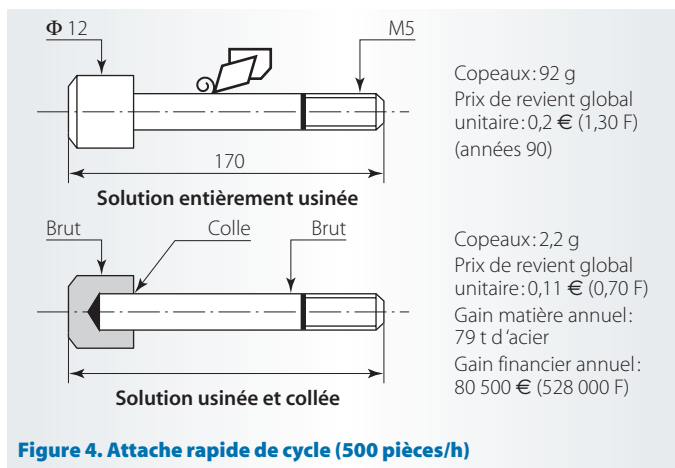


Figure 4. Attache rapide de cycle (500 pièces/h)

Enfin, le collage est compatible avec diverses technologies (selon *Veille technologique*, « assemblages », 1995, Cetim) telles que :

- le soudage;
- le rivetage;
- le sertissage;
- le clinchage;
- le frettage;
- le boulonnage.

Que coller ?

Les théories de l'adhésion

Selon les essais, la rupture apparaît :

- par arrachement du support (rupture cohésive du support);
- par arrachement au cœur de l'adhésif (rupture cohésive de l'adhésif, figure 5);
- par manque d'adhérence de l'adhésif sur le support (rupture adhésive, figure 6).

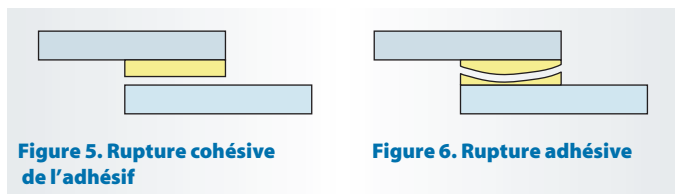


Figure 5. Rupture cohésive de l'adhésif

Figure 6. Rupture adhésive

Les forces de cohésion sont définies par les propriétés du « matériau » adhésif.

Quant aux forces d'adhésion, différentes définitions sont adoptées.

- **L'approche physique :** selon une théorie moléculaire (distances de 10^{-10} à 10^{-9} m), les liaisons sont du type Van der Waals, covalentes par les atomes d'hydrogène.

- **L'approche mécanique :** l'adhésion peut s'expliquer par un effet ventouse dû à des microbulles (selon article de M. Albertini dans *Le Monde* du 12 février 1999). Elle peut aussi être due à un ancrage dans les rugosités ($Ra = 0,8$ à $3,2 \mu m$).

- **L'approche thermodynamique :** l'adhésion dépend de la mouillabilité de la surface (figure 7).

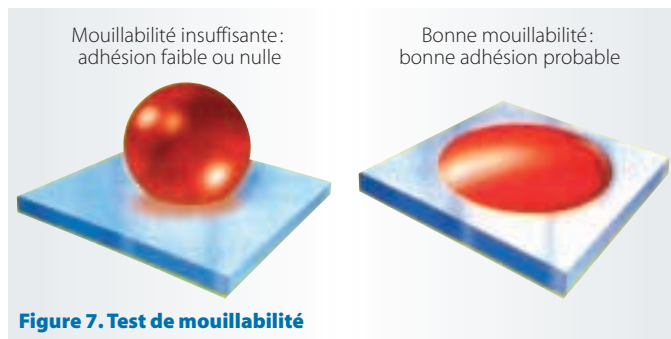


Figure 7. Test de mouillabilité

Il faudra donc procéder à des essais lors du collage de produits nouveaux.

Étudier les assemblages dès la conception

Proscrire les contraintes de pelage et de clivage

Dans le cas du pelage (figure 8), sous l'effort F, la rupture du joint collé s'effectue ligne après ligne sur toute la largeur L; sa résistance s'exprime en N/m. Le pelage se manifeste lorsque les supports sont souples (ou facilement déformables).

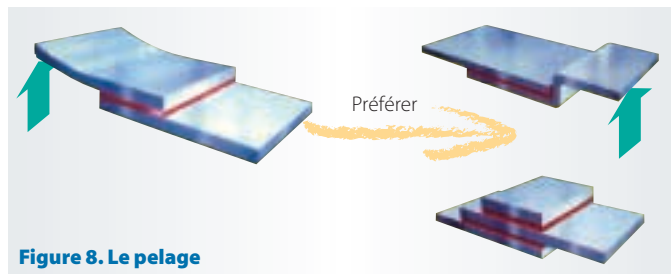


Figure 8. Le pelage

Dans le cas du risque de clivage (figure 9), sous la charge F, toute la surface collée intervient et la rupture se produit après une déformation importante par arrachement en forme de biseau. Le clivage se produit lorsque les supports sont plutôt rigides.

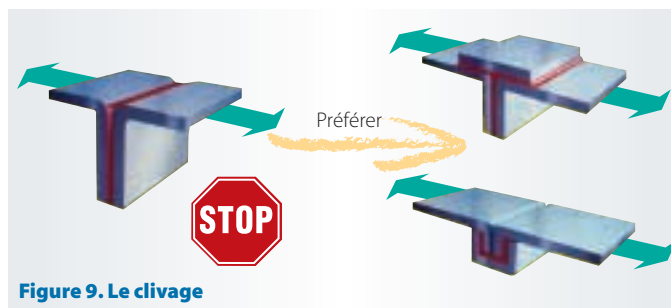


Figure 9. Le clivage

Éviter les contraintes de traction

En effet, les efforts sont rarement perpendiculaires au joint et réclament des sections importantes pour pondérer les effets parasites.

Coller deux tiges ou deux tubes bout à bout ne les met pas à l'abri de sollicitations inopinées de pelage ou de clivage (figure 10). Ainsi, il ne faut pas compter sur une réparation de ce type pour des branches de lunettes, par exemple. Par contre, concevoir une

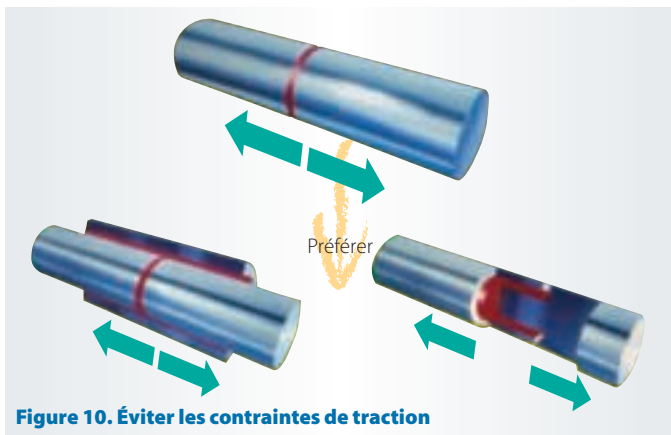


Figure 10. Éviter les contraintes de traction

monture en plastique avec des branches en acier rapportées ne peut s'envisager que par un emmanchement collé. Un tel assemblage permettra aussi de transmettre un couple (figure 11).

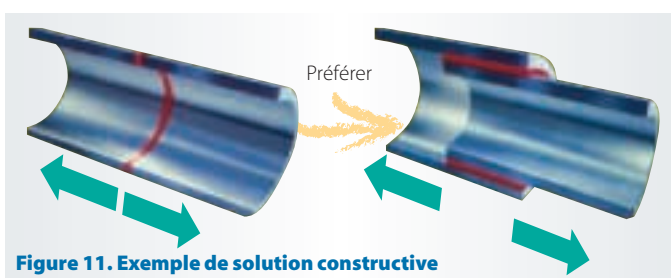


Figure 11. Exemple de solution constructive

Préférer les contraintes de cisaillement et/ou de compression

Toute la surface du joint travaille.

Optimiser la surface de recouvrement

La charge de rupture n'augmente pas proportionnellement à la longueur collée. Les concentrations de contraintes se trouvent aux extrémités du support.

La courbe de la figure 12 montre qu'il n'y a pas d'intérêt à augmenter la longueur de recouvrement car le joint de colle offre le maximum de résistance près de ses extrémités. L'expérimentation se révèle souvent nécessaire. La norme d'essai NF T 76-107 des éprouvettes plates indique que sur une largeur de 25 mm, la longueur de recouvrement doit être de 12,5 mm.

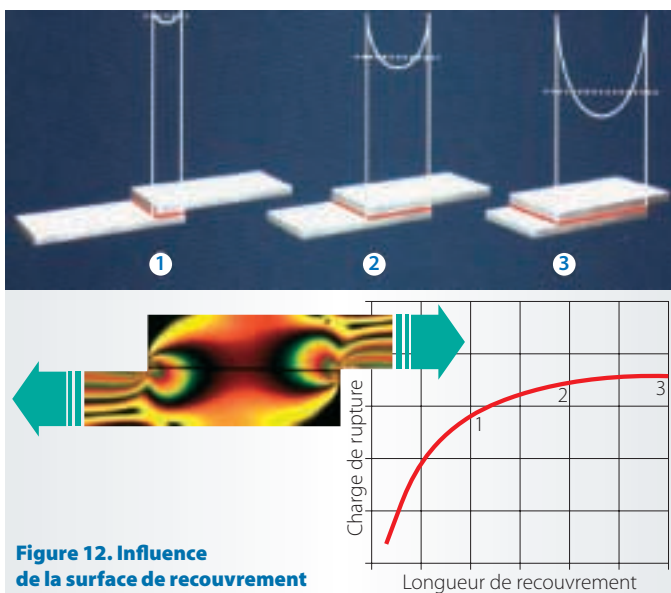


Figure 12. Influence de la surface de recouvrement

Avec quoi coller ?

Choisir parmi les familles de produits

Les adhésifs acryliques

- Les adhésifs acryliques anaérobies :
 - polymérisent en l'absence d'oxygène et présence d'ions métal (confinés);
 - polymérisent sur les substrats métalliques;
 - n'acceptent qu'un jeu (l'épaisseur d'adhésif) faible, au maximum de 0,5 mm;
 - sont rigides à flexibles;
 - supportent des températures d'utilisation allant de - 50 °C à + 200 °C;
 - sont utilisés pour les collages en mécanique (étanchéité, fixations et freinages, transmission d'efforts dans les emmanchements).

● Les adhésifs acryliques modifiés :

- ne polymérisent qu'en présence d'un activateur;
- adhèrent à des substrats multiples;
- acceptent un jeu moyen, au maximum de 2 mm;
- sont résilients;
- supportent des températures allant de - 50 °C à + 120 °C (+ 150 °C en pointe);
- permettent un collage structural plan sur plan ($\tau > 7$ MPa).

Les adhésifs acryliques polymérisables aux UV :

- sont photo-initiateurs, à polymérisation multiphase;
- nécessitent qu'au moins l'un des substrats soit perméable aux UV;
- acceptent un jeu faible à moyen;
- sont rigides à flexibles;
- supportent des températures d'utilisation allant de - 50 °C à + 150 °C;
- sont adaptés au collage du verre, des plastiques entre eux ou sur d'autres substrats, aux applications électroniques (*potting*, encapsulage, CMS, etc.).

Les adhésifs cyanoacrylates :

- polymérisent essentiellement en présence d'humidité de surface;
- agissent sur la plupart des substrats;
- n'acceptent qu'un jeu faible, au maximum de 0,25 mm;
- sont rigides à résilients;
- supportent des températures d'utilisation allant de - 50 °C à + 120 °C;
- permettent un collage instantané (quelques secondes).

Les silicones monocomposants ou accélérés :

- polymérisent en présence d'humidité atmosphérique pour les monocomposants (ou accélérateur basique);
- adhèrent à des substrats multiples (avec ou sans primaire);
- acceptent un jeu important, de 8 mm au maximum pour les monocomposants;
- sont des adhésifs souples, de 25 à 60 shore A;
- supportent une large gamme de températures, de - 60 °C à + 300 °C;
- sont utilisés en collage et/ou en étanchéité haute température ou dans les assemblages soumis à des dilatations différentielles.

Les adhésifs polyuréthanes mono ou bicomposants :

- polymérisent en présence d'humidité, pour les monocomposants, ou d'un accélérateur isocyanate;
- adhèrent à des substrats multiples (avec ou sans primaire);
- acceptent un jeu important;
- sont des adhésifs souples (A % = 80 à 100 %);
- supportent des températures d'utilisation allant de - 50 °C à + 100 °C;
- permettent un collage structural souple ($\tau < 5$ à 7 MPa).

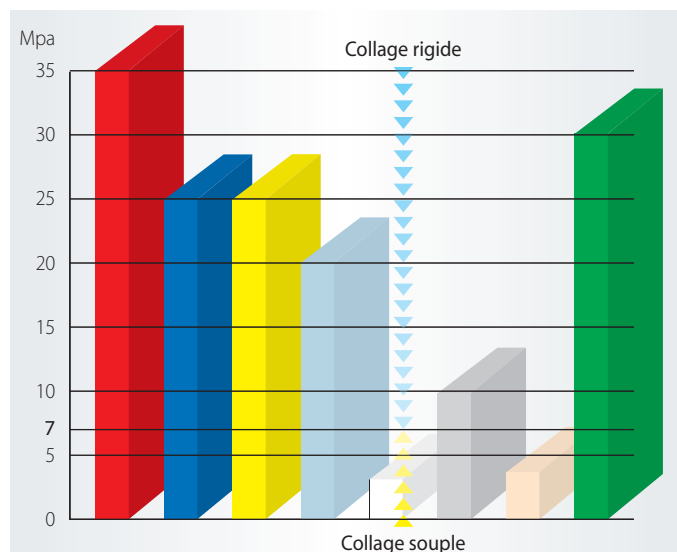
Substrat A \ Substrat B	Métal et céramique	Verre	Plastiques	Caoutchouc	Bois
Métal et céramique	■ ■ ■ □ □ □ ■	▲ ▲ ■ □ □ □ ■	▲ ■ ■ ■ □ □ □ ■	■ □ ■ ■	■ ■ □ □ □
Verre	▲ ▲ ■ □ □ □ ■	■ □ □ □ ■	■ □ □ □ ■	▲ ■ ■ ■	▲ ■ □ □ □
Plastiques	▲ ■ ■ ■ □ □ □ ■	■ □ □ □ ■	■ ■ ■ □ □ □ ■	■ □ ■ ■	■ ■ □ □ □
Caoutchouc	■ □ ■ ■	▲ ■ ■ ■	■ □ ■ ■	■ □ ■ ■	■ □ ■ ■
Bois	■ ■ □ □ □	▲ ■ □ □ □ ■	■ ■ □ □ □ ■	■ □ ■ ■	■ ■ □ □ □

Légendes des tableaux et graphiques: ■ Anaérobies ■ Cyanoacrylates ■ Acryliques modifiés ■ Motif carré: la plupart
 ■ Acryliques UV □ Silicones ■ Polyuréthanes ■ MS Polymers ■ Époxi ▲ Motif triangle: sous conditions

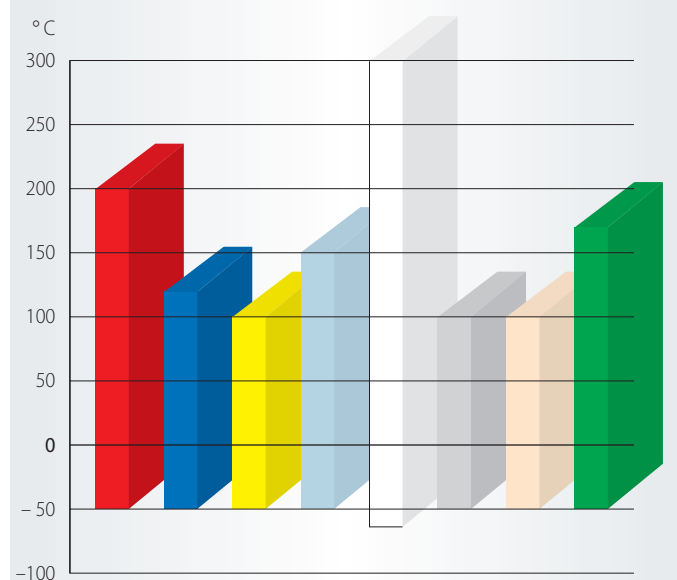
Les Modified Silane Polymers:

- supporte l'humidité ambiante;
- adhèrent à des substrats multiples;
- acceptent un jeu important (de 6 à 12 mm);
- sont des adhésifs souples (A % = 90 à 300 %);
- supportent des températures d'utilisation allant de - 50 °C à + 100 °C;
- permettent un collage souple.

- Les adhésifs époxy mono ou bicomposants:
 - adhèrent à la plupart des substrats;
 - acceptent un jeu important (0,25 mm en collage);
 - sont rigides à flexibles;
 - supportent des températures d'utilisation allant de - 55 °C à + 120 °C;
 - offrent des applications diverses, en collage avec les adhésifs « clairs » (structures en nid d'abeilles en aéronautique, bijoux fantaisie...), en outillage avec les résines chargées (calage de machine, reprise de défauts d'aspect...).



Graphique 1. Résistance au cisaillement



Graphique 2. Résistance en température

Coller selon les supports

Le tableau 1 autorise une première sélection de familles de produits permettant de réaliser un assemblage particulier. Par exemple, on voit que si l'on souhaite assembler du caoutchouc sur du métal, on peut utiliser *a priori*:

- un adhésif instantané (cyanoacrylate);
- un silicone (pas tous: motif triangle);
- un polyuréthane;
- un époxi.

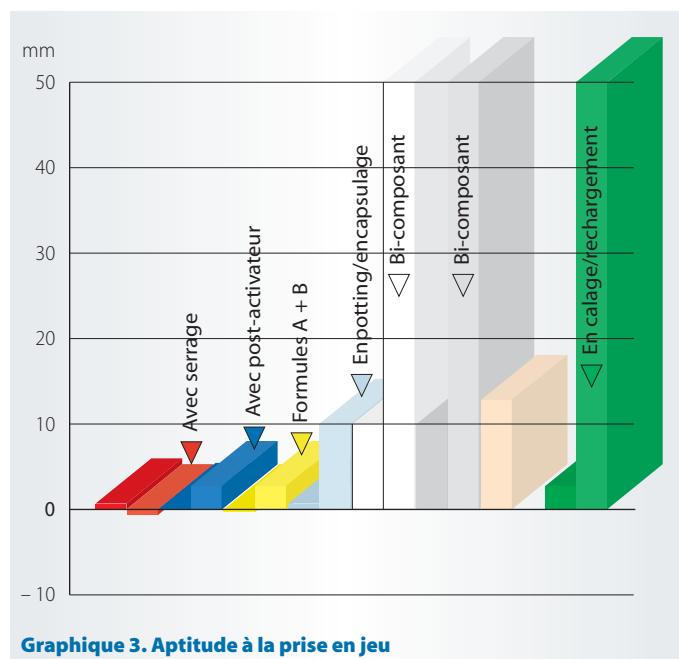
Encore faut-il examiner les autres conditions: sollicitations, température, jeux, temps de manipulation...

Coller en fonction des sollicitations (graphique 1)

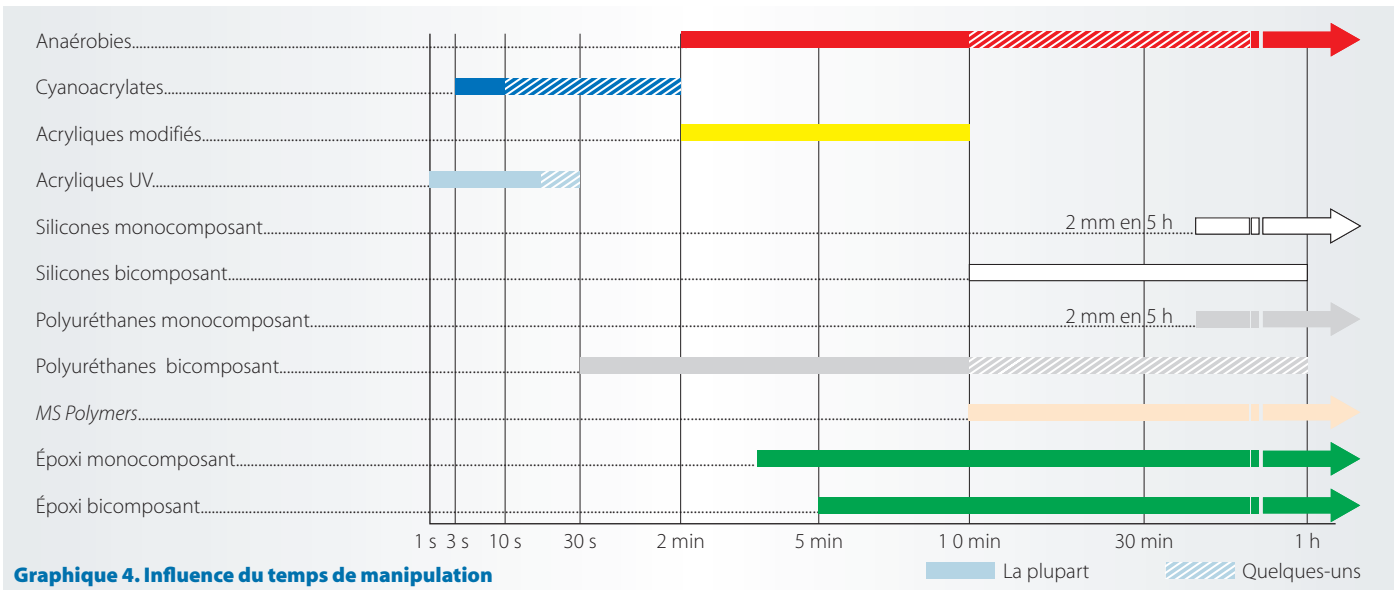
Coller selon la température (graphique 2)

Coller en fonction des jeux (graphique 3)

Coller en fonction du temps de manipulation (graphique 4)



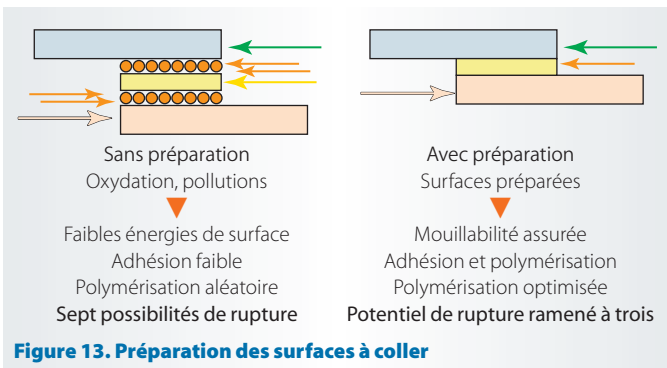
Graphique 3. Aptitude à la prise en jeu



Comment coller ?

Généralités

Après avoir analysé les sollicitations, les matériaux, les jeux, les conditions d'utilisation et avoir choisi l'adhésif, la réussite d'une liaison collée dépend de la préparation des surfaces (figure 13).



La préparation des métaux

Par voie mécanique :

- usinage « rugueux » ($0,8 < Ra (\mu m) < 3,2$) ;
- émerisage ($120 < grain < 140$) ;
- ponçage ;
- sablage.

La figure 14 montre une rupture adhésive : cette rupture s'est produite après un effort d'arrachement de $22 \cdot 10^3$ à $35 \cdot 10^3$ daN. On peut distinguer (difficilement) sur la photo de gauche une lamelle d'adhésif et des traces blanchâtres dans l'alésage alors que l'arbre (photo de droite) ne porte plus aucune trace de produit.

En dessous, on observe le résultat d'une rupture cohésive : les traces blanchâtres recouvrent la quasi-totalité de l'alésage et de l'arbre, ce qui prouve que l'adhésif s'est rompu dans son épaisseur sous une charge nettement supérieure. Sa résistance a donc été utilisée de façon optimale, fruit d'une bonne préparation des surfaces.

Par voie chimique :

- dégraissage avec un solvant non gras (sec) ;
- dégraissage alcalin si possible ;
- décapage acide.

Conduite des traitements (en tout ou partie) :

- dégraissage ;
- traitement mécanique ;



- dégraissage n° 2 ;
- décapage ;
- rinçage ;
- application d'un primaire.

La préparation des plastiques

Selon les cas :

- émerisage (grain 400) ;
- flammage (traitement avec une flamme oxydante) ;
- effet Corona (décharges couronnes) ;
- traitement au plasma froid sous atmosphère contrôlée ;
- rayonnement UV ;
- traitement chimique (oxydation chromique, solutions de dérochage...) ;
- application d'un primaire.

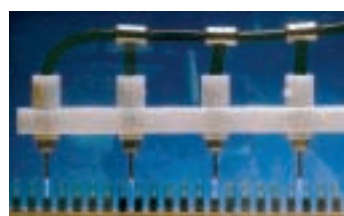


Figure 15. Traitement par effet Corona



Figure 16. Traitement par rayonnement UV

La photo de la figure 15 montre un traitement de surface d'une matière plastique destiné à modifier sa structure moléculaire de surface par des décharges électriques (effet Corona). Cette préparation s'avère utile pour les plastiques à faible énergie de surface comme le PTFE.

La photo de la figure 16 montre un traitement de surface par un rayonnement UV approché à l'aide d'un conduit en fibre optique.

Conclusion

Les paramètres qui déterminent la réussite d'un collage sont :

- l'analyse fonctionnelle (cahier des charges fonctionnel, analyse de la valeur, reconception...);
- la nature des matériaux (propriétés physiques, traitements de surface...);
- la conception du joint (géométrie, dimensionnement, calculs...);
- le choix de l'adhésif (chimie, mode de polymérisation...);
- l'industrialisation (dépose de l'adhésif, temps de cycle...);
- les contrôles (substrats, adhésif, processus, destruction par prélèvement, CND...).

La réussite d'un collage est aussi le résultat :

- d'un projet de groupe (études, méthodes, fabrication...);
- de la formation des personnels, des concepteurs aux opérateurs;
- de la mise en place de l'environnement :
 - température et hygrométrie contrôlées,
 - pesage de la pièce,
 - moyens de dépose de l'adhésif adaptés,
 - moyens de polymérisation (étuve, tunnel UV, etc.),
 - moyens de contrôle du processus,
 - considérations d'hygiène et de sécurité.

UNE APPLICATION INDUSTRIELLE²

Les adhésifs anaérobies Loctite sont bien connus des services de maintenance de tous les secteurs d'activité, qu'ils soient industriels ou de service public tels que les hôpitaux, les transports et l'énergie. Immobiliser des vis, des écrous au Freinfillet® est aujourd'hui chose courante, surtout lorsque l'assemblage « travaille » dur.

L'utilisation de ces produits pour réaliser les étanchéités de raccords filetés se substitue de plus en plus à l'emploi de rubans plastiques et même de la filasse; c'est plus pratique, plus rapide et la sécurité des assemblages s'en trouve renforcée. Et quand on sait ce que représente le coût des fuites... Les clavettes qui ont été matées sont remontées au Quick Métal®, les roulements qui ont laminé leurs portées sont réassemblés au Scelroulement®.

L'emploi d'un procédé de collage sur des matériels stratégiques n'est pas l'apanage des industries de pointe telles que l'aéronautique ou le spatial, les services entretien et travaux neufs des industries de transformation et des services publics ne sont pas en reste, mettant en œuvre des applications dignes d'intérêt. Certes, elles sont moins nombreuses et moins fréquentes que les opérations citées plus haut, faisant désormais partie du quotidien, mais elles sont remarquables par les enjeux et bien souvent aussi par la taille des pièces qui constituent l'assemblage. Ce fut récemment le cas avec le groupe d'exploitation hydraulique Haute Dordogne-Vézère d'Électricité de France, basé à Tulle, qui a en charge la maintenance de la production et du transport du réseau Énergie Midi-Pyrénées.

2. Joseph Delécolle, support technique, Loctite France.

Quelques mots sur les centrales hydrauliques

En matière énergétique, depuis quelques décennies, la France a beaucoup misé sur le nucléaire. Il reste un certain nombre de centrales thermiques en service; les centrales hydrauliques sont nombreuses; la centrale marémotrice de l'estuaire de la Rance est un fleuron du genre; les énergies nouvelles sont encore plus ou moins expérimentales.

À puissance égale, une centrale hydraulique réclame une mise de fonds initiale deux à trois fois plus importante qu'une centrale thermique, mais les charges d'exploitation sont pratiquement négligeables.

L'emplacement des centrales hydrauliques est imposé par la nature et non par les centres d'utilisation. On distingue les centrales au fil de l'eau, les centrales d'écluse et les centrales de lac. Grâce à ses deux principaux massifs montagneux, notre pays possède un réseau, assez dense, de centrales hydroélectriques, dont certaines sont très anciennes.

Une centrale hydroélectrique de lac utilise l'énergie, potentielle ou cinétique, d'une retenue d'eau, ce qui permet de produire une puissance d'autant plus grande que la chute est plus haute et son débit plus important (figure 17).

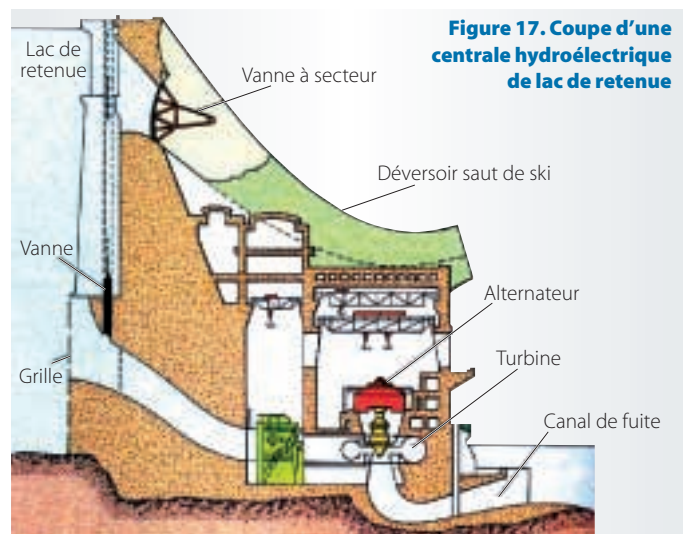


Figure 17. Coupe d'une centrale hydroélectrique de lac de retenue

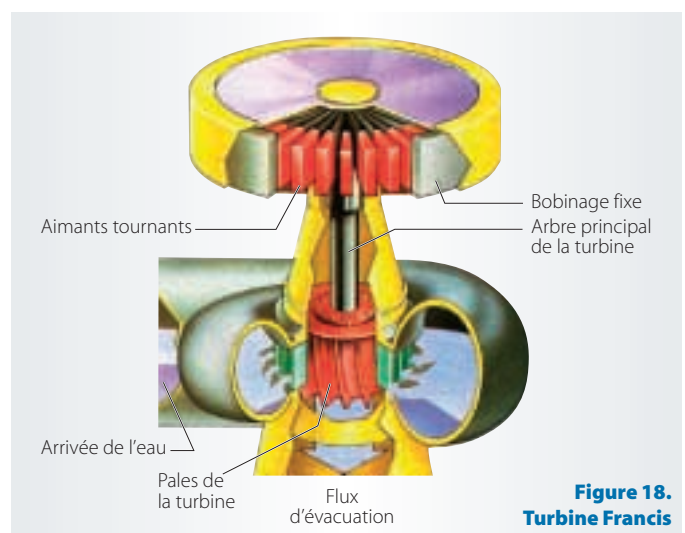


Figure 18. Turbine Francis

Suivant les caractéristiques de la chute utilisée, la turbine est équipée de roues différentes qui entraînent à leur tour un alternateur pour produire l'électricité. Ces roues sont les suivantes :

- la roue Pelton, qui possède, à sa périphérie, une vingtaine d'augets à échancrure médiane, en forme de double cuillère. On l'emploie

pour les hautes chutes de 1800 à 500 m, et l'on obtient jusqu'à 200 MW par roue ;

— la roue Kaplan, qui a l'allure d'une hélice de bateau, avec trois à huit pales à pas variable montées sur un très gros moyeu. On l'utilise pour les basses chutes de 60 à 3 m, et l'on peut obtenir 20 MW par roue. Sous forme immergée, la roue Kaplan constitue un groupe bulbe ;

— la roue Francis (figure 18), qui comprend une quinzaine d'aubages fixes, disposés entre deux flasques contenant des aubages directeurs à incidence variable. On l'utilise pour des chutes moyennes de 500 à 60 m. Très répandue, ce type de turbine permet d'obtenir le meilleur angle d'attaque du courant d'eau sur les pales du rotor mobile et elle peut fournir jusqu'à 500 MW.

Chronologie des faits

Au cours d'une réunion d'information technique sur les technologies et les produits Loctite organisée par la société Chaumeil de Brives, le distributeur local, le représentant régional de Loctite France, Patrick Amoyel, a développé les différentes fonctions de l'assemblage mécanique par collage et en particulier celle de la fixation par frettage-collage.

Sa présentation fut enrichie par un grand nombre d'études de cas d'application, en particulier dans des industries de transformation comme la sidérurgie, où des applications collées existent sur des matériels de premier ordre tels que des galets moteurs de pont roulant, des accouplements et des allonges de cage de laminoir.

Les responsables du groupe d'exploitation EDF présents à cette session furent très intéressés par le procédé frettage-collage.

En effet, le groupe d'exploitation hydraulique Haute Dordogne doit procéder à la remise à niveau des quatre servomoteurs des vannes de garde d'un barrage datant de 1940 (figure 19). Il s'agit en fait de gros vérins qui actionnent l'ouverture et la fermeture de l'arrivée d'eau aux turbines. Ces vannes font 4,5 m de diamètre.

Le corps de ces servomoteurs avait déjà été chemisé par le passé. Au démontage, il est constaté une corrosion assez importante à l'interface malgré un ajustement serré et un montage par frettage.

Ceci renforce d'ailleurs la véracité de l'argumentaire : le taux de portance entre deux pièces assemblées est faible, même dans le cas de liaisons frettées ; probablement de 15 % à 20 % au maximum compte tenu de la taille importante de cet assemblage (diamètre 1320 mm, longueur 1850 mm).

Un réalésage des corps s'avère alors nécessaire pour y assembler une nouvelle frette en acier inoxydable. Cet usinage réduira d'autant l'épaisseur de la paroi du corps qui n'était à l'origine que de 45 mm.

Consulté, le responsable régional Loctite propose un frettage-collage permettant d'assurer l'étanchéité parfaite de la liaison par le remplissage de l'interface ainsi qu'un renforcement mécanique de la liaison. L'étude est alors confiée au support technique de Loctite France.

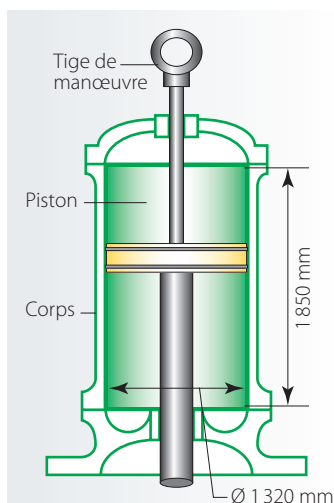


Figure 19.
Coupe d'un servomoteur



◀ **Figure 20. L'opération de dégraissage**



Figure 21. L'application de l'adhésif ▶



◀ **22. La descente du corps dans la cheminée**



Figure 23. La position finale de l'assemblage ▶

Après prise en compte du cahier des charges et vérification des contraintes internes de frettage, une définition ainsi qu'une mise en œuvre sont proposées au client :

- un taux de serrage faible compte tenu des parois minces et de la limite élastique incertaine de la fonte du corps du servomoteur ;
- une réalisation de la portée sur deux diamètres sensiblement différents compte tenu de la longueur de l'assemblage, et ce pour éviter tout risque de coincement pendant l'opération d'assemblage ;
- l'application d'un produit acrylique anaérobie à polymérisation lente, l'adhésif Loctite 640 ;
- une température de frettage suffisante pour réaliser l'assemblage, compatible avec l'adhésif.

Procédure d'assemblage

Après exécution des pièces aux tolérances fixées au plan, elles sont dégraissées au solvant Loctite 7063 à l'aide d'un chiffon blanc non pelucheux ou bien encore au Sopalin®. Un contrôle de la rugosité peut alors être effectué. Enfin, un dégraissage de finition est réalisé par pulvérisation et évaporation naturelle (figure 20).

Le corps du servomoteur est mis au four préalablement, pour le dilater.

La chemise, quant à elle, est enduite d'adhésif Loctite 640 à l'aide d'un pinceau de soies naturelles (figure 21).

Un pinceau en nylon ne convient pas ; en effet, cette matière n'est pas compatible avec l'adhésif acrylique à l'état liquide.

Dans ce cas précis, la dépose a été effectuée sur quatre zones d'une hauteur d'environ 250 mm. En effet, la portée a été réalisée sur deux diamètres légèrement différents compte tenu de la longueur de la liaison.

Le corps est amené à la verticale de la chemise et il est nécessaire que les axes des deux pièces soient parfaitement alignés



▲ **Figure 24. Ensemble assemblé après équilibrage des températures**

(figure 22). La descente au pont peut alors commencer, par petites longueurs au début de l'assemblage afin de pouvoir rectifier si nécessaire les positions, puis sans s'arrêter jusqu'à la position finale (figure 23). L'ensemble sera manipulable après équilibrage des températures (figure 24).

Bilan

Cette solution a permis de réutiliser des systèmes de plus de soixante ans d'âge tout en les fiabilisant. En effet, l'étanchéité totale étant obtenue, il n'y aura pas de perte de charge et les servomoteurs auront un meilleur rendement.

Le coût du procédé (environ 2 000 F, 304,90 €) de produit par application) est négligeable par rapport au prix des pièces qu'il aurait fallu changer, et *a fortiori* aux pertes d'exploitation qu'entraînerait un incident de manœuvre d'une vanne de barrage.

Cette solution a été adoptée par la direction technique d'Électricité de France pour tous les servomoteurs de barrage. ■