

Collage et étanchéité industriels

(quatrième partie)

DANIEL SPENLÉ¹

Dans les numéros 119, 122 et 124 de Technologie, l'auteur a passé en revue certaines familles d'adhésifs utilisés dans l'industrie. Le présent article, construit à partir des documents utilisés lors du stage PAF proposé depuis quelques années dans les académies de Paris, Créteil et Versailles en partenariat avec la société Henkel Loctite France, propose d'en analyser l'une des applications, puis de décrire un nouveau produit pédagogique mis à la disposition des enseignants.

MOTS-CLÉS liaison, procédé, matériaux, conception, équipement didactique, travaux pratiques

LES ASSEMBLAGES CYLINDRIQUES

La fixation des emmanchements cylindriques

La fonction de service

Il s'agit de transmettre un couple ou un effort axial (arrachement) entre deux pièces en liaison encastrement (figure 1).



▲ Figure 1. Un emmanchement collé

Les méthodes traditionnelles

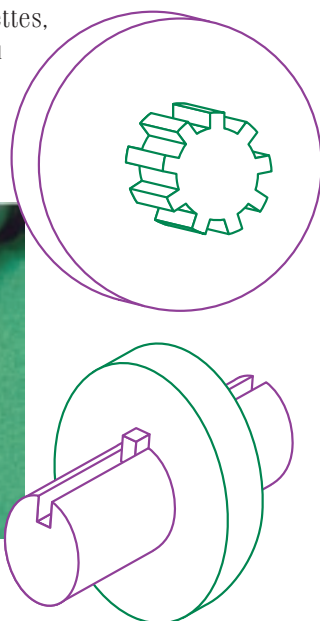
On réalise selon les cas une liaison par obstacle ou par adhérence.

La liaison par obstacle

Elle s'effectue au moyen de clavettes, cannelures, avec ou sans anneau élastique d'arrêt axial, vis de pression ou d'arrêt, goupille (figure 2)...



▲ Figure 2. Des emmanchements par obstacle



1. Professeur agrégé de mécanique au lycée Robert-Doisneau de Corbeil-Essonnes. Crédit photos et images: Henkel Loctite.

● **Inconvénients:** Une clavette ne transmet les efforts que sur une surface réduite en raison des défauts géométriques de surfaces (figure 3). Dans un article précédent sur les adhésifs anaérobies, nous avons indiqué quelques résultats expérimentaux de taux de portance (pourcentage de contacts effectifs rapporté à la surface théorique):

- pour des cales de métrologie, 60 %;
- pour un roulement sur portée rectifiée, 30 %;
- pour une clavette dans sa rainure, 10 %.

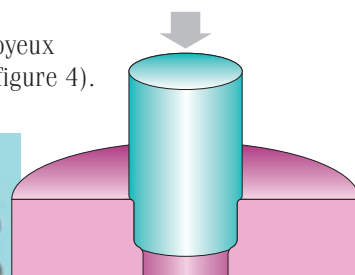
Ce faible taux de surface réellement en contact engendre au cours des transmissions d'efforts des écrouissements qui augmentent les jeux de fonctionnement, sources de détérioration, de corrosion et de bruits.

De plus, les usinages divers, et coûteux, engendrent des concentrations de contraintes.

● **Avantages:** procédés de liaison bien maîtrisés et adaptables aux efforts, solutions rassurantes.

La liaison par adhérence

Elle s'effectue grâce à des moyeux expansibles ou par frettage (figure 4).



▲ Figure 4. Un emmanchement par adhérence

● **Inconvénients:** Le frettage engendre des contraintes internes qui s'ajoutent à celles provoquées par la transmission de puissance. Elles peuvent provoquer des ruptures de pièces et limitent les applications en « parois minces » (figure 5).



▲ Figure 5. Des ruptures de pièces

● **Avantages:** Les efforts sont transmis par toute la surface en contact, donc beaucoup mieux répartis. On remarque qu'il y a peu d'usure, ce qui abaisse le prix de revient.



▲ Figure 3. Grossissement de surfaces en contact

La méthode par collage

- **Inconvénients** : limites en température et compatibilité avec l'environnement selon les adhésifs utilisés.
- **Avantages** : Des études comparatives rapportées à la solution par collage ont montré que, pour la fixation d'emmanchements cylindriques devant transmettre les mêmes puissances :
 - le frettage revient environ 20 % plus cher (tolérances et qualité d'usinage pour l'essentiel) ;
 - le clavetage avec l'arrêt axial est 3,5 fois plus cher ;
 - les cannelures coûtent 6,5 fois plus cher.

Le collage peut apporter une solution à des assemblages avec des matériaux ayant des dilatactions différentielles (par exemple des roulements en acier dans des paliers en aluminium, figure 6).



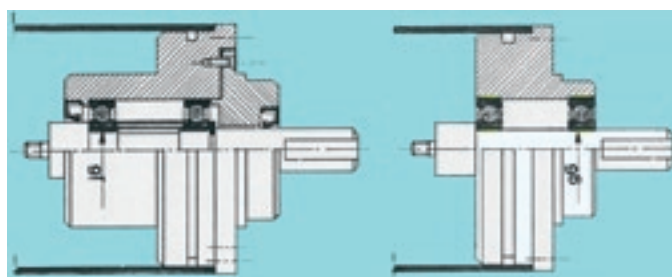
▲ **Figure 6. Le collage d'un roulement dans un palier en aluminium**

Parfois, la solution collée permet des économies spectaculaires. Par exemple, en 1995, la société Leroy Somer a réduit le prix de revient de certains moteurs de près de 60 % en collant les roulements du rotor sur leur axe. Ramené en monnaie actuelle, le décompte est résumé dans le tableau 1.

Tableau 1.

Avant		Après	
Circlips	0,06 €	Adhésif Loctite 603	0,01 €
Gorge (usinage 15 s)	0,06 €	Montage (12 s)	0,05 €
Montage (18 s)	0,07 €	Applicateur (amortissement sur 2 ans)	0,02 €
Total (33 s)	0,19 €	Total (12 s)	0,08 €

Autre exemple, la société Hohner Automation, qui fabrique des codeurs incrémentaux (figure 7), a réduit de 14 à 5 le nombre de pièces réalisant la fonction « guidage en rotation », tout en permettant une diminution des frottements et du poids ainsi qu'en simplifiant les usinages. Le gain représentait 30 francs en 1990 pour chaque ensemble réalisé.

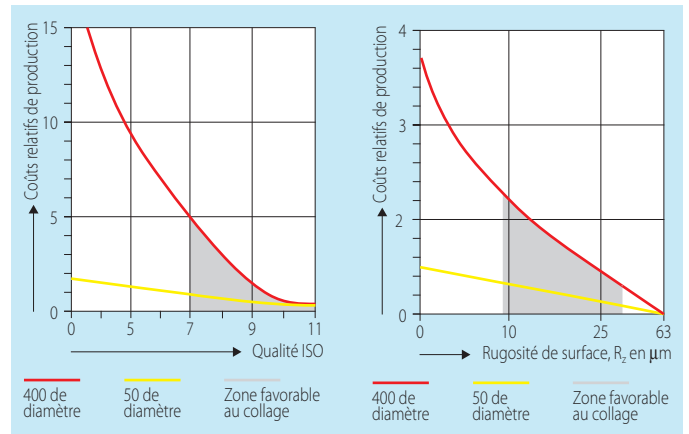


Avant : Portées de roulements usinées j6, Entretoise - Circlips - Couvercle + vis. Après : Roulements collés sur g6 sur l'arbre et dans alésage.

▲ **Figure 7. Des codeurs incrémentaux avant et après la solution de collage**

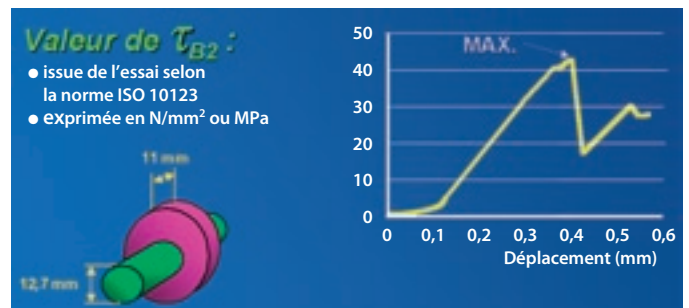
Il convient de noter que la rugosité requise pour la liaison collée et l'élargissement des tolérances contribuent également à la réduction du coût (figure 8).

La solution collage apporte une sécurité supplémentaire à la liaison. En effet, une surcharge accidentelle non prévue peut entraîner la rupture de l'organe de liaison créé par une clavette,



▲ **Figure 8. Les valeurs conseillées pour la liaison par collage, mettant en évidence la réduction des coûts**

une goupille, entraînant sa destruction et le risque de voir des débris métalliques se disperser et entraîner plus de dégâts... La colle qui se rompt par cisaillement se comporte un peu comme un limiteur de couple à poudre : il se produit un effet de bourrage, qui permet de transmettre encore un effort. Cette poudre qui peut ensuite se disperser ne détruira pas le reste du mécanisme. Cet effet est mis en évidence lors de l'essai normalisé axe-bague (figure 9).

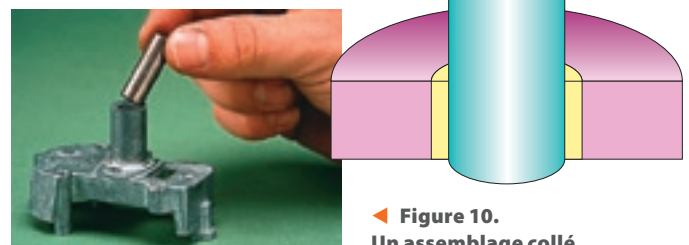


▲ **Figure 9. Un essai normalisé axe-bague**

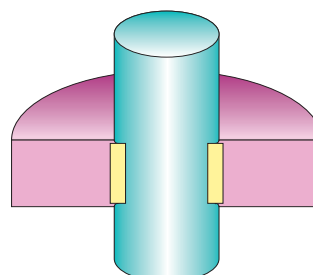
Les emmanchements cylindriques collés

Les divers procédés

On distingue trois procédés : le « collé » (figure 10), le « fretté-collé » et le « pressé-collé » (figure 11).



▲ **Figure 10. Un assemblage collé**



▲ **Figure 11. Un assemblage pressé-collé**

Le collé s'obtient avec un ajustement glissant.

Le fretté-collé consiste à dilater l'alésage par chauffage et/ou à refroidir l'arbre de façon à réaliser un assemblage libre. Lorsque ces deux pièces reprennent la même température, leur ajustement redevient serré et peut transmettre des efforts.

Le pressé-collé ne diffère du fretté-collé que par le fait que l'on ne modifie pas les températures des pièces.

On peut dire par conséquent que le fretté-collé est un frettage à chaud avec colle et que le pressé-collé est un frettage à froid avec colle.

L'assemblage collé

Le produit adhésif polymérisé transmet l'intégralité des efforts dans la liaison.

Il s'agit d'une conception simple, le jeu dans la liaison avant polymérisation de l'adhésif facilitant la mise en coaxialité de l'arbre et de l'alésage.

Ce type d'assemblage fournit une solution de remplacement intéressante à la réalisation de paliers, qui doivent être alignés, et permet d'augmenter les tolérances.

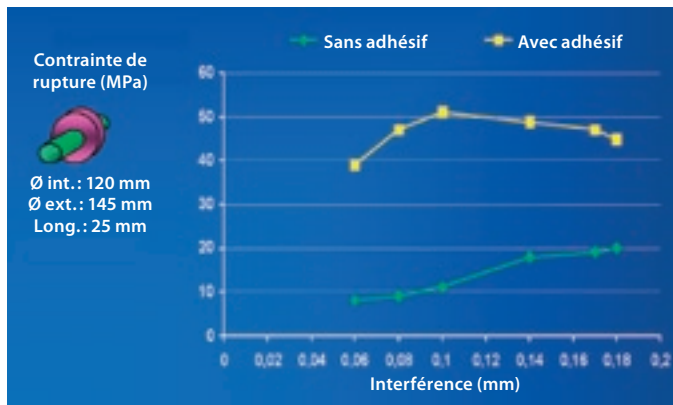
Pour ses produits adhésifs, Loctite préconise un jeu proche de 0,05 mm et une rugosité Ra comprise entre 1,6 et 3,2 μm .

Ce type d'assemblage convient particulièrement aux liaisons faiblement chargées. Les pièces peuvent être manipulées après quelques minutes. En revanche, il faut parfois prévoir une « mise en conformateur », telle une butée amovible, pour les positionner l'une par rapport à l'autre.

Cette liaison présente le plus faible coût.

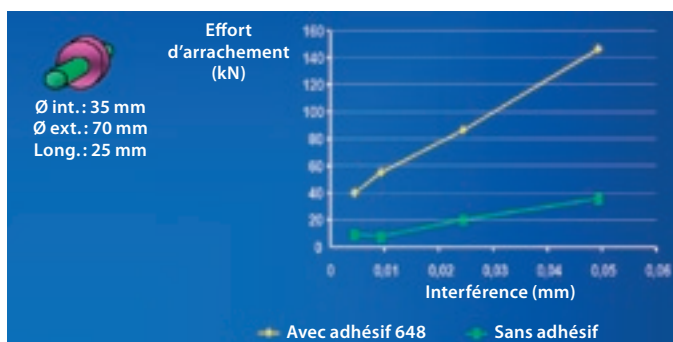
Les assemblages fretté-collé et pressé-collé

Lors d'un assemblage fretté-collé, le montage s'effectue avec jeu, mais le chauffage d'une pièce accélère la vitesse de polymérisation : c'est un assemblage en une phase et en un temps bien défini. L'adhésif polymérise sous compression à chaud (figure 12). C'est l'assemblage le plus performant en tenue à la fatigue et sous charge combinée.



▲ Figure 12. Le fretté-collé

Le serrage du pressé-collé se traduit par un frottement important lors de l'assemblage, qui élève la température des pièces et réduit ainsi le temps de polymérisation (figure 13).



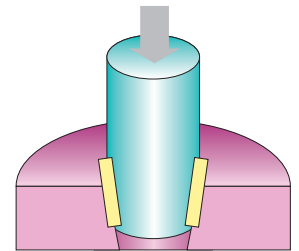
▲ Figure 13. Le pressé-collé

Avec ces deux procédés, l'adhésif intercalé dans la liaison, par ses propriétés mécaniques, permet de réduire l'importance du serrage nécessaire, diminuant ainsi les contraintes du frettage. En corollaire, l'adhésif permet de transmettre des efforts plus importants avec le même ajustement serré. Ses propriétés d'amortissement des vibrations améliorent en outre la tenue à la fatigue. Et les pièces sont manipulables immédiatement après l'assemblage.

Les autres solutions collées

On peut naturellement coller des emmanchements coniques ou réalisés à l'aide de clavettes ou de cannelures...

L'emmanchement conique collé présente les mêmes avantages que la liaison pressée-collée. Toutefois, il nécessite un effort plus faible, et il n'y a pas (ou peu) de polymérisation au cours de l'assemblage (figure 14).



▲ Figure 14. Un emmanchement conique collé



▲ Figure 15. Des cannelures collées

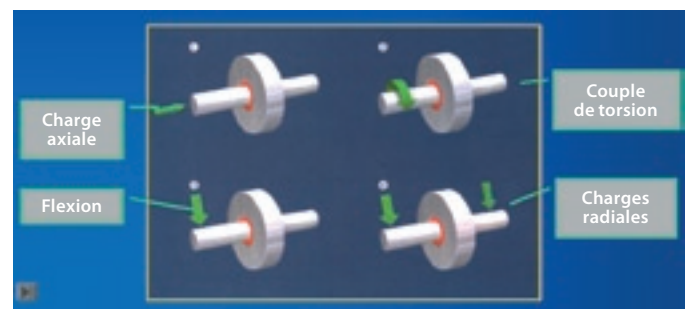
Coller une liaison avec clavette ou cannelure peut paraître un procédé surprenant. Pourtant, il réalise simplement l'arrêt axial (sans usinage), permet de réduire les bruits et l'usure tout en répartissant les contraintes lors de la transmission d'efforts (figure 15).

Coller une liaison avec clavette ou cannelure peut paraître un procédé surprenant. Pourtant, il réalise simplement l'arrêt axial (sans usinage), permet de réduire les bruits et l'usure tout en répartissant les contraintes lors de la transmission d'efforts (figure 15).

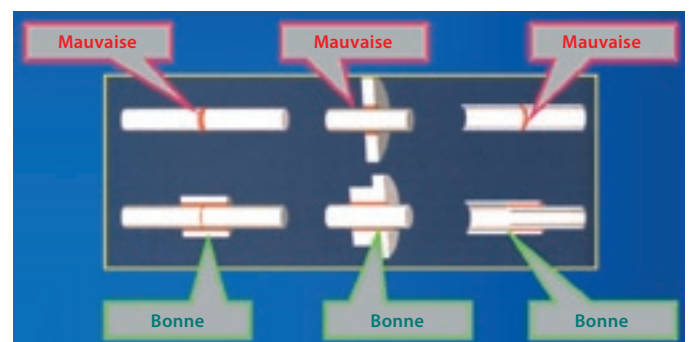
La modélisation et le dimensionnement des emmanchements cylindriques collés

L'examen des conditions de fonctionnement

Dès la conception, il faut penser à la transmission des efforts de façon que le produit adhésif ne travaille qu'en cisaillement ou compression. La traction peut s'envisager aussi, mais risque fréquemment de se transformer en pelage ou clivage, généralement peu souhaitables (figures 16 et 17).



▲ Figure 16. Les conditions de chargement



▲ Figure 17. Les conceptions spécifiques au collage

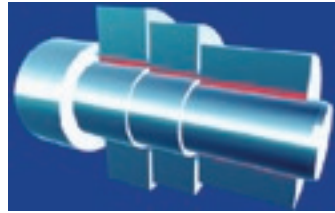


▲ Figure 18. Le collage dans un trou borgne

Des trous borgnes permettent un dosage de la quantité de produit adhésif. Le surplus s'expulse hors de l'assemblage lors du montage et ne polymérise pas, n'étant plus en condition d'anaérobie (figure 18).

Des chanfreins d'entrée à 30° favorisent la répartition de la colle.

Sur les arbres recevant plusieurs poulies ou roues dentées, prévoir un étage-ment évite aussi le raclage (figure 19).



▲ Figure 19. Des portées étagées

Le calcul des emmanchements cylindriques collés

Lors de la transmission d'efforts par un emmanchement cylindrique collé, la contrainte de cisaillement τ se calcule par l'expression

$$\tau = \tau_{B2} \cdot f_c + \mu \cdot P.$$

τ_{B2} (MPa ou N/mm²) représente la contrainte de cisaillement donnée par la fiche technique de l'adhésif selon la norme ISO 10123.

μ représente le facteur de frottement entre les éléments assemblés, obtenu expérimentalement.

P (MPa ou N/mm²) correspond à la pression de contact entre les éléments assemblés, calculée selon les normes relatives aux assemblages frettés (pour un emmanchement seulement collé, dans la suite des calculs, $P = 0$). Dans le cas de matériaux identiques, les formules de Lamé conduisent à :

$$P = \frac{s \cdot E \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)}{2 \cdot d}$$

s (mm) : serrage

E (N/mm²) : module de Young

d (mm) : diamètre de l'assemblage

D (mm) : diamètre extérieur de la frette

Tableau 2. Les différents facteurs

f_1 (facteur de matériau)	f_2 (facteur d'assemblage)
Acier..... 1	Assemblage collé..... 1
Acier allié..... 0,9	Assemblage pressé-collé..... 0,5
Fonte..... 0,8	Assemblage fretté-collé..... 1,2
Acier inoxydable..... 0,8	
Alliage d'aluminium..... 0,5	
Cuivre et alliages..... 0,4	
f_3 (facteur d'ajustement)	f_4 (facteur de géométrie)
<p>Prendre $f_3 = 1$ pour un serrage (jeu négatif)</p>	<p>Prendre toujours $f_4 = 0,5$ si $d > 100$</p>
f_5 (facteur de température)	f_6 (facteur de vieillissement thermique)
<p>Fonction du produit : voir fiche technique</p>	<p>Fonction du produit : voir fiche technique</p>

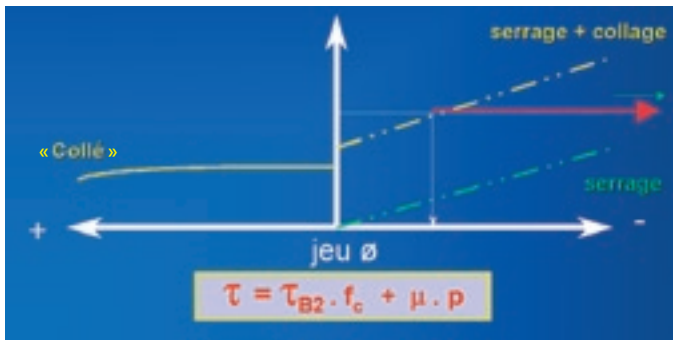
f_c est un facteur de correction défini par :

$$f_c = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6 \cdot f_7 \dots$$

Les six premiers de ces facteurs sont présentés dans le tableau 2; f_7 , le facteur d'environnement, dépend du produit.

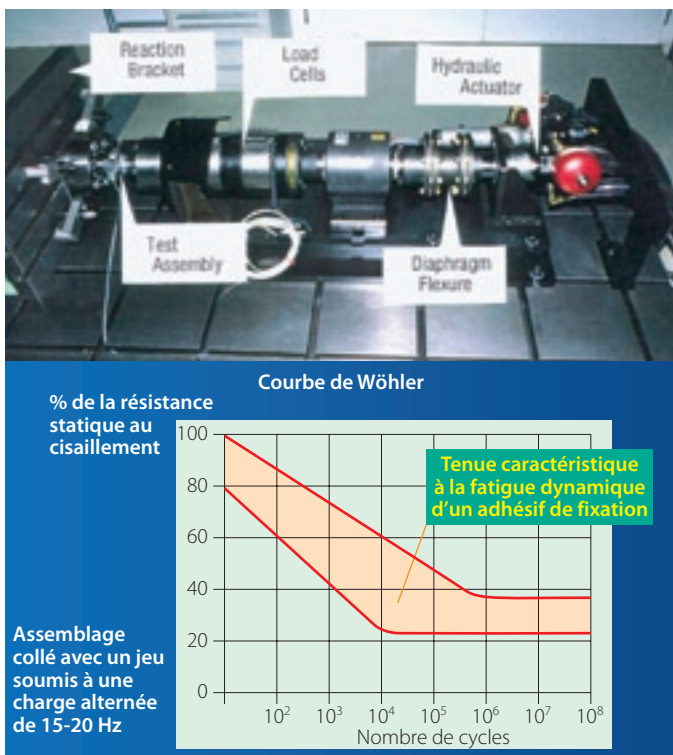
Remarque: les produits anaérobies d'assemblage des emmanchements ne sont pas recommandés pour les applications les mettant en présence d'oxygène!

Il est alors aisé d'interpréter le graphique de la figure 20... On remarque en particulier que, dans certains cas, si les efforts à transmettre nécessitent une contrainte élevée, le serrage sans collage ne pourra pas être réalisé car il serait trop important pour la résistance des matériaux, alors que le serrage associé au collage peut apporter une solution.



▲ Figure 20. L'expression de la contrainte de cisaillement en collage

À l'aide d'un banc expérimental, on détermine la tenue à la fatigue de la liaison. On obtient alors la courbe de Wöhler de la figure 21.



▲ Figure 21. Le comportement à la fatigue

Les produits adhésifs

Pour le collage des roulements, Loctite préconise le produit 603 (figure 22), qui tolère les traces grasses du roulement, que l'on peut se contenter d'essuyer soigneusement avant montage. Particulièrement bien adapté à cette fonction, ce produit présente une forte réactivité sur les substrats métalliques traités. On se



▲ Figure 22. Les produits phares

contente alors d'un montage glissant H8 ou f8 (jeu maximal de 0,15 mm).

Pour les fixations fortes du type roue dentée ou poulie sur arbre, on préférera le produit 638 (figure 22) dès l'instant que le jeu diamétral reste inférieur à 0,25 mm.

Pour des fixations fortes avec un jeu plus important (0,5 mm au maximum), on utilisera le produit 660, plus visqueux, capable de combler les jeux des clavettes et cannelures ou de tous les assemblages ayant pris du jeu du fait de l'usure.

Naturellement, on dispose d'autres produits, par exemple le 648 qui présente une forte résistance à la chaleur (il supporte 150 °C en continu), aux huiles et mélanges eau-glycol et répond au cahier des charges des constructeurs d'automobiles.

Le produit 620 supporte des températures allant jusqu'à 200 °C, et le produit 640, plus lent, convient pour l'assemblage de pièces en bronze et au frettage-collage de pièces de grande dimension.

La mise en œuvre d'un assemblage par collage

Une fois les précautions habituelles au collage prises, en particulier le nettoyage soigné des surfaces à coller, la dépose s'effectue de l'une des façons suivantes :

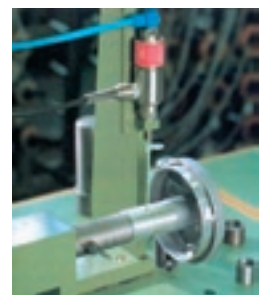
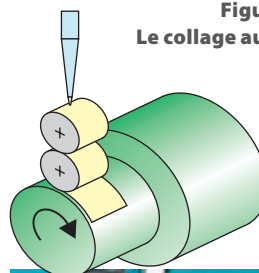
- directement à partir du flacon (figure 23) ;
- au pinceau (figure 24) ;
- à l'aide d'un applicateur à seringue (figure 25) ;
- par transfert (figure 26) ;



▲ Figure 23. Le collage d'un roulement



Figure 24. ▶ Le collage au pinceau



▲ Figure 25. Un applicateur à seringue

◀ Figure 26. Le collage par transfert

— à l'aide d'un « roto-spray » (figure 27).

Dans ce dernier cas, le produit est déposé dans une coupelle tournant à grande vitesse, percée d'un orifice latéral par lequel s'échappe l'adhésif soumis à l'effet centrifuge. Ce système convient donc à la dépose d'adhésif dans les alésages.



▲ **Figure 27. Le collage par roto-spray**

Les domaines d'application des assemblages cylindriques collés

Les principaux sont :

- le collage de roulements (figure 28) ;
- le collage de roues dentées d'arbres de boîtes de vitesses (figure 29) ;
- le collage d'outils (figure 30).

On peut assembler par collage des pièces de quelques grammes (figure 31)... ou de plusieurs tonnes (figure 32) !



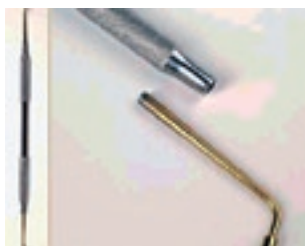
◀ **Figure 28. ▲ Le collage de roulements**



▲ **Figure 29. Le collage de roues dentées**



▲ **Figure 30. Le collage d'outils**



▲ **Figure 31. Le collage de pièces légères**



Figure 32. Le collage de pièces lourdes ▶

L'ENSEIGNEMENT DU COLLAGE INDUSTRIEL AVEC LA MALLETTE PÉDAGOGIQUE « MICROMOTEUR ET COLLAGE »

Présentation générale

Pour quoi faire ?

Cette mallette permet d'apprendre et de comprendre les bases de tout assemblage obtenu à l'aide d'adhésifs modernes, de plus en plus utilisés dans l'industrie (figure 33).



◀ **Figure 33. La mallette « Micromoteur et collage »**

Le support, ludique et sans danger, peut-être utilisé plusieurs fois pour des exercices de montage et démontage. Mais, à un moment donné, l'utilisateur dispose d'un petit moteur pneumatique parfaitement ludique, et riche d'enseignements sur les divers phénomènes physiques qu'il fait intervenir : transformation d'énergie et de mouvement, jeux et ajustements, étude des liaisons et des guidages. Pour les plus avancés dans les études, on peut prévoir des calculs élémentaires d'assemblages collés (voir le TP4 décrit plus loin).

Des prolongements évidents conduisent aux problèmes de cotation, de fabrication (étude de montages d'usinages), à des séances de DAO, les dessins conçus sous SolidWorks restant complètement disponibles.

Le public concerné et les applications envisageables

- 4^e et 3^e, en technologie : FAO ; collage ; histoire des solutions à un problème technique...
- BEP, Bac Pro MPMI : FAO selon référentiel...
- MVA : principe de fonctionnement, découverte du fonctionnement d'un moteur à 2 temps, calcul de couple, cylindrée ; collage industriel...
- 2^{de} ISI : liaisons mécaniques, dessin industriel, assemblages, animation virtuelles (avant le réel), analyse fonctionnelle, principe de fonctionnement...
- 2^{de} ISP : fabrication de pièces simples (usinages sur machines-outils traditionnelles ou à commande numérique, ajustage, collage...).
- 1^{res} et terminales STI et SSI : idem 2^{de} avec technologie de fabrication et de construction ; graphe d'interactions, FAST ; ajustements et cotation fonctionnelle ; calculs de jeux ; applications en mécanique (statique, cinématique, dynamique...); transformation d'énergie...
- STS (DPI) et DUT : analyse des liaisons mécaniques ; lois entrée-sortie ; calculs d'efforts transmissibles dans les liaisons collées ; études de fabrications, montages unitaires ou sériels, dédiés ou modulaires...
- Formation professionnelle (sections motoristes) : idem MVA...

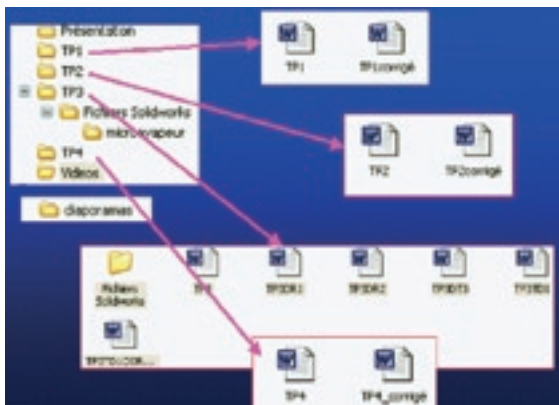
Le contenu de la mallette

- 1 micromoteur assemblé.
- 4 micromoteurs en pièces détachées.
- 1 flacon (10 ml) de produit adhésif industriel Loctite 648.
- 1 dégraissant industriel (150 ml), préparateur de surface, Loctite 7063.
- 1 cédérom, *Pour l'éducation* (figure 34), recensant les connaissances actuelles sur le collage et les adhésifs (du collège à l'université).



▲ Figure 34. Le menu général du cédérom *Pour l'éducation*

- 1 cédérom pédagogique d'accompagnement contenant tous les travaux pratiques avec leurs corrigés (figure 35).



▲ Figure 35. Le cédérom pédagogique

- Des fiches techniques et de données de sécurité des produits (adhésif, nettoyant) fournis.
- 1 kit de démontage.

Notons que les cédéroms contiennent nombre de vidéos d'applications industrielles et pédagogiques (figure 36).



▲ Figure 36. Le contenu du cédérom pédagogique

Les exercices proposés

TP1 : analyse fonctionnelle d'un mécanisme de transformation de mouvement et d'énergie puis assemblage

Application possible : en collège et lycée (figure 37).

- Analyse du fonctionnement du micromoteur.
- Vocabulaire technique.
- Analyse fonctionnelle élémentaire (limitée aux fonctions de services essentielles).
- Notions sur le collage industriel et les précautions essentielles.
- Recherche de solutions collées.
- Assemblage du micromoteur.
- Essais.



◀ Figure 37. Des extraits des TP1 et TP2 ▼

TP2 : idem TP1 avec analyse des liaisons

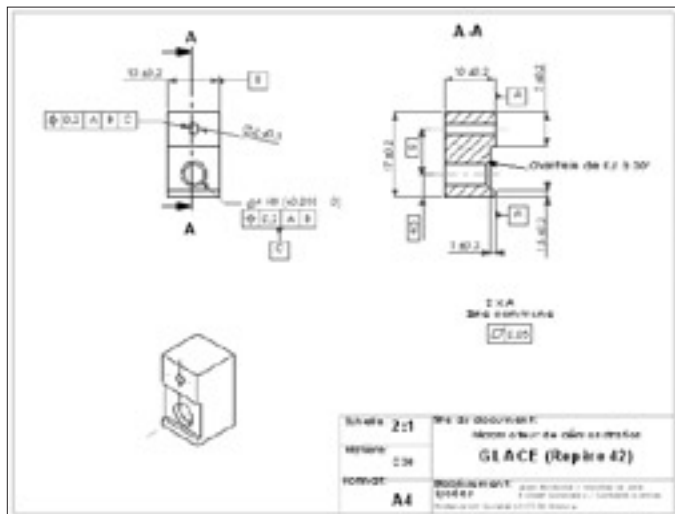
Application possible : au lycée en ISI et STI (figure 37).

- Principe de fonctionnement.
- Détermination des liaisons puis des sous-ensembles fonctionnels.
- Identification des pièces déformables.
- Râteau d'analyse ou fiche de montage-démontage.
- Graphe et tableau des liaisons.
- Schéma cinématique minimal.
- Analyse de solutions techniques, en particulier celles concernant le collage.
- Correspondance des vues sur un dessin industriel et repérage des pièces.
- Vocabulaire technique.

TP3 : idem TP1 avec analyse des ajustements

Application possible : au lycée en STI.

Ce TP est constitué de trois dossiers techniques, de deux dossiers ressources et d'un dossier «Travail demandé» (figure 38).



▲ Figure 38. Un extrait du TP3

Le premier dossier propose une analyse de la transformation d'énergie dans le moteur et débouche sur l'analyse du fonctionnement.

Le deuxième porte sur l'analyse fonctionnelle d'un moteur pour modèle réduit, proche de celui à construire, avec FAST de solutions donné en exemple.

- Analyse des solutions retenues pour le micromoteur expérimental avec modélisation des liaisons observées.
- Analyse des divers plans 2D cotés fonctionnellement.
- Règles essentielles du collage industriel.
- Calcul de jeux fonctionnels dans les ajustements.
- Assemblage.
- Diagnostic d'une panne éventuelle.

TP4 : idem TP1 avec calculs de transmissions d'efforts puis vérification par démontage

Application possible : au lycée, par exemple en STS.

Après avoir rappelé l'origine de l'étude et analysé le fonctionnement du micromoteur, l'exercice porte sur l'analyse des emmanchements collés.

- Séquence d'observation par démontage d'un micromoteur (assemblé lors de TP antérieurs).
- Séquence d'apprentissage par un dossier ressources présentant la «Fixation des emmanchements cylindriques par collage», avec accès à trois diaporamas : «Introduction au collage», «Frettages», «Collage des roulements».
- Séquence d'analyse et approfondissement des connaissances en répondant à cinq questions relatives aux encastrement collés du micromoteur.
- Séquence de calculs, afin d'évaluer l'effort nécessaire au démontage d'un sous-ensemble.
- Séquence de remontage, pour la prise en compte des contraintes particulières de préparation d'une liaison collée.

Approfondissement d'un exercice (extraits du TP4)

TP4 Lycée STS	<p>Travaux pratiques MICROMOTEUR & COLLAGE « Emmanchements »</p>
<p>2. Analyse des liaisons complètes par emmanchement collé</p> <p>2.1 Démontage du micromoteur de démonstration assemblé</p> <p>Dévisser délicatement et complètement le seul écrou en veillant à ne pas égarer le ressort hélicoïdal et les deux rondelles situées à chacune de ses extrémités. Les ranger dans une petite boîte.</p> <p>Démonter délicatement l'anneau élastique (Truarco ou Grifaxe Plus selon les cas) qui réalise l'arrêt axial du volant ainsi que la rondelle plate. Séparer du socle, sans forcer, le bloc contenant le cylindre assemblé, le piston assemblé et le volant.</p> <p>Vous devez disposer de 10 éléments, dont ceux représentés ci-dessous :</p>	
<p>Après avoir étudié le dossier ressources, répondre aux questions Q1 à Q5, en fin de dossier, dans la partie «Travail demandé».</p>	

Après repérage des sous-ensembles, nous présentons ci-après les pages comprenant questions et réponses.

TP4 Lycée STS	Travaux pratiques MICROMOTEUR & COLLAGE Dossier : « Travail demandé »
---------------------	--

Nom:	Classe:
Prénom	Date:

PREMIÈRE PARTIE : Analyse des liaisons encastrements

Q1 : Comment sont réalisées les liaisons encastrements dans les sous-ensembles nommés « socle assemblé », « volant assemblé », « cylindre assemblé » et « piston assemblé » ?

R1 :

Ces liaisons sont réalisées par des emmanchements collés.

Q2 : Rechercher (dans votre ouvrage de technologie ou ailleurs) comment réaliser autrement la liaison entre le coussinet et le socle d'une part, le tube d'admission d'air et le socle d'autre part, en précisant les avantages et inconvénients par rapport à la solution retenue ici.

R2 :

Liaison coussinet/socle	Avantages	Inconvénients
<i>Par emmanchement serré appelé aussi frettage Une documentation sur les coussinets préconise une tolérance H7 pour l'alésage</i>	<i>Emmanchement au maillet ou à la presse Peu coûteux pour une faible série ou une pièce unitaire</i>	<i>Tolérance plus serrée que la solution collée qui nécessite moins de précision, donc plus coûteux à mettre en œuvre si le coût de l'adhésif est amorti par un usage fréquent</i>
Liaison tube d'admission / socle	Avantages	Inconvénients
<i>Par emmanchement serré Par vissage</i>	<i>Idem ci-dessus</i>	<i>Idem ci-dessus Coût d'usinage élevé: filetage sur le tube et taraudage dans l'alésage, non débouchant Doit pouvoir être serré et étanché. L'adhésif réalise l'étanchéité</i>

Q3 : Rechercher (dans votre ouvrage de technologie ou ailleurs) comment réaliser autrement la liaison entre le volant et l'arbre ou le maneton, en précisant les avantages et inconvénients par rapport à la solution retenue ici.

R3 :

Liaisons volant/arbre et volant/maneton	Avantages	Inconvénients
<i>Par frettage</i>	<i>Peu coûteux</i>	<i>Nécessite un ajustement serré dont la valeur dépend du couple à transmettre Engendre des contraintes non négligeables</i>
<i>Par vissage</i>		<i>Mauvaise coaxialité et coût d'usinage élevé</i>
<i>Avec une clavette ou des cannelures</i>	<i>Transmet des couples élevés</i>	<i>Très coûteux en usinage Nécessite un arrêt axial</i>
<i>Avec des composants intermédiaires du genre « moyeux expansibles »</i>	<i>Peu d'usinage</i>	<i>Composants assez coûteux. Crée des contraintes non négligeables</i>

Q4 : Pour quelle raison n'a-t-on pas préféré usiner directement, en un seul bloc, le « piston assemblé » ?

R4 : *Le piston est en aluminium alors que la tige est en acier... En supposant que l'on ait choisi un même matériau, l'usinage en copeaux et en reprise revient certainement plus cher que l'assemblage collé.*

Q5 : Le « cylindre assemblé » est constitué de 3 éléments collés avec le produit Loctite 648 :

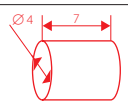
- le cylindre proprement dit, en laiton ;
- la glace, en acier ;
- le pivot en acier Ø4 f8 qui se loge dans l'alésage Ø4 H8 de la glace.

...

Comment aurait-on pu réaliser autrement la liaison glace/cylindre ?	Pourquoi avoir préféré la solution par collage ?
R5:	
Liaison	Inconvénients
Par vissage	Coûteux en usinages Pose des problèmes d'étanchéité
Par soudage	Engendre des problèmes de compatibilités avec les matériaux (laiton et acier) Crée des déformations Pas toujours étanche

Q6: Sur un dessin en perspective, proprement exécuté à main levée, porter les cotes moyennes de la zone collée transmettant les efforts entre le volant et l'axe Ø4 f8 (on peut négliger le chanfrein de l'alésage) et calculer cette surface.

R6:

Croquis coté	Calcul de la surface collée transmettant les efforts
	$S = \pi \cdot d \cdot L$ $S = \pi \times 4 \times 7$ $= 88 \text{ mm}^2$

Q7: Sachant que le produit Loctite 648 peut transmettre $\tau = 20$ à 40 MPa, calculer le couple prévisible que peut transmettre cette liaison à coup sûr ainsi que l'effort axial qu'il faut pouvoir exercer pour la rompre (essai envisageable).

R7:

Couple maximal prévisible	Effort d'arrachement nécessaire
$C_{max} = T \cdot d/2$ avec T : effort tangentiel global et $T = \tau \cdot S$ d : diamètre de la surface On obtient: $C_{max} = \tau \cdot S \cdot d/2$ $= \tau \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot d/2$ $= \tau \cdot \pi \cdot d^2 \cdot L/2$ $= 20 \times \pi \times 4^2 \times 7/2$ $= 3,52 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$	$N = \tau \cdot S$ $= \tau \cdot \pi \cdot d \cdot L$ $= (20 \text{ à } 40) \times \pi \times 4 \times 7$ $= 1760 \text{ à } 3520 \text{ N}$ Remarque le choix des valeurs de τ dans ces deux cas...

Q8: Lorsque l'on démonte un assemblage serré, on observe généralement un arrachement de certaines particules de la liaison. Est-ce le cas après démontage de cet assemblage collé ? Que peut-on constater ?

R8: Après démontage, la liaison par collage laisse des traces blanches qui sont en fait les résidus de la rupture de la colle. Au cours du démontage, ces résidus ont effectué un bourrage qui a nécessité un effort d'arrachement supérieur à celui qui a rompu initialement la liaison, offrant ainsi une sécurité supplémentaire de l'assemblage. Ils ont également eu un rôle de protection: après nettoyage soigné, le « volant assemblé » peut être reconstruit !

DEUXIÈME PARTIE: Reconstruction du «micromoteur expérimental»

Q9: Reconstruire le «volant assemblé»

- Nettoyer soigneusement au produit 7063 et sécher (avec du papier genre Sopalin).
- Vérifier le pivot-glissant correspondant à l'ajustement Ø4 f8.
- Déposer une goutte de produit Loctite 648 sur l'arbre et dans l'alésage.
- Emmancher délicatement l'arbre du côté du chanfrein, en tournant selon un mouvement hélicoïdal de va-et-vient (qui ne doit pas durer plus de 20 s) afin de bien répartir l'adhésif.
- Immobiliser l'arbre de façon que son extrémité emmanchée vienne au ras de la face opposée du volant.
- Ne plus toucher à cet assemblage pendant au moins 20 min. Ne pas le solliciter fortement avant plusieurs heures, le temps de la polymérisation complète.
- Après ce laps de temps minimal de 20 min, procéder délicatement à l'assemblage complet du micromoteur, dans le sens inverse du démontage.

Q10: Quel autre nom pourrait-on donner au «volant assemblé» si l'on considère la cinématique de la transformation de mouvement de ce micromoteur ?

R10: La transformation de mouvement entre le piston et le volant est un système «bielle-manivelle». Le volant est donc intégré à une «manivelle» ou encore à un «vilebrequin».

On peut aisément prolonger ce travail en demandant d'évaluer l'effort nécessaire au démontage de la glace et du cylindre à l'aide de l'outillage très simple fourni dans la mallette: un simple tube ouvert partiellement. Seul l'étau n'est pas inclus...

Ce produit pédagogique constitue donc un support intéressant pour l'apprentissage du collage, mais permet aussi de nombreux prolongements technologiques. ■