

---

# Bulletin de l'Union des Physiciens

Association des professeurs de Physique et de Chimie

---

## Le collage *Une alternative «moderne» aux trois techniques classiques d'assemblage : rivetage, vissage et soudage*

par Michel BARQUINS  
Directeur de Recherche au CNRS  
Laboratoire de Physique et de Mécanique des Milieux Hétérogènes  
URA au CNRS n° 857  
ESPCI - 10, rue Vauquelin - 75231 Paris Cedex 05

---

### 1. LE COLLAGE : UNE VIEILLE HISTOIRE !

Le collage est l'une des premières techniques d'assemblage d'une structure que l'homme ait utilisée en parallèle avec le coincement d'un outil et sa ligature sur un manche en bois, en corne ou en os. Cet attrait pour le collage n'est pas fortuit, il provient du fait que la nature, de tout temps et en tout lieu, a toujours été généreuse, mettant à la disposition de chacun un grand nombre de produits naturels d'origines végétale, animale et minérale tels que : glu tirée de l'écorce du houx, chair visqueuse du fruit du gui, gomme arabique extraite de certains acacias, latex de l'hévéa, sève résineuse des conifères, farines de céréales, bétuline\*, goudron de charbon de bois, jus de gousse d'ail pressée,

---

\* Brai de bouleau, obtenu par calcination de l'écorce de l'arbre.

blanc d'œuf, gomme laque produite par certaines espèces de cochenilles, cire d'abeille, caséine du lait, bitume\*, etc...

Avant l'Homme, certaines espèces de nos amies les bêtes ont utilisé et emploient encore des techniques de collage pour leur survie. A titre d'exemple, citons les araignées qui enduisent certains fils de leur toile afin de piéger les insectes dont elles se nourrissent. Signalons également le cas des moules qui ont résolu leur problème de fixation, sur les bouchots ou autres supports, dans des conditions que nous qualifions aujourd'hui de technologiquement difficiles, à savoir en milieu humide : le byssus est composé d'une protéine qui s'organise en un faisceau de filaments soyeux, lesquels adhèrent au support par interactions électrostatiques. A l'heure actuelle, on sait préparer par génie génétique la protéine et les milieux médicaux et dentaires sont très attentifs aux solutions qu'est susceptible d'apporter cette protéine aux problèmes d'adhésion et de suture en chirurgie.



**Figure 1** : Réplique d'une faucille à moissonner datant d'environ 3 500 ans avant notre ère.

Photographie : Patricia ANDERSON - Institut de Préhistoire Orientale, C.N.R.S., Jalès.

Les premières manifestations de l'utilisation de la viscosité et de la plasticité conférant aux matières naturelles leur pouvoir adhésif remontent à plus de trente siècles avant notre ère\*\*. La figure 1 montre, à titre

\* Substance naturelle minérale fossile que l'on trouve généralement dans les bassins sédimentaires.

\*\* La découverte très récente en Syrie d'un silex, datant d'il y a cinquante mille ans, sur lequel on observe des traces de bitume (Pour La Science, novembre 1993, page 20) est susceptible de faire reculer très loin dans le temps la première fabrication et utilisation d'un outil collé.

d'exemple, la réplique d'un couteau à moissonner découvert dans le site sous-lacustre d'Auvergnier, près du lac de Neuchâtel en Suisse, appartenant à la culture de Courtaillod vieille de cinq mille sept cents ans environ. Ce couteau, ou faucille, est constitué d'une lame de silex longue d'une dizaine de centimètres coincée dans une fine rainure ménagée dans le manche en bois et maintenue en place à l'aide de bétuline. En France, des fouilles entreprises dans les stations lacustres des lacs de Clairvaux et de Chalain, dans le Jura, ont permis de mettre à jour un certain nombre d'armes et d'outils utilisés par les palafitteurs, tels que des haches de pierre avec leur manche auquel elles étaient collées à l'aide d'un mastic résineux.

Aux époques les plus reculées, le collage n'était pas uniquement réservé à la réalisation d'assemblages devant supporter des efforts mécaniques. Cette technique fut très tôt utilisée pour maintenir en place sur un support non noble un revêtement décoratif. A titre d'exemple, on peut évoquer le lion en bois découvert dans les années 1930 par M. de Mecquenem à Suse, dans l'actuel Iran, à la suite d'un sondage pratiqué sous l'acropole, dont l'âge est estimé à 3300 ans avant notre ère. Ce lion magnifique est recouvert d'une plaque en or maintenue sur la surface du bois à l'aide de bitume utilisé comme liant intermédiaire. Beaucoup plus tard, au Moyen Age, on utilisa le blanc d'œuf pour coller les feuilles d'or des manuscrits enluminés.

Des documents égyptiens que l'on estime vieux de trois mille ans témoignent de la pratique du premier collage par fusion («Hot Melt» actuel). On l'utilisait pour assembler des lames dans leur manche et des pointes de flèches dans leurs tiges, à l'aide de soufre. Après avoir subi une enduction de soufre, les lames et pointes étaient emmanchées sur leur support puis chauffées à une température voisine de 115°C afin de provoquer la fusion du soufre. La solidification du soufre par refroidissement assurait la cohésion de l'assemblage souhaité. Plus tard, selon le même principe, les Romains utiliseront le plomb.

Ces mêmes Romains mirent au point, sans doute par jeu et aussi très certainement pour agrémenter leurs repas, le collage par contact dont firent les frais les petits oiseaux qui venaient se poser sur des planchettes enduites de glu et y restaient piéger. Phéniciens et Romains, pour coller le bois, utilisaient fréquemment des os écrasés et des déchets de poissons pour fabriquer des colles d'origines animales. Ce type de colle mélangé d'ocre, de calcaire et de différentes terres broyées était couramment utilisé dans l'antique Égypte pour peindre les sarcophages.

Il s'agit bien là d'une réelle opération de collage, puisque l'adhésif a pour effet de fixer les pigments de diverses couleurs sur un substrat.

Les Phéniciens, les Grecs et les Romains, tout comme le pratiquent encore les pêcheurs européens qui rendent étanches les assemblages de planches en bois de leurs bateaux à l'aide d'un mélange de chanvre, de sisal et de poix, calfataient les bateaux à l'aide de compositions, à base de térébenthine (extraite du pistachier résineux appelé térébinthe), de cire d'abeille, de goudron de charbon de bois et de bitume, qui présentaient un excellent rempart contre l'humidité et une durée de vie convenable.

Les anciens Égyptiens pouvaient revendiquer d'avoir trouvé les premiers deux industries majeures, celle de la préservation des aliments et celle des matières plastiques. En effet, on a pu mettre en évidence que les jarres remplies d'épices, découvertes dans la tombe de Toutânkhamon à Thèbes en 1922 par Lord Carnavon et Howard Carter, étaient hermétiquement scellées avec de l'asphalte fondue\*.

Depuis la plus haute antiquité, la cire d'abeille, de couleur naturelle ou diversement pigmentée, fut utilisée pour les sceaux, technique qui permettait à la fois de fermer très symboliquement un pli et de graver par moulage, d'un corps dur formant matrice, en pierre ou en métal, une signature attestant l'identité de l'expéditeur.

En Égypte, à partir de la conquête d'Alexandre Le Grand, en 331 avant l'ère chrétienne et jusqu'à l'invasion arabe conduite en l'an 641 de notre ère par le général 'Amr Ibn Al-As, une activité quasi industrielle prend toute son ampleur, celle de la cellulose, sous la forme de la fabrication des papyrus dont les premiers exemplaires remontent au XVIII<sup>ème</sup> siècle avant notre ère. Le papyrus, cet ancêtre du papier, était fabriqué soit à partir de la moelle d'un roseau, le *Cyperus papyrus*, soit à partir du cœur de l'herbe d'une variété du souchet. Des bandes étaient coupées, placées en croix en deux couches superposées, mouillées à l'eau du Nil puis séchées. Les feuilles ainsi obtenues étaient ensuite pressées et martelées, le jus exsudé servant de colle, et la finition consistait en un polissage fin. Cette industrie très prospère fournissait aux commerces locaux et exportateurs une grande variété de qualités de feuilles allant du papyrus royal, très fin réservé à l'écriture, à une forme beaucoup plus emporetique et grossière destinée à l'emballage. Papyrus

---

\* Mélange naturel de calcaire, de silice et de bitume.

détériorés et archives périmées étaient vendus à bas prix aux fabricants de cercueils qui les malaxaient et les agglutinaient pour former une espèce de cartonnage en «papier mâché» dont on enveloppait les momies avant de les recouvrir des traditionnelles inscriptions funéraires. Ainsi, dès cette époque lointaine on pratiquait déjà le recyclage !

Pour ce qui concerne le papier, sa préparation fut mise au point par les Chinois : pour certains, par Mong-Tien il y a quelque 210 ans avant notre ère, et pour d'autres, par Tsai-Lun, vers l'an 105 de notre ère. Le papier était initialement fabriqué feuille à feuille avec des chiffons de lin, de chanvre et de coton et il parvint en France au XII<sup>ème</sup> siècle environ de notre ère, par le truchement des Arabes et des Turcs. Comme pour le papyrus, la matière première est végétale, il s'agit de cellulose. A cette même époque on colle le bois avec du lait caillé mélangé à de la chaux. Les premières plaques à imprimer chinoises, réalisées en l'an 1040 par le chinois Pi Sheng, étaient obtenues par collage sur bois, à l'aide de résine de conifères, de caractères réalisés en terre glaise cuite.

Au XV<sup>ème</sup> siècle, l'essor de la typographie et de l'imprimerie a pour conséquence une utilisation croissante des colles d'origines végétale et animale. En effet, la fabrication du papier consomme une énorme quantité de colles : gélatine, colle de fécule, colle de résine, etc..., dont le choix est conditionné par la qualité souhaitée du papier. On constate rapidement que l'ajout de charges minérales à la colle, telles que talc et kaolin, a pour effet d'augmenter l'opacité du papier et d'améliorer son imperméabilité. Sans colle, le papier à lettre serait un véritable buvard !

Quant aux papiers peints d'ameublement, qui sont issus de l'art des imagiers médiévaux, ils étaient ornés, jusqu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle, de motifs peints à la colle, d'où leur nom. Ils ont d'abord été collés sur le plâtre au moyen d'une colle de pâte obtenue en mélangeant et en chauffant de la farine et de l'eau, on améliora ensuite le comportement à l'humidité et aux moisissures en dispersant un peu de plâtre au sein de la colle. Dès le XIX<sup>ème</sup> siècle, des collages, plus performants encore, furent réalisés avec les amidons et les féculs. Plus résistants, ils devenaient également moins sensibles aux bactéries.

Pendant des siècles la technologie du collage n'a évolué que très lentement. Par exemple, les sceaux à la cire d'abeille pour cacheter les enveloppes étaient encore couramment utilisés au XVIII<sup>ème</sup> siècle alors que le collage de simples papiers se faisait à l'aide de bâtonnets à base

de gomme arabique, de sucre et d'ingrédients parfumés divers. Le cachetage par sceaux disparut au profit du gommage des enveloppes à l'aide d'un mélange de gomme arabique et de sucre puis à celui, plus économique, de colle d'os, de dextrine et de glucose.

Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, se développent l'emballage ainsi que l'étiquetage, d'abord manuels puis automatiques, à l'aide de papier kraft gommé, le gommage étant à base de sucre, tandis que l'industrie aéronautique, bien que toute naissante, a déjà ses préférences pour les colles à base de caséine du lait. Mais le développement des adhésifs synthétiques ne va pas tarder à prendre toute son ampleur, il va nous faire passer du progrès de la technique au progrès technique proprement dit. A titre d'exemple, pour les étiquettes, les timbres et autres objets du même type (comme les chatoyantes «gommettes», à la maternelle), on est passé dans un premier temps du papier à coller, puis au papier préencollé qu'il suffit d'humecter (timbres, feuilles de papier gommé à cigarettes, papiers peints), pour aboutir actuellement au papier auto-adhésif, autrement dit l'autocollant, dont l'usage est multiple, immédiatement prêt à l'emploi après décollement de son support siliconé.

On ne peut pas évoquer l'histoire du collage, même de manière succincte, en occultant celle du caoutchouc naturel, le cis-polyisoprène. Souvenons-nous que cet élastomère, issu du latex circulant dans l'écorce interne tendre d'un certain nombre de variétés d'hévéas, était connu des Olmèques qui vivaient voici quelque trois milliers d'années dans la région chaude de l'actuel golfe du Mexique. Le latex proprement dit, ou sa forme caoutchouteuse après coagulation à l'air, outre son caractère sacré et son utilisation lors de rites sanglants, servait en de nombreuses autres occasions, pour façonner des objets utilitaires et pour imperméabiliser des toiles. C'est sur ce dernier emploi qu'il convient d'insister, par le fait même qu'il suggère l'association des concepts de collage et d'étanchéité. En d'autres termes, un bon collage n'implique-t-il pas nécessairement un assemblage étanche ? La question est d'ores et déjà posée.

Depuis l'époque des Olmèques, après la redécouverte du caoutchouc, il y a tout juste cinq siècles par Christophe Colomb, puis par Charles Marie de La Condamine en 1736, il faut attendre 1823, date à laquelle l'Écossais Mac Intosh réinvente l'imperméabilisation des tissus en découvrant le solvant idéal du caoutchouc, le naphta\*. Puis en 1839, Charles Goodyear découvre fortuitement le mécanisme de la vulcanisa-

---

\* Huile de houille, ou encore, bitume liquide.

tion du caoutchouc par chauffage en présence de soufre, en réalisant des ponts inter et intramoléculaires du type carbone-soufre-carbone entre les molécules de caoutchouc provoquant ainsi l'élasticité de la structure nouvelle obtenue. On venait de faire le premier pas vers les nouveaux procédés synthétiques par intervention physico-chimique sur une molécule naturelle, et même une macromolécule, pour cet exemple précis.

Les colles fabriquées industriellement à partir du caoutchouc naturel, par dissolution dans un solvant organique, apparaissent un peu avant la Première Guerre mondiale. On les appelle, sans faire preuve de beaucoup d'imagination, «dissolutions» et elles trouvent leur application directe dans la confection des pneumatiques, en ce que l'on nomme aujourd'hui le collage par contact, c'est-à-dire, par simple application les unes sur les autres de plaques encollées de caoutchouc. Ces «dissolutions» sont actuellement toujours utilisées pour réparer, à l'aide d'une rustine prédécoupée, une chambre à air percée.

Bien que découverte en 1846 par Schönbein, la nitrocellulose ne trouve son utilisation dans la fabrication des colles qu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle, particulièrement dans l'industrie de la chaussure. De même, un long moment a passé entre les premières études de la réaction des phénols sur le formol, entreprise par Otto Bayer dès 1872, et l'année 1912 qui voit le chimiste américain d'origine belge Léo Bæckeland réussir la mise au point industrielle du premier produit adhésif à base de résine phénolique. Il est fabriqué sous le nom de bakélite<sup>®</sup>, par l'usine Rütgen-Werke-Hochst, et est destiné tout particulièrement au collage du bois.

L'industrie du bois contre-plaqué se développe au début du siècle actuel en même temps que la mise au point des colles de caséine, découvertes en 1897 par le chimiste allemand Spitteler, lesquelles vont rapidement être détrônées par les colles d'urée formol dans les années 1925-1930. Il convient de souligner que jusqu'alors les industriels restaient toujours tributaires plus ou moins directement des produits naturels, mais la situation change brutalement avec la fabrication des résines synthétiques et le développement de la chimie des macromolécules.

Dans les années 1940 apparaît à la fois aux USA, en Grande-Bretagne et en Allemagne, le collage métal-métal, à la suite d'études entreprises sur le collage caoutchouc-métal, bois-métal et la mise au point des polyuréthanes et des colles phénoliques. La liaison métal-

colle-métal était si résistante que l'on osait faire travailler mécaniquement ces assemblages et les utiliser dans la construction des avions ; la notion de colle structurale était née, il s'agissait là d'une révolution extraordinaire. L'expression «collage structural» est couramment utilisée aujourd'hui pour rendre compte qu'un assemblage collé est capable de supporter des efforts importants. Ainsi, actuellement les pare-brise des automobiles sont collés, non pas pour des raisons purement esthétiques, mais principalement pour participer à la résistance mécanique de l'habitacle du véhicule.

A la même époque, voient le jour, d'une part les résines époxy, permettant d'effectuer des collages sous faible pression, et d'autre part, les polymères silicones. Ces derniers présentent une excellente adhésion avec les matériaux à base de silice comme les verres et les céramiques, par suite de l'interaction forte silicone-silice. Ces polymères, dont la mise en œuvre est aisée et permet l'ajout d'ingrédients divers, sont utilisés soit pour coller, soit pour jouer un simple rôle de joints d'étanchéité et/ou de dilatation thermique. A titre d'exemple, les vitrages extérieurs de la Pyramide du Louvre à Paris ont été jointoyés à l'aide de mastic silicone.

Après la Deuxième Guerre mondiale, d'une technique ou d'un art, avec divers tours de main astucieux et plus ou moins compliqués, le collage empirique devient une science, c'est-à-dire que commencent, dans les laboratoires de recherche et de développement, les études des lois du collage, du vieillissement et de la durée de vie des assemblages collés. Divers théories et modèles sont proposés pour comprendre les mécanismes du collage, pour déterminer les principaux paramètres actifs ainsi que leurs importances respectives selon les conditions de réalisation de l'assemblage souhaité.

Bien évidemment, au cours de la période d'après guerre, des produits nouveaux voient naturellement le jour, comme les cyanoacrylates. Egalement, compte tenu de sa rapidité d'exécution, un collage fort ancien connaît à nouveau une vogue extraordinaire comme le «Hot Melt» ou collage par fusion déjà signalé, en particulier avec les copolymères acétate de vinyle-éthylène (EVA), qui intéresse la reliure des livres, les chaussures, le contre-plaqué, les assemblages polymère-métal. Pour le blocage des vis et des assemblages cylindriques, la fixation et l'étanchéité, apparaissent les colles anaérobies dans les années 1950-1955. Quant à la décennie suivante, c'est au tour du

développement des polyimides qui, en plus d'un bon comportement aux contraintes mécaniques, résistent à des températures de plus de 350°C.

A l'heure actuelle, les colles d'origines naturelles, végétale et animale, sont toujours utilisées mais en les combinant le plus souvent avec des adhésifs synthétiques, principalement dans les industries du bois, du papier, de la photographie et dans la fabrication des abrasifs. De nos jours, il existe une bonne dizaine de milliers de formulations de colles synthétiques, réalisées à partir de quelques colles de base, et cela par le jeu des mélanges et le nombre des additifs qui conduisent à la fabrication de produits adhésifs souvent équivalents mais commercialisés sous des noms différents.

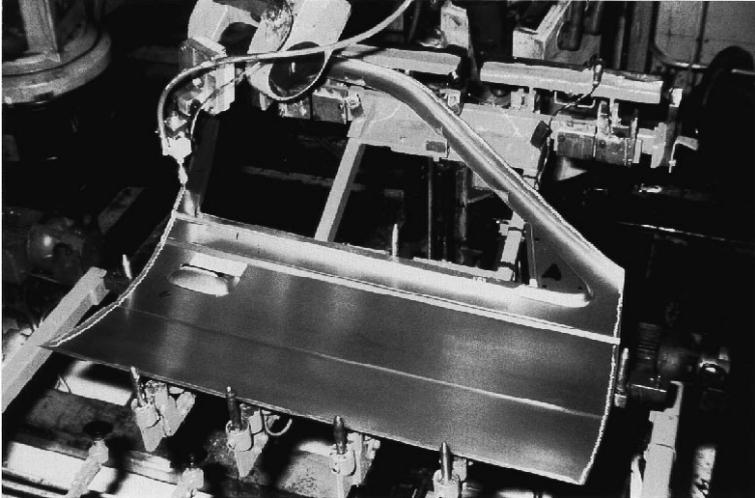
## **2. JE COLLE, TU ENDUIS, NOUS MASTIQUONS, ..., ILS ADHÈRENT !?**

Pour réaliser un assemblage autrement que par un moyen mécanique, tel que accrochage, agrafage, ajustage, amarrage, boulonnage, boutonnage, calage, clavetage, clouage, coincement, couture, emboîtement, encastrement, enchâssement, épinglage, épissure, fermeture à glissière, imbrication, ligature, pliage, rivetage, sertissage, suture, tissage, vissage, etc..., qu'utilise-t-on et pour quoi faire ? En d'autres termes, colle, résine, produit adhésif, mastic, etc..., représentent-ils des produits différents pour coller, faire adhérer, créer une adhésion, assurer une échançabilité, etc... ?

Il s'agit d'un problème de sémantique qu'il convient de résoudre de la manière simple suivante : on appelle «colles» les substances servant à assembler des corps solides par interposition à leurs surfaces et le résultat obtenu est un «collage», lequel laisse un film distinct, qui peut être très mince, de produit adhésif entre les deux solides réunis. Ainsi, on colle à l'aide d'étain deux fils de cuivre pour assurer un contact électrique, on colle à l'aide de mortier deux moellons pour faire un mur, on colle à l'aide de mastic deux plaques de béton pour accommoder les dilatations thermiques. Dans une automobile, on colle le pare-brise, et sur sa face interne la vignette et le rétroviseur intérieur, on colle des joints (figure 2), des garnitures en étoffe ou en matières plastiques rigides ou souples, etc..., à l'aide des produits adhésifs les plus appropriés.

En revanche, on soude par chauffage deux feuilles de la même matière plastique pour assurer une étanchéité, on soude deux tôles métalliques par poinçonnement pour les réunir, on soude par fusion

partielle deux morceaux de verre, la réduction d'une fracture osseuse consiste en une soudure. Ainsi, par opposition au collage, la soudure ne fait pas intervenir un autre matériau que ceux déjà en présence. Dans la suite, nous nous intéresserons exclusivement au collage.



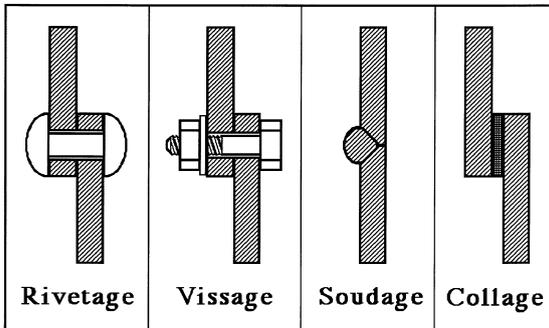
**Figure 2 :** Dépose d'un cordon de colle par un robot sur une portière avant d'un véhicule de tourisme.

Photographie : Elf Atochem S.A.

Pour clore le problème de la sémantique, remarquons que malgré, ou du fait de la fréquence de plus en plus importante des opérations de collage dans la vie quotidienne, on constate que le langage populaire associe aux colles la notion injustifiée de faible résistance mécanique, et aux produits adhésifs ou résines, une grande fiabilité et une résistance plus importante, vraisemblablement par suite de la haute technicité que suppose la fabrication de tels produits. On entend parler parfois de colle «forte» pour définir les qualités supérieures d'un produit par rapport à une autre colle qui ne donne pas satisfaction. En fait, une colle ou une résine présente les propriétés adhésives attendues et répond au problème posé chaque fois qu'elle est employée dans les conditions prévues de son utilisation. En d'autres termes, il est possible de tout coller mais pas avec n'importe quoi et n'importe comment !

### 3. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU COLLAGE

Le collage trouve des applications dans tous les domaines industriels, il est devenu une technique d'assemblage au même titre que le triangle classique rivetage - vissage - soudage (figure 3) et l'on sait aujourd'hui coller tous les matériaux. Il est vrai que le collage présente un très grand nombre d'avantages tant du point de vue de sa mise en œuvre que celui de la qualité des assemblages réalisés ; en contrepartie, certaines précautions d'emploi doivent être observées, et la conception des pièces doit nécessairement prendre en compte ce procédé particulier d'assemblage.



**Figure 3 :** Le collage : une alternative «moderne» aux trois techniques classiques d'assemblage.

Pour ce qui concerne les avantages, signalons en tout premier lieu, l'augmentation de la cadence de fabrication, par suite d'une part, d'un moindre besoin de pièces à assembler et d'autre part, de la rapidité de l'application du produit adhésif qui, de plus, est souvent automatisée. Le collage est parfaitement adapté à l'assemblage des matériaux différents, des matériaux fragiles et des matériaux minces : la colle forme un joint continu entre les solides au travers duquel se transmettent parfaitement les efforts mécaniques. La résistance mécanique est supérieure à celle produite par le rivetage, à moins de placer un rivet tous les millimètres, ce qui aurait pour conséquence immédiate de provoquer un déchirement.

Plus particulièrement pour les matériaux métalliques, par rapport au soudage à haute température, le collage permet de conserver les caractéristiques des traitements thermiques réalisés si bien qu'il n'entraîne pas de modification des dimensions des pièces et, au besoin,

permet même de rattraper les dépassements de tolérances d'usinage. Le gain de poids par rapport aux techniques mécaniques énumérées précédemment intéresse particulièrement les applications destinées à l'aéronautique ainsi qu'à l'astronautique. Le fait d'obtenir un joint de colle continu supposé étanche évite les couples galvaniques lors de l'assemblage de métaux différents.

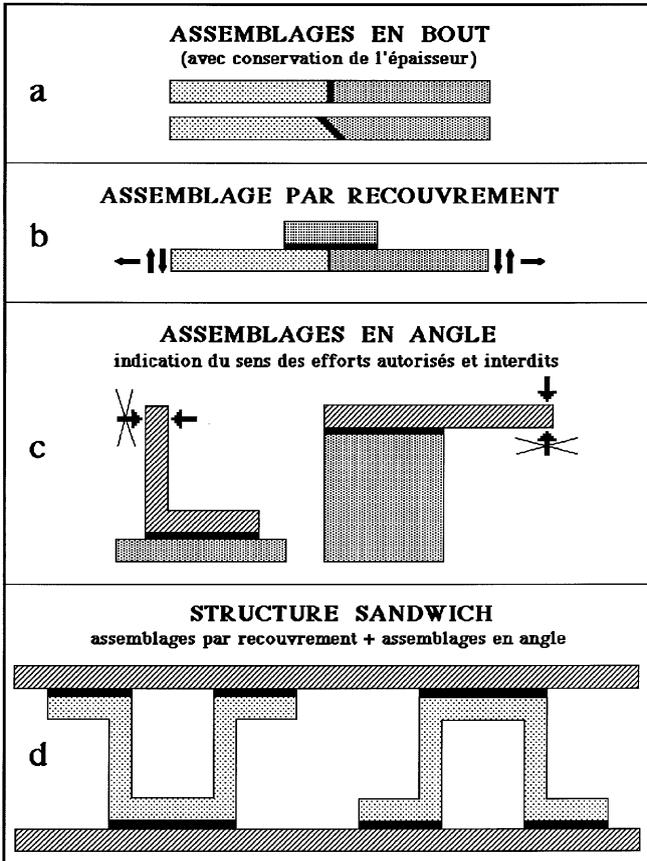


Figure 4 : Principaux types de joints collés.

N'oublions pas non plus l'amélioration de l'aspect esthétique apportée par le collage, les surfaces extérieures des assemblages pouvant être parfaitement lisses, ce qui ne peut qu'améliorer la résistance à l'air en aéronautique, par exemple. Autre avantage : les

films de colle absorbent les vibrations et apportent une isolation à la fois électrique, thermique et phonique ainsi que, selon le cas, une certaine perméabilité ou imperméabilité à la vapeur d'eau, ce qui, il est vrai, ne constitue pas nécessairement un avantage.

Pour ce qui concerne les inconvénients, leur énumération s'impose d'elle-même en reprenant la définition du collage : coller c'est prendre deux solides, appliquer sur les surfaces (ou sur l'une des deux) un produit adhésif liquide (ou susceptible de le devenir) et le solidifier afin d'assurer une liaison intime, forte et stable dans le temps entre les deux solides en contact.

Ainsi, cette opération d'assemblage implique la résolution des trois problèmes suivants :

**1** - choix des formes et des dimensions adéquates des surfaces des solides à réunir en évitant, en particulier, toute localisation de contraintes. A titre d'exemples, la figure 4 montre les quatre principaux types de joints collés :

**a** - collage en bout, comme le pratiquait naguère le raccommodeur de faïences et de porcelaines, et comme le pratiquent toujours les archéologues et autres restaurateurs. Ces collages ne supportent pas d'importants efforts mécaniques ;

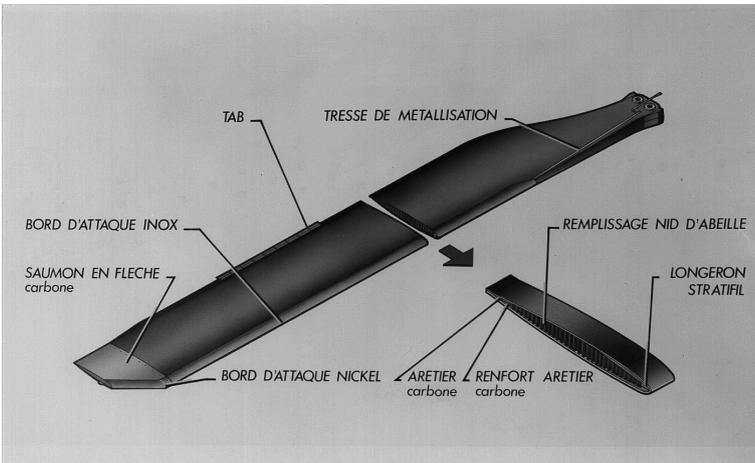
**b** - collage par recouvrement, beaucoup plus résistant que le précédent et surtout le plus fréquemment utilisé, par exemple, pour réunir les deux parties d'une feuille de papier déchirée à l'aide d'un ruban adhésif, pour cacheter une enveloppe, pour ressemeler une chaussure, pour fixer une moquette, pour assembler les divers éléments nécessaires à la réalisation d'un boîtier de montre, pour coller un pare-brise sur une carrosserie, pour fabriquer un bouchon de champagne, pour étiqueter une bouteille, pour fixer les verrous orthodontiques (figure 5), etc... ;

**c** - collage en angle, pour confectionner des structures complexes, comme les skis, comme les charpentes en bois lamellé-collé. Une telle charpente, de forme sphérique, soutient le dôme de la salle de cinéma Imax en bordure de l'esplanade à Paris-La Défense ;



**Figure 5 :** Verrous orthodontiques : prothèses dentofaciales, ici en céramique, collées pendant une courte durée (dix-huit à trente six mois), pour améliorer les aspects fonctionnel et esthétique d'une dentition.

Photographie : Éric SERFATY.



**Figure 6 :** Structure d'une pale d'hélicoptère.

Photographie : Eurocopter - Aérospatiale.

*d* - la structure «sandwich», laquelle associe les deux types de joints par recouvrement et en angle et allie ainsi robustesse, souplesse et légèreté. Un type très voisin, appelé structure en nids d'abeilles, est utilisé dans la fabrication des pales d'hélicoptère et confère une grande fiabilité à ces organes vitaux (figure 6).

**2** - préparation de la surface des solides à coller, autrement dit, application aux surfaces de traitements mécaniques et physico-chimiques, opérations en général coûteuses mais indispensables pour éliminer les impuretés, augmenter l'énergie de la surface, accroître l'accrochage mécanique et favoriser le mouillage\*.

**3** - choix du produit adhésif en fonction de nombreux critères liés à la nature même des solides, aux conditions auxquelles sera soumis l'assemblage, à la forme liquide ou solide à bas point de fusion de l'adhésif, à ses caractéristiques de mouillabilité, à sa facilité d'application sur les surfaces ainsi qu'aux conditions et à la durée de la solidification, temps de séchage (durée de prise de la colle), par exemple.

Quant au joint adhésif ainsi réalisé, dont le démontage et le repositionnement des éléments sont deux opérations bien évidemment impossibles à envisager, on souhaite en contrôler la qualité, en mesurer la résistance mécanique et en estimer la durée de vie. Ces paramètres ne sont accessibles qu'à partir des résultats d'une étude préliminaire fine, et/ou d'expériences témoins conduites en parallèle pendant la fabrication, consistant à détruire le produit collé. Il existe également des contrôles non destructifs, ils sont utilisés chaque fois que la forme, la structure et les dimensions de l'assemblage collé le permettent.

Parmi toutes les colles existantes, certaines ne résistent pas à la chaleur, au froid ou aux chocs thermiques, d'autres présentent un mauvais comportement à la lumière, d'autres encore, techniquement parfaites pour l'utilisation envisagée, s'avèrent trop onéreuses compte tenu de la grande superficie à encoller, si bien qu'il n'existe pas de colle universelle alliant toutes les qualités à la fois.

En revanche, un très large éventail de produits adhésifs est aujourd'hui offert par les nombreux manufacturiers de sorte qu'il existe pour chaque problème posé un compromis acceptable et souvent même

---

\* Ces différents concepts seront examinés dans le chapitre suivant.

judicieux. A l'heure actuelle, le plus grave inconvénient est sans conteste le manque de fiabilité des joints collés, le plus grand problème étant la sensibilité à l'environnement et plus particulièrement à l'humidité.

#### **4. LES THÉORIES ET MODÈLES DE L'ADHÉSION, LES MÉCANISMES DU COLLAGE**

Les progrès technologiques aidant, l'utilisation de matériaux composites et multicouches est de plus en plus fréquente, aussi, la fiabilité et les performances de ces assemblages dépendent bien évidemment de la bonne tenue du collage, c'est-à-dire de la grande cohésion des interfaces formées que l'on peut décrire schématiquement par l'association «solide 1 - colle - solide 2». Ainsi, les nombreuses applications industrielles du collage expliquent le notable regain d'intérêt dans la recherche des mécanismes fondamentaux régissant l'adhésion des solides.

Par les faits mêmes que l'on s'intéresse soit à la formation de l'interface «colle - solide» ou à sa destruction, que l'analyse de cette interface, à caractère mécanique ou/et physico-chimique, est effectuée à une échelle plus ou moins fine, il est aisément compréhensible que l'adhésion recouvre un nombre certain de concepts et que son étude implique nécessairement plusieurs disciplines scientifiques dont les principales sont : la rhéologie des matériaux, la mécanique de la rupture de ces matériaux, la physico-chimie des polymères ainsi que celle des surfaces et des interfaces. Compte tenu de la pluridisciplinarité qu'implique la notion d'adhésion, il n'est pas étonnant de constater dans la littérature scientifique spécialisée la coexistence de plusieurs modèles ou théories. Cela signifie en tout premier lieu que la théorie de l'adhésion n'a pas encore été découverte et que chacun emploie le modèle le plus représentatif des phénomènes observés dont le domaine de validité est souhaité le plus large possible.

##### **4.1. Quelques considérations d'ordre général**

La cohésion d'un corps est assurée par l'existence de forces qui agissent en son sein et chaque molécule est soumise à des interactions avec toutes ses plus proches voisines de sorte que la résultante des interactions est nulle. Par contre, à la surface, une molécule se trouve soumise à une résultante non nulle dirigée vers l'intérieur et qui tend à réduire la surface. C'est la raison pour laquelle, lorsque l'on approche

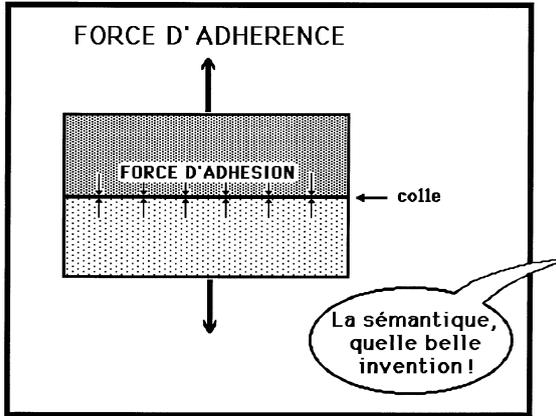
deux solides l'un de l'autre, des forces d'attraction moléculaire se manifestent avant même que le contact soit établi. Elles sont mesurables dès que la distance devient inférieure à quelques dixièmes de micromètre et augmentent jusqu'à la réalisation du contact. Ces forces viennent s'ajouter aux efforts extérieurs, de la même manière que le champ magnétique accroît la pression d'appui d'un aimant posé sur un substrat en fer doux.

Les forces d'attraction moléculaire ont une intensité qui dépend à la fois de la nature des liaisons assurant la cohésion des matériaux et de la présence d'éléments étrangers tels que couches d'oxydes et contaminants divers. Ces forces sont responsables de l'adhésion naturelle des solides et produisent au niveau des rugosités émoussées, lorsque celles-ci sont déformées de manière élastique, des zones de contact plus larges que ne le prévoit la mécanique classique.

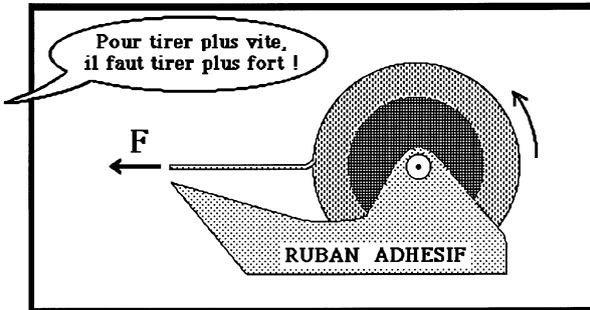
Il est bien connu aujourd'hui que les solides élastiques isotropes sont caractérisés par un certain nombre de paramètres, tels que le module d'élasticité (module de Young)  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$ , lesquels reflètent le comportement des forces intermoléculaires pour des petits déplacements des atomes au voisinage de leur position d'équilibre et  $2\gamma$ , qui représente l'énergie qu'il faut dissiper pour séparer, de manière isotherme et réversible, deux parties du solide suivant un plan imaginaire de surface unitaire, en coupant les liaisons rencontrées ; ainsi  $\gamma$  est l'énergie superficielle du solide considéré, laquelle est tout naturellement directement liée à la nature des forces de liaison assurant la cohésion du solide. A titre d'exemples, les matériaux métalliques et covalents ont des énergies superficielles très élevées, de l'ordre de 1 à 3 J/m<sup>2</sup>, pour les cristaux ioniques la gamme d'énergies s'étend de 100 à 500 mJ/m<sup>2</sup>, quant aux matériaux moléculaires, leurs énergies superficielles sont inférieures à 100 mJ/m<sup>2</sup>, ordre de grandeur de la liaison hydrogène et des forces de van der Waals.

Il convient de signaler que dans une atmosphère ordinaire, l'air ambiant par exemple, les forces les plus intenses, qui sont à très court rayon d'action, sont écrantées par les films d'oxyde, les couches de molécules absorbées et toute contamination extérieure présents sur la surface exposée de sorte que la contribution des forces de van der Waals, dans cette situation, devient prépondérante. Si l'on élimine la contamination atmosphérique, les couches d'oxyde peuvent alors réagir par des liaisons polaires coordinantes, appelées aussi liaisons donneur-

accepteur ou encore liaisons acide-base, ou par des liaisons ioniques plus intenses.



**Figure 7 :** Convention de langage : selon la norme NF T 76-001 (1981), l'adhésion est un phénomène physique, chimique ou physico-chimique qui produit l'adhérence.



**Figure 8 :** Exemple de différence entre force d'adhésion (entre chaque couche) et force d'adhérence  $F$  (pour dérouler une longueur de couche).

Le calcul et/ou la mesure de la force d'attraction (que l'on peut appeler **force d'adhésion**) en fonction de la distance des solides que l'on rapproche, ne permet pas d'en déduire la force qu'il faut appliquer pour séparer les corps une fois le contact établi. En effet, cette force de séparation, appelée communément **force d'adhérence** (figure 7), dépend d'un grand nombre de comportements mécaniques et de paramètres environnementaux (déformations élastique, viscoélastique ou plastique des solides en contact, vitesse de rupture, caractéristiques mécaniques

de l'appareil de mesure de la force, présence de contaminants, température et hygrométrie ambiantes, etc...). A titre d'exemple, les forces qui lient entre elles les différentes couches d'un ruban adhésif sur son rouleau débiteur sont de même intensité (ce sont des forces d'adhésion, qui dépendent de la nature de l'adhésif utilisé), en revanche lorsque l'on souhaite décoller une certaine longueur du ruban, la force qu'il faut appliquer (autrement dit, la force d'adhérence) dépend en tout premier lieu de la vitesse de tirage que l'on impose (figure 8).

Lorsque l'on désire séparer en deux un solide ou détruire un assemblage collé, la nécessaire rupture des liaisons assurant la cohésion du système impose que la séparation ne s'effectue jamais d'un seul bloc, mais par propagation d'une fissure à partir d'un défaut macro ou microscopique préexistant. Cette fissure chemine plus ou moins rapidement en rompant successivement les liaisons rencontrées, suivant un mode similaire au fonctionnement d'une fermeture à glissière. Il convient d'ailleurs de signaler que, comme dans le cas du curseur d'une fermeture à glissière, la pointe de fissure ne voit un éventuel défaut (point dur ou bulle) qu'au voisinage immédiat de ce dernier.

De plus, la propagation de la fissure produit des déformations dissipatrices d'énergie, induisant une relation directe entre les effets rhéologiques et la force d'adhérence dont la valeur est fonction de la vitesse à laquelle on effectue la séparation. Ainsi, à chaque instant, la fissure adopte la célérité de propagation telle que l'énergie dissipée correspondante équilibre très exactement l'énergie élastique restituée du fait de la séparation.

Le premier à avoir couplé les propriétés d'élasticité des solides ( $E$  et  $\nu$ ) et leur propriété superficielle ( $\gamma$ ) fut Griffith en 1920 en écrivant que pour découvrir la surface élémentaire  $dA$  la fissure consomme le travail  $\gamma dA$  et que ce dernier est pris à l'énergie élastique emmagasinée dans le système. Irwin, trente quatre ans plus tard, introduisait le concept de taux  $G$  de restitution de l'énergie mécanique, défini comme l'accroissement d'énergie mécanique  $U_M$  par unité de surface balayée par la fissure ( $G = \partial U_M / \partial A$ ), en écrivant le critère d'équilibre d'une fissure sous la forme :

$$G = 2\gamma \quad (1)$$

l'énergie mécanique  $U_M$  représentant, soit l'énergie élastique  $U_E$  emmagasinée dans le système, soit la somme  $U_E + U_p$ , faisant intervenir

l'énergie potentielle  $U_P$  correspondant à l'application éventuelle d'une force de séparation  $P$ .

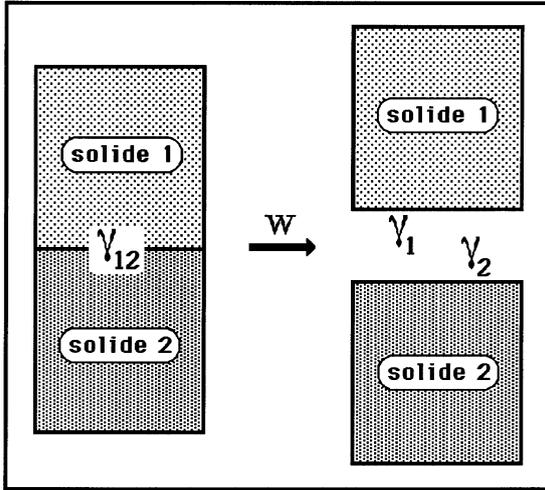
Dans le cas de l'assemblage de deux solides dissemblables, le critère d'équilibre d'une fissure à l'interface s'écrit :

$$G = w \quad (2)$$

où  $w$  représente l'énergie d'adhésion de Dupré (1869) définie à partir des énergies superficielles  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$  et interfaciale  $\gamma_{12}$  des solides 1 et 2 en contact selon la relation (figure 9) :

$$w = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (3)$$

$w$  prenant la valeur  $2(\gamma_1\gamma_2)^{1/2}$  dans le cas où seules les forces dispersives de van der Waals interviennent.



**Figure 9 :** Travail thermodynamique d'adhésion  $w$  ou énergie d'adhésion de Dupré (1869).

La force nécessaire pour maintenir l'équilibre de la fissure est la **force d'adhérence élastique  $P_c$**  correspondant donc à  $G = 2\gamma$  ou  $G = w$ . Cette force dépend de la forme des solides en contact, qui conditionne l'existence éventuelle de concentrations de contraintes, ainsi que de l'état géométrique des surfaces, la présence de rugosités sur des matériaux durs pouvant faire disparaître l'adhérence, alors que l'adhésion n'est pas pour autant négligeable. A titre d'exemple, un cylindre en plexiglas<sup>®</sup>, dont la surface est parfaitement lisse, roule sans

tomber **sous** un plan de caoutchouc souple (figure 10) par la seule action des forces de van der Waals, alors qu'il tombe instantanément dès que sa surface est rendue rugueuse, ou que la surface de l'élastomère est contaminée par des poussières ou des couches adsorbées suffisamment épaisses pour écranter les forces de van der Waals.

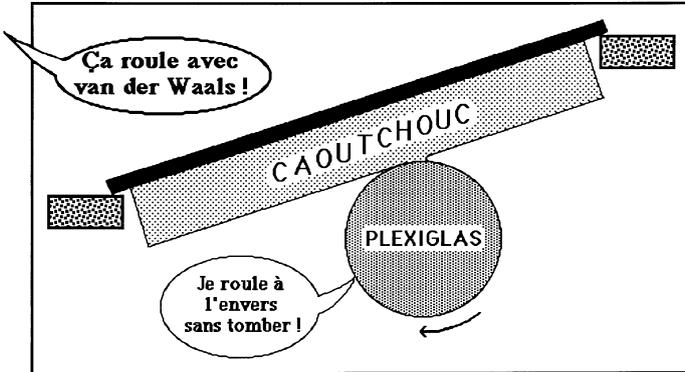


Figure 10 : Mise en évidence d'un effet d'intervention des forces superficielles d'attraction moléculaire.

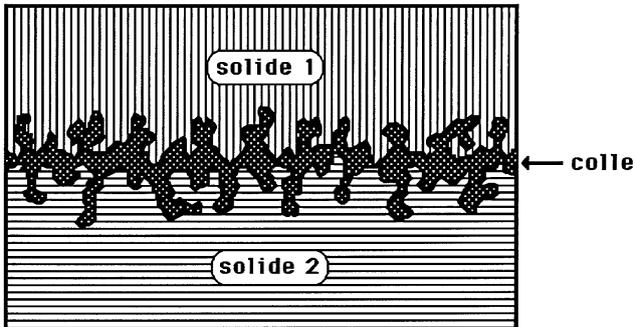


Figure 11 : Représentation schématique du modèle de l'ancrage mécanique.

#### 4.2. Les principaux théories et modèles de l'adhésion

L'un des premiers modèles utilisés, dès 1926 par Mac Bain et Hopkins, pour rendre compte de l'adhésion durable entre deux solides est l'**ancrage mécanique** qui résulte de la pénétration par capillarité de la colle liquide dans les pores et entre les aspérités des surfaces en contact et de la solidification ultérieure de cette colle (figure 11). L'augmentation de la surface réelle de contact et l'accroissement

concomitant du nombre de liaisons interfaciales permettent d'expliquer la forte adhésion constatée et l'accroissement de la résistance au cisaillement du joint dans le plan de l'interface. Encore faut-il, comme on le sait aujourd'hui, que la colle «mouille» le plus parfaitement possible les surfaces à réunir. Ce concept du mouillage sera examiné ultérieurement. Il est toutefois utile et important de remarquer que l'évocation précoce de cette notion de mouillabilité traduit le fait que certaines théories de l'adhésion sont entre-elles plutôt complémentaires que contradictoires.

Pour des matériaux de natures différentes, chronologiquement il convient d'évoquer le **modèle électrostatique** qui fut développé à l'initiative de Deryagin et Krotova, de l'École russe à partir de 1948, suite à l'observation d'émissions d'électrons rapides lorsqu'un contact est rompu sous vide ou lors de la fracture d'un cristal. Cette théorie est basée sur le transfert de charges électriques lors du contact et le réajustement des niveaux de Fermi, processus qui conduit en général à la formation d'une double couche électrique à l'interface, laquelle peut être assimilée aux deux plaques d'un condensateur plan (figure 12). Bien que ce modèle, basé sur les attractions électrostatiques, rende parfaitement compte de la cohésion d'assemblages verre-polymère tels que verre - caoutchouc et verre - chlorure de polyvinyle, il ne s'applique pas à d'autres interfaces, toutes aussi usuelles, telles que verre - dépôts métalliques divers, de sorte que l'on a tendance aujourd'hui à considérer que les effets électriques, lorsqu'ils sont observés, sont plutôt l'effet que la cause de l'adhésion constatée.

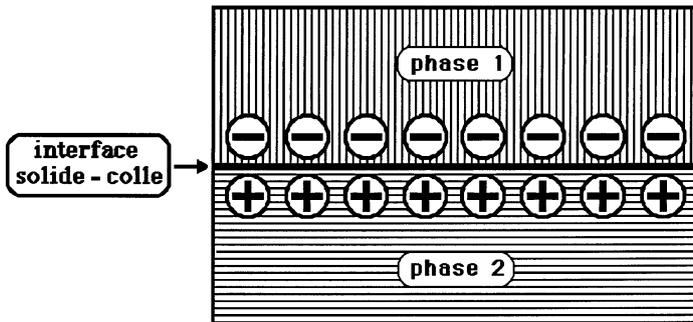


Figure 12 : Représentation schématique du modèle électrostatique.

Dans les années 1960, l'Américain Bickerman émet l'hypothèse de la formation au voisinage de l'interface d'une zone, l'interphase,

caractérisée par une cohésion différente de celles des deux matériaux en présence (figure 13). Dans le cas d'une forte cohésion, une rupture ne peut se produire qu'à l'intérieur de l'un des solides ; au contraire, une rupture dans la zone de transition interfaciale traduit une faible cohésion. Ce **modèle d'interphase**, à forte ou faible cohésion, n'a pas la prétention d'expliquer les mécanismes de l'adhésion ; par contre, il propose d'attirer une attention tout à fait particulière sur la nature de l'interface lorsque l'on affine l'échelle d'observation, du micromètre au nanomètre, c'est-à-dire à la dimension de la molécule.

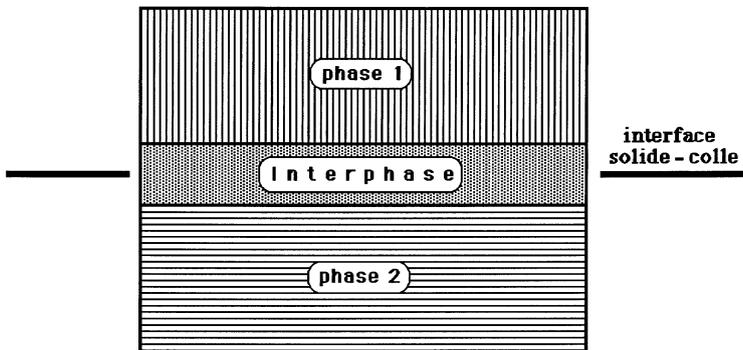


Figure 13 : Représentation schématique du modèle de l'interphase.

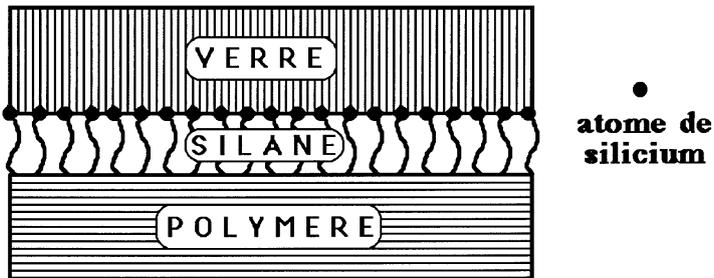


Figure 14 : Représentation schématique de l'action des agents de couplage, tels que les silanes pour le verre et les polymères.

Si l'interface est le siège de réactions chimiques créant des liaisons solides de types covalent ou ionique conférant à l'assemblage une grande résistance à la rupture, on parle de **modèle chimique**. A titre d'exemple, choisi dans le domaine des pneumatiques, ce modèle régit l'adhésion des fils d'acier laitonné des nappes métalliques au contact

des élastomères au sein des carcasse et bande de roulement, par suite de l'établissement d'une liaison chimique entre le laiton et le caoutchouc par l'intermédiaire du soufre utilisé pour la vulcanisation du caoutchouc. De même, pour augmenter l'adhésion de polymères au verre, aux charges minérales et à divers métaux, des agents de couplage (appelés également primaires d'adhésion) tels que les silanes, sont utilisés (figure 14). Les silanes ont une formule du type  $\text{Si}(\text{OR})_4$ , ils sont par conséquent constitués de silicium et d'oxygène associés chimiquement à des radicaux R, tels que méthyle ( $\text{CH}_3$ ), éthyle ( $\text{C}_2\text{H}_5$ ), etc...

Un modèle voisin du précédent par l'aspect chimique qu'il représente est le **modèle de l'interdiffusion**, qui intéresse essentiellement les assemblages polymère-polymère de même ou de différentes natures chimiques (l'un étant constitutif du substrat et l'autre de la colle), pour lesquels les chaînes macromoléculaires des deux matériaux en contact diffusent à travers l'interface et réalisent la cohésion de l'ensemble (figure 15). Cette théorie, proposée par Voyustkii de l'École russe dans les années 1950, permet d'expliquer les phénomènes de cicatrisation observés avec les polymères fracturés ou fissurés. Les mécanismes fondamentaux de diffusion des macromolécules ont été décrits et analysés par Pierre-Gilles de Gennes, prix Nobel de physique 1991, en utilisant le concept de reptation, le temps de relaxation associé à la reptation d'une chaîne variant comme le cube de la masse moléculaire du polymère. Une question reste actuellement en suspens : l'interdiffusion crée-t-elle l'adhésion ou se produit-elle à la suite d'une adhésion préalable ?

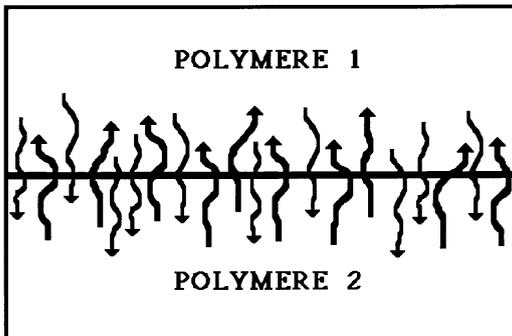
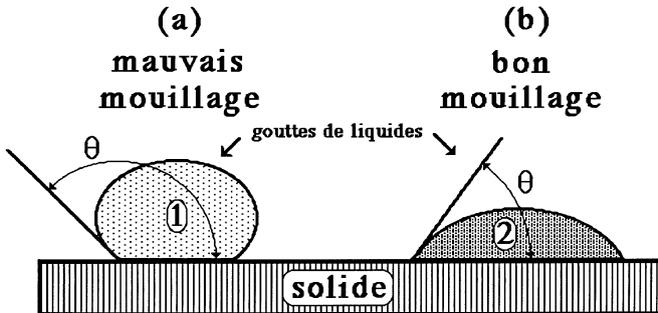


Figure 15 : Représentation schématique de l'interdiffusion des polymères.

Au contact de la surface plane et lisse d'un solide, une goutte d'un liquide quelconque mouille plus ou moins la surface, c'est-à-dire qu'elle s'étale naturellement plus ou moins. Dans la mesure où la goutte est petite, afin que les effets gravitationnels puissent être considérés comme négligeables, l'angle de raccordement  $\theta$  (figure 16) est directement lié à la réactivité du substrat vis-à-vis du liquide. Un mouillage total correspond à  $\theta = 0$ , comme on peut l'observer dans le cas de l'eau pure sur la surface propre d'une plaque de verre. Les schémas de la figure 16 montrent des mouillages partiels, plutôt mauvais en cas de faible réactivité (a) et plutôt bon (b) en cas de réactivité notable. On l'aura compris, dans ce que l'on appelle la **théorie du mouillage**, la condition d'obtention d'une bonne adhésion dépend du contact entre les deux solides destinés à être assemblés donc du mouillage au contact «colle liquide - surface solide» lors de la formation de l'assemblage. La relation (3), exposée précédemment, peut être réécrite en fonction de l'angle  $\theta$ , sous la forme :

$$w = \gamma_{LV}(1 + \cos\theta) + \gamma_S - \gamma_{SV} \quad (4)$$

en prenant en compte l'énergie libre superficielle du liquide L en présence de sa vapeur V ( $\gamma_{LV} = \gamma_1$ ), l'énergie libre superficielle du solide S dans le vide ( $\gamma_S = \gamma_2$ ) et l'énergie interfaciale  $\gamma_{SV}$  du solide S en présence de la vapeur V du liquide L. Un bon mouillage impose que l'énergie superficielle du liquide soit inférieure à celle du substrat.



**Figure 16 :** Comparaison entre le mauvais (a) et le bon (b) mouillage d'un liquide 1 et d'un liquide 2 respectivement, sur la même surface solide.

Un dernier modèle, chronologiquement le plus récent, concerne plutôt l'adhérence que l'adhésion dans le sens où il fait intervenir la notion de rupture de l'assemblage collé plutôt que celle de sa cohésion, il s'agit du **modèle du facteur dissipatif**. Lorsqu'une fissure se

propage dans un matériau ou à l'interface d'un joint adhésif, le bilan des énergies mises en jeu peut être écrit sous la forme :

$$G - G_0 \equiv w \cdot \Phi_1(v,T) + \Phi_2 \quad (5)$$

identité dans laquelle le premier membre ( $G - G_0$ ) peut être considéré comme le «moteur» de la fissure,  $G$  étant le taux de restitution de l'énergie mécanique, défini dans la section 4.1, et  $G_0$  sa valeur à l'équilibre (vitesse de propagation de la fissure égale à zéro),  $G_0$  pouvant être égal à l'énergie réversible d'adhésion  $w$ ., dans le cas de collage de faible résistance. Selon le vieux principe de l'action et de la réaction, le second membre de l'identité regroupe les termes de freinage de la fissure,  $\Phi_1$  correspondant à l'énergie dissipée de manière irréversible dans les déformations viscoélastiques en tête de fissure lesquelles, pour les polymères, sont très largement dépendantes de la température  $T$  et de la vitesse  $v$  de propagation de la fissure et  $\Phi_2$  représentant l'énergie perdue dans le processus d'extraction des chaînes macromoléculaires lors de l'ouverture de la fissure, comme l'a récemment suggéré P.-G. de Gennes. Bien évidemment, il est supposé qu'à vitesse de propagation  $v$  nulle les termes dissipatifs  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  sont nuls, de sorte que l'on retrouve bien l'égalité :  $G = G_0$ . En d'autres termes,  $G_0$  représente l'énergie qu'il faut fournir au système pour réactiver la fissure et la faire propager à nouveau.

Ce modèle permet de comprendre (avec le cas simple :  $G_0 = w$  ;  $\Phi_2 = 0$ ) qu'un joint adhésif présente la même adhérence si l'adhésion ( $w$ ) est faible avec une colle présentant une viscosité ( $\Phi_1$ ) importante ou si l'adhésion est forte avec une viscosité peu marquée, le paramètre de contrôle étant précisément le produit  $w \cdot \Phi_1$ . Ainsi, si la pâte à modeler présente un aspect collant et légèrement poisseux au toucher, malgré sa faible adhésion, c'est parce que la viscosité de la pâte est essentiellement responsable de la sensation tactile éprouvée.

A partir des modèles et théories précédemment décrits, il est possible de dégager quelques règles simples à suivre afin de réaliser un bon collage. En tout premier lieu, l'adhésif doit être appliqué sous forme liquide, sa viscosité étant la plus faible possible, il doit mouiller et nettoyer le substrat. Le mouillage peut être amélioré en augmentant la rugosité de la surface, ce qui facilite l'ancrage mécanique. Ensuite, on provoque la solidification de la colle qui doit devenir la plus visqueuse possible, et le chimiste connaît trois moyens pour réaliser cette transformation, lesquelles correspondent précisément à trois catégories de colles :

**1** - dissolution du principe collant et évaporation du solvant,

**2** - fusion d'une colle solide puis refroidissement,

**3** - mélange de deux liquides conduisant à la formation d'un matériau solide.

Bien évidemment la colle doit présenter un coefficient de dilatation proche de celui du substrat afin d'éviter le développement de contraintes résiduelles, lesquelles favorisent la fissuration des joints adhésifs. Enfin, risquons un truisme en rappelant que l'adhésif doit présenter une énergie d'adhésion élevée vis-à-vis des éléments qu'il est chargé de réunir.

## **5. QUELLE COLLE ET POUR QUOI FAIRE ?**

Les adhésifs ou colles utilisés pour réaliser l'assemblage d'éléments et assurer l'étanchéité peuvent être classés, selon la nature chimique de leur principal composant, celle des couples de matériaux à collés entre-eux ou encore suivant les mécanismes ou techniques mis en jeu.

Pour l'utilisateur, qu'il soit industriel, artisan ou simple bricoleur, le choix est essentiellement guidé par la nature des éléments à coller et la simplicité d'utilisation de l'adhésif adéquat, selon les indications plus ou moins claires, fournies par le fabricant. En d'autres termes, il existe des colles ne nécessitant pas ou peu de préparation alors que d'autres ne sont opérantes qu'à la suite d'un protocole expérimental particulier et/ou d'une réaction chimique dont la réalisation demande des précautions certaines. Il semble donc judicieux, comme l'a proposé récemment Eduardo Schindel-Bidinelli, de classer les colles suivant deux catégories : celles qui ne font appel qu'à des mécanismes physiques et celles pour lesquelles une réaction chimique est nécessaire. Pour ce qui concerne les processus physiques, citons à titre d'exemple les trois principaux utilisés : l'évaporation d'un solvant, aqueux ou organique, l'application d'une force sur l'assemblage dans le but d'augmenter l'intimité du contact entre les deux surfaces à réunir et l'échauffement de l'adhésif en vue de le ramollir ou de le fondre, suivi d'un refroidissement lent ou rapide, selon le cas, afin de provoquer son durcissement.

### **5.1. Les collages utilisant un mécanisme physique**

Parmi les colles les plus simples à utiliser, signalons celles dont le principe actif est en solution ou en suspension dans l'eau, le collage s'effectuant par évaporation. Elles sont bien connues du grand public essentiellement parce qu'elles ne demandent aucune préparation avant

emploi et qu'elles conviennent pour un grand nombre de matériaux usuels, même poreux. Ces colles sont aussi bien d'origines naturelles (minérales, végétales et animales) que synthétiques. Parmi les colles naturelles, signalons les adhésifs à base de silicate de soude, dextrines et amidons pour les industries du papier et du carton, à base de ciment et de bitume pour le collage des carrelages, la gomme arabique pour l'enduction des timbres et étiquettes, les produits à base de colophanes pour le collage des revêtement de sols, les colles à base de caséine du lait pour la fabrication des structures en bois lamellé-collé.

Les colles d'origine synthétique en milieu aqueux sont des adhésifs phénoliques, utilisés dans l'industrie du bois pour le contre-plaqué et le lamellé-collé, il y a également les urée-formol pour le placage en menuiserie et ébénisterie, les alcools polyvinyliques et l'acétate de polyvinyle pour le bois, le carton et le papier, sans oublier le polyvinyle-pirrolidone pour la colle dite «de bureau».

Tout aussi simples à utiliser sont les adhésifs synthétiques à solvants organiques, le collage s'effectuant par évaporation du solvant. Ces colles sont à base d'élastomères, comme les polychloroprènes ou néoprènes et les polyuréthanes pour le collage des textiles et pour l'industrie de la chaussure, à base vinylique pour le bricolage (éthers polyvinyliques). Font aussi partie de cette catégorie, les aminoplastes et phénoplastes pour le collage des stratifiés, les polyuréthanes utilisés dans les industries de l'automobile et de l'aéronautique, les néoprène-phénolique, nitrile-phénolique et vinyle-phénolique pour les collages structuraux. Comme cela a déjà été signalé, le qualificatif «structural» signifie que le rôle principal de l'adhésif est de créer une liaison mécanique forte et rigide entre les éléments déformables constituant l'assemblage ; l'adhésif employé fait partie intégrante de l'ensemble de la structure et les assemblages ainsi réalisés peuvent supporter des contraintes aussi importantes que les systèmes mécano-soudés.

De nouveaux adhésifs structuraux, dits renforcés, apparaissent sur le marché, le renforcement consistant en l'incorporation, dans une colle réputée rigide et cassante telle que peut l'être une résine acrylique, de microbilles de caoutchouc, lesquelles augmentent la résistance à la rupture.

Doivent être également mentionnés les produits auto-adhésifs conditionnés ordinairement sous forme de ruban ou de plaque (scotch<sup>®</sup>, Tesa<sup>®</sup>). Ils sont fabriqués principalement à base de caoutchoucs naturels

et synthétiques et de polyacrylates. Ils agissent par une légère pression sur l'assemblage (étiquettes et plaquettes autocollantes, par exemple) et conviennent aux matériaux les plus divers, y compris les métaux et matières plastiques, la condition de porosité n'étant pas impérative.

Pour le cas particulier du collage entre-elles des matières thermo-plastiques (lesquelles ramollissent et fondent par chauffage et réversiblement se solidifient et se rigidifient par refroidissement), on utilise le mécanisme de la diffusion en employant des produits à base de solvant organique, comme le Tangit® pour le collage d'éléments en chlorure de polyvinyle, par exemple. Les objets en plexiglas® sont collés selon le même principe, à l'aide d'une solution de plexiglas®, l'utilisation simultanée d'ultrasons accélérant le processus de diffusion.

Il est difficile de distinguer fondamentalement les adhésifs dits «à solvant», examinés précédemment, des adhésifs dits «de contact» du fait même que l'assemblage est réalisé après évaporation complète du solvant organique. La spécification «de contact» est introduite pour rendre compte que le collage nécessite l'application d'une pression. Les colles entrant dans cette catégorie sont à base de polyuréthane, de copolymères styrène-butadiène ou encore de polychlorobutadiène et sont principalement utilisées pour réaliser des assemblages composites cuir/textile, cuir/caoutchouc, tels qu'on peut les rencontrer dans l'industrie de la chaussure, matière plastique/béton et textile/béton pour ce qui concerne la pose des revêtements de sols ou muraux. De manière générale, les surfaces à réunir sont, avant pression l'une contre l'autre, préalablement enduites et séchées.

Un type complètement différent de colles, dites thermofusibles, peuvent être utilisées concurremment avec celles évoquées précédemment. Ces adhésifs, qui sont sans solvant, sont appliqués fondus et c'est la couche refroidie, plus ou moins souple, qui constitue le système d'assemblage. Ces produits, à base de copolymères styrène-butadiène ou éthylène-acétate de vinyle (EVA) ou encore à base de polyester, interviennent dans un grand nombre de domaines industriels tels que : l'automobile, l'ameublement, l'électronique, l'habillement et la reliure, par exemple.

## 5.2. Les collages nécessitant une réaction chimique

Les colles modernes sont des polymères artificiels, c'est-à-dire des macromolécules dont la synthèse consiste à enchaîner les unes aux autres des molécules de petites dimensions en pratiquant des réactions

spécifiques. Celles-ci sont des polymérisations ou copolymérisations radicalaires (par ouverture de liaisons multiples sous l'effet d'interventions extérieures, telles que chauffage et rayonnements ultra-violet, par exemple), des polycondensations (telles que des estérifications, avec élimination d'eau et des substances légères acides ou alcooliques) et des polyadditions, utilisées moins fréquemment que les précédentes, qui consistent en l'addition répétée d'un élément monomère.

Parmi les adhésifs qui deviennent opérants sous l'effet d'une action extérieure, il existe les colles qui durcissent grâce à l'humidité de l'air ambiant. On distingue celles à base de polyuréthane ou de polysiloxane (colles silicone) et celles à base d'esters de l'acide cyanoacrylique. Elles conviennent pour coller les métaux, les matières plastiques, les élastomères, et sont plutôt adaptées aux surfaces de faible dimension pour lesquelles la pénétration de l'humidité est favorisée. A température ambiante, l'humidité relative optimale est de l'ordre de 65 %.

Il existe des produits, polyesters et polyuréthanes comportant des doubles liaisons ainsi que des acrylates, qui sont radiosensibles, c'est-à-dire que l'exposition à une radiation ultra-violette provoque leur durcissement, d'où l'idée de les utiliser pour réaliser des colles. Celles-ci sont parfaitement adaptées à l'assemblage des verres, céramiques, métaux et matières plastiques, la seule condition étant que l'un des éléments à réunir soit transparent à la longueur d'onde (100-380 nm) de la radiation ultra-violette, cet élément étant, par conséquent, nécessairement de très faible épaisseur. Ces résines photopolymérisables sont très largement utilisées en Odontologie, par exemple.

Un dernier type de colles, dont on peut dire également que le durcissement est dû à une action extérieure, est représenté par les adhésifs anaérobies. Ces produits, à base de diacrylate, durcissent par effet catalytique au contact des métaux en absence d'oxygène ou d'air et conviennent donc parfaitement au collage des matériaux métalliques. On les utilise très souvent à des fins de blocages : blocage des emmanchements cylindriques axe-tourillon lisses et blocage des vis, la colle liquide comble le jeu entre les pièces ou l'espace libre entre les filets des vis et écrous et ceux des vis et trous taraudés (Loctite®, par exemple). Après durcissement, non seulement les pièces sont bloquées par empêchement de tout glissement relatif, mais aussi les assemblages sont rendus étanches, ce qui présente l'avantage certain de supprimer ou de diminuer très

fortement le risque de corrosion. Le joint de colle peut également jouer éventuellement un rôle d'amortissement des vibrations.

Il existe un très large éventail de colles nécessitant le mélange de deux composants, appelés communément résine et durcisseur, afin de produire la réaction chimique. Les colles «à réaction chimique» sont relativement simples à utiliser. Il suffit de mélanger la résine et le durcisseur dans les proportions prescrites par le fabricant, en évitant toute inclusion de bulles d'air, lesquelles affaibliraient considérablement la résistance du joint adhésif formé. Relèvent de ce premier type de colles, les résines époxydes et acryliques, les polyesters qui conviennent à tous les matériaux utilisés dans les industries aéronautiques, mécaniques, métallurgiques, tels que alliages métalliques, céramiques, élastomères, matières plastiques, roches, verres, etc... A titre d'exemple, pour les époxydes, qui sont des adhésifs thermodurcissables, la résine de base est le Diglycidyléther du Bisphénol A (DGEBA) dont la polymérisation est assurée grâce à des amines ou diamines, lesquelles jouent ainsi le rôle de durcisseur. Afin de conférer à ces colles des propriétés particulières, plusieurs ingrédients viennent compléter la formulation tels que talc, kaolin et caoutchouc. Les Araldite<sup>®</sup> entrent dans cette catégorie de produits adhésifs.

Les mêmes matériaux que ceux énumérés précédemment peuvent être collés avec des produits, de conception astucieuse, déclarés monocomposants parce que l'adhésif, une résine époxyde par exemple, contient à l'état latent le durcisseur (en général, il s'agit du dicyan-diamide, DiCy). La réaction de polymérisation est déclenchée par élévation de la température, les éléments à assembler étant maintenus sous une légère pression. Bien évidemment la résistance du joint adhésif dépend fortement des conditions opératoires recommandées par le fabricant concernant la température et la durée du chauffage.

Un dernier type de colles à réaction chimique, à base de résines phénol-formol, résines époxydes et phénoliques, demande le plus grand soin de préparation puisqu'il y a deux composants à mélanger et que les éléments à assembler doivent être chauffés sous pression. Il faut donc impérativement réaliser le mélange dans les proportions adéquates et imposer la température pendant la durée expressément préconisées par le fabricant sous peine de former un joint adhésif dont la résistance n'est pas optimale.

## 6. C'EST COLLÉ ? OUI, MAIS EST-CE QUE CELA VA TENIR ? ET, PENDANT COMBIEN DE TEMPS ?

Ce sont effectivement les premières questions qui viennent à l'esprit. En d'autres termes, comment caractériser la résistance mécanique de l'assemblage que l'on vient de réaliser ? Comment quantifier la fiabilité du collage ? Peut-on prévoir sa durée de vie ? Ces questions supposent évidemment :

- 1 - que les formes et dimensions des surfaces à coller ont été étudiées de manière à ne pas favoriser la formation de zones à forte concentration de contraintes mécaniques ;
- 2 - que l'on a correctement traité les surfaces des solides à l'aide de solvants et de réactifs afin d'éliminer les impuretés, de définir un état géométrique adéquat de surface (topographie), d'augmenter l'énergie de surface, de favoriser le mouillage et d'augmenter l'accrochage mécanique ;
- 3 - que l'adhésif a été judicieusement choisi (il en existe plus de dix milliers actuellement) et convenablement appliqué sur les surfaces, la distribution d'un fluide sur une surface n'étant pas aisée par suite des variations de viscosité au cours du temps et selon la température ambiante ;
- 4 - que l'on sait mesurer la résistance mécanique du joint adhésif, ou plutôt l'énergie nécessaire pour provoquer sa rupture. Ce dernier point nécessite quelques éclaircissements.

### 6.1. Considérations d'ordre général

Le développement des adhésifs modernes à haute résistance mécanique a entraîné inévitablement la recherche et la mise au point de tests normalisés permettant de comparer les qualités respectives de deux produits concurrents. Il existe deux types d'essais : ceux qui provoquent la rupture de l'éprouvette et les contrôles déclarés non destructifs.

Les tests non destructifs concernent la qualification des collages et sont mis en œuvre chaque fois que l'on souhaite vérifier la bonne exécution du collage. En d'autres termes, ils servent essentiellement de détecteurs de défauts. Les principaux tests non destructifs seront évoqués plus loin.

Quant aux tests destructifs, dont les principaux sont décrits schématiquement dans la figure 17, le plus fréquemment utilisé consiste en une mesure de la force de rupture en cisaillement d'un joint en bout ou en recouvrement (figure 17 a). Les valeurs des forces  $F$  que l'on peut ainsi mesurer ne sont valables et peuvent permettre d'établir des comparai-

sons entre différentes résines de collage qu'à l'intérieur d'un même laboratoire, dans lequel on peut espérer que les conditions de préparation des surfaces sont identiques, avec une température et une hygrométrie ambiantes contrôlées.

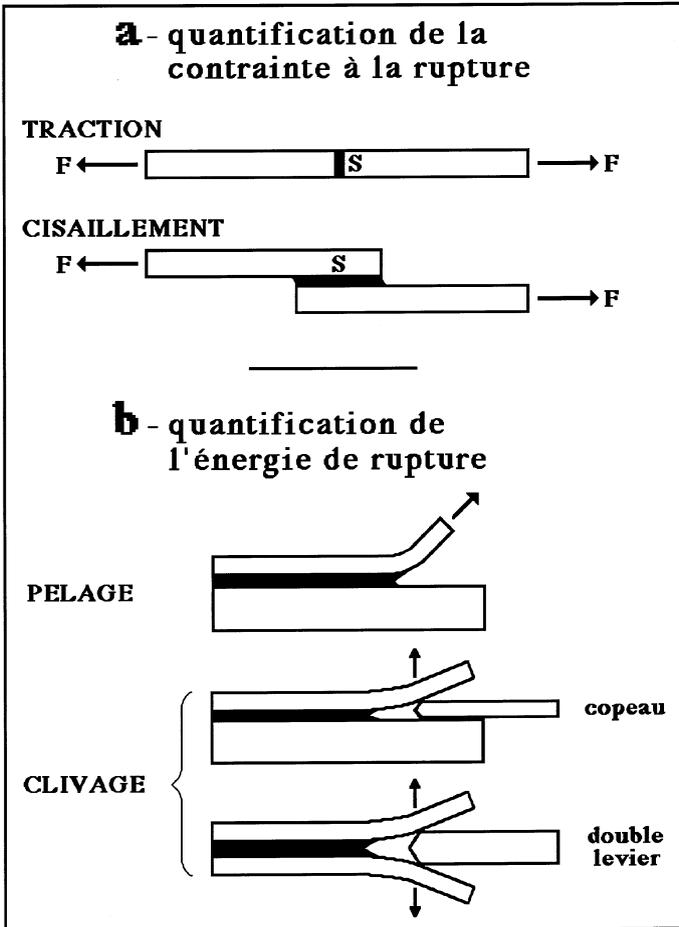


Figure 17 : Exemples de contrôles destructifs.

Pour ce qui concerne l'usage de rapporter, comme on le voit trop souvent encore, la force de rupture  $F$  à la surface  $S$  de la zone collée (figure 17 a), pour en déduire une espèce de contrainte de traction ou de cisaillement à la rupture, il s'agit là d'une pure hérésie. En effet, la

proportionnalité de la force de rupture à la surface collée signifierait que la rupture s'effectue d'une manière brutale, d'un seul bloc, alors que nous avons vu précédemment (section 4) que la rupture résulte toujours de la propagation d'une fissure dont la vitesse est largement dépendante de la rhéologie des matériaux, c'est-à-dire des pertes viscoélastiques par frottement interne dans les polymères que sont les colles. C'est un peu comme si l'on prétendait que la résistance d'une chaîne est égale à la somme des résistances de chacun des maillons, alors que l'on sait parfaitement qu'elle est égale à la résistance du maillon le plus fragile\*. Rappelons l'image très explicite, déjà évoquée, selon laquelle une fissure se propage dans un matériau ou à l'interface d'un joint adhésif suivant le mode de fonctionnement d'une fermeture Éclair<sup>®</sup>, l'avance du curseur n'étant possible qu'à la suite des décrochements successifs des agrafes.

Parmi la multitude de tests existants pour quantifier les qualités de résistance d'un joint adhésif, lesquels sont nécessairement destructifs, les seuls qui peuvent être déclarés fiables (figure 17 b) sont ceux pour lesquels le taux  $G$  de restitution de l'énergie mécanique (section 4) est calculable. La valeur  $G_0(L_0)$  à l'équilibre représente l'énergie minimale à fournir au joint collé pour provoquer la propagation d'une fissure préexistante de profondeur  $L_0$ , dans la mesure où  $G_0$  dépend de  $L_0$ , ce qui n'est d'ailleurs pas toujours le cas, comme nous le verrons plus loin.

## 6.2. Exemples d'essais destructifs

La méthode qui paraît à la fois la plus simple à réaliser et la mieux adaptée pour éprouver la résistance au décollement d'un film adhésif est le **pelage** (figure 17 b). Elle consiste, dans un premier temps, à coller une bande souple dont la déformation est élastique sur la surface plane et lisse d'un substrat rigide. Dans un second temps, comme le montre schématiquement la figure 18, afin de provoquer le décollement on impose une force  $F$  dans la direction qui fait un angle  $\alpha$  avec le plan du point collé. A partir de considérations géométriques simples et prenant en compte le fait que le film est soumis à une déformation uniaxiale, le taux  $G$  de restitution de l'énergie mécanique peut être exprimé sous la forme de la somme de deux

---

\* Cette évidence ne doit pas pour autant conduire à la conclusion erronée suivante : l'énergie récupérée lors de la rupture du maillon le plus faible est directement liée à la résistance à la rupture de ce maillon. L'énergie récupérée est égale à la somme des énergies élastiques emmagasinées dans tous les maillons de la chaîne au moment de la rupture.

termes, le premier à caractère géométrique et le second qui résulte de l'élasticité linéaire :

$$G = (F/b)(1 - \cos\alpha) + (F/b)^2/2Ee \quad (6)$$

expression dans laquelle  $b$  et  $e$  sont respectivement les largeur et épaisseur de la bande à décoller et  $E$  le module d'élasticité de son matériau constitutif (figure 18). La relation précédente, établie par l'anglais Kevin Kendall en 1975, fait clairement apparaître que la valeur de  $G$  est indépendante de la superficie de la zone restant à décoller. De plus, pour les angles de pelage  $\alpha > 30^\circ$ , le deuxième terme du membre de droite de la relation (6) devient négligeable devant la valeur du premier terme, de sorte que l'on retrouve l'expression, que l'on sait être aujourd'hui une approximation, proposée dès 1944 par Rivlin :

$$G = (F/b)(1 - \cos\alpha) \quad (7)$$

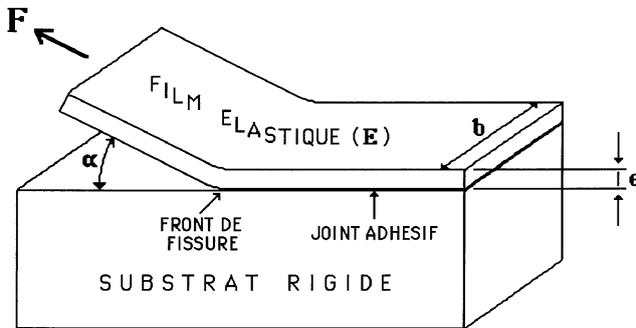


Figure 18 : Représentation schématique du test de pelage.

La relation (7) se simplifie plus encore lorsque le pelage est effectué sous un angle  $\alpha = \pi/2$  ou à  $\alpha = \pi$  :

$$G_{\pi/2} = F/b \quad (8)$$

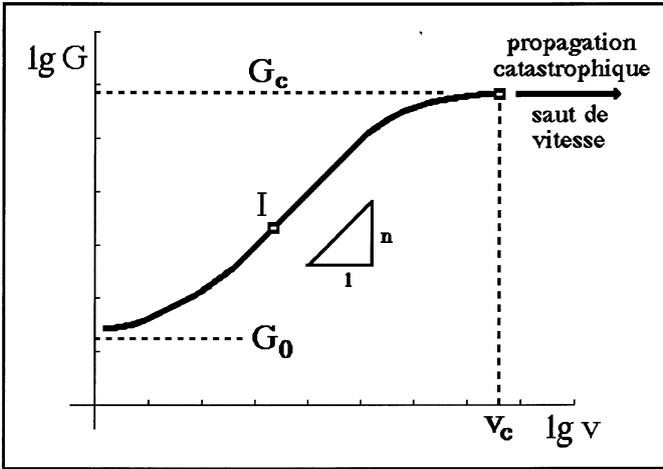
$$G_{\pi} = 2F/b \quad (8 \text{ bis})$$

ce qui est souvent le cas en pratique.

Lorsque le collage est très résistant, la technique du pelage présente l'inconvénient majeur de créer des concentrations de contrainte dans la zone étroite de décollement avec un risque non négligeable de provoquer une déchirure du film. Ce désagrément est aisément évité d'une part, en collant sur le film à peler un dos textile souple inextensible, ce

qui n'a pas d'incidence sur la mesure puisque  $G$  est indépendant de l'épaisseur aux angles  $\alpha > 30^\circ$  (relation (7)), d'autre part, en imposant, à l'aide d'une tige cylindrique légère, un rayon de courbure à la bande pelée dans la région où se produit la séparation.

Quelle que soit la méthode utilisée, angle  $\alpha$  quelconque (relation (6) ou relation (7)), pelage à  $\alpha = \pi/2$  (relation (8)) ou encore pelage à  $\alpha = \pi$  (relation (8 bis)), plus la force imposée est grande, plus la valeur de  $G$  est élevée et plus la vitesse  $v$  de pelage est rapide, comme le schématise la courbe représentée dans la figure 19 laquelle rend compte du fait que dans un large domaine de vitesses  $v$  de propagation, le taux  $G$  varie le plus souvent comme la puissance  $n$  de la vitesse  $v$ , le paramètre  $n$  (toujours trouvé inférieur à 1) étant très largement dépendant de la structure du matériau polymérique étudié, mais, à ce jour, aucune explication probante n'a été apportée à cette constatation expérimentale.



**Figure 19** : Variation du taux de l'énergie mécanique avec la vitesse de propagation d'une fissure.

De plus, il est important de signaler dès à présent que cette courbe  $G - v$  n'est pas caractéristique du test de **pelage**, la relation entre  $G$  et  $v$  est caractéristique du matériau éprouvé, c'est-à-dire qu'une courbe identique est obtenue lorsque l'on soumet le même matériau à un autre test pour lequel le taux  $G$  de restitution de l'énergie mécanique est

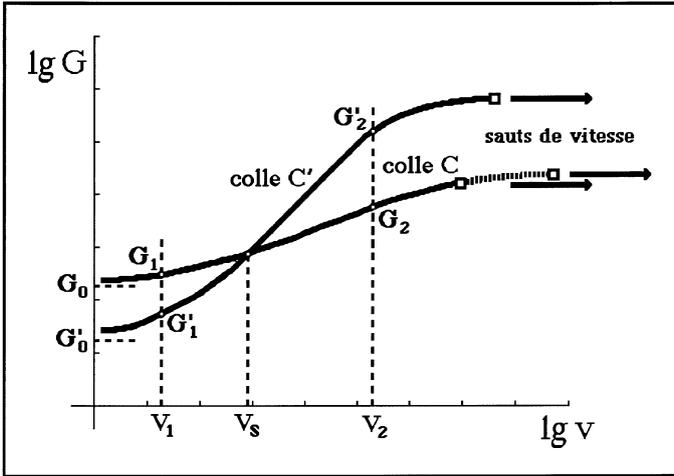
calculable, sous réserve que les conditions ambiantes de température et d'hygrométrie restent inchangées.

Dans le cas particulier du pelage, compte tenu du fait que  $G$  est indépendant de la surface pelée ou, ce qui revient au même, de celle qui reste à décoller : à force  $F$  constante,  $G$  est constant et par suite la vitesse de décollement reste inchangée, il existe donc un point de fonctionnement (propagation) fixe sur la courbe  $G - v$ , tel que le point I dans la figure 19. La fissure est déclarée en équilibre pour la force seuil  $F_0$  correspondant à la propagation à vitesse nulle, c'est-à-dire telle que  $G = G_0$ .

Un phénomène qu'il convient de signaler tout particulièrement est l'apparition d'un décollement brutal dès que la force imposée produit la valeur de  $G$  égale à la valeur critique  $G_c$  et correspondant à la vitesse de décollement critique  $v_c$  : un saut de vitesse de grande amplitude (vitesse multipliée par 10, 100 ou 1000 selon les matériaux) est enregistré avec une émission acoustique associée caractéristique. C'est le même phénomène qui régit le déroulement d'un ruban adhésif de son rouleau débiteur, l'émission sonore bien connue, obtenue en tirant rapidement sur le ruban, traduit l'instabilité de la propagation. De même, l'effondrement qui paraît brutal d'un pylône en béton d'un remonte-pente, par exemple, est toujours précédé par une propagation lente de fissure au sein du matériau. En d'autres termes, cette propagation catastrophique est un phénomène tout à fait général, observable quel que soit le test de rupture réalisé, point important sur lequel nous reviendrons ultérieurement.

Afin de comparer les propriétés adhésives de plusieurs films adhésifs, il est nécessaire de tracer le diagramme  $G - v$  relatif à chacun d'eux et de comparer les différentes valeurs de  $G$  pour la même vitesse de décollement, c'est-à-dire pour les mêmes conditions de dissipation d'énergie au sein des matériaux. La valeur de  $G_0$  est très importante pour choisir une colle : plus elle est élevée, plus l'assemblage est susceptible de supporter des contraintes mécaniques. Toutefois, il convient de ne pas négliger pour autant la forme des diagrammes  $G - v$  (figure 19). En effet, comme cela est schématiquement représenté dans la figure 20, une colle C peut présenter à la vitesse  $v_1$  un taux  $G_1$  plus grand que celui  $G'_1$  de la colle C', ce qui conduit à préférer d'emblée la colle C, mais ce choix n'est justifié que si à la vitesse  $v_2 > v_s$ , on ne trouve pas  $G_2 < G'_2$ . C'est la durée de vie du joint qui est en jeu dans ce cas, car si l'on admet qu'une fissure peut se propager dans le joint

adhésif, compte tenu de sa très grande superficie par exemple, dès que la vitesse  $v$  devient supérieure à  $v_s$ , l'utilisation de la colle  $C'$  s'avère préférable à celle de la colle  $C$ , puisque l'énergie à dissiper pour provoquer la même vitesse de propagation (par exemple  $v_2$ ) est plus grande ( $G'_2 > G_2$ ). Pour ce qui concerne la valeur  $v_c$  de la vitesse de propagation critique correspondant à l'apparition du saut de vitesse, il n'a pas été trouvée de relation entre la forme de la courbe  $G - v$  et  $v_c$ , c'est la raison pour laquelle la courbe de la figure 20 relative à la colle  $C$  présente deux points critiques possibles d'apparition de la propagation catastrophique.



**Figure 20 :** Comparaison des comportements de deux colles différentes  $C$  et  $C'$  dans le diagramme  $\lg(G) - \lg(v)$ .

Lorsqu'il s'agit non plus de films élastiques mais de matériaux déformables élastiquement en flexion, il est commode d'utiliser un essai de clivage (figure 17 b) tel que le **test du copeau**, lequel a été mis au point par Obreimoff en 1930 dans son étude du travail à fournir pour cliver, à partir d'un bloc, une lamelle de mica. Cette expérience est adaptée aujourd'hui au cas d'une plaquette d'un matériau élastique, préalablement collée sur un substrat rigide, que l'on décolle par insertion à l'interface d'un coin dur et tranchant, comme le représente schématiquement la figure 21. En considérant que ce clivage équivaut à la flexion d'une poutre encastrée à une extrémité (point B sur la figure 21) et qu'une flèche égale à l'épaisseur  $h$  du coin est imposée à son autre extrémité (point A sur la figure 21), il est aisé de calculer, à partir de l'énergie élastique emmagasi-

née dans la poutre (en supposant que son épaisseur  $e$  est très petite devant sa longueur  $L$ ), le taux  $G$  de restitution de l'énergie :

$$G = (3/8)Ee^3h^2/L^4 \quad (9)$$

$E$  étant le module d'élasticité du matériau constitutif de la poutre. On ne manquera pas de remarquer que  $G$  est indépendant de la largeur  $b$  de la poutre.  $L$ , longueur de cette poutre, représente la longueur d'une fissure préexistente de largeur  $b$  dont la propagation s'amorce dès que  $G$  devient plus grand que  $G_0$ , par enfoncement brusque du coin, par exemple.

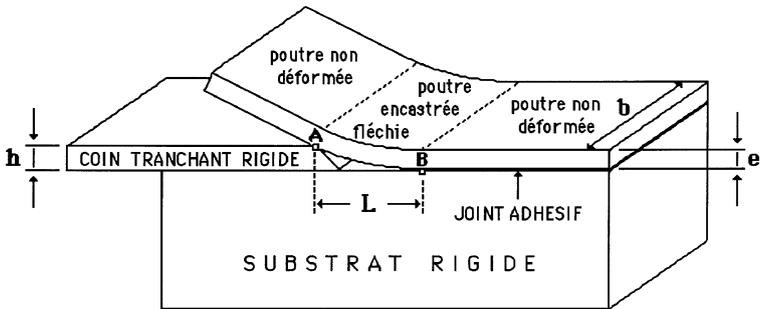


Figure 21 : Représentation schématique du test du copeau.

La géométrie du **test du copeau** est particulièrement intéressante dans la mesure où  $G$  variant comme l'inverse de la puissance 4 de la longueur  $L$  de la fissure (relation (9)), l'équilibre est très rapidement atteint et  $G_0$  est ainsi déterminé de manière précoce (à partir de la mesure de  $L = L_0$ ). Cette commodité ne dispense pas le tracé de la courbe  $G - v$ , lequel pose plus de problèmes d'ordre technique que le test de pelage par suite de la variation rapide de la vitesse de propagation. La comparaison des qualités de plusieurs colles se fait, comme précédemment, à partir de courbes telles que celles représentées dans la figure 20.

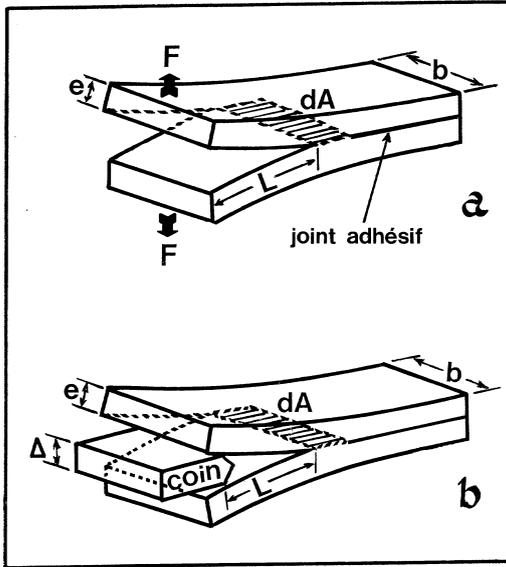
Un dernier test qu'il convient d'évoquer, puisque très utilisé, consiste aussi en un essai de clivage (figure 17 b), il s'agit du test du **double levier** (DCB, *Double Cantilever Beam* en anglais), lequel est très voisin du précédent quant à l'aspect mécanique de la rupture qui le caractérise. Cette épreuve, comme le schématise la figure 22, consiste à séparer deux poutres ou plaquettes de mêmes dimensions préalablement collées, en imposant soit un effort  $F$  perpendiculairement au plan de l'interface, soit en imposant un écartement  $\Delta$  à l'aide d'un coin. Dans

la figure 22,  $dA$  représente l'élément unitaire de surface balayée par la fissure au début de la propagation. Bien que la géométrie soit la même suivant les deux procédures,  $F$  ou  $\Delta$  imposé, les comportements sont complètement différents. En effet, les taux  $G_F$  et  $G_\Delta$  de restitution de l'énergie relatifs aux deux types d'essais précédents, sont respectivement égaux à :

$$G_F = 12F^2L^2/Eb^2e^3 \quad (10 a)$$

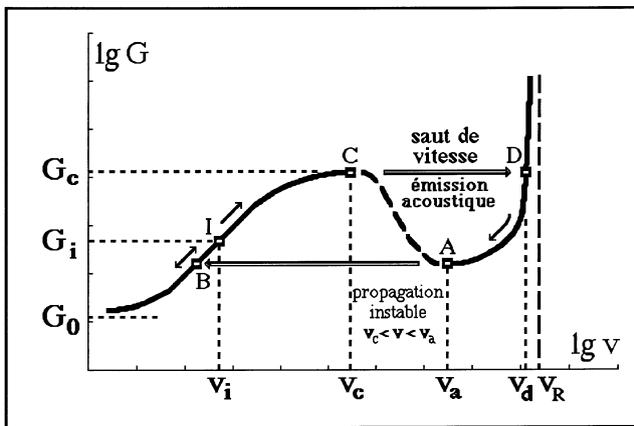
$$G_\Delta = (3/16)Ee^3\Delta^2/L^4 \quad (10 b)$$

la relation (10 a) montre clairement que dès que la force appliquée  $F$  est suffisante pour amorcer une fissure ( $G > G_0$ ),  $G$  augmente immédiatement comme le carré de la distance parcourue par la fissure de sorte que le système évolue très rapidement vers une rupture catastrophique (figure 19). L'évaluation de  $G_0$  est délicate, par contre, le tracé du diagramme  $G - v$  ne pose pas de problème en cinématographiant la propagation. En revanche, le deuxième type d'essai (relation (10 b)) dont la valeur de  $G$  a, à un coefficient numérique près, la même forme que pour le test du copeau, présente les mêmes avantages et défauts que ce test.



**Figure 22 :** Représentation schématique du test du double levier à force imposée (a) et à écartement imposé (b).

Afin, dans un premier temps, de simplifier la présentation de la relation entre le taux  $G$  de restitution de l'énergie mécanique et la vitesse  $v$  de propagation d'une fissure conduisant à la rupture d'un assemblage collé (figures 19 et 20), seule la portion de la courbe caractérisant la propagation aux vitesses lentes (propagation subcritique), inférieures ou égales à la vitesse critique  $v_c$ , a été donnée. En fait, la courbe complète a une forme sigmoïde comme le schématise la figure 23. La portion, déjà examinée, est complétée par une autre branche déportée vers les vitesses très rapides avec, entre elles-deux, une bande interdite pour laquelle sont observées les instabilités de propagation. Cette courbe constitue un modèle très simple pour rendre compte de tous les comportements de propagation de fissures dans un matériau ou un joint collé.



**Figure 23** : Courbe complète de variation du taux de restitution de l'énergie mécanique en fonction de la vitesse de propagation d'une fissure.

A titre d'exemple, considérons le test du double levier (figure 22). Lorsqu'une force  $F$  est imposée (figure 22 a) et qu'elle est suffisante ( $G > G_0$ ) pour initier la propagation d'une fissure à partir d'un défaut préexistant de longueur initiale  $L_0$  (relation (10 a)), le point I de fonctionnement à l'instant initial (figure 23) va décrire la courbe  $G - v$  vers la droite puisque  $G$  augmente ( $G$  varie comme  $L^2$ ). Dès que la vitesse de propagation atteint la valeur  $v_c$ , (point C de la figure 23) un saut de vitesse avec une émission acoustique associée est observé, à énergie  $G_c$  constante, de  $v_c$  à  $v_d$ . La vitesse est si grande que cette propagation conduit inéluctablement à la ruine de l'éprouvette ou de l'assemblage collé. Théoriquement, en supposant infinie la dimension

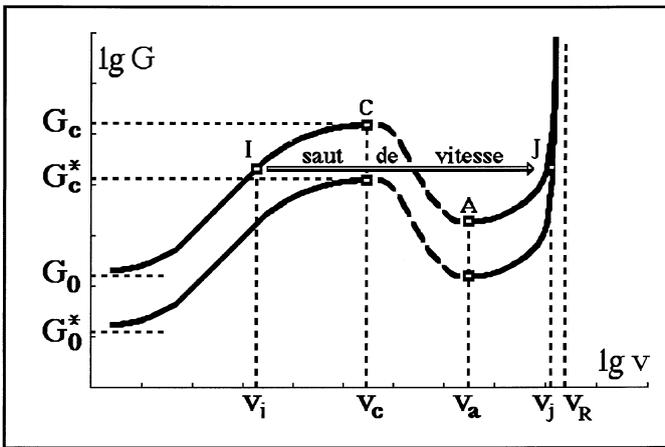
du corps d'épreuve, la vitesse croîtrait à partir de  $v_d$  jusqu'à approcher la vitesse limite  $v_R$  des ondes de Rayleigh (vitesse voisine de celle du son dans le matériau).

Sans modifier la géométrie (double levier) imposons maintenant un écartement  $\Delta$  constant (figure 22 b et relation (10 b)) et comme précédemment supposons que cet écartement est suffisant pour initier la propagation, le point de fonctionnement à l'instant initial étant le même point I. Au cours du temps ce point va décrire la courbe vers la gauche puisque  $G$  diminue ( $G$  varie comme  $L^{-4}$ ) et la fissure va tendre rapidement vers son équilibre ( $v = 0$  et  $G = G_0$ ).

Changeons de géométrie et considérons un rouleau de ruban adhésif. Supposons que l'on applique à l'extrémité de la bande pendant une vitesse de tirage constante  $v$  telle que  $v_c < v < v_a$  (figure 23), que ce passe-t-il ? L'application d'une vitesse donnée n'étant pas instantanée, le point de fonctionnement I va, à partir de  $v = 0$ , gravir la courbe jusqu'à atteindre le point C correspondant à  $v_c$ , comme  $v_c$  est inférieure à la vitesse  $v$  imposée, un saut de vitesse se produit avec une émission acoustique pour atteindre la valeur  $v_d$ , à énergie constante. A cet instant (point D de la figure 23) la vitesse de propagation de la fissure est supérieure à la vitesse  $v$  imposée, il en résulte un ralentissement, le point de fonctionnement I décrivant la branche DA avec comme vitesse minimale  $v_a$  qui est, elle-aussi, supérieure à la vitesse d'entraînement imposée  $v$ . Cette situation provoque un nouveau saut de vitesse, à énergie constante, de  $v_a$  à  $v_b$ . Chacun aura compris qu'au point B, la vitesse de la fissure étant inférieure à  $v$ , un nouveau cycle BCDAB va être décrit, éventuellement après un léger ralentissement au delà du point B. C'est très exactement ce qui se passe lorsque l'on fait craquer un ruban de scotch® brillant ordinaire en tirant dessus, le pelage est saccadé, le régime de propagation est dit catastrophique. Les plus curieux ne manqueront pas de remarquer la présence sur le ruban de traces parallèles correspondant aux cycles réalisés (il y a une trace et une émission sonore par cycle).

Jetons un dernier regard à la courbe  $G - v$  pour montrer qu'elle permet également d'expliquer pourquoi certains phénomènes de rupture et de décollement nous apparaissent comme brutaux et inéluctables. Considérons un assemblage collé que l'on croit parfaitement sain alors qu'en fait il se détruit progressivement par propagation lente d'une fissure que représente le point de fonctionnement I sur la courbe de la figure 24 (courbe supérieure), le taux de restitution de l'énergie  $G_i$

correspondant étant compris entre les valeurs  $G_0$  et  $G_c$ . Si, pour une cause quelconque, telle que augmentation brutale de l'humidité et/ou contamination rapide de l'environnement, les énergies de surface ( $\gamma$  ou  $w$ ) sont brusquement diminuées, il en résulte une réduction concomitante de  $G_0$ , lequel prend la valeur  $G_0^*$ . La courbe, correspondant aux conditions nouvelles influençant le comportement de la fissure, se déduit de la précédente par un déplacement vertical vers le bas, de sorte que le taux  $G_i$  du point de fonctionnement peut avoir une valeur plus grande que le nouveau taux critique  $G_c^*$ . Il en résulte instantanément, à énergie constante  $G_i$ , un saut de vitesse de très grande amplitude qui entraîne la ruine de l'assemblage (figure 24).



**Figure 24** : Prédiction d'un saut de vitesse de fissure par abaissement des propriétés superficielles à l'équilibre.

Pour clore ces questions de mécanique de rupture, la figure 25 donne la terminologie employée pour décrire l'état d'une fissure à l'équilibre et en mouvement dans un matériau ou à l'interface d'un joint adhésif.

### 6.3. Contrôles non destructifs

Il s'agit de tests de qualification ayant pour but de détecter des défauts de collage (bavures, fissures, bulles, ...) afin d'écartier tout assemblage collé ne répondant pas aux normes que l'industriel s'est fixées pour l'application prévue de la structure collée. En d'autres termes, on n'acceptera aucun défaut dans l'élaboration d'une pale

d'hélicoptère par suite du caractère vital de cet élément, alors que des tolérances seront acceptées pour des collages de moindre importance.

### TERMINOLOGIE

$G=G_0$ et $\partial G/\partial A > 0$ (ou $\partial G/\partial L < 0$ )	équilibre stable
$G=G_0$ et $\partial G/\partial A < 0$ (ou $\partial G/\partial L > 0$ )	équilibre instable
$G=G_0$ et $\partial G/\partial A = 0$ (ou $\partial G/\partial L = 0$ )	équilibre indifférent
$G > G_0$ et $\partial G/\partial v > 0$	propagation stable
$G > G_0$ et $\partial G/\partial v < 0$	propagation instable (saut de vitesse, propagation catastrophique)
$G > G_0$ et $\partial G/\partial v = 0$	propagation à vitesse constante <i>exemple : pelage</i>
$G > G_0$ et $\partial G/\partial A > 0$ (ou $\partial G/\partial L < 0$ )	propagation contrôlée (à vitesse décroissante) <i>ex : DCB à écartement <math>\Delta</math> imposé</i>
$G > G_0$ et $\partial G/\partial A < 0$ (ou $\partial G/\partial L > 0$ )	propagation spontanée (à vitesse croissante) <i>ex : DCB à force <math>F</math> imposée</i>

avec :

$G$  : taux de restitution de l'énergie mécanique :  $G = (\partial U_E / \partial A + \partial U_F / \partial A)_X$  ;

$U_E$  : énergie élastique emmagasinée dans le système ;

$U_F$  : énergie potentielle de la force  $F$ , éventuellement appliquée ;

$A$  : superficie de la surface plane assurant le contact (toute propagation conduisant à la rupture implique nécessairement  $dA < 0$ ) ;

$X$  : paramètre maintenu constant, force ou déplacement élastique ;

$G_0$  : taux de restitution de l'énergie mécanique à l'équilibre (à vitesse de propagation nulle) ;

$L$  : longueur de la trajectoire parcourue par la fissure ;

$v = dL/dt$  : vitesse de propagation de la fissure.

**Figure 25** : Le langage de la mécanique de la rupture, pour les conditions d'équilibre, de stabilité et de propagation d'une fissure dans un matériau massif ou un joint collé.

Les quatre principaux essais mis en œuvre en vue de détecter des défauts de collage sont :

**1** - les méthodes ultrasonores, basées sur le principe que toute discontinuité de la matière est une source de réflexion, de sorte que la perturbation du signal sert d'indicateur de présence d'un défaut ;

**2** - l'interférométrie holographique : le but est de former un réseau régulier de franges d'interférence par application d'une petite déformation, laquelle doit provoquer des déplacements de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde utilisée, l'existence d'un défaut de collage est mise en évidence par une perturbation localisée du réseau de franges ;

**3** - la thermographie infrarouge, qui est une technique basée sur la loi de Stephan-Boltzman concernant la puissance rayonnée par un matériau soumis à un flux thermique : toute anomalie dans un joint collé se traduit par une variation de la capacité calorifique du milieu concerné ;

**4** - l'émission acoustique : une contrainte mécanique ou thermique imposée à un matériau a pour conséquence de provoquer une émission ultrasonore. La présence de défauts accroît l'activité sonore du milieu sollicité.

Pour le domaine particulier de la fabrication des pales d'hélicoptère (figure 6), dont tous les éléments constitutifs sont collés entre eux, il existe une méthode manuelle, appelée «tapping», qui consiste à laisser rebondir sur la surface de la pale une petite tige métallique présentant une extrémité émoussée. Le manipulateur, qui teste chaque centimètre carré de la surface, est capable, par l'écoute du bruit du rebond, d'une part, de détecter la présence d'un défaut de collage, et, d'autre part, d'indiquer à quelle profondeur il se situe. Ce type de contrôle est, bien évidemment, mené en parallèle avec une ou plusieurs des méthodes précédemment évoquées, mais la similitude des diagnostics nous transporte d'admiration pour l'extraordinaire dextérité dont fait preuve le manipulateur.

#### **6.4. La durée de vie d'un joint collé**

La durée de vie d'un joint adhésif est le plus grand problème du collage industriel, car une fois déterminées les grandeurs, comme  $G_0$  et/ou la relation  $G - v$ , comment le joint va-t-il évoluer au cours du temps ? L'expérimentation (test de clivage, par exemple) montre que les adhésifs structuraux, dans une atmosphère tempérée non trop humide ne voient pas leurs caractéristiques évoluer en l'absence de fortes contraintes extérieures. Par contre, si la contrainte imposée excède environ 30 % de la contrainte de rupture, la durée de vie du joint décroît exponentiellement avec l'intensité de la contrainte, cette dernière étant imposée de manière permanente.

Le paramètre le plus important semble être l'humidité : un joint collé perd 90 % de sa capacité à résister à la rupture lorsqu'il est saturé

d'eau. Heureusement, d'une part l'imprégnation d'eau est réversible, c'est-à-dire que le joint, à moins d'une détérioration, retrouve ses propriétés initiales dès que le taux d'humidité revient à un taux normal et d'autre part, la diffusion de l'eau est très lente. La prédiction de la durée de vie d'un joint collé n'est que pour demain !

## 7. EN GUISE DE CONCLUSION

Rappelons qu'à l'heure actuelle, on peut coller entre eux tous les matériaux mais qu'en contrepartie, cela demande des colles spécifiques ainsi qu'un très grand savoir faire. Malgré l'assurance, quelque peu arrogante parfois, de certains fabricants de produits adhésifs, on ne colle pas n'importe quoi n'importe comment. Quant à la durée de vie du joint collé réalisé, bien malin serait celui qui peut la prédire, c'est sans doute la raison pour laquelle des horlogers de grand renom ne souhaitent pas que l'on sache que certains éléments de montres sont collés. Et pourtant, le collage est une technique de plus en plus utilisée aujourd'hui, qui rivalise avec le rivetage, le vissage et le soudage. Quatre à cinq kilogrammes de colle interviennent actuellement dans l'assemblage des différents éléments d'une voiture de tourisme et il faut s'attendre à voir croître cette masse de colle. Et cela, bien que la plupart des mécanismes fondamentaux de l'adhésion des solides soient encore mal compris. Certes, il existe bon nombre de modèles qui permettent d'expliquer certains des comportements observés, mais nous sommes encore loin de voir paraître une théorie unifiée de l'adhésion et du collage.

## BIBLIOGRAPHIE

- M. BARQUINS - *Les polymères*, B.U.P. n° 743 (avril 1992), pp. 509-530.
- M. BARQUINS - *Colles naturelles et colles synthétiques*, Pour la Science n° 192, octobre 1993, pp. 8-10.
- H.-F. BRINSON - *Engineered Materials Handbook*, vol. 3 : Adhesives and sealants. ASM International, USA, 1990.
- J. COGNARD - *Les collages*, Pour la Science n° 180, octobre 1992, pp. 56-62.
- P. COUVRAT - *Le collage moderne*, Hermès, Paris, 1990.
- P. COUVRAT - *Le collage structural moderne*, Lavoisier, Paris, 1992.

- J. DELORME et R. BLUMA - *Les matières plastiques*, Librairie Desforges, Paris, 1945.
- A.-J. KINLOCH - *Adhesion and Adhesives, Science and technology*; Chapman and Hall, Londres, 1990.
- D. MAUGIS et M. BARQUINS - *Stick-slip and peeling of adhesives tapes*, Adhesion 12, éditeur K. W. Allen, Elsevier Applied Science Publishers Ltd, Londres, 1988, pp. 205-222.
- J.-J. MEYNIS de PAULIN - *Les colles et adhésifs*, Éditions Guy Le Prat, Paris, 1974.
- H. MONTERNOT, D. BÉNAZET et H. ANCENAY - *Guide du collage du CETIM*, Lavoisier, Paris, 1978.
- E.-H. SCHINDEL-BIDINELLI - *Pratique du collage industriel*, Lavoisier, Paris, 1992.