

II.1. Introduction au collage structural

Les matériaux utilisés pour le collage structural sont essentiellement de nature métallique, céramique, composite ou verre pour les substrats et de nature polymère pour les adhésifs [20]. Les adhésifs commerciaux les plus employés sont des polymères phénoliques, acryliques, polyuréthanes, polyimides et époxydiques. Par exemple, notre étude concerne un alliage d'aluminium et un matériau composite par des fibres et l'adhésif est une résine époxydique. La qualité du collage dépend de nombreux paramètres, comme les conditions de mise en oeuvre, de réticulation, des propriétés mécaniques et physico-chimiques de surface ou de volume de l'adhésif aussi bien que des substrats. Appréhender le phénomène d'adhésion nécessite donc de faire appel à plusieurs domaines scientifiques (chimiques, physico-chimique et mécaniques de ce problème complexe). [21].

II.2 Adhésion et adhérence

La norme NF T T6-001 de 1981 définit l'adhésion comme un phénomène chimique; physique ou physico-chimique qui produit l'adhérence. Plusieurs théories ont été émises pour mieux comprendre les mécanismes élémentaires de l'adhésion. Selon Couvrat [22], nous pouvons aborder l'adhésion en suivant principalement deux approches :

- *une approche physique* pour expliquer la nature des liaisons s'établissant entre deux surfaces de natures différentes ;
- *une approche thermodynamique* pour expliquer comment les liaisons peuvent s'établir. Ceci amène à introduire la notion de mouillabilité. On souligne ici la différence entre adhésion et adhérence.

Lorsqu'on souhaite rompre les forces d'attraction (adhésion) entre deux solides, il est nécessaire de fournir une quantité d'énergie supérieure à l'énergie d'adhésion. Ou mesure alors le résultat de la rupture des forces d'adhésion et la dissipation d'énergie dans les solides, ce que l'on nomme adhérence [23].

II.2.1. Approche physique

L'adhésion peut être considérée comme le produit d'un ensemble de mécanismes physiques : ancrage mécanique, liaisons chimiques, forces électrostatiques, forces dipolaires, forces de Van der Waals. On expose ici les principaux mécanismes physiques responsables de l'adhésion.

II.2.1.1. La théorie mécanique

L'un des premiers modèles utilisés, dès 1925 par Mac Bain et Hoptins, pour rendre compte de l'adhésion durable entre deux solides est l'ancrage mécanique qui résulte de la pénétration par capillarité de la colle liquide dans les pores et entre les aspérités des surfaces en contact, et de la solidification ultérieure de cette colle [24].

L'augmentation de la surface réelle de contact, quantifiée par la rugosité; et l'accroissement concomitant du nombre de liaisons interfaciales permettent d'expliquer la forte adhésion constatée et l'accroissement de la résistance au cisaillement du joint dans le plan de l'interface. Encore faut-il comme on le sait aujourd'hui; que la colle « mouille » le plus parfaitement possible les surfaces à réunir; afin de ne pas piéger des bulles d'air au fond des porosités. Ce concept de mouillage sera examiné ultérieurement. Il est toutefois utile et important de remarquer que l'évocation précoce de cette notion de mouillabilité traduit le fait que certains modèles de l'adhésion sont; entre eux, plutôt complémentaires que contradictoires.

II.2.1.2. La théorie électrostatique

La théorie électrostatique, développée à l'initiative de Deryagin et Krotova de l'Ecole Russe à partir de 1948, rend compte du contact de deux matériaux de natures différentes. Elle fut formulée suite à l'observation d'émissions d'électrons rapides lorsqu'un contact est rompu sous vide ou lors de la fracture d'un cristal. Elle conduit à un remarquable accord entre les valeurs théoriques et les valeurs mesurées mécaniquement par un test de pelage, mais ne s'applique que dans des cas très rares [24].

Cette théorie est basée sur le transfert de charges électriques lors du contact et le réajustement des niveaux de Fermi [25], processus qui conduit en général à la formation d'une double couche

électrique à l'interface, laquelle peut être assimilée aux deux plaques d'un condensateur plan. Bien que ce modèle, basé sur les attractions électrostatiques, rende parfaitement compte de la cohésion d'assemblages verre-polymère tels que verre-caoutchouc et verre-chlorure de polyvinyle, il ne s'applique pas à d'autres interfaces, toutes aussi usuelles, telles que verre-dépôts métalliques divers, de sorte que l'on a tendance aujourd'hui à considérer que les phénomènes électriques, lorsqu'ils sont observés, sont plutôt l'effet que la cause de l'adhésion constatée.

II.2.1.3. La théorie de la diffusion

Cette théorie, proposée par Voyutidif de l'Ecole Russe dans les années 1950, permet d'expliquer les phénomènes de cicatrisation observés avec les polymères fracturés ou fissurés [24]. L'adhésion est alors expliquée comme un enchevêtrement de macromolécules de deux matériaux résultant de l'interdiffusion des couches du substrat et de la colle. La zone de transition ainsi créée est appelée interphase ou interface épaisse. Les mécanismes fondamentaux de diffusion des macromolécules ont été décrits et analysés par Pierre-Gilles de Gennes; prix Nobel de physique en 1991, en utilisant le concept de reptation, le temps de relaxation associé à la reptation d'une chaîne variant comme le cube de la masse moléculaire du polymère. Cette théorie suppose une solubilité mutuelle des deux matériaux et ne s'applique que dans peu de cas.

II.2.1.4. La théorie de Bekerman

Dans les années 1960, l'américain Bekerman émet l'hypothèse de la formation au voisinage de l'interface d'une zone, l'interphase; caractérisée par une cohésion différente de celles des deux matériaux en présence [24].

Dans le cas d'une forte cohésion; une rupture ne peut se produire qu'à l'intérieur de l'un des solides ; au contraire; une rupture dans la zone de transition interrassiale traduit une faible cohésion.

Ce modèle d'interphase; à forte ou faible cohésion; n'a pas la prétention d'expliquer les mécanismes de l'adhésion ; par contre, il propose d'attirer une attention tout à fait particulière sur la nature de l'interface lorsque l'on affine l'échelle d'observation, du micromètre au nanomètre, c'est-à-dire à la dimension de la molécule.

II.2.1.5. La théorie de l'adsorption thermodynamique

Des forces intermoléculaires de type Van Der Waals ou liaison hydrogène [distance d'interaction de l'ordre de 3 à 5 Å] fixent l'adhésif à l'état liquide sur la surface du solide [3]. Selon cette théorie, il faut que le contact soit parfait entre le solide et l'adhésif pour avoir une bonne adhésion.

Dans une atmosphère ordinaire; l'air ambiant par exemple, les forces les plus intenses, qui sont à très court rayon d'action, sont écrantées par les films d'oxyde; les couches de molécules adsorbées et toute contamination extérieure présents sur la surface exposée. Les forces de Van Der Waals sont de plus faible intensité mais présentent un plus grand rayon d'action. Leur contribution, dans une atmosphère ordinaire devient prépondérante. Si l'on élimine la contamination atmosphérique, les couches d'oxyde peuvent alors réagir par des liaisons polaires coordinantes, appelées aussi liaisons donneur-accepteur ou encore liaisons acide-base, ou par des liaisons ioniques plus intenses.

II.2.1.6. La théorie de la liaison chimique

Si l'interface est le siège de réactions chimiques créant des liaisons solides de types covalent ou ionique, qui confèrent à l'assemblage une grande résistance à la rupture; on parle de modèle chimique. L'efficacité d'un couplage chimique varie étroitement avec deux paramètres : le nombre des liaisons interraciales et la longueur des chaînons assurant le couplage.

II.2.2. Approche thermodynamique (énergie l'adhésion de Dupré)

La cohésion d'un corps est assurée par l'existence de forces qui agissent en son sein. Chaque molécule est soumise à des interactions avec toutes ses plus proches voisines de sorte que la résultante des interactions est nulle. Par contre; à la surface; une molécule se trouve soumise à une résultante non nulle dirigée vers l'intérieur et qui tend à réduire la surface. C'est la raison pour laquelle, lorsque l'on approche deux solides l'un de l'autre, des forces d'attraction moléculaire se manifestent avant même que le contact soit établi et augmentent jusqu'à la réalisation du contact.

Ces forces viennent s'ajouter aux efforts extérieurs; de la même manière que le champ magnétique accroît la pression d'appui d'un aimant posé sur un substrat, en fer doux.

Les forces d'attraction moléculaire ont une intensité qui dépend de la nature des liaisons assurant la cohésion des matériaux. L'énergie superficielle γ représente le travail à effectuer pour séparer, de manière isotherme et réversible, deux parties du solide suivant un plan imaginaire de surface unitaire, en coupant les liaisons rencontrées. Cette énergie s'exprime en joule par mètre carré (J.m^{-2}) n'existe une définition similaire pour rendre compte de la séparation de deux solides différents 1 et 2 préalablement réunis : c'est l'énergie d'adhésion de Dupré (1969), ou travail thermodynamique d'adhésion [24], noté E_D . Son calcul est simple : il faut dépenser l'énergie γ_1 pour créer un élément unitaire de surface du corps 1 et l'énergie γ_2 pour créer un élément unitaire de surface du corps 2, et l'on récupère l'énergie interrassiale γ_{12} emmagasinée à l'interface lors de la mise en contact (II.1). C'est l'énergie de Dupré qui est responsable du maintien en place de deux corps réunis dans un assemblage et qui assure leur contact interne.

$$E_D = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad \text{II.1}$$

Cette énergie prend une forme légèrement différente (II.2) lorsqu'on s'intéresse à un contact liquide solide. Le critère de bonne adhésion est alors essentiellement un critère de mouillabilité. La mouillabilité est définie par l'angle de raccordement qu'une goutte de liquide posée sur une surface minérale fait avec cette surface (figure II.1).

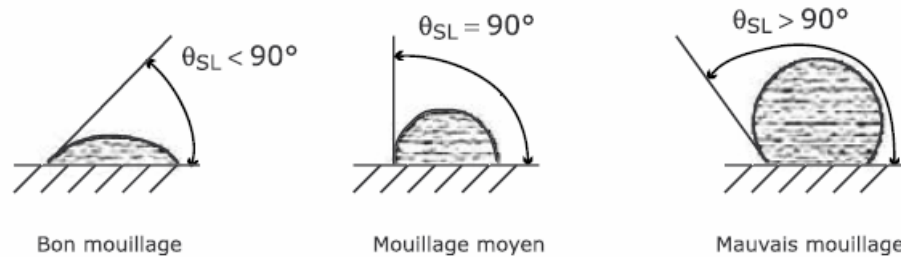


Figure II.1. Définition de l'angle de mouillage.

$$E_D = \gamma_L (1 + \cos(\theta_{SL})) \quad \text{II.2}$$

Où γ_L est la tension superficielle du liquide et θ_{SL} est l'angle de contact solide liquide ou angle de mouillage. Le calcul ou la mesure de la force d'attraction (que l'on peut appeler force d'adhésion) en fonction de la distance des solides que l'on rapproche, ne permet pas d'en déduire la force qu'il faut appliquer pour séparer les corps une fois le contact établi. On mesure le résultat de la séparation des éléments collés, ce que Maugis propose de nommer adhérence [23]. En effet, cette force de séparation dépend d'un grand nombre de comportements mécaniques et de paramètres environnementaux tels que déformations élastiques; viscoélastiques ou plastiques des solides en contact, vitesse de rupture, caractéristiques mécaniques de l'appareil de mesure de la force; présence de contaminants, température *et* hygrométrie ambiantes, etc.

II.2.3. Le modèle du facteur dissipatif

Ce dernier modèle, concerne plutôt l'adhérence que l'adhésion dans le sens où il fait intervenir la notion de rupture de l'assemblage collé. Il s'agit du modèle du facteur dissipatif [24]. Lorsqu'une fissure se propage dans un matériau ou à l'interface d'un joint adhésif; Le bilan des énergies mises en jeu peut être écrit sous la forme simple suivante; $G = \Gamma \chi \phi$, expression dans laquelle l'énergie de rupture G est égale au produit de l'énergie de surface (Γ) par le facteur de dissipation irréversible en volume (ϕ) lequel résulte essentiellement des pertes visqueuses pour les polymères.

Ce modèle permet de comprendre qu'un joint adhésif présente la même adhérence si l'adhésion (Γ) est faible avec une colle présentant une viscosité (ϕ) importante ou si l'adhésion est forte avec une viscosité peu marquée; le paramètre de contrôle étant précisément le produit $\Gamma \chi \phi$. Ainsi; si la pâte à modeler présente un aspect collant et légèrement poisseux au toucher; malgré sa faible adhésion, c'est, parce que la viscosité de la pâte est essentiellement responsable de la sensation tactile éprouvée [24].

Ce modèle permet également de comprendre pourquoi (par déformation de la colle ou d'un des corps en contact) il faut dépenser; pour rompre un assemblage collé une énergie énorme au moins 10^4 fois supérieure à l'énergie correspondant aux forces attractives entre les molécules. Un autre mécanisme, qui amplifie cet effet, est mis en évidence par le français Ludwick Leibler, qui

consiste en un "effet ventouse" créé par de minuscules bulles d'air au sein de l'adhésif [26]. Ce phénomène peut être aisément visualisé avec du chewing-gum.

II.3. Essais de caractérisation mécanique du collage

Du point de vue de l'ingénieur, le dimensionnement d'une structure collée nécessite la connaissance de caractéristiques mécaniques du collage en lien avec les sollicitations auquel il est soumis : traction, compression, cisaillement, clivage (séparation des constituants rigides d'un assemblage par application d'un effort, à leur extrémité selon une direction sensiblement perpendiculaire au plan de collage) ou pelage [27] (séparation des constituants d'un assemblage, dont l'un au moins est souple, par application d'un effort à l'extrémité du support souple selon un angle compris entre 90° et 180° par rapport au plan de collage).

Dans la pratique, la résistance mécanique d'un collage est toujours évaluée dans un assemblage collé. D'après la norme NF EN ISO 10365, on distingue deux types de rupture :

Rupture de cohésion (ou cohésive) : rupture d'assemblage qui, à l'oeil nu ou à l'aide de la techniques d'observation ou d'analyse appropriées, est localisée à l'intérieur du joint de colle ou au sein du substrat ;

Rupture d'adhésion (ou adhésive) : rupture d'assemblage qui, à l'oeil nu ou à l'aide de techniques d'observation ou d'analyse appropriées, est localisée à l'interface adhésif/substrat.

Généralement, on distingue [28] :

- la résistance à la traction;
- la résistance au cisaillement ;
- la résistance au cisaillement en nuage : le glissement progressif des pièces collées, l'une par rapport à l'autre, soumises à une force imposée ;
- la résistance au clivage ;
- la résistance au pelage.

II.4. Traitements mécaniques

Le traitement mécanique consiste le plus souvent à faire subir une abrasion (traitement mécanique « léger ») ou une projection de particules (traitement mécanique « dur ») à la surface du substrat.

II.4.1. L'abrasion

Ce traitement consiste à frotter manuellement ou mécaniquement un papier sablé sur la surface de collage [29,30]. L'abrasion, comme le sablage, nécessite une action comme le soufflage ou les ultrasons pour enlever les particules résiduelles inhérentes au traitement [31].

II.4.2. Le sablage

Le sablage consiste à projeter de fines particules de taille et de composition contrôlée sur la surface du substrat à une certaine pression, un angle de projection donné, une certaine distance, un certain diamètre de buse et pendant un temps donné[32]. Les particules projetées peuvent être des billes de verre ou du corindon (Al_2O_3) [33,34]. Ce procédé permet d'éliminer les couches d'oxyde fragiles et peu actives et en former d'autres par oxydation dans l'atmosphère des couches d'alliage situées sous les couches d'oxydes découpées par sablage [35,36]. Il permet aussi d'augmenter la rugosité par la déformation de la surface du substrat après impact des particules [33].

L'abrasif le plus utilisé est le corindon. Les grains, de taille variable (env. 80 à >700 μm), ont les arrêtes vives et sont très durs. La granulométrie et le diamètre influencent les propriétés mécaniques des assemblages [34]. Certains auteurs minimisent cependant cette influence pour des assemblages non vieillis [32]. S'il permet d'éliminer des couches d'oxydes polluées, fragiles ou peu actives, le sablage peut aussi amener des éléments contaminants à la surface du substrat traité.

Ce sont souvent des particules ou des fragments de particules du sablage qui sont restées incrustées à la surface, contenant du silicium (Si), du calcium (Ca), du sodium (Na) [32,33]. La pollution par les particules peut aussi se faire au niveau atomique, au moment de l'impact à haute vitesse (donc avec une grande quantité d'énergie mise en jeu) propice à l'échange d'atomes [35]. La composition des particules influence donc la composition de la surface. Ainsi, les forces

dispersives et polaires à la surface vont être modifiées en fonction de la nature des atomes apportés de l'extérieur [32].

Le sablage permet d'augmenter d'environ 50 % les propriétés d'adhésion initiales par rapport à un dégraissage seul. La plus forte amélioration s'obtient par sablage au corindon. Les billes de verre augmentent aussi l'adhésion, mais dans une moindre mesure [33]. Cette augmentation peut s'expliquer principalement par l'augmentation de la surface développée due à la rugosité [32]. En effet, un substrat aluminium, à la sortie de l'usine, a une rugosité Ra d'environ $0,4\mu\text{m}$. Après sablage, Ra vaut quelques μm environ [32]. En revanche, ce traitement ne semble pas augmenter sensiblement les performances des assemblages en milieu agressif. Cependant, on peut noter que le diamètre des particules de sablage semble avoir une influence sur la durabilité. Un sablage avec des particules de faible diamètre d'un substrat d'alliage aluminium donne une meilleure durabilité des assemblages en milieu humide [32]. Le résultat inverse est trouvé pour un substrat en acier. En outre, un assemblage dont les substrats ont été sablés avec des billes de verre absorbe moins d'eau qu'un assemblage dont les substrats ont été sablé au corindon. Par ailleurs, il est déconseillé de sabler un substrat polymère renforcé par des fibres de carbone. En effet, les fibres à la surface sont dégradées, cassées et n'assurent plus leur rôle de répartition de contrainte [37].

II.4.3. Ultrasons

Cette technique utilise les vibrations haute fréquence pour séparer les particules faiblement liées au substrat. Les ultrasons sont souvent utilisés après un traitement sablage ou traitement chimique pour séparer les particules non solidaires de la surface créée après un décapage.

II.5. Mécanique de la rupture, application aux joints collés

On peut définir la rupture par la séparation de deux corps initialement solidaires, ou la séparation de parties d'un corps formant initialement une seule entité [23]. Elle est généralement amorcée à partir d'une entaille ou d'un défaut [38]. Sa vitesse de propagation dans le système et son aspect dépendent du (des) matériau(x), des contraintes internes au système et de celles exercées sur celui-ci par le milieu (température, forces appliquées...), de la géométrie du (des) solide(s) [39-41].

Les liaisons existant entre les deux parties qui se séparent se brisent les unes après les autres, on parle de fissuration [42]. L'énergie dépensée pour créer une fissuration dans un corps est appelée « énergie de cohésion ». Dans le cas de la séparation de deux corps distincts, on parle d'« énergie de décohésion interfaciale » [40] ou d'énergie d'adhésion. Il existe trois modes de fissurations (Figure II.2)

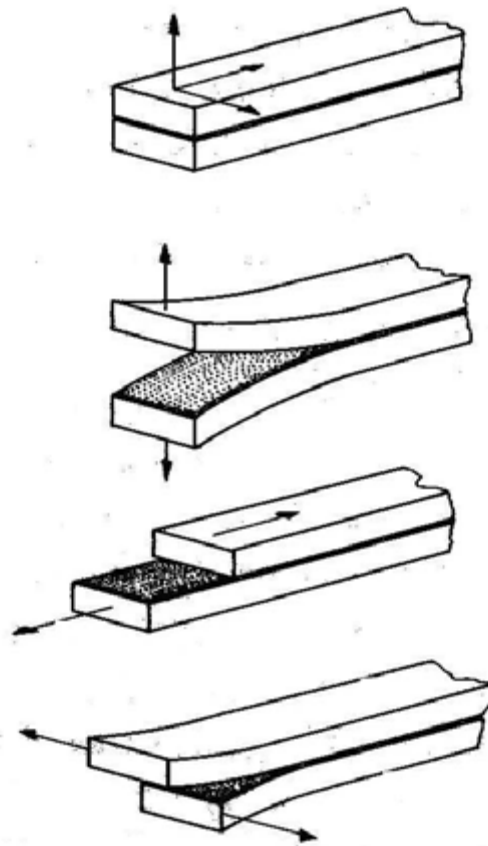


Figure II.2. Schématisation des modes de fissuration [42].

I-5.1. Différents aspects d'une fissure

On peut classer les types de rupture suivant le lieu où elle se produit (Figure II.3) [43]. Une rupture confinée au sein d'un matériau est dite « cohésive ». Une rupture sur la surface d'un matériau constituant un assemblage est dite « adhésive » ou « interfaciale ». Une rupture confinée

au sein d'un matériau est dite « cohésive ». Un troisième aspect doit être mentionné. En effet, la rupture se fait parfois non pas à l'interface *stricto sensu*, mais très proche de celle-ci [43]. On parle de rupture dans l'« interphase » car la proximité d'une interface peut être synonyme de gradient de propriétés [43,44]. La fissure peut alterner entre ces trois types de faciès au cours d'une même sollicitation de l'assemblage [45]. La localisation précise de la fissure (microanalyse X, par exemple) est très utile pour la description des mécanismes de rupture.

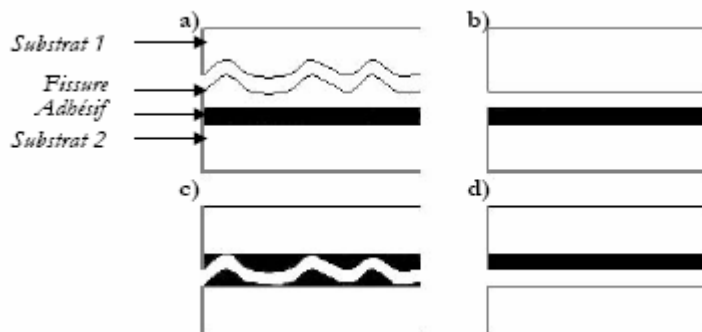


Figure II.3. Types de fissures possibles dans le cas des assemblages collés : a) et c) cohésives ; b) et d) adhésives.

II.6. L'adhérence

Les théories de l'adhésion ont pour but d'expliquer les phénomènes pouvant être à l'origine de l'adhésion entre deux matériaux mais ne permettent pas de les quantifier. Les essais mécaniques effectués sur les assemblages collés permettent de mesurer l'adhérence de l'assemblage qui dépend de divers paramètres ne résultant pas forcément d'un phénomène d'adhésion. Ainsi, l'adhérence peut être définie comme étant l'énergie dépensée pour séparer les deux parties d'un assemblage; elle représente alors la résistance de l'assemblage sous diverses sollicitations mécaniques. L'adhérence est donc mesurée par l'aire sous la courbe contrainte – déformation dans le cas de ruptures s'amorçant ou se produisant au sein de la zone interfaciale adhésif/substrat considérée [46]. Dans le cas de fissuration cohésive, ce sont les propriétés de cohésion de l'adhésif ou du substrat qui sont étudiées et on ne peut qualifier l'énergie déterminée d'adhérence.

Plusieurs paramètres peuvent avoir une influence sur l'adhérence des assemblages collés. Certains affectent directement les propriétés mécaniques, physiques et chimiques de l'interphase et d'autres agissent sans modifier l'interphase considérée mais sont susceptibles de changer les valeurs des grandeurs déterminées.

Parmi les facteurs qui affectent réellement l'adhérence, on peut citer :

- les propriétés physico – chimiques de la surface (nature chimique, rugosité).
- les propriétés physico – chimiques de la couche créée à la suite des traitements de surface du substrat.
- les propriétés physico – chimiques du polymère.
- les conditions d'application et de polymérisation de l'adhésif et les conditions de vieillissement de l'assemblage collé.
- les conditions d'essai (température, hygrométrie).

Par conséquent, l'adhérence des assemblages collés est conditionnée aussi bien par les phénomènes physico – chimiques superficiels que par les propriétés rhéologiques de l'adhésif ou des substrats, par les conditions de réticulation de l'adhésif et par les conditions de sollicitation mécaniques. Les efforts d'optimisation de l'adhérence d'un assemblage collé se portent donc naturellement sur l'optimisation physico – chimique de l'état de surface. Ces préparations sont, en outre, fortement dépendantes du type de matériau et de ses propriétés intrinsèques.

De nombreuses références de la littérature traitent des traitements de surfaces applicables à l'ensemble des matériaux que l'on souhaite assembler par collage. Cependant, une connaissance des traitements couramment utilisés pour les matériaux est nécessaire. Il existe ainsi des traitements spécifiques aux métaux [47], aux polymères [48,49] et aux matériaux composites [50], différents de par la nature et la réactivité des matériaux à assembler.

II.6.1. Assemblages collés

De nombreux types d'assemblages collés ont été étudiés afin de tester leurs propriétés mécaniques et donc la résistance des adhésifs en situation réelle. Citons par exemple les joints à simple et double recouvrement ("single and double lap joints" en anglais), les joints massiques et

annulaires en torsion ("torsion butt joint and napkin ring test") et les joints massiques sollicités en traction ("butt joints"). Le choix de la géométrie utilisée correspond à un compromis entre la simplicité d'élaboration, le type de sollicitation envisagé, la nature des résultats souhaités, qualitative ou quantitative.

L'évaluation des performances et de la durabilité d'un assemblage collé s'effectue :

Soit par des *tests mécaniques destructifs*. Il s'agit alors de mesurer un paramètre de force ou de déplacement maximal à la rupture. Le paramètre mesuré sera représentatif de *l'adhérence* (force ou travail qu'il faut fournir au système pour en séparer les deux constituants) si la rupture est *adhésive*, c'est à dire si elle se produit à l'interface adhésif/substrat. Si la rupture est *cohésive*, c'est à dire qu'elle survient au sein de l'adhésif (ou du substrat), la valeur mesurée est caractéristique des propriétés intrinsèques du matériau dans lequel a eu lieu la rupture. Les principales sollicitations mécaniques sont la traction, le cisaillement, le clivage ou le pelage.

Soit par des *Contrôles Non Destructifs* (CND) qui, du fait de l'intérêt que leurs portent les industriels, se développent considérablement même s'ils ne sont pas encore totalement fiables. Citons, par exemple, la caractérisation d'assemblages collés par ultrasons [51].

Un des éléments importants de la réalisation d'assemblages collés est le traitement de surface du substrat. De nombreuses études ont été réalisées sur l'influence du traitement de surface sur la tenue mécanique des assemblages collés [52,53]. Le but des traitements est multiple, il s'agit :

- de dégraisser la surface du substrat
- d'éliminer les couches de contamination en surface qui sont faiblement adhérentes
- de changer la composition chimique superficielle pour former une couche de haute réactivité chimique
- de modifier la morphologie de la surface en augmentant la rugosité

Il ressort de ces études que le traitement de surface est primordial pour obtenir une bonne tenue mécanique. Les traitements de surface les plus couramment utilisés sont l'ablation mécanique tel le sablage, les traitements chimiques et/ou électrochimiques, les dépôts plasma ou l'utilisation de primaire d'adhérence [53].

II.6.2. Durabilité des joints collés

En optimisant les phénomènes d'adhérence lors de la conception de l'assemblage, et plus particulièrement lors des phases indispensables de préparation des surfaces, la durée de vie de l'assemblage est amplifiée. Cependant, d'autres facteurs doivent être pris en compte pour garantir à l'assemblage collé un maintien dans le temps de ses caractéristiques mécaniques, tant au niveau de sa fabrication que de son utilisation. En effet, les grandes précautions prises lors de la préparation du substrat doivent être poursuivies pour assurer une bonne cohésion de l'adhésif [54].

II.6.3. Hygro thermo mécanique de l'adhésif

Lors de la conception de l'assemblage, le comportement hygrothermo mécanique de l'adhésif peut intrinsèquement être un facteur d'endommagement. En effet, la formation de bulles d'air dans l'adhésif provient souvent de l'introduction de l'air lors du mélange et s'interprète physiquement sur la base des tensions interfaciales entre gaz et liquide. La variation de volume de l'adhésif et le retrait consécutif à sa polymérisation, souvent associé à l'évaporation d'un solvant sont aussi des facteurs d'endommagement. C'est pourquoi l'utilisation d'adhésifs époxy à faible retrait et qui dégagent peu ou pas de composés volatils lors de leur polymérisation sont souvent choisis dans les assemblages structuraux. De même, les différences de coefficient de dilatation thermique entre substrat et adhésif sont aussi un facteur de microfissuration qui toutefois n'altère la durabilité du joint qu'en atmosphère humide. Les conditions de cuisson de l'adhésif à l'élaboration du joint sont autant de facteurs d'endommagement qui seront révélés lors du service à long terme. Ainsi, plus la viscosité de l'adhésif diminue avec l'augmentation de la température, moins les risques d'endommagement se manifestent : les capacités d'écoulement accrues conduisent à une meilleure mouillabilité, une limitation des porosités, une meilleure absorption, dissolution et dispersion des contaminants à la surface des substrats et meilleures interactions avec les substrats. De même, une température élevée de cuisson favorisera la réticulation de l'adhésif et par conséquent sa résistance au fluage. Le contrôle de la pression le long du joint alors que l'adhésif change de viscosité en polymérisant peut engendrer des contraintes internes qui représentent elles aussi des sources d'endommagement.

II.6.4. Endommagement de l'assemblage collé en service

Les caractéristiques mécaniques d'un assemblage collé peuvent se trouver diminuées par les conditions de service de la structure contenant l'assemblage. Les causes en sont diverses et variées et peuvent être énumérées comme suit :

- les contraintes appliquées à la structure peuvent être de trois types ; d'une part, les contraintes statiques (fluage) sont nocives aux assemblages et inhérentes à l'adhésif polymère. Des contraintes cycliques (fatigue) sont étudiées surtout dans les industries aérospatiales et automobiles et apparaissent plus néfastes aux assemblages que les contraintes statiques. Enfin, les assemblages collés dans l'industrie automobile nécessitent une bonne connaissance de la tenue aux chocs. On peut toutefois souligner que les adhésifs structuraux sont très sensibles à la vitesse de sollicitation par une diminution de leur taux de restitution d'énergie.
- la température est un facteur important car les performances mécaniques des adhésifs sont très nettement diminuées lorsque la température atteint une valeur inférieure de 25°C de leur température de transition vitreuse [55]. De même, une élévation de température active la diffusion d'eau et favorise le vieillissement humide et la dégradation interfaciale.
- d'autres facteurs peuvent modifier la durabilité des joints collés tels que les rayonnements UV [56], les passages en atmosphères particulières, les agressions chimiques [57] ou électrochimiques [58] et ne font que s'ajouter aux facteurs précédemment énoncés.

II.6.5. Préparation de surface avant collage

La théorie de l'adhésion et l'étude des phénomènes d'adhérence ont montré l'importance des traitements de surface et de toutes les étapes de préparation de l'assemblage collé. De plus, les conditions de durabilité et de vieillissement du joint de colle doivent absolument être prises en compte dans le dimensionnement de l'assemblage. Toutefois, répondre à toutes ces questions ne suffit pas pour obtenir un joint solide et adapté à ses conditions d'utilisation. Il faut, en effet, que la géométrie de l'assemblage puisse conserver les caractéristiques intrinsèques de l'adhésif. Ainsi, certaines configurations de joints collés sont à proscrire car elles sollicitent mal l'adhésif. Toute localisation des efforts dans un joint de colle pourra avoir des effets catastrophiques et la recherche d'une répartition la plus homogène possible des efforts devra toujours être le but

premier du concepteur. La rugosité et la porosité sont, sans conteste, des facteurs favorables à l'adhésion. Il existe une rugosité optimale des supports qui donnera la meilleure adhésion.

II.7. Défauts dans les assemblages collés

Lors de la réalisation d'un assemblage collé, de nombreux types de défauts sont susceptibles d'être créés. Ces défauts sont évidemment des sites préférentiels pour l'amorçage de la rupture. La figure I.5 représente les défauts typiques d'un assemblage collé [59].

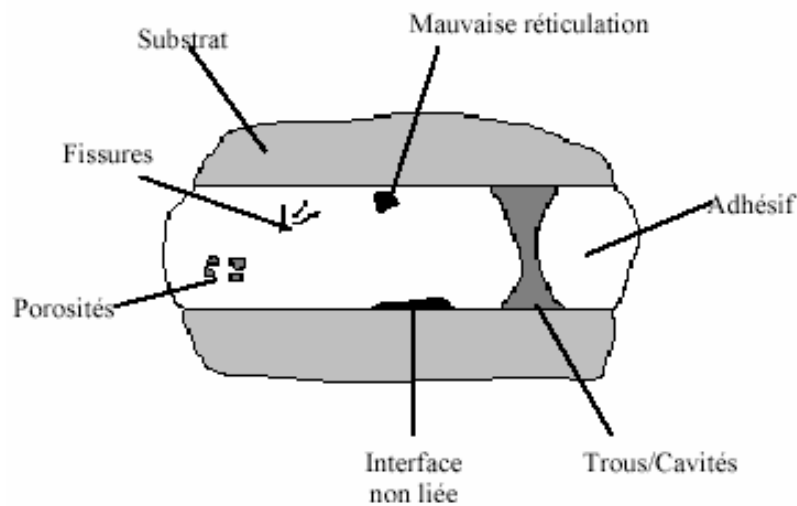


Figure II.4. Défauts typiques présents d'un assemblage collé [59].

La nature des défauts que l'on peut rencontrer dans un assemblage collé varie selon le phénomène à l'origine de ce défaut. On peut ainsi trouver :

- une **porosité** due à des gaz de polymérisation ou de l'air emprisonné pendant la fabrication de l'assemblage.
- des **micro fissures** dues à un fluage de l'adhésif, des contraintes résiduelles ou à des phénomènes de fatigue.
- des **zones de faible polymérisation** causées par exemple par un mauvais mélange de l'adhésif, un mauvais dosage des composants ou un temps de polymérisation insuffisant.
- des **cavités** dues à une mauvaise application de l'adhésif ou à des dégagements gazeux durant la polymérisation.

- des **zones de décollements** pouvant être conséquentes et provenant généralement d'une déficience de la préparation de surface du substrat, de phénomènes de condensation à l'interface, ou à la présence de contaminants lors du collage.

II.8. Principales sollicitations des assemblages collés

Les méthodes permettant d'identifier les paramètres de rupture sont les essais de séparation des substrats. Avec le choix du test, s'impose la nature des contraintes mises en jeu. On peut imposer à un joint de colle des contraintes normales au plan du joint (traction, compression), des contraintes tangentielles au plan du joint (cisaillement), des contraintes de pelage et des contraintes de clivage (arrachement).

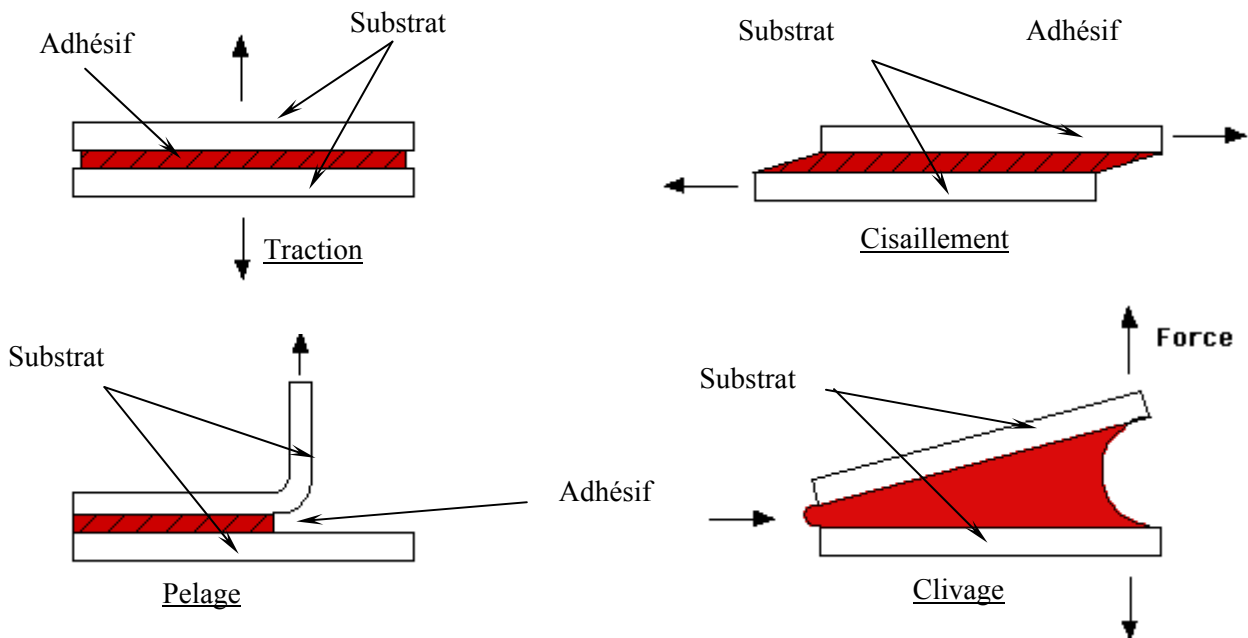


Figure II.5. Représentation des principales sollicitations que pourrait subir un assemblage collé.

Dans la réalisation d'un joint, on a vu qu'il est conseillé d'avoir une concentration de contraintes minimale et donc de répartir les charges imposées sur toute la surface du joint. Il est également préférable de favoriser les contraintes en compression ou en cisaillement et d'éviter autant que possible les contraintes de traction, de clivage ou de pelage. Les essais existants pour tester un joint adhésif sont nombreux, complexes et généralement adaptés à des applications spécifiques. Des normes [60,61] sont disponibles dans un grand nombre de domaines et

présentent l'avantage de définir un processus expérimental complet (préparation, mise en œuvre...) et de permettre la comparaison des résultats concernant les produits provenant de différents fabricants. Cependant, les résultats donnés par de tels essais s'avèrent bien souvent insuffisants pour une détermination des caractéristiques mécaniques de l'assemblage. Le but de tels essais est d'obtenir des résultats reproductibles et comparables d'une campagne d'essais à l'autre afin de pouvoir jauger divers produits équitablement. Cependant, ces essais ne permettent souvent qu'à l'accession à la force moyenne à rupture de l'assemblage et à certaines grandeurs statistiques sur le type de rupture observé. Ces essais présentent différentes configurations.