

PLASTIQUES ET COMPOSITES
FAMILLES D'ADHÉSIFS
ET CARACTÉRISATION D'UN COLLAGE
STRUCTURAL



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **AM3560 V2**

Date de publication :
10 mars 2022

Familles d'adhésifs et caractérisation d'un collage structural

Cet article est issu de : **Matériaux | Plastiques et composites**

par **Chantal BRETTON, Gilbert VILLOUTREIX**

Mots-clés

colles | assemblage | tests
mécaniques | acier industriel

Résumé Suite à l'évolution des propriétés mécaniques des adhésifs, et donc à la multitude des applications industrielles, le collage fait partie incontestablement des techniques les plus modernes d'assemblage. Cet article présente les propriétés des principaux adhésifs structuraux et non structuraux disponibles à ce jour, ainsi que les problèmes soulevés par l'utilisation du collage en fabrication industrielle. La mise en œuvre et l'exploitation d'une méthode de caractérisation d'un collage structural par éprouvette sont ensuite exposées.

Keywords

glues | bonding | mechanical
tests | industrial steel

Abstract Due to evolution of mechanical properties of adhesives and the growth of many new industrial applications, adhesive bonding is now particularly suitable in modern technics of assembly. This article deals with major structural and non structural adhesives and their properties up to dates, as well as difficulties and solutions to choose adhesives for industrial applications. Finally, mechanical tests on steel samples bonded with structural adhesives are presented.

Pour toute question :

Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :
infos.clients@teching.com

Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **23/03/2022**

Pour le compte : **7200106152 - éditions ti // céline BLONBOU // 86.252.11.200**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

Familles d'adhésifs et caractérisation d'un collage structural

par **Chantal BRETTON**

Head of development
ArcelorMittal, Alleur, Belgique

et **Gilbert VILLOUTREIX**

Ancien professeur des universités
Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), Paris, France

1. Familles d'adhésifs	AM 3 560v2 – 2
1.1 Bases naturelles (végétales, minérales, animales)	– 3
1.2 Bases synthétiques	– 3
2. Adhésifs structuraux et non structuraux : définitions et propriétés	– 3
2.1 Liaisons et interactions physico-chimiques internes	– 3
2.1.1 Concept de macromolécule	– 3
2.1.2 Édifices macromoléculaires	– 3
2.2 Adhésifs non structuraux	– 4
2.3 Adhésifs structuraux	– 4
2.3.1 Résines époxydiques	– 4
2.3.2 Résines polyuréthanes	– 5
2.3.3 Adhésifs acryliques	– 7
2.3.4 Adhésifs phénoliques	– 9
3. Problèmes de l'utilisation du collage dans les fabrications industrielles	– 9
3.1 Contraintes fonctionnelles	– 9
3.2 Contraintes de mise en œuvre	– 9
3.3 Contraintes d'hygiène, de sécurité et environnementales	– 10
4. Caractérisation d'un collage structural	– 10
4.1 Caractérisation de l'assemblage collé par éprouvette de traction-cisaillement	– 10
4.1.1 Caractéristiques intrinsèques des matériaux : support et adhésif	– 10
4.1.2 Contraintes mécaniques dans un joint collé	– 13
4.2 Facteurs influant sur le comportement mécanique des joints collés à simple recouvrement	– 15
4.2.1 Vitesse de sollicitation et facteurs géométriques	– 15
4.2.2 Facteurs physico-chimiques	– 18
5. Conclusion	– 19
Pour en savoir plus	Doc. AM 3 560v2

Travaux de recherche efficaces, progrès technologiques, réalisations techniques de pointe, démarches commerciales ont su faire pénétrer les adhésifs jusque dans la vie courante.

Si le collage était déjà bien connu dans l'Antiquité égyptienne notamment pour associer des feuilles de papyrus accolées les unes aux autres pour former un rouleau d'écriture (département des Antiquités égyptiennes du musée du Louvre), ancêtre de la forme du livre jusqu'au II^e siècle après J.C., avant l'arrivée du codex, puis du livre actuel, il connaît au XX^e et XXI^e siècle la plus forte expansion des technologies modernes d'assemblage : il n'est point de domaine technique qui puisse ignorer l'importance de l'assemblage par collage.

Les papiers, les cartons, les tissus, les cuirs, les plastiques, les bois, les métaux, les minéraux connaissent maintenant d'innombrables applications nouvelles grâce au collage.

L'industrie aéronautique en grand précurseur du progrès technologique, forte de son autorité, a ouvert la voie à toute l'industrie de la construction.

Les premières applications de collage d'acier datent du début des années 1970 et connaissent un essor important malgré une tradition très affirmée pour la soudure et les assemblages mécaniques.

En raison de l'évolution des caractéristiques des adhésifs à propriétés mécaniques améliorées et adaptées aux matériaux mis en œuvre qui a engendré une multitude d'applications industrielles, le collage occupe, à juste titre, une place de choix parmi les techniques les plus modernes d'assemblage.

L'article présenté dans la rubrique semi-produits de ce traité concerne le collage structural par adhésif appliqué à des assemblages dont le module d'élasticité des substrats est élevé par rapport à celui du polymère adhésif. Les produits adhésifs (ou colles) d'origine animale ou végétale ne sont a priori pas pris en compte.

Pour analyser et prédire le comportement d'un assemblage collé de ce type, on ne dispose pas jusqu'alors d'une théorie unique capable d'interpréter les phénomènes lors du collage ni d'une approche de synthèse intégrant le choix des conceptions, produits et procédés.

Une attention particulière est portée sur l'étude intrinsèque de l'adhésif et celle du joint collé à simple recouvrement sollicité en traction-cisaillement. Ces éléments permettent en particulier d'étudier les phénomènes d'adhésion et de tenue en milieu chaud et humide en vue d'une conception d'assemblage collé optimale assurant une garantie de durabilité, appréciée notamment par les industriels.

L'objectif de cet article est de définir les principaux adhésifs structuraux utilisés à ce jour et de déterminer une procédure reproductible de mise en œuvre et de caractérisation des éprouvettes de contrôle, afin de dégager les paramètres fondamentaux liés au substrat, au revêtement et à l'adhésif qui conditionnent les valeurs de résistance aux sollicitations.

Le lecteur désirant approfondir ses connaissances sur le collage structural pourra consulter la rubrique Collage du traité Génie mécanique des Techniques de l'Ingénieur.

1. Familles d'adhésifs

Un adhésif se définit comme un produit capable de maintenir ensemble des matériaux, notamment par adhérence. L'adhérence est ainsi l'état dans lequel deux surfaces sont maintenues assemblées par des forces interfaciales. Les adhésifs sont obtenus par formulation de plusieurs constituants, chacun apportant une ou plusieurs fonctions technologiques, la résine de base conduisant à la dénomination de l'adhésif.

Les conditions de mise en œuvre de l'adhésif (rhéologie, mouillabilité des surfaces...) et les performances finales de l'assemblage sont notamment liées aux caractéristiques intrinsèques de l'adhésif mais aussi aux adjuvants de formulation (plastifiants, tensioactifs, charges...), à la conception de l'assemblage (géométrie des joints, etc.), aux préparations des surfaces et aux paramètres de mise en œuvre [1] [2].

Il n'y a pas d'adhésif universel, mais plusieurs dizaines de familles d'adhésifs [3]. La classification des adhésifs par nature chimique est la plus utilisée, mais elle doit également tenir compte du mode de durcissement et des performances.

1.1 Bases naturelles (végétales, minérales, animales)

Les **colles naturelles** peuvent être à bases végétales (dextrines, celluloses, amidon...), à bases minérales (silicates, bitumes...) ou à bases animales (caséine, colles de poisson, colles d'os...).

1.2 Bases synthétiques

Les **adhésifs à base de résines synthétiques** comportent principalement deux classes : ceux dont le durcissement correspond à une réaction chimique (adhésifs réactifs) et ceux pour lesquels la « prise en masse » correspond généralement à un changement d'état physique résultant de l'évaporation d'un solvant ou de l'eau d'une émulsion aqueuse ou bien de la solidification (adhésifs physiques). En plus de ces deux classes principales il existe aussi des adhésifs thermoplastiques, qui pour certains présentent une première polymérisation par évaporation puis une seconde lors du chauffage.

Ces deux premières classes ont leur importance industrielle mais souvent les adhésifs réactifs résistent à des mises sous charge significatives et sont, par conséquent, considérées les seules aptes à servir d'adhésifs pour les applications mécaniques fortes.

■ Adhésifs à prise réactive chimique

D'une manière générale, les principaux adhésifs thermodurcissables sont les époxydiques, les polyuréthanes, les phénoliques, les silicones, les acryliques anaérobies. Les acryliques modifiés, les cyanoacrylates appartiennent aux thermoplastiques.

■ Adhésifs à changement d'état physique

Ces produits passent, par exemple, de l'état liquide à l'état solide. Ce sont des adhésifs thermoplastiques tels que :

- les bases solvantées (élastomères) : le caoutchouc naturel, le caoutchouc butyl, les silicones thermoplastiques...
- les émulsions aqueuses : les vinyliques, les acryliques...
- les thermofusibles : les polyesters, les copolymères éthylène-acétate de vinyle (EVA), les polyamides...

À retenir

- Dans les classements d'adhésifs on désigne généralement une grande catégorie par « famille ».
- Celles à base naturelle sont essentiellement issues des règnes végétal, animal et à moindre mesure minéral.
- La plus grande famille vient du domaine synthétique essentiellement constituée de produits issus du pétrole.
- Le nombre de formulations d'adhésifs est quasiment illimité ; pour une application donnée, on essaie de choisir la formulation existante la mieux adaptée aux contraintes d'usage.

2. Adhésifs structuraux et non structuraux : définitions et propriétés

2.1 Liaisons et interactions physico-chimiques internes

2.1.1 Concept de macromolécule

Les adhésifs proviennent essentiellement de la synthèse de polymères conduisant à des structures linéaires (thermoplastiques) ou tridimensionnelles (élastomères et thermodurcissables) [2].

Les polymères tridimensionnels sont insolubles et infusibles quand ils sont complètement formés ou durcis. Il est possible d'obtenir des polymères tridimensionnels à partir de certains polymères linéaires par des réactions de pontage ou de réticulation comme le durcissement des résines époxydiques à l'aide de durcisseurs type amine, par exemple. La réaction est irréversible.

2.1.2 Édifices macromoléculaires

Une macromolécule (ou grande molécule ou chaîne macromoléculaire) est caractérisée par la répétition d'un même groupe d'atomes caractéristique d'un produit donné appelé « motif de base » associé à lui-même un grand nombre de fois. Ainsi la molécule « éthylène » conduit par polymérisation (répétition successive avec ouverture de liaison) à la macromolécule polyéthylène.

Pour affiner les connaissances en ce domaine depuis la base, le lecteur peut avantageusement consulter les articles de la base Plastiques et composites et en particulier les articles *Nomenclature, classification et formules chimiques des polymères* [A 3 035] ainsi que *Structure moléculaires des polymères* [A 3 037].

2.1.2.1 Forces intramoléculaires

Les forces intramoléculaires sont des liaisons chimiques classiques qui peuvent être soit covalentes ou ioniques, soit métalliques. Les liaisons covalentes sont les principales forces agissant entre atomes d'une même molécule : elles assurent la cohésion de la chaîne macromoléculaire. Ces liaisons mettent en jeu des énergies importantes. On peut noter que les éléments présents dans les adhésifs sont, traditionnellement, le carbone (C) qui constitue la majorité des squelettes des chaînes, l'hydrogène (H), l'oxygène (O), l'azote (N), le chlore (Cl), le fluor (F) et le silicium (Si) pour les dérivés siliconés. Les distances d'action des liaisons interatomiques sont de 1 à 2 Å (0,1 à 0,2 nm). L'ordre de grandeur de la longueur d'une chaîne macromoléculaire est le micromètre pour une distance interchaîne de quelques angströms.

2.1.2.2 Forces intermoléculaires

La cohésion d'un édifice macromoléculaire est due à des forces intermoléculaires qui peuvent être de type van der Waals ou des liaisons hydrogène.

Ces liaisons intermoléculaires ont une action à plus longue distance (plusieurs angströms). Elles assurent la compacité et la résistance mécanique de la « masse adhésive » constituant le joint entre les matériaux à assembler.

■ Forces de van der Waals

Ces forces interchaînes se divisent en trois grandes catégories :

- **forces de dispersion ou forces de London.** Ces forces résultent de l'attraction coulombienne instantanée entre électrons et noyaux de deux molécules en interaction. Dans un atome, les électrons sont en mouvement, et ce mouvement peut donner lieu, par concentration locale instantanée, à l'apparition d'un dipôle qui crée un champ électrique. Ce champ polarise un atome voisin dans lequel un dipôle est induit en phase avec le premier et interagit avec le dipôle instantané. Les forces de dispersion de London n'ont pas d'orientation privilégiée et peuvent agir sur une grande portée (jusqu'à plus de 100 Å). Elles sont présentes au sein de tout groupe d'atomes ou de molécules, polaires ou non polaires. Ce sont les principales forces mises en jeu lorsqu'un polymère est proche de la surface d'un métal ;

- **interactions dipôle-dipôle ou forces de Keesom.** Ces forces résultent d'interactions électrostatiques entre dipôles permanents qui s'attirent et s'orientent mutuellement, malgré l'agitation thermique qui tend à les désorienter ;

- **forces d'induction ou forces de Debye.** Lorsqu'une molécule présente un dipôle permanent, celui-ci peut induire un dipôle dans une molécule neutre voisine qu'il déséquilibre. Il existe alors une attraction électrostatique entre le dipôle permanent et le dipôle induit. Les forces d'induction (0,02 à 0,5 kJ/mol) sont cependant plus faibles que les forces de London (0,5 à 2 kJ/mol) ou de Keesom (0,5 à 3 kJ/mol).

■ Liaisons hydrogène

La plupart des processus interfaciaux, dont l'adhésion, sont assurés, pour une large part, par les forces de van der Waals (London principalement) et les liaisons hydrogène (jusqu'à une quarantaine de kilojoules par mole).

Ces dernières se développent entre un atome d'hydrogène « acide » et un atome électronégatif (O, F, Cl...), qui doit posséder au moins un doublet libre d'électrons qu'il doit mettre en commun avec l'atome d'hydrogène. Il en résulte une liaison de type « accepteur-donneur » (cf. § 2.1.2 alinéa 2).

2.2 Adhésifs non structuraux

Les adhésifs non structuraux sont ceux qui présentent des propriétés mécaniques plus modestes (jusqu'à 10 à 12 MPa en résistance en traction-cisaillement par exemple). Leur durcissement correspond souvent à un changement d'état physique comme dans le cas des résines thermofusibles, des adhésifs à base de caoutchouc ou des émulsions.

Ils sont connus également sous le terme « d'adhésifs non réactifs » ; la cohésion de ces adhésifs est obtenue grâce aux liaisons interchaînes et par macromolécules enchevêtrées (figure 1). Ces polymères linéaires donnent des matériaux à cohésion de valeur moyenne.

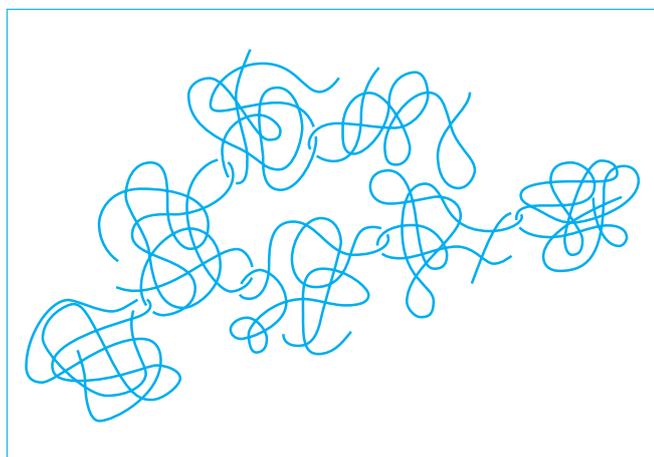


Figure 1 – Macromolécules enchevêtrées

2.3 Adhésifs structuraux

Les adhésifs structuraux [4] conduisent à une forte résistance mécanique de l'assemblage (20 MPa et plus). Ils sont réactifs : ils durcissent par réaction chimique avec formation d'une structure bi- ou tridimensionnelle.

Les familles d'adhésifs les plus courantes entrant dans la catégorie des adhésifs structuraux sont les résines époxydiques, les polyuréthanes, les acryliques et les phénoliques.

2.3.1 Résines époxydiques

La formule des résines époxydiques est donnée à la figure 2. Les adhésifs époxydiques se présentent sous la forme monocomposant ou bicomposant (prépolymère-durcisseur). Leur réticulation s'obtient à froid ou à chaud en présence de durcisseurs (amines, par exemple) [5] [6].

2.3.1.1 Prépolymère

Le mode de synthèse le plus usuel des prépolymères époxydiques est celui des résines à base de bisphénol A. Il correspond à la polycondensation, lorsque le bisphénol A (A pour acétone) réagit avec l'épichlorhydrine de glycol en présence de soude (NaOH) comme catalyseur pour obtenir des résines type DGEBA (diglycidyl-éther du bisphénol A) selon la réaction de la figure 3.

Ces résines sont caractérisées par la présence de radicaux hydroxyles et de ponts époxy réactifs (en cyan sur la figure 3) qui vont permettre l'association interchaîne, la cohésion de l'adhésif, et, parfois, la création de liaisons covalentes fortes avec le support.

Le motif de base du pont époxy présenté figure 4 est caractérisé par la présence d'un atome d'oxygène lié à deux atomes de carbone voisins.

Dans ces prépolymères *n* peut atteindre 25.

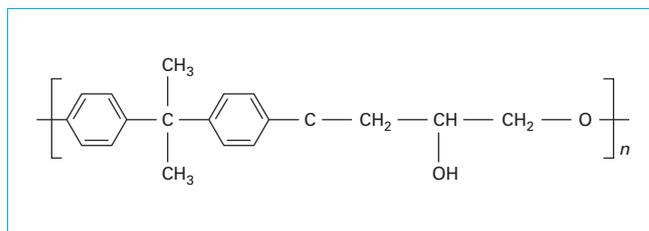


Figure 2 – Motif de base de macromolécule époxydique

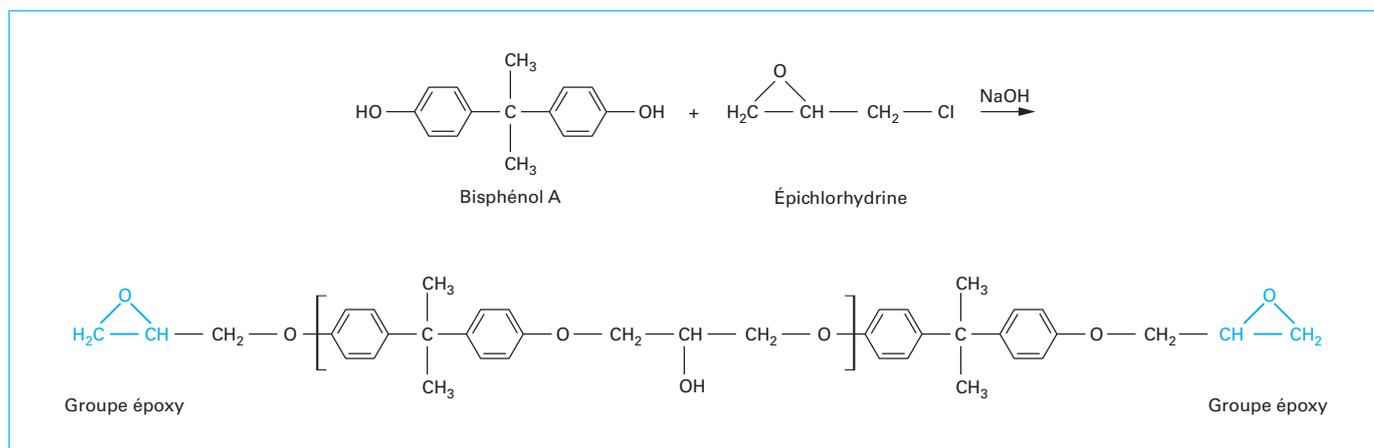


Figure 3 – Obtention des résines de type DGEBA

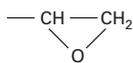


Figure 4 – Caractéristique du pont époxy



Figure 5 – Exemple caractéristique d'amine

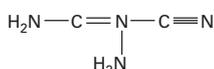


Figure 6 – Dicyandiamide

2.3.1.2 Durcisseur

Le durcisseur est un agent de réticulation du prépolymère. Il permet, par exemple, l'ouverture du cycle époxydique et le pontage des chaînes polymères pour former un réseau tridimensionnel. Il existe une grande variété de durcisseurs. Leur choix est fonction des conditions de mise en œuvre et des propriétés souhaitées. Les amines, telle celle de la figure 5 occupent un rôle important parmi l'ensemble des durcisseurs.

Exemple de diamine : le dicyandiamide

Le dicyandiamide (DICY), dont la formule est donnée figure 6, est un agent de réticulation couramment employé pour les adhésifs utilisés « à chaud », car très stable et peu réactif aux basses températures, et pour l'adhérence maximale des résines ainsi constituées, notamment avec les métaux. Il existe sous deux formes : à température ambiante, c'est un solide blanc cristallin. Aux environs de 100 °C, le DICY devient réactif avec les résines époxydiques ; il faut compter 1 h à 180 °C pour obtenir une réaction complète, mais un accélérateur est généralement incorporé.

2.3.1.3 Additifs

Afin de respecter des critères particuliers de mise en œuvre et de propriétés (réduction de la fragilité du produit final, réduction du coût, fonctions secondaires du joint...), des charges ou additifs sont incorporés au mélange de base. Une gamme courante de charges ou additifs avec l'influence positive ou négative sur la résistance au cisaillement est présentée dans le tableau 1 [7] [8].

2.3.1.4 Réaction de réticulation

Les mécanismes réactionnels des systèmes prépolymère époxyde-dicyandiamide sont complexes. Ils sont gouvernés par les conditions de réticulation (température, cycle), par la nature du milieu, par la présence d'un catalyseur, par les additifs... Tous ces facteurs influent sur le type de réaction [9]. Avec les amines, de

nombreuses réactions sont possibles. Avec le dicyandiamide, la plus probable est celle donnée figure 7.

La réaction démarre lentement, puis la vitesse augmente. Cela peut s'expliquer par l'action catalytique des hydroxydes formés, qui a souvent été mise en évidence.

Les groupes époxydiques aminés réagissent avec les fonctions amine, selon le schéma théorique général de la figure 8.

On obtient un réseau réticulé conduisant à un polymère tridimensionnel thermodurci (figure 9).

2.3.1.5 Propriétés

Les principales propriétés des adhésifs époxydiques sont :

- leurs très bonnes caractéristiques mécaniques ;
- leur faculté d'adhésion exceptionnelle ;
- leur excellente résistance à la fatigue et au vieillissement ;
- leur rigidité et leur module élevés ;
- leur possibilité d'incorporation d'une phase élastomère pour diminuer la rigidité ;
- leur excellente tenue à l'eau et aux produits chimiques ;
- leur bonne tenue en température.

2.3.2 Résines polyuréthanes

Un exemple de formule chimique d'une résine polyuréthane est donné figure 10.

2.3.2.1 Prépolymère et durcisseur

Les résines polyuréthanes sont obtenues par action de polyisocyanates sur des polyalcools, composés contenant un hydroxyle (polyester ou polyéther, ou polymère dialcool à chaîne courte) [10] [11].

Les isocyanates sont synthétisés à partir de produits contenant des groupements aliphatiques ou aromatiques (R). Les isocyanates aromatiques sont généralement préférés pour leur réactivité et leur avantage économique.

Les polyuréthanes constituent la famille de polymères la plus polyvalente qui existe. Il peut s'agir d'élastomères, mais aussi de peintures, de colles, etc.

Le motif uréthane (figure 11) se caractérise par un groupe d'atomes que l'on retrouve dans les chaînes polyuréthanes.

Les polyuréthanes sont des adhésifs très réactifs grâce à la présence de groupes isocyanates capables de réagir avec de nombreux substrats.

Des polyuréthanes plus complexes conduisant à des propriétés particulières peuvent être préparées comme exposés à la figure 12.

Quelquefois le dialcool est remplacé par une diamine et le polymère que l'on obtient est alors une polyurée (figure 13).

Les polyuréthanes créent des liaisons hydrogène intéressantes en collage et ils peuvent être plus ou moins souples. Pour cette raison, ils sont souvent utilisés pour obtenir des copolymères blocs avec des polymères caoutchouteux. Ces copolymères ont des propriétés de thermoplastiques élastomères.

Les adhésifs polyuréthanes présentent en structure deux phases séparées : l'une amorphe plus souple et l'autre cristalline plus compacte. Les propriétés viscoélastiques et la flexibilité de ces adhésifs sont liées à l'existence de ces deux phases.

Tous les additifs et solvants utilisés dans les adhésifs polyuréthanes doivent être anhydres. En présence d'eau, les isocyanates moussent et les gaz qui se dégagent creusent des cavités internes au joint qui conduisent à une adhésion et à une cohésion affaiblies.

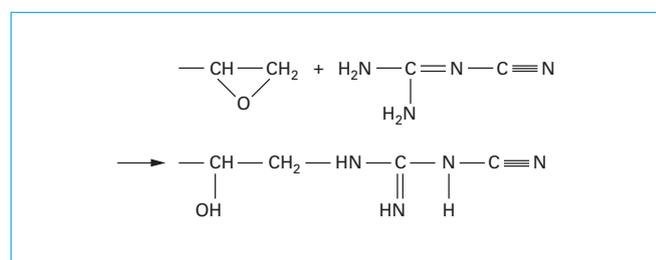
2.3.2.2 Réactions de réticulation

■ Adhésifs à deux composants

Ils se forment par polyaddition, selon le schéma simple donné figure 14.

Tableau 1 – Influence des charges sur la résistance au cisaillement des joints collés (exemple d'adhésif époxydique bicomposant)

Charge	Charge par rapport à l'adhésif [%]	Résistance à la rupture au cisaillement R_{rupt} à - 57 °C [MPa]	R_{rupt} à 25 °C [MPa]	R_{rupt} à 82 °C [MPa]
Oxyde de titane	166,7	10,4	10,8	14,5
	150	11,9	13,0	18,8
	100	14,6	14,3	17,6
	66,7	16,3	19,1	12,3
Oxyde de nickel	233,3	15,5	12,6	18,3
	216,7	12,6	13,5	16,3
	166,7	14,8	14,3	17,1
	20	14,1	14,1	18,7
Oxyde de plomb	250	12,7	14,6	20,5
	233,3	15,5	15,4	26,4
	183,3	15,1	16,7	22,1
	150	17,7	19,0	19,3
Oxyde ferrique	133,3	15,4	17,2	25,8
	108,9	13,5	21,4	22,4
	83,3	17,8	18,4	20,3
	66,7	16,7	20,2	19,3
Alumine	103,3	14,4	13,4	17,4
	86,7	14,5	17,0	19,7
	53,3	17,2	18,9	18,7
	36,7	14,1	21,5	15,1
Résine non chargée	0		19,0	9,5

**Figure 7 – Réaction époxy-dicyandiamide****■ Adhésif monocomposant réticulant à l'humidité de l'air**

Leur réaction a lieu avec un dégagement de dioxyde de carbone (figure 15).

2.3.2.3 Propriétés

Les principales propriétés des adhésifs polyuréthanes sont :

- leurs caractéristiques de résilience et de souplesse ;
- leur bonne résistance au pelage ;
- leur tenue à basse température ;
- leur bon comportement pour l'assemblage de matériaux différents (panneau sandwich).

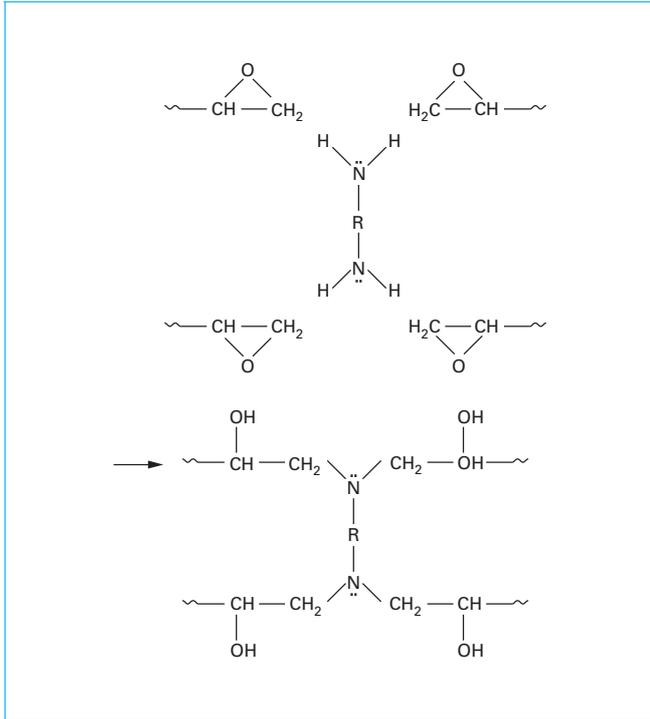


Figure 8 – Obtention d'un réseau réticulé

2.3.3 Adhésifs acryliques

Les adhésifs acryliques passent de l'état liquide à l'état solide par réaction chimique. Leur développement a permis de créer plusieurs variétés dont les principales sont citées ci-après.

■ Acryliques modifiés

Ils polymérisent avec des activateurs ; la résine de base acrylique et l'activateur étant chacun déposés sur une des faces à assembler, le temps ouvert est alors « infini ». Ces adhésifs utilisables de -55 à 120 °C environ présentent une bonne résistance en traction (20 MPa) et aussi au choc du fait de la présence d'élastomère dans la formulation.

■ Acryliques anaérobies

Ils prennent en masse en l'absence d'oxygène et en présence de métal à température ambiante. Ces produits monocomposants contiennent une substance active qui demeure inhibée en présence de l'oxygène de l'air ; en l'absence d'oxygène, des radicaux libres se créent grâce à la présence d'ions métalliques (support acier, laiton, cuivre, fer, bronze), ce qui déclenche la réaction de polymérisation. Ces adhésifs présentent une bonne tenue au cisaillement et en

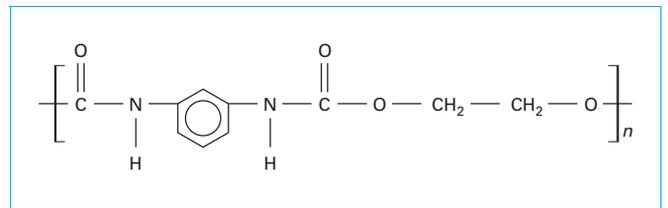


Figure 10 – Formule chimique d'une résine polyuréthane

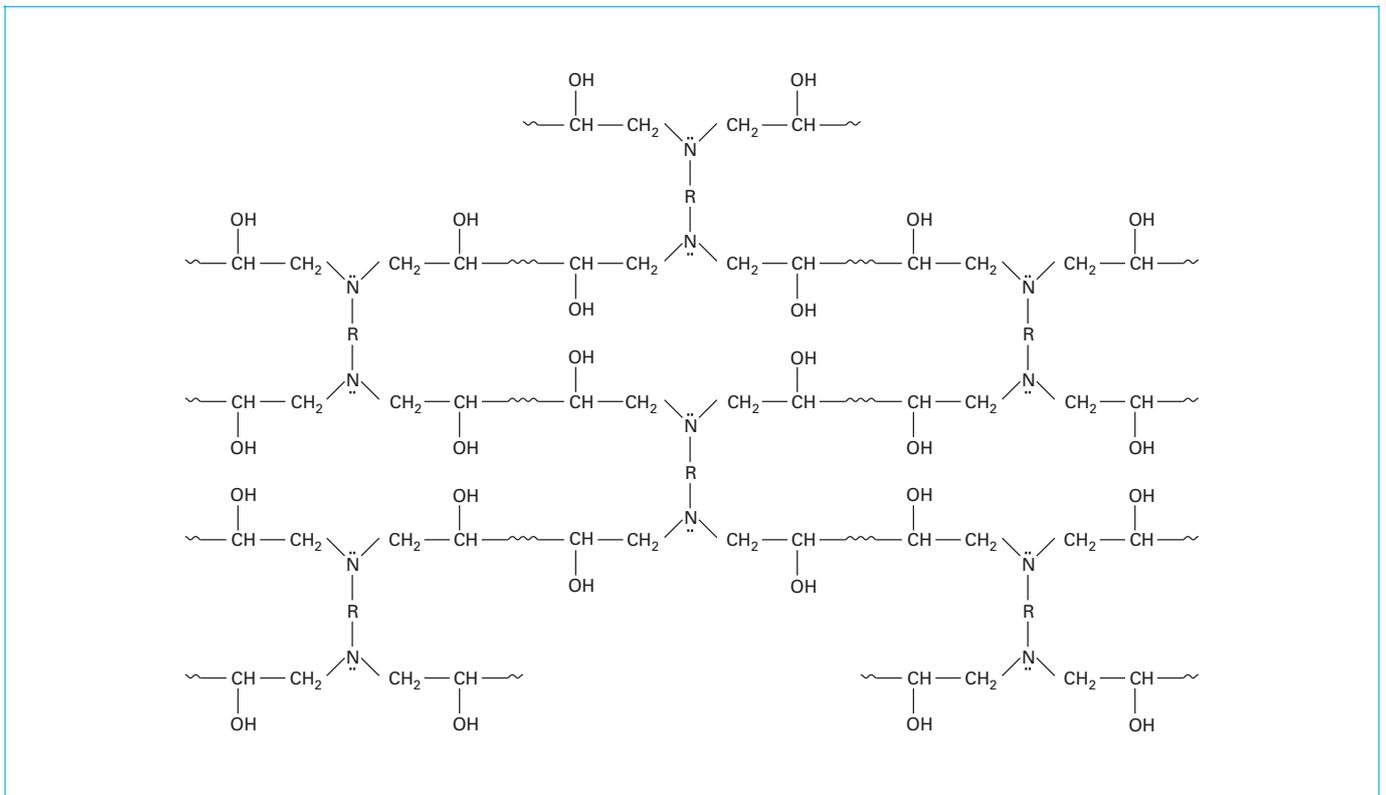


Figure 9 – Réseau réticulaire

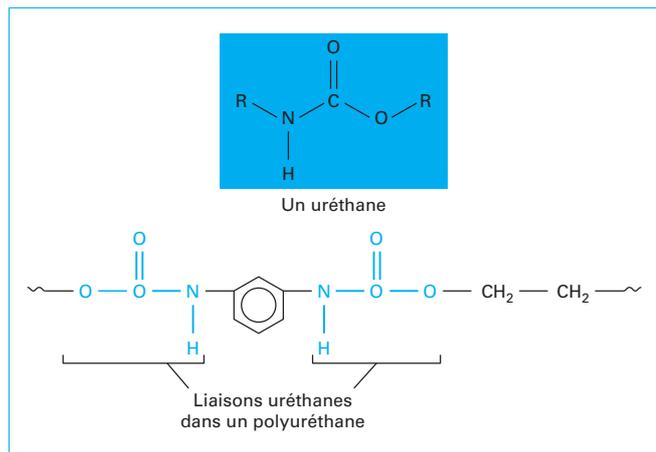


Figure 11 - Motif uréthane et chaîne polyuréthane

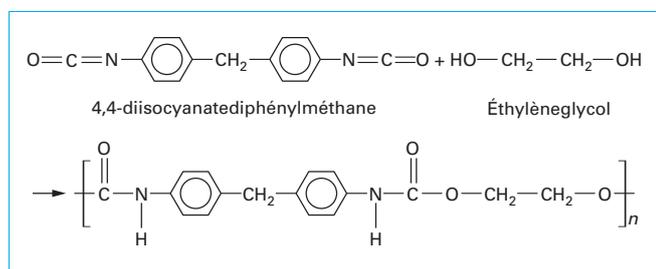


Figure 12 - Exemple de polyuréthane plus complexe

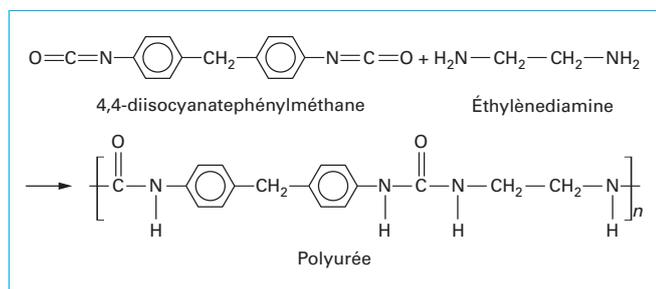


Figure 13 - Exemple de polyurée

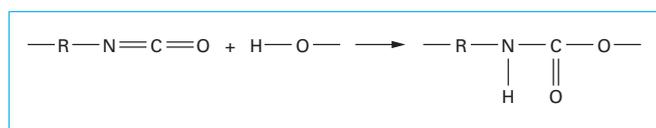


Figure 14 - Schéma de polyaddition

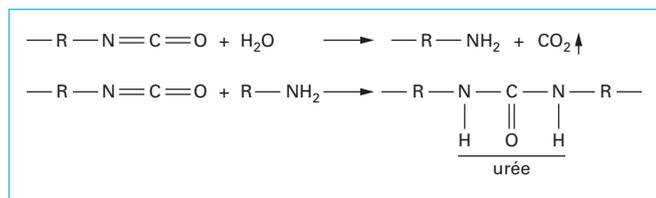


Figure 15 - Exemple d'adhésif monocomposant réticulant à l'humidité de l'air

température (de - 55 à 230 °C). Parmi les applications phares, on cite le freinage/blocage des filets dans l'assemblage avec les boulons et la fixation des emmanchements sur axes.

■ Acryliques photosensibles

Ils réagissent lorsqu'ils sont exposés à la lumière UV, ce qui implique une bonne exposition du joint à la source UV qui va provoquer la photopolymérisation. La lampe UV doit être choisie en fonction de son spectre d'émission et de son intensité adaptés à l'emploi. Des formulations de résines photosensibles polymérisables ou en réaction combinée ont été mises au point pour le cas des joints à géométrie difficilement accessible par le rayonnement de la lampe ou en des emplacements particuliers protégés. Il y a ainsi combinaison de l'auto/photopolymérisation. La résistance en traction peut atteindre 40 MPa.

■ Cyanoacrylates (méthyle, éthyle, butyle), thermoplastiques, monocomposants, liquides incolores

Ils polymérisent rapidement en présence d'une légère humidité ambiante. Le durcissement se fait par polymérisation anionique déclenchée en pratique par l'humidité.

Les réactions de prise en masse sont de type polyaddition (sans élimination de produit) selon :

- 1) Initiation (figure 16) ;
- 2) Propagation (figure 17) ;
- 3) Terminaison (figure 18) ;

Ces adhésifs, de viscosité variable selon les formulations (de 5 à 100 mPa.s), assez polyvalents pour les supports, sont surtout utilisés pour les faibles épaisseurs de joint et pour le collage en quelques secondes de petites surfaces permettant d'obtenir des

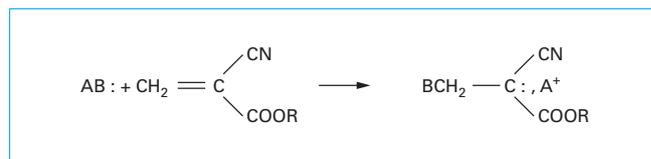


Figure 16 - Réaction d'initiation

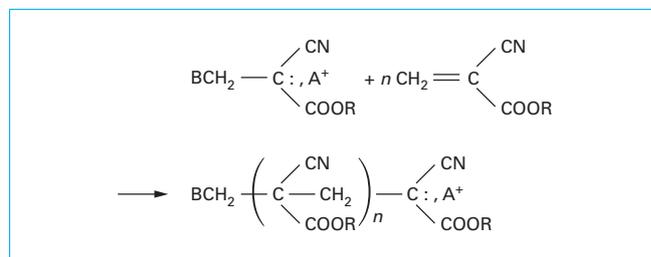


Figure 17 - Réaction de propagation

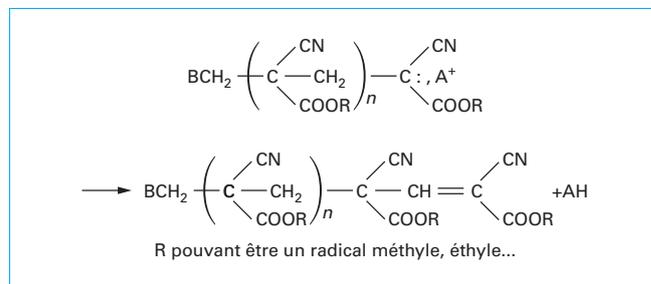


Figure 18 - Réaction de terminaison

assemblages de grande résistance mécanique au cisaillement et à la traction (20 à 30 MPa).

Toutefois, leur tenue en température ne dépasse guère 80 °C en continu. Ils peuvent présenter une forte rigidité selon la formulation et conduire à une rupture du type « fragile » à la température ambiante, moins marquée lorsque le radical est un butyle (plus long, plus souple). Leur résistance aux chocs est souvent limitée avec les bases type « méthyle ». Des charges additionnelles peuvent modifier les comportements, leur prix est élevé et ils sont étiquetés irritants (Xi).

2.3.4 Adhésifs phénoliques

Les adhésifs phénoliques sont obtenus à partir de la polycondensation du phénol et du formol conduisant à un produit thermodurcissable (figure 19).

Sous forme liquide ou de films, ces adhésifs réticulent sous pression et à chaud (par exemple 5 min à 200 °C), ce qui évacue les produits volatils de polycondensation. Ces adhésifs, à haut niveau de résistance en traction-cisaillement (30 à 50 MPa) et de rigidité (3 à 3,8 MPa), présentent de bonnes caractéristiques en fluage et aux températures élevées. Ils sont incombustibles, libèrent peu de fumée et sont très employés dans les structures autoportantes en bois (norme NF EN 301) et pour le collage des matériaux dérivés du bois ; on distingue les adhésifs phénoliques type résorcine phénol-formol et type mélamine, dont la température à l'emploi peut dépasser de beaucoup 50 °C, des adhésifs urée-formol aux propriétés à l'emploi et aux usages plus limités.

Modifiés par des élastomères ou des thermoplastiques, ces résines phénoliques peuvent s'employer pour le collage des métaux ; c'est le cas avec les phénoliques-nitriles (bonne résistance mécanique en cisaillement 25 à 38 MPa), les phénoliques néoprènes (bonne résistance aux basses températures) et les phénoliques vinyliques (bonne résistance mécanique et à l'humidité).

À retenir

- Les adhésifs structuraux constituent une classe d'adhésifs qui présente des propriétés de forte résistance mécanique à l'emploi.
- Ils sont recherchés notamment pour assurer globalement la haute résistance de la structure collée située généralement à des valeurs au-dessus de 10 MPa.
- Ces adhésifs sont essentiellement obtenus à partir des résines époxydiques, polyuréthanes, acryliques ou phénoliques.

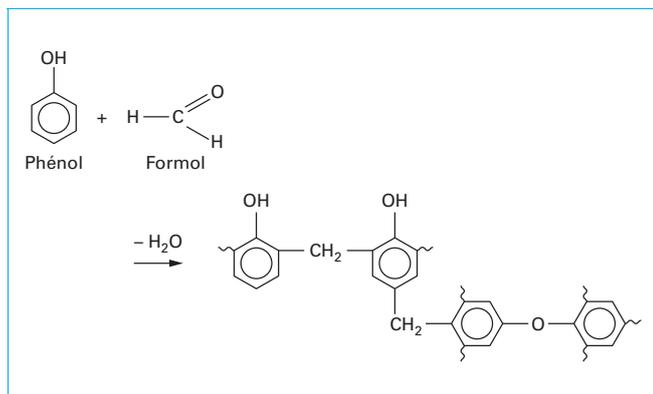


Figure 19 – Polycondensation phénol/formol

3. Problèmes de l'utilisation du collage dans les fabrications industrielles

En fabrication industrielle d'assemblages collés, les principales contraintes imposées par le collage sont de trois types : les contraintes liées au fonctionnement de la pièce à coller (contraintes dites fonctionnelles), celles liées au procédé industriel de dépose et de transformation de la colle (contraintes dites de mise en œuvre) et contraintes d'hygiène, de sécurité et environnementales qui restreignent ou interdisent l'utilisation du produit ou d'un constituant.

3.1 Contraintes fonctionnelles

Pour être efficace, un collage doit supporter, avec une sécurité définie, les contraintes de service.

Une efficacité optimale des joints collés ne peut s'obtenir que si l'on a une adéquation aussi parfaite que possible entre la conception, le calcul et la réalisation des assemblages envisagés. Malheureusement, cette situation idéale ne se rencontre que très rarement, par exemple pour des raisons de tolérance géométriques mal maîtrisées, de méconnaissance des caractéristiques des surfaces à assembler souvent très variables d'une pièce à l'autre et l'inexistence de méthode pratique de calcul de ces assemblages réels à disposition des industries [12] [13] [14] [15].

Dans ces conditions, les industries qui travaillent les assemblages de l'acier sont amenées à utiliser des colles non optimisées fonctionnellement et qui, généralement, remplissent la fonction visée « par excès », le niveau de cet excès n'étant généralement pas connu.

Pratiquement, pour une nouvelle application, la méthode empirique est retenue, selon le processus simplifié suivant :

- dialogue avec le bureau d'études sur le cahier des charges fonctionnel de la pièce à coller ;
- recherche de la colle paraissant la mieux adaptée, par approche directe ou par intelligence artificielle ;
- essais sur quelques pièces mises en situation réelle de fonctionnement ;
- en cas d'essais positifs, figeage du « bon » produit ;
- en cas d'essais négatifs, reconsidération en boucle du problème avec les bureaux d'étude.

3.2 Contraintes de mise en œuvre

Pour ce type de contraintes, le procédé de fabrication dans lequel devra s'intégrer la future application de colle est connu avec précision.

On est facilement en mesure de dresser la liste des contraintes de mise en œuvre que devra supporter la colle. Un cahier des charges peut ici être établi, il répond aux premières questions types suivantes :

- peut-on envisager ou non de traiter les surfaces avant collage ?
- de combien de temps dispose-t-on pour déposer la colle et quels sont les moyens spécifiques de dépose ?
- quel moyen de réticulation ou méthode de prise en masse envisage-t-on ?
- quelles contraintes le processus aval fera-t-il subir à l'ensemble de l'assemblage (production, utilisation) ?

Les réponses à ces questions auront des incidences capitales sur les caractéristiques de la colle retenue, notamment en termes de réactivité et de rhéologie de l'adhésif.

Cependant, les techniques de polymérisation rapide (quelques secondes) nécessaires pour répondre aux cadences de production industrielle et leur incidence sur la tenue de l'assemblage sont encore, trop souvent, à adapter et à maîtriser « sur le tas ».

La connaissance précise des paramètres intrinsèques aux matériaux supports à coller et à l'adhésif qui entrent en jeu dans l'assemblage est essentielle pour aborder un problème de collage qui doit être pensé dès le début. Le concept de l'assemblage, la mise en œuvre d'éprouvettes de collage et la caractérisation rigoureuse des paramètres d'essais sont une démarche incontournable pour s'assurer de la tenue de l'assemblage.

3.3 Contraintes d'hygiène, de sécurité et environnementales

Le collage répond de manière efficace aux réalisations d'assemblages les plus exigeants grâce en particulier au dynamisme des chercheurs qui mettent au point les formulations les plus pointues quelque soit la destination : spatial, construction, médical, etc...

Des limites apparaissent toutefois aujourd'hui. Les contraintes d'hygiène, de sécurité et environnementales [17] [18] associées aux législations nationales et internationales élargies, sans cesse plus élaborées, restreignent la réalisation de prouesses vers l'infini des chercheurs scientifiques et définissent les contours à ne pas dépasser dans les applications. Toutes les étapes de l'assemblage par collage sont concernées depuis la formulation de l'adhésif et sa mise en œuvre jusqu'au devenir en fin de vie (recyclage). Les propriétés remarquables peuvent être affectées. Ainsi, par exemple un adhésif à base solvant organique le plus performant pourra être interdit d'usage s'il ne répond pas à la réglementation. Un solvant organique peut selon ses caractéristiques provoquer ou non des affections cutanées, sanguines ou au niveau du système nerveux, être cancérigène, etc. Pour les procédés exposant le personnel, une prévention aux risques chimiques doit être mise en place. Ainsi, les produits classés et étiquetés dangereux doivent être supprimés et substitués par des produits mieux classés, y compris pour les résines et additifs toxiques. Les substitutions ainsi rendues obligatoires permettent d'aboutir progressivement à une nouvelle génération de colles dans le contexte d'hygiène, de sécurité et d'environnement.

La volonté écoresponsable permanente d'offrir au marché les produits les plus avancés implique dorénavant de tenir compte des démarches environnementales engagées : qualité de l'air, de l'eau, énergie consommée, empreinte carbone... (cf. ISO 14001). Les défis technologiques doivent ainsi s'accommoder de la législation pour répondre aux besoins sociétaux respectueux de l'environnement. REACH (*Registration, Evaluation, Authorization and restriction of Chemicals*) est entrée en vigueur dès juin 2007. Cette réglementation – qui impose à tout professionnel utilisant des substances chimiques de les évaluer et de gérer systématiquement les risques qu'elles peuvent représenter pour la santé et l'environnement – a ouvert la voie à un ensemble de mesures comprenant aussi l'analyse environnementale de l'organisation des entreprises. CLP (classification-étiquetage-emballage) est aussi une importante réglementation dont l'objet est d'assurer que les dangers que présentent éventuellement les substances chimiques soient clairement communiqués aux travailleurs et aux autres acteurs de la chaîne de développement y compris les consommateurs. L'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) et l'ECHA (European Chemicals Agency) sont des institutions très actives. Le secteur est ainsi passé de 19 réglementations en 1990 à plus de 1000 en 2021... Il est indispensable de suivre aussi les connaissances nouvelles acquises en toxicologie et d'être attentif aux nouveaux étiquetages et classifications des produits chimiques et aux précautions à prendre lors de leur utilisation. Des fiches d'aide à la substitution sont disponibles sur le site de l'Institut national de recherche et sécurité (INRS) créée dès 1947 pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (voir la rubrique Sites Internet du *Pour en savoir plus*).

Les démarches de développement durable et responsable effectuées par les fabricants anticipent maintenant très souvent les

règlementations (cf. Association française des industries colles, adhésifs et mastics (AFICAM), association membre de la Fédération des Industries des Peintures, Encres, Colles, Adhésifs, Mastics, Couleurs, Préservation du bois (FIPEC)).

À retenir

- En fabrication industrielle, le collage se substitue souvent au boulonnage ou à la soudure.
- Les contraintes fonctionnelles liées au cahier des charges (conception, réalisation, contraintes de service, sécurité...) et les contraintes liées au procédé de fabrication doivent être étudiées et suivies avec soin (préparation de surface, temps de prise, température...).
- Les contraintes d'hygiène, de sécurité, et environnementales évoluent en permanence (législation galopante). Elles remettent en question les choix traditionnels et introduisent l'écoresponsabilité environnementale.

4. Caractérisation d'un collage structural

L'approche présentée ici se réfère à plusieurs types d'aciers plats C-Mn et à un adhésif de type époxydique classique.

Pour dimensionner une structure collée, il est nécessaire de pouvoir apprécier les caractéristiques mécaniques du joint collé. Pour cela, il est important de définir les types d'essais à mettre en œuvre et surtout de prévoir la signification des résultats obtenus vis-à-vis du comportement en service de l'assemblage (fluage, fatigue, vieillissement...) [19] [20]. Malgré un effort de recherche important, le dimensionnement de ces jonctions pose encore de nombreux problèmes.

En effet, une structure collée est fondamentalement hétérogène et nécessite, pour la prévision de ses performances mécaniques :

- la maîtrise de la mise en œuvre, afin d'assurer la fiabilité et la reproductibilité du collage ;
- la connaissance, à la fois, des comportements mécaniques intrinsèques de l'adhésif et des supports, la répartition triaxiale des contraintes dans le joint, le rôle de l'interface support/adhésif et un critère de rupture, pour la caractérisation [21], sans oublier la connaissance du comportement à l'état liquide de l'adhésif.

4.1 Caractérisation de l'assemblage collé par éprouvette de traction-cisaillement

Les essais de traction pure et de cisaillement pur sont particulièrement précieux pour caractériser un assemblage collé. Particulièrement, les essais « combinés » de traction-cisaillement connaissent un fort engouement car plus simples à mettre en œuvre avec des supports et un adhésif plus ou moins souples ou rigides.

4.1.1 Caractéristiques intrinsèques des matériaux : support et adhésif

Une grande variété d'aciers revêtus ou non existe actuellement. L'utilisation de ces produits suppose une bonne connaissance de leurs caractéristiques mécaniques pour la mise en œuvre, et aussi de leur surface pour leur appliquer éventuellement des traitements de finition, des traitements de surface (phosphatation, chromatisation, laquage...) ou encore préparer leur assemblage par collage.

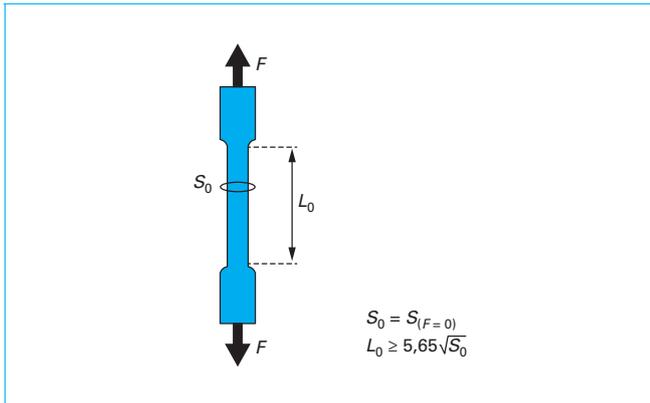


Figure 20 – Paramètres d'une éprouvette de traction

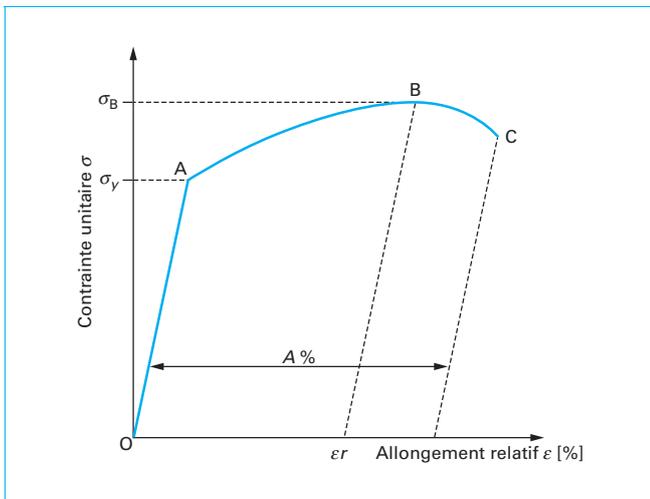


Figure 21 – Définition des caractéristiques de traction d'un acier

Devant une telle variété de produits, il est essentiel de définir, dans un premier temps, leurs caractéristiques mécaniques car elles ont une influence déterminante sur la tenue de l'assemblage collé.

4.1.1.1 Caractéristiques mécaniques des substrats

Comme indiqué au début de la section 2.4 l'approche faite ici se réfère à plusieurs types d'aciers plats.

L'attention est particulièrement portée sur l'aspect mécanique, y compris basique rappelé ci-dessous, pour souligner l'importance des caractéristiques des substrats sur la tenue de collages. Cette importance est notamment prise en compte industriellement dans l'exemple des aciers revêtus destinés à la carrosserie automobile (voir la thèse de doctorat de Chantal Bretton [42]).

■ Essai de traction

La résistance d'un acier à la traction s'obtient à partir d'un essai normalisé sur une éprouvette elle-même normalisée.

Si l'on soumet une éprouvette à un essai de traction (figure 20), son comportement peut être caractérisé par le diagramme de la figure 21.

Ce diagramme donne la variation de l'allongement relatif ϵ en fonction de la contrainte unitaire σ [22]. La contrainte unitaire σ est définie comme la force F de traction par unité de surface de la

section S_0 ; l'allongement relatif ϵ (ou déformation) est défini de la manière suivante :

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \%$$

L'examen de ce diagramme montre que le volume ($S_0 \times L_0$) présente trois zones dont le comportement moyen est fondamentalement différent :

– pour une contrainte unitaire $\sigma \leq \sigma_y$ (zone O-A, figure 21), la relation entre la déformation ϵ et σ est linéaire :

$$\sigma = E \epsilon$$

La constante E est appelée **module d'élasticité** ou **module de Young**.

Du point de vue microscopique, dans cette zone, l'éloignement moyen des atomes est suffisamment faible pour que la disparition de la sollicitation extérieure F permette aux atomes de retrouver, en moyenne, leur position initiale. On parle ainsi de **zone « élastique »** où les déformations imposées par une sollicitation extérieure sont réversibles. La contrainte unitaire σ_y est appelée « **limite d'élasticité conventionnelle** ». Celle-ci est dite conventionnelle parce que la contrainte unitaire σ est définie comme la force par unité de surface de la section initiale S_0 . Or, au fur et à mesure que σ augmente, la section réelle S de l'éprouvette diminue. Dans le domaine élastique, cette variation de section reste cependant suffisamment faible pour que la limite d'élasticité conventionnelle puisse, en première approximation, être assimilée à la limite d'élasticité réelle.

L'expérience montre que l'allongement axial d'une éprouvette soumise à une traction est toujours accompagné d'une contraction transversale de l'éprouvette. En deçà de la limite d'élasticité, le rapport de la contraction transversale unitaire à l'allongement axial unitaire est constant.

Cette constante, qui est appelée **coefficient de Poisson**, est désignée par ν ;

– pour une contrainte unitaire σ , telle que $\sigma_y < \sigma \leq \sigma_B$ (zone A-B, figure 21), la relation entre la déformation relative ϵ et σ n'est plus linéaire :

$$\sigma = E_p(\epsilon, \dot{\epsilon}) \epsilon$$

Du point de vue microscopique, l'éloignement moyen des atomes est trop important pour que ceux-ci puissent retrouver leur position moyenne initiale, quand la sollicitation extérieure F disparaît : la déformation est dite plastique. Les forces d'attraction entre atomes existent cependant toujours et, à la disparition de la force F , ceux-ci subissent un retour élastique. Dans cette zone, tout accroissement de la déformation relative résulte d'un accroissement de la contrainte unitaire σ ;

– au-delà du point B (zone B-C, figure 21), l'examen du diagramme montre que l'allongement relatif ϵ croît alors que la contrainte unitaire σ décroît. Du point de vue microscopique, l'éloignement moyen des atomes est tel que l'accroissement de cette distance ne nécessite plus d'augmentation de la charge unitaire : il y a écoulement plastique. Si l'effort extérieur F s'annule, l'écoulement s'arrête et les atomes subissent le même retour élastique que celui de la zone précédente. La contrainte σ_B est la contrainte unitaire conventionnelle la plus élevée que peut subir l'éprouvette sans se rompre : au point C, elle est appelée « **contrainte de rupture** ». L'allongement à la rupture est donnée par :

$$A = (L_c - L_0)$$

Par rapport à σ_y et à σ_B qui sont les limites de l'élasticité et du maximum de contrainte admissible sur l'éprouvette, on pourra définir les limites d'élasticité R_e et de rupture R_m d'un acier.

Cisaillement pur

Le cisaillement pur (figure 22) est un cas particulier important de l'état plan de tension, celui où les tensions principales σ_1 et σ_2 sont égales et de signes contraires [23].

Un élément d'un corps tel que abcd (figure 23), supposé détaché du corps, sera en équilibre uniquement sous l'action de tensions tangentielles telles que :

$$\tau = \sigma_1 - \sigma_2 (\sigma_1 > \sigma_2)$$

Les longueurs ab, bc, cd et da (figure 23) ne changent pas pendant la déformation mais entrent en distorsion. Le petit angle γ définit la distorsion de l'élément abcd et s'appelle l'angle de glissement :

$$\gamma = \tan \gamma = \frac{aa'}{ad}$$

La relation qui existe entre le glissement γ et les tensions tangentielles est établie après calcul par :

$$\frac{\gamma}{2} = \frac{\tau(1+\nu)}{E}$$

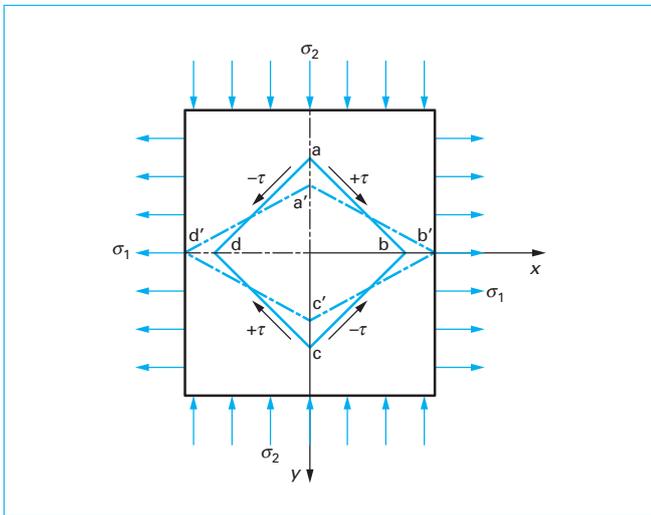


Figure 22 – État de contrainte en cisaillement pur

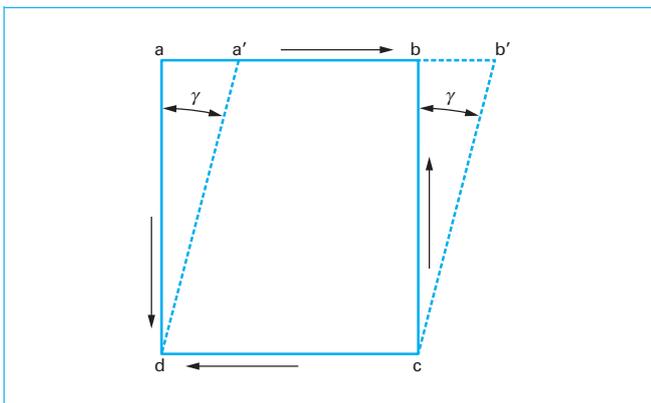


Figure 23 – Angle de glissement

Si l'on pose :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

on obtient

$$\gamma = \frac{\tau}{G}$$

Pour un matériau linéaire, élastique, homogène et isotrope, il existe donc une relation entre le module de Young E et le module de cisaillement G :

$$E = 2G(1+\nu)$$

On voit que le glissement γ est proportionnel à la tension de cisaillement et inversement proportionnel à la quantité G qui dépend des propriétés élastiques du matériau.

Cette loi est semblable à la loi de déformation par traction.

Pour compléter cette analogie, on appelle G le **module d'élasticité transversale ou module de cisaillement**.

L'acier revêtu pris en référence dans le cadre de cet article est un acier de base doux destiné à la carrosserie automobile. Les caractéristiques mécaniques de ces tôles mesurées dans les sens travers du laminage sont les suivantes :

- la limite d'élasticité R_e à 0,2 % est de 175 MPa ;
- la limite de rupture R_m est de 293 MPa ;
- le module de Young E_s est de 210 000 MPa ;
- l'épaisseur e_s est de 0,7 mm.

4.1.1.2 Caractérisation d'un adhésif à l'état massif

Dans le domaine du collage structural, la connaissance des caractéristiques mécaniques intrinsèques des adhésifs telles que les modules de Young E_j et de cisaillement G_j , les limites d'élasticité et les caractéristiques à la rupture (contraintes et déformations) en traction, compression et cisaillement sont essentielles pour le calcul du dimensionnement des structures.

Plusieurs types d'essais mécaniques peuvent être utilisés pour la caractérisation d'un adhésif à l'état massif [24]. L'essai le plus utilisé est l'essai de traction uniaxiale (NF T 51034). Il est représenté figure 24.

On moule les éprouvettes dans des formes en alliage d'aluminium revêtues d'un agent antiadhérent et usinées aux dimensions de l'éprouvette. Ces moules sont composés de trois plaques de 2 mm d'épaisseur : les deux plaques extérieures sont pleines. La plaque intermédiaire est usinée aux formes de l'éprouvette.

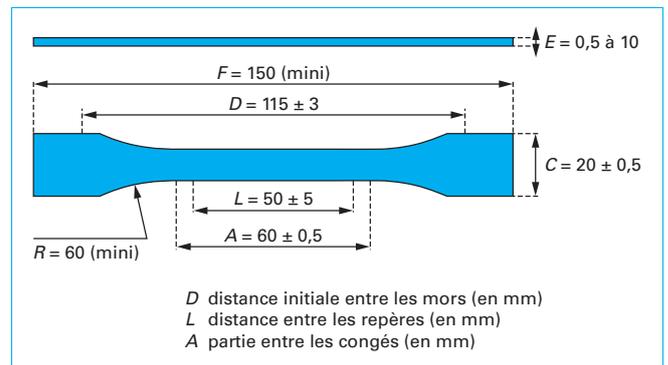


Figure 24 – Éprouvette de traction de type NF EN ISO 527-1 (NF T 51034)

Un serrage par vis/écrous assure la fermeture du moule. La température de cuisson est de 1 h à 180 °C.

Pour l'obtention d'une valeur moyenne, 6 éprouvettes sans défaut apparent par essai sont mises en œuvre et tractionnées à la vitesse de 50 ± 5 mm/min.

On calcule ensuite la contrainte à la rupture, l'allongement relatif moyen et le module de Young.

Du fait qu'elle néglige les problèmes d'interface substrat/adhésif, cette méthode a fait l'objet de critiques. Cependant, il a été montré que les propriétés mécaniques d'un adhésif « massique » peuvent être comparées à celles obtenues sur éprouvettes d'assemblage collé.

Prenons l'exemple de l'adhésif résine époxydique monocomposant utilisée dans l'industrie automobile pour des assemblages par collage structuraux.

La figure 25 montre l'évolution sur éprouvette massique d'adhésif de la résistance en traction en fonction de l'allongement.

Les caractéristiques mécaniques de cet adhésif sont relevées comme suit :

- module de cisaillement $G_j = 1\,800$ MPa ;
- module de Young $E_j = 5\,000$ MPa ;
- coefficient de Poisson $\nu = 0,33$.

4.1.2 Contraintes mécaniques dans un joint collé

En fabrication mécanique, les bureaux d'étude, soucieux de choisir une colle présentant une bonne tenue sous charge, s'intéressent surtout aux contraintes existant dans le joint collé.

Il existe de nombreux types d'essais destinés à étudier le comportement mécanique des joints collés, selon la sollicitation considérée.

4.1.2.1 Principaux types d'essai

On peut considérer quatre catégories essentielles liées aux types d'assemblages rencontrés en pratique : le cisaillement, la traction, le pelage et le clivage.

■ Traction

Le joint adhésif est sollicité perpendiculairement à la surface de collage (figure 26a). Les contraintes sont alors perpendiculaires au plan du joint d'adhésif et sont réparties plus ou moins régulièrement dans le joint (l'idéal serait que la répartition fût homogène). Au même instant, le joint tout entier est sous contrainte et chaque élément de la jonction contribue au travail total.

■ Pelage

Cette sollicitation résulte en général d'une traction localisée à l'extrémité de l'assemblage, et se rencontre lorsqu'un au moins des supports est flexible. Les contraintes sont maximales aux lèvres du joint (figure 26b) (là où peu d'éléments participent à la tenue du joint).

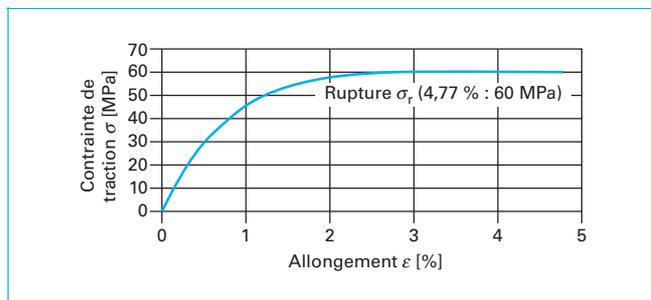


Figure 25 – Évolution de la résistance en traction sur éprouvette massique d'adhésif époxydique en fonction de l'allongement

■ Clivage

C'est une sollicitation intermédiaire entre la traction et le pelage, généralement observée à l'extrémité de l'assemblage de matériaux rigides soumis à une force perpendiculaire à la surface de l'assemblage. Les contraintes ne sont pas distribuées uniformément dans le joint (figure 26c) du fait de la combinaison d'une force perpendiculaire avec une force tangentielle.

■ Cisaillement

Le joint adhésif est sollicité parallèlement aux surfaces de collage. Les contraintes les plus importantes, dans ce cas, sont réparties parallèlement au plan du joint d'adhésif et de façon plus ou moins régulière à l'intérieur du joint (figure 26d) ce sont les sollicitations privilégiées en collage.

4.1.2.2 Éprouvette de cisaillement à simple recouvrement

L'essai de cisaillement d'éprouvettes à simple recouvrement est très utilisé pour tester les assemblages de pièces rigides, c'est lui que l'on étudie.

Par joint à simple recouvrement (figure 27) on entend l'assemblage constitué par deux plaques rectangulaires 1 et 2 de largeur b , de longueur L_s et d'épaisseur e_s . Les deux plaques sont collées sur leur largeur b et sur une longueur L_r de recouvrement. Elles sont constituées de matériau de module de Young E_s et de coefficient de Poisson ν_s .

L'adhésif a une épaisseur e_j , un module de Young E_j , un module de cisaillement G_j et un coefficient de Poisson ν_j .

L'ensemble de l'éprouvette est sollicité en traction : chaque plaque est soumise à une force F dans son propre plan. Sous l'effet de cette force de traction, des contraintes de cisaillement τ prennent naissance dans le joint adhésif (figure 28).

Du fait que les forces n'agissent pas exactement dans le même plan, les plaques subissent une flexion qui crée dans le joint adhésif des contraintes d'arrachement $\sigma_{\nu\nu}$ à rapprocher d'une sollicitation en pelage/clivage au bord de joint.

L'essai de cisaillement est le test de base pour la plupart des assemblages de supports rigides. En particulier, l'essai par cisaillement à simple recouvrement est le plus répandu pour l'évaluation d'un adhésif structural. C'est un essai simple à réaliser mais difficile à interpréter.

Les éprouvettes à simple recouvrement considérées ici sont réalisées à partir de supports minces. Ce type d'éprouvette ne permet pas d'obtenir la résistance en cisaillement « pure » du joint adhésif. En effet, la rupture en traction-cisaillement sur cette éprouvette n'est pas le seul mode de rupture et la ruine du joint est plutôt initiée par des efforts d'arrachement (pelage), plus ou moins intenses selon la nature et l'épaisseur des supports [25].

Cependant, ces éprouvettes présentent l'énorme avantage d'être représentatives de conditions habituelles de fonctionnement d'assemblages collés et sont reconnues comme telles.

La figure 29 montre une courbe contrainte/déformation en cisaillement caractéristique d'un assemblage à simple recouvrement au moyen d'un adhésif structural.

La figure 30 illustre le comportement d'un assemblage à simple recouvrement collé avec ce même adhésif présentant un comportement élastoplastique lorsque l'on augmente progressivement la charge appliquée :

- pour une charge appliquée inférieure à F_e , l'adhésif reste élastique dans toute la zone de recouvrement. La charge F_e correspond à la charge appliquée pour laquelle on atteint la limite d'élasticité τ_{\max} de l'adhésif au voisinage immédiat des points les plus sollicités A et B (figure 30a) ;
- pour une charge appliquée supérieure à F_e , l'adhésif ne va pas se rompre mais des zones plastiques a et b apparaissent aux extrémités, tandis que la zone élastique centrale voit sa longueur diminuer progressivement lorsque a et b augmentent sous l'effet de la

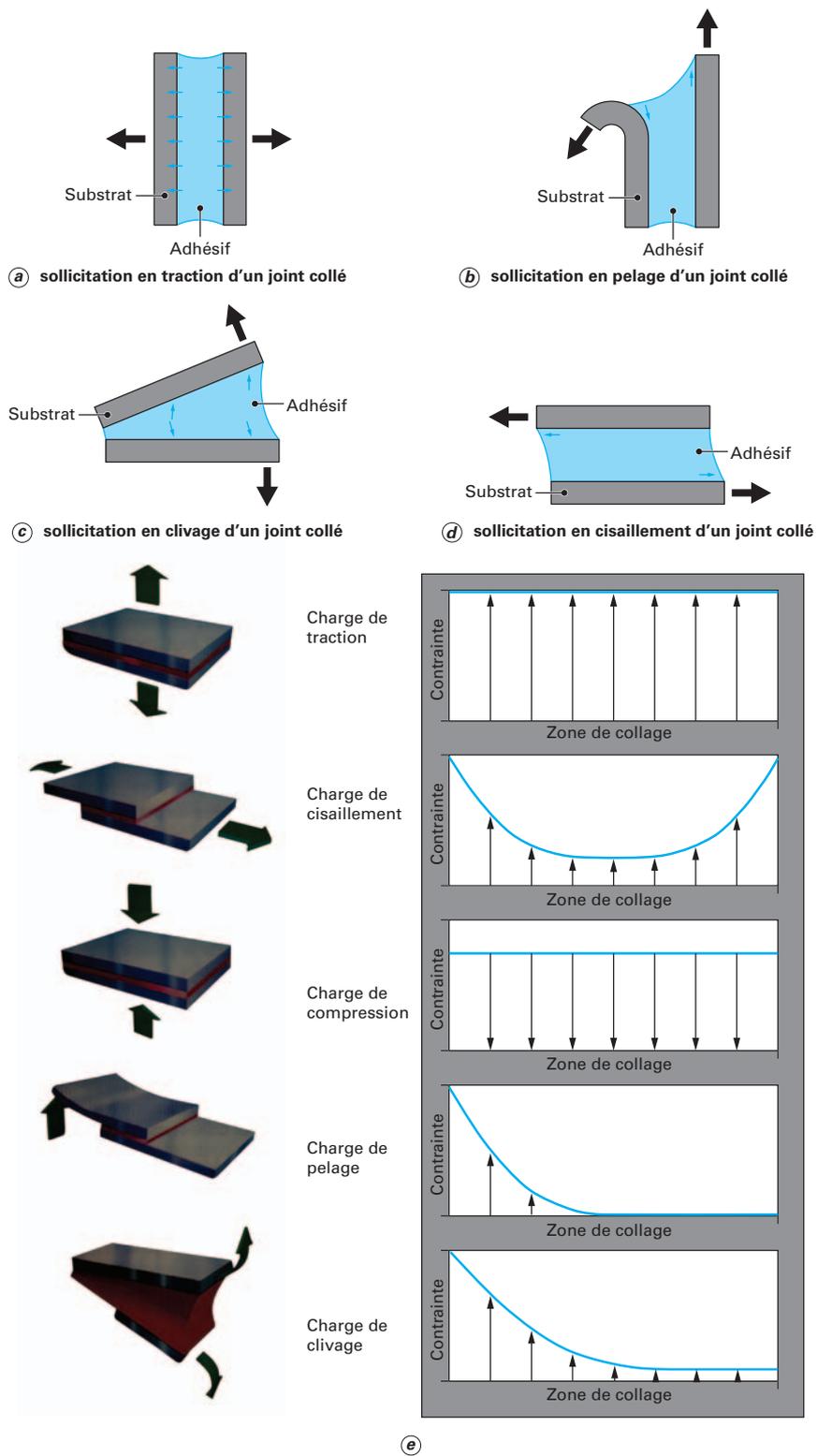


Figure 26 – Principaux types d'essais

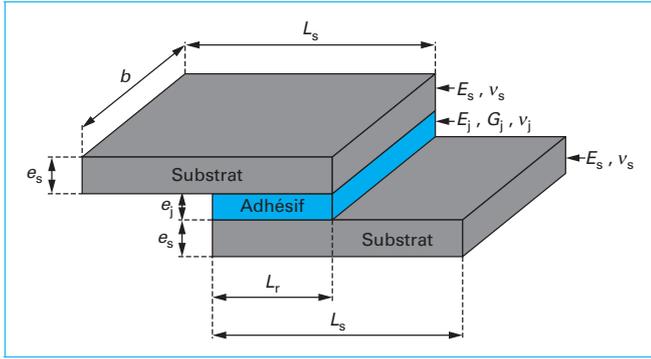


Figure 27 – Éprouvette de cisaillement à simple recouvrement

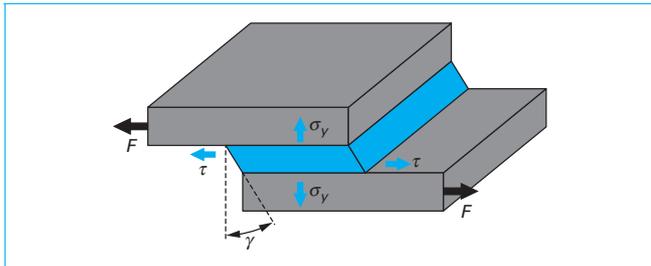


Figure 28 – Contraintes dans une éprouvette de traction-cisaillement

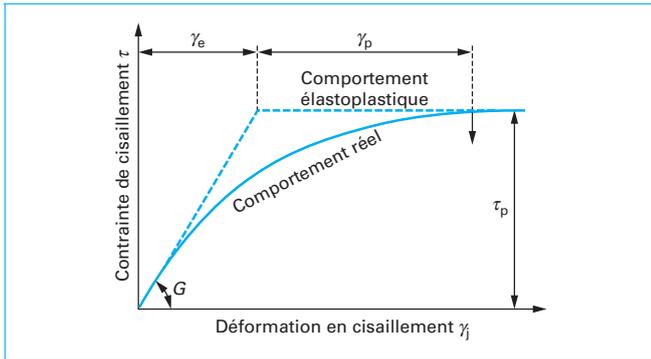


Figure 29 – Modèles de comportement d'un assemblage de tôle mince au moyen d'un adhésif structural sollicité en cisaillement

charge croissante. Dans les zones plastiques, la contrainte de cisaillement est constante ($\tau_{max} = \tau_p$) (figure 30b) ;

– l'adhésif continuera à se déformer dans le domaine plastique jusqu'à une charge appliquée F_p pour laquelle les déformations maximales aux extrémités atteignent la limite de déformation admissible par l'adhésif en cisaillement (figure 30c).

4.2 Facteurs influant sur le comportement mécanique des joints collés à simple recouvrement

Plusieurs facteurs peuvent conduire à des fluctuations du comportement mécanique, une maîtrise de ces paramètres est donc nécessaire [26].

L'éprouvette normalisée de traction-cisaillement (figure 31) a été mise en œuvre pour l'étude de ces paramètres.

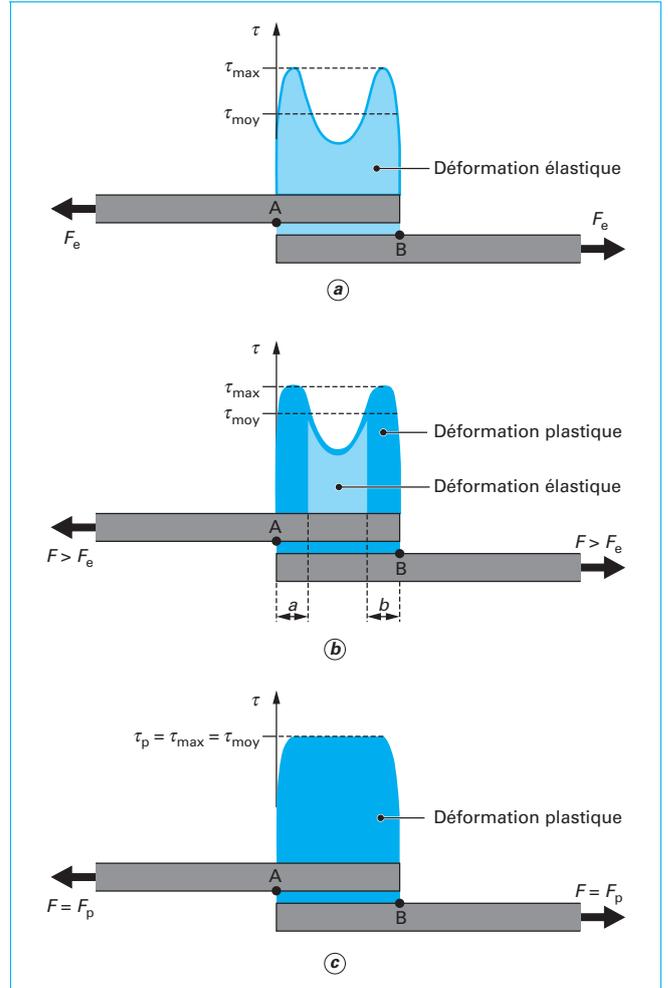


Figure 30 – Profil de concentration des contraintes d'un joint collé sollicité en traction-cisaillement

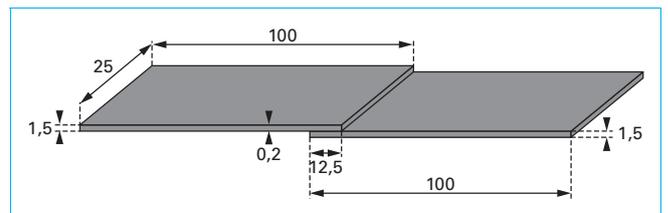


Figure 31 – Éprouvette à simple recouvrement d'après la norme NF T 76-011 (NF EN ISO 9964)

4.2.1 Vitesse de sollicitation et facteurs géométriques

La vitesse de sollicitation joue sur la résistance mécanique du joint. Il en est de même, comme on l'observe dans les paragraphes suivants, de la géométrie des éléments d'assemblage qui joue de manière importante sur les propriétés mécaniques en statique des assemblages à simple recouvrement [27] [28] [29] :

- l'épaisseur et la limite d'élasticité des tôles ;
- la longueur de recouvrement ;
- l'épaisseur du joint.

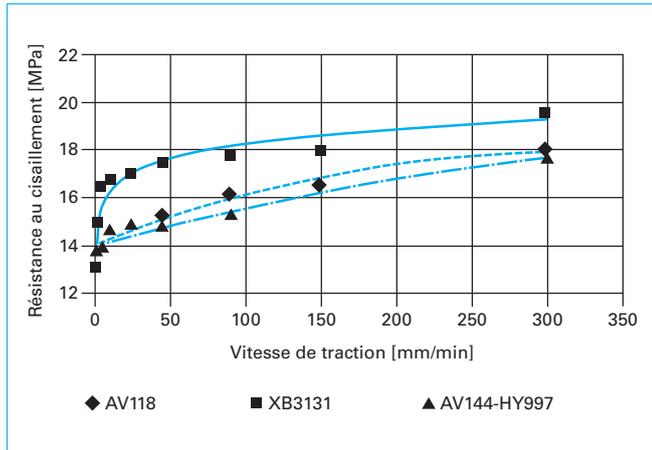


Figure 32 – Évolution de la résistance au cisaillement en fonction de la vitesse de traction

4.2.1.1 Vitesse de traction

Une analyse des contraintes de rupture des éprouvettes collées en fonction de la vitesse de traction (figure 32) montre qu'elles sont une fonction croissante de la vitesse, les ruptures étant adhésives pour les basses vitesses et devenant progressivement cohésives quand elles augmentent dans notre exemple.

Afin d'explicitier ce résultat, on suppose que l'interface se rompt si une contrainte $\sigma_{initial}$ est atteinte au niveau de l'interface, et que la colle se rompt si une contrainte $\sigma_{critique}$ est atteinte. En émettant l'hypothèse que $\sigma_{initial}$ est peu sensible à la vitesse et que $\sigma_{critique}$ augmente avec la vitesse, il est permis de justifier une transition cohésif/adhésif mais pas l'inverse. Les chaînes de polymères du joint n'ont pas le temps de se « démêler » et de s'écouler à forte vitesse.

On peut également supposer que l'interface se rompt si une déformation $\sigma_{initial}$ est atteinte au niveau de l'interface et que la colle se rompt si l'on atteint une déformation $\sigma_{critique}$. On suppose que ces deux valeurs critiques ne dépendent pas de la vitesse. En considérant que les effets viscoélastiques sont localisés dans l'épaisseur de la couche adhésive mais pas à l'interface, on peut montrer que la contrainte au niveau de l'interface est proportionnelle à la déformation et dépend peu de la vitesse alors que la contrainte au sein du joint dépend de la déformation et de la vitesse (on considère uniquement des effets élastiques). Ce modèle ne permet pas non plus de justifier une transition interfacial/cohésif.

On attire l'attention sur le fait qu'il n'y a aucun sens à mentionner une valeur de rupture en traction-cisaillement sans préciser la vitesse de sollicitation à laquelle elle est associée.

L'accent est donc mis sur l'importance de la vitesse de traction dans les tests normalisés (en général, la vitesse de traction est de 10 mm/min) mais également sur l'insuffisance de cette condition qui limite les résultats à un comportement unique et non prévisionnel de la réalité de la déformation jusqu'à rupture : les résistances en traction-cisaillement ainsi que les modes de rupture ne seront pas réellement représentatifs du comportement d'un assemblage collé en site où les vitesses de traction sous charge sont très lentes par rapport aux machines de traction.

4.2.1.2 Épaisseur de l'adhésif

En règle générale, plus l'épaisseur de l'adhésif est faible, plus la résistance du joint est élevée (figure 33). Une des explications suggérée pourrait aussi être l'effet de la diminution du taux relatif d'hétérogénéités au sein du joint plus fin soumis à l'action traction-cisaillement [28] [30] [31].

Ainsi, des contractions résiduelles se développent et provoquent une fragilisation du joint collé [32]. Toutefois, une étude plus fine

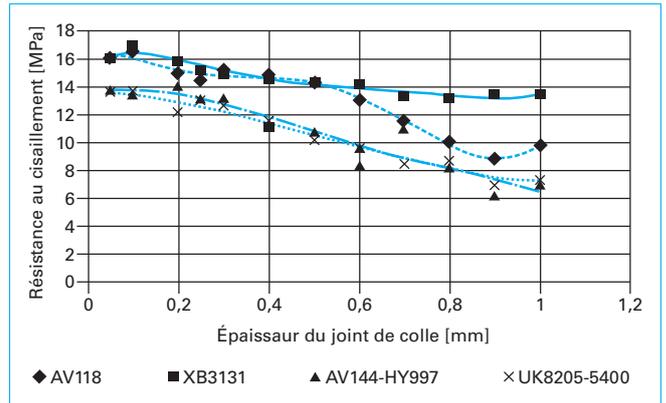


Figure 33 – Influence de l'épaisseur du joint de colle

Tableau 2 – Caractéristiques des aciers galvanisés testés

Épaisseur e_s [mm]	Limite d'élasticité R_e [MPa]
0,7	181
0,9	253
1,25	78

montre l'existence d'autres comportements avec optimisation de l'épaisseur du joint pour un assemblage donné.

La résistance du joint collé augmente d'abord rapidement à partir de très faibles épaisseurs (inférieures à quelques centièmes de millimètre), passe par un optimum, puis décroît ; cette décroissance s'atténue au fur et à mesure que l'épaisseur devient importante (de 1 à quelques millimètres). Par ailleurs, la rupture peut devenir de plus en plus adhésive quand l'épaisseur de l'adhésif augmente [33] [34].

En fonction secondaire, l'épaisseur du joint favorise l'amortissement mécanique.

4.2.1.3 Épaisseur et limite d'élasticité des tôles

Si l'épaisseur des tôles augmente, deux phénomènes contradictoires apparaissent : l'augmentation de la rigidité des tôles, donnant un effet bénéfique [42] de résistance, et l'augmentation du moment fléchissant, favorisant la rupture par pelage et non par cisaillement. Ce facteur est lié à la nature des tôles : limite d'élasticité, allongement, épaisseur limitée... [35].

Des éprouvettes de traction-cisaillement ont été mises en œuvre avec l'adhésif époxydique : l'épaisseur de l'adhésif e_j est constante (0,2 mm) et trois aciers galvanisés de caractéristiques mécaniques différentes ont été testés (voir tableau 2).

Le rapport entre la force à la rupture du joint collé F_r et la force nécessaire à l'entrée en plasticité F_p du substrat si celui-ci travaille uniquement en traction est donné dans le tableau 3. Cette dernière force est fonction à la fois de l'épaisseur de l'éprouvette et de la limite d'élasticité :

$$F_p = R_e \times e_s \times 25$$

Le rapport calculé est considéré constant et sa valeur est fonction des caractéristiques des surfaces collées.

Il a été constaté que la rupture de l'assemblage apparaît dans les trois cas en zone de déformation plastique quand la force de

Tableau 3 – Influence de e_s et R_e sur le rapport F_r/F_p

e_s [mm]	R_e [MPa]	Entrée en plasticité de l'acier F_p [N]	Rupture de l'assemblage F_r [N]	Rapport F_r/F_p
0,7	181	3 174	3 500	1,102
0,9	253	5 692	6 344	1,114
1,25	178	5 562	5 875	1,056

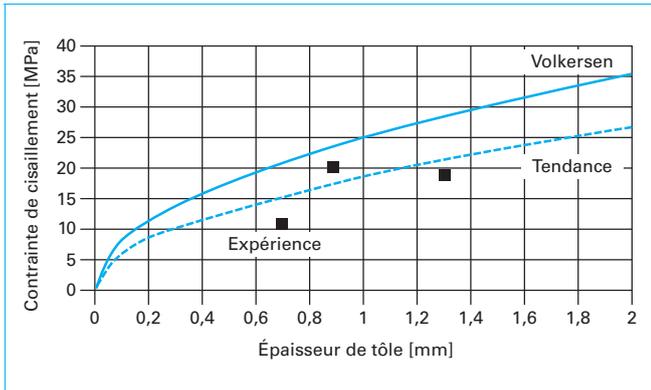


Figure 34 – Comparaison entre théorie de Volkersen et expérimentation

traction a dépassé de 10 % en moyenne la force d'entrée en plasticité de l'acier.

La variation de la contrainte de cisaillement d'un assemblage collé en fonction de l'épaisseur des substrats et de leur limite d'élasticité a été étudiée par Volkersen. La figure 34 montre les courbes théoriques et expérimentales de la contrainte de rupture en fonction de l'épaisseur des tôles pour les données citées.

On constate que cette théorie prévoit des résultats nettement trop optimistes : les valeurs de contraintes de cisaillement relevées expérimentalement sont inférieures aux prévisions théoriques. Cette différence peut s'expliquer pour les raisons qui suivent. La théorie de Volkersen repose sur le calcul des contraintes dans le joint de colle et tient compte de l'épaisseur des substrats (figure 35) : les tôles sont supposées travailler en traction. L'adhérence colle/substrat est supposée parfaite et la continuité des déplacements est assurée.

Les substrats sont supposés rester élastiques et sont donc caractérisés par leur module de Young. En réalité, pour des substrats minces comme ceux traités ici, le domaine plastique est atteint et les déformations des substrats sont importantes. Cela est d'autant plus vrai que, localement (points A et B ; figure 35), un joint collé présente des concentrations de contraintes.

La rupture de l'assemblage apparaît lorsque la continuité des déplacements ne peut plus être assurée entre le substrat et l'adhésif, celui-ci ne supportant pas de fortes déformations, particulièrement s'il s'agit d'un adhésif époxydique bicomposant.

Une simple mesure de la longueur des éprouvettes après rupture permet de constater leur allongement et donc l'entrée en plasticité du substrat. Toutes les ruptures sont cohésives et présentent la même allure. Les ruptures s'initient aux points de concentration de contrainte et se propagent. L'adhésion « colle/substrat » est suffisante pour ne pas être responsable de la rupture. Celle-ci est initiée après entrée des substrats en plasticité.

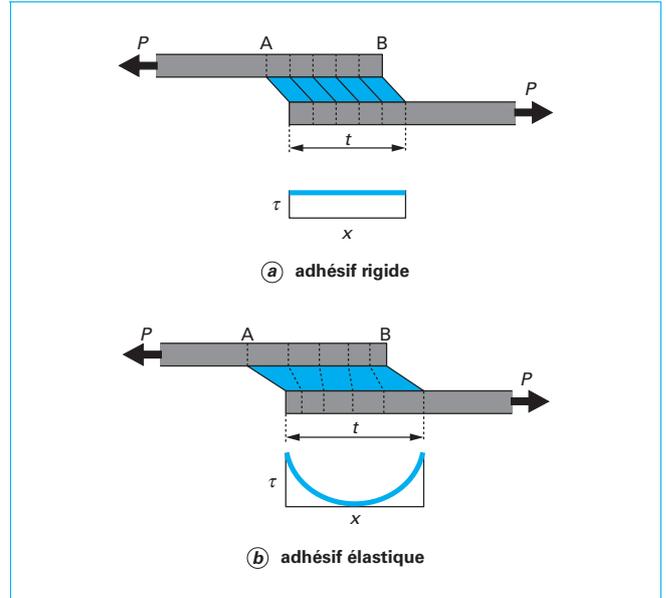


Figure 35 – Déformations dans un joint à simple recouvrement

Bien que les modes de sollicitation, à la fois du substrat et de l'adhésif, soient complexes, l'approximation suivante est avancée afin de vérifier l'explication proposée : le rapport calculé entre la force à la rupture du joint collé et la force nécessaire à l'entrée en plasticité du substrat si celui-ci travaille uniquement en traction est constant. La force d'entrée en plasticité est fonction à la fois de l'épaisseur de l'éprouvette support et de la limite d'élasticité.

Ce rapport constant montre bien l'influence de l'entrée en plasticité et sa valeur est fonction des caractéristiques des surfaces collées.

Afin de rendre chaque résultat de tenue en traction-cisaillement indépendant des caractéristiques mécaniques de tôles, on peut déterminer la constante adimensionnelle :

$$F_r/F_p$$

avec F_r force à la rupture de l'assemblage collé (en N),
 $F_p = R_e \times 25 \times e_s$ force nécessaire à l'entrée en plasticité du substrat (en N).

4.2.1.4 Longueur de recouvrement

L'augmentation de la longueur de recouvrement provoque une augmentation de la charge à la rupture et un abaissement de la contrainte conventionnelle de cisaillement (figure 36).

Au-delà d'une certaine longueur de recouvrement, le phénomène se stabilise. La longueur de recouvrement initiale d'éprouvette est de 15 à 30 fois l'épaisseur du métal pour les adhésifs structuraux. Elle peut atteindre 100 fois l'épaisseur du métal avec des colles souples et moins performantes, colles non structurales classiquement utilisées dans l'industrie de l'assemblage.

4.2.1.5 Effet des bourrelets

Le bourrelet résulte du surplus de colle chassée vers l'extérieur lors de la mise sous pression de l'assemblage.

Des calculs effectués par éléments finis montrent que la présence du bourrelet apporte un effet positif, en réduisant les concentrations de contraintes au niveau du bord chargé [36].

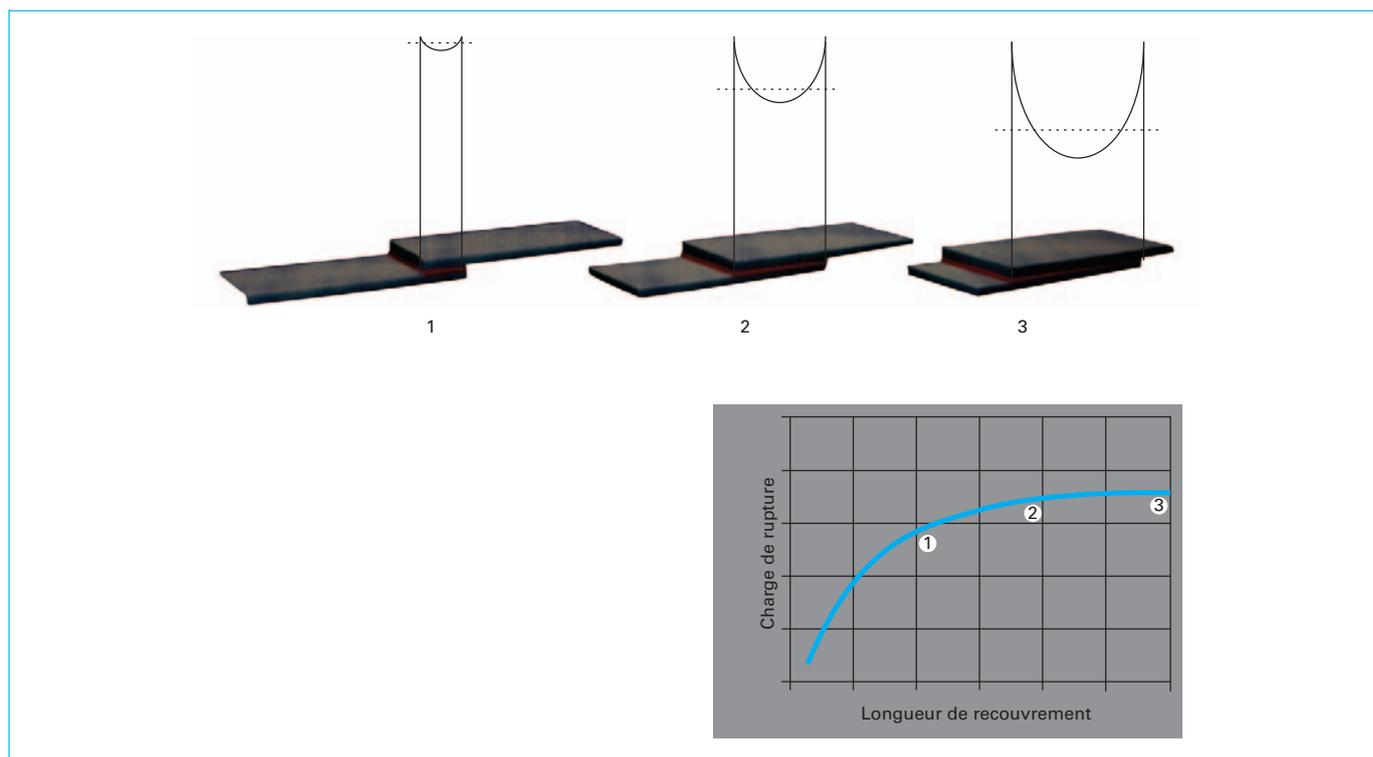


Figure 36 – Longueur de recouvrement (d'après [42])

4.2.2 Facteurs physico-chimiques

4.2.2.1 Nature du polymère

Les adhésifs sont souvent des matériaux viscoélastiques. S'ils présentent une déformation ductile, les résultats mécaniques sont, comme pour la plupart des matériaux de ce type, classiquement dépendants de la vitesse et de la température de sollicitation [A 3 110].

Lorsque le module de Young de l'adhésif augmente, pour un même substrat et une géométrie donnée, la concentration des contraintes de cisaillement et de pelage croît fortement [37].

Le fait que la résistance au cisaillement d'un joint collé baisse avec l'augmentation du module de Young peut être expliqué par une augmentation simultanée de la dureté et de la fragilité des adhésifs structuraux. Comme les efforts dans un joint collé à simple recouvrement sont maximaux au niveau des extrémités, il pourrait être avantageux de faire varier la rigidité sur la longueur de recouvrement : un adhésif ductile pouvant s'accommoder des plus fortes contraintes sur les extrémités du joint, et un adhésif plus fragile mais plus résistant au milieu du recouvrement.

La rhéologie de l'adhésif joue un rôle important sur la répartition des contraintes dans un joint collé à simple recouvrement et sur le niveau d'adhésion métal/adhésif [38]. Un adhésif à faible viscosité permet naturellement de mouiller plus facilement le substrat.

4.2.2.2 Nature du substrat

Les caractéristiques d'un assemblage collé dépendent de la nature, du module de Young, de la limite d'élasticité et du taux d'allongement à la rupture des substrats. L'adhésif universel n'existe pas encore, le choix d'un adhésif dépend de la famille des substrats à coller et du cahier des charges [39].

Une grande variété de métaux et revêtements existent actuellement. Le collage de ces produits suppose une bonne connaissance

de leurs caractéristiques notamment mécaniques pour la mise en œuvre, et de leur surface (analyse) pour leur appliquer éventuellement des traitements de finition classiques.

L'expérience récente montre que la structure et la composition des couches d'extrême surface sont très largement différentes de celles de la composition du revêtement. Or c'est précisément ces couches d'extrême surface qui jouent un rôle déterminant vis-à-vis des dépôts de surface, laques ou adhésifs.

Devant une telle variété de produits semi-finis [40], il est essentiel de définir leurs caractéristiques, la nature des revêtements et spécifiquement les couches d'extrême surface, qui seront au contact direct avec l'adhésif dans le cas du collage. La chimie des revêtements via son influence sur l'adhésion de la colle est ainsi un facteur important à prendre en compte pour caractériser le collage structural des tôles métalliques.

À retenir

- La caractérisation d'un collage structural est une opération importante et délicate.
- Le dimensionnement de la structure collée nécessite de connaître les caractéristiques mécaniques du joint collé que l'on peut obtenir par des essais ou tests mécaniques bien choisis.
- Les essais de traction-cisaillement occupent une place souvent privilégiée dans le cas du collage structural.
- Les performances de l'adhésif à l'état massif ainsi que celles du substrat sont à prendre en compte.
- Un certain nombre de facteurs influencent le comportement mécanique des joints collés : facteurs géométriques, vitesse de sollicitation, épaisseur du joint, limite d'élasticité des supports, longueurs de recouvrement, etc.

5. Conclusion

La variété sans cesse élargie d'adhésifs créés et proposés au marché économique et industriel renforce l'idée de la poursuite de la croissance en particulier pour les produits innovants et durables. Les nouvelles formulations devront répondre aux besoins sociétaux rapidement évolutifs, en tenant compte de la prise de conscience environnementale bien présente et de l'arrivée de nouvelles formes de technologie protectrices pour l'être humain.

Après évaluation des risques, par exemple, chimiques, en particulier pour les adhésifs à base solvants ou contenant des substances nocives pour la santé, les produits finaux classés dangereux devront être éliminés. Ils sont déjà remplacés pour certains et

progressivement substitués pour d'autres par des composés au profil moins marqué comme le souhaite l'INRS.

Les performances peuvent cependant s'en trouver affectées. Ainsi la suppression de certains solvants organiques entrant dans la formulation d'adhésifs, et éliminant de fait le produit final, constitue un obstacle aux propriétés remarquables obtenues pour le collage, en l'attente de résultats substitutifs positifs de la recherche scientifique.

Les collages structuraux à hautes performances en souffrent le plus. Ils sont indispensables à la conduite des grandes évolutions technologiques aussi bien dans le domaine des transports, de l'électronique, du spatial que celui du médical...

Les performances de ces collages structuraux, tout en devenant plus « écoresponsables » et en respectant les règles d'hygiène et sécurité mises en place rapidement par les autorités européennes et internationales, devront enfin encore être améliorées.

Familles d'adhésifs et caractérisation d'un collage structural

par **Chantal BRETTON**

Head of development
ArcelorMittal, Alleur, Belgique

et **Gilbert VILLOUTREIX**

Ancien professeur des universités
Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), Paris, France

Sources bibliographiques

- [1] BERNARD (D.). – *Les colles et adhésifs : différentes familles et marchés*. Chimie Paris, p. 12 (1995).
- [2] KHARAT (S.). – *Recent developments in structural adhesives, Paintindia*. Vol. LXX, n° 12 (2020).
- [3] DUBOIS (P.), FONTAINE (E.) et VILLOUTREIX (G.). – *Technologie*. Presses Universitaires de France (1991).
- [4] AY (S.). – *What are structural adhesives*. Adhesives & Sealants Industrie vol. 26, n° 10 (2019).
- [5] PENN (L.S.) et CHIAO (T.T.). – *Epoxy resins*. P. 57-85 (1992).
- [6] BEHM (D.) et GANNON (J.). – *Epoxies*. Engineered Materials Handbook (vol. 3) Adhesives and Sealants, ASM International (1990).
- [7] KOHN (S.). – *Influence des charges sur les propriétés des adhésifs*. Congrès « Assemblage par adhésif », Commissariat de l'Énergie Atomique, Bruyères-le-Châtel, p. 191-217 (1969).
- [8] JOJIBABU (P.), ZHANG (Y.X.), RIDER (A.N.) et WANG (J.). – *Mechanical performance of adhesive joints using high-performance nanocomposite adhesive material with carbon nanotube and triblock copolymer hybrids*. Composites Part B : Engineering, Elsevier (2020).
- [9] BERTHONNEAU (C.) et VILLOUTREIX (G.). – *Étude des conditions de réticulation de résines thermodurcissables par analyse calorimétrique différentielle*. Matériaux et Techniques, p. 210 (1978).
- [10] KREIDER (C.K.). – *Urethanes*. Engineered Materials Handbook (vol. 3) Adhesives and Sealants, ASM International (1990).
- [11] LAPIERRE (J.F.). – *Le collage structural*. Formation Henkel France (1998).
- [12] FICHANT (J.M.) (PSA- (Stellantis)). – *Le collage dans l'automobile*. Journée SFM, Douai (1993).
- [13] ALI (M.T.). – *Effets des défauts d'adhésion sur la résistance mécanique des assemblages collés*. Matériaux – Université de Bordeaux, (NNT : 2018 BORD0061) (2018).
- [14] PURABGOLA (P.), RASTOGI (S.) et SHARMA (G.). – *Surface preparation for structural adhesive joints*. Wiley on line library (2020).
- [15] ZUO (P.) et VASSILOPOULOS (A.P.). – *Review of fatigue of bulk structural adhesives and thick adhesive joints*. International Materials reviews, Taylor & Francis (2020).
- [16] MARTINET (B.), ROSANKIS (E.) et LÉONARD (M.). – *Les expositions aux risques professionnels : les produits chimiques*. Synthèse Stat' : 32, p. 1-323 (2020).
- [17] TÖNISSEN (M.) et MILLERET (J.B.). – *Innovative adhesive for product safety*. Adhesion-adhesives & sealants, vol. 17, n° 4, p. 18-19 (2020).
- [18] PITOLLAT (C.) et ROSSI (L.). – *Mission d'information commune, Perturbateurs endocriniens*. Rapport présidence assemblée nationale n° 2483 (2019).
- [19] HALIOUI (M.). – *Contribution à l'évaluation du comportement mécanique non linéaire d'assemblages collés de tôles minces d'acier, sous sollicitations monotones ou cycliques*. Thèse de doctorat, université de Reims Champagne-Ardenne (1990).
- [20] GANTCHENKO (V.). – *Caractérisation d'une interface collée*. Revue des composites et des matériaux avancés, vol. 27, n° 3-4 (2017).
- [21] DANTAS (M.A.), CARBAS (R.J.C.) et LOPES (A.M.). – *Novel torsion machine to test adhesive joints*. Adhesives, Springer (2021).
- [22] TIMOSHENKO (S.). – *Résistance des matériaux*. Librairie polytechnique Ch. Béranger, Paris (1953).
- [23] MASSONNET (Ch.). – *Résistance des matériaux*. Dunod, Paris (1961).
- [24] JEANDRAU (J.P.). – *Intrinsic mechanical characterization of structural adhesives*. Int. J. Adhesion and Adhesives, vol. 6, n° 4, p. 227-231 (1986).
- [25] DIB (S.). – *Étude de la rupture d'assemblages métalliques liés par joint d'adhésif*. Thèse de doctorat, École centrale de Paris (1985).
- [26] PANDA (H.S.), SAMANT (R.) et MITTAL (K.D.). – *Durability aspects of structural adhesive joints*. Structural adhesives, Wiley on line library (2020).
- [27] JEANDRAU (J.P.). – *Calcul et dimensionnement des assemblages collés*. Fascicule de formation n° 8, CETIM (1992).
- [28] SEKIGUCHI (Y.) et SATO (C.). – *Experimental investigation of the effects of adhesive thickness on the fracture behavior of structural acrylic adhesive joints un dervarious loading rates*. International journal of adhesion and adhesives, Elsevier (2021).
- [29] SEKIGUCHI (Y.) et SATO (C.). – *Effect of bond-line thickness on fatigue crack growth of structural acrylic adhesives joints*. Materials, mdpi.com (2021).
- [30] BRYANT (R.W.) et DUKEZ (W.A.). – *The effect of adhesive thickness on joint strength*. Journal of Adhesion (vol. n° 1), p. 48-53 (1969).
- [31] JAILLON (A.), JUMEL (J.), LACHAUD (F.), PAROISSIEN (E.) et RENART (J.). – *Adhesive thickness influence on a structural methacry-*

late adhesive behavior. 6th World congress on adhesion and related phenomena, (wcarp 2018) p. 1-3 (hal-01892183), San Diego (Ca) (2018).

[32] HAHN (H.T.). – *Residual stress in the interfacial bond zone of curing adhesives by a sensitive strain measurement technique*. Journal of Adhesion, 17, p. 21-32 (1984).

[33] GIRAUD (J.M.). – *Quelle épaisseur de colle choisir pour un assemblage collé ?* Matériaux et Techniques, p. 255-259 (1990).

[34] MALLICK (P.K.). – *Structural adhesive joints*. Wiley online library (2020).

[35] GUESS (T.R.), ALLRED (R.E.) et GERSTLE (F.P.). – *Comparison of lap shear test specimens*. Journal of Testing and Evaluation, vol. 5, n° 2, p. 48-53 (1977).

[36] CROCOCRE (A.D.) et ADAMS (R.D.). – *Influence of the spew fillet and other parameters on stress distribution in the single lap joint*. Journal of Adhesion, vol. 13, p. 141-155 (1981).

[37] JEANDRAU (J.P.). – *Modélisation et prévision du comportement d'un assemblage collé à partir des caractéristiques de l'adhésif à l'état massique*. Rapport CETIM n° 105040 (1987).

[38] TAHERI (F.). – *Improvement of the performance of structural adhesive joints with nanoparticles and numerical prediction of their response*. Structural adhesive joints, Wiley online library (2020).

Thèses récentes

[39] BUCH (X.). – *Dégradation thermique et fluage d'un adhésif structural époxyde*. Thèse doctorat : Sciences et techniques. ENSM Paris (2000).

[40] DELOZANNE (J.). – *Durabilité des époxyds ; application au collage structural aéronautique*. ENSAM Paris (2018).

[41] LÉONARDI (A.). – *Liaison structurale par collage de composite fibre de carbone – PEEK – Elaboration et analyse des propriétés physiques*. Toulouse-3 (2013).

[42] BRETTON (C.). – *Contribution à l'étude de l'assemblage par collage structural d'aciers revêtus*. Thèse doctorat : Sciences des matériaux. CNAM (2001).

[43] STAEGER (M.). – *Influence de l'addition de polymères photoréticulables sur les propriétés physico-chimiques d'un adhésif sensible à la pression thermofusible : application aux panneaux d'étanchéité de portières d'automobile*. Thèse doctorat : Chimie-Physique. Dijon (2002).

[44] DORVAL (F.). – *Étude des propriétés d'adhérence et de durabilité du système acier inoxydable : adhésif époxyde, influence d'un primaire d'adhésion*. Thèse doctorat : Science et génie des matériaux. Grenoble, INPG (2003).

[45] DUFOUR (L.). – *Caractérisation et modélisation du collage structural multimatériaux sous sollicitations dynamiques*. Valenciennes (2017).

À lire également dans nos bases

COGNARD (P.). – *Collage des matériaux. Mécanismes. Classification des colles*. [BM 7 615] Génie industriel (2002).

COGNARD (P.). – *Collage des matériaux. Caractéristiques, mise en œuvre*. [BM 7 616] Génie industriel (2002).

COGNARD (P.). – *Collage des matériaux. Applications*. [BM 7 617] Génie industriel (2003).

COGNARD (P.). – *Collage des métaux. Généralités. Caractéristiques*. [BM 7 620] Génie industriel (2003).

COGNARD (Ph.). – *Collage des métaux. Applications*. [BM 7 621] Génie industriel (2003).

CHATAIN (M.). – *Comportements physique et thermomécanique des plastiques*. [A 3 110] Plastiques et composites (1993).

FONTANILLE (M.) et GNANOU (Y.). – *Structure moléculaire des polymères*. [A 3 037] Plastiques et composites (2008).

NAUDIN (C.-A.). – *Nomenclature, classification et formules chimiques des polymères*. [A 3 035] Plastiques et composites (1995).

PENT (J.-A.), BAZIARD (Y.), NASSIET (V.) et HASSOUNE-RHABBOUR (B.). – *Durabilité des assemblages collés – Étude*. [COR 160] Corrosion Vieillessement (2005).

Normes et standards

NF EN ISO 527	Mars 1996	Plastiques. Détermination des propriétés en traction. Partie 1 – Principes généraux. Indice de classement : T 51034.			Partie 5 : conditions d'essai pour les composites plastiques renforcés de fibres unidirectionnelles. Indice de classement : T51-034-5.
NF EN ISO 527-2	Juillet 1996	Plastiques – Détermination des propriétés en traction – Partie 2 : conditions d'essai des plastiques pour moulage et extrusion. Indice de classement : T51-034-2.	NF EN ISO 9664	Septembre 1995	Adhésifs. Méthodes d'essai de tenue à la fatigue d'adhésifs structuraux en traction – Cisaillement. Indice de classement : T 76111.
NF EN ISO 527-3	Octobre 1995	Plastiques – Détermination des propriétés en traction – Partie 3 : conditions d'essai pour films et feuilles. Indice de classement : T51-034-3.	NF EN 15274	Mai 2015	Adhésifs structuraux pour applications générales – Exigences et méthodes d'essai.
NF EN ISO 527-4	Juillet 1997	Plastiques – Détermination des propriétés en traction – Partie 4 : conditions d'essai pour les composites plastiques renforcés de fibres isotropes et orthotropes. Indice de classement : T51-034-4.	NF T 76-011	Décembre 2017	Adhésifs – Classification des principaux adhésifs.
NF EN ISO 527-5	Juin 1997	Plastiques – Détermination des propriétés en traction –	NF EN 924	Janvier 2004	Adhésifs. Adhésifs à base de solvants et adhésifs exempts de solvants. Détermination du point éclair.
			NF EN 4880-102	Décembre 2019	Pour en savoir plus et suivre les mises à jour, merci de consulter le bulletin T.I. de veille normative.

Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- > + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- > + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- > Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

Les offres Techniques de l'Ingénieur

INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique

INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques

OFFRE



Plastiques et composites

Choisir et mettre en oeuvre des matériaux capables de remplacer les matériaux traditionnels
Ref : TIP100WEB

PRÉSENTATION

Toutes les données nécessaires pour appréhender les polymères: propriétés, procédés de mise en oeuvre, essais, conception de pièces, finition, recyclage,
Une étude détaillée des différentes fibres de renforcement et des méthodes de transformation des plastiques renforcés,
Des monographies sur les principaux thermoplastiques et thermodurcissables,
De nombreux développements consacrés au comportement et aux applications des matériaux composites.

VOTRE COMMANDE :

Référence	Titre de l'ouvrage	Prix unitaire H.T	Qté	Prix total H.T
TIP100WEB	Plastiques et composites	2 295 €	1	2 295 €
Total H.T en €				2 295 €
T.V.A : 5,5%				126,23 €
Total TTC en €				2 421,23 €

VOS COORDONNÉES :

Civilité M. Mme

Prénom _____

Nom _____

Fonction _____

E-mail _____

Raison sociale _____

Adresse _____

Code postal _____

Ville _____

Pays _____

Date :

Signature et cachet obligatoire

CONDITIONS GÉNÉRALES DE VENTE

Conditions générales de vente détaillées sur simple demande ou sur www.technique-ingenieur.fr

Si vous n'êtes pas totalement satisfait, vous disposeriez d'un délai de 15 jours à compter de la réception de l'ouvrage pour le retourner à vos frais par voie postale. Livraison sous 30 jours maximum.