

N° d'ordre : 2353

THESE

PRÉSENTÉE À

L'UNIVERSITE BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DE PHYSIQUE

Par **M. Frédéric SIMON**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : MÉCANIQUE

***ENDOMMAGEMENT ET RUPTURE DES JOINTS COLLES
SOLLICITES EN TRACTION OU CISAILLEMENT.
APPLICATION AU COLLAGE DU BOIS***

Soutenue le 11 Avril 2001

Après avis de :

M. P. HALLER	Professeur, Univ. Tech. Dresde	Rapporteurs
M. D. GAMBY	Professeur, ENSMA Poitiers	

Devant la Commission d'examen formée de :

M. J.A. PETIT	Professeur, ENI Tarbes	Président
M. P. HALLER	Professeur, Univ. Tech. Dresde	Rapporteurs
M. D. GAMBY	Professeur, ENSMA Poitiers	
M. J.L. LATAILLADE	Professeur, ENSAM Bordeaux	Examineurs
M. P. MORLIER	Professeur, Univ. Bordeaux I	
M. G. VALENTIN	Professeur, Univ. Bordeaux I	

-- 2001 --

REMERCIEMENTS

Ma gratitude et mes sincères remerciements vont tout d'abord à Monsieur le Professeur Pierre Morlier pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et permis de bénéficier de tous les moyens nécessaires à cette étude.

Je remercie mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur Gérard Valentin, pour l'attention continue qu'il a portée à mon travail durant ces trois années. La liberté d'action dont j'ai pu bénéficier tout au long de cette étude et la rigueur expérimentale qu'il a su m'inculquer ont abouti à des enrichissements permanents et à une véritable formation par la recherche, même si ma gestion du travail demeure un mystère...

Je suis très sensible à l'intérêt que Monsieur le Professeur Peer Haller a porté à ce travail en acceptant d'en être rapporteur, tout comme Monsieur le Professeur Denys Gamby. De même, je tiens à remercier Monsieur le Professeur Jacques Alain Petit et Monsieur le Professeur Jean Luc Lataillade d'avoir accepté de juger ce travail.

J'aimerais aussi remercier tous les membres du LRBB et plus particulièrement ceux qui ont contribué par leur aide ou leur appui au bon déroulement de cette thèse : je soulignerai ainsi l'aide technique apportée par Philippe Taris pour la réalisation de tous les montages expérimentaux (et il y en a eu !), la pugnacité de Bruno Lasserre face aux difficultés de la modélisation ainsi que les conseils éclairés de Philippe Bressolette (CUST / LERMES Clermont Ferrand). Enfin, mes plus sincères remerciements vont à Stéphane Morel pour le suivi de mon travail depuis maintenant presque cinq ans et enfin Philippe Ancelin pour sa disponibilité de tout jeune Docteur lors de la rédaction du mémoire et la préparation de l'exposé.

Mes plus sincères remerciements vont à toute ma famille au sens large du terme, parents, amis dont le soutien et les encouragements ont été permanents. Que ma mère, mes frères et ma belle famille trouvent dans ces quelques lignes l'expression de ma profonde reconnaissance.

Enfin, il m'est impossible de ne pas remercier « ma source d'équilibre », Catherine, mais aussi bien évidemment nos enfants Luca et Emilie pour tout le bonheur qu'ils m'apportent.

J'aimerais pour conclure dédier ce travail à mon père.

Les calculs numériques présentés dans cette étude ont été effectués sur le logiciel CASTEM 2000 mis à disposition par le Commissariat à l'Energie Atomique – CEA – DRN / DMT / SEMT

INTRODUCTION GENERALE

L'apparition et le développement des adhésifs structuraux permettent au collage, très ancienne technique d'assemblage, de trouver sa place dans les industries de pointe grâce aux efforts réalisés dans l'aéronautique. De nos jours, la technique d'assemblage par collage est encore appelée à un large développement dans de nombreux domaines de l'industrie (automobile, constructions navales, aéronautique, bâtiment...) vu les progrès constants réalisés en sciences des matériaux, en particulier dans l'industrie des matériaux composites. Grâce à de nombreux avantages, le collage remplace souvent les procédés traditionnels d'assemblages tels que le boulonnage, le rivetage, le vissage, l'agrafage ou bien même le soudage. Une brève énumération des avantages de l'assemblage par collage met en évidence une répartition plus régulière des contraintes, la possibilité d'assembler des matériaux de nature différente grâce aux progrès constants de l'industrie chimique, un amortissement des vibrations dans la structure grâce aux propriétés de l'adhésif, un allègement des structures, une amélioration de l'esthétique, un prix de revient souvent inférieur aux techniques d'assemblages classiques. Enfin, l'assemblage par collage est une opération facilement automatisable permettant de grandes cadences de production. Cependant, des inconvénients persistent dans l'utilisation de cette technique d'assemblage et peuvent s'avérer limitatifs à son développement. En effet, la résistance à la chaleur est souvent limitée, la durabilité en milieux sévères est parfois moyenne (5 à 20 ans), des traitements de surface avant collage sont souvent nécessaires. De même, un joint de colle possède une résistance au pelage souvent faible, le démontage d'une structure collée est difficile voire impossible et le temps de prise de la colle est parfois long. Tous ces paramètres doivent être pris en compte lors de la conception d'un assemblage par collage. Ainsi, on peut encore observer une certaine appréhension quant à la généralisation de cette technique d'assemblage à de nombreux domaines de l'industries. L'incapacité actuelle à adopter des critères de dimensionnement validés autres que les essais normalisés demeure préjudiciable. Des travaux de recherche sont encore nécessaires pour caractériser l'adhésif sous la forme d'un joint de colle et éclaircir les mécanismes de ruine des assemblages collés afin de déterminer des critères validés et destinés aux bureaux d'études puis de donner des règles pratiques pour la conception des joints collés. C'est dans ce contexte que se situent les travaux présentés dans ce mémoire.

Les joints collés jouent un rôle important dans la construction bois moderne. Dans le but d'ajouter de la valeur au ce matériau, de nombreux produits à base de bois (Engineered Wood based Products, EWP) ont été développés et font appel à la présence de joints de colle. Des exemples typiques de produits reconstitués à base de bois sont le bois lamellé collé (Glulam) et le LVL (Laminated Veneer Lumber). De même, une application importante du collage en construction bois fait appel aux goujons collés (glued rods) qui permettent souvent

de réaliser les connexions entre différents éléments de charpente ou entre éléments de charpente et fondations. Cependant, dans le but de comprendre et de modéliser le comportement réel d'éléments de structures bois tels que les poutres lamellées collées, par exemple, il est indispensable de connaître le comportement mécanique des joints de colle. Bien que le joint de colle représente une partie infime d'un composant de structure bois, son influence sur le comportement et la résistance de cette structure est prédominante. L'épaisseur typique d'un joint de colle en construction bois varie de 0.1 à 1 mm alors que la taille des éléments de structure varie quant à elle de 0.1 à 10 m, comme cela apparaît sur la figure suivante.

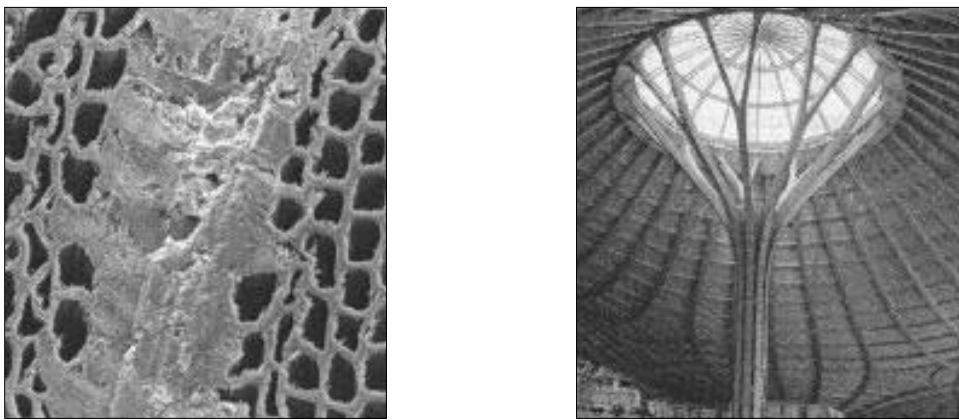


Fig.I.1 : Joint de colle résorcine phénol formol observé sur des structures bois lamellées collées [132].

La généralisation des produits à base de bois provient d'une volonté de valorisation du matériau bois en construction, dont les avantages peuvent être déclinés comme suit : l'aspect esthétique est indéniable, l'usinage et la transformation sont aisés, il garde ses propriétés de résistance suffisamment longtemps en cas d'exposition au feu, il constitue un matériau de construction toujours renouvelable et enfin, c'est un matériau de construction qui ne contribue pas à l'effet de serre. Cependant, il existe de désavantages bien connus à l'utilisation du bois dans la construction : comme tout matériau « vivant », ses propriétés varient dans des proportions assez importantes, c'est de plus un matériau fortement anisotrope avec une faible résistance dans la direction perpendiculaire au fil et bien connu pour sa très forte sensibilité à l'humidité. La grande variabilité du bois, dans sa résistance par exemple, provient simplement des variations existant entre les arbres telles que les nœuds, le bois de compression, les poches de résines, l'orientation du fil et les variations de densité. Des différences de climat pendant la vie de l'arbre, associées à d'autres facteurs externes tels que, par exemple, des variations de la qualité du sol peuvent engendrer une grande dispersion des propriétés mécaniques du bois. Le bois est considéré comme un matériau orthotrope présentant des rapports de modules d'Young et de limite en traction dans différentes directions de l'ordre de 1:50 à 1:30. La

résistance en tension et en compression sont différentes (dans toutes les directions) et les caractéristiques à la rupture varient d'une rupture fragile (traction parallèle au fil) à une rupture quasi fragile (traction perpendiculaire au fil) jusqu'à une rupture ductile (compression). C'est pour éviter ces nombreux désavantages du bois massif que les produits à base de bois ont été développés. De cette façon, on accroît leur homogénéité par rapport au bois, et on limite la variabilité de leurs propriétés mécaniques telles que la raideur et la résistance, par exemple. De ce fait, dans le cas où le matériau est transformé à l'échelle de la fibre ou de particules un peu plus importantes, qui sont ensuite orientées de façon aléatoire dans le produit fini, le résultat donne un matériau reconstitué dont les propriétés mécaniques laissent apparaître une anisotropie beaucoup moins importante.

La fabrication des EWP met en jeu une consommation importante de colle, surtout dans le cas de l'industrie des panneaux de fibres. Malgré tout, dans le domaine du bois lamellé collé, la quantité de colle utilisée en France en 1999, est loin d'être négligeable et peut être estimée à 2000 tonnes réparties comme suit :

- | | |
|----------------------------|--------------------------------|
| -Polyuréthane : 2% | -Urée Formol : 8% |
| -Mélamine Urée Formol : 5% | -Résorcine Phénol Formol : 85% |

Cette consommation nationale peut être comparée avec la consommation au niveau européen d'environ 12000 tonnes en moyenne sur les 5 dernières années mais dont la répartition diffère quelque peu, comme le montrent les données suivantes :

- | | |
|--------------------|--------------------------------|
| -Polyuréthane : 5% | -Mélamine Urée Formol : 55% |
| -Urée Formol : 5% | -Résorcine Phénol Formol : 35% |

Différentes applications structurales du collage du bois peuvent être observées sur la figure suivante (fig.I.2).



Fig.I.2 : Bois reconstitué collé couramment utilisé en construction bois : le LVL (Laminated Veneer Lumber), le Lamellé collé , poutre en I.

On peut ainsi constater que les lamellistes français utilisent principalement des colles résorcines, de couleur brune, et non des colles à base de mélamines, transparentes, dont l'utilisation s'est généralisée au niveau des pays européens et scandinaves. Les colles époxy, bien adaptées à des applications structurales en raison de leurs hautes performances mécaniques, sont peu utilisées dans la fabrication de poutres lamellées collées car souvent contestées pour leur résistance en service sous conditions environnementales variables.

Les avantages provenant de l'utilisation des EWP tels que le lamellé collé par rapport au bois massif peuvent être répertoriés comme suit :

- résistance et raideur accrues par rapport au bois massif parce que la variabilité de ces paramètres est moindre par rapport au bois massif.

- liberté dans le choix des sections, des longueurs et de la courbure des poutres.

- une plus grande précision des dimensions et de la stabilité de forme pendant l'exposition à des conditions environnementales variables.

L'assemblage par collage du matériau bois met en évidence de nombreux paramètres souvent néfastes à la résistance de l'assemblage collé (nœuds, fissures de séchage...). De plus, la nature complexe du bois comme substrat engendre des difficultés quant au dimensionnement du joint de colle. En effet, la porosité naturelle de ce matériau et sa composition favorisent la pénétration de l'adhésif dans le substrat et les liaisons chimiques entre polymères du substrat et de la colle. Ainsi, même s'il est maintenant relativement aisé de connaître les propriétés de l'adhésif massif, une difficulté persiste dans la connaissance de son comportement mécanique sous la forme d'un joint bois-colle.

Un état des connaissances sur le dimensionnement des assemblages collés et des phénomènes intervenant dans la qualité d'un assemblage, ouvert à tous les domaines d'application, est réalisé dans la première partie afin d'établir un bilan des techniques classiques de dimensionnement des assemblages collés.

A la vue des nombreux travaux réalisés sur les assemblages collés et compte tenu des spécificités du matériau bois, la Mécanique de la Rupture peut s'avérer être l'outil permettant un dimensionnement judicieux d'une part, mais aussi permettant surtout de prévenir les ruptures brutales d'une structure bois collée. En effet, l'un des inconvénients du collage est d'introduire lors de la conception de l'assemblage ou de la polymérisation de l'adhésif des défauts (porosité, présence de micro fissures) pouvant être néfastes à la bonne tenue de la structure à la sollicitation.

Ainsi, de nouvelles méthodes de dimensionnement des assemblages collés par la mécanique de la rupture peuvent être développées et proposer une alternative intéressante aux

méthodes classiques énoncées dans le premier chapitre. Cette approche fera l'objet du second chapitre.

L'application de la mécanique de la rupture à la fissuration cohésive du joint de colle permet d'établir des données expérimentales sur le comportement de l'adhésif en tenant compte des spécificités du substrat et de l'adhésif puis de la géométrie du joint (en particulier son épaisseur). Ainsi, la troisième partie de ce mémoire met en place une procédure expérimentale stricte favorisant la fissuration cohésive d'un assemblage collé pour des sollicitations d'ouverture (Mode I) ou de cisaillement (Mode II). Cette démarche d'étude constitue une première étape dans la compréhension du comportement des joints collés, qui, par leur géométrie particulière aux assemblages bois, sont sollicités en services par des chargements de mode mixte. On peut observer sur la figure suivante (fig.I.3) le type de joint abouté couramment utilisé dans le bois lamellé collé.

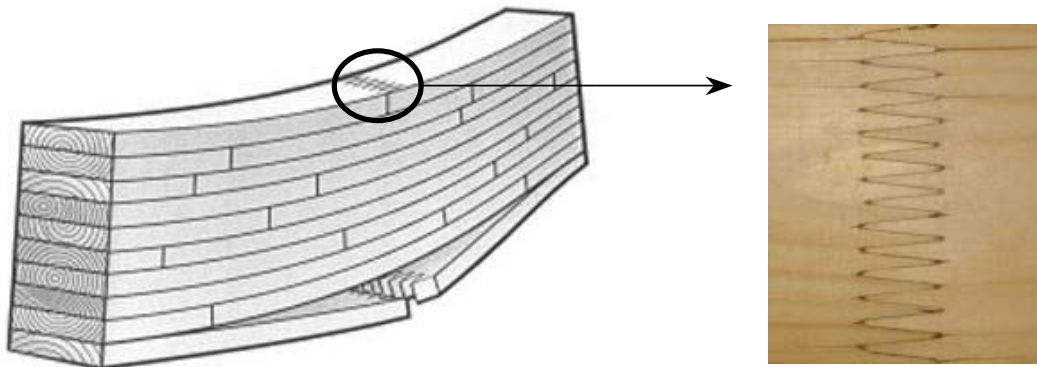


Fig. I.3 : Joint abouté à entures multiples d'une poutre lamellée collée [132].

Cependant, l'observation des phénomènes se produisant lors du chargement montre que l'utilisation de la Mécanique Linéaire de la Rupture ne peut prédire judicieusement le comportement de l'assemblage du fait des nombreux phénomènes d'endommagement se produisant avant la rupture. Par conséquent, ce chapitre traitera aussi de l'observation de tous ces phénomènes rendue possible par la mise au point d'un spécimen d'essai permettant une propagation stable et contrôlée de la fissure, et complétée par une analyse des surfaces fissurées après la rupture par Microscopie Electronique. Toutes ces données expérimentales démontrent la complexité des phénomènes se produisant dans la rupture du joint et justifient l'utilisation d'une approche par la Mécanique non linéaire de la rupture.

Vu la difficulté des essais à mettre en œuvre et surtout le nombre de paramètres pouvant influencer le résultat de ces essais, des simulations numériques sont nécessaires à l'établissement de critères de dimensionnement. C'est l'objet de la quatrième partie dont le but est d'accéder à une modélisation numérique satisfaisante du comportement de

l'assemblage et surtout à la prévision de l'évolution d'un défaut présent dans le joint de colle. A nouveau, une approche par la Mécanique linéaire de la rupture s'avère insuffisante bien que permettant de comprendre certains phénomènes. Une approche non linéaire tenant compte de certains paramètres d'endommagement observés sera alors réalisée afin de traduire au mieux les données expérimentales.

Chapitre 1

Approches classiques d'analyse des assemblages collés

La technique d'assemblage par collage joue actuellement un rôle prépondérant dans de nombreux domaines tels que l'industrie aéronautique, la construction automobile, la construction navale, la fabrication et l'élaboration de produits à base de matériaux composites et de polymères et enfin le Génie Civil. L'approche multi matériaux présentée dans ce chapitre a pour but de dresser un état des connaissances actuelles sur les procédés d'études et de dimensionnement des assemblages collés de toutes sortes mais aussi de souligner l'importance des différents paramètres intervenant dans la qualité d'un collage dès son élaboration jusqu'à son utilisation. Cependant, seule une approche mécanique du comportement des assemblages collés sera abordée ici, même si des notions de physico chimie des surfaces et des interfaces sont indispensables à la bonne compréhension des phénomènes d'adhésion. Les caractéristiques chimiques des polymères ne seront pas abordées dans ce travail ; seules seront concernées leurs caractéristiques mécaniques toutefois intimement liées à leur formulation chimique. Ainsi, ce chapitre s'articule autour des thèmes suivants :

La compréhension des phénomènes d'adhésion et leurs mécanismes élémentaires est de la plus grande importance car une adhésion optimale entre l'adhésif et son substrat est nécessaire à un bon collage. Il existe ainsi deux types d'approches permettant d'expliquer les phénomènes d'adhésion entre deux matériaux (approche physique et thermodynamique).

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 que d'un phénomène d'adhésion. L'adhérence peut être quantifiée à partir d'essais mécaniques par l'énergie de séparation de l'assemblage collé. Ainsi, pour optimiser l'adhérence entre matériaux, des traitements de surface et une caractérisation de cette surface avant et après traitement sont indispensables.

En favorisant l'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. Si l'on prend l'exemple des assemblages bois collés, les variations climatiques peuvent provoquer un vieillissement prématuré de l'assemblage, non pas à cause de l'adhésif dont le spectre d'utilisation en humidité et température permet de faire face aux sollicitations mais plutôt à cause des variations dimensionnelles du substrat bois provoquant des sollicitations constantes au niveau de l'interface dont il faut absolument tenir compte lors du dimensionnement de l'assemblage.

L'adhérence des assemblages collés est généralement mesurée à l'aide d'essais mécaniques de séparation de l'assemblage mais peut aussi être évaluée par des procédés de contrôle non destructifs de l'assemblage qui permettent d'identifier des défauts dans le joint de colle tels que de la porosité, un déficit de polymérisation, de la micro fissuration ou des décollements ponctuels. Les essais mis en œuvre permettent une étude de la répartition de l'état de contrainte en fonction des données géométriques de l'assemblage et de la loi de comportement de l'adhésif. Les deux configurations sur lesquels le plus grand nombre de travaux a été réalisé sont le joint à simple recouvrement et le joint abouté. Mais des problèmes subsistent quant aux conditions aux limites de tels systèmes dans des analyses par calcul numérique.

1. Les théories de l'adhésion :

Dans le domaine du collage, la compréhension des phénomènes d'adhésion et leurs mécanismes élémentaires est de la plus grande importance car une adhésion optimale entre adhésif et substrat est nécessaire à un bon collage. Les différentes théories proposées à l'heure actuelle résultent de l'étude de cas particuliers. Ainsi, il n'existe pas de modèle unique permettant d'expliquer les phénomènes d'adhésion entre deux matériaux mais plutôt deux types d'approches :

- approche physique.
- approche thermodynamique.

1.1. Approche physique de l'adhésion :

L'approche physique des phénomènes d'adhésion a pour but d'identifier et d'expliquer la nature des liaisons qui s'établissent entre deux surfaces de natures chimiques différentes. Pour ceci, plusieurs hypothèses ont été émises.

1.1.1. L'ancrage mécanique (Mac Bain 1926).

Ce modèle propose un ancrage mécanique de l'adhésif dans les anfractuosités du substrat. En effet, lorsqu'on dépose sur une surface rugueuse et possédant des microcavités un adhésif fluide, celui-ci pénètre dans les pores et les aspérités du substrat augmentant ainsi la surface réelle de collage et, après polymérisation, l'adhésif reste ancré dans les cavités (effet de clé mécanique). On explique ainsi l'effet bénéfique de la rugosité et donc l'intérêt des traitements de surface des substrats. Par sa nature, ce modèle s'applique plutôt aux matériaux présentant une rugosité micrométrique importante. Cette rugosité importante associée à une porosité de la surface du substrat favorise l'adhésion en raison de l'augmentation de l'aire de contact à

l'interface adhésif-substrat. Toutefois, une rugosité trop importante peut nuire à la qualité de l'adhésion à cause des concentrations de contraintes induites par les aspérités de faible rayon de courbure. De plus, si le mouillage entre adhésif et substrat n'est pas optimal, l'ancrage est de mauvaise qualité et des cavités peuvent naître dans les pores vides d'adhésif; ces zones non mouillées peuvent alors être des zones d'amorce de fissuration donc de rupture [1].

Ce modèle de l'ancrage mécanique peut expliquer certains phénomènes d'adhésion mais doit être considéré comme étant complémentaire de l'adhésion dite "spécifique" où la nature des interactions (électriques, physiques ou chimiques) est prise en compte.

1.1.2. L'adhésion électrique ou électrostatique (Deryagin, Skinner 1948).

En 1948, Deryagin et Krotova [2] ont proposé une théorie fondée sur des effets électriques observés lors d'un essai de pelage. Ces auteurs ont constaté lors de ce test la présence de décharges électriques et ont donc postulé l'existence d'une double couche électrique de signes opposés, assimilant le joint à un condensateur plan. L'adhésion résulterait donc de forces d'attraction électrostatiques développées entre l'adhésif et le substrat. Bien que ce modèle ait été validé par le test de pelage sur les assemblages verre-polychlorure de vinyle, plusieurs auteurs s'accordent à penser que les décharges électriques seraient une conséquence plutôt que la cause de l'adhésion.

PRINCIPAUX MATÉRIAUX POLAIRES ET NON POLAIRES

Matériaux polaires	Matériaux non polaires
<ul style="list-style-type: none"> ● Cellulose (bois, coton, papier) ● Résines aminoplastes ● Matériaux avec groupe hydroxyle (phénolique, résorcine) ● Isocyanate, époxyde... ● Eau ● Oxyde de métaux 	<ul style="list-style-type: none"> ● Caoutchouc ● Polystyrène ● Polyéthylène ● Téflon ● Huiles minérales ● Métaux non oxydés

Tableau 1.1 : Polarité naturelle de différents matériaux pouvant être assemblés [3].

1.1.3. L'adhésion par interdiffusion (Voyustkii 1949).

Cette théorie [4] est utilisée pour expliquer l'adhésion entre deux matériaux macromoléculaires. L'adhésion est ainsi expliquée comme un enchevêtrement de macromolécules de deux matériaux résultant de l'interdiffusion des molécules des plans

superficiels du liant et du substrat. Cette interdiffusion se traduit par la création d'une zone de transition, appelée interphase ou interface épaisse. Cette théorie s'appuie sur deux critères:

- critère cinétique
- critère thermodynamique

De Gennes [5] s'est basé sur le concept de reptation pour expliquer le phénomène d'interdiffusion. Selon lui, la diffusion se fait essentiellement par les extrémités des chaînes macromoléculaires. Ce modèle ne peut être appliqué qu'aux matériaux compatibles thermodynamiquement et exige que les macromolécules du substrat et de l'adhésif soient suffisamment mobiles et mutuellement solubles.

1.1.4. La théorie des couches interfaciales de faible cohésion (Bikerman 1968).

Dans cette théorie [6], on considère que, lors de la séparation de deux surfaces collées, la rupture ne se produit pas strictement à l'interface adhésif substrat mais plutôt dans une couche interfaciale de faible cohésion. Ce concept de couche interfaciale de faible cohésion, qui conduit à la notion d'interphase entre les deux matériaux, est particulièrement important puisque la résistance à la rupture du système dépend de ses propriétés mécaniques. En effet, étant donné que le collage est souvent réalisé en atmosphère non stérile, les surfaces des substrats se contaminent chimiquement et une couche de faible cohésion se forme entre adhésif et substrat.

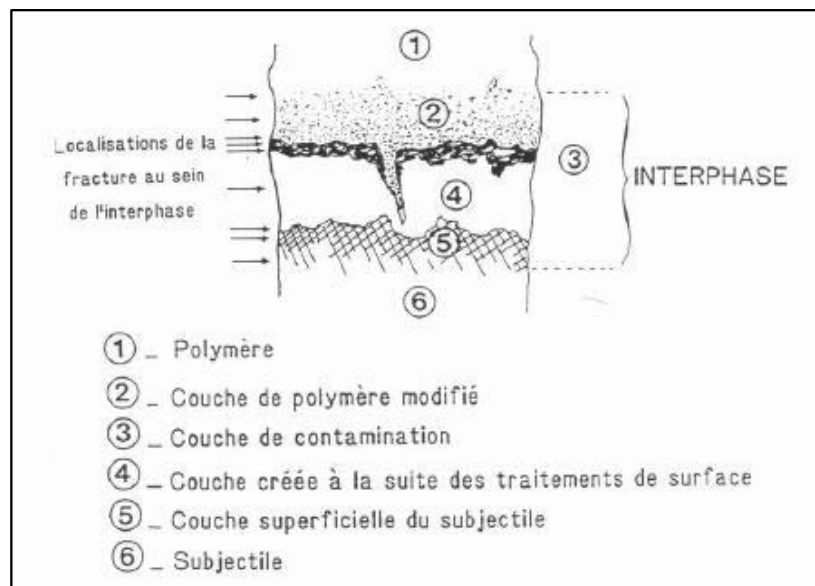


Fig. 1.1 : Représentation de l'interphase adhésif/substrat. [22]

Cette couche est généralement constituée de poches d'air piégées lors d'un mauvais mouillage, d'impuretés présentes à la surface du substrat, ou formée par la migration dans la zone

interfaciale de constituants de faible poids moléculaire. La ségrégation d'additifs du polymère ou la formation de produits de réaction à l'interface, ou bien même l'influence d'un substrat métallique sur la réticulation du polymère peuvent aussi contribuer à la formation de cette couche de faible cohésion.

1.1.5. Les liaisons moléculaires.

Cette théorie met en évidence deux types de liaisons chimiques : l'une faible (liaisons de Van Der Waals et liaisons hydrogènes) et l'autre forte (liaisons covalentes, ioniques, métalliques).

1.1.5.1. Liaisons faibles:

Ces liaisons sont de natures différentes et contribuent à des degrés divers au phénomène d'adhésion. Parmi ces liaisons, les plus courantes sont les liaisons de Van Der Waals qui représentent 70 à 90% des forces d'adhésion entre un corps polaire et un substrat quelconque. Suivant le degré de polarité des éléments mis en contact, plusieurs cas sont observés:

- forces de LONDON [7], découvertes en 1930 et toujours présentes dans les phénomènes d'adhésion. Leur énergie de liaison est inférieure à 10 kcal/mol et la distance à laquelle a lieu l'équilibre est de l'ordre de 10 Å.

- forces d'induction de DEBYE [8] s'exerçant entre une substance polaire et une autre non polaire (dipôle permanent - dipôle induit). Ces forces sont non dispersives et leur énergie de liaison est de l'ordre de 0,5 kcal/mol. Elles se rencontrent à la surface des métaux [10].

- forces de KEESOM [9] dans le cas de substances polaires (dipôle permanent - dipôle permanent) créant des liaisons non dispersives dont l'énergie est inférieure à 5 kcal/mol. Ces forces se rencontrent à la surface des céramiques [10].

L'énergie de ces trois interactions de Van Der Waals décroît rapidement avec la distance d'interaction d (selon une loi en d^{-6}) où les interactions de London apparaissent prépondérantes [11]. Leur distance d'équilibre est de l'ordre de 0,5 nm mais il a été démontré que les effets des trois types de liaisons sont additifs et que leur distance d'influence peut atteindre 10 nm [11].

D'autres liaisons, plus faibles, interviennent dans le phénomène d'adhésion : ce sont les liaisons hydrogène. Ces liaisons s'établissent entre un atome d'hydrogène (site acide) et un atome électro-négatif. Ces liaisons peuvent par conséquent être assimilées à des liaisons de type acide - base ou accepteur - donneur d'électrons au sens de LEWIS [12]. L'énergie de ces liaisons peut atteindre 12 kcal/mol et leur distance d'équilibre est de l'ordre de 0,2 à 0,5 nm [13]. Ces liaisons atteignent donc des valeurs plus fortes que celles des interactions de Van Der Waals

et peuvent jouer un rôle dans la cohésion des matériaux polymères mais aussi dans l'adhésion sur les verres ou les métaux.

1.1.5.2. *Liaisons fortes:*

Dans ce cas, le phénomène d'adhésion est attribué à la formation de forces chimiques primaires (covalentes, ioniques, métalliques) à l'interface mettant en jeu des énergies 10 à 100 fois supérieures à celles de liaisons de Van Der Waals et ayant une distance d'interaction de l'ordre de 0.07 à 0.3 nm. La présence de telles liaisons dans des assemblages collés est très intéressante car permet d'atteindre une énergie de séparation très élevée. Ainsi, l'adhésion polymère – métal est obtenue avec de meilleurs résultats pour les métaux les plus réactifs (Ti, Fe...). La liaison chimique est également invoquée dans le mécanisme de pontage par des agents de couplage tels que les silanes utilisés, par exemple, dans le collage du verre. Enfin, l'adhésion du caoutchouc sur le laiton par l'intermédiaire du soufre est un exemple souvent cité en bibliographie. L'adhésion est alors due, dans ce cas, à la formation de liaisons polysulfures entre le cuivre du laiton et l'élastomère réticulé du soufre. L'efficacité d'un couplage chimique varie étroitement avec deux paramètres : le nombre de liaisons interfaciales et la longueur des chaînons assurant le couplage.

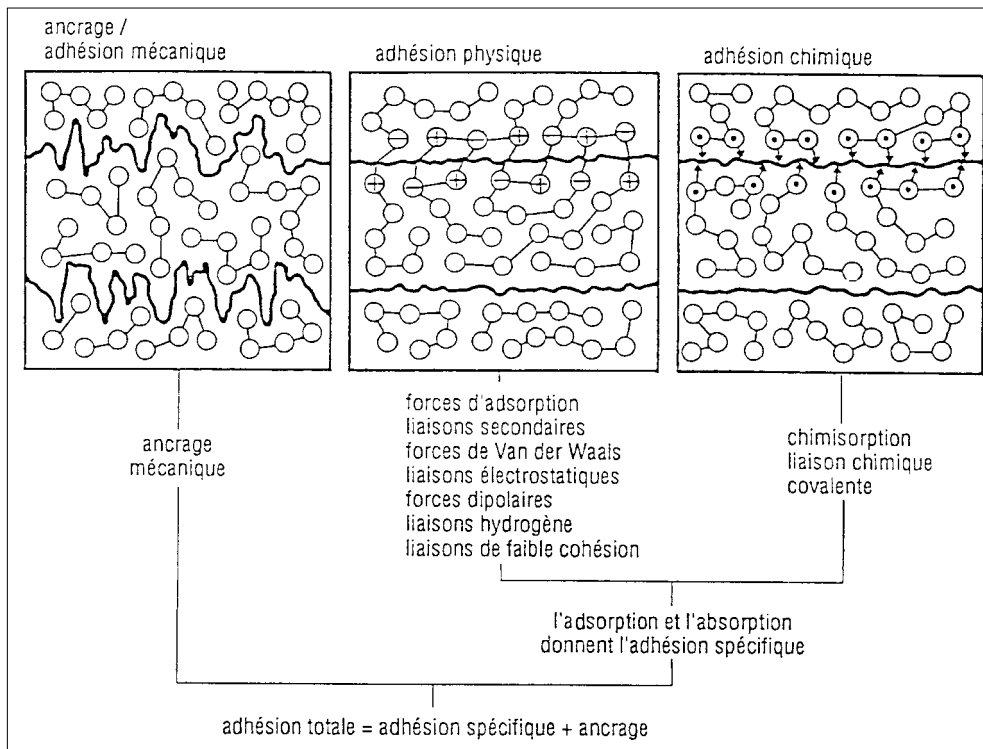


Fig. 1.2 : Contribution de tous les phénomènes d'adhésion à l'adhérence finale. [39]

1.2. Approche thermodynamique et mouillabilité.

1.2.1. Adsorption – mouillabilité.

Les liaisons intermoléculaires ayant un champ d'action du même ordre de grandeur que les distances moléculaires (quelques Angström) [13], une bonne adhésion serait donc conditionnée par un contact intime entre adhésif et substrat. Lorsque un solide et un liquide sont mis en contact, il se crée des interactions de type Lifshitz – Van Der Waals [14] (aussi appelées interactions secondaires) et/ou des interactions plus fortes de type acide – base au sens de Lewis.

Dans le cas où seul le premier type d'interactions intervient, le travail d'adhésion W_a^{LW} est défini comme suit [15] :

$$W_a^{LW} = F_{LV} + F_{SV} - F_{SL} \quad (1.1).$$

F_{LV} , F_{SV} , F_{SL} sont respectivement les énergies libres de surface du liquide, du solide et interfaciale solide – liquide.

Dans le cas où le second type d'interaction intervient, un complexe acide – base est créé par réaction entre les deux matériaux mis en présence :



Ce complexe acide – base joue un très grand rôle dans le mécanisme d'adhésion [12]. Le travail d'adhésion apparaît donc comme étant :

$$W_a^{A:B} = -f \cdot n^{A:B} \cdot \Delta H^{A:B} \quad (1.3).$$

où f est un facteur de conversion permettant le passage de l'enthalpie à l'énergie libre, $n^{A:B}$ est le nombre de sites propices à la création du complexe A:B par unité de surface, et $\Delta H^{A:B}$ est l'enthalpie molaire de formation du complexe A:B.

Le travail total d'adhésion prenant en compte ces deux types d'interactions est donc :

$$W_a = W_a^{LW} + W_a^{A:B} \quad (1.4).$$

Dans le cas où d'autres interactions interviennent dans le processus d'adhésion, le travail total d'adhésion est donc accru par la participation de chaque nouvelle interaction.

$$W_a = W_a^{LW} + W_a^{A:B} + W_a^{Cov} + W_a^{Ion} + \dots \quad (1.5).$$

Par souci de simplification, Fowkes [12] assimile les interactions de type Lifshitz – Van Der Waals à l'ensemble des interactions de type dispersif et regroupe le reste dans un terme d'interactions non dispersives. Le travail total d'adhésion devient alors dans le cas d'un contact intime entre l'adhésif et le substrat (bonnes conditions de mouillabilité) :

$$W_a = W_a^D + W_a^{ND} \quad (1.6).$$

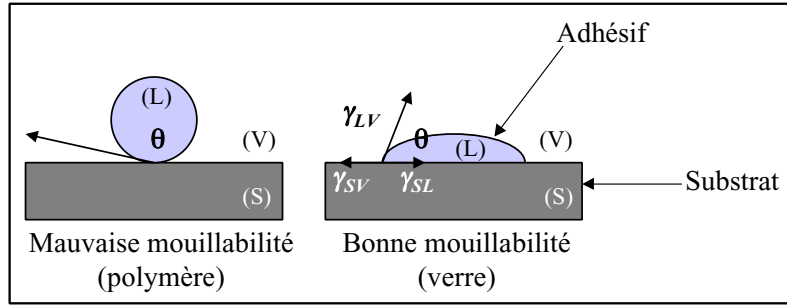


Fig. 1.3 : Modèle d'Young de l'interface solide - liquide [15]

La mouillabilité est la capacité à s'étaler d'une goutte de liquide déposée sur un solide. La forme de la goutte correspond à l'énergie libre minimale du système et les conditions d'équilibre sont données par l'équation d'Young [16] qui permet de relier la tension superficielle du liquide γ_{LV} et du solide γ_{SV} en présence de la vapeur du liquide, de l'énergie d'interaction solide – liquide γ_{SL} et de l'angle de contact θ_e :

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta_e \quad (1.7).$$

Dans le cas où toutes les interactions sont présentes, le travail d'adhésion est alors donné par la relation suivante :

$$W_a = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (1.8).$$

Les équations (1.7) et (1.8) permettent d'obtenir l'expression du travail d'adhésion en fonction de l'angle de contact (relation de Young – Dupré) [16] :

$$W_a = \gamma_{LV} (1 + \cos \theta_e) \quad (1.9).$$

qui devient, lorsque l'on prend en compte la pression d'étalement du liquide π_e :

$$W_a = \gamma_{LV} (1 + \cos \theta_e) + \pi_e \text{ avec } \gamma_S = \gamma_{SV} - \pi_e \quad (1.10).$$

1.2.2. Aspect rhéologique de l'adhésion.

La théorie développée précédemment permet de déterminer le travail total d'adhésion. Cependant, les essais mécaniques effectués sur les assemblages collés permettent d'accéder à l'énergie de séparation de l'assemblage dont la valeur est supérieure au travail total d'adhésion. Cette différence entre l'énergie de rupture et l'énergie réversible d'adhésion s'explique par le fait que lors des essais mécaniques, l'énergie de déformation de l'assemblage est prise en compte et prend une large part dans l'énergie de rupture. Cette énergie, initialement formulée par Schultz et Gent [17], a été réétudiée par Andrew et Kinloch [18] puis Maugis et Barquins [19].

Ainsi, pour un matériau homogène dans lequel se propage une fissure, l'énergie de séparation s'exprime de la façon suivante :

$$G = G_0 (1 + \Phi(T, V)) \quad (1.11).$$

où G_0 représente l'énergie réversible d'adhésion liée aux propriétés superficielles du substrat et de l'adhésif, et $\Phi(T, V)$ un facteur mécanique décrivant la dissipation d'énergie au cours de

la déformation irréversible de l'adhésif. Ce facteur, qui ne dépend que des propriétés massiques de l'adhésif, varie avec la vitesse de séparation V , la température T et la géométrie de l'essai utilisé.

Quand la rupture de l'assemblage est réalisée dans des conditions proches de l'équilibre thermodynamique (faible vitesse de séparation ou température élevée), l'énergie de séparation mesurée demeure supérieure à l'énergie réversible d'adhésion. Par conséquent, l'énergie limite de séparation en l'absence de phénomènes dissipatifs est différente de l'énergie d'adhésion.

Ainsi, à partir des travaux de Lake et Thomas [20], une nouvelle théorie des phénomènes de rupture, plus générale, a été proposée [21]. Cette théorie propose d'exprimer l'énergie de rupture cohésive ou adhésive d'un assemblage collé par la relation suivante :

$$G = W_a \cdot g(M_c)(1 + \Phi(T, V)) \quad (1.12_1).$$

$$W_a \cdot g(M_c) = G_0 \quad (1.12_2).$$

où $g(M_c)$ correspond à un facteur de dissipation moléculaire dépendant de la longueur des chaînes macromoléculaires, donc de la masse M_c .

Une telle formulation permet de relier quantitativement l'énergie de rupture et l'énergie réversible d'adhésion en tenant compte à la fois des caractéristiques superficielles des substrats et des propriétés massiques de l'adhésif.

2. 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 et 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 [22]. 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. Bien évidemment, le cadre de notre étude nous pousse plutôt à étudier les traitements de surface nécessaires au substrat bois. Cependant, une connaissance des traitements couramment utilisés pour les autres matériaux est nécessaire. Il existe ainsi des traitements spécifiques aux métaux [23], aux polymères [24, 25] et aux matériaux composites [26], différents de par la nature et la réactivité des matériaux à assembler.

2.1. Traitements de surface du matériau bois [27, 28, 29].

Les traitements de surface applicables au bois ne font pas appels aux méthodes lourdes couramment utilisées pour les métaux et les polymères. On considère généralement qu'un bon état de surface d'un substrat bois est obtenu sur un bois fraîchement raboté (obtention d'une surface la plus plane possible), dégraissé, dérésiné et dépoussiéré. On peut noter qu'une surface fraîchement rabotée accroît la mouillabilité de l'adhésif et favorise la mise en place de liaisons fortes entre les polymères composant le bois et l'adhésif. Cependant, un adhésif de trop forte mouillabilité ne doit pas être utilisé dans le cas du bois à cause de sa structure cellulaire qui favorise la diffusion de l'adhésif dans le substrat. Cette observation montre la forte influence de la structure du matériau bois sur les caractéristiques de l'état de surface obtenu.

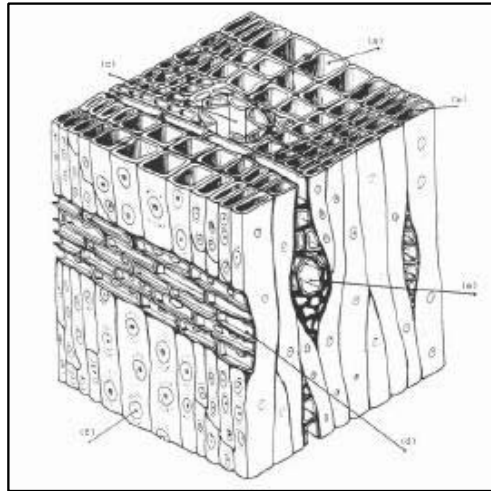


Fig. 1.4 : Orientation cellulaire d'un bois résineux.

Les différentes zones repérées sur la figure précédente correspondent à :

- | | |
|--|---|
| a) Trachéide dans le bois de printemps | e) Rayon ligneux avec canal résinifère |
| b) Trachéide dans le bois d'été | f) Ponctuation assurant des passages intercellulaires |
| c) Canal résinifère | |
| d) Rayon ligneux | |

De par sa forte anisotropie naturelle matérialisée par une croissance radiale de l'arbre selon deux cycles distincts (bois d'été et de printemps) et sa structure cellulaire, il existe une forte variabilité des propriétés physiques à la surface d'un substrat bois qui peut altérer le mouillage et les conditions d'adhésion.

- La **densité** doit être considérée comme un facteur clé contrôlant tous les aspects du mouillage (adhésion, écoulement, pénétration) [30]. Il existe évidemment de fortes variations de densité entre différentes essences de bois mais aussi au sein d'une même essence au niveau des cernes de croissance.

- L'**espèce** de bois considérée joue un rôle important sur la mouillabilité [31] par sa composition chimique. Celle-ci dépend directement du nombre de groupements hydroxyyles présents à la surface qui varie fortement entre les essences exotiques ou européennes par exemple.

- Le **vieillissement**. Des variations chimiques et physiques se produisent à la surface du bois immédiatement après le rabotage. Des contaminants peuvent aussi se déposer sur la surface rabotée ou bien être absorbés à partir de l'air ambiant. Quelle que soit l'essence étudiée, on peut observer une baisse de la mouillabilité pouvant aller jusqu'à 50% avec le vieillissement de la surface [32, 33, 34].

- L'**humidité** du bois joue un rôle important sur la mouillabilité par action directe sur la valeur de la tension superficielle du bois. L'énergie de surface de bois humide est

généralement supérieure à celle d'un bois sec [35]. Lorsque le bois absorbe de l'humidité, des sites supplémentaires d'adsorption apparaissent ce qui accroît l'énergie de surface du bois donc la mouillabilité. Mais une humidité relative du bois trop importante peut avoir un effet néfaste sur la résistance du joint collé car elle peut entraîner une mouillabilité trop forte de l'adhésif conduisant à une diffusion importante dans le bois [36].

- La **rugosité**. Koutsky [37] a établi une relation entre la ténacité d'un assemblage collé et la rugosité des surfaces du substrat bois. Les surfaces réalisées à la machine (ponceuse) conduisent à des ténacités plus faibles que celles obtenues par un ponçage manuel. Ceci provient sans doute de l'écrasement de la structure cellulaire du bois lors de l'usage de la machine. On observe la même tendance dans le cas d'un rabotage avec des lames usées où l'écrasement de la structure cellulaire diminue l'adhérence de l'assemblage [37]. Enfin, Elbez [38] a montré l'importance de la texture locale du support sur les angles de mouillage et la porosité superficielle. Le type d'usinage de surface adopté (le rabotage qui coupe les fibres ou le ponçage qui les arrache) ainsi que la coupe du bois (en fonction de l'angle du fil et de l'orientation des cernes) influent sur la porosité des substrats. Il est donc nécessaire d'accorder une grande importance au choix des bois en fonction de leurs particularités physiologiques (duramen, aubier, bois de printemps ou d'été).

Des traitements chimiques peuvent aussi être envisagés mais leur action s'avère souvent néfaste à la bonne tenue des assemblages collés. Ainsi, les produits de préservation du bois peuvent s'avérer bénéfiques ou néfastes ; tout dépend de leur action et de leur compatibilité avec l'adhésif et le substrat mis en jeu [39]. De même, l'inactivation chimique du bois par carbonisation de la surface (four à 250°C) entraîne une diminution sensible de la ténacité d'un assemblage [36]. Enfin, des traitements plasma du bois avant collage sont actuellement à l'étude.

On a pu voir précédemment l'importance de la préparation de surface dans la bonne tenue des assemblages collés. Cependant, il faut souligner que le mode de préparation doit être particulièrement adapté à la nature du substrat mais aussi de l'adhésif utilisé sous peine d'obtenir l'effet inverse à celui escompté. Ainsi, il est nécessaire de bien connaître le substrat et son état de surface avant et après le traitement appliqué afin de contrôler si le traitement de surface effectué a été bénéfique.

2.2. Méthodes de caractérisation physico-chimique des surfaces et des interfaces.

Le but de toutes les techniques de caractérisation des surfaces mises en œuvre dans les phénomènes d'adhésion est d'obtenir des informations aussi complètes que possibles sur l'assemblage [40] :

- avant sa formation : propreté des surfaces de départ, rôle des traitements de surface...
- pendant sa formation : liaisons chimiques créées à l'interface, formation d'une interphase...
- en service ou après sa rupture : tenue en environnement agressif (corrosion...), localisation de la rupture...

Il est possible de classer les différentes techniques en fonction de leurs caractéristiques : type d'information, éléments détectés, profondeur d'analyse, diamètre moyen de la zone analysée, sensibilité...

Il n'est pas question ici de détailler toutes ces techniques mais simplement d'en énoncer rapidement le champ d'action et quelques particularités dans le tableau 1.2 :

Technique	Information	Profondeur Analysée	Zone analysée (diamètre moyen)	Limite de Sensibilité	Eléments détectés
Spectroscopie de Photoélectrons (ESCA)	Analyse élémentaire et chimique Profilométrie	1-5 nm	qques μm à qques mm	<1%	Z>2
Spectroscopie Auger (AES)	Analyse élémentaire Profilométrie	0,5-5 nm	qques nm à qques μm	<1%	Z>3
Spectrométrie de masse d'ions secondaires (SIMS)	Analyse élémentaire Profilométrie	<1 nm	10^{-2} à qques μm	10^{-4} à 0.1%	Tous
Spectroscopie d'ions rétrodiffusés (ISS)	Analyse élémentaire Profilométrie	<0.5 nm	Environ 100 μm	<1%	Z>3
Spectroscopie Infrarouge (IRAS)	Molécules adsorbées sur une surface		qques mm à qques cm	qques %	Dipôles ayant composantes perpendiculaire à la surface
Spectroscopie RAMAN (SERS)	Molécules adsorbées sur une surface	Interface	qques mm à qques cm	qques %	Règles de sélection
Spectroscopie de pertes électroniques (HREELS)	Molécules ou atomes adsorbés sur une surface	qques A à qques diz.d'A	qques mm	qques %	Dépend du mécanisme de diffusion
Microscopie électronique à balayage (SEM)	Morphologie Analyse élémentaire	μm	μm	100 ppm	Z>5
Microscopie électronique à transmission (TEM)	Morphologie Analyse élémentaire Analyse chimique	Epaisseur échantillon <100 nm	50 nm	0.1-1 ppm	Z>5
Microscopie à force atomique (AFM)	Morphologie	0.1 nm	Résolution atomique		Champ de force

Tableau 1.2 : Méthodes de caractérisation et d'analyse des surfaces. [40]

Les phénomènes d'adhérence jouent donc un rôle important dans le comportement mécanique des assemblages collés. Cependant, l'une des inconnues est l'évolution de l'adhérence au cours du temps, et plus particulièrement son évolution face à des facteurs externes tels que l'histoire de chargement mécanique, les variations climatiques, les rayonnements et tous les autres paramètres pouvant entraîner un vieillissement et une altération de la liaison adhésif - substrat.

3. 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 [41].

3.1. Hygro thermo mécanique de l'adhésif.

Lors de la conception de l'assemblage, le comportement hygro thermo 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 thermiques entre substrat et adhésif sont aussi un facteur de micro fissuration 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 sources elles aussi d'endommagement. La présence d'eau peut, elle aussi, jouer un rôle. Généralement, les adhésifs peuvent absorber et adsorber des molécules d'eau à tous les stades de l'élaboration des joints. Les molécules d'eau introduites dans l'adhésif à l'élaboration sont difficilement désorbées et des phénomènes irréversibles d'homopolymérisation et d'hydrolyse peuvent avoir lieu dans le cas des résines époxy et se traduisent par une diminution de groupes actifs et des propriétés mécaniques (module d'Young, transition vitreuse).

3.2. Révélateurs d'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 car dans des conditions normales d'utilisation des assemblages structuraux, les substrats métalliques et céramiques ne fluent pas. Dans le cas où les substrats fluent, le comportement au fluage de tout le système adhésif doit être étudié. Ce domaine d'étude comporte encore énormément d'inconnues et est surtout étudié dans l'industrie aérospatiale. Des contraintes cycliques (fatigue) peuvent aussi intervenir. Elles sont surtout étudiées dans les industries aérospatiales et automobiles et apparaissent plus néfastes aux assemblages que les contraintes statiques. Enfin, l'importance grandissante des assemblages collés dans l'industrie automobile nécessite 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 [42]. De même, une élévation de température active la diffusion d'eau et favorise le vieillissement humide et la dégradation interfaciale. Si les mouvements d'eau demeurent dans la masse de l'adhésif, la diffusion est réversible et une élévation de la température peut s'avérer favorable (séchage).

- l'humidité a fait l'objet de nombreux travaux et modèles de diffusion et constitue un des principaux facteurs d'endommagement du joint [43]. Ainsi, la durabilité d'assemblages collés en milieu humide dépend de la nature du substrat (et plus particulièrement de son état de surface) et de son comportement vis à vis de l'eau (bois, par exemple), des propriétés intrinsèques de l'adhésif (diffusion de l'eau), de la nature des liaisons à l'interface adhésif/substrat, et enfin de la géométrie de l'assemblage offrant le moins de prise à l'accès de l'humidité. On s'accorde à dire qu'une perte d'adhérence survient

pour un taux d'humidité relative de 70% au delà duquel l'eau se condense à l'interface. Dans le cas des assemblages bois collés, une étude a été menée par Birginie et al [44] sur les effets de retrait et de gonflement des substrats dans des poutres lamellées collées. Il a ainsi été montré que l'agencement des lamelles de bois jouait un rôle important dans la sensibilité aux variations d'humidité et donc dans les phénomènes de micro fissuration se produisant aux interfaces. De même, des travaux récents de Lasserre [45] montrent l'importance de l'orientation des lamelles de bois dans une poutre de lamellé collé face aux phénomènes de diffusion et la dangerosité de certaines configurations d'assemblages.

- d'autres facteurs peuvent modifier la durabilité des joints collés tels que les rayonnements UV [46], les passages en atmosphères particulières (salines, par exemple), les agressions chimiques [47] ou électrochimiques [48] et ne font que s'ajouter aux facteurs précédemment énoncés.

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.

De même, la détermination de la résistance d'assemblages collés passe le plus généralement par l'adaptation d'un test destructif qui fournira la valeur de la force nécessaire à obtenir la séparation des matériaux en contact. Encore faut-il que le résultat de ce test soit significatif. Le choix de l'essai et, par la suite, de la géométrie et de la nature des contraintes appliquées, doit se faire en ayant à l'esprit les trois questions suivantes :

- Quel est le test qui permet d'évaluer au mieux la résistance de l'interface étudiée compte tenu des propriétés des matériaux de l'assemblage ?
- Comment se comparent les résultats obtenus pour le test choisi avec ceux obtenus dans d'autres conditions expérimentales ?
- Le comportement du joint étudié est-il représentatif du comportement de la structure réelle ?

En fait, deux questions fondamentales se posent dans l'étude du comportement mécanique des joints collés :

- Quelle est la relation qui lie la valeur expérimentale de la résistance interfaciale G et la résistance intrinsèque de l'interface G_0 ? En fait, G dépend des forces interatomiques ou intermoléculaires qui se sont établies durant la phase d'assemblage mais aussi des propriétés mécaniques de l'adhésif et des substrats ainsi que de la géométrie spécifique du joint et des conditions de sollicitation [49]. Ceci signifie qu'il faut avoir au préalable une bonne connaissance des matériaux entrant dans l'assemblage et de la distribution des contraintes dans la géométrie du test mis en œuvre.
- Quelle est la localisation de la rupture? S'est-elle propagée dans la masse de l'un des matériaux, à l'interface entre les deux matériaux assemblés ou dans une zone proche de l'interface dont les propriétés sont différentes de celles de la masse? Comment cette localisation est-elle influencée par les conditions de sollicitation? Dans tous les cas, il est indispensable d'associer la valeur de l'énergie de séparation à une localisation de la rupture.

Avant d'aborder les différentes configurations d'essai existantes, il est utile de rappeler les configurations de joints couramment utilisées en structure [50].

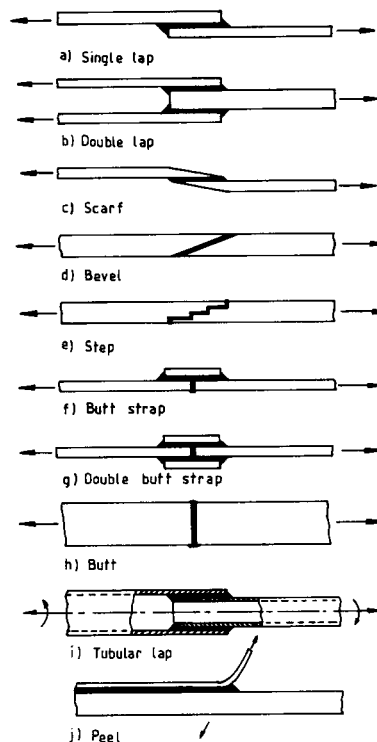


Fig. 1.5 : Configurations de joints couramment utilisées en assemblage structural. [50]

4. Mesure de l'adhérence des assemblages collés :

Mesurer l'adhérence d'un assemblage collé revient en général à mettre en œuvre un test de séparation des deux substrats de l'assemblage. Des techniques de contrôle non destructif des assemblages collés existent et continuent à se développer sous l'impulsion des industriels.

4.1. Procédés non destructifs de contrôle des assemblages collés [50] :

L'objectif de tels procédés de mesure est de déterminer une corrélation directe entre la résistance mécanique du joint et des grandeurs mécaniques, physiques ou chimiques du joint sans toutefois l'endommager ou le détruire comme précédemment. De telles méthodes sont aussi capables de localiser ou d'identifier des défauts qui peuvent diminuer les performances ou la durée de vie de l'assemblage. Il existe deux zones bien distinctes d'examen des propriétés de l'adhésif : la partie cohésive de l'assemblage qui permet d'évaluer les propriétés intrinsèques du joint et la zone interfaciale qui permet d'identifier la résistance du joint entre l'adhésif et le substrat. De plus, les cavités, les décollements localisés et la porosité créent une classe de défauts supplémentaire qui doit être inspectée. Avant d'étudier les méthodes d'identification non destructives des défauts pouvant entamer la résistance du joint, il est nécessaire d'identifier la nature de ces défauts.

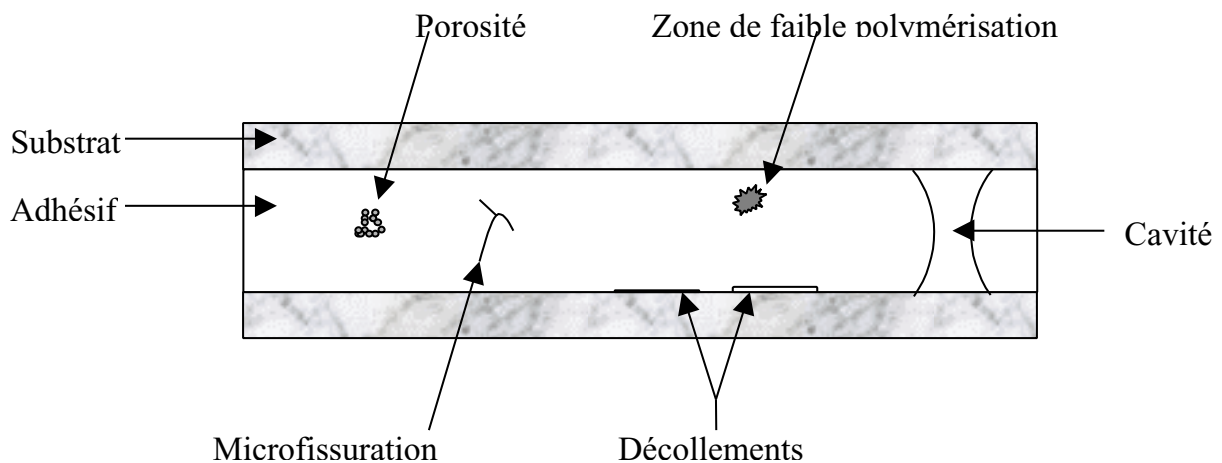


Fig. 1.6 : Défauts typiques présents dans un joint de colle.

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.

Ainsi, pour déterminer la qualité d'un collage, divers contrôles sont nécessaires avant sa mise en service.

- **Analyse ultrasonore.** Un cristal piézoélectrique subit une impulsion répétitive, entraînant l'émission d'ondes à hautes fréquences (1-20 MHz, 1000 fois par seconde). Le faisceau d'ondes traverse le joint de colle et est capté par un récepteur. Ainsi, l'analyse des changements de caractéristiques du faisceau d'ondes permet de déterminer les caractéristiques de la structure traversée. Dans le cas de défauts présents dans un joint de colle, les symptômes permettant d'identifier la nature du défaut peuvent être les suivants : la porosité d'un joint de colle peut être identifiée par un amortissement du faisceau d'ondes, une cavité peut entraîner une réflexion partielle ou totale du faisceau. Des analyses ultrasonores différentes permettent d'obtenir un spectre de fréquences en temps réel de la réponse de la structure sollicitée par une impulsion courte (0,5 – 15 MHz). Il est alors possible d'observer les différences entre les bonnes et les mauvaises structures. Cette impulsion peut être appliquée par l'intermédiaire d'un marteau ou d'un coin équipés d'un transducteur.
- **Emission acoustique.** L'application d'une contrainte à une structure peut conduire à des ruptures microscopiques. Ce phénomène est généralement associé à une dissipation locale d'énergie qui se propage sous la forme d'une onde qui peut être détectée par un micro haute fréquence ou un capteur piézoélectrique. Malheureusement, il est nécessaire de solliciter la structure jusqu'à une charge importante pour obtenir un spectre d'émission généré suffisant.
- **Radiographie.** Les rayons X sont souvent utilisés pour l'identification de défauts dans les structures métalliques collées.
- **Interférométrie optique.** Par cette technique, il est possible de mesurer des déplacements de surface de l'ordre de 0,5 μm . La charge est appliquée à la structure par des vibrations, une pression, du vide ou de la chaleur. Les défauts présents dans la

structure provoquent une perturbation dans l'interférogramme. Cette technique est appliquée pour les matériaux sandwichs mais pas encore pour les joints collés [51].

• **Inspection visuelle.** Hart-Smith [52] conseille une inspection visuelle du bourrelet d'adhésif et suggère qu'elle est la plus efficace des techniques pour les joints collés. L'état du bourrelet d'adhésif est un bon indicateur de l'état du joint à son extrémité. Un bourrelet poreux indique la présence d'humidité dans le joint. L'absence de bourrelet indique un manque de pression et peut être synonyme de vides internes à la structure. L'angle de contact de l'adhésif polymérisé à l'extrémité du bourrelet, formé quand l'adhésif était à l'état liquide, indique si une contamination de surface a eu lieu.

4.2. Procédés destructifs de contrôle des assemblages collés :

Même si ces méthodes permettent d'identifier des paramètres pouvant affecter la résistance intrinsèque de l'assemblage et son vieillissement, les essais de contrôle les plus usités restent les essais de séparation des substrats. Avec le choix du test s'impose en réalité la nature des contraintes mises en jeu. On peut imposer à un joint de colle les sollicitations suivantes :

- des contraintes normales au plan du joint (traction, compression).
- des contraintes tangentielles au plan du joint (cisaillement).
- des contraintes de pelage lorsque au moins l'un des matériaux est souple.
- des contraintes de clivage qui résultent de l'application de la force à l'extrémité d'un assemblage de matériaux rigides.

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 [53, 54] 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 bien souvent que d'accéder 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 .

4.2.1. Configurations provoquant une localisation des contraintes.

4.2.1.1. L'essai de pelage :

Un joint travaille en pelage lorsque au moins un des substrats est souple. En effet, le test de pelage (peel test) est certainement le plus communément utilisé pour ce type de matériaux. Un tel essai sera mis en œuvre pour le bois uniquement dans le cas d'assemblages mixtes. De plus, sa mise en œuvre est simple et la vitesse de propagation du front de rupture est contrôlée et peut varier dans un large domaine. Les angles de pelage sont également très variables et les plus communément rencontrés sont 90° et 180°. Dans ce type de tests, il est très important que les dissipations viscoélastiques restent limitées en fond de fissure pour pouvoir appliquer les concepts de la Mécanique Élastique de la Rupture (MLER). En pratique, cette condition impose lors de l'expérience l'ajout d'un renfort dont la rigidité très faible ne modifie pas la courbure mais permet d'éviter la déformation longitudinale de la partie pelée.

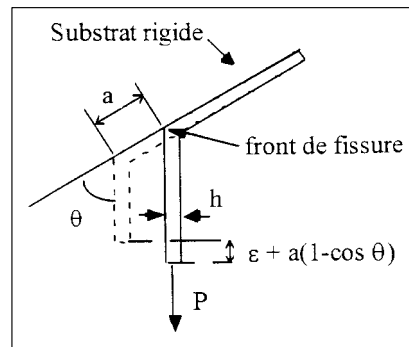


Fig. 1.7 : Configuration d'un essai de pelage sous un angle θ . [49]

L'introduction des concepts de bilan d'énergie et de la mécanique de la rupture conduit au calcul du taux de restitution d'énergie G correspondant à l'énergie de rupture de l'assemblage [55, 56, 57, 58]. Ainsi, dans le cas d'un essai de pelage sous un angle θ , G s'écrit comme la somme des variations d'énergie potentielle et d'énergie élastique lors de la diminution de l'aire de contact d'une quantité dA sous une charge appliquée P :

$$G = \frac{dU_P}{dA} + \frac{dU_E}{dA} = \frac{P}{b}(1 - \cos\theta) + \frac{P^2}{2b^2 E h} \quad (1.14).$$

où h correspond à l'épaisseur du ruban pelé, b sa largeur et E son module d'Young.

Dans le cas où la partie pelée est considérée comme indéformable, l'énergie élastique emmagasinée devient nulle et le taux de restitution d'énergie s'écrit dans le cas où la partie pelée est indéformable :

$$G = \frac{P}{b}(1 - \cos\theta) \quad (1.15).$$

De nombreux travaux [59, 60, 61] portant sur l'influence de l'épaisseur de la couche d'adhésif ou du substrat, de l'angle et des conditions de pelage (vitesse, température) sont rapportés

dans la littérature. Si l'énergie de séparation G est une propriété de l'interface, la force de pelage devrait être inversement proportionnelle à $(1-\cos\theta)$. Or, des écarts importants sont observés dans deux domaines limites. Aux angles de pelage inférieurs à 30° environ, des phénomènes particuliers (dislocations, déformation plastique des substrats...) sont mis en évidence [62]. Par ailleurs, pour des angles supérieurs à 130° , la force augmente alors qu'elle devrait être minimale pour $\theta=180^\circ$ [63]. Des mécanismes de dissipation supplémentaires tels que la déformation plastique des substrats due à la très grande flexion des substrats ainsi que ceux induits par l'épaisseur du joint doivent être pris en compte. Ainsi, dans le dernier cas, la quantification de G s'avère extrêmement délicate à cause de la variation de l'état de contrainte dans l'épaisseur de la couche d'adhésif (qui dépend de la résistance intrinsèque de l'interface mais aussi des conditions de séparation).

4.2.1.2. L'essai de clivage :

Dans le cas de l'assemblage de deux matériaux rigides, le test de pelage n'est plus applicable. Le comportement à la propagation de fissure peut être estimé par un test de clivage à charge ou déplacement imposé. Il s'agit d'un test en mode I lorsque la rupture se propage dans la couche adhésive. Une combinaison des modes I et II intervient lorsque la rupture se propage à une interface ou au voisinage de celle-ci [64]. La mesure est toujours possible dans ce cas mais son interprétation devient alors complexe.

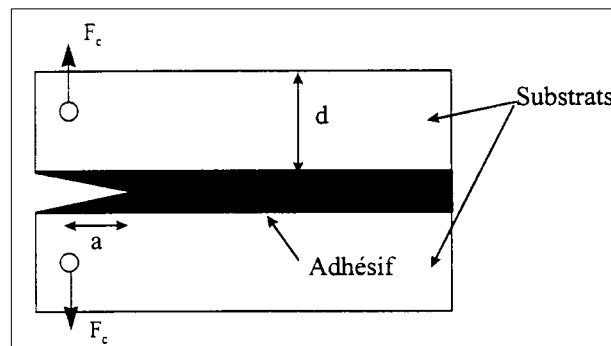


Fig. 1.8 : Configuration d'un essai de clivage. [47]

Dans le cas d'un comportement linéaire élastique de la structure collée et si l'effort tranchant est négligé, l'énergie de rupture du système s'écrit [65] :

$$G = \frac{12F_c^2 a^2}{Eb^2 d^3} \quad (1.16).$$

L'ouverture se fait sous l'action de la force F_c , b est la largeur de l'éprouvette, a la longueur de la fissure, d l'épaisseur du substrat et E son module d'Young. Une difficulté expérimentale est liée à la mise en œuvre de ce test tout spécialement pour des adhésifs rigides pour lesquels il est indispensable d'obtenir une fissure à faible rayon de fond d'entaille. Ce critère est d'autant plus important que le comportement est plus fragile et devient négligeable pour les

adhésifs dont le déformabilité est grande. Le test de clivage est très sensible à l'environnement dans la mesure où la concentration de contraintes à l'interface ou à son voisinage est élevée. Le test connu sous le nom de Boeing Wedge Test (ASTM D3762) permet de prédire la durabilité d'un assemblage très rapidement lorsque le joint dans lequel est enfoncé le coin est soumis à différentes conditions atmosphériques.

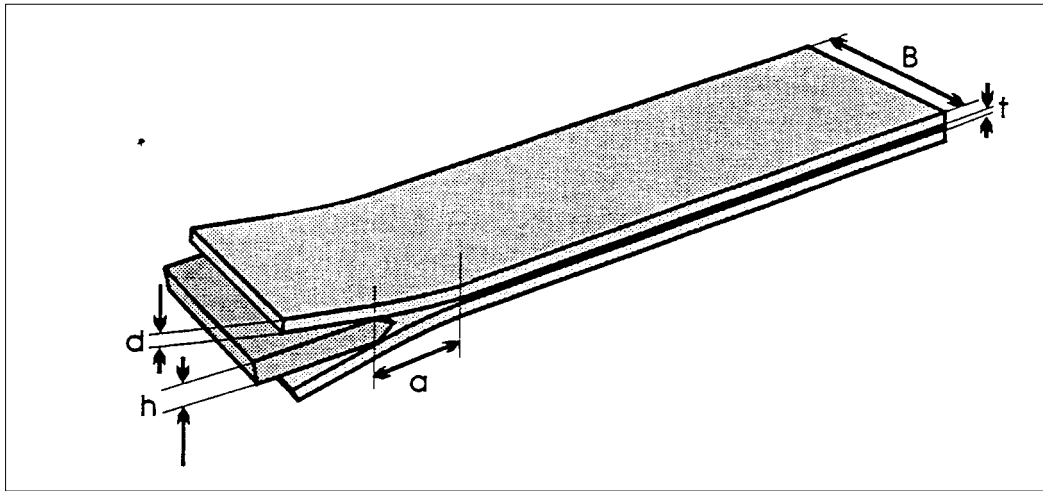


Fig. 1.9 : Boeing Wedge Test. [50]

La propagation de la fissure est suivie dans le temps en fonction de différents paramètres (humidité, temps d'immersion dans l'eau ou dans des solutions chimiques, température, temps d'exposition à des radiations...). Toutefois, le fluage de l'adhésif doit pouvoir être vérifié car il joue un rôle prépondérant sur la distribution des contraintes dans le joint. Par ailleurs, le manque de reproductibilité des résultats a souvent été mis en avant. Néanmoins, en choisissant soigneusement les dimensions du joint et les substrats afin que leur déformation soit toujours élastique, il est possible de déterminer l'énergie de rupture de systèmes fortement adhérents [66]. La mesure de la longueur de la fissure est réalisée à l'équilibre atteint en moins de 24 heures. L'action de l'environnement peut alors être suivie.

Les essais présentés précédemment sont certes couramment utilisés mais la configuration d'essai sur laquelle le plus grand nombre de travaux a été réalisé est de loin la configuration à simple recouvrement qui permet une sollicitation du joint de colle en cisaillement.

4.2.1.3. Joint à simple recouvrement :

Les joints à simple recouvrement sont très fréquemment étudiés tant en raison de leur simplicité de mise en œuvre que de l'intérêt pratique que présente cette géométrie dont la forme la plus simple est donnée sur la figure suivante.

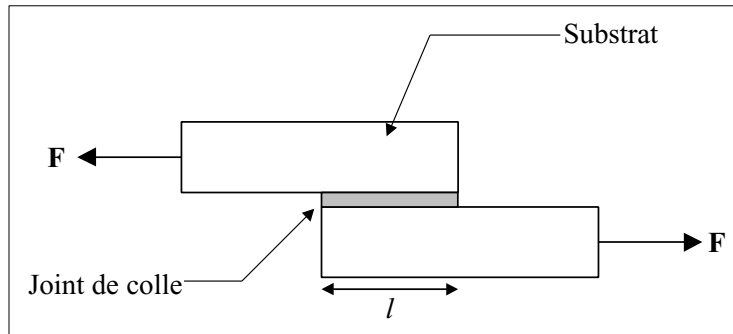


Fig. 1.10 : Joint à simple recouvrement (Single Lap Joint)

Différentes approches théoriques ont été réalisées sur ce type d'essai.

- des approches élastiques pures
- des approches élasto plastiques, viscoélastiques...

4.2.1.3.1. Approches analytiques élastiques pures :

Approche élastique linéaire :

C'est la plus simple des hypothèses où l'on considère que les substrats sont rigides et que seul l'adhésif se déforme en cisaillement. Dans le cas où la largeur du joint est b , sa longueur l et la force appliquée P , la contrainte de cisaillement τ est exprimée par :

$$\tau = \frac{P}{bl} \quad (1.17).$$

Cependant, les substrats subissant la traction se déforment et subissent un allongement non négligeable. Ainsi, Volkersen [67] est le premier à avoir raisonnablement analysé la contrainte de cisaillement dans un joint à simple recouvrement.

Dans cette théorie, il est supposé que l'adhésif se déforme uniquement en cisaillement pendant que les substrats se déforment uniquement en tension.

Avec des conditions limites adaptées, Volkersen exprime ainsi la distribution de contraintes de cisaillement dans l'adhésif :

$$\tau(x) = \tau_m \frac{\omega l}{2} \left(\frac{\cosh \omega x}{\sinh \omega l/2} + \frac{|E_1 e_1 - E_2 e_2|}{E_1 e_1 + E_2 e_2} \frac{\sinh \omega x}{\cosh \omega l/2} \right) \quad (1.18).$$

Dans laquelle on a :

$$\omega = \sqrt{\frac{G_c}{e_c} \left(\frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2} \right)} = \sqrt{\frac{E_c}{2e_c(1+\nu)} \left(\frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2} \right)} \quad (1.19).$$

dans laquelle E_1 , e_1 et E_2 , e_2 correspondent respectivement au module d'Young et à l'épaisseur de chaque substrat, G_c et e_c au module de Coulomb et à l'épaisseur de l'adhésif et l à la longueur du recouvrement. Un joint est dit équilibré lorsque les rigidités $E_1 e_1$ et $E_2 e_2$ sont égales. L'analyse de l'équation de Volkersen montre que l'on a intérêt à concevoir des joints

équilibrés. Dans le cas de matériaux identiques, les épaisseurs de substrats devront être identiques ou si les matériaux sont différents, alors les épaisseurs seront fonction du rapport des modules d'Young :

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{e_1}{e_2} \quad (1.20).$$

Alors, dans le cas d'un joint équilibré, la contrainte de cisaillement maximale est :

$$\tau_{\max} = \tau_m \frac{\omega l}{2} \coth \frac{\omega l}{2} \quad (1.21).$$

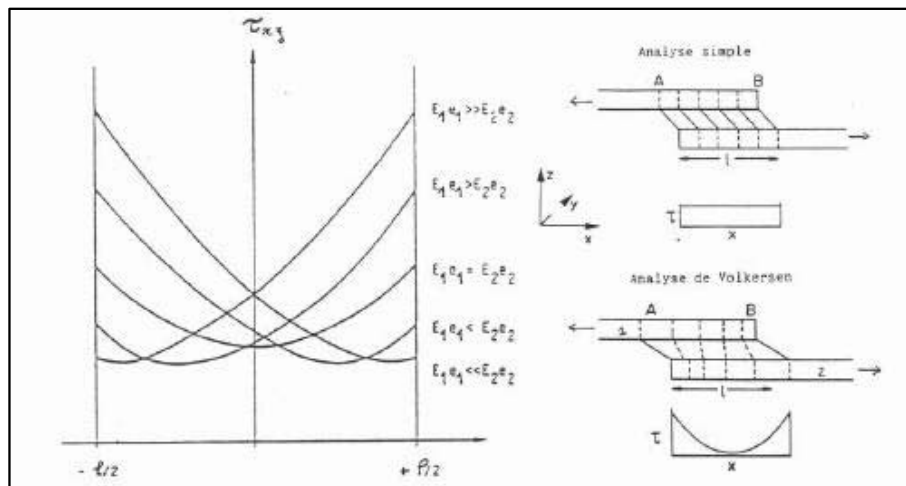


Fig. 1.11 : Répartition des contraintes de cisaillement dans le joint à simple recouvrement selon la théorie de Volkersen. [67]

On peut définir un coefficient de surcontrainte k tel que :

$$k = \frac{\tau_{\max}}{\tau_m} = \frac{\omega l}{2} \coth \frac{\omega l}{2} \quad (1.22).$$

Dans certains cas, on peut faire l'approximation consistant à utiliser comme valeur de la contrainte admissible la valeur de la contrainte moyenne τ_m . Cette hypothèse revient alors à donner la valeur 1 à k ; on voit bien que cette approximation n'est pas réaliste, notamment aux extrémités du joint et qu'elle néglige un coefficient de surcontrainte qui peut prendre des valeurs importantes.

En conclusion, la théorie de Volkersen est intéressante car elle donne des indications précieuses, notamment pour la géométrie du joint. Si les valeurs de contraintes trouvées ne sont pas d'une précision optimale, cette théorie est cependant le point de départ de toutes les autres. Sa principale lacune est qu'elle n'intègre pas dans le calcul des contraintes la présence des efforts parasites (notamment des moments de flexion) introduits par le non alignement des efforts.

Analyse de Goland et Reissner [68] :

Du fait que les supports des forces ne sont pas dans le même plan, il apparaît un moment de flexion M_f créant ainsi dans le joint et dans les supports des contraintes normales au plan de collage (dites contraintes d'arrachement, de décollement ou de pelage) qui viennent se superposer aux contraintes de cisaillement. Si la rigidité des supports est faible, ceux-ci vont fléchir sous l'action de M_f ce qui accroît les contraintes normales aux extrémités du recouvrement (phénomène de clivage). Goland et Reissner ont tenu compte de cet effet de flexion des substrats dans le calcul de l'état de contrainte dans le joint.

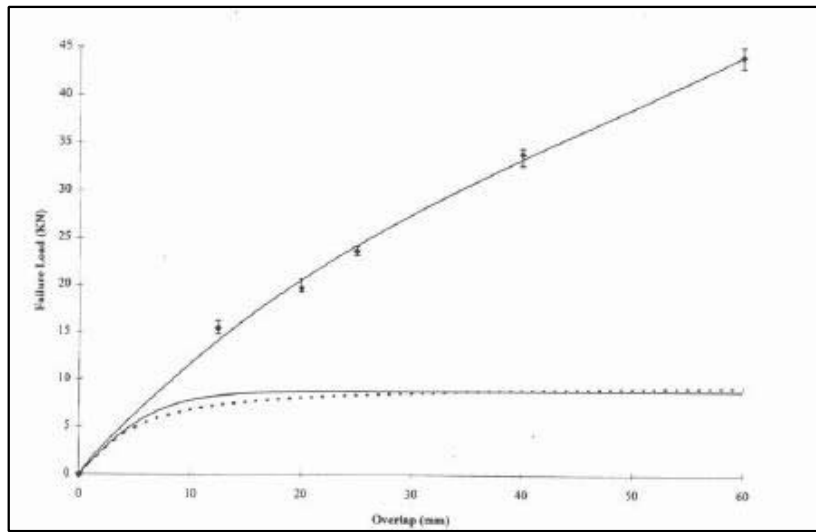


Fig. 1.12 : Comparaison des théories de Volkersen (—) et de Goland et Reissner(.....) aux résultats expérimentaux d'un joint à simple recouvrement acier-époxy [50]

La définition d'un facteur de moment de flexion k lie le moment de flexion agissant sur le substrat à la fin du recouvrement, M_0 , au chargement P et à l'épaisseur t des substrats par la relation suivante :

$$M_0 = kP \frac{t}{2} \tag{1.23}.$$

Dans le cas où la charge est faible, il n'y a aucune rotation de la zone de recouvrement. Au fur et à mesure que la charge augmente, ce facteur correctif k diminue lorsque la flexion des supports s'accroît jusqu'à tendre vers zéro lorsque les efforts imposés s'alignent. Ainsi, l'expression des contraintes normales de pelage peut être déterminée à l'aide de l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} = & \frac{\sigma t^2}{C^2 R_3} \left[\left(R_2 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \cosh \lambda \cos \lambda \right) \cosh \frac{\lambda x}{C} \cos \frac{\lambda x}{C} \right] \\ & + \frac{\sigma t^2}{C^2 R_3} \left[\left(R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \sinh \lambda \sin \lambda \right) \sinh \frac{\lambda x}{C} \sin \frac{\lambda x}{C} \right] \end{aligned} \tag{1.24}.$$

Avec

$$C=1/2$$

$$\lambda = \frac{C}{t} \left(\frac{6E_3 t}{Et_3} \right)^{1/4}$$

$$k' = k \frac{C}{t} \left(3(1-\nu^2) \frac{\sigma}{E} \right)^{1/2}$$

$$R_1 = \cosh \lambda \sin \lambda + \sinh \lambda \cos \lambda$$

$$R_2 = \sinh \lambda \cos \lambda + \cosh \lambda \sin \lambda$$

$$R_3 = (\sinh 2\lambda + \sin 2\lambda) / 2$$

E, ν = Module d'Young et Coefficient de Poisson des substrats

E_3 = Module d'Young de l'adhésif

k = facteur de moment de flexion

$\sigma = P/bt$ contrainte moyenne de traction dans les substrats

P la charge appliquée, b la largeur du joint et t l'épaisseur des substrats.

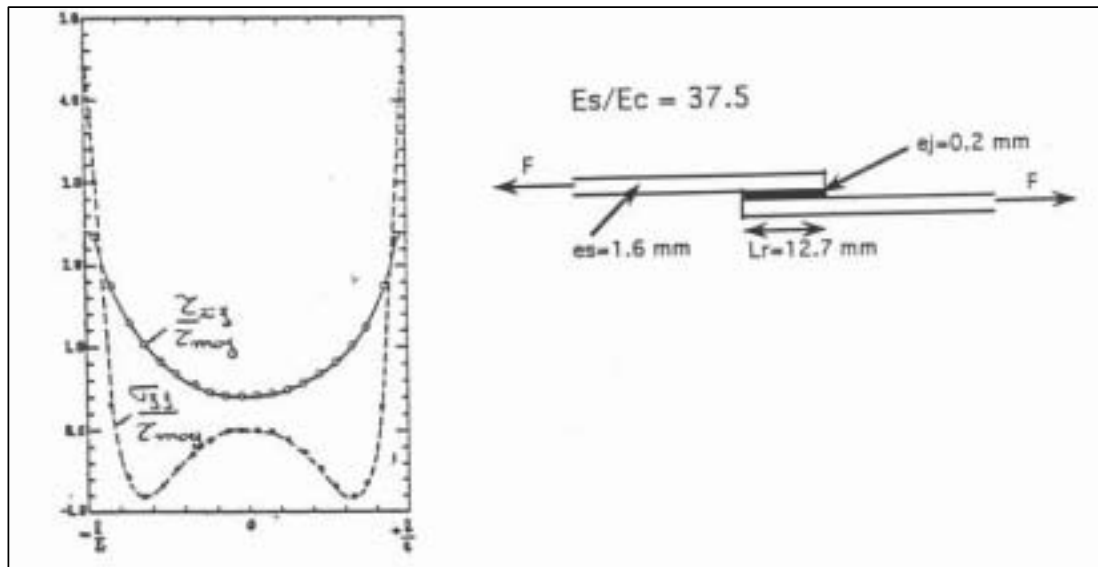


Fig. 1.13 : Répartition des contraintes dans le joint de colle selon Goland et Reissner. [67]

Le facteur de moment de flexion k a été déterminé pour deux substrats identiques par Goland et Reissner sous la forme suivante :

$$k_{GR} = [1 + 2\sqrt{2} \tanh(\theta / 2\sqrt{2})]^{-1} \quad (1.25).$$

$$\theta = l \sqrt{\frac{3P(1-\nu^2)}{bEt^3}} \quad (1.26).$$

Une autre détermination du facteur k a été faite par Hart-Smith [69] :

$$k_{HS} = [1 + \theta + \theta^2 / 6]^{-1} \quad (1.27).$$

Mais aussi par Zhao, Adams et Pavier [70], encore plus simple.

$$k_z = [1 + \theta]^{-1} \quad (1.28).$$

Par la suite, plusieurs auteurs ont affiné le modèle analytique de Goland. Ainsi, Ojalvo et Eidinoff [71] ont supposé que les valeurs des contraintes τ_{xy} et σ_{yy} variaient linéairement dans l'épaisseur de la colle. Cette analyse permet de mieux expliquer le mécanisme de rupture de la colle puisque celle-ci s'initie aux points où les contraintes sont maximales. Toutefois, ces deux auteurs trouvent que les contraintes σ_{zz} varient peu dans l'épaisseur du joint alors que les contraintes τ_{xz} varient beaucoup plus. Des études numériques par éléments finis montrent en fait que les deux contraintes τ_{xz} et σ_{zz} varient dans l'épaisseur du joint de colle surtout aux extrémités du recouvrement [72]. Du Chen et al [73] ont proposé une méthode qui consiste à découper le joint à simple recouvrement en une série de blocs étudiés séparément pour mieux prendre en compte les conditions aux limites. Ces auteurs supposent que les contraintes de traction dans le substrat ont une distribution linéaire et que la contrainte de cisaillement a une distribution parabolique. Ils considèrent en outre que la contrainte de cisaillement dans l'adhésif est constante et que la contrainte de pelage varie linéairement selon l'épaisseur de la colle. Tous ces modèles analytiques supposent que la contrainte normale axiale peut être négligée et ceci n'est possible que pour certaines configurations de joints et d'adhésifs. Delale et al [74] ont affiné l'analyse de Goland par la prise en compte des déformations de cisaillement dans le support et des contraintes normales axiales dans l'adhésif.

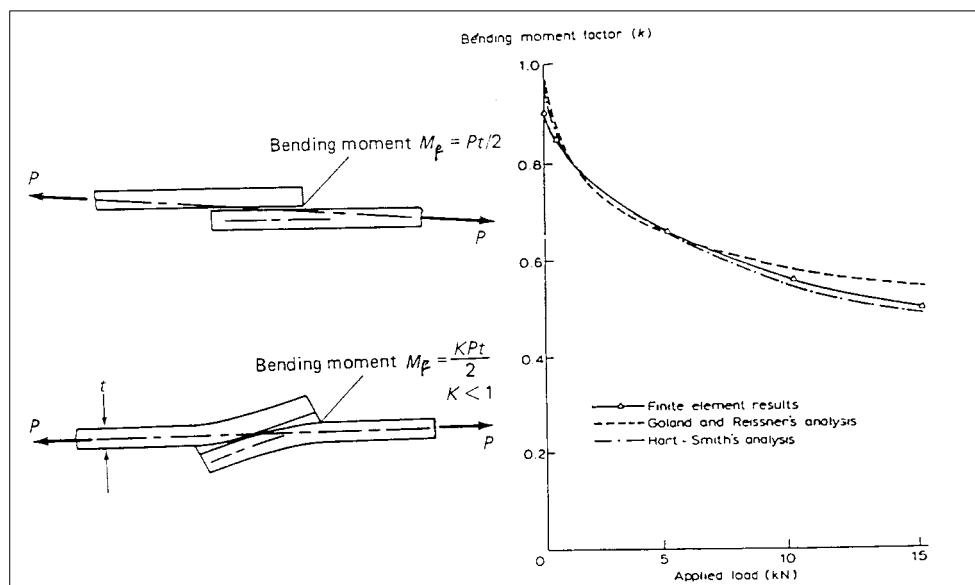


Fig. 1.14 : Variation du moment de flexion avec la charge appliquée. [73]

Ces modèles analytiques cités précédemment ne peuvent pas prendre en compte le fait que la contrainte de cisaillement doit s'annuler au bord libre du joint. L'analyse élastique la plus correcte semble être celle de Renton et al [75] dans laquelle l'assemblage collé n'est pas considéré dans sa globalité. Les auteurs procèdent à un découpage de l'assemblage en blocs dont ils analysent séparément l'équilibre mécanique. Le joint est alors un bloc indépendant. Pour un joint à simple recouvrement, on calcule ainsi les contraintes et les déformations à la fois dans l'adhésif et les supports, les contraintes dans les supports variant non seulement suivant la longueur de recouvrement mais également suivant leur épaisseur. La prise en compte de variation de contraintes dans les supports permet de faire une représentation correcte de la contrainte de cisaillement dans le joint d'adhésif. Dans ce modèle, cette contrainte s'annule aux extrémités et est maximale à une distance très proche de l'extrémité.

Rigolot [76] a proposé une méthode asymptotique pour évaluer la contrainte dans un joint collé à double recouvrement. Cette méthode consiste à exprimer le champ des contraintes et le champ des déplacements dans chaque milieu (substrat et colle) sous la forme d'un développement asymptotique selon les puissances d'une petite variable. Cette méthode permet de tenir compte de la nullité du cisaillement au bord libre du joint. En fait, l'effet de bord libre est un phénomène complexe car à cause de la discontinuité de géométrie et de matière, les contraintes sont théoriquement singulières. Ainsi, une méthode numérique d'analyse par éléments finis a été développée [77] pour calculer l'ordre de cette singularité, très localisée, qui joue un rôle important du point de vue de la résistance de l'assemblage collé. De même, une étude détaillée des contraintes transverses a été réalisée par Adams sur ce type d'assemblage dans le cas élastique [50].

4.2.1.3.2. Approches analytiques élastoplastique, viscoélastique, viscoplastique :

Pour des adhésifs ductiles (comme des époxy modifiées, par exemple), de nombreux problèmes surviennent : viscosité, critère d'écoulement plastique... Les adhésifs ductiles ont en général un comportement visco – élastoplastique à l'état solide qui dépend du temps, de la température et aussi de l'humidité environnante. Les mécanismes de cette déformation non linéaire sont liés aux mouvements des chaînes de polymères, à la formation de bandes de cisaillement ou encore de craquelures multiples. Ainsi, la connaissance de ces mécanismes est très importante pour une bonne description du comportement de l'adhésif. Ainsi, Hart-Smith [69] a proposé une modélisation analytique simple en supposant que l'adhésif est élastoplastique parfait.

Partant de ces considérations, il a montré que la charge maximum que peut transmettre un joint de géométrie donnée est uniquement fonction de l'énergie de déformation de l'adhésif en cisaillement, quelle que soit la courbe contrainte/déformation. Cette approche permet de prévoir un meilleur comportement de l'adhésif ductile par rapport à l'adhésif

fragile. Ottosen et al [78] ont étudié le modèle de Volkersen en supposant la loi de comportement en cisaillement connue et ont calculé les contraintes dans un joint quand il se plastifie. La viscosité des polymères les rend particulièrement sensible au fluage. Il a été montré par Delale et Erdogan [79] que le fluage du joint entraîne un nivellement des contraintes dans le cas d'un comportement viscoélastique, et que cet écoulement est beaucoup plus lent pour les contraintes de pelage σ_{zz} par rapport aux contraintes de cisaillement τ_{xz} . Cependant, si l'analyse viscoélastique linéaire est souvent valable à des déformations relativement petites pour des polymères à l'état solide, elle apparaît vite limitée pour des grandes déformations où il faut passer en régime viscoplastique. Ainsi, des études ont été réalisées dans le cas de joints à double recouvrement en viscoélasticité non linéaire [80] ou en viscoplasticité [81, 82] dans un joint à simple recouvrement. Mais pour la colle visqueuse, une modélisation qui tient compte de la viscosité et de l'influence de la contrainte hydrostatique reste encore un problème à résoudre. Enfin, Adams et Mallick [83] ont développé une méthode permettant l'analyse du joint de colle en considérant la plasticité de l'adhésif, les contraintes longitudinales, et la variation des contraintes selon l'épaisseur du joint. Cette méthode est aussi applicable sur des assemblages dissymétriques et sous chargement thermomécanique.

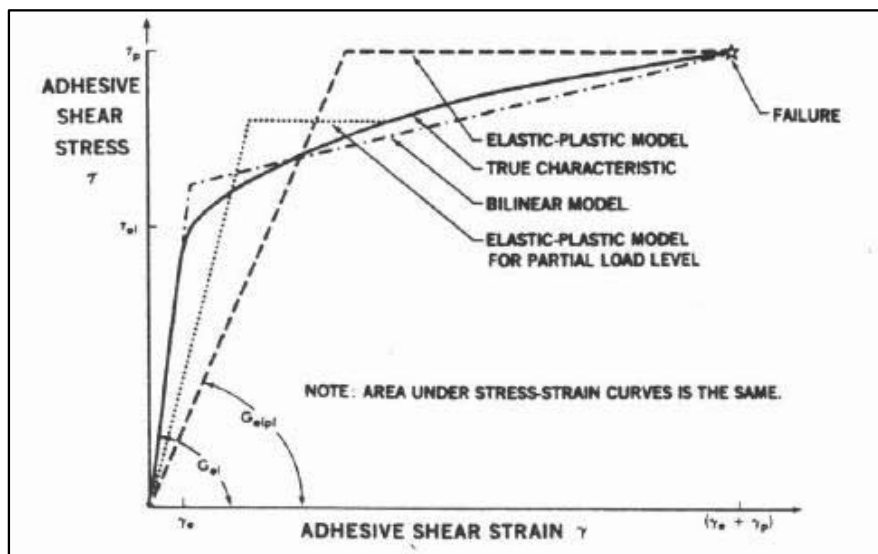


Fig. 1.15 : Courbes contrainte – déformation en cisaillement d'un adhésif et comparaison avec des modèles mathématiques. [69]

De telles approches analytiques sont maintenant complétées par des méthodes numériques (éléments finis notamment) grâce auxquelles de nombreuses simulations numériques sont possibles. Ainsi, la structure étudiée est décomposée en éléments de base (triangulaires ou quadrangulaires) composant le maillage. L'estimation des contraintes sera

d'autant meilleure que le maillage sera raffiné et que l'on considérera le plus grand nombre d'hypothèses dans le calcul. Ainsi, les éléments représentatifs de l'assemblage seront de plus en plus fins au fur et à mesure que l'on s'approchera des points singuliers, et, dans le cas du joint à simple recouvrement, des extrémités du recouvrement.

Les méthodes numériques permettent de tenir compte des effets de flexion, du cisaillement dans l'adhésif, des effets de bords dans le joint et n'est pas limitée aux configurations simples d'assemblages sollicités par des efforts unidirectionnels comme les méthodes analytiques. On pourra ainsi étudier la répartition des contraintes dans le cas de joints de formes quelconques ou dans le cas de chargements complexes ou multidirectionnels. De nombreux codes de calcul sont disponibles sur le marché (CASTEM 2000, ABAQUS, CASTOR 2D, ANSYS, SAMCEF...) et peuvent tous traiter ce type de problèmes.

Ainsi, il est aisé faire varier la géométrie de l'assemblage et d'en déterminer son influence sur ses caractéristiques mécaniques.

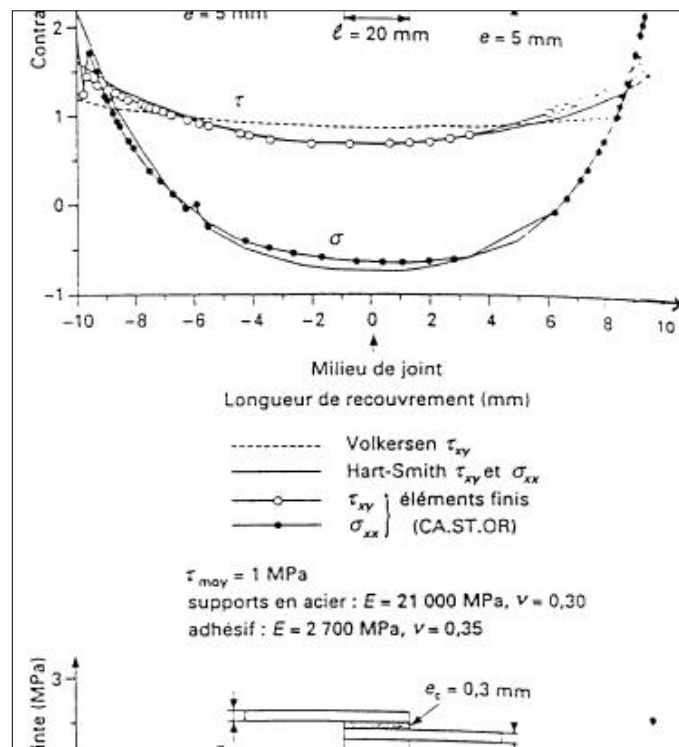


Fig. 1.16 : Influence du comportement élastoplastique de l'adhésif sur la répartition des contraintes ; comparaison avec le modèle élastique de Volkersen. [69]

4.2.1.3.3. Influence de la géométrie du joint à simple recouvrement sur ses propriétés mécaniques :

Nous avons donné précédemment un aperçu de la nature et de la répartition des contraintes dans un assemblage à simple recouvrement. Cependant, toute modification de la géométrie ou du dimensionnement de l'assemblage induit une variation des contraintes dans l'adhésif comme dans les supports.

Dans ce type d'assemblage, trois paramètres fondamentaux influencent directement le comportement mécanique ; il s'agit :

- de la longueur de recouvrement l
- de l'épaisseur des substrats e_s
- de l'épaisseur du joint de colle e_j

L'augmentation de la longueur de recouvrement provoque une augmentation de la charge à rupture par l'accroissement de la surface collée. Cependant, il existe une longueur de recouvrement optimale car pour une longueur trop importante, seules les extrémités du joint subissent la sollicitation alors que le centre ne supporte aucun effort. De même, une analyse des contraintes au extrémités du joint montre que lorsque la valeur de la longueur de recouvrement passe de 20 à 45 mm, la valeur des contraintes de cisaillement τ_{xz} et normales σ_{zz} doublent [84].

Augmenter l'épaisseur des supports a pour conséquences deux effets contradictoires ; d'une part, ceci entraîne une aggravation de l'excentricité des efforts et une augmentation du moment fléchissant induit et d'autre part une augmentation de la rigidité des plaques qui tend à atténuer le clivage. Mais l'influence de l'épaisseur des substrats n'est pas un phénomène à considérer indépendamment. Ainsi, pour de faibles longueurs de recouvrement, (<20 mm), augmenter l'épaisseur de substrat provoque une diminution de la charge transmise par le joint donc l'effet néfaste du moment de flexion l'emporte sur le gain en rigidité. De même, pour des longueurs de recouvrement importantes, le phénomène s'inverse et l'augmentation de l'épaisseur des supports entraîne une augmentation de la charge transmise par le joint [84].

La résistance de l'assemblage augmente avec l'épaisseur du joint de colle pour de très faibles épaisseurs, passe par un optimum puis décroît ensuite très rapidement [85]. Ce phénomène est expliqué par l'augmentation des surcontraintes (notamment des contraintes de pelage) lorsque l'épaisseur du joint augmente. L'épaisseur optimale est donc le moment où ces surcontraintes sont moindres [85].

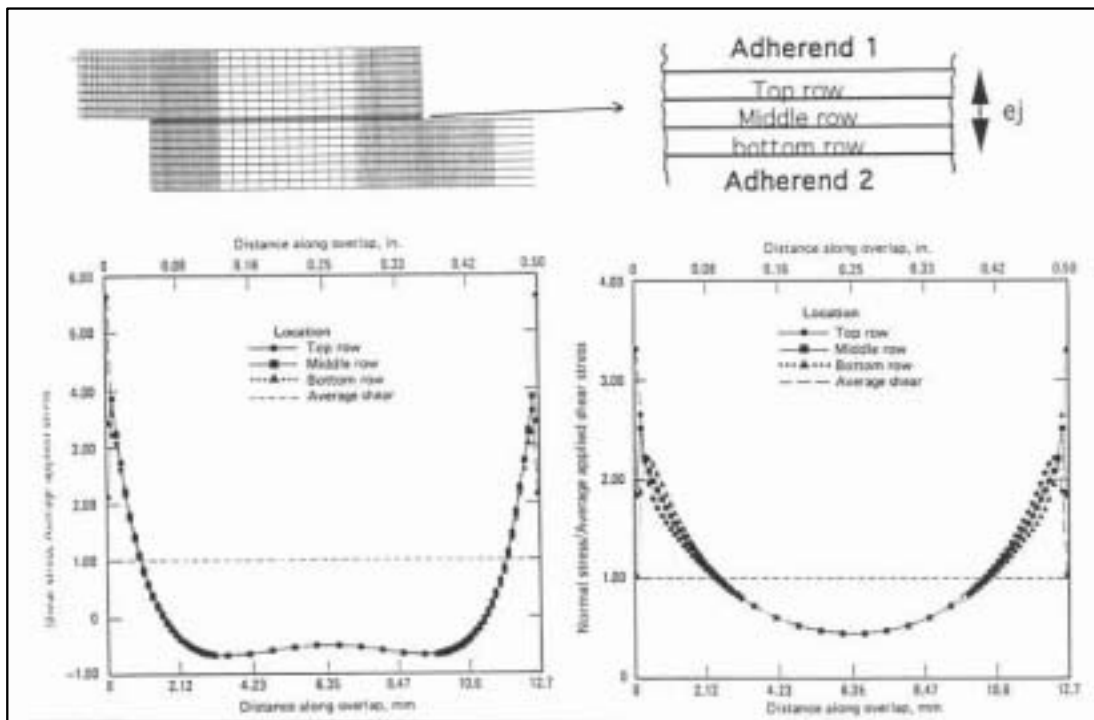


Fig. 1.17 : Variation des contraintes de cisaillement et des contraintes normales dans l'épaisseur du joint, en fonction de la longueur de recouvrement. [100]

La présence d'un bourrelet d'adhésif aux extrémités du recouvrement a fait l'objet d'études détaillées par Adams [50]. Ainsi, la présence d'un bourrelet de colle peut améliorer considérablement la tenue mécanique de l'assemblage en réduisant les concentrations de contraintes aux extrémités du joint.

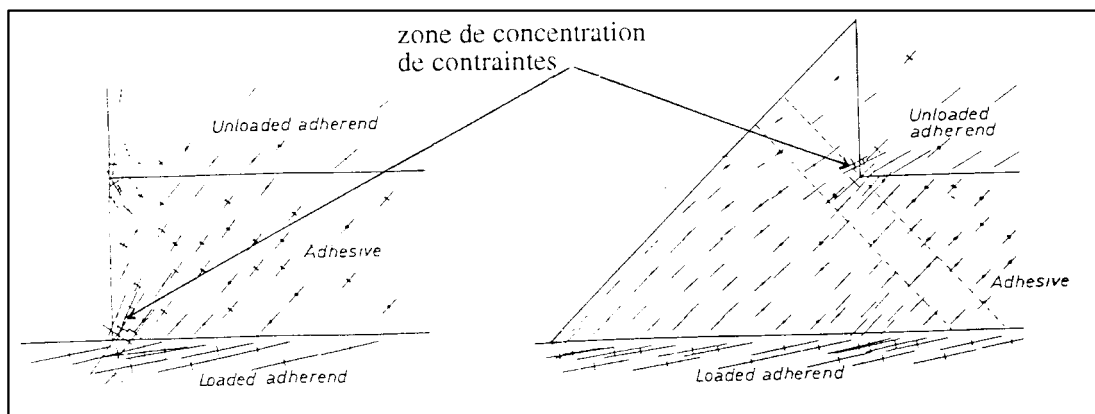


Fig. 1.18 : Modélisation par éléments finis des contraintes principales dans un joint à simple recouvrement avec et sans bourrelet d'adhésif. [50]

Cependant, l'intensité et la localisation des surcontraintes dépendent de la forme du bourrelet. Par exemple, Adams montre, en modélisant les deux cas extrêmes, que la localisation des surcontraintes passe d'une extrémité à l'autre de la couche d'adhésif dans son épaisseur. La rupture ne s'amorce pas réellement sur un coin de l'interface mais à une certaine distance de l'interface colle/substrat. De plus, la présence d'un bourrelet de colle apporte une meilleure répartition des contraintes dans les substrats.

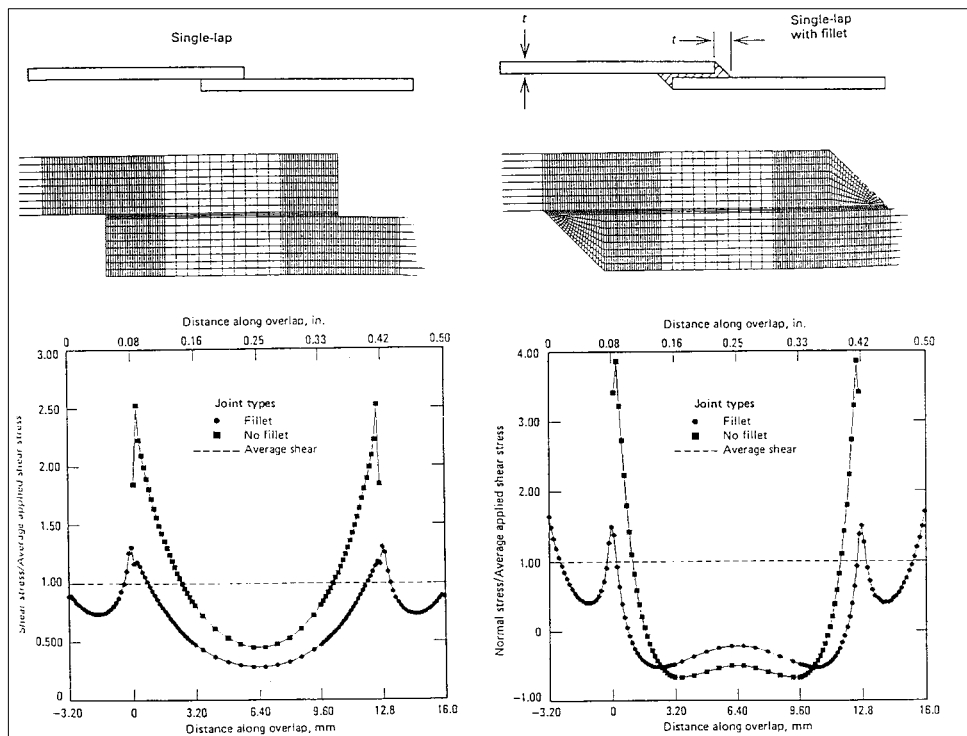


Fig. 1.19 : Modélisation par éléments finis des contraintes de cisaillement et de pelage dans un joint à simple recouvrement avec et sans bourrelet d'adhésif. [100]

Enfin, le biseautage des substrats aux extrémités du recouvrement peut être une solution envisageable car une diminution d'épaisseur à cet endroit minimise le moment de flexion et ainsi provoque une diminution des contraintes de pelage [86]. En fait, il a été montré [50, 69] qu'un bourrelet d'adhésif améliore d'avantage la tenue mécanique de l'assemblage que le biseautage des supports. Cependant, la combinaison d'un biseau interne et d'un bourrelet procure une résistance maximale [86] lorsque l'un des substrats est en composite. Ce procédé permet non seulement de faire chuter les contraintes transverses de 38 MPa à 5 MPa mais aussi de modifier le type de rupture qui ne se produit plus dans le composite (comme c'est souvent le cas !) mais plutôt dans la colle. De même, il est possible de faire varier l'épaisseur du joint et des substrats afin d'obtenir un cisaillement uniforme dans l'adhésif et enfin de s'affranchir des effets de bords [88].

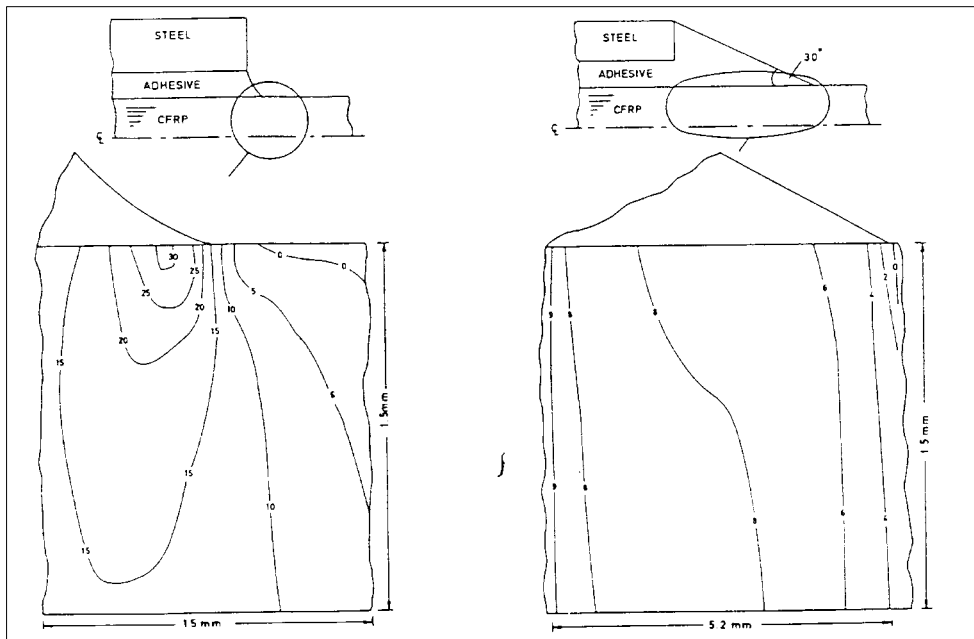


Fig. 1.20 : Influence de la présence d'un bourrelet de colle sur les contraintes de cisaillement transverse dans un substrat en composite. [50]

De même, on peut faire varier les caractéristiques mécaniques de l'adhésif (soit pour comparer deux adhésifs, soit pour déterminer l'influence du vieillissement du joint sur les caractéristiques à rupture de l'assemblage). Cette dernière approche est surtout réalisée pour les assemblages à vocations industrielles [89, 90, 91, 92]. Des calculs en grande déformations peuvent aussi être réalisés sur des matériaux provenant de l'industrie des composites afin d'obtenir des critères de rupture d'assemblages à simple recouvrement [93].

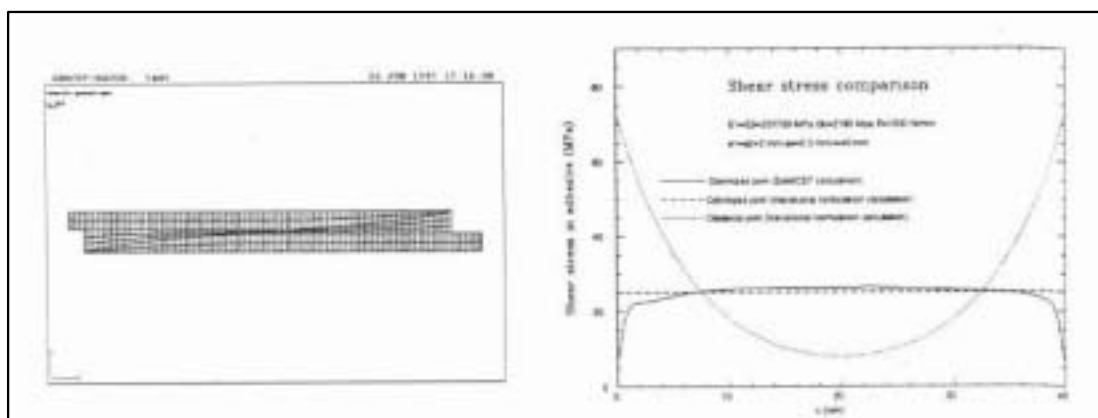


Fig. 1.21 : Calcul des contraintes de cisaillement pour un joint d'épaisseur variable. [88]

Différentes études ont aussi été réalisées pour comparer la résistance de configurations différentes de joints collés sous un même cas de charge [100] par éléments finis. L'intérêt de telles études numériques réside dans le fait qu'il est aisé de modifier une configuration d'essai et de voir son influence sur la répartition des contraintes, comme cela apparaît sur la figure suivante.

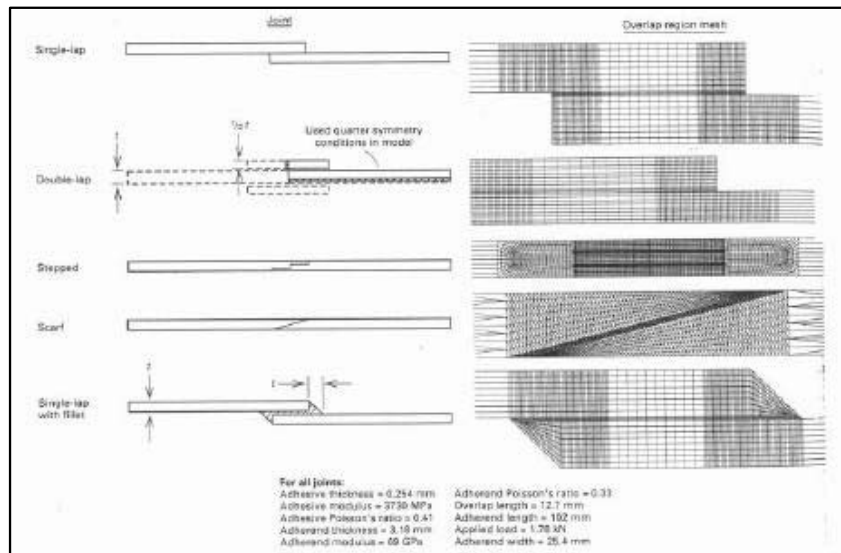


Fig. 1.22 : Maillage utilisés en E.F. pour 4 configurations typiques de joints collés. [100]

Les répartitions de contraintes de pelage et de cisaillement pour de tels assemblages sont données sur les courbes suivantes :

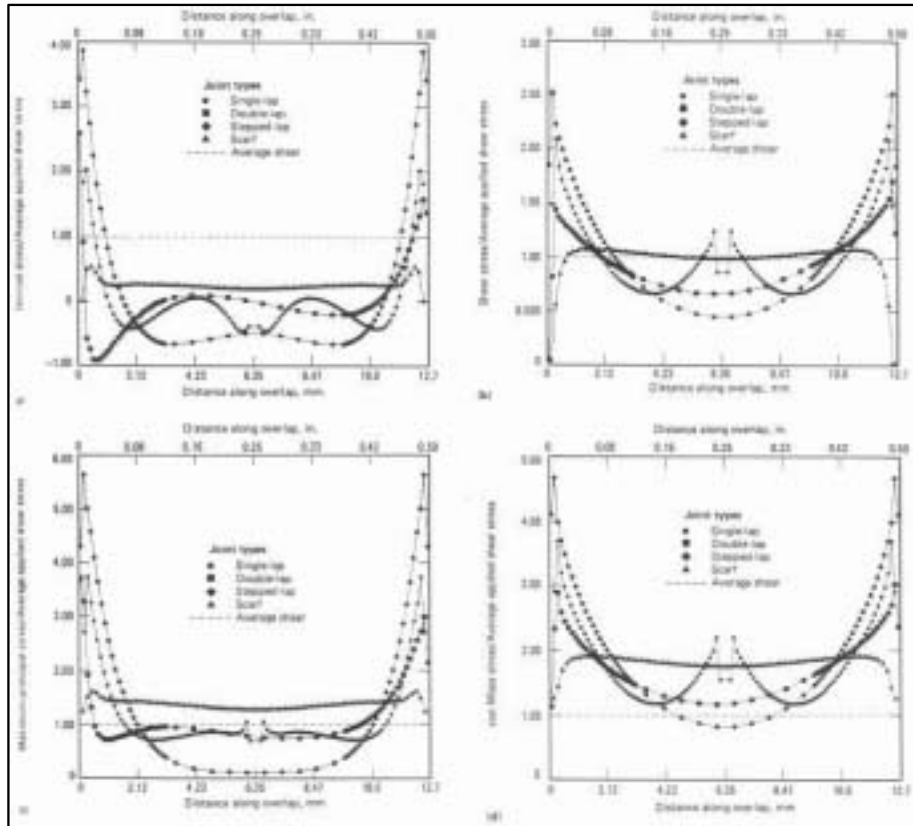


Fig. 1.23 : Résultats des simulations E.F. de la répartition des contraintes le long du recouvrement pour les 4 configurations de joints précédentes [100].

- a) Contraintes de pelage, b) Contraintes de cisaillement
- c) Contraintes principales maximales, d) Contraintes de Von Mises.

4.2.1.4. Joints aboutés :

Même s'ils ont été beaucoup moins étudiés que le joint à simple recouvrement, les joints aboutés font aussi l'objet de nombreuses études de résistance. Ils sont généralement utilisés pour étudier la réponses des adhésifs au cisaillement ou aux contraintes de traction et compression.

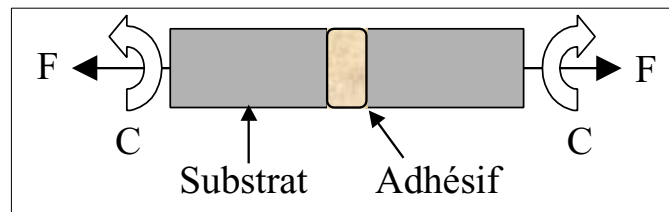


Fig. 1.24 : Joint abouté.

Les joints aboutés ne sont généralement pas rencontrés dans des cas de chargement réels parce que bien que résistants en tension, compression ou cisaillement, ils sont généralement rompus à cause du moment de flexion causé par les hautes contraintes de pelage et de clivage produites lors du chargement.

Une telle configuration d'essai permet, dans le cas d'un chargement en torsion pure, un état de cisaillement pur et des courbes contraintes – déformations en cisaillement. Les résultats les plus probants ont été obtenus dans le cas de joints annulaires aussi appelés « napkin ring test » pour lesquels les variations de contraintes dans le joint sont minimales [94]. Ainsi, la théorie de l'élasticité linéaire permet de calculer la distribution des contraintes de cisaillement dans le joint.

$$\tau_{z\theta} = \frac{2Tr}{\pi(r_0^4 - r_i^4)} \quad (1.29).$$

où $\tau_{z\theta}$ est la contrainte de cisaillement à un rayon r causée par un couple T alors que r_0 et r_i sont les valeurs des rayons interne et externe. Cependant, lors de l'assemblage du spécimen, il est courant d'observer la formation d'un bourrelet d'adhésif dont la forme modifie la distribution des contraintes donnée par l'équation (1.29).

Dans le cas d'essais de traction sur les joints aboutés, les modules plus faibles de l'adhésif conduisent à une striction dont il faut tenir compte dans la détermination de l'état de contraintes. Ainsi, la plus simple des analyses qui néglige cette striction permet d'obtenir les expressions des contraintes radiales et circonférentielles.

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) \sigma_z \quad (1.30).$$

où ν est le coefficient de Poisson de l'adhésif et σ_z est la contrainte axiale appliquée.

Le module d'Young apparent E' (défini comme la contrainte axiale appliquée divisée par la déformation axiale) est donné par :

$$E' = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (1.31).$$

Avec E module d'Young de l'adhésif.

Kuenzi et Stevens [94] ont modifié cette approche pour tenir compte des déformations des substrats en supposant que la déformation radiale dans la colle est égale à la déformation des substrats.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = - \left(\frac{\nu_s}{E_s} \right) \sigma_z \quad (1.32).$$

Avec E_s et ν_s module d'Young et coefficient de Poisson des substrats. L'équation (1.30) devient alors :

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \left(\nu - \frac{E\nu_s}{E_s} \right) \left(\frac{\sigma_z}{1-\nu} \right) \quad (1.33).$$

Cette analyse très simple ignore la nécessité que la contrainte radiale soit nulle sur le bord libre du joint, ce qui implique que des contraintes de cisaillement existent dans le joint de colle. L'obtention de ces contraintes de cisaillement peut se faire par les calculs éléments finis qui montrent que dans le cas de substrats très rigides devant les adhésifs utilisés, ces contraintes de cisaillement sont maximales à proximité du bord libre du joint [96].

Cependant, aucune de ces analyses ne tient compte du fait que l'interface ne reste pas plan sous la charge car les contraintes ne sont pas uniformes dans le joint. Seuls Kuenzi et Stevens [95] posent l'hypothèse peu réaliste que la distribution de contraintes axiales dans la colle est uniforme. Enfin, dans le cas d'un joint abouté sollicité en torsion, la présence du bourrelet de colle affecte la distribution de contraintes et aucune des précédentes analyses n'en tient compte. Adams et al [97] ont tenu compte de ces remarques dans l'étude de joints annulaires aboutés sollicités en torsion. Ils ont montré que les contraintes de cisaillement étaient maximales sur les bords du joint et ne variaient pas dans l'épaisseur du joint. De même, la présence du bourrelet de colle réduit comme prévu l'intensité du cisaillement près du bord libre mais introduit une grosse singularité de contraintes près du coin du substrat enclavé dans la colle.

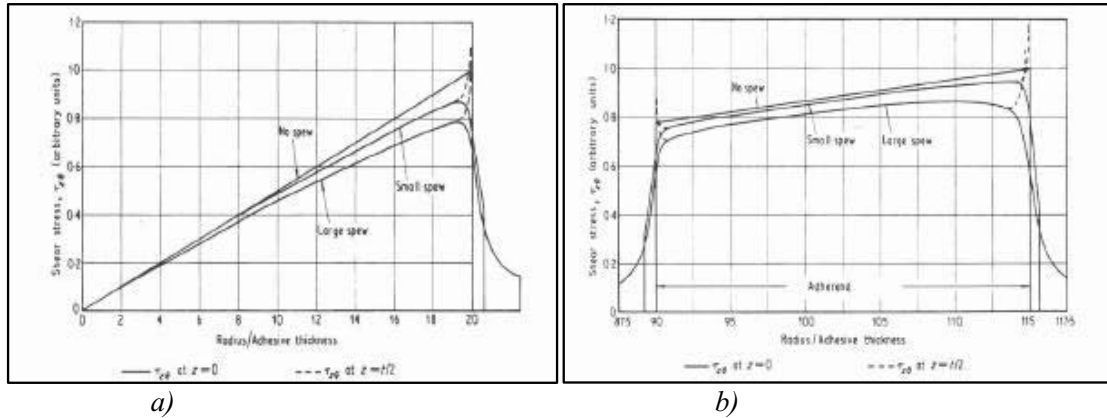


Fig. 1.25 : Distributions des contraintes de cisaillement dans un joint abouté sollicité en torsion avec ou sans bourrelet de colle. [50]
a) joint massif, b) joint annulaire

Cependant, vu le comportement général des adhésifs (apparition de déformations plastiques), il est fort probable que ces singularités de contrainte entraînent une plastification de l'adhésif dans cette zone sans toutefois provoquer une rupture catastrophique du joint. Ainsi, la présence du bourrelet entraîne une surestimation du module de cisaillement de l'adhésif et il est donc préférable d'éliminer ce bourrelet de colle sur les spécimens d'essai.

Pour les sollicitations en traction, on peut noter que le champ de contraintes varie dans l'épaisseur du joint. Malgré tout, au niveau de l'interface adhésif/substrat, il existe une concentration de contraintes causée par la différence de caractéristiques des matériaux. De même, la présence d'un bourrelet provoque une relaxation du champ de contraintes et réduit la singularité proche du coin du substrat, bien que le comportement non linéaire des adhésifs structuraux soit souvent fortement limité. On voit expérimentalement que la rupture s'amorce généralement au niveau de ces singularités de contraintes [97]. Par conséquent, la présence de cette concentration de contraintes et la probabilité d'une rupture prématurée dans la zone précédemment décrite suggère que la contrainte moyenne de traction appliquée au joint abouté est une sous estimation de la résistance en traction de l'adhésif.

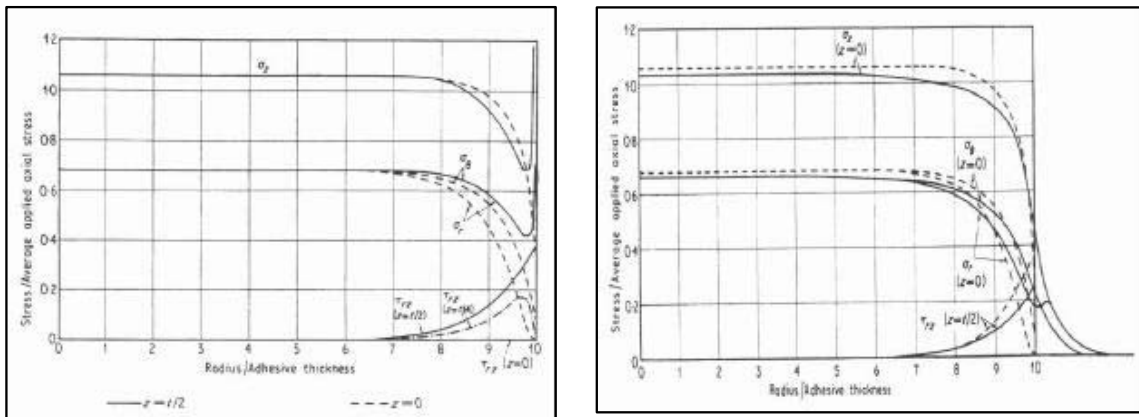


Fig. 1.26 : Distribution des contraintes dans un joint abouté sollicité en traction [50]

- a) sans bourrelet de colle et selon l'épaisseur du joint
- b) avec et sans bourrelet de colle

Des travaux ont aussi été réalisés sur des joints aboutés d'épaisseur variable (Tapered adhesive joints) [98] et ont montré que la rupture des joints à épaisseur constante était indépendante de la valeur de l'épaisseur du joint d'adhésif à l'inverse des joints trapézoïdaux où la résistance à la rupture est fortement dépendante de l'épaisseur de colle. Il apparaît donc une configuration optimale de joint dans le cas de cette géométrie de structure. Comme le plus gros problème est le contrôle de l'épaisseur du joint dans l'assemblage par collage, cette application est à proscrire dans l'assemblage structural. Comme pour le cas des joints à simple recouvrement, des analyses élasto plastiques ont été réalisées sur les joints aboutés sollicités en flexion quatre points. L'influence des moments de flexion sur la résistance à la rupture du joint est étudiée par éléments finis en fonction des caractéristiques mécaniques des substrats. Ainsi, il a été montré que la contrainte principale maximale croît lorsque le rapport des modules substrat/adhésif décroît mais aussi lorsque l'épaisseur de colle décroît [99].

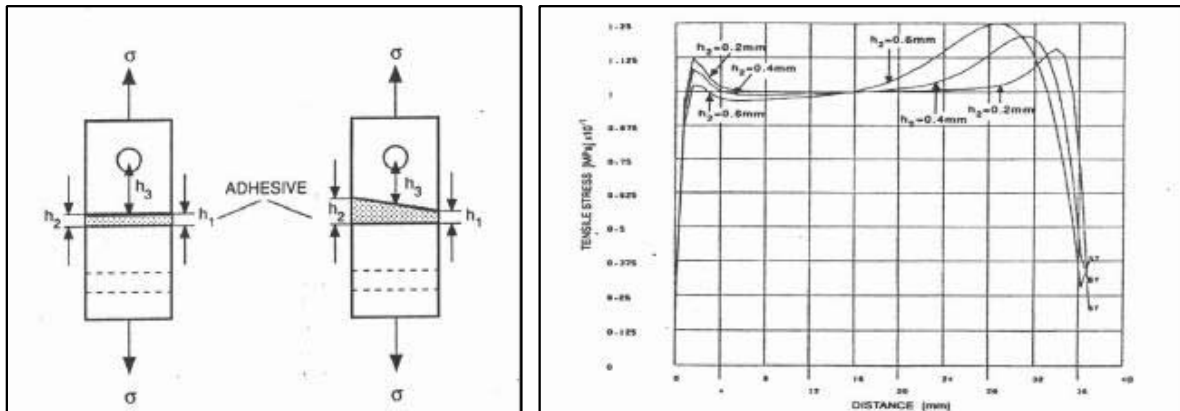


Fig. 1.27 : Variation de la distribution des contraintes le long de l'interface supérieur d'un joint abouté d'épaisseur variable pour différentes variations d'épaisseur de joint [98].

Enfin, des études sur les joints aboutés ont été réalisées en utilisant des substrats bois et en faisant varier la valeur de l'angle d'aboutage [101], ce qui permet de passer d'un mode de sollicitation en traction à un mode mixte de sollicitation puis principalement en cisaillement. L'influence de l'endommagement sur la rupture a été étudié lors de ces travaux mais aussi dans le cas de structures bois collées de type « sifflet » [102] par un procédé d'émission acoustique. Dans le cas de déformations plastiques, de rupture de fibres, d'amorçage et de propagation de fissures, il existe une libération d'énergie brutale qui provoque la diffusion d'ondes sous forme de salves au sein du matériau étudié. Par l'étude des salves, il est possible d'identifier certains processus non linéaires intervenant dans la rupture de l'assemblage.

5. Conclusion :

Cet état des connaissances concernant les méthodes de dimensionnement des assemblages collés selon une approche multi matériaux a été réalisée dans le but de collecter un maximum de données sur les travaux déjà réalisés dans ce domaine et ce, dans tous les secteurs de l'industrie faisant appel aux techniques d'assemblages par collage. Plusieurs résultats importants émergent de cette étude. Tout d'abord, les critères de dimensionnement classiques semblent insuffisants à une bonne description de la tenue de l'assemblage face aux sollicitations appliquées en service et les résultats qu'ils donnent divergent de la majorité des résultats expérimentaux. Les moyens de calculs par éléments finis permettent maintenant d'atténuer ces divergences mais un problème demeure, par exemple, dans le cas des conditions limites réelles aux bords d'un joint à simple recouvrement.

Nous avons vu que les essais réalisés sur les assemblages collés pouvaient être ceux précédemment détaillés (joint à simple recouvrement, joint abouté...) mais aussi des tests mettant en jeu une localisation des contraintes dans le joint (essais de pelage ou de clivage)

pour amorcer sa rupture. Le premier type d'essai permet une étude des champs de contraintes, de la résistance de l'assemblage et du mode de rupture du joint (rupture cohésive, adhésive, déviée...). Les critères de dimensionnement peuvent ainsi être déterminés, par exemple, à l'aide de l'analyse limite.

L'analyse limite permet de prévoir les conditions de rupture à partir de la géométrie de la structure et de sa résistance ultime. Elle dépend de la sollicitation et de l'anisotropie du matériau. Dans sa modélisation, la rupture a lieu lorsqu'un vecteur de contrainte traverse l'enveloppe limite. Cette enveloppe est représentée par des fonctions dépendant de la sollicitation mécanique et des paramètres du matériau. Différents critères de rupture ont ainsi été établis (Tsai, Saint Venant, Rankine, Von Mises, Raghava ou Ishai).

Le deuxième type d'essai, s'il permet d'atteindre les mêmes grandeurs que le premier, possède l'avantage de pouvoir accéder en plus à des grandeurs nouvelles telles que l'énergie de rupture de l'assemblage, le taux de restitution d'énergie élastique critique permettant un meilleur dimensionnement du joint de colle.

De ce fait, cette approche par la Mécanique de la Rupture apparaît donc fondamentale dans l'étude des assemblages collés.

Chapitre 2

Dimensionnement par la Mécanique de la Rupture des assemblages collés

L'étude du comportement à rupture des assemblages collés est un domaine où les procédures expérimentales sont complexes tant le nombre de paramètres intervenant dans la qualité du collage peut être varié. Ainsi, les essais que l'on peut trouver dans la littérature ne permettent que d'accéder à quelques grandeurs globales du joint de colle mais pas d'appréhender son comportement mécanique.

Les essais normalisés, pour chaque mode de sollicitation, sont des essais de configuration relativement simple obéissant à un protocole rigoureux tant au niveau de la mise en forme de l'assemblage qu'à celui de l'expérience elle-même. 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 bien souvent que d'accéder à la force moyenne à rupture de l'assemblage et à certaines grandeurs statistiques sur le type de rupture observé. Ainsi, les essais normalisés mécaniques qualifiant la qualité d'un collage se feront sous diverses sollicitations relatives à la fonction structurale du collage. Ce seront des essais de traction perpendiculaire au plan de collage, de cisaillement du plan de collage ou de pelage. De plus, compte tenu de la nature particulière du substrat bois, les essais entrepris devront soigneusement tenir compte de l'essence de bois utilisée et des conditions expérimentales de température et d'humidité, pour ne citer qu'elles, dont l'influence est primordiale [135, 115]. Les configurations classiques d'essais normalisés dans le domaine du bois [53, 54] sont l'étude des liaisons par aboutage en flexion ou en traction (NF B51-021, NF B51-022, ASTM D4688-95), l'étude dans le lamellé-collé du cisaillement en traction ou compression (NF B51-032, NF EN 391, NF EN392, NF T76-108, ASTM D4680-92) à partir de la configuration d'essai à simple recouvrement. Ces configurations ne permettent d'obtenir que la force à rupture de l'assemblage et le mode de rupture associé (adhésive, cohésive dans le bois ou la colle).

Si l'on s'intéresse aux essais réalisés dans le domaine de la recherche, on retrouve des configurations souvent voisines des précédentes. En effet, de nombreuses modélisations sur le comportement des joints collés sollicités en cisaillement se font à partir de la configuration à simple recouvrement même si les travaux d'Adams [50] ont montré que lors de la sollicitation, il existe un moment de flexion dans les substrats qui induit un phénomène de clivage s'ajoutant au cisaillement exercé. Ainsi, à partir d'un certain niveau de charge, le joint est soumis à une sollicitation mixte de traction et de cisaillement [50]. De plus, il apparaît que la mise en forme du joint est décisive quant au comportement à rupture de l'assemblage ; par exemple, si le joint de colle enclave le coin inférieur du substrat supérieur, ceci crée une singularité géométrique critique pour l'assemblage [50]. Certaines alternatives existent à ces problèmes comme d'éliminer les concentrations de contraintes aux bords du joint par la fabrication d'un spécimen à épaisseur de joint variable le long du recouvrement [88]. Dans le cas des essais de clivage du joint, la majeure partie des travaux se fait par une approche

mécanique de la rupture qui permet d'analyser le comportement sous charge d'une fissure dans l'adhésif et le type de rupture induite

Ce type d'approche a pour objet l'étude des fissures macroscopiques, notamment le calcul des champs de contraintes et de déformations, et l'obtention de données expérimentales permettant de porter un jugement sur la cinétique de propagation des défauts et leur taille critique, au-delà de laquelle la rupture instable sera déclenchée pour une sollicitation donnée. Deux types d'analyses seront abordés : tout d'abord, une analyse élastique linéaire dont les limites seront démontrées puis une analyse non linéaire tenant compte des phénomènes de dissipation d'énergies se produisant en avant du fond de fissure (plasticité, endommagement) et dont l'existence et l'importance ne peuvent plus être négligées dans les critères de dimensionnement des assemblages collés.

1. Etude par la Mécanique de la rupture des assemblages collés :

La figure 2.1 présente la défaillance d'une structure fondée sur la rupture catastrophique amorcée à partir d'un défaut. Pour prévoir ce type de défaillance, des critères ont été proposés. Ils établissent soit un rapport entre une excitation mécanique et la réponse du matériau, soit une relation entre la sollicitation mécanique, la taille du défaut et la réponse du matériau. En effet, tout défaut présent dans une structure provoque localement des concentrations de contraintes facilitant sa propagation et le processus de rupture. Sur cette figure, on peut schématiser en trois régions distinctes le rapport entre la sollicitation mécanique et la taille du défaut (fissure).

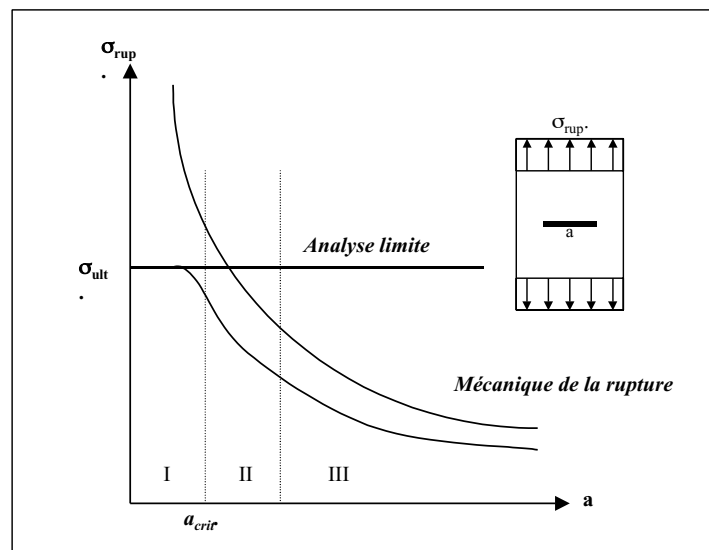


Fig. 2.1 : Relation entre contrainte de rupture et taille du défaut. [101]

- **région I** : Dans cette zone, la taille du défaut n'intervient pas et la défaillance peut être prévue à partir de l'analyse limite. Ces défauts non influents ont une taille dépendante de la taille de la structure. L'analyse limite fera appel à la contrainte ultime du matériau dans la direction de sollicitation et la recherche du critère de défaillance revient au choix d'une fonction appropriée qui reflète au mieux les résultats expérimentaux.
- **région III** : Dans cette région, la contrainte limite est inférieure à la contrainte ultime du matériau et dépend de la taille du défaut. La prévision de la rupture fait appel à la mécanique de la rupture qui postule que celle-ci se produit lorsqu'une fonction de la contrainte appliquée et de la taille du défaut atteint une valeur seuil appelée ténacité K_c .
- **région II** : Intermédiaire entre les deux premières zones, elle n'a pas fait jusqu'ici l'objet d'études approfondies. Elle peut être considérée comme relevant d'une interpolation entre la mécanique de la rupture et l'analyse limite.

Nous avons vu dans la partie traitant des conditions de vieillissement des assemblages collés que le joint d'adhésif était soumis à des sollicitations extérieures pouvant être mécaniques, chimiques, thermiques, hydriques qui peuvent conduire à la ruine de la structure. De façon générale, l'endommagement du joint de colle (apparition de micro cavités, micro fissures) aboutit à la création de fissures macroscopiques suffisamment grandes pour que le volume qui les entoure satisfasse aux hypothèses de la mécanique des milieux continus. On dit alors qu'on entre dans le domaine de *la mécanique de la rupture*. Celle-ci a pour objet l'établissement des données expérimentales qui permettent de porter un jugement sur la cinétique de propagation des défauts et leur taille critique, au-delà de laquelle la rupture instable sera déclenchée pour une sollicitation donnée. L'important développement théorique de la mécanique de la rupture depuis les années 1960 doit beaucoup aux progrès réalisés dans la mise au point de méthodes de contrôle non destructif.

Les fondements de la mécanique de la rupture furent d'abord établis en élasticité linéaire par Griffith en 1920 [103] puis développés par Irwin en 1956 [104] dans le cas de plasticité confinée en fond de fissure dans le but de décrire les phénomènes de fissuration dans les matériaux isotropes. Sous l'impulsion de l'intérêt grandissant pour les matériaux composites en particulier, la mécanique de la rupture est maintenant appliquée au délaminage de ce type de matériaux et à l'étude des assemblages collés.

1.1. Mécanique Linéaire Elastique de la rupture (MLER)

1.1.1. Relations fondamentales de la MLER :

Vers 1920, Griffith fut le premier à proposer une théorie fondée sur la redistribution de l'énergie élastique restituée lors de l'avancée de la fissure et l'énergie dissipée sous forme de création de nouvelles surfaces. La théorie de Griffith, dont les travaux ont d'abord porté sur des matériaux très fragiles tels que le verre, s'appuyait sur le calcul de la densité d'énergie de déformation contenue dans une cavité elliptique. Depuis, cette théorie a été étendue. De façon générale, on appelle W_p l'énergie potentielle totale disponible dans la structure. Ainsi, la propagation d'une fissure est caractérisée par l'énergie par unité de surface nécessaire à la création d'une nouvelle aire fissurée. Cette énergie, appelée taux de restitution d'énergie critique G_c , est une grandeur intrinsèque du matériau.

Si on considère un solide comprenant une fissure de longueur a et de largeur b , le taux de restitution d'énergie peut être calculé à partir de la relation suivante :

$$G = \frac{1}{b} \frac{\partial W_p}{\partial a} \quad (2.1).$$

L'énergie constante de ce système comprend l'énergie potentielle des forces appliquées W , l'énergie élastique emmagasinée W_e , l'énergie de surface $(2A)\gamma_s$, A surface de la fissure et enfin, éventuellement, l'énergie cinétique W_c .

Le 1^{er} principe de la thermodynamique indique que :

$$dW + dW_e + d(2A)\gamma_s + dW_c = 0 \quad (2.2).$$

Si on pose que $W_p = W + W_e$, la relation précédente devient :

$$dW_p + d(2A)\gamma_s + dW_c = 0 \quad (2.4).$$

A l'équilibre, dW_c est nulle d'où :

$$G = G_c = 2\gamma_s \quad (2.5).$$

Si G dépasse ce seuil critique, la fissure se propage.

Si on note P la force appliquée à la structure et δ son déplacement, alors le taux de restitution d'énergie G a pour expression :

$$G = \frac{1}{2A} (P \dot{\delta} - \dot{P} \delta) \quad (2.6).$$

où $A=ba$ est l'aire fissurée, $\dot{\delta} = \frac{d\delta}{dt}$ et $\dot{P} = \frac{dP}{dt}$.

Cette relation peut donc s'écrire, dans le cas d'un essai réalisé à force ou déplacement imposé :

$$G = \frac{1}{b} \frac{\partial W}{\partial a}(a, P) \quad \text{ou bien} \quad G = \frac{1}{b} \frac{\partial W}{\partial a}(a, \delta) \quad (2.7).$$

Si on désigne par $C(a)$ la complaisance de la structure contenant une entaille initiale de longueur a telle que $C(a) = \delta/P$, on obtient l'expression de G , taux de restitution d'énergie :

$$G = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} \quad (2.8).$$

On peut montrer que cette énergie est liée à l'intensité des contraintes en fond de fissure aboutissant au calcul des facteurs d'intensité de contraintes K.

On se place en mode I dans un cas plan. On suppose qu'une figure de longueur a progresse jusqu'à une longueur $a+\Delta a$. Nous devons déterminer, au cours de cette propagation, l'énergie élastique libérée. Elle est égale, en valeur absolue, au travail ΔW nécessaire pour refermer la fissure sur la longueur propagée. Lorsque la fissure a une longueur $a+\Delta a$, l'écartement des points situés sur les lèvres de la fissure entre a et $a+\Delta a$ est celui donné par les relations donnant le déplacement en mode I pour une longueur $a+\Delta a$, un angle $\theta=\pi$, une distance $r'=\Delta a-x$.

Lorsque la fissure s'est refermée de Δa , sa longueur est a . Les forces de fermeture à une distance x en avant de la fissure sont données par :

$$df = b\sigma_{yy} dx \quad (2.9).$$

Où σ_{yy} est le champ de contrainte connu analytiquement [125]. Le travail total pour les deux lèvres de la fissure sera égal à :

$$\Delta W = b \int_0^{\Delta a} \sigma_{yy} u_y dx = G.b.\Delta a \quad (2.10).$$

Tous calculs faits, on obtient en déformation plane :

$$G = \frac{K_I^2 (1-\nu^2)}{E} \quad (2.11).$$

puis dans le cas d'un état de contrainte plane.

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad (2.12).$$

Le même type de calcul peut être réalisé en cisaillement (plan et antiplan). Cependant, il est nécessaire de supposer que la fissure se propage dans son propre plan. On obtient ainsi la relation générale :

$$G = \frac{(K_I^2 + K_{II}^2)(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1+\nu)}{E} K_{III}^2 \quad (2.13).$$

Cependant, la propagation d'une fissure en mode II et en mode mixte n'est généralement pas coplanaire et le résultat précédent n'est que formel.

L'application de la MLER à la rupture des assemblages collés a fait l'objet de nombreux travaux sur le collage des matériaux. Les principales références que nous pouvons trouver dans la littérature traitent en majorité de la rupture des assemblages collés en Mode I en utilisant le spécimen D.C.B. (Double Cantilever Beam). Il n'est évidemment pas possible de parler de tous les travaux réalisés sur ce type d'essai mais plutôt d'en donner un éventail le plus large possible.

1.1.2. Rupture des assemblages collés en ouverture :

La configuration d'essai de Mode I est la plus utilisée car la plus facile à mettre en œuvre. De plus, nous avons vu précédemment que les sollicitations de traction s'avèrent souvent être les plus néfastes à une bonne tenue des structures collées. Pour ces deux raisons, les études de rupture en ouverture des assemblages collés se sont multipliées. Les premiers essais ont été réalisés sur des substrats acier, aluminium ou bois et auraient plutôt tendance de nos jours à s'orienter vers les problèmes de délaminage dans les structures composites. Les adhésifs utilisés pour ce genre d'étude sont des adhésifs de type époxy dont le comportement mécanique apparaît comme étant très fragile et pour lesquels l'utilisation de la MLER s'avère justifiée, tout au moins au niveau du comportement macroscopique de la structure. Ripling et Mostovoy [104] ont été les premiers à utiliser de tels procédés pour la détermination des propriétés à la rupture d'adhésifs structuraux à l'aide de spécimens D.C.B. et T.D.C.B. (Tapered Double Cantilever Beam) à inertie variable. Liechti et Freda [105] ont poursuivi leur travail et ont montré que les énergies de rupture mesurées sont toujours inférieures à celles prévues soit par la théorie des poutres (qui ne tient pas compte de la rotation des substrats en fond de fissure), soit par les calculs éléments finis qui ne considèrent qu'un Mode I pur. Il apparaît donc dans ces essais un mode mixte en fond de fissure dont il faut tenir compte par un facteur correctif. Cependant, les énergies de rupture mesurées expérimentalement dépendent fortement de la propagation de la fissure qui peut être adhésive, cohésive dans la colle ou les substrats, ou oscillante d'une interface à l'autre. Ce phénomène, observé par Chai [106] et étudié par Akisanya et al [107], semble être dû au mixage de mode en avant du fond de fissure provoqué par les différences de caractéristiques des substrats et de la colle.

Ces travaux montrent qu'un tel phénomène peut se produire quand les conditions suivantes sont réunies :

- il existe une contrainte résiduelle de traction dans la couche de colle.
- il existe des défauts à l'interface dus au polissage des substrats avant collage.
- la longueur d'onde de l'oscillation de la fissure entre les deux interfaces dépend des différences de caractéristiques des matériaux (données par α et β), de la grandeur adimensionnelle ξ , et du rapport s/h .

On donne :

$$\alpha = \frac{(1-\nu_2)/\mu_2 - (1-\nu_1)/\mu_1}{(1-\nu_2)/\mu_2 + (1-\nu_1)/\mu_1} \quad (2.14).$$

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{(1-2\nu_2)/\mu_2 - (1-2\nu_1)/\mu_1}{(1-\nu_2)/\mu_2 + (1-\nu_1)/\mu_1} \quad (2.15).$$

avec n et m respectivement coefficient de Poisson et module de cisaillement des matériaux (1 pour les substrats et 2 pour la colle).

$$\xi = \sigma_0 \sqrt{h} / \sqrt{E^* \Gamma_I} \quad (2.16).$$

Où σ_0 est la contrainte de traction résiduelle dans la colle, h l'épaisseur du joint, E^* le module élastique équivalent de la structure en déformation plane, Γ_I la ténacité de l'interface en mode I et s la distance parcourue entre les deux interfaces. Ce type de propagation n'a pu être observé que dans le cas d'adhésifs fragiles.

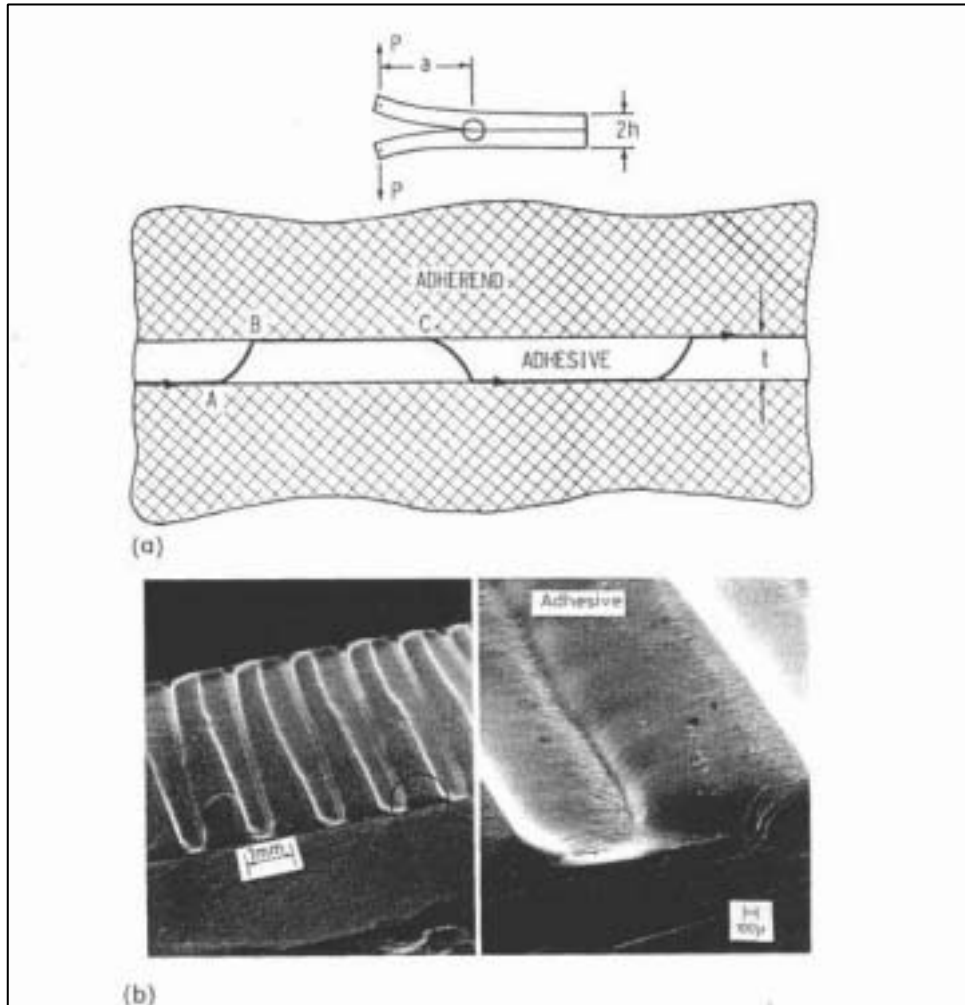


Fig. 2.2 : Propagation d'une fissure oscillant d'un interface à l'autre en Mode I. [107]

Dans la lignée de ces travaux, Akisanya et al [108] ont étudié la propagation d'une fissure en mode mixte à l'aide d'éprouvette D.C.B. asymétriques.

Ils ont ainsi pu montrer que la résistance à la rupture s'accroît lorsque le domaine de mode mixte augmente, que la longueur d'onde d'oscillation entre les deux interfaces croît lorsque la contrainte résiduelle de traction dans le joint augmente ainsi que l'épaisseur d'adhésif. Penado [109] a développé un modèle de dimensionnement des assemblages collés permettant de

calculer les taux de restitution d'énergie de couples adhésif/substrat assemblés en D.C.B. et sollicités en ouverture, et ce dans le cas de fissuration cohésive. Malgré tout, il souligne l'importance de la définition des effets de cisaillement dans la précision du modèle ; ces effets étant amplifiés par la présence de substrats épais, de fissures courtes ou de matériaux composites.

Des essais de Mode I peuvent aussi être réalisés sur des éprouvettes C.T. collées (Compact Tension). Ce type de travaux a été réalisé par Daghyani et al [110] pour voir l'influence de particules souples ajoutée à une résine époxy sur le mode de rupture d'assemblages collés sollicités en ouverture. Les taux de restitution d'énergie critiques d'une éprouvette C.T. sont déterminés par la formule suivante :

$$K_{IC} = \frac{P_c Q}{b\sqrt{w}} \quad (2.17).$$

Où Q est le polynôme de calibration de l'éprouvette C.T. collée

$$Q = 29.6(a/w)^{1/2} - 185.5(a/w)^{3/2} + 655.7(a/w)^{5/2} - 1017(a/w)^{7/2} + 638.9(a/w)^{9/2} \quad (2.18).$$

Le taux de restitution d'énergie en déformation plane étant obtenu à partir de la relation (2.13). Ces travaux montrent que l'ajout d'une faible quantité de particules souples provoque une augmentation remarquable de la résistance à la rupture accompagnée d'une légère diminution de module d'Young et de contrainte limite d'écoulement. Cependant, ces observations montrent que l'écoulement de cisaillement est le mécanisme majeur de déformation responsable de la haute résistance à la rupture de ce type d'adhésif et qu'une augmentation supplémentaire de la teneur en particules souples n'accroît pas cette résistance. L'approche par la MLER ne semble donc plus aussi bien adaptée à ce type d'adhésif.

Dans le cas des assemblages bois collés, les travaux de Komatsu et al [111] montrent que le comportement non linéaire doit être pris en compte au moins pour les joints les plus épais dans la détermination de l'énergie de rupture. Mijovic et Koutsky [112] ont étudié par la MLER l'influence de l'angle de fil du bois par rapport au plan de collage sur les énergies de rupture. Il semble, à la lumière de ces travaux, que la faible viscosité d'une résine époxy entraîne une pénétration différente de l'adhésif dans le bois selon l'orientation du fil. Ces travaux, repris par la suite par Ebewe et al [113] sur un spécimen à inertie variable assemblé à l'aide d'une colle structurale résorcine-phénol-formol confirment l'importance de l'angle de fil sur l'énergie de rupture. En effet, les conditions de mouillabilité sont modifiées avec l'angle de fil ce qui influence directement la valeur de l'énergie de rupture. De même, il existe une épaisseur de joint optimale permettant d'obtenir un fort taux de restitution d'énergie critique. L'avantage de l'éprouvette à inertie variable est qu'elle permet une propagation stable de la fissuration en compensant la diminution de la complaisance lors de la propagation par une augmentation de son inertie. De même, des essais sur une éprouvette collée de forme triangulaire ont été menés par Liu et al [114] sur la rupture cohésive de mastic silicone.

Enfin, les travaux de Haller [115] montrent la grande difficulté d'obtenir des résultats reproductibles sur la rupture des assemblages bois collé du fait de la grande diversité du type de fissuration obtenu. Ainsi, il est fréquent de coupler des essais de rupture d'assemblages collés à des observations en microscopie des faciès de rupture afin d'isoler les phénomènes propres à chaque mode de fissuration.

1.1.3. Rupture des assemblages collés en cisaillement :

Des essais de flexion trois points ont été réalisés sur des spécimens collés par Chai et Mall [116] à partir des travaux réalisés sur le bois massif par Barrett et Foschi dans le but d'obtenir un mode II pur en fond de fissure. Le taux de restitution d'énergie est alors calculé comme en Mode I par la relation (2.13). Dans ces travaux, les auteurs ont appliqué la théorie des poutres au spécimen E.N.F. (End Notch spécimen in Flexure) afin de rechercher les domaines de stabilité de la fissuration. Une comparaison est réalisée entre les taux de restitution d'énergie expérimentaux et ceux déterminés à partir de la théorie des poutres et de calculs éléments finis. Les valeurs expérimentales excèdent toujours les valeurs obtenues par la théorie des poutres. Chai applique les mêmes principes [117] que précédemment et fait varier l'épaisseur du joint d'une valeur minimale correspondant à une faible fraction de la zone d'endommagement à l'extrémité d'une fissure naturelle à une valeur suffisamment grande pour provoquer une rupture globale. Le processus de rupture démarre avec le développement de micro fissures en avant de l'extrémité du fond de fissure et se poursuit avec l'étalement de cet endommagement au travers des ligaments interfaciaux des micro fissures. Les énergies ainsi déterminées s'avèrent donc supérieures à celles déterminées par la théorie des poutres et la MLER. Par la suite, il étudie les effets de l'épaisseur du joint sur les mécanismes de rupture en cisaillement [118] et compare les calculs élastiques à des résultats expérimentaux et des calculs élasto plastiques. Il montre ainsi la limite de validité des hypothèses élastiques linéaires en fonction de l'épaisseur du joint de colle, comme le souligne la courbe de la figure 2.3.

Daghyani et al [119] ont réalisé des essais de propagation de fissure à l'interface sur des spécimens C.P.S. collés (Compact Pure Shear) et ont comparé leurs résultats expérimentaux à ceux obtenus en appliquant une analyse élastique de l'état des contraintes semblable à celle de Goland et Reissner. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance des résultats expérimentaux et théoriques d'une part puisque les ruptures observées sont interfaciales et de type fragile, et une évolution de G_{IIc} avec l'épaisseur du joint qui augmente fortement au début pour atteindre un plateau par la suite à partir d'environ 0.2 mm. Enfin, des travaux se sont portés sur l'élaboration de spécimens permettant une

fissuration d'assemblages collés à taux de restitution d'énergie maintenu constant durant la propagation [120]. De tels spécimens existent déjà pour la fissuration du bois massif.

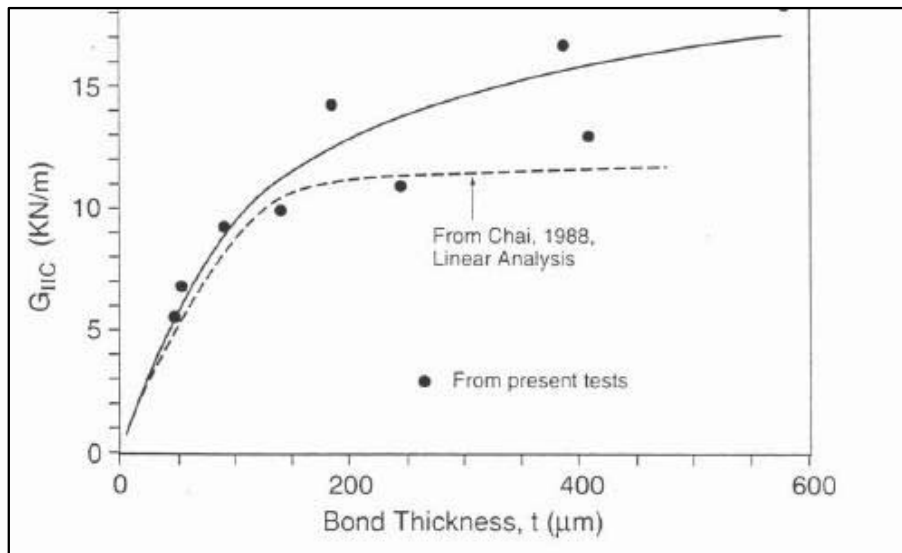


Fig. 2.3 : Variation de l'énergie de rupture de Mode II en fonction de l'épaisseur du joint de colle ; différence entre analyse élastique et élasto plastique [118].

On peut souligner que quelques travaux ont été réalisés par Chai sur des sollicitations de Mode III et que les observations faites sur ces travaux sont proches des précédentes.

On a pu voir ci dessus que les sollicitations, même si elles sont censées être soit en mode I pur ou en Mode II pur, s'avèrent souvent être un mixage de mode I et II. De nombreuses études ont été réalisées ces dernières années sur des assemblages collés sollicités en Mode mixte. La mise en œuvre la plus facile est l'utilisation d'éprouvettes D.C.B. asymétriques. Des essais ont aussi été réalisés sur des substrats aluminium assemblés par une résine époxy mais n'ont pas apporté de résultats décisifs dans la compréhension du comportement des assemblages collés [121]. Une étude plus théorique a été réalisée sur ce type d'éprouvette [122] en utilisant la théorie des poutres associée au modèle de Kanninen dans le cas d'une fissure se propageant à l'interface d'un bimatériau. Il a été montré que pour des assemblages à caractéristiques mécaniques pas trop différentes, les résultats donnés par cette analyse sont proches de l'expérience. Une étude similaire a été réalisée sur des composites afin d'observer l'effet de l'épaisseur du joint sur le comportement à rupture [123] pour un rapport de mode mixte constant. Les énergies mesurées dépendent alors fortement du chemin de propagation.

Enfin, les travaux réalisés par Ducept [124] sur les matériaux composites en Mode I, II puis mixte montrent l'apport des techniques comme l'émission acoustique dans la localisation de

l'amorçage d'une fissure afin d'obtenir un critère de rupture cohérent par rapport à l'assemblage testé et la sollicitation appliquée.

L'analyse du comportement à rupture par la mécanique linéaire élastique de la rupture semble être une approche cohérente dans le cas de fissures interfaciales, se propageant dans des adhésifs à comportement très fragile ou pour des épaisseurs de joints très petites. Cependant, la tendance actuelle est à l'élaboration d'adhésifs structuraux de plus en plus complexes dont le comportement mécanique apparaît comme étant lui aussi de plus en plus complexe. De plus, on a pu voir dans les études détaillées auparavant que l'analyse élastique linéaire sous estime presque dans tous les cas les valeurs des taux de restitution d'énergie critiques par la présence de phénomènes dissipatoires en avant du fond de fissure (plasticité, endommagement). Ainsi, une analyse non linéaire du comportement à rupture des assemblages collés est fortement indiquée dans le cas de problèmes de dimensionnement des assemblages.

1.2. Mécanique Non Linéaire de la Rupture (MNLR)

Tout comme pour la mécanique linéaire de la rupture, les relations fondamentales d'analyse des fissures en élasto plasticité (MNLR) apparaissent dans le paragraphe suivant.

1.2.1. Relations fondamentales en élasto plasticité :

Le principe de cette théorie réside dans le fait que la solution obtenue en élasticité n'a aucune réalité physique. Ceci est tout spécialement vrai pour les métaux pour lesquels on conçoit aisément que les contraintes en fond de fissure vont être « écrêtées » par la plasticité.

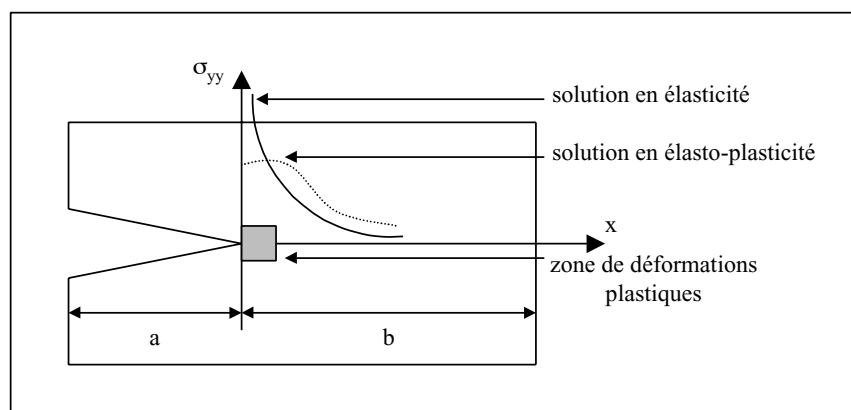


Fig. 2.4 : Schéma de principe illustrant l'abaissement des contraintes en fond de fissure produit par l'apparition de la plasticité. [126]

Deux questions se posent alors :

- Dans quelle mesure la plasticité affecte la solution établie dans le cadre élastique ?
- La signification énergétique de la rupture par la définition du taux de restitution d'énergie n'est plus aussi claire du fait de l'irréversibilité des déformations plastiques.

1.2.1.1. Cas de la plasticité confinée. Modèle d'Irwin [125] :

Le modèle d'Irwin s'applique aux conditions de contrainte plane. Le matériau est supposé être parfaitement plastique et obéit au critère de Tresca, soit $2k=R_p$, R_p étant la limite d'élasticité du matériau. Comme nous pouvons le voir sur la figure précédente, la contrainte qui s'applique dans la zone plastifiée est constante et vaut R_p . En élasticité, la contrainte à une distance r du fond de fissure vaut :

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.19).$$

La contrainte σ_{yy} atteint la limite R_p à une distance R_y telle que :

$$R_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{R_p} \right)^2 \quad (2.20).$$

En réalité, la zone déformée plastiquement est plus étendue de façon à respecter l'équilibre des contraintes. Il faut, en effet, compenser la troncature de la distribution élastique pour $r < R_y$. On fait alors une hypothèse simple selon laquelle la distribution élastique de la contrainte σ_{yy} est translatée d'une quantité X dont la valeur est, après calcul,

$$X = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{R_p} \right)^2 = R_y \quad (2.21).$$

Ainsi, la dimension de la zone plastique est :

$$R_{zp} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{R_p} \right)^2 \quad (2.22).$$

Ce calcul est évidemment approximatif puisque l'équilibre des contraintes n'est assuré que dans le plan qui prolonge la fissure. De plus, ce calcul n'est valable que si la dimension de la zone plastique est petite devant les autres dimensions. On remarque que la fissure accompagnée de sa zone plastique se comporte comme une fissure élastique fictive de longueur $(a+R_y)$.

1.2.1.2. Modèle de Dugdale – Barenblatt [126] :

Ce modèle qui permet de s'affranchir de l'hypothèse de strict confinement de la zone plastique en fond de fissure est une illustration de l'extension du principe de superposition.

Considérons une fissure de longueur $2a$ dans une plaque infinie soumise à une contrainte uniforme à l'infini notée σ_∞ . La plasticité est modélisée par des efforts égaux à la

limite d'élasticité du matériau. Ces efforts constants s'exercent sur une longueur R_p , taille de la zone plastique à déterminer, devant chaque extrémité de la fissure.

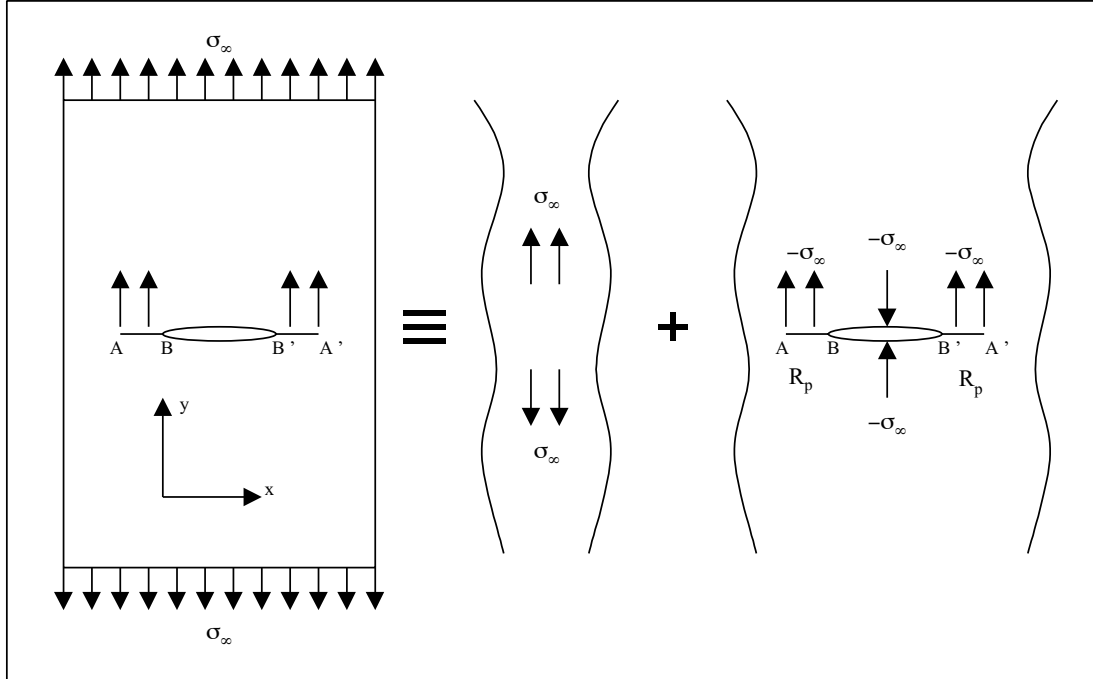


Fig. 2.5 : Modèle de Dugdale – Barenblatt. [126]

Par superposition, les conditions aux limites du problème, ramenées sur la figure, s'écrivent :

$$\sigma_{yy}(x,0) = -\sigma_{\infty} \quad \text{si} \quad |x| \leq a \quad (2.23).$$

$$\sigma_{yy}(x,0) = -\sigma_{\infty} + R_p \quad \text{si} \quad a \leq |x| \leq a + R_D \quad (2.24).$$

On peut ainsi calculer la valeur de la zone plastifiée R_D :

$$R_D = a \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi\sigma_{\infty}}{2R_p}\right)} - 1 \right] \quad (2.25).$$

Dans le cas où $\sigma_{\infty} \ll R_p$, le développement limité de cette expression devient :

$$R_D \approx \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{R_p} \right)^2 \quad (2.26).$$

Par le calcul, on peut obtenir la valeur de l'ouverture de fissure δ comme étant égale à :

$$\delta = \frac{8 R_p}{\pi E} a \operatorname{Ln} \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi \sigma_\infty}{2 R_p}\right)} \right] \quad (2.27).$$

On peut noter que dans le cas de polymères (et les adhésifs, par exemple), cette longueur de zone plastique est assez bien vérifiée.

On peut accéder à la valeur R_p par la mesure du déplacement des lèvres de la fissure δ appelé en anglais le C.T.O.D. (Crack Tip Opening Displacement).

$$\delta \approx \frac{K_I^2}{E R_p} \quad (2.28).$$

où E est le module d'Young du matériau.

Dans le cas d'un matériau réel, on peut calculer l'énergie élastique restituée au cours d'une avancée virtuelle de la fissure en supposant une propagation sans déviation et l'absence de forces sur les lèvres de la fissure. On montre que la variation d'énergie est égale à la variation d'une intégrale de contour, indépendante du contour d'intégration : c'est l'intégrale de Rice.

1.2.1.3. Intégrale de Rice [126] :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$J = \int_{\Gamma} (W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (2.29).$$

où W est la densité élastique telle que

$$\sigma_{ij} = \partial W / \partial \varepsilon_{ij} \quad (2.30).$$

T est le vecteur contrainte en un point M de normale sortante orientée vers l'extérieur et u le vecteur déplacement au même point. Le contour Γ doit être orienté. Les propriétés de cette intégrale sont les suivantes :

- elle est indépendante du contour choisi.
- elle représente en élasticité non linéaire le taux de libération d'énergie correspondant à une avancée infinitésimale de la fissure soit

$$J = - \frac{dP}{bda} \quad (2.31).$$

où P est l'énergie potentielle totale et a la longueur de fissure.

Les études non linéaires de la rupture d'assemblages collés sont moins nombreuses que dans le cas du domaine élastique linéaire. Cependant certains travaux ont retenu notre attention.

1.2.2. Etude des assemblages collés par la mécanique non linéaire de la rupture :

Parmi les approches les plus intéressantes, on peut citer les suivantes ; l'influence de l'épaisseur du joint de colle a été étudiée par Chai [127] dans le cas d'assemblages collés à substrat aluminium sollicités en ouverture. Il apparaît une zone endommagée dans le cas d'adhésifs présentant un comportement ductile dont l'influence sur la rupture du joint varie en fonction de l'épaisseur de ce dernier comme le montre la figure suivante.

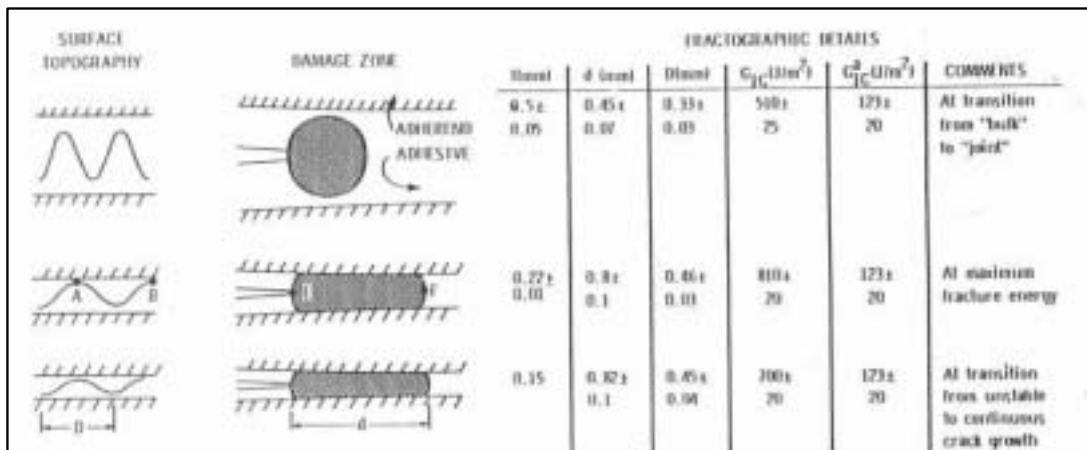


Fig. 2.6 : Caractéristiques des zones endommagées en fond de fissure pour 3 épaisseurs de joint [127].

Les observations de Chai sont confirmées par les travaux de Daghyani et al [128] sur des éprouvettes C.T. collées assemblées à l'aide d'un adhésif dont le comportement est matérialisé par un modèle élasto plastique à grande déformation.

De même, les travaux de Liechti [129] montrent l'importance des phénomènes non linéaires se produisant en avant du fond de fissure et leur influence sur sa propagation (plastification, micro cavitation et coalescence de micro vides, micro fissuration...).



Fig. 2.7 : Propagation d'une fissure dans un joint collé sollicité en cisaillement ; Développement de microfissures en avant du front de fissure réel [129].

Pour les assemblages collés sollicités en cisaillement, Chai [130] a mesuré l'évolution de la zone endommagée en fonction de la charge appliquée et son influence sur la propagation de la fissure. La fragilité de l'assemblage est estimée par l'introduction d'un coefficient λ tel que:

$$\lambda = L \sqrt{\frac{8G_a}{Eht}} \quad (2.32).$$

où L , E , h sont respectivement la longueur entre appuis, le module de Young et la hauteur du substrat, et G_a et t sont respectivement l'énergie de rupture pour une entaille de longueur a et l'épaisseur du joint. Si λ diminue, on note une augmentation de la longueur de la zone endommagée et par conséquent, l'assemblage tend vers un comportement ductile; l'amorce de la non linéarité du comportement est alors expliquée par la zone endommagée en fond de fissure initiale.

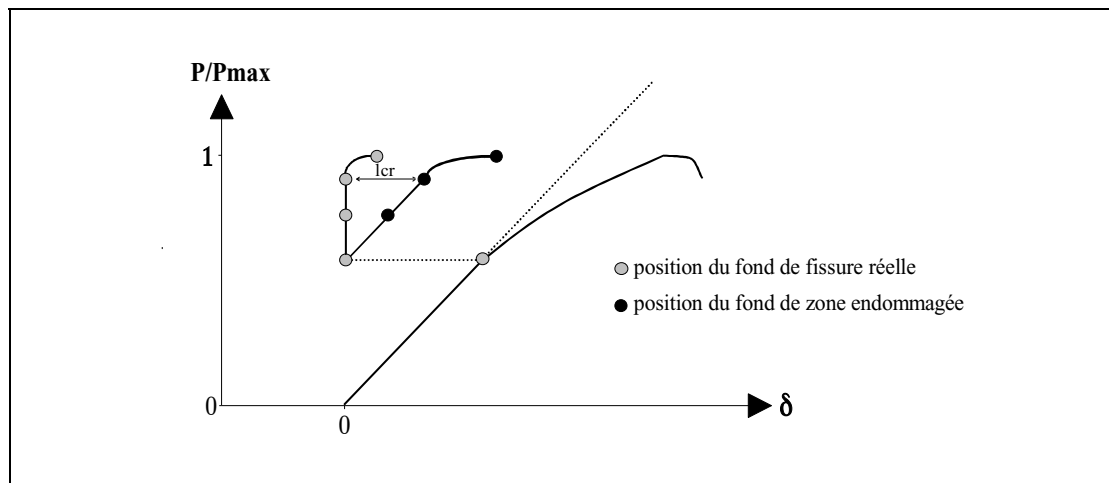


Fig. 2.8 : Courbe force déplacement (épaisseur $t=0.25$ mm) pour l'éprouvette E.N.F. [130]

Si la charge augmente, la taille de la zone endommagée croît jusqu'à atteindre une longueur critique. A cet instant, la charge appliquée à l'éprouvette est proche de la charge maximale et on note alors une progression simultanée du fond de la fissure réelle et du fond de la fissure fictive. Chai a, en outre, observé une augmentation de la longueur de la zone endommagée accompagnée d'une diminution de la déformation maximale de cisaillement dans le cas d'une augmentation de la raideur des substrats et/ou d'un accroissement de souplesse de l'adhésif.

Dans le cas de rupture cohésive de l'assemblage, le comportement non linéaire du joint de colle peut être matérialisé par des modèles généralement appliqués à des matériaux fragiles endommageables présentant un comportement adoucissant, tels que le béton par exemple. Elaborée par Hillerborg [1976 à 1990] pour l'étude du comportement adoucissant du béton lors de l'ouverture d'une fissure, la méthode de la fissure fictive peut ainsi être appliquée

aux joints collés [131]. Des discontinuités de caractéristiques mécaniques ou géométriques engendrent une concentration de contraintes et par conséquent favorisent l'apparition de grandes déformations locales. Ainsi, le modèle de la fissure fictive est fondé sur les hypothèses suivantes:

- la zone de fissuration cohésive (ou zone plastique) commence à se développer dès que la contrainte normale maximale atteint la limite élastique du matériau σ_u .

- le matériau, en fond de fissure, est endommagé mais est encore capable de transmettre des efforts; l'intensité de ces contraintes est dépendante de l'ouverture w d'une fissure dite fictive et correspond à une force de cohésion tendant à refermer la fissure.

- le fond réel de la fissure est défini comme étant le point où la distance entre les deux lèvres de la fissure est égale au déplacement d'ouverture critique w_c . Les contraintes de cohésion entre les bords de la fissure sont évidemment nulles.

- le fond de la fissure fictive est défini comme étant le point où la contrainte normale atteint σ_u et où l'ouverture de la fissure est nulle.

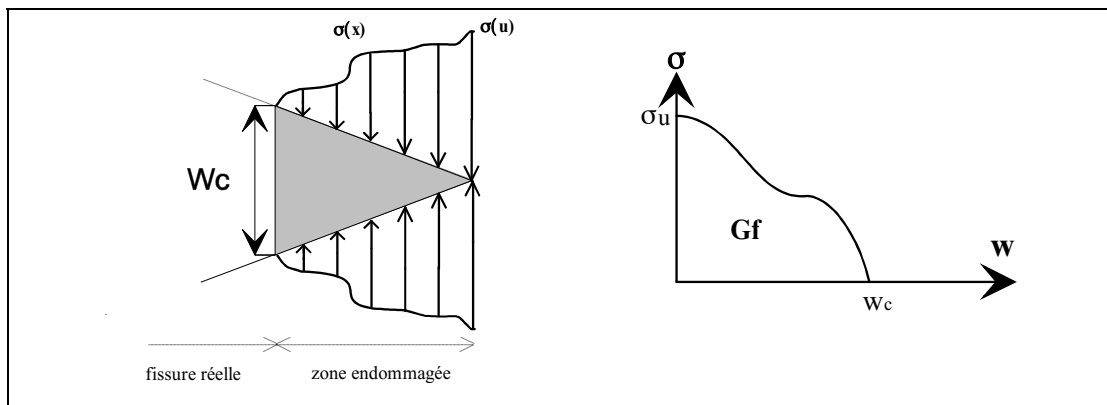


Fig. 2.9 : Fissure fictive

Loi constitutive du matériau [131]

Le matériau, malgré son caractère fragile, a un comportement adoucissant et nous sommes dans le cadre d'une mécanique non linéaire de la rupture (MNLR).

Une transposition de ce modèle peut être faite, au moins de façon formelle pour appréhender le comportement d'un assemblage collé sollicité en cisaillement.

Wernersson [132] a réalisé un essai de cisaillement à simple recouvrement et a proposé un indice de fragilité w d'un joint collé tel que:

$$w^2 = \frac{l^2 \tau_f^2}{E \cdot t \cdot G_f} \quad (2.33).$$

où l , t , b , E : respectivement longueur, épaisseur, largeur et module de Young du substrat. τ_f , G_f : cisaillement maximum et énergie de rupture de l'adhésif.

Le rapport τ_f^2/G_f caractérise la fragilité de l'adhésif. D'après Wernersson, le paramètre déterminant un comportement fragile de l'adhésif est G_f dans le cas où cette énergie est faible. A contrario, le paramètre déterminant un comportement ductile est τ_f si cette contrainte maximale de cisaillement supportée par l'adhésif est faible. De plus, l'indice de fragilité dépend de la taille du substrat ce qui, par conséquent, met en évidence un effet de dimension de la structure dont il faut tenir compte dans le dimensionnement.

Cet aspect peut s'observer sur la figure suivante où l'on peut voir que pour un indice de fragilité inférieur à 0.1, le comportement de l'assemblage peut être prédit par l'approche élastique idéale. De même, dans le cas d'un indice de fragilité supérieur à 100, un dimensionnement réalisé à l'aide de la MLER tenant compte des singularités de contrainte aux bords libres du joint peut être employé. Enfin, pour un indice de fragilité compris entre 0.1 et 100, on doit tenir compte de tous les facteurs intervenant dans la définition de l'indice de fragilité mais aussi de la forme de la courbe $\tau=f(\delta)$ obtenue lors de la mise en charge de la bande d'adhésif. Les aspects non linéaires du comportement induits par le joint de colle sont alors pris en comptes par cette approche. On peut observer expérimentalement que la majorité des assemblages se situe dans ce domaine.

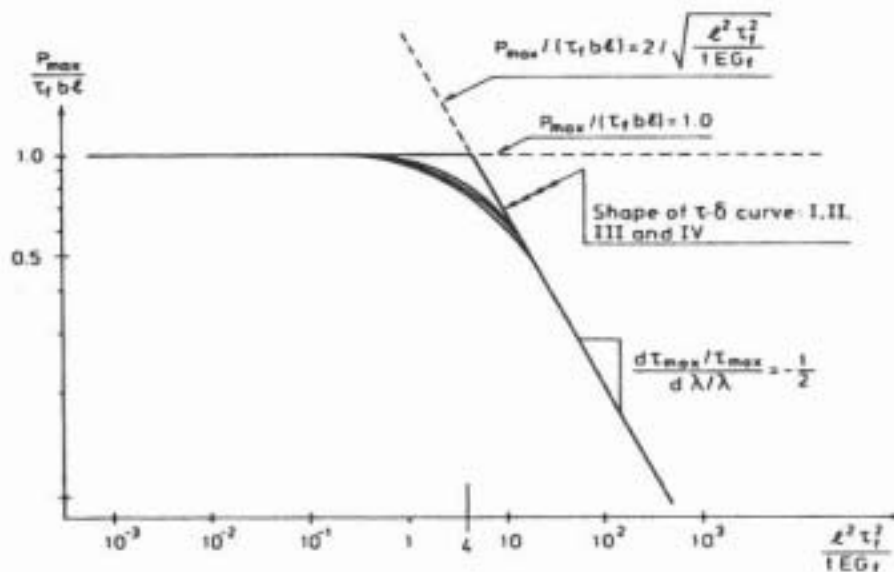


Fig. 2.10 : Résistance normalisée de l'assemblage à simple recouvrement en fonction de l'indice de fragilité défini par Wernersson [132].

Ce travail a ensuite été repris par Serrano [133] dans le but d'introduire un modèle tenant compte de la notion d'interface entre l'adhésif et le substrat (que l'on peut alors considérer comme une interphase du fait de la pénétration réelle de l'adhésif dans le bois). L'adhésif massif est modélisé à l'aide d'un modèle plastique et l'interphase par un modèle adoucissant

type Ottosen. Ainsi, l'interprétation du comportement adoucissant de l'interphase est faite à l'aide d'un modèle d'endommagement diffus permettant de modéliser de façon satisfaisante le comportement adoucissant de l'assemblage.

Enfin, on a pu voir que l'endommagement des adhésifs en avant du fond de fissure se faisait sous la forme de création de micro fissures, de micro cavitation et de coalescence de cette cavitation pour entraîner la propagation de la fissure. Une relation entre la structure moléculaire de l'interface et le taux de restitution d'énergie G peut être obtenue grâce à une analyse proposée récemment par Brown [134] et complétée par Xiao et Curtin [135].

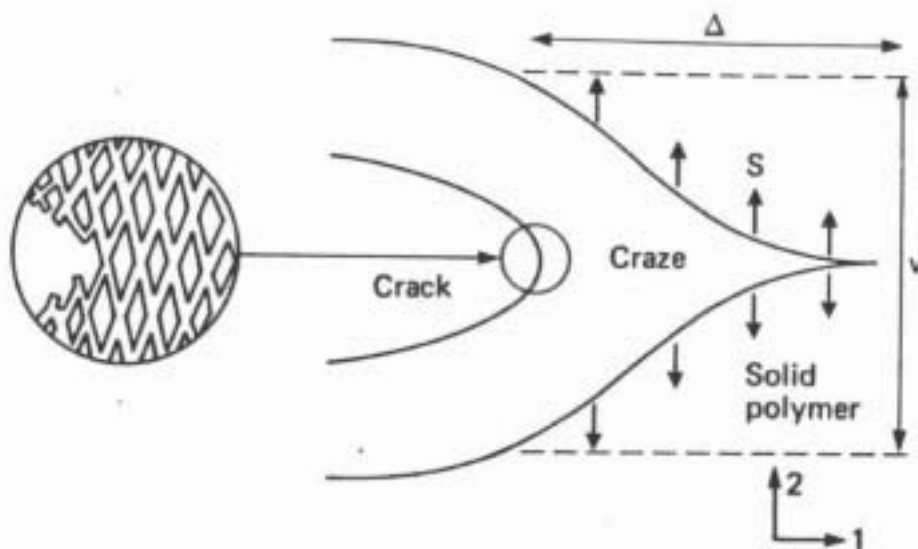


Fig. 2.11 : Diagramme de la géométrie des craquelures en fond de fissure dans le cas d'un polymère vitreux [134].

En effet, la zone endommagée est une structure fibrillaire contenant une grande majorité de vide et modélisée comme un réseau de fibrilles parallèles et ne pouvant pas transmettre de contraintes latéralement. Par conséquent, suivant le modèle de Dugdale, si chaque fibrille était soumise à la même contrainte σ_y , il était difficile de définir un critère moléculaire de rupture des fibrilles qui aurait pu relier la structure moléculaire à l'épaisseur maximum de la zone plastique h_f . En fait, les fibrilles composant la zone plastique sont formées par l'étirement du polymère à partir de cavités nucléées par la pression hydrostatique négative. Des mesures aux rayons X montrent que ces fibrilles sont reliées par des ponts et qu'elles forment plutôt une structure en treillis. La zone endommagée va donc être modélisée comme un milieu élastique anisotrope de module C_{22} dans le sens des fibrilles principales, C_{11} perpendiculairement à celui-ci et de module de cisaillement C_{12} . Par conséquent, il existe à l'intérieur de cette zone plastique une concentration locale de contrainte k_1 due au transfert de

contrainte latéral d'une fibrille à l'autre. Cette concentration de contrainte est reliée à un taux de restitution d'énergie local par l'expression suivante :

$$g = \frac{k_I^2}{\sqrt{C_{12}C_{22}}} \quad (2.34).$$

Ce taux de restitution d'énergie local est donné dans cette géométrie par :

$$g = 2h_f W \quad (2.35).$$

où W est la densité d'énergie élastique stockée entre les deux plans rigides de la zone plastique. Cette approche est typique de la mécanique de la rupture des élastomères où les déformations sont grandes et W est donné par la relation suivante :

$$W = \frac{\sigma_y^2}{2C_{22}} \quad (2.36).$$

Par la suite de cette concentration de contraintes dans la zone endommagée, les fibrilles les plus proches du fond de fissure sont soumises à une contrainte supérieure à σ_y donnée par :

$$\sigma_{22} = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.37).$$

On postule que la rupture intervient lorsque la contrainte à une distance égale à une demi distance entre fibrilles $D/2$ de la tête de fissure devient supérieure à la contrainte de rupture :

$$\sigma_{rup} = \Sigma_{eff} f_b \quad (2.38).$$

avec Σ_{eff} le nombre de chaînes effectives coupant le plan de l'interface, ce qui donne pour k_I :

$$k_I = \Sigma_{eff} f_b \sqrt{\pi D} \quad (2.39).$$

En combinant les équations (2.34) à (2.39), on obtient la relation suivante :

$$G_{Ic} = \frac{2\pi D (\Sigma_{eff} f_b)^2}{\sigma_d} \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \left(\frac{C_{22}}{C_{12}}\right)^{1/2} \quad (2.40).$$

soit

$$G_{Ic} = 2h_f \sigma_y \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \quad (2.41).$$

où λ est le degré d'étirement des chaînes de polymère dans la zone plastique fibrillaire (typiquement, λ vaut entre 3 et 6 pour les polymères vitreux) et G_{Ic} est obtenu par la relation de Dugdale Barenblatt.

Ce résultat est très important car plusieurs paramètres peuvent être mesurés indépendamment de manière expérimentale. On retiendra la dépendance de G_{Ic} avec Σ_{eff} qui est une signature du processus de déformation plastique. Dans le cas de polymères plus ductiles, la zone plastique n'est plus confinée et il vaut mieux utiliser l'intégrale J plus adaptée à une zone plastique dont la taille n'est plus négligeable par rapport à celle de l'échantillon.

Ainsi, l'approche par la mécanique de la rupture apparaît fort prometteuse, en gardant toutefois à l'esprit qu'une approche élastique linéaire est probablement amenée à subir le

même sort que les critères classiques de dimensionnement. Il est donc indispensable de poursuivre les travaux sur les assemblages collés dans le domaine de la mécanique non linéaire de la rupture dont les premiers résultats laissent émerger une forte corrélation entre l'expérimental et le numérique et laissent apparaître des comportements mettant en jeu un endommagement de l'assemblage avant rupture. Des indices de fragilité ont été développés par Chai et Wernersson liant la longueur critique de la zone endommagée au chargement et aux caractéristiques mécaniques de l'assemblage. Enfin, cet endommagement du joint est fortement lié à un effet d'échelle de la structure dont il faut absolument tenir compte dans les critères de dimensionnement. Ces travaux sont bénéfiques pour le Génie Civil bois mais l'utilisation du substrat bois demeure un obstacle supplémentaire pour le mécanicien du fait de son comportement fort complexe.

Par conséquent, on voit apparaître un spécimen d'essai largement utilisé car de mise en forme facile : l'éprouvette D.C.B. (Double Cantilever Beam) déjà étudiée en particulier dans le domaine du bois par Komatsu et Haller [111, 115]. Cependant, un problème de localisation et d'instabilité de la fissuration persiste dans ce type de spécimen. Une solution a été trouvée au problème de l'instabilité par l'apparition d'une éprouvette à inertie variable (éprouvette T.D.C.B. (Tapered Double Cantilever Beam)) pour laquelle un essai normalisé a été élaboré dans le domaine du collage des métaux (ASTM D3433-93) et permet le calcul d'énergie de rupture de Mode I. Une forme proche du spécimen D.C.B. peut être sollicitée en flexion 3 points (spécimen E.N.F. : End Notched specimen in Flexure) et a été utilisé entre autre par Chai [137] dans des essais de cisaillement de joint collé avec substrats métalliques. Mais il demeure le même problème d'instabilité qu'en Mode I.

Ainsi, nous avons travaillé au L.R.B.B. sur l'élaboration d'un essai de mode I et de mode II d'assemblage bois collé permettant d'accéder à des grandeurs différentes de celles obtenues par les essais existant déjà, de mise en œuvre aisée s'inspirant des travaux effectués à la fois dans le domaine du bois et des assemblages collés. Afin d'avoir un essai le plus représentatif possible, toutes les contraintes relatives à l'utilisation d'un substrat bois et à l'intervention des multiples paramètres physico-chimiques du collage devront être soigneusement prises en compte.

2. Spécimen d'essai :

Comme nous l'avons souligné précédemment, le spécimen d'essai étudié doit être adapté au substrat bois puis ensuite modifié pour les assemblages collés. De plus, un spécimen offrant une stabilité de fissuration tant en ouverture qu'en cisaillement serait

intéressant car nous permettrait de pratiquer des essais de mécanique de la rupture à fissuration contrôlée pour ces deux types de sollicitation.

2.1. Notion de stabilité de fissuration en MLER. [138].

Pour obtenir le facteur d'intensité de contrainte critique (ou le taux de restitution d'énergie critique), une rupture fragile et instable est nécessaire. Par contre, si l'on veut calculer une énergie de rupture, il est nécessaire d'avoir une fissuration stable. De façon générale, la stabilité de la propagation d'une fissure contenue dans une structure dépend, pour un matériau donné, d'un certain nombre de variables pouvant être classées en trois domaines distincts :

- Propriétés du matériau : existence d'une courbe de résistance (courbe R) et d'effets de la plasticité ou de la viscosité.
- Propriétés géométriques de la structure qui doit offrir une complaisance variant avec la longueur de fissure et une forme particulière du fond de fissure à l'initiation de la propagation.
- Propriétés du système de charge : mode de charge (force ou déplacement imposé), raideur de la machine d'essai et du système de mesure des charges, vitesse de charge.

Par exemple, il est bien connu qu'il est plus difficile d'obtenir une rupture stable à force imposée qu'à déplacement imposé. Cependant, si une machine d'essai n'est pas suffisamment raide, on ne peut obtenir de contrôle du déplacement car l'énergie stockée dans la machine produit une rupture instable comme à force imposée. Physiquement, une propagation stable de la fissuration est obtenue si le taux de restitution d'énergie G est maintenu à sa valeur critique à chaque instant de la propagation. Cette considération physique de stabilité de fissuration peut s'écrire en terme mathématique par une approche énergétique. Pour une structure d'épaisseur b contenant une fissure de longueur a , le taux de restitution d'énergie G est :

$$G = \frac{P^2}{2b} \left(\frac{dC(a)}{da} \right) \quad (2.42).$$

où $C(a) = \frac{\delta}{P}$ est la complaisance de la structure contenant une fissure de longueur a et δ est

le déplacement du point d'application de la force P . La condition de croissance stable d'une fissure de longueur initiale a peut s'écrire sous la forme ci-après :

$$G(a) = G_R(a) \text{ et } \frac{dG(a)}{da} \leq \frac{dG_R(a)}{da} \quad (2.43).$$

G_R est une caractéristique du matériau traduite par une courbe de résistance qui est une fonction en général croissante de l'accroissement de la longueur de la fissure. Pour un matériau idéalement fragile, G_R est constante et égale au taux de libération d'énergie critique

G_c . La condition de stabilité peut être assez complexe si on envisage la raideur des différents composants du système de charge ou une forme non droite du fond de fissure. Pour des raisons de simplicité, on ne considérera par la suite que l'influence de la géométrie de la structure et on suppose que G_R est constante. De la relation (2.42), il vient pour une épaisseur unité :

$$\frac{dG}{da} = P \left(\frac{dP}{da} \right) \left(\frac{dC}{da} \right) + \frac{P^2}{2} \left(\frac{d^2C}{da^2} \right) \quad (2.44).$$

Si un petit accroissement de la longueur de fissure se produit à déplacement imposé, la relation $P = \frac{\delta}{C(a)}$ entraîne $\frac{dP}{da} = \frac{1}{C} \frac{d\delta}{da} - \frac{\delta}{C^2} \frac{dC}{da}$ et la condition (2.43) conduit à :

$$\frac{1}{G_c} \left(\frac{dG}{da} \right) = \left(\frac{d^2C}{da^2} \right) \left(\frac{dC}{da} \right) - \frac{2}{C} \left(\frac{dC}{da} \right) \leq 0 \quad (2.45).$$

La relation (2.45) est donc la relation mathématique régissant la stabilité de la fissuration à déplacement imposé et l'existence d'un terme négatif dans cette relation montre que la stabilité à déplacement imposé est plus facilement atteinte que dans le cas de charge à force imposée (où le terme négatif n'intervient pas)

Ainsi, parmi toutes les variables pouvant favoriser la stabilité de fissuration d'un matériau élastique fragile endommageable, la géométrie du spécimen accompagnée de celle du fond de fissure paraît être la plus influente. Par conséquent, une entaille en chevron sera introduite afin de minimiser la charge critique et la hauteur du spécimen devra être une fonction croissante de la longueur de fissure pour compenser la diminution de raideur associée à la propagation de la fissure (principe appliqué à l'éprouvette T.D.C.B.).

Les principes de stabilité de la fissuration ayant été énoncés, nous pouvons donc aborder l'étude du spécimen d'essai.

2.2. Epreuve T.D.C.B. (Tapered Double Cantilever Beam).

L'utilisation de l'éprouvette D.C.B. aux essais de clivage de joints collés est largement répandue pour une grande diversité de matériaux. En effet, les données de la littérature sont nombreuses sur ce type d'essai, que ce soit dans le domaine des métaux ou des composites [127, 139]. Dans le cas des assemblages bois collés, on retrouve ce type de spécimens dans les travaux de Komatsu, Duchanois ou Haller [111, 136, 115]. Cependant, le lien que l'on peut faire entre tous ces travaux est une instabilité de fissuration lors de la sollicitation. Ainsi, d'après les hypothèses que l'on a développées auparavant, les conditions de stabilité de la fissuration sont dépendantes de la géométrie du spécimen. Ainsi, certains travaux se sont orientés vers le spécimen T.D.C.B. dont l'inertie croît avec la longueur de la fissure. Les travaux se rapportant aux assemblages collés sont dans ce cas plus rares ; on peut

citer dans le domaine des composites les travaux de Liu [140] et dans le domaine des métaux collés ceux qui ont inspiré la création de l'essai normalisé ASTM D3433-93 [53]. Ce type de spécimen est aussi utilisé dans le cadre du bois massif où il donne des résultats tout à fait satisfaisants. Ainsi, notre objectif est d'appliquer un tel spécimen aux essais de clivage d'assemblages bois collés. Des travaux dans le domaine des matériaux celluloseux ont été effectués sur des éprouvettes D.C.B. [141]. Dans ses travaux, Mai utilise une expression obtenue par des considérations de MLER. donnant le facteur d'intensité de contrainte en fonction des données géométriques et du chargement du spécimen. On a, pour une épaisseur unité :

$$\left(\frac{K_I}{P}\right)^2 = \frac{12}{h} \left(\frac{a}{h}\right)^2 \left[1 + 1.32 \frac{h}{a} + 0.532 \left(\frac{h}{a}\right)^2\right] \quad (2.46).$$

où h est la demi hauteur de l'éprouvette, a la longueur d'entaille, P la charge appliquée. Une première approximation est de considérer l'éprouvette T.D.C.B. comme une juxtaposition d'éprouvettes D.C.B. dont la hauteur croît linéairement avec la longueur de la fissure. Ainsi, différents calculs ont été effectués selon ce procédé en vue d'optimiser la stabilité du spécimen. On retrouve ces résultats sur la figure suivante :

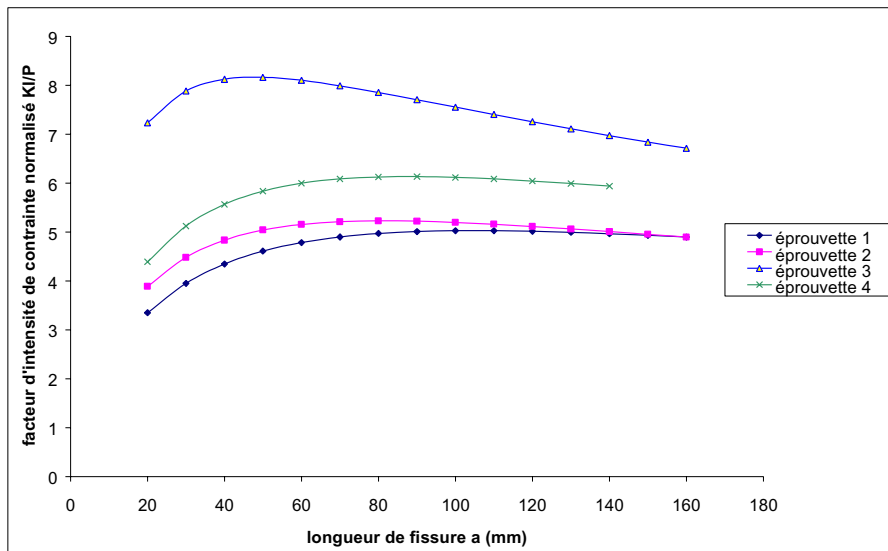


Fig.2.12 : Calculs des facteurs d'intensité de contrainte normalisés en mode I en fonction de la longueur de fissure appliqués à différentes géométries d'éprouvettes

Les données géométriques de variation de la hauteur du spécimen $d_i = 2h_i$ en fonction de la longueur de fissure a pour chaque éprouvette sont

épreuve 1: ligament de 10mm, hauteur finale de 50mm et $d_1 = 2 * \left(10 + \frac{15(a - 20)}{140}\right)$

épreuve 2: ligament de 8mm, hauteur finale de 50mm et $d_2 = 2 * \left(8 + \frac{17(a-20)}{140} \right)$

épreuve 3: ligament de 5mm, hauteur finale de 40mm et $d_3 = 2 * \left(5 + \frac{15(a-20)}{140} \right)$

épreuve 4: ligament de 7.28mm, hauteur finale de 40mm et $d_4 = 2 * \left(7.28 + \frac{12.72(a-20)}{120} \right)$

D'après les notions précédentes, la stabilité théorique semble supérieure pour l'éprouvette 3 mais celle des autres spécimens semble tout à fait acceptable. On voit donc que pour un essai de clivage, le spécimen T.D.C.B. montre un comportement théorique satisfaisant à la fissuration. Existe-t-il un spécimen de Mode II pour lequel les résultats sont similaires ?

2.3. Eprouvette T.E.N.F. (Tapered End Notched specimen in Flexure).

Si l'on s'intéresse aux travaux existant dans la littérature, les données sont plus faibles que dans le cas du mode I. On peut toutefois citer les travaux de Chai sur les essais de flexion 3 points d'une éprouvette E.N.F. collée à substrats métalliques dont le comportement est totalement instable [137]. Hormis les essais de cisaillement à simple recouvrement dont on a évoqué les limites auparavant, il n'existe pas d'essais dans la littérature traitant de fissuration stable d'assemblages bois collés sollicités en cisaillement. Par contre, de nombreux travaux sur le bois massif effectués au L.R.B.B. [138] font état d'un spécimen proposant une fissuration stable en cisaillement. Comme pour le mode I et l'évolution de l'éprouvette D.C.B. en T.D.C.B., les travaux vont se porter sur une évolution de l'éprouvette E.N.F. sollicitée en flexion 3 points. Dans le domaine du bois massif, et en particulier de l'épicéa, des calculs par éléments finis ont été effectués sur ce spécimen par Murphy [138] qui donne l'expression du facteur d'intensité de contraintes en mode II en fonction des données géométriques et de la longueur de la fissure de l'éprouvette. Ainsi:

$$K_{II} = \frac{P}{(2b\sqrt{d_i})} \left(2.72 \frac{a}{d_i} + 0.76 \right) \quad (2.47).$$

où b est la largeur de l'éprouvette, P la force appliquée, a la longueur de la fissure et d_i la hauteur de l'éprouvette pour une longueur de fissure donnée. De plus, si l'on fait l'hypothèse qu'une variation de hauteur continue de l'éprouvette peut être appliquée à cette expression, différents calculs peuvent être effectués en vue d'optimiser la stabilité. Il est utile de noter que les simulations numériques effectuées au L.R.B.B. [138] confirment les résultats de Murphy malgré les approximations effectuées. Ainsi, de nombreux calculs ont été effectués en faisant varier la pente de la zone de hauteur croissante, la hauteur finale de l'éprouvette, la longueur du domaine de fissuration et la hauteur initiale de l'éprouvette en fond d'entaille et ce afin d'optimiser le domaine de fissuration. On retrouve sur la courbe suivante les mêmes géométries d'éprouvettes que celles étudiées pour le mode I.

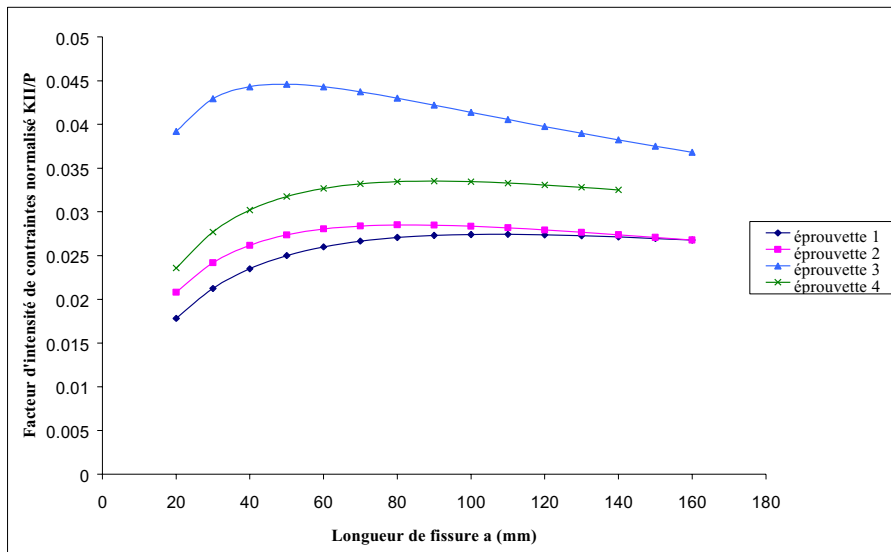


Fig. 2.13 : Calculs des facteurs d'intensité de contraintes normalisés en mode II en fonction de la longueur de fissure appliqués à différentes géométries d'éprouvettes

Le graphique montre que l'éprouvette 3 offre en théorie une meilleure stabilité que les autres. Cependant, l'augmentation de la pente de la zone variable se fait au détriment de la longueur de fissuration (en fait de la zone de stabilité) et de la hauteur du ligament initial. De plus, même si l'on travaille à un niveau de charge moins élevé pour les éprouvettes 3 et 4 (40mm de hauteur finale), on ne peut se permettre un ligament initial trop faible. C'est pour cela qu'il a été introduit une partie de hauteur constante égale à 10mm qui rattrape la pente de la zone variable par la suite. Ceci ne change rien à priori dans le résultat des calculs puisque cette partie à inertie constante se trouve en avant du fond d'entaille initial.

Une série d'essais sur bois massif confirme ces observations tant en ouverture qu'en cisaillement mais les essais de mode II sur bois collé montrent que la singularité géométrique induite par cette modification est critique pour les éprouvettes 3 et 4 à cause de la flexion imposée au spécimen. Ainsi, le gain en stabilité théorique est limité par la réalité physique et géométrique du spécimen.

Par conséquent, l'éprouvette d'essai de Mode II retenue pour sa stabilité de fissuration et sa compatibilité à l'essai imposé est l'éprouvette 2. Comme pour le cisaillement, les calculs montrent que ce spécimen sollicité en ouverture s'avère d'une stabilité suffisante vis à vis des conditions énoncées auparavant. Ainsi, le même spécimen peut être testé en ouverture et en cisaillement, seule la configuration du chargement varie.

Le spécimen collé sera alors un assemblage de 2 demi éprouvettes liées par le joint de colle de forme tout à fait similaire au spécimen massif.

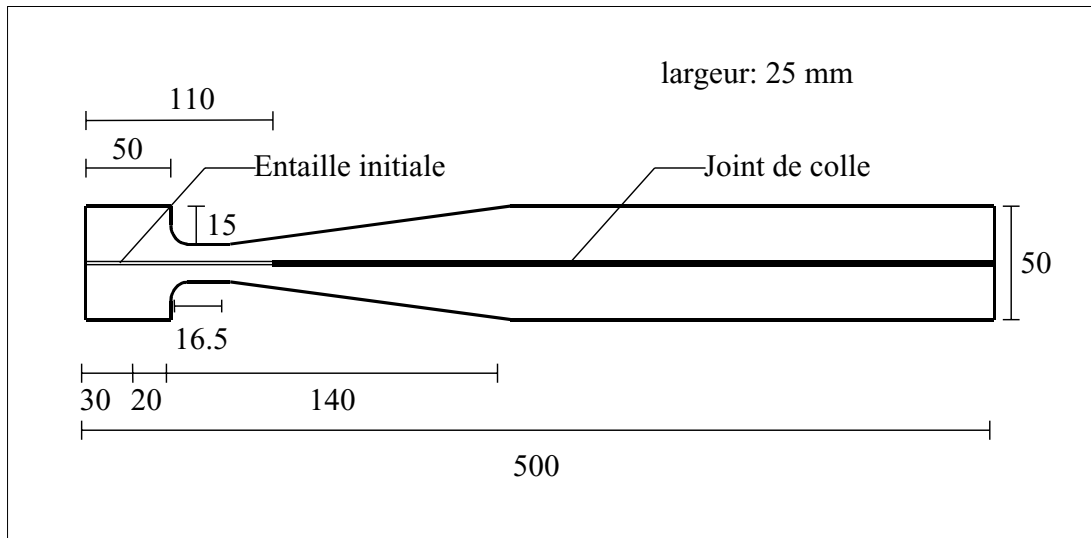


Fig. 2.14 : Epreuve T.E.N.F. modifiée collée

2.4. Calculs numériques : Etude de la stabilité de fissuration des assemblages bois collés.

Les hypothèses émises et utilisées dans la partie précédente ne tenaient pas compte de la présence ni même de la nature du joint de colle. De plus, l'approximation faite par le polynôme de Murphy dans le cas de la sollicitation de cisaillement a été faite pour un résineux de caractéristiques mécaniques moyennes. Enfin, l'introduction d'une bande d'adhésif plus ou moins épaisse pouvant posséder des caractéristiques mécaniques singulièrement différentes peut entraîner de grosses différences au niveau des champs de contraintes et de déformations. Il a ainsi été décidé d'utiliser les calculs précédents pour le choix de la forme de l'éprouvette, et surtout le choix de la variation de pente de la zone à inertie variable. Mais, de plus, des calculs d'évolution des facteurs d'intensité de contrainte et de l'énergie de rupture ont été réalisés sur cette éprouvette grâce au code d'éléments finis Castem 2000 afin d'étudier l'influence de la nature et de l'épaisseur du joint de colle sur la stabilité de fissuration. Cette étude a été réalisée pour chaque mode de chargement (ouverture et cisaillement), chaque adhésif ultérieurement utilisé dans les essais et différentes épaisseurs de joint variant de 0.25 à 1 mm. On peut toutefois souligner que toutes ces simulations numériques sont réalisées dans le cas d'assemblages collés dont le joint occupe toute l'épaisseur du spécimen et ne possède pas de forme particulière à son origine (pas de chevron permettant d'initier une fissuration stable en Mode II dans le bois massif). Nous verrons ensuite dans le descriptif des éprouvettes d'essai que ces deux particularités procurent un apport conséquent dans l'initiation d'une fissuration stable.

Dans tous les calculs réalisés, les caractéristiques mécaniques des matériaux sont les suivantes :

- les substrats bois sont orthotropes ; leurs propriétés mécaniques sont celles de l'épicéa (Norway Spruce) que nous avons utilisé pour les essais (E_1 : 14320 MPa, E_r : 910 MPa, E_t : 990 MPa, ν_{12} : 0.39, ν_{23} : 0.51, ν_{13} : 0.43, G_{12} : 400 MPa).

- les adhésifs sont isotropes, leurs modules d'Young sont respectivement 106 MPa (polyuréthane) et 2700 MPa (résorcine phénol formol). Les coefficients de Poisson sont identiques et égaux à 0.4.

Tous ces calculs sont réalisés en élasticité linéaire pour des chargements fixés au préalable. En effet, l'objectif est simplement d'observer et de quantifier l'évolution de l'énergie de rupture en fonction de la longueur de l'entaille initiale. Dans le domaine élastique, l'énergie de rupture G est évaluée à l'aide de l'intégrale de Rice. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut à la fois être utilisée pour des matériaux isotropes ou orthotropes, donc des assemblages bois collés ou des spécimens bois massif. Ainsi, à titre de comparaison avec les spécimens collés, ces mêmes calculs seront réalisés sur des éprouvettes en bois massif. Le maillage du spécimen d'essai, constitué d'éléments TRI6 et QUA8 apparaît sur la figure suivante :

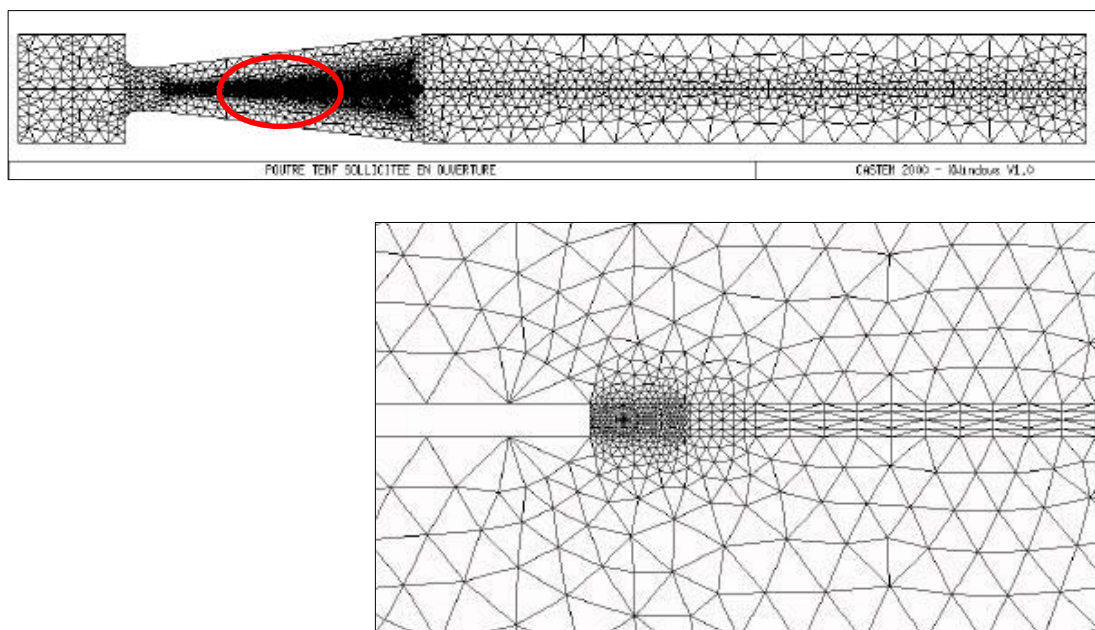


Fig. 2.15 : Maillage de l'éprouvette TENF modifiée collée pour un joint de 0.5 mm d'épaisseur.

On peut remarquer immédiatement la très forte densité d'éléments aux abords du joint de colle et dans la zone à inertie variable, contenant bien évidemment le fond d'entaille initiale. En effet, la première difficulté numérique induite par ce type de maillage est la très faible épaisseur du joint de colle (quelques dixièmes de millimètres) face à la hauteur totale du spécimen (5 cm). On peut aussi noter en observant ce maillage qu'il a été choisi d'intensifier

la densité du maillage en fonction de l'épaisseur du joint aux abords du fond de fissure. Ce dernier est matérialisé par une zone rayonnante dont le diamètre est lui aussi proportionnel à l'épaisseur du joint. L'importance des maillages pour chaque configuration d'assemblages apparaît dans le tableau suivant.

Epaisseur du joint	MODE I		MODE II	
	Nbre de nœuds	Nbre d'éléments	Nbre de nœuds	Nbre d'éléments
0.25 mm	16629	8146	16635	8148
0.5 mm	18815	9236	18821	9238
0.75 mm	21889	10746	21895	10748
1 mm	19593	9568	19847	9694

Tableau 2.1 : Importance des différents maillages utilisés.

Les différents maillages en fond de fissure pour chaque épaisseur de joint apparaissent figure 2.16. De plus, le joint de colle sollicité en ouverture ou en cisaillement dans une région proche du fond de fissure est visible sur la figure suivante :

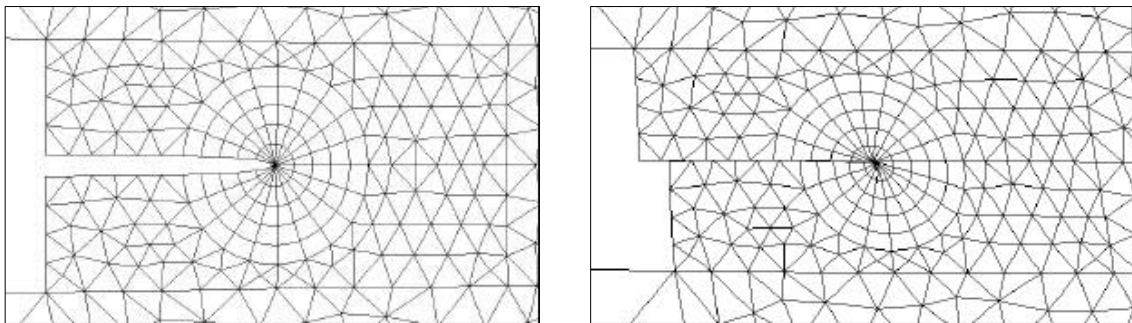


Fig. 2.16 : Maillages déformés en fond de fissure en ouverture puis en cisaillement pour un joint de 0.5 mm d'épaisseur.

2.4.1. Stabilité de fissuration en ouverture :

Les résultats des différentes simulations en Mode I apparaissent sur la figure suivante. Chaque adhésif est testé pour 4 épaisseurs de joint distinctes (0.25 mm, 0.5 mm, 0.75 mm, 1 mm). A titre de comparaison, la courbe donnant le comportement du spécimen en bois massif est aussi donnée sur la figure 2.17.

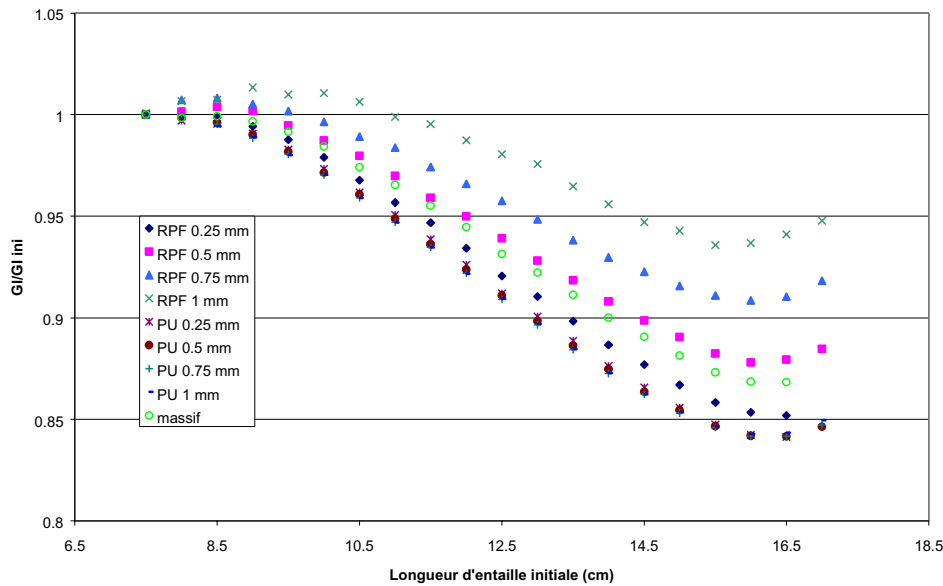


Fig. 2.17 : Stabilité de fissuration du spécimen TENF modifié collé sollicité en ouverture.

On peut observer sur cette courbe que pour une longueur d'entaille initiale comprise entre 85 et 155 mm, la stabilité de fissuration est obtenue pour la totalité des spécimens. Comme nous avons pu le voir dans le paragraphe précédent, la stabilité de fissuration est obtenue dans le cas d'un chargement à déplacement imposé si la pente de la courbe $G=f(a)$ est négative. De plus, l'épaisseur du joint ne semble pas jouer de rôle important pour les assemblages polyuréthane dont les courbes sont très proches les unes des autres. En revanche, la variation d'épaisseur du joint de colle dans le cas des assemblages résorcine phénol formol influence beaucoup plus le comportement de l'assemblage. Dans le cas du joint épais de 1 mm, on peut observer que la longueur du domaine de stabilité est légèrement réduite. Ainsi, cette instabilité initiale se retrouve dans la courbe 2.6 où l'on peut observer que la rapport G/G_{ini} croît avec l'épaisseur du joint de colle. On peut aussi noter que la complaisance du spécimen est elle aussi affectée par l'augmentation de l'épaisseur du joint dans le cas des assemblages résorcine.

Hormis dans ces deux cas de figure, il ne semble pas y avoir d'influence particulière de l'épaisseur du joint de colle sur le comportement à rupture de l'assemblage, comme le montre la figure 2.18 retranscrivant l'évolution de GI pour les deux types d'adhésifs, le même chargement et une longueur d'entaille de 110 mm.

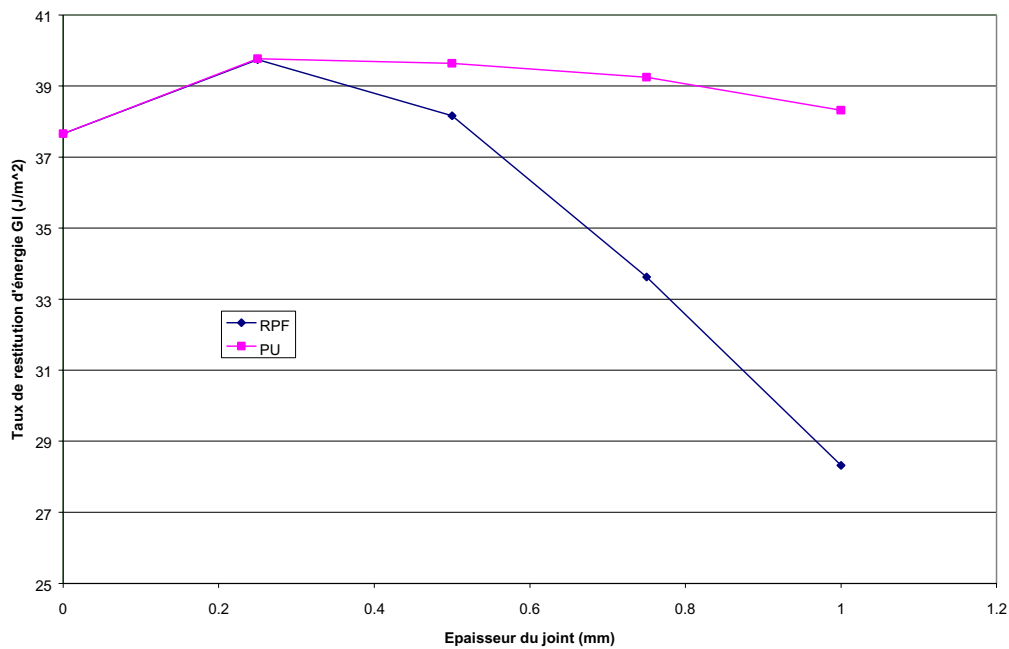


Fig. 2.18 : Evolution du taux de restitution d'énergie en Mode I en fonction de l'épaisseur du joint de colle.

Par conséquent, on peut souligner que dans le cas de la sollicitation d'ouverture, le facteur déterminant dans la complaisance de l'assemblage est principalement la raideur des bras de l'éprouvette. L'augmentation de l'épaisseur du joint n'est pas assez importante pour avoir un effet significatif sur la complaisance du spécimen. De plus, vue la faible évolution de la complaisance de l'assemblage en fonction des paramètres du joint, on peut considérer que chacun des assemblages a sensiblement la même réponse face à la sollicitation. La différence sensible d'énergie apparaissant sur la courbe provient certainement du fait que dans le cas des assemblages résorcine, la complaisance diminue faiblement avec l'accroissement de l'épaisseur du joint mais vue la faible différence de modules entre le bois et l'adhésif, l'état de contraintes est faiblement modifié par une augmentation de l'épaisseur du joint. Par conséquent, l'énergie déterminée dans ce cas est représentative de la diminution de complaisance et décroît ainsi selon la même tendance. Le cas des assemblages polyuréthane est différent : la complaisance croît avec l'épaisseur du joint mais la forte différence de module entre substrat et adhésif influence la répartition des contraintes dans le joint de façon plus prononcée que dans le cas précédent. Ainsi, l'augmentation de l'épaisseur du joint entraîne un niveau de déformation croissant mais un niveau de contraintes dans le joint qui subit une tendance inverse. De ce fait, le bilan énergétique retranscrit une diminution de GI avec l'augmentation du joint pour l'adhésif polyuréthane, mais qui reste très faible entre les différentes configurations.

2.4.2. Stabilité de fissuration en cisaillement :

Si on applique un chargement de flexion 3 points sur ce type d'assemblages d'une intensité de 800 N en faisant varier les mêmes paramètres, on obtient la courbe apparaissant figure 2.19.

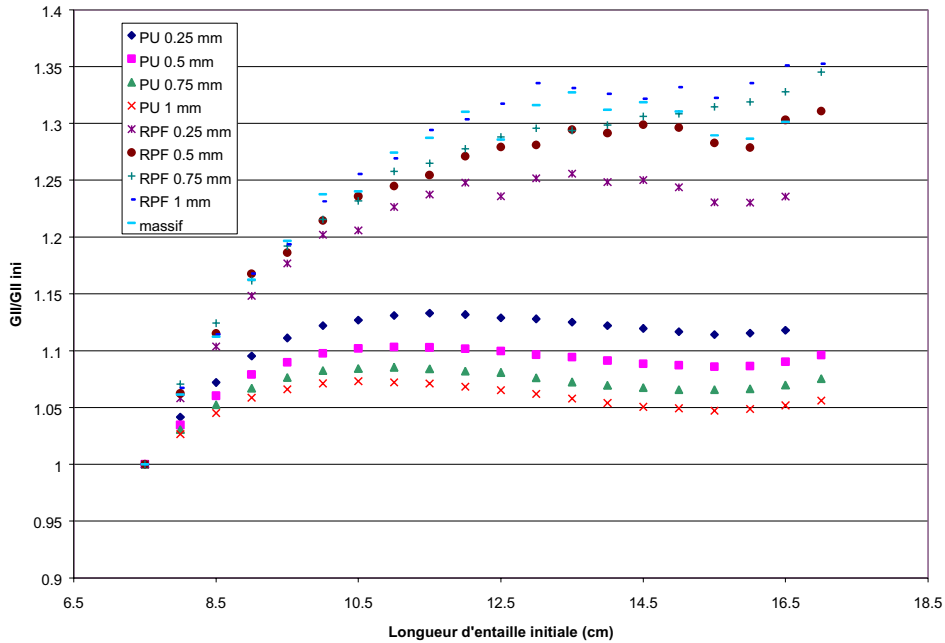


Fig. 2.19 : Stabilité de fissuration du spécimen TENF modifié collé sollicité en cisaillement

Le comportement de chacun des assemblages est maintenant assez distinct. En effet, on peut observer que le domaine de stabilité apparaît différent pour chaque configuration d'assemblage, limité par rapport à celui du mode I, et que la décroissance de la courbe $G=f(a)$ est beaucoup moins marquée en cisaillement. Les écarts par rapport au spécimen massif sont beaucoup plus importants dans le cas du chargement de flexion 3 points. Le comportement des assemblages polyuréthane est assez homogène et laisse présager un comportement à la rupture tout à fait acceptable. L'accroissement de l'épaisseur du joint provoque un accroissement de la complaisance de l'éprouvette collée. A contrario, l'accroissement de l'épaisseur du joint pour les assemblages résorcine entraîne une diminution de la complaisance, une réduction du domaine de stabilité et la présence de sauts fragiles dans ce dernier. Contrairement aux conclusions de la partie précédente, en flexion 3 points, le même chargement appliqué sur des configurations d'assemblages différentes ne génère pas le même état de contrainte dans le joint. Ainsi, la réponse énergétique de chaque assemblage pour un même chargement est une combinaison de l'augmentation de la complaisance mais aussi de l'influence de la proximité des substrats sur la répartition des contraintes dans le joint en fond de fissure. L'accroissement de complaisance des assemblages polyuréthane est uniquement du

à la souplesse de l'adhésif qui lui permet d'accepter le cisaillement imposé. Plus le joint sera épais, plus la flexion autorisée importante, bien que limitée par les substrats bois. La différence de réponse face à la sollicitation pour des assemblages différents mais soumis au même chargement et possédant une fissure initiale de même longueur (110 mm) apparaît figure 2.20.

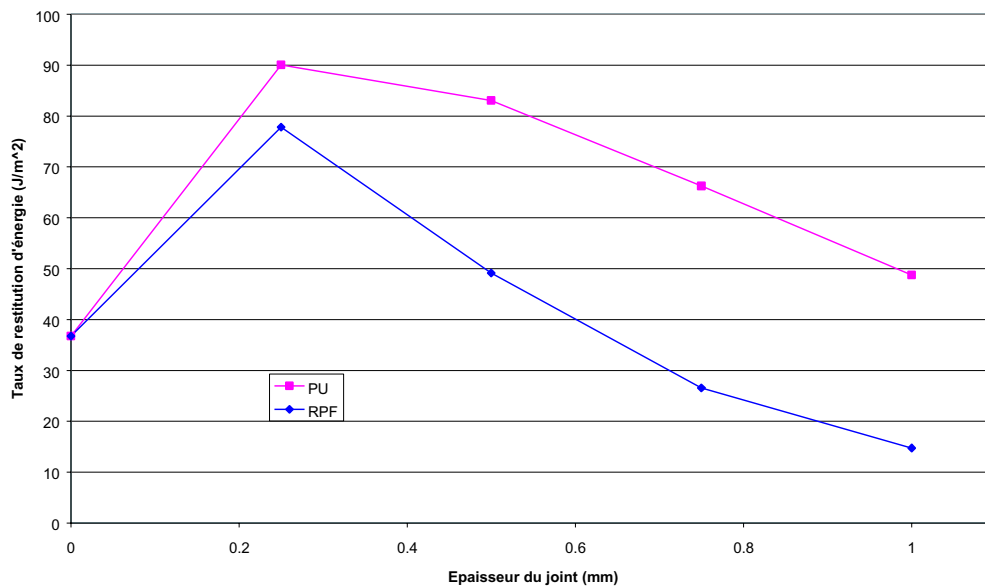


Fig. 2.20 : Evolution du taux de restitution d'énergie en Mode II en fonction de l'épaisseur du joint de colle

La figure 2.19 laisse entrevoir quelques difficultés dans l'application expérimentale de ces simulations du fait de l'initiation de la fissure dans le domaine d'instabilité. De plus, les sauts observés dans le domaine de stabilité pourraient être néfastes au bon comportement des assemblages résorcine vues les caractéristiques hautement fragiles de ce type d'adhésif. Malgré tout, cette configuration d'assemblage est adoptée en espérant que l'initiation de la fissure par un joint en forme de chevron et la réduction du joint aux 3/5 de l'épaisseur de l'assemblage permettent de pallier à ces faiblesses apparentes.

3. Calcul de l'énergie de rupture :

Le spécimen d'essai a été optimisé afin de pouvoir déterminer des énergies de rupture des assemblages collés tant en mode I qu'en mode II. L'énergie de rupture est l'énergie nécessaire à la création et la propagation d'une fissure sur une unité de surface.

Deux types d'énergie de rupture pourront alors être différenciés :

- l'énergie nécessaire seulement à la propagation de la fissure d'une longueur a à une longueur $a + \Delta a$ appelée taux de restitution d'énergie critique G_c .
- l'énergie nécessaire non seulement à la propagation de la fissure d'une longueur a à une longueur $a + \Delta a$ mais aussi nécessaire aux phénomènes d'initiation de la fissuration. Celle-ci tenant compte de la totalité des phénomènes se produisant en fond de fissure, elle sera nommée énergie totale de fissuration G_f .

Ces énergies se calculent directement à partir de la courbe force-déplacement enregistrée lors de l'essai de fissuration.

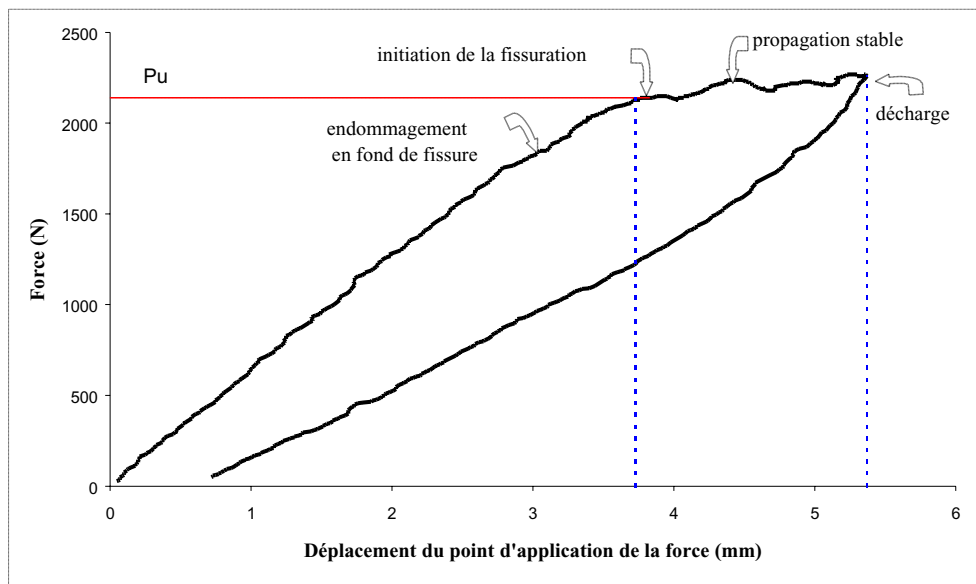


Fig. 2.21 : Courbe charge déplacement d'une éprouvette T.E.N.F. sollicitée en flexion 3 points.

Sur cette courbe, la force P_u est la force critique d'initiation de la fissuration et δ_u le déplacement correspondant. En fait, c'est à partir de cycles de charge décharge successifs que l'on peut émettre plusieurs hypothèses permettant la détermination de ces énergies.

3.1. Cycles de charge décharge successifs.

3.1.1. 1^{ère} étape de chargement :

On effectue la mise en charge d'un spécimen jusqu'à atteindre une non linéarité de la courbe force déplacement. On effectue la décharge et on laisse se dissiper toutes les

déformations résiduelles dues au caractère viscoélastique du bois. On charge à nouveau le spécimen jusqu'à la fissuration. Pour les 2 charges successives, on trace une droite de régression sur le domaine linéaire de la courbe en ne tenant pas compte des premiers points de mise en place de l'essai.

On obtient les courbes suivantes :

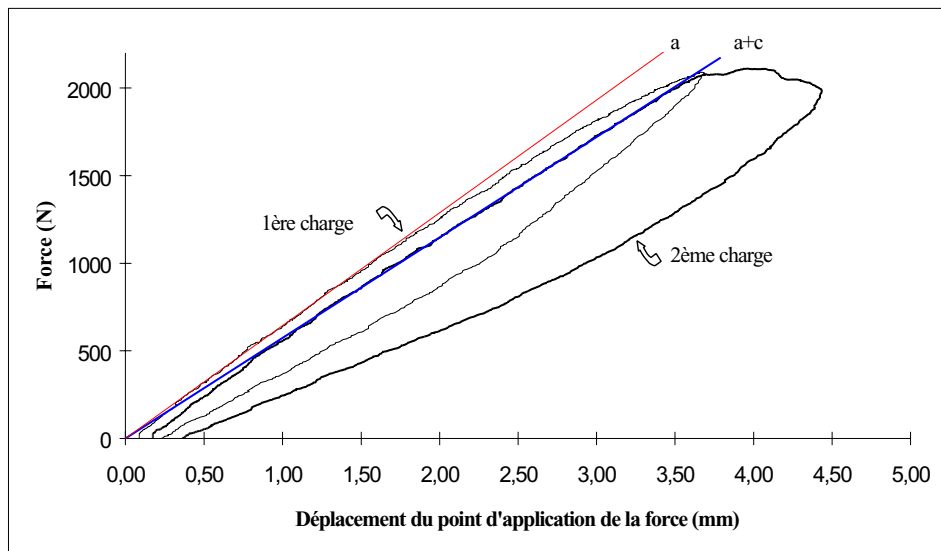


Fig. 2.22 : Charge et recharge avant fissuration d'une éprouvette T.E.N.F. sollicitée en flexion 3 points

Sans avoir propagé la fissure, la raideur du spécimen a diminué ce qui caractérise un endommagement se produisant en fond de fissure. En observant cette figure, on s'aperçoit que la pente de la courbe de la recharge correspond à la droite qui lie l'origine au dernier point de la 1^{ère} charge. On nommera cette droite décharge élastique fictive.

Tout se passe comme si la 2^{ème} charge correspondait à la charge d'un spécimen d'entaille de longueur $a+c$, c étant la longueur élastiquement équivalente de la zone endommagée lors de la 1^{ère} charge.

Ceci est retranscrit sur la figure suivante, dans le cas d'un matériau considéré comme quasi fragile tel que le bois, par exemple. Dans la suite des travaux, les adhésifs utilisés seront considérés en fonction de leurs caractéristiques mécaniques comme pouvant être des matériaux quasi fragiles.

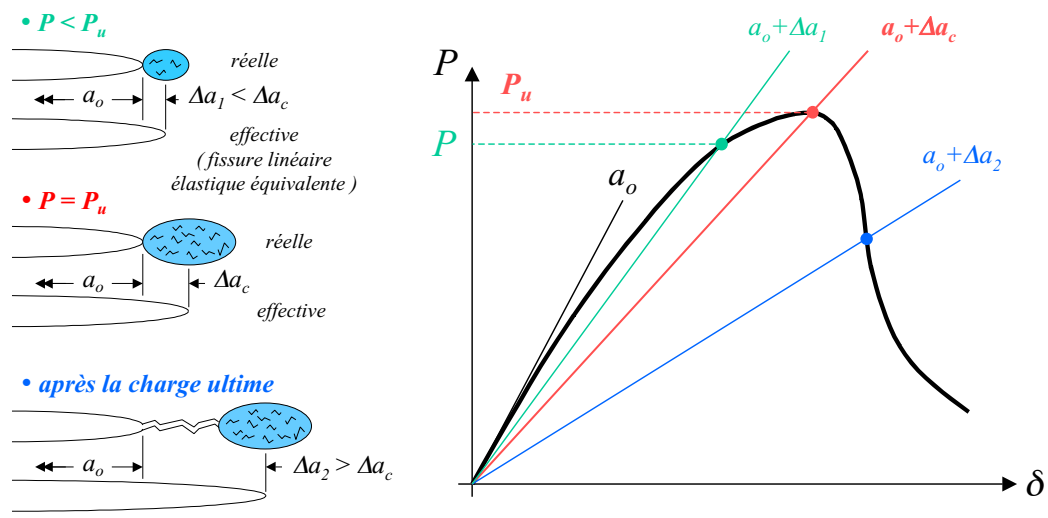


Fig. 2.23 : Evolution de la zone endommagée en avant du fond de fissure et notion de fissure élastique équivalente.

3.1.2. 2^{ème} étape de chargement :

On charge un spécimen d'entaille initiale de longueur a jusqu'à fissuration. La fissure mesure alors une longueur $(a + c + \delta a)$. On procède à une décharge complète de l'éprouvette puis on laisse les effets viscoélastiques du bois se dissiper avant de la recharger jusqu'à une nouvelle fissuration. On voit à nouveau sur la figure 2.24 que si on trace une régression sur la zone linéaire de la recharge, celle-ci correspond à la décharge élastique fictive de la première charge.

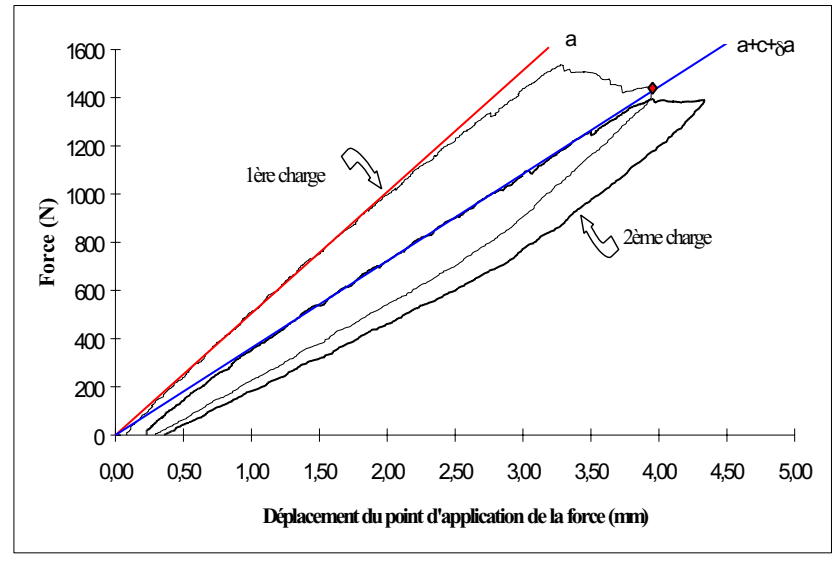


Fig. 2.24 : Charge et recharge après fissuration d'une éprouvette T.E.N.F sollicitée en flexion 3 points

3.2. Détermination des deux types d'énergie de rupture :

Par conséquent, la différenciation des deux types d'énergie de rupture est possible et se justifie par les hypothèses suivantes :

- l'énergie disponible pour créer la décohésion à la pointe de la fissure est nécessairement une énergie élastique stockée provisoirement dans la structure.
- les décharges élastiques dont nous avons parlé auparavant sont à considérer de manière fictive. Dans ce cas, l'endommagement d'ouverture ou de cisaillement reste confiné en fond de fissure et l'on reste dans le domaine de la Mécanique Linéaire Elastique de la Rupture. Le travail élastique de fissuration est alors défini comme étant l'aire limitée par les raideurs de la structure existant avant et après l'accroissement de la fissure de δa (raideur pour une fissure de longueur élastiquement équivalente à $a+c$ et raideur pour une fissure de longueur $(a+c+\delta a)$) et la courbe $P = f(\delta)$.
- l'énergie de rupture peut alors être définie en ajoutant au taux de restitution d'énergie élastique critique l'énergie nécessaire à l'endommagement en fond de fissure matérialisé par la partie non linéaire de la courbe force déplacement avant la propagation de la fissure.

On retrouve ces hypothèses sur la figure suivante.

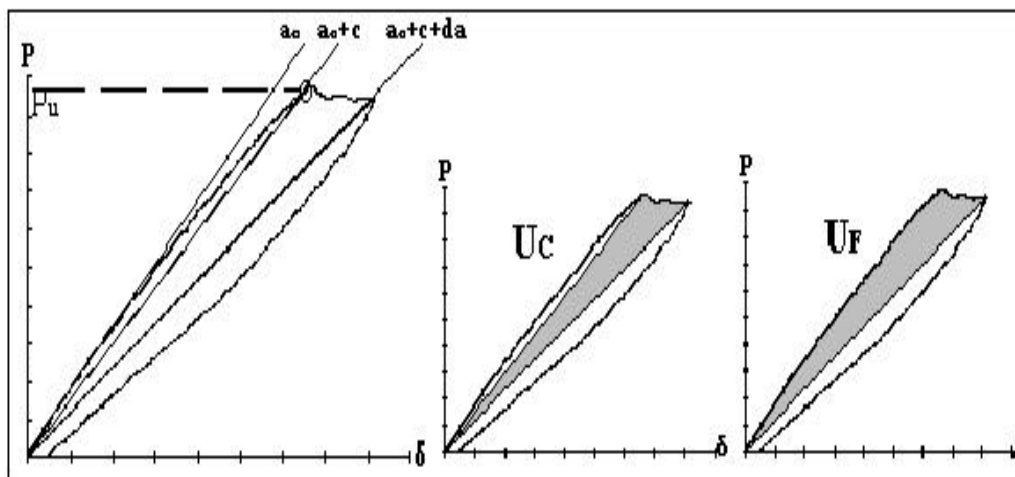


Fig. 2.25 : Détermination des énergies de rupture

Une fois les aires de la courbe décrites auparavant calculées (U_c et U_f), il suffit de les diviser par la surface totale fissurée A pour obtenir les valeurs des énergies correspondantes.

Cette approche énergétique offre donc un double intérêt :

- d'une part le calcul d'un taux de restitution d'énergie élastique critique de fissuration fondé sur les principes de la MLER. (approche élastique).
- d'autre part le calcul d'une énergie totale (ou énergie de propagation) tenant compte des phénomènes d'endommagement non linéaires se produisant en avant du fond de fissure (approche non linéaire).

4. Conclusion :

L'approche par la Mécanique de la Rupture semble pouvoir combler certaines lacunes des approches classiques énoncées dans le premier chapitre. Cependant, l'application à des assemblages bois collés semble un peu plus délicate à mettre en œuvre par rapport à d'autres matériaux mécaniquement plus « accueillants ». En effet, de par son orthotropie naturelle, sa porosité, ses défauts, l'orientation du fil, sa sensibilité à l'humidité, son utilisation comme substrat d'un assemblage pourrait compliquer l'étude du comportement de l'adhésif sous la forme d'un joint collé. De plus, des problèmes de déviation de la fissure peuvent survenir. Enfin, l'étude numérique du spécimen d'essai montre un comportement très différent de l'assemblage par rapport à la sollicitation appliquée mais surtout par rapport à l'adhésif et à la configuration du joint. L'étude expérimentale menée sur toutes les configurations d'assemblages va certainement permettre de lever la majorité de ces incertitudes.

Chapitre 3

Etude expérimentale

La campagne d'essai menée au LRBB pour la réalisation de ce travail (réalisé dans le cadre du *Projet Performances du Collage dans le Génie Civil Bois*) a mis en jeu quelques 200 spécimens massifs ou collés d'épicéa (Norway Spruce) dont la description est donnée dans le chapitre précédent. Cette campagne expérimentale associe des essais de Mécanique de la Rupture, des observations in situ de l'endommagement de l'adhésif lors de la fissuration cohésive du joint, des essais de différentes configurations de collage rompues soit en ouverture, soit en cisaillement. Afin d'appréhender au mieux un maximum de phénomènes pouvant intervenir dans la rupture de ces assemblages, une analyse fractographique des surfaces fissurées et une analyse D.S.C. des joints collés une fois polymérisés et testés ont été réalisées dans le but majeur d'identifier des phénomènes physiques ou physico-chimiques responsables d'éventuelles dispersions des phénomènes. Tous les essais de rupture ont été réalisés selon la méthode décrite en *Annexe 1* sur des spécimens collés assemblés selon un processus de collage clairement défini afin d'assurer une reproductibilité optimale des essais vu le grand nombre de paramètres intervenant dans la qualité du joint.

L'échantillonnage de bois choisi est une sélection d'épicéa présentant des caractéristiques de croissance comparables (densité et espacement de cernes). Les spécimens sont usinés pour obtenir un plan de fissuration dans le plan radial longitudinal du bois et ne contiennent aucun défaut majeur visible (nœud, poche de résine...). Afin d'avoir des caractéristiques mécaniques de notre échantillonnage de bois, des essais de rupture préliminaires ont été réalisés sur des spécimens massifs. Les résultats de ces essais apparaissent en *Annexe 2* où l'on peut observer que la variabilité de notre échantillonnage est assez conséquente mais dans la norme par rapport aux résultats concernant le bois massif apparaissant dans la littérature. Par contre, les observations de la fissuration montrent que le spécimen d'essai est très bien adapté aux deux types de sollicitation (ouverture et cisaillement) puisqu'il fournit une fissuration stable et faiblement déviée dans la majorité des cas. On peut aussi observer qu'une forte déviation de la fissure entraîne une augmentation conséquente au niveau des énergies de rupture (par exemple, dans le cas du spécimen MEC 110-1).

Les spécimens d'essai ont été préparés à l'aide de 2 adhésifs de nature différente :

- un adhésif résorcine-phénol-formol (ENOCOL RLF185 CECA) [142]
- un adhésif polyuréthane (LIDEC A284 CFPI) [143]

1. Caractéristiques mécaniques des adhésifs :

Avant d'aborder les résultats expérimentaux, il est utile de procéder à une brève présentation de chacun de ces adhésifs et des principales caractéristiques mécaniques les concernant portées à notre connaissance. Toutes ces caractéristiques provenant des formulateurs ou de la littérature sont données en *Annexe 3*.

Cependant, vue la faiblesse des données concernant l'adhésif polyuréthane, des essais complémentaires sur des éprouvettes moulées de colle ont aussi été réalisés dans le but de déterminer des grandeurs caractéristiques de l'adhésif. Le caractère visqueux et fortement amortissant de l'adhésif polyuréthane, n'a pas permis une détermination fiable du module d'Young par évaluation non destructive. L'option d'essais mécaniques de flexion 3 points a été retenue avec un système de mesure de la flèche du spécimen permettant une mesure fiable de déplacement du point d'application de la force. En effet, la forte viscosité du matériau engendre une indentation élastique lors de l'expérience qu'il faut absolument éliminer de la mesure du déplacement si l'on veut obtenir des valeurs fiables. Une mesure de déplacement par acquisition d'images a aussi été mise en place pour cette série d'essais, qui peut être scindée en deux parties :

- une première partie où les essais de flexion 3 points ont été réalisés sur des poutres massives de colle non entaillées, dans le but de déterminer le module d'Young du matériau.
- une deuxième partie pour laquelle des entailles ont été réalisées afin de déterminer des grandeurs caractéristiques à la rupture (énergie de rupture G_f) de l'adhésif.

Le descriptif expérimental de ces essais est détaillé en *Annexe 4*. Tous les résultats obtenus apparaissent dans le tableau 3.1.

On peut observer sur ces résultats que les grandeurs énergétiques calculées sont très importantes par rapport à celles du bois massif. Le module d'Young déterminé est lui très en deçà de celui de l'autre adhésif. Nous sommes donc bien dans la gamme que nous avons fixé pour les adhésifs avec un adhésif à fort module d'Young, et l'autre présentant un module beaucoup plus faible. Cependant, un doute peut subsister quant à la validité des résultats de l'essai ASTM dont l'approche par la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture ne peut retranscrire de façon satisfaisante le comportement d'un adhésif possédant un caractère viscoélastique si marqué. La dernière colonne du tableau de résultats exprime donc le rapport entre les facteurs d'intensité de contrainte réel et celui calculé par l'approche élastique linéaire. Hormis dans deux cas, le rapport K_{max}/K_Q proche de 1 permet de valider l'essai ASTM, qui, rappelons le, n'a été réalisé que dans le but d'obtenir des grandeurs indicatives du comportement à la rupture de l'adhésif seul. En effet, le comportement de l'adhésif sous la forme d'un joint de colle est certainement fortement influencé par les contraintes résiduelles de polymérisation (polymérisation sous contrainte, retrait de l'adhésif...) et par le fait que le matériau à coller, le bois, est fortement poreux et favorise la création de l'interphase dont le comportement mécanique, peu accessible, influence aussi le comportement de la structure. De plus, les dimensions de l'éprouvette massive de colle favorisent les forces de cohésion du polymère qui ne sont certainement pas les mêmes dans le cas d'un joint de colle d'une épaisseur inférieure à 1 mm.

Echantillon	E (MPa)	$G_{f_{exp}}^f$ (J/m ²)	K_{max} (ASTM)	$G_Q = G_{Ic}$ (J/m ²)	K_{max}/K_Q
			MPa.m ^{0.5}		
Colmas1	91.2				
Colmas2	79.6	3840	0.533	3248	1
Colmas3	98.8	3580	0.608	3025	1.06
Colmas4	105.0	4520	0.675	2826	1.18
Colmas5	106.0	4390	0.78	2990	1.32
Colmas6	93.6	3030	0.485	2166	1.03
Moyenne	95.7	3872.0	0.6	2851.0	1.1
Ecart type	9.9	609.0	0.1	411.4	0.1
CV (%)	10.3	15.7	18.9	14.4	11.9

Tableau 3.1 : Résultats des essais de flexion des éprouvettes massives de colle.

Les grandeurs données dans ce tableau sont les suivantes :

- E : module d'Young en flexion

- $G_{f_{exp}}^f$: énergie de rupture totale calculée par l'aire sous la courbe force-déplacement et la surface fissurée.

- K_{max} : facteur d'intensité de contrainte calculé par le polynôme de calibration de l'éprouvette de flexion SENB (relation A4.1).

- G_Q : taux de restitution d'énergie critique déterminé à partir du K_Q calculé en déformations planes (relation 2.11).

De plus, ces essais ont aussi permis de valider l'hypothèse d'un comportement adoucissant de l'adhésif par l'existence d'une rupture progressive sous sollicitation, comme le montrent les courbes expérimentales obtenues par traitement d'images (figure 3.1).

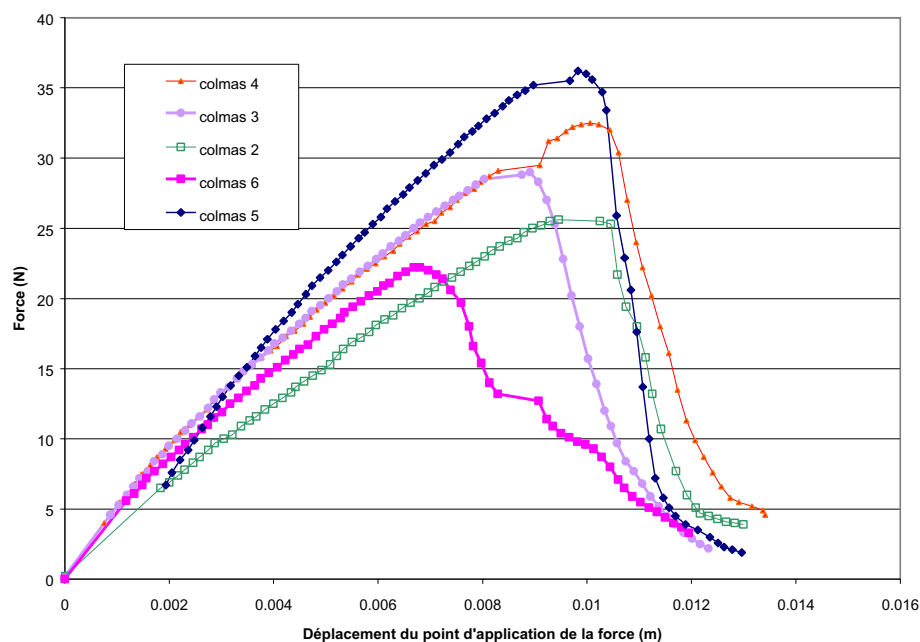


Fig. 3.1 : Courbes expérimentales force-déplacement d'éprouvettes massives de colle entaillées.

Les résultats expérimentaux concernant les assemblages bois collés s'étalent sur une période allant du mois de février 1998 au mois de juin 2000. De plus, ces essais sur substrat bois ont été précédés d'essais sur des assemblages en polycarbonate sollicités en ouverture ou en cisaillement, et soumis à une lumière polarisée afin de réaliser des observations de photoélasticimétrie. L'influence du joint de colle sur la répartition des contraintes élastiques dans le substrat a ainsi pu être observée lors de la fissuration cohésive de l'assemblage. Par souci de clarté dans la présentation de ces résultats, nous avons choisi de ne pas tenir compte de la chronologie de réalisation de ces essais mais plutôt de leurs résultats afin d'appréhender au mieux tous les phénomènes se produisant lors des sollicitations imposées.

L'objectif des essais étant d'étudier la fissuration cohésive dans l'adhésif, nous allons donc traiter en priorité les résultats concernant ce type de rupture. Ainsi, ce type de fissuration a pu être observé lors des essais de photoélasticimétrie d'une part, mais aussi lors d'essais réalisés en flexion 3 points sur des assemblages polyuréthane à joint d'épaisseur 0.25 mm (substrats épiciéa).

2. Rupture cohésive des assemblages polyuréthane :

2.1. Rupture cohésive observée par photoélasticité.

La théorie de la photoélasticimétrie est rappelée en *Annexe 5*. On peut toutefois préciser que l'assemblage étudié se compose de deux substrats de polycarbonate (PSM 1 VISHAY) liés entre eux par un mastic polyuréthane bi composant (LIDEC A 224D en Mode I et LIDEC A 284 en Mode II de la société C.F.P.I.). Le processus de collage déjà appliqué pour les assemblages bois est repris et permet ainsi d'assurer une reproductibilité maximale des joints de colle. L'éprouvette de Mode I utilisée ici est l'éprouvette DCB. (Double Cantilever Beam). Ces éprouvettes seront testées sur une machine de traction (Wykeham Farrance) à vitesse fixe de 1.52 mm/min. L'acquisition de la force a été faite au moyen d'un dynamomètre de 100 daN et celle du déplacement à l'aide de deux LVDT de 20 mm de course chacun. Dans le cas des essais de cisaillement, l'éprouvette utilisée est l'éprouvette TENF (Tapered End Notched specimen in Flexure), décrite auparavant mais dont les dimensions ont été divisées par 2 (figure 3.2).

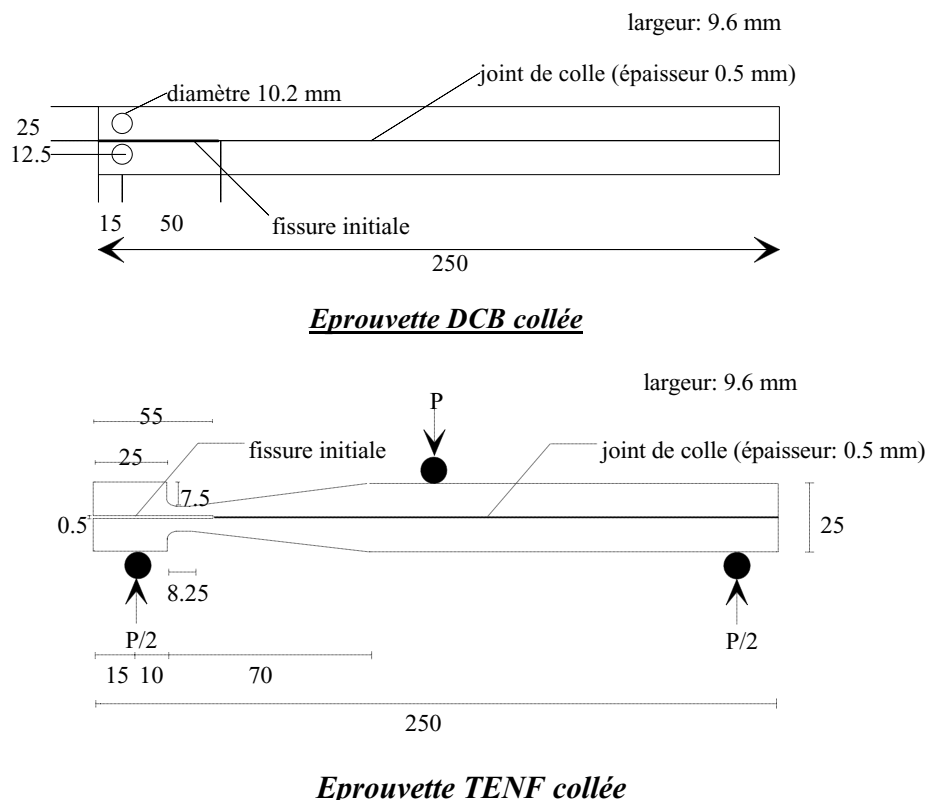


Fig. 3.2 : Eprouvettes d'essai de Mode I et II

Chaque spécimen de Mode II sera testé en flexion trois points à vitesse de déplacement de la traverse constante (charge: 2,2 mm/min et décharge: 4,4 mm/min) sur une machine de traction compression (ADAMEL), sur laquelle un banc de photoélasticimétrie a été adapté [146, 147, 148, 149]. Les premières observations réalisées sur un spécimen massif de polycarbonate sollicité en ouverture montrent une forme des isochromes très proche de ceux obtenus par la théorie de la MLER (fig. A5.2) même si un effet d'entaille non négligeable modifie leur aspect, et ce pour chacune des sollicitations. Il apparaît de même, en avant du fond d'entaille, une zone de redistribution des contraintes clairement observable sur la figure 3.3.

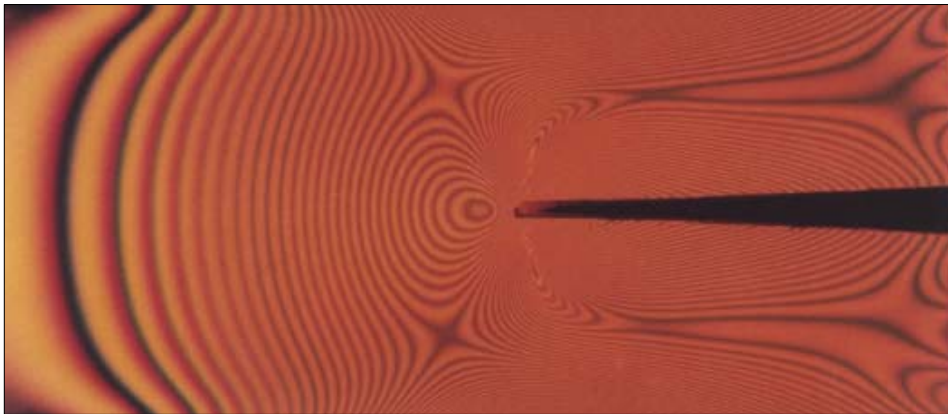


Fig. 3.3 : Isochromes observées en Mode I sur un spécimen massif de polycarbonate.

Les mêmes observations réalisées en cisaillement montrent à nouveau une forte corrélation avec les isochromes théoriques provenant de la mécanique linéaire élastique de la rupture. Toutefois, on peut observer un effet d'entaille beaucoup moins important que pour la sollicitation d'ouverture.

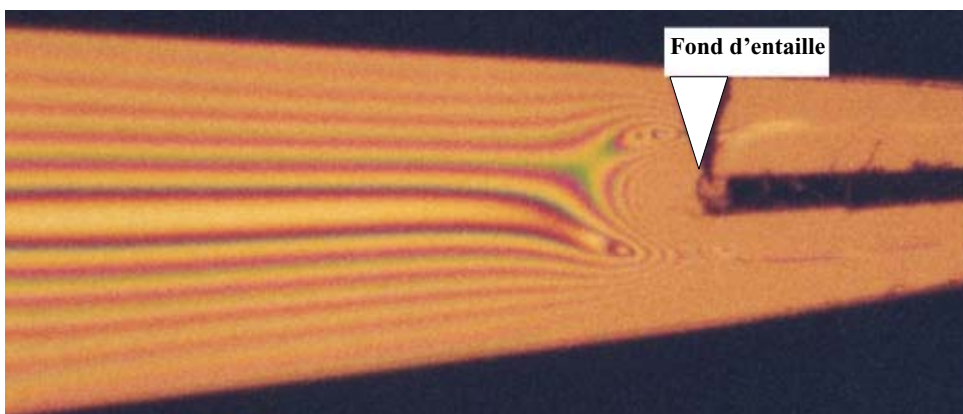


Fig. 3.4 : Isochromes observées en Mode II sur un spécimen massif de polycarbonate.

Dans le cas des assemblages collés soumis à une rupture cohésive, si on considère que la fissure reste dans l'adhésif et que l'on néglige les termes de second ordre dans l'expression du champ de contrainte [146], le tracé des isochromes devrait être similaire pour l'assemblage collé. Cependant, les observations sur spécimens collés de substrats identiques divergent des premières ce qui suppose que l'effet des interfaces et des termes de second ordre ne peut être négligé. De plus, la nature même de l'adhésif suppose qu'il subit au cours des sollicitations de grandes déformations locales en fond de fissure [131]. Malgré son caractère fragile, il est supposé avoir un comportement adoucissant et nous sommes dans le cadre d'une mécanique non linéaire de la rupture. Une transposition du modèle de la fissure fictive [131] peut être faite pour appréhender le comportement d'un assemblage collé sous sollicitation où les phénomènes d'endommagement tels que la création de micro vides, la micro fissuration et la fibrillation sont courants.

2.1.1. Comportement mécanique des assemblages collés:

Lors du chargement, la concentration de contrainte en fond de fissure conduit à la perte précoce du comportement élastique de l'adhésif. La nature de la non linéarité de ce comportement peut être vérifiée par la décharge de spécimens chargés où la fissure ne s'est pas propagée. Dans le cas d'un essai de cisaillement, nous obtenons les courbes suivantes (figure 3.5) :

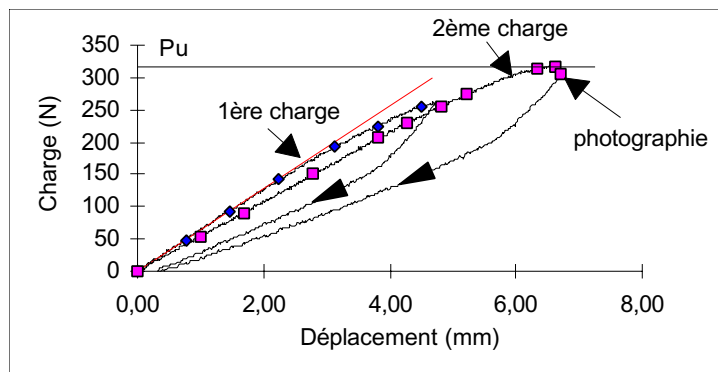


Fig. 3.5 : Courbes charge-déplacement d'une éprouvette T.E.N.F. collée

Si l'on charge suffisamment un spécimen jusqu'à atteindre un comportement non linéaire mais sans propager la fissure, il apparaît que la pente de la courbe de recharge est plus faible, tant en cisaillement qu'en ouverture.

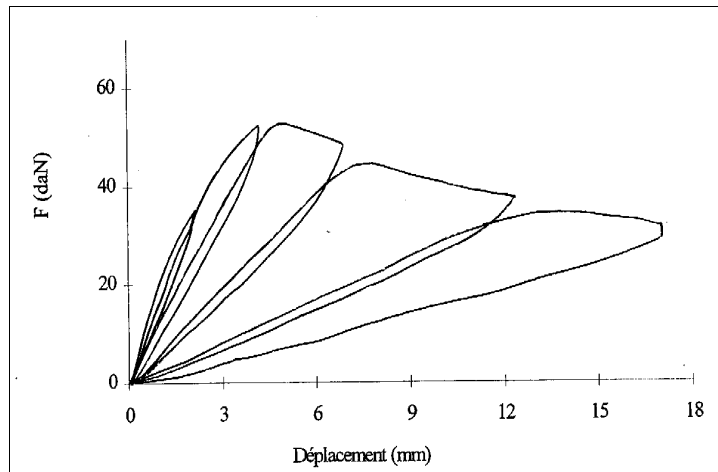


Fig. 3.6 : Courbes charge-décharge de spécimens collés de Mode I

La raideur de l'assemblage a donc été modifiée alors que la fissure ne s'est pas propagée. Comme la limite élastique du substrat est suffisamment grande pour supporter le déplacement induit lors de la première charge sans subir de déformation plastique, la perte de raideur peut être imputée au seul endommagement du joint de colle. De même dans le cas de l'ouverture de la fissure (figure 3.6), la pente de la courbe diminue entre les trois premières charges alors que la fissuration, matérialisée par le plateau, n'intervient qu'à la troisième mise en charge. Enfin, une observation des faciès de rupture montre clairement une cavitation qui se produit dans le joint lors de la sollicitation.

2.1.2. Essais de photoélasticité ; Visualisation des contraintes :

Dans les deux types de sollicitation, l'éprouvette non chargée laisse apparaître des contraintes résiduelles dues au collage qui ne semblent pas trop perturber le champ de contrainte une fois le spécimen chargé.

2.1.2.1. Mode I :

On retrouve dans le spécimen collé les trois grandes régions que l'on avait pu visualiser dans le cas du spécimen massif même si les variations d'orientation des isochromes sont beaucoup moins rapides dans le cas du spécimen collé. Cependant, la distance entre le fond de la fissure et la zone de répartition des contraintes est beaucoup plus importante pour le spécimen collé. De plus, il apparaît dans cet espace une zone intermédiaire dont la taille croît avec la charge et qui semble se déplacer lors de la propagation de la fissure. On peut observer cette zone située entre les deux repères de couleur sur la photographie suivante :

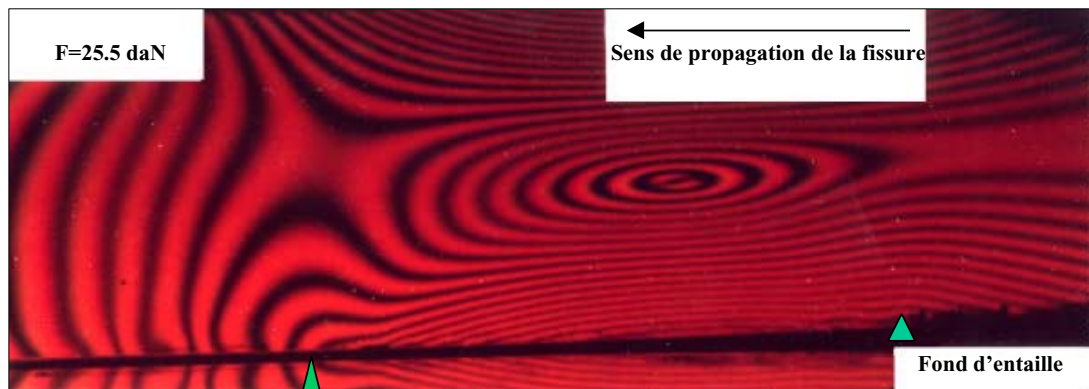


Fig. 3.7 : Spécimen collé sollicité en ouverture (Mode I).

2.1.2.2. *Mode II* :

Les bras de l'éprouvette au niveau de l'entaille se comportent comme deux demi poutres au comportement identique. Elles sont toutes deux caractérisées par la présence d'une frange sombre située sur leurs lignes moyennes respectives. Cette frange sombre suit la ligne moyenne de la demi éprouvette jusqu'au moment où elle subit un changement d'inclinaison pour rejoindre la ligne moyenne de l'assemblage collé (donc le joint de colle). Une description de cette zone perturbée apparaît figure 3.9. Celle-ci se développe avec l'augmentation de la charge. Lorsque se produit la propagation de la fissure, on assiste à un déplacement de cette zone perturbée le long du joint. On peut aussi noter que sa longueur semble demeurer constante pendant la propagation et que sa forme ne varie pas avec le changement d'inertie de l'éprouvette.

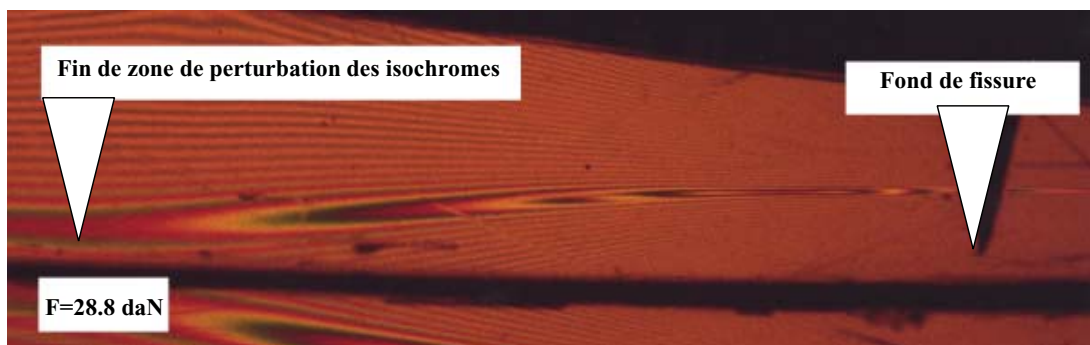


Fig. 3.8 : Spécimen collé sollicité en cisaillement (Mode II)

Dans les deux cas, une zone de perturbation de franges apparaît en avant du fond de fissure et semble croître avec le chargement jusqu'à la phase de propagation de la fissure pendant laquelle elle demeure constante

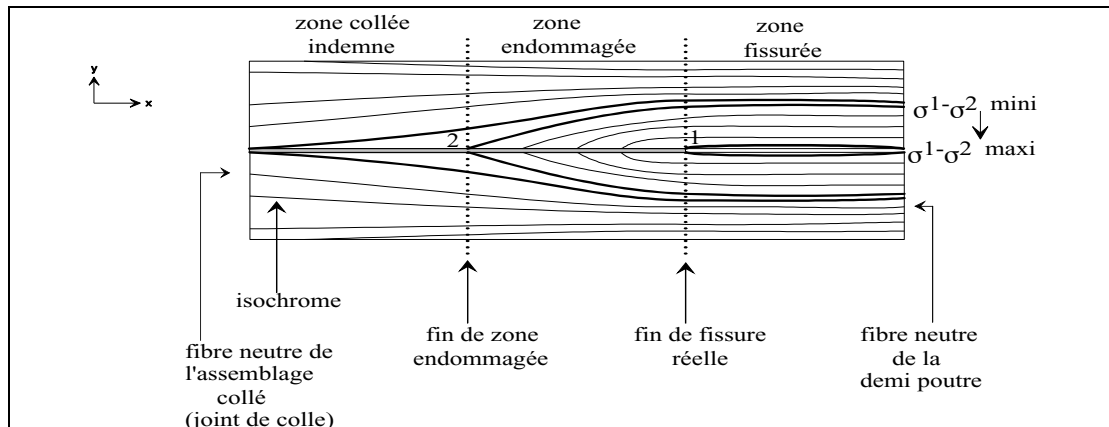


Fig. 3.9 : Visualisation de la zone de perturbation des isochromes par la photoélasticité en Mode II.

2.1.2.3. Localisation du fond de fissure et interprétation :

Des essais supplémentaires ont été effectués pour confirmer la localisation du fond réel de la fissure. Après une propagation de fissure en cisaillement, l'éprouvette est déchargée puis rechargée à nouveau afin de déterminer au mieux la zone de perturbation de franges. Deux repères sont ainsi collés sur l'éprouvette : le premier au fond réel de la fissure et le second au fond de la zone endommagée (les deux zones étant repérées selon la méthode décrite auparavant).

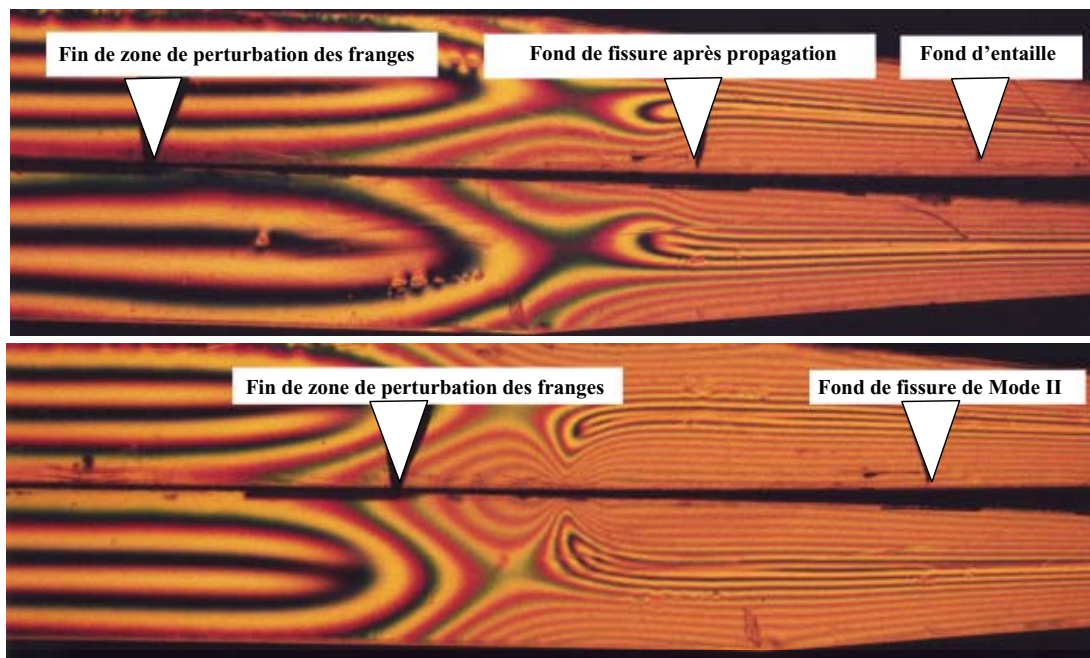


Fig. 3.10 : Localisation du fond de fissure réel

Ainsi, un chargement de mode I est effectué (fig. 3.10) pour identifier la position du premier repère. Il semble que le fond de fissure de mode I se situe entre les deux marques ce qui peut s'expliquer par la difficulté de localiser précisément le fond de la fissure réelle et par le fait que la fissuration en mode I du joint déjà endommagé étant instable, le moindre chargement induit une propagation de la fissure. De plus, si le fond de fissure de mode II se trouvait au niveau de la deuxième marque, le chargement de mode I conduirait directement à ce repère: on peut donc ajouter que le changement d'inclinaison des franges sombres de chaque demi éprouvette marque bien le fond de fissure réel.

Enfin, si l'on s'intéresse à l'évolution de la taille de cette zone de perturbation de franges en fonction de la charge appliquée, on s'aperçoit que celle-ci croît, pour chacun des modes de sollicitation, de manière à peu près linéaire en fonction de la charge. Dans le cas du mode II et sur plusieurs spécimens identiques, ce phénomène se produit jusqu'à la propagation de la fissure où cette zone atteint une longueur critique constante matérialisée par un plateau sur la figure 3.11. De même cette même figure montre, pour un chargement de Mode I, la croissance linéaire de la zone perturbée jusqu'à la fissuration.

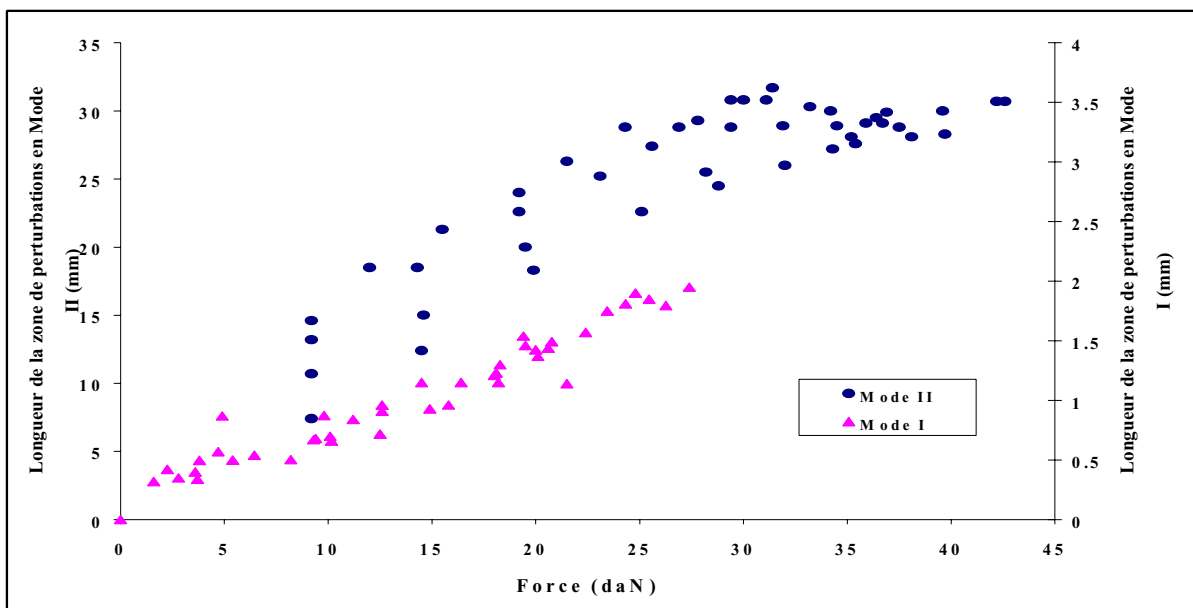


Fig. 3.11 : Evolution de la zone de perturbations de franges en ouverture et cisaillement en fonction de la force appliquée.

A la vue des essais, il semble que la zone de perturbations de franges garde une longueur à peu près constante après propagation mais le chargement constant en Mode I rend la localisation précise du fond de fissure difficile. La figure montre l'évolution de cette zone pour différentes longueurs de fissure initiale. On peut constater que la longueur de la zone

endommagée n'est pas fonction de celle de la fissure initiale mais simplement de la force appliquée. Cette évolution de la zone perturbée semble confirmer les travaux de Chai [151] sur la zone endommagée en fond de fissure d'assemblages collés et en particulier l'existence d'une longueur critique atteinte au moment de la propagation. De plus, il existe une forte différence de taille de zone perturbée entre les deux types de sollicitation ce qui pourrait expliquer la différence de stabilité de fissuration entre les deux modes et le caractère plus fragile de la fissuration de Mode I.

Même si les renseignements qu'elle apporte ne sont ici que qualitatifs, la photoélasticité permet l'identification d'une zone de perturbation de franges en fond de fissure pour chacun des modes de sollicitation. L'évolution de cette zone avec la charge se révèle linéaire jusqu'à atteindre une longueur critique synonyme de propagation de la fissure. Cette zone de perturbation des contraintes élastiques dans les substrats semble être un bon indicateur de la zone endommagée du joint collé car elle suit un comportement similaire à une zone endommagée déjà décrit par de nombreux auteurs [151].

2.2. Rupture cohésive en cisaillement des assemblages épicea-polyuréthane :

Les essais de rupture réalisés sur ces spécimens collés selon la configuration à fil du bois convergent vers le plan de collage donnent des résultats tout à fait convaincants dans la mesure où la fissuration cohésive de l'adhésif est systématiquement obtenue. Cependant, on peut observer à la vue des résultats de cette campagne d'essais que deux types de rupture cohésive doivent être envisagés dans la prévision du comportement de l'assemblage collé sollicité en flexion 3 points. Une première rupture pourra se produire dans une zone proche de l'un des deux interfaces, selon une direction de rupture rectiligne et peu tourmentée donnant un faciès de rupture à faible rugosité et d'aspect peu endommagé. Le niveau de chargement apparaît bien en deçà de celui des spécimens présentant l'autre type de rupture cohésive dont les caractéristiques sont un faciès de rupture fortement rugueux et tourmenté, un niveau d'endommagement très fort et une partie non linéaire de la courbe force-déplacement bien plus accentuée que dans le premier cas. Ce dernier point apparaît sur la figure suivante où l'on peut visualiser deux courbes expérimentales obtenues, comparées à une courbe expérimentale traitant de la rupture d'un spécimen en bois massif.

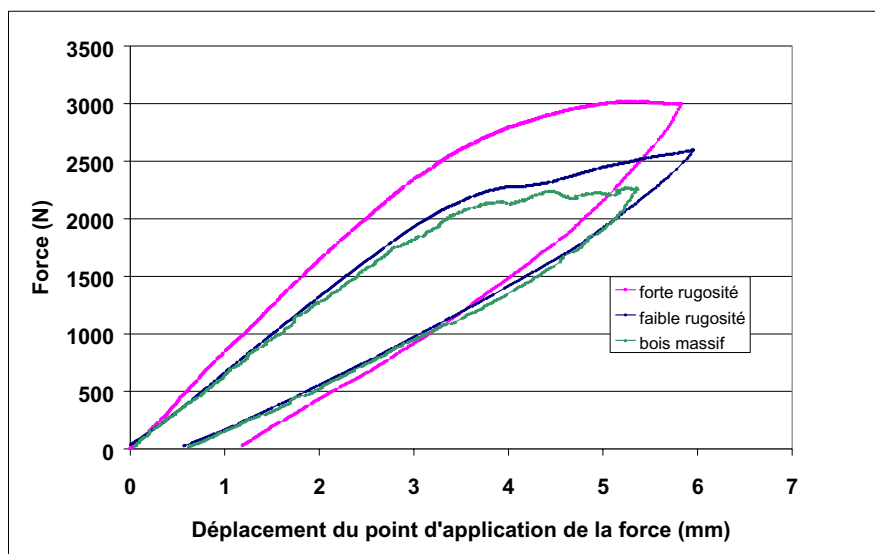


Fig. 3.12: Courbes expérimentales de flexion 3 points de spécimens TENF collés.

On peut observer sur ce type de courbe que le cas de rupture à faible rugosité de la surface fissurée se produit à des niveaux de charge et déplacement proches de ceux du spécimen massif mais dans une limite toutefois supérieure car selon un type de propagation stable au début mais qui ensuite se produit à charge légèrement croissante. Cet aspect de la courbe force-déplacement se retrouve toujours pour ce type de fissuration, et la période de reprise en charge suit une phase de propagation soit stable, soit légèrement fragile.

En revanche, dans l'autre cas de figure, la courbe expérimentale apparaît beaucoup plus bombée avec une zone non linéaire bien plus importante et une propagation réalisée à charge constante. Il faut toutefois dans ce cas observer que la différence de raideur à l'origine des deux spécimens collés sur la figure 3.12 provient certainement d'une différence de qualité du joint du fait que, dans ce cas de figure, les modules longitudinaux des spécimens testés sont du même ordre de grandeur (environ 14500 MPa). Ceci expliquerait la propagation de la fissure dans la zone de faible cohésion qui constituerait une zone sensible et d'une certaine faiblesse de l'assemblage collé. Les observations faites directement sur les faciès de rupture peuvent être visualisées sur la figure suivante.

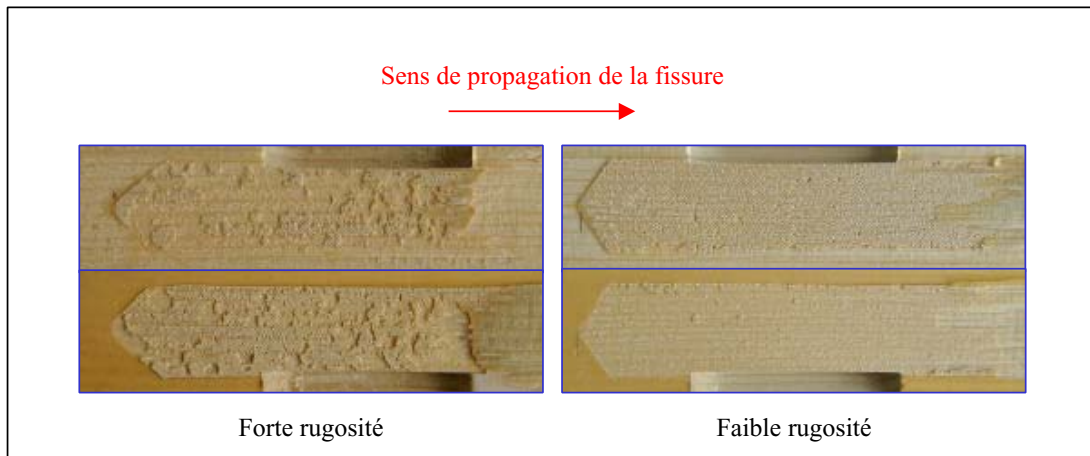


Fig. 3.13 : Faciès de rupture obtenus lors de la fissuration cohésive d'assemblages PU collés.

Dans le deuxième cas, la propagation s'effectue dans une zone très proche de l'interface supérieure sans changements de direction. Ce type de propagation dans ce que l'on peut nommer la zone de faible cohésion de l'assemblage est certainement favorisée par la présence d'éléments contaminants introduits pendant l'accostage des deux substrats lors du collage. Ainsi, cette zone de faiblesse de l'interface collée pourrait expliquer la forte différence de raideur initiale de l'assemblage alors que les substrats ont des caractéristiques mécaniques identiques. On peut enfin noter que ce type de propagation est considéré comme cohésif car on peut clairement observer la présence de colle sur les deux faces de la surface fissurée.

2.2.1 Grandeurs énergétiques déterminées.

Au niveau de énergies de rupture calculées selon la méthode décrite dans la procédure expérimentale, les résultats sont significatifs et confirment les premières observations. En effet, dans le cas des spécimens présentant une faible rugosité de surface de rupture, l'énergie de rupture totale calculée (G_{IIIF}) est de l'ordre de $1553 \pm 297 \text{ J/m}^2$ (Coef. De variation de 19%) alors que pour les autres cas de figure, G_{IIIF} varie de 2300 à 3340 J/m^2 , cette valeur variant avec le degré d'endommagement et de rugosité de la surface fissurée. Pour comparaison, on peut noter que dans le cas d'un spécimen en bois massif présentant une fissuration non déviée dans du bois sans défauts, l'énergie de rupture totale en cisaillement G_{IIIF} est de l'ordre de $810 \pm 200 \text{ J/m}^2$ (Coef de variation de 18%). On peut observer que pour un type de rupture clairement défini, la dispersion des résultats est du même ordre que celle des essais réalisés sur les spécimens massifs, donc que le processus de collage n'induit pas de dispersion supplémentaire des résultats lorsqu'un même type de fissuration est isolé et considéré. Ces résultats montrent aussi clairement qu'une propagation dans la couche de faible cohésion, même si elle n'est pas satisfaisante du fait qu'elle soit due à la présence

d'éléments contaminants, permet d'atteindre une énergie de rupture totale deux fois plus importante que celle déterminée pour la rupture d'un spécimen massif. On peut aussi noter qu'une fissure déviée dans le bois, qui caractérise une bonne adhésion bois-colle et un comportement performant de l'adhésif ne permet pas d'atteindre de tels niveaux d'énergie. Le tableau de l'*Annexe 6* reprend tous les résultats de fissuration cohésive que nous avons obtenu lors de nos essais (toutes campagnes d'essais confondues) sur les deux configurations de collage. On peut signaler que la deuxième configuration à fil du bois convergent vers le plan de collage permet d'atteindre une fissuration cohésive du joint de façon quasi systématique. Le tableau reprend ces résultats en isolant chaque type de fissuration clairement identifié : fissuration dans la zone de faible cohésion, rupture fragile ou due à un accident de polymérisation ou rupture à fort niveau d'endommagement. Ce dernier cas étant celui demandant le plus d'énergie à la fissure, les résultats sont évidemment les moins nombreux du fait que la fissure prend toujours le chemin qui consomme le moins d'énergie. On peut aussi souligner que tous les spécimens qui n'apparaissent pas dans ce tableau ont présenté des ruptures soit non cohésives, soit brutales (en particulier du bras de l'éprouvette à cause d'un défaut d'usinage). Les grandeurs que l'on retrouve dans le tableau sont les suivantes :

- Modules d'Young des substrats (ou à défaut, masse volumique anhydre) déterminés avant usinage de l'éprouvette.

- Raideur de l'assemblage (pente du domaine linéaire de la courbe force-déplacement)

- Force (P_u) et déplacement (d_u) à l'initiation du plateau.

- Force maximale supportée par le spécimen durant l'essai (P_{max})

- Déplacement maximal (d_{max}) et la force correspondante (F_{depmax}).

- Energies de rupture.

On peut voir en comparant ce tableau à celui des essais sur le bois massif que l'introduction du joint PU diminue la raideur de l'assemblage en conservant à peu près la même dispersion. En revanche, les résultats concernant les charges observées présentent une dispersion bien plus grande dans le cas des assemblages. Ceci peut s'expliquer par le fait que pour P_u , par exemple, le début de la propagation est souvent difficile à identifier car le plateau est faiblement marqué ou la propagation démarre à chargement croissant. De plus, du fait de la variation sur la raideur des substrats, il est assez logique, vu la sollicitation imposée, d'obtenir une distribution similaire des résultats en force similaire. Par contre, la distribution en déplacement s'avère beaucoup moins forte (<10%) ce qui aurait tendance à impliquer un départ de fissuration à un taux de glissement à peu près identique quelle que soit la raideur des substrats composant l'assemblage. Les informations données par le déplacement maximal ne sont que purement indicatives sachant que l'essai est stoppé par l'opérateur. Il faut toutefois noter qu'au delà de 6.5 mm de flèche, la tenue à la sollicitation de l'éprouvette, en partie à

cause de ses singularités géométriques, n'est plus garantie. Au niveau des énergies de rupture, la difficulté d'identifier le début de la propagation se retrouve dans le calcul de GII_c mais les résultats d'énergie de rupture totale, pour un même type de fissuration clairement isolé, montrent une dispersion acceptable du fait des paramètres nombreux influençant ce résultat (frottements des lèvres de la fissure par exemple). De plus, les types de fissuration isolés retranscrivent un phénomène majoritaire observable sur la surface rompue. Il faut bien avoir conscience qu'une dispersion provient du fait que même si une rupture est globalement réalisée dans la zone de faible cohésion du joint, on peut trouver sur le faciès des zones laissant apparaître un endommagement plus fort en certains points ou un changement d'interface de la fissure (phénomènes demandant plus d'énergie) ou à contrario, des défauts ponctuels (bulle d'air, accident de polymérisation, impuretés...) permettant une propagation nécessitant moins d'énergie pour la fissure. Ceci apparaît clairement dans les observations in situ de l'endommagement de l'assemblage sous sollicitation.

2.2.2. *Suivi de la fissuration par acquisition d'images [152].*

Ces essais de rupture ont ensuite été associés à un procédé d'acquisition d'images haute résolution dans le but d'observer in situ l'endommagement du joint de colle pendant la sollicitation par le biais d'une fenêtre d'observation réalisée sur le flanc de l'éprouvette. Ces observations, réalisées tout d'abord en considérant un champ d'observation de quelques centimètres puis ensuite quelques millimètres, permettent d'identifier des paramètres distincts selon le type de fissuration. Ainsi, une observation à grossissement moyen des deux spécimens dont les courbes expérimentales apparaissent figure 3.11 et les faciès de rupture figure 3.12 permet clairement de voir que dans le cas du joint présentant une forte rugosité de la surface de rupture, l'endommagement s'étend sur toute l'épaisseur de l'adhésif par un blanchiment important (plastification ?) et des micro fissures qui apparaissent en avant du front de fissure. L'hypothèse d'une zone endommagée par micro fissuration se développant en avant de la fissure réelle avant la propagation semble alors confirmée. De même, son influence sur la stabilité de la fissuration est confirmée dans la mesure où le caractère relativement fragile de la rupture du spécimen à faible rugosité de surface ne se retrouve pas dans l'autre type de propagation. Ceci apparaît clairement sur les images suivantes.

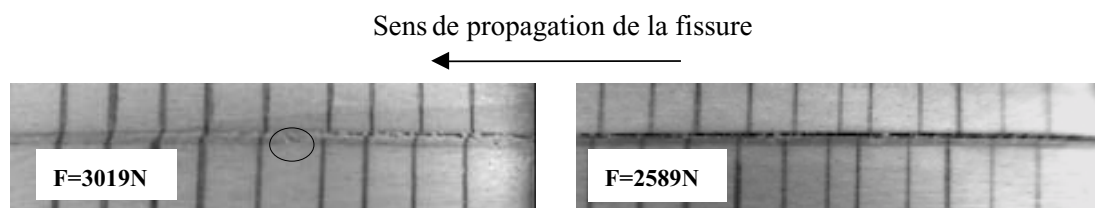


Fig. 3.14 : Observations in situ de l'endommagement d'un joint PU collé en cisaillement.

Sur l'image de gauche, une micro fissure orientée à 45° par rapport au plan de collage (dans le repère noir) apparaît. Elle est associée au blanchiment du joint dans toute son épaisseur. De même, l'image de droite montre une propagation dans la couche de faible cohésion de l'assemblage, rectiligne, sans endommagement profond de l'adhésif. On peut observer à l'aide des repères verticaux disposés à 2.5 mm d'intervalle, que lorsque la rupture est totale, ceux ci sont nettement décalés (image de droite). Dans le cas d'un endommagement fort précédant la rupture, même si l'image laisse penser que la fissure s'est propagée au bord du joint, l'observation de ces mêmes repères semble indiquer qu'il persiste une certaine cohésion au niveau de l'assemblage de par la déformation des repères. Pour ces raisons, il est extrêmement difficile de procéder à une localisation du fond réel de la fissure sachant que nous n'avons, de plus, accès qu'aux phénomènes d'endommagement se produisant en surface du joint de colle.

De même, on a pu observer une fissure déviée dans le bois et une fissure se propageant dans l'interphase bois-colle. Dans le cas de la fissure déviée, on voit nettement que celle-ci suit le fil du bois alors que pour la propagation dans l'interphase, la fissure reste dans une alternance de bois et de colle, très proche de l'interface supérieure.

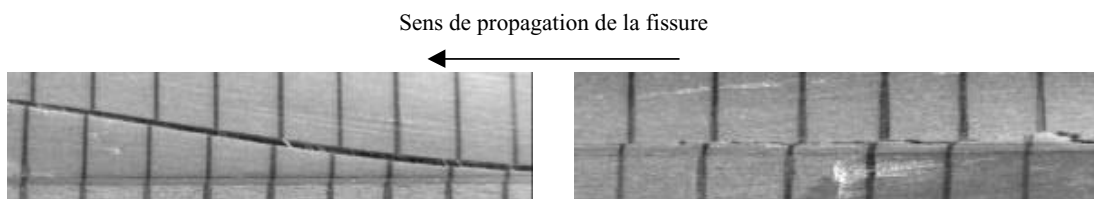


Fig. 3.15 : Observations de propagations déviée dans le bois ou dans l'interphase bois-colle.

Dans le cas de la fissure se propageant dans l'interphase (photo de gauche), l'énergie de rupture dissipée est de l'ordre de 2280 J/m^2 , qui se situe dans une valeur moyenne des ruptures cohésives à forte rugosité de surface fissurée. L'ouverture du spécimen a montré par la suite que la propagation à l'interphase s'est uniquement produite à la périphérie de l'éprouvette alors que le cœur du joint a été fissuré de façon cohésive.

Si l'on observe à plus fort grossissement le bord du joint selon le même principe, on peut observer dans les cas où l'endommagement est fort la présence de micro fissures orientées à 45° par rapport au plan de collage (selon la contrainte d'ouverture maximale). De plus, le développement des micro fissures se fait en avant du fond de fissure réel, et ce bien avant la propagation et de manière plus ou moins importante selon les spécimens observés. Il faut toutefois noter que les observations réalisées donnent une indication uniquement sur l'état de la surface du joint. On a pu observer sur les faciès de rupture que la fissure ne propage pas sur un front rectiligne mais plutôt selon une forme en chevron (thumb nail). Il est

ainsi très difficile de localiser avec précision le fond réel de la fissure avec de telles observations. On peut aussi observer une propagation de fissure qui alterne d'une interface à l'autre, certainement à cause de la présence des micro fissures mais la périodicité du phénomène n'a pu être observée de façon aussi flagrante que dans la littérature. Par contre, on a pu observer des zones de délamination importantes à fort blanchiment du joint (certainement une plastification) comme sur les clichés suivants où les photos de gauche représentent l'état initial du joint et celles de droite la fin de la propagation pour différents spécimens testés. Les premiers clichés montrent une fissuration tout d'abord dans la zone de faible cohésion proche de l'interface supérieur puis une fissuration à fort endommagement dans un second temps.

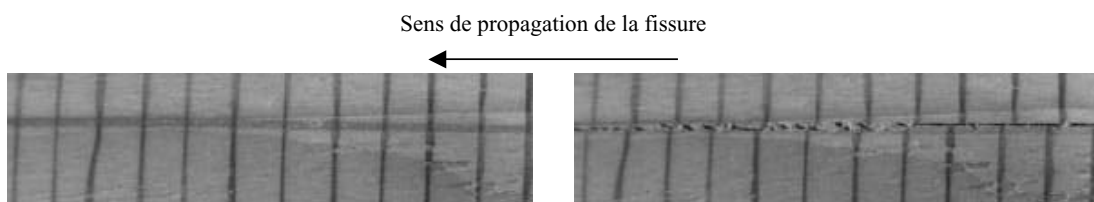


Fig. 3.16 : Alternance des 2 types de fissuration s cohésives sur un même spécimen (Epreuve 27).

On peut donc encore visualiser une source de dispersion des valeurs dans la mesure où même lorsque la fissuration est cohésive, celle-ci peut se faire selon différents stades d'endommagement. La figure 3.17 montre un phénomène que nous avons pu observer sur certains spécimens : une délamination du joint peut se produire, surtout à l'initiation de la fissuration. Cette délamination se produit dans ce cas sur une longueur d'environ 3 mm et induit une ouverture de la fissure non négligeable par rapport au glissement imposé par la sollicitation.

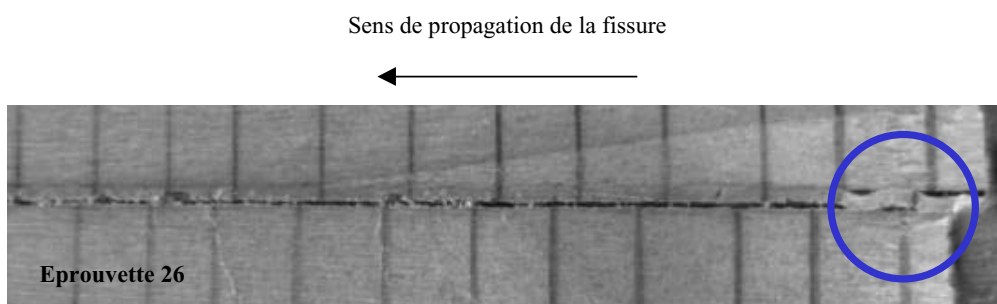


Fig. 3.17 : Délamination du joint de colle lors de la sollicitation de cisaillement.

Les clichés suivants sont réalisés à un grossissement environ dix fois supérieur au précédent. Les observations effectuées montrent en plus une fibrillation du joint de colle avant la rupture et un pontage entre les deux lèvres de la fissure qui constitue certainement l'ultime source de cohésion du joint de colle avant la rupture totale. On peut observer sur les clichés de

tous les essais réalisés l'existence d'une ouverture de fissure lors de sa propagation (pouvant aller jusqu'à 0.1 à 0.15 mm) qui correspond à une sollicitation locale d'ouverture (Mode I). Ces observations tendent à penser que l'endommagement du spécimen avant fissuration est bien réalisé par la sollicitation de cisaillement mais que la propagation s'effectue sous un mode mixte d'ouverture et de cisaillement. Ceci est peut être induit par la rugosité de la surface fissurée qui provoque un blocage des lèvres de la fissure et donc une nécessité d'ouverture de ces lèvres pour pouvoir se propager.

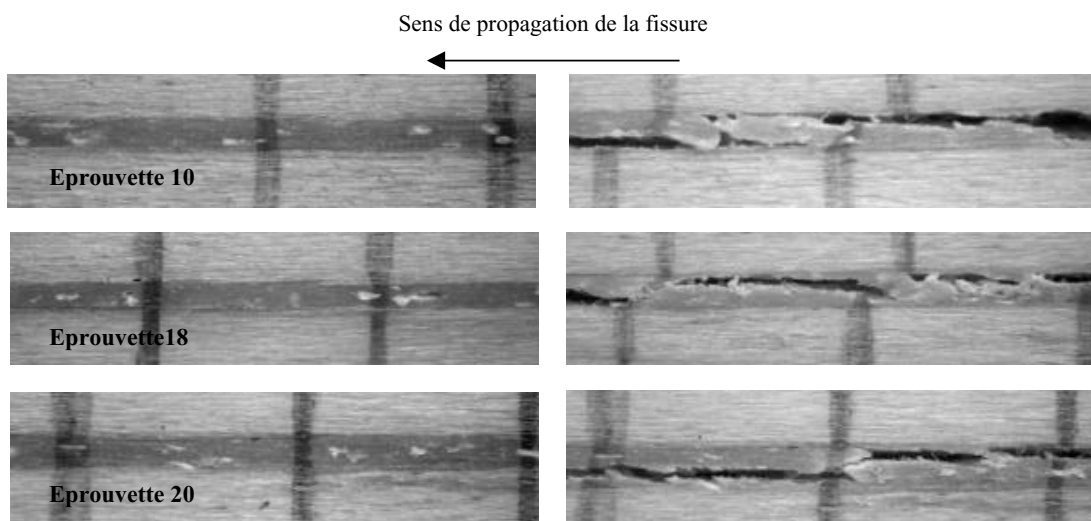


Fig. 3.18 : Observations à fort grossissement de l'endommagement en cisaillement des assemblages PU collés.

De même, un phénomène de pontage des lèvres de la fissure apparaît dans chacune des fissurations cohésives mais son influence sur la cohésion de l'assemblage semble moins importante que dans le cas du bois massif (ou d'une fissure déviée) où le phénomène est prédominant, comme le montrent les clichés de la figure 3.19.

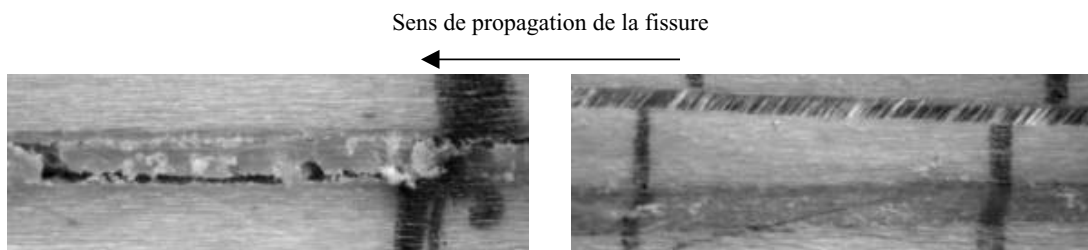


Fig. 3.19: Pontage entre les lèvres de la fissure dans le cas d'une fissuration dans la colle et déviée dans le bois.

Afin de mettre en évidence le phénomène d'endommagement, des cycles de charge ont été réalisés sur des spécimens collés en appliquant le même procédé d'acquisition d'images (Fig. 3.20). Les résultats apparaissent sur la figure 3.20 où l'on peut voir des images prises à différents stades de la sollicitation et les courbes force-déplacement correspondant aux sollicitations appliquées.

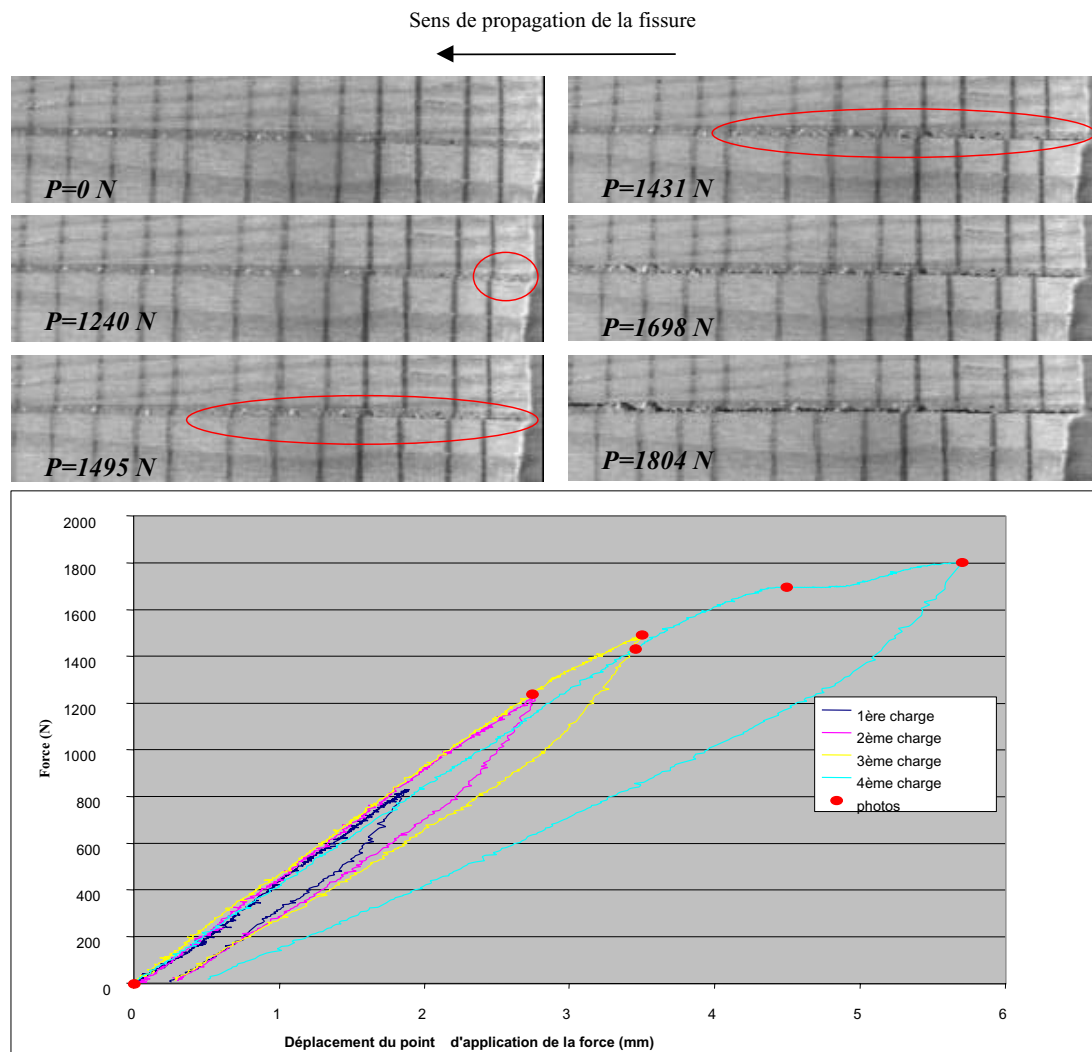


Fig. 3.20: Cycles de charge d'une éprouvette collée en flexion 3 points associée à une observation de l'endommagement du joint de colle.

Tout d'abord, deux cycles sont réalisés dans le domaine linéaire et les observations de la caméra ne montrent aucun signe d'endommagement visible au niveau du joint. Une troisième charge est alors réalisée jusqu'à atteindre un comportement non linéaire de l'éprouvette. Les premières micro fissures apparaissent à la périphérie du joint de façon assez intense entre le début de la non linéarité (1240 N) et le moment choisi pour la décharge (1495

N). A cet instant, il n'y a pas eu propagation de la macro fissure mais la courbe de la 4^{ème} charge montre une forte augmentation de la complaisance de l'assemblage. Le cliché pris à 1698 N montre un développement de cet endommagement mais il faut toutefois souligner que la macro fissure a débuté sa propagation. On peut aussi observer la confirmation de l'ouverture progressive des lèvres de la fissure indiquant que localement, la rupture est associée à une sollicitation mixte d'ouverture et de cisaillement. La dernière image est prise à la décharge après propagation où l'on peut observer une ouverture de la fissure importante. Il semblerait que le départ de la macro fissure soit lié au début du phénomène de clivage des lèvres de la fissure. On peut observer ceci sur les clichés pris à 1431 N et à 1698 N entre lesquels la fissure a débuté sa propagation et où l'ouverture des lèvres est significative.

Ces essais de fissuration en cisaillement sur des assemblages polyuréthane apportent une somme considérable d'informations ; tout d'abord, la fissuration cohésive du joint est facilement maîtrisable avec ce type d'adhésif et propose des niveaux énergétiques de rupture largement supérieurs à ceux du bois massif. De plus, on peut déjà observer sur les joints de 0.25 mm que la fissure a tendance à se propager dans la zone de faible cohésion de l'adhésif, en évitant le cœur du joint où les forces de cohésion du polymère sont maximales. La configuration de collage à fil du bois convergent vers le joint confirme une fissuration cohésive quasi systématique même si cet adhésif et une épaisseur de 0.25 mm permettent de s'en affranchir. Les observations faites à l'aide des caméras montrent en périphérie du joint un endommagement fort avant propagation (micro fissures) mais ne permettent pas une localisation précise du fond de la fissure. En revanche, le mode de propagation a pu être identifié comme étant une association d'ouverture et de cisaillement. Les phénomènes d'endommagement sont, quant à eux, en majorité dus au cisaillement.

A la lumière de toutes ces informations, il est maintenant plus facile d'apporter une interprétation judicieuse aux autres essais de rupture des assemblages bois collé. Ces essais ont été réalisés sur des assemblages collés selon la première configuration à l'aide des adhésifs polyuréthane et résorcine phénol formol. Le choix de cette configuration a été dicté par le fait de laisser libre cours à la fissuration afin d'observer le comportement réel du couple adhésif substrat sous sollicitation. En effet, il est possible de canaliser la fissure dans le joint de colle par orientation du fil du bois pour certains types d'assemblages. Ainsi, la fissuration cohésive crée un apport non négligeable dans la résistance à la rupture. Pour pouvoir quantifier cet apport par rapport aux autres phénomènes, il est nécessaire d'en avoir des valeurs indicatives. De plus, l'alternance de la fissure d'un interface à l'autre, même si la périodicité n'a pas été clairement identifiée, n'est elle pas due à l'orientation du fil du bois ? Chaque adhésif a été testé sous trois épaisseurs de joints distinctes, dont deux communes aux deux adhésifs à titre de comparaison. Il faut toutefois noter que l'adhésif résorcine phénol

formol est préconisé pour des joints fins (strictement inférieurs à 0.5 mm d'épaisseur) alors que le polyuréthane l'est pour des joints plutôt épais. Enfin, chaque type d'assemblage est testé en ouverture et en cisaillement.

3. Rupture des assemblages bois collés.

3.1. Essais de Mode I :

Les résultats des essais réalisés sur des spécimens identiques en bois massif figurent en *Annexe 2*. Ils montrent que l'éprouvette est adaptée à la sollicitation car nous obtenons des ruptures stables et peu déviées dans la majorité des cas. De plus, les coefficients de variation de chaque valeur déterminée sont largement acceptables pour le matériau bois (12% pour G_{If} , par exemple). La variation plus importante au niveau de la raideur est sûrement due en partie à l'usinage très délicat de ce type d'éprouvette. Enfin, nous voyons que la stabilisation en humidité du bois est bonne à 15% environ avec un coefficient de variation faible (1%). Ceci est important pour les essais sur les assemblages collés car le facteur différence d'humidité relative entre les substrats pourra être exclu des interprétations. De même, les colles et le bois étant conditionnés en permanence à température contrôlée, il n'y a pas de gradient de diffusion thermique lors de l'assemblage car l'échauffement de la colle lors de la préparation et de la polymérisation peut être considéré comme négligeable.

Les essais effectués sur les assemblages collés dans les conditions décrites dans la procédure expérimentale laissent apparaître une grande dispersion de résultats en partie due à une forte concurrence entre différents types de fissuration. En effet, la sollicitation d'ouverture des assemblages collés engendre, quel que soit l'adhésif, une rupture qui peut être indifféremment :

- déviée dans le bois après initiation dans l'interphase, dans le joint, ou à l'interface.
- cohésive dans la colle puis adhésive ou dans l'interphase.
- dans l'interphase.
- oscillante d'un interface à l'autre.

Cette concurrence directe entre les différents types de fissuration rend l'interprétation des résultats et l'objectif de dimensionnement de l'assemblage collé difficile. Cependant, de nombreuses indications apparaissent déjà pour chaque adhésif. On peut enfin souligner la difficulté de mesure du déplacement de la force par l'extensomètre optique conduisant à des problèmes de décrochage vis à vis de la cible, menant à l'échec de l'essai.

3.1.1. Assemblages polyuréthane :

La concurrence entre les différentes ruptures apparaît sur les diagrammes suivants pour les trois épaisseurs de joint étudiées (tableaux donnés en *Annexe 7*).

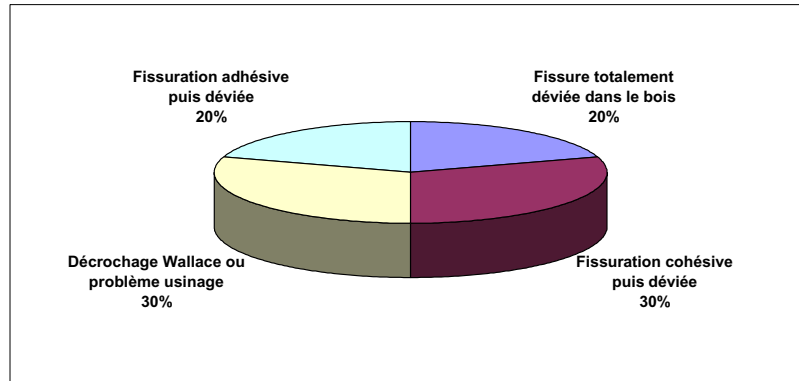


Fig. 3.21 : Fissuration en ouverture des assemblages polyuréthane à joint d'épaisseur 0.25mm.

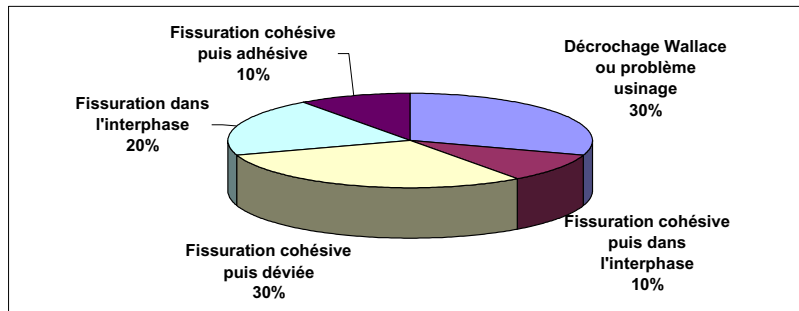


Fig. 3.22 : Fissuration en ouverture des assemblages polyuréthane à joint d'épaisseur 0.5mm.

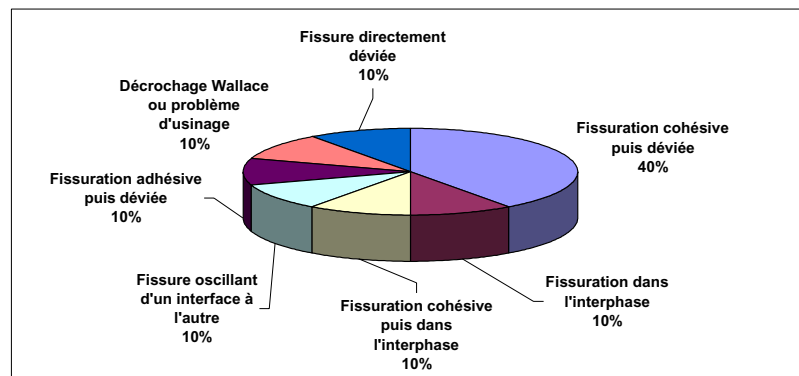


Fig. 3.23 : Fissuration en ouverture des assemblages polyuréthane à joint d'épaisseur 0.75mm

Si on s'intéresse à la raideur initiale de chaque assemblage testé et pour chaque épaisseur de joint, on obtient la figure 3.24. Nous pouvons observer sur cette figure qu'il peut exister des disparités de raideur entre deux assemblages de même caractéristique mais appartenant à une batterie de collage différente (flèches sur le graphique). Cependant, ces disparités existent aussi sur le bois massif d'une part à cause de la dispersion naturelle du matériau et d'autre part certainement à cause de l'usinage délicat des spécimens. On peut ainsi supposer que le collage ne fait qu'amplifier, dans certains cas, les faibles différences de géométrie dues à l'usinage. L'analyse D.S.C. aura pour objectif de rechercher si des différences de polymérisation de l'adhésif existent entre deux batteries de collage distinctes. Dans le cas contraire, on a vu dans la littérature que la présence d'éléments contaminants dans la zone de faible cohésion pouvait affecter les propriétés globales de l'assemblage. On peut toutefois voir que la raideur de l'assemblage croît selon une tendance linéaire avec la masse volumique des substrats et que pour une même épaisseur de joint, il peut exister d'importantes différences de raideur entre deux collages différents. On peut aussi constater que l'augmentation de l'épaisseur du joint ne modifie pas de façon notable la raideur de l'assemblage qui reste, en moyenne, inférieure à celle du spécimen massif.

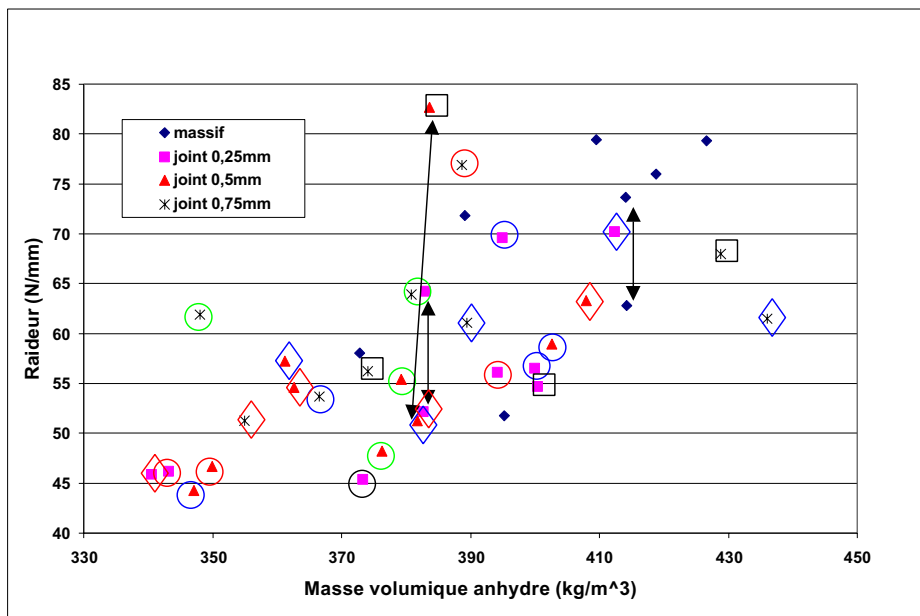


Fig. 3.24 : Raideur de l'assemblage PU en ouverture en fonction de la masse volumique anhydre des substrats

Les symboles de couleur sur la figure 3.24 correspondent au dates de collage :

- ○ collage du 10 juin 1998
- ◇ collage du 15 juin 1998
- ● collage du 11 juin 1998
- ◆ collage du 16 juin 1998
- □ collage du 12 juin 1998
- ○ collage du 3 septembre 1998

Si l'on s'intéresse aux forces d'initiation de la fissure P_u , celles-ci sont en moyenne plus faibles que dans le cas du bois massif car la fissure est initiée dans la colle. Ainsi, on peut observer dans la majeure partie des courbes force-déplacement (telles que celles apparaissant fig. 3.40 et 3.41) un léger saut fragile suivi d'une reprise en charge quasi immédiate jusqu'à la fissuration finale. Ceci s'explique par le fait que la fissure, une fois initiée dans l'adhésif, est rapidement déviée dans le bois. On retrouve ceci sur la figure suivante :

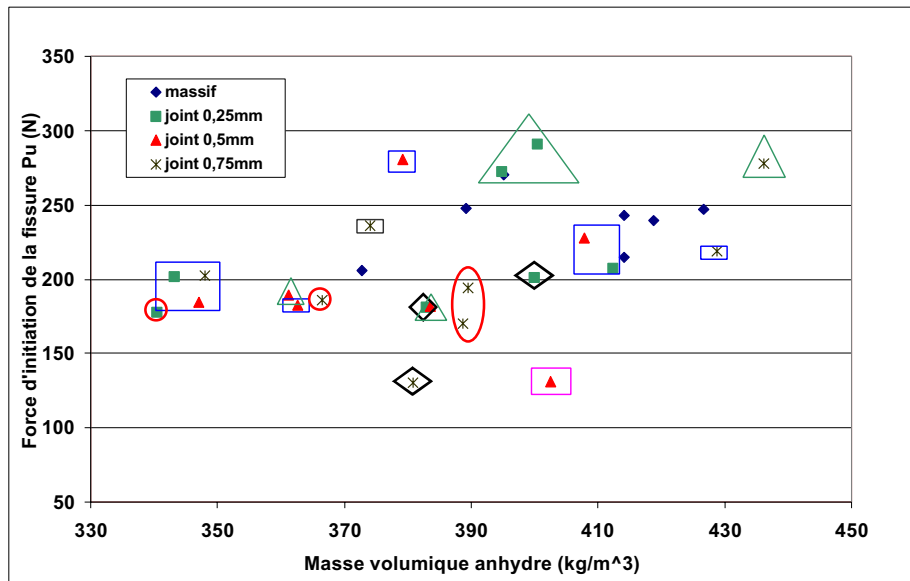


Fig. 3.25 : Forces d'initiation de la fissuration des assemblages polyuréthane en ouverture en fonction de la masse volumique anhydre des substrats

Les symboles apparaissant sur la figure 3.25 correspondent à une fissuration :

- □ cohésive puis déviée dans le bois
- ○ directement déviée dans le bois
- △ dans l'interphase bois-colle
- ◇ adhésive puis déviée dans le bois
- □ cohésive dans la colle puis adhésive
- □ oscillante d'un interface à l'autre

Cette figure montre que les valeurs d'initiation de la fissuration sont très proches de celles du bois massif car la déviation dans le substrat se fait en général dès l'initiation de la fissuration. Elles apparaissent légèrement supérieures dans le cas des ruptures dans l'interphase à cause de la pénétration de la colle dans le bois et inférieures pour les ruptures adhésives qui caractérisent une faiblesse de la liaison entre adhésif et substrat. Les forces maximales appliquées aux assemblages collés polyuréthane sont du même ordre que celles appliquées aux spécimens massifs hormis pour les assemblages présentant une initiation de rupture adhésive nécessitant une P_u plus faible. De plus, les spécimens présentant une fissure fortement déviée atteindront des forces maximales plus importantes que les spécimens massifs où la fissure se développe selon la fibre neutre de l'éprouvette.

Les énergies de rupture laissent apparaître une grande dispersion de résultats car elles dépendent directement du type de fissuration. De plus, pour une même fissuration, on pourra se heurter à des énergies totalement différentes de par leur valeur ; ceci s'explique par la différence du chemin pris par la fissure lors de sa propagation (déviation plus ou moins forte, densité du bois, nœud ou déviation de fil, rotation du plan de fissuration...) et du caractère plus ou moins fragile de la rupture. Une rupture fragile, même si elle se produit souvent à des niveaux de charge et de déplacement plus importants donne une énergie de rupture plus faible car la surface fissurée est beaucoup plus grande. En effet, un spécimen atteignant des niveaux de charge et de déplacement importants emmagasine une grande quantité d'énergie élastique. Lorsque le matériau présent en fond de fissure va céder, l'énergie disponible est plus grande que celle nécessaire à la propagation stable de la fissure. Ainsi, la fissure va se propager jusqu'à dissipation de ce surplus d'énergie permettant d'atteindre d'importantes surfaces fissurées. Les énergies de rupture calculées pour les assemblages collés polyuréthane sont toutes supérieures à celles calculées dans le cas du bois massif, hormis dans le cas des ruptures adhésives catastrophiques. La fissure ne semble pas se propager dans la colle et va donc dévier vers :

- le bois selon un angle plus ou moins marqué entraînant une énergie plus ou moins forte mais toutefois supérieure à celle du bois massif.
- l'interface où la rupture sera fragile et catastrophique à de faibles énergies de rupture pouvant varier là aussi si une déviation ultérieure intervient. Ainsi, il est possible de maintenir la fissure dans la zone limitée par les deux interfaces (cas de la fissure oscillant d'une interface à l'autre) en introduisant d'une part une opposition de fil du bois d'au moins 8 degrés entre les substrats et d'autre part une convergence de fil vers le plan de collage ; l'énergie nécessaire à la propagation est ainsi plus importante que pour une fissure demeurant dans la même interface.
- l'interphase bois-colle avec une énergie qui semble croître avec l'épaisseur du joint. La pénétration de la colle dans le bois est-elle favorisée pour les joints épais ?

La fissuration des assemblages collés polyuréthane sous sollicitation de Mode I met donc en concurrence divers modes de fissuration. Les énergies de rupture mises en jeu divergent elles aussi par conséquent. Cependant, une tendance à la déviation dans le bois quasi systématique apparaît, laissant supposer que l'énergie de décohésion de la colle au sein du joint et que l'énergie d'adhésion au niveau de l'interface (hormis quelques cas isolés) est supérieure à l'énergie de rupture du bois. Une incertitude apparaît toutefois au niveau de l'interphase dont le comportement à rupture semble réserver quelques surprises qui pourraient être éclaircies par les observations au microscope électronique. Enfin, les quelques cas de

rupture adhésive auxquels nous avons été confrontés semblent être en partie dus au mode de fixation de la bande de PTFE garantissant l'épaisseur du joint mais permettent toutefois de quantifier le phénomène. La préparation de surface ou la méthode d'assemblage ne semblent pas être en cause.

3.1.2. Assemblages résorcine :

Les différents types de rupture obtenus (tableaux en *Annexe 7*) apparaissent sur les diagrammes suivants :

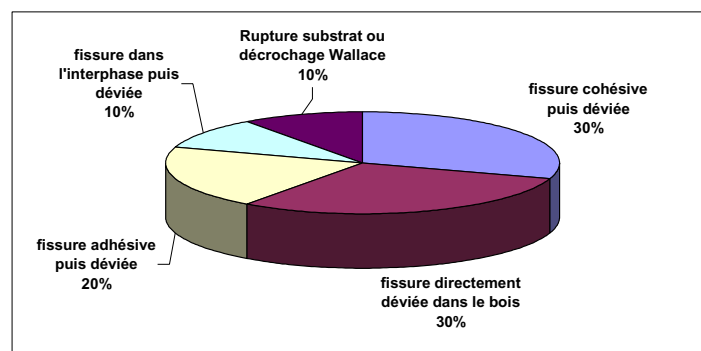


Fig.3.26 : Fissuration en ouverture des assemblages résorcine à joint d'épaisseur 0.1 mm.

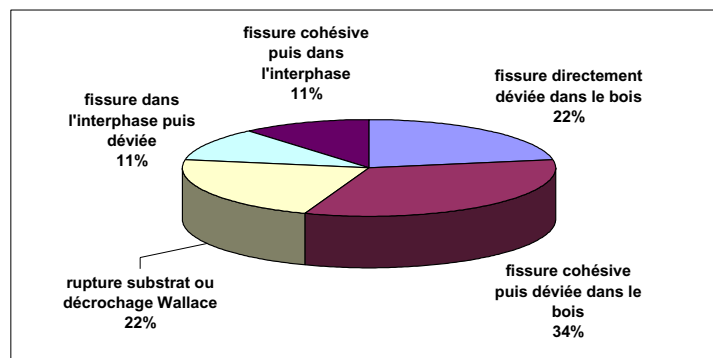


Fig. 3.27 : Fissuration en ouverture des assemblages résorcine à joint d'épaisseur 0.25 mm.

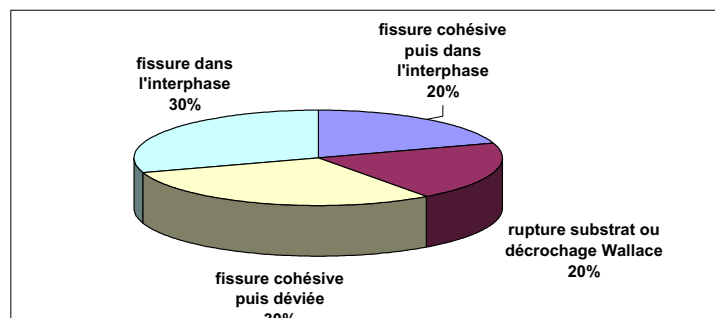


Fig. 3.28 : Fissuration en ouverture des assemblages résorcine à joint d'épaisseur 0.5 mm.

Les phénomènes se produisant pour l'assemblage résorcine sont sensiblement identiques à ceux des assemblages polyuréthane. Si on s'intéresse à la raideur initiale de chaque assemblage testé et pour chaque épaisseur de joint, on obtient la figure suivante :

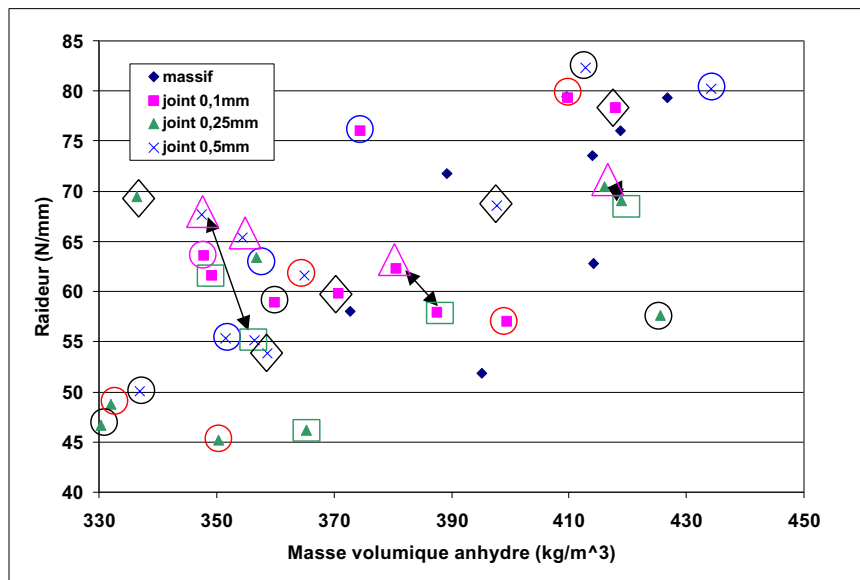


Fig. 3.29 : Raideur des assemblages résorcine en ouverture en fonction de la masse volumique anhydre du bois

Les symboles de couleur de la figure 3.29 correspondent aux dates de collage suivantes :

- ○ collage du 30 septembre 1998
- ○ collage du 1^{er} octobre 1998
- △ collage du 2 octobre 1998
- □ collage du 5 octobre 1998
- ◇ collage du 6 octobre 1998
- ○ collage du 8 octobre 1998

En comparant la figure 3.29 à la figure 3.24, on peut voir que la raideur des assemblages résorcine est supérieure à celle des assemblages polyuréthane et qu'aucune influence de l'épaisseur du joint n'apparaît de manière significative. Il semblerait exister une tendance linéaire d'augmentation de raideur en fonction de la masse volumique anhydre des substrats mais un phénomène apparaît pour les plus faibles masses volumiques qui sembleraient présenter des raideurs supérieures. Il existe peut-être une masse volumique de substrat optimale par rapport à l'utilisation de l'adhésif résorcine. Si on observe les collages du 2/10/98 et du 5/10/98, on peut voir, pour des masses volumiques anhydres équivalentes, des différences de raideur dont l'importance semble augmenter avec l'épaisseur du joint (flèches noires sur la figure). Une hausse de masse volumique anhydre et une diminution de l'épaisseur du joint semble atténuer cet écart vraisemblablement dû à une différence de polymérisation étudiée ultérieurement par D.S.C.. On retrouve toujours une certaine dispersion entre batteries de collage mais le phénomène semble moins accentué que pour

l'adhésif polyuréthane plus visqueux favorisant l'inclusion de défauts et en particulier de bulles d'air.

Les forces d'initiation de la fissuration P_u sont là encore plus faibles que dans le cas du bois massif avec une dispersion sensiblement identique au assemblages polyuréthane mais à des niveaux de charge inférieurs. Dans le cas des fissures déviées directement, on retrouve des forces d'initiation similaires à celles du bois massif mais pour les fissures initiées dans l'adhésif ou l'interphase bois-colle, les niveaux de charge apparaissent beaucoup plus faibles sûrement à cause d'un caractère fragile supérieur de la résorcine. Ces résultats apparaissent sur la figure 3.30.

Du fait de la déviation quasi systématique de la fissure dans le bois, les forces maximales mesurées sont du même ordre que celles du bois massif. Les mesures des différents déplacements n'apportent pas de renseignements supplémentaires car différent peu entre les assemblages collés et le bois massif.

Si l'on s'intéresse maintenant aux énergies de rupture, on peut observer la même dispersion des résultats que pour les assemblages polyuréthane du fait d'une concurrence toujours aussi vive entre les types de rupture. Hormis pour les fissurations déviées dans le bois, le caractère fragile de la rupture explique le peu de différence entre G_{IC} et G_{IF} car l'endommagement en fond de fissure reste très localisé. Dès que la fissure pénètre le matériau bois, la différence est plus marquée entre l'initiation et la propagation de la fissure à cause du comportement moins fragile du bois par rapport à la résorcine. La dispersion des énergies au niveau d'un même type de fissuration peut à nouveau s'expliquer par un chemin de fissuration plus ou moins dévié. Les fissurations se produisant dans l'interphase étant généralement déviée dans le bois, les énergies de rupture sont supérieures à celles des assemblages polyuréthane pour lesquels la fissure demeurerait dans l'interphase. Un phénomène s'ajoute au précédent dans la mesure où il se produit des arrachements localisés de fibres de bois ou de colle provoquant une dissipation énergétique supérieure. Les ruptures adhésives proviennent d'un défaut ponctuel d'adhésion entre adhésif et substrat. Elles sont donc rapidement déviées dès que la fissure a dépassé ce défaut d'adhésion selon le même processus que pour les autres spécimens à cause de la reprise brutale de l'adhésion colle-substrat.

On se retrouve alors dans le cas d'une fissuration classique où les énergies de rupture restent supérieures à celles des assemblages polyuréthane pour lesquels la fissure demeurerait généralement à l'interface.

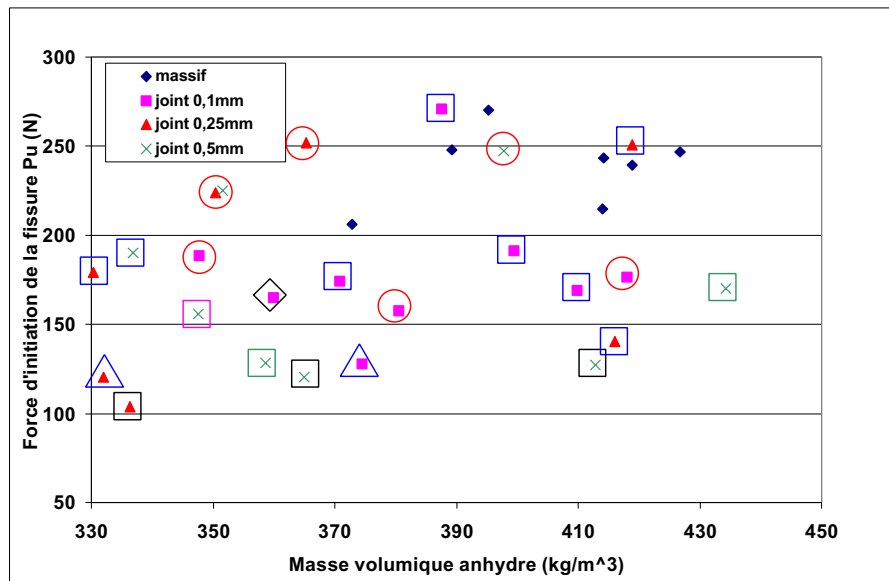


Fig. 3.30 : Forces d'initiation de la fissuration des assemblages résorcine en ouverture en fonction de la masse volumique anhydre du bois'

Les symboles apparaissant sur la figure 3.30 correspondent à une fissuration :

- cohésive puis déviée dans le bois
- cohésive dans la colle
- directement déviée dans le bois
- dans l'interphase bois-colle
- mi cohésive, mi interphase
- dans l'interphase puis déviée
- adhésive puis déviée dans le bois

Des essais complémentaires (tableau *Annexe 8*) ont été réalisés sur des assemblages résorcine à joint de 0.1 mm d'épaisseur en Mode I. La différence par rapport à ces essais réside dans le fait que les substrats ont été rabotés juste avant le collage et que les modules d'Young des substrats ont été déterminés au préalable. Les résultats apparaissent en annexe et montrent que la résistance des assemblages est accrue par le rabotage juste avant collage et de façon assez significative. D'autre part, la détermination des modules avant collage permet d'identifier vers quel substrat dévie la fissure ; il semblerait que ce soit vers celui possédant le module le plus élevé.

Les conclusions établies pour les assemblages polyuréthane se retrouvent pour les assemblages résorcine en ajoutant toutefois une tendance à la déviation dans le bois plus marquée pour les fissuration adhésives ou dans l'interphase, ce qui a tendance à limiter les ruptures catastrophiques de l'assemblage. Cette déviation de fissure de l'interphase vers le bois pourrait être causée par le caractère plus fragile de la résorcine qui, lorsqu'elle a pénétré les cellules du bois, le rend trop résistant pour la fissure qui s'oriente alors vers le bois. Une deuxième explication peut être une différence de pénétration de la résorcine dans le bois par

rapport au polyuréthane qui limite la taille de l'interphase et par conséquent la propagation de la fissure dans cette zone. Les observations de microscopie devraient en partie répondre à ceci.

3.2. Essais de Mode II :

Tout comme pour les essais de Mode I, la campagne d'essais sur les spécimens collés a été précédée d'une série de tests sur des éprouvettes de bois massif afin d'obtenir les caractéristiques de notre échantillonnage de bois (tableau *Annexe 2*). Ces essais laissent apparaître que le spécimen est adapté là aussi à la sollicitation car les fissurations s'avèrent stables et en général peu déviées. Cependant, un facteur qui n'intervenait pas dans les essais d'ouverture provoque une dispersion des résultats même au niveau des spécimens massifs. En effet, malgré la présence de cales en PTFE minimisant les frottements au niveau de l'entaille initiale, il existe un contact des lèvres de la fissure propagée (donc des frottements) qui peut être plus ou moins important et donc induire un blocage de la fissure ou une dissipation d'énergie dont on devra tenir compte dans le calcul des énergies de rupture. Malgré cela, ces essais permettent de déterminer des grandeurs caractéristiques de notre épicea.

3.2.1. Assemblages polyuréthane :

La mise en place des cibles d'acquisition du déplacement par l'extensomètre optique Wallace étant beaucoup plus délicate pour les essais de flexion, nos premiers essais ne nous ont pas permis de déterminer toutes les grandeurs souhaitées. Cependant, ce problème a pu être surmonté rapidement et nous avons pu obtenir des résultats sur un nombre minimal d'éprouvettes.

La concurrence décrite entre différents types de fissuration que l'on a pu observer lors des essais d'ouverture existe à nouveau pour les essais de cisaillement mais dans des proportions moindres. Les différents types intervenant ici sont :

- une fissuration cohésive dans la colle.
- une fissuration cohésive puis déviée dans le bois.
- une fissuration interfaciale puis déviée dans le bois.
- un mélange de fissuration cohésive et interfaciale.

Dans le cas des assemblages polyuréthane sollicités en Mode II, la répartition des différents types de fissuration apparaît dans les diagrammes suivants où l'on peut voir que la fissuration cohésive des assemblages est majoritaire (tableau *Annexe 9*). Dans le cas des

assemblages à joint d'épaisseur 0.25 mm, la fissuration cohésive a été obtenue pour tous les essais où le Wallace n'a pas décroché.

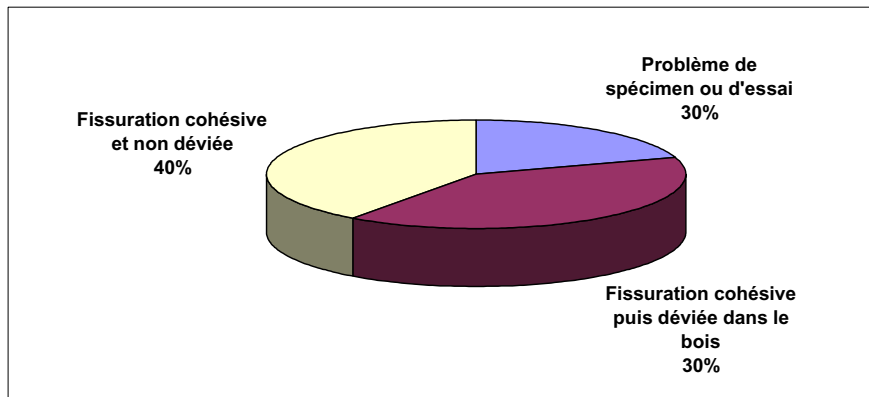


Fig. 3.31 : Fissuration en cisaillement des assemblages polyuréthane à joint d'épaisseur 0.5 mm

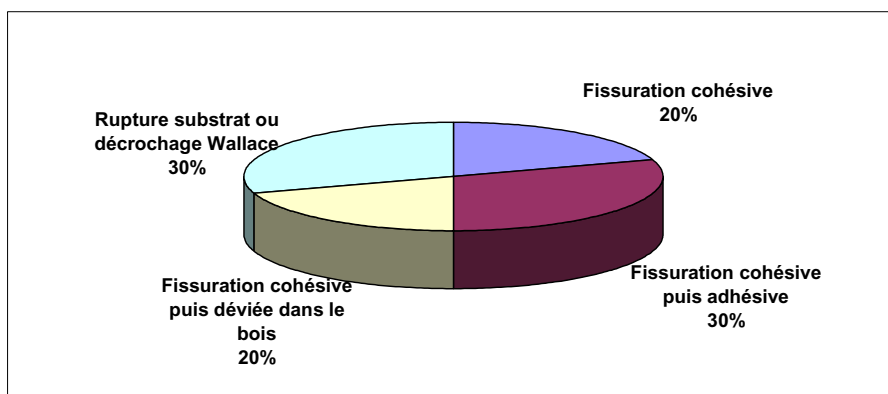


Fig. 3.32 : Fissuration en cisaillement des assemblages polyuréthane à joint d'épaisseur 0.75 mm

Si on s'intéresse à la raideur des assemblages collés pour les trois épaisseurs de joint testées, on obtient la figure suivante :

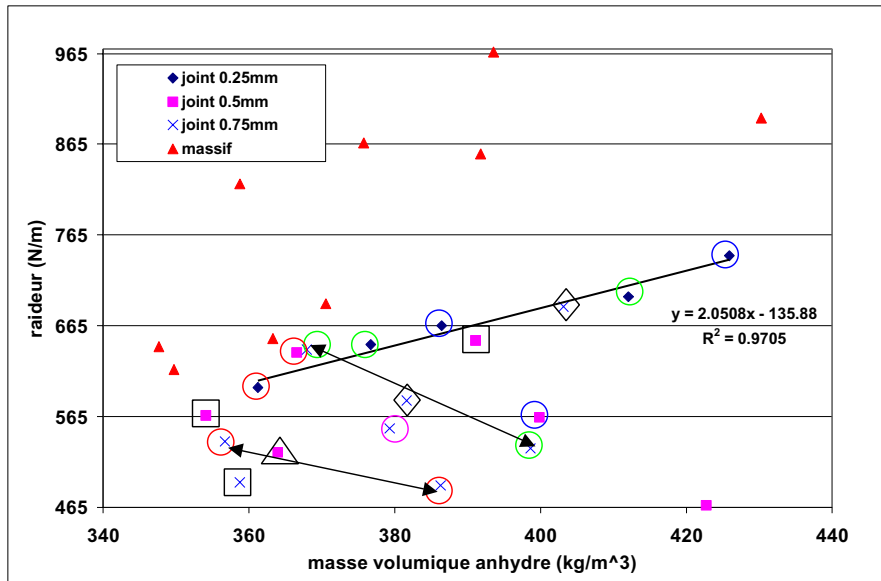


Fig. 3.33 : Raideur des assemblages polyuréthane en flexion en fonction de la masse volumique anhydre du bois

Les symboles de couleur de la figure 3.33 correspondent au dates de collage suivantes :

- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| - □ collage du 19 mai 1998 | - ○ collage du 27 mai 1998 |
| - △ collage du 25 mai 1998 | - ○ collage du 28 mai 1998 |
| - ◇ collage du 26 mai 1998 | - ○ collage du 29 mai 1998 |

En s'intéressant à cette figure, on peut voir très nettement que l'épaisseur du joint joue un rôle important. En effet, le spécimen étant sollicité en flexion, plus le joint est épais, plus son importance au niveau des caractéristiques de l'assemblage est grande. L'augmentation de l'épaisseur du joint a donc tendance à réduire la raideur globale en flexion de l'assemblage. De plus, on peut observer une certaine dispersion dans le cas du bois massif que l'on ne retrouve pas pour les assemblages de joint d'épaisseur 0.25 mm. Le joint de colle de cette épaisseur semble donc homogénéiser le comportement de l'assemblage en réduisant la dispersion naturelle du bois. Le coefficient de corrélation de la régression tracée pour ces assemblages est tout à fait acceptable. En augmentant l'épaisseur du joint à 0.5 mm puis à 0.75 mm, cette observation n'est plus valable et la dispersion des résultats redevient importante. Ce phénomène est certainement dû à la forte viscosité du mélange adhésif facilitant l'inclusion de défauts critiques (bulles d'air) lors de la fabrication du spécimen. Pour les joints d'épaisseur importante, la mise sous pression lors du collage doit être insuffisante à chasser l'air du joint capable de supporter la pression appliquée. Ceci devrait apparaître lors des observations des surfaces fissurées. Ainsi, vu l'importance du joint dans le comportement de l'assemblage en flexion, l'inclusion de ces défauts est certainement liée à la dispersion des

mesures de raideur pour les joints épais. La polymérisation ne semble pas intervenir car on obtient de grandes disparités de mesures entre joints identiques (matérialisées sur la figure 3.23 par les flèches noires) appartenant à une même batterie de collage. L'origine de cette dispersion a été étudiée par l'analyse D.S.C. et ne provient pas d'un défaut de polymérisation. Malgré tout, les résultats sur les joints de 0.25 mm d'épaisseur montrent que le processus de collage semble performant pour cette dimension.

Les forces d'initiation de la fissuration apparaissent sur la figure 3.34 en fonction de la masse volumique anhydre des substrats. On peut observer que celles-ci sont supérieures à celles des spécimens massifs (environ 20%) pour toutes les épaisseurs de joint testées. Il n'apparaît pas d'effet de joint au niveau de ces grandeurs. Hormis pour les assemblages à joint de 0.5 mm d'épaisseur ou un spécimen atteint un P_u très élevé de 3070 N (la valeur moyenne atteinte pour un spécimen massif étant de 2170 N), la dispersion des résultats reste correcte (12 %) par rapport au substrat bois utilisé. Ceci signifie que l'initiation de la fissure se fait à des chargements reproductibles d'un spécimen à l'autre si on garde à l'esprit qu'il existe des variations de raideur de l'assemblage dues en partie au substrat bois et à des faiblesses du joint (bulles d'air, présence d'éléments contaminants). Ainsi, des assemblages possédant une raideur similaire ou très voisine à l'origine (EP50 19/5/98 A, EP50 27/5/98 A, EP50 25/5/98 A) auront des P_u identiques (2100 N). On a vu que le gain en force d'initiation de la fissuration était important mais celui du déplacement d_u correspondant l'est tout autant. En effet, le d_u moyen des spécimens massifs est de 3.2 mm, passe à 4.2 mm pour les joints de 0.25 mm, 4.6 mm pour ceux de 0.5 mm et va jusqu'à 5.1 mm pour les joints de 0.75 mm. Le gain en déplacement est donc considérable par rapport au bois massif et l'épaisseur du joint. De plus, la dispersion des résultats (11% en moyenne) montre la même reproductibilité que pour les P_u . Les gains très importants en force et déplacement d'initiation de la fissuration confèrent à l'assemblage une capacité intéressante à supporter la sollicitation appliquée. La souplesse de l'adhésif polyuréthane lui permet d'accepter un cisaillement élevé sans se fissurer. Il serait intéressant de vérifier ceci sur des assemblages à joints d'épaisseur supérieure mais le gain en souplesse n'est pas compatible avec la géométrie de l'éprouvette qui rompt au départ de la zone à inertie variable.

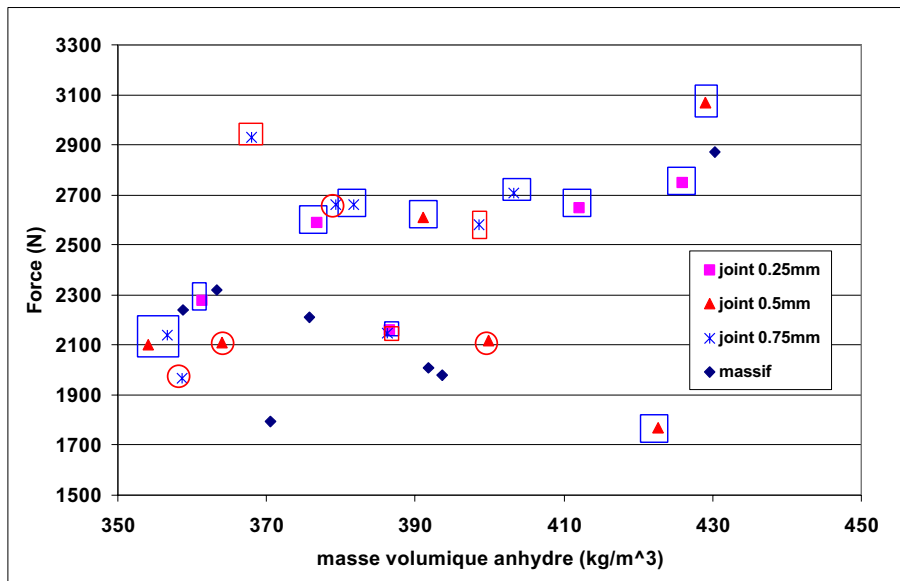


Fig. 3.34 : Forces d'initiation de la fissuration des assemblages polyuréthane en flexion en fonction de la masse volumique anhydre des substrats

Les symboles apparaissant sur la figure 3.34 correspondent à une fissuration :

- cohésive
- cohésive et adhésive
- cohésive puis déviée dans le bois

En s'intéressant aux énergies de rupture calculées, on peut observer plusieurs phénomènes :

- les niveaux de charge et de déplacement étant largement supérieurs pour les assemblages collés, les valeurs des énergies calculées suivent la même tendance.
- l'effet du joint se retrouve aussi dans le calcul des énergies pour les raisons citées précédemment.
- la déviation de la fissure initiée dans le polyuréthane s'avère relativement rare en Mode II alors que pourtant, l'énergie demandée est largement supérieure. Ainsi, les énergies calculées pour les fissures déviées varient surtout en fonction de l'importance de la zone fissurée dans la colle avant la déviation lors de la fissuration. Plus la déviation interviendra tôt dans la fissuration, plus l'énergie nécessaire sera faible.
- de même, si la rupture est fragile, l'énergie calculée sera plus faible que pour une fissuration stable. On le vérifie pour le spécimen EP75 28/5/98 B où la fissuration se fait par à-coups, certainement lors de la rencontre de petits défauts (bulles d'air), de micro fissures ou de micro cavités.
- on peut observer que certaines éprouvettes présentent une rupture cohésive au centre du joint et adhésive aux bords. Ce phénomène est certainement dû à un mauvais collage partiel et affecte la valeur des énergies de rupture.
- en observant les faciès de rupture à l'œil nu, on peut voir dans le cas des ruptures cohésives que la rupture se rapproche de l'interface avec l'augmentation de l'épaisseur

du joint, phénomène déjà observé par Haller [115]. La région proche de l'interface (zone de faible cohésion) semble bien être une zone de résistance moindre pour les joints épais ?

De même, la couleur du faciès est différente ; l'adhésif endommagé a un aspect laiteux pour les joints les plus fins, avec une cavitation apparente faible alors que pour les joints plus épais, la cavitation semble croître et la couleur du joint rompu tend à se rapprocher de la couleur initiale de l'adhésif. Ces observations seront analysées plus précisément à l'aide du microscope électronique à balayage.

- Dans le cas des joints les plus épais, l'énergie de rupture peut être très élevée et on atteint facilement des valeurs voisines de celles déterminées pour le barreau massif de colle. Ce résultat était prévisible car on a vu que plus le joint était épais, plus les forces de cohésion du polymère étaient importantes. Ce phénomène associé à l'effet joint (contraintes résiduelles, ancrage mécanique, interphase et polymérisation sous pression...) permet d'obtenir des énergies de rupture fortes. De plus, on a vu que l'endommagement est majoritairement réalisé en cisaillement et la propagation en mode mixte. Il est donc relativement logique d'obtenir des valeurs supérieures, dans le cas où les forces de cohésion du polymère sont comparables (joints épais), puisque les essais réalisés sur les éprouvettes massives de colle l'ont été uniquement sous sollicitation de Mode I.

Les essais de flexion trois points des spécimens collés par le mastic polyuréthane permettent d'obtenir une fissuration cohésive du joint dans des proportions intéressantes. L'effet de l'épaisseur du joint se traduit par une plus grande souplesse de l'assemblage lui permettant de supporter un cisaillement supérieur. L'observation de faciès de rupture différents selon l'épaisseur du joint confirme cette influence. Cependant, même si la fissure a tendance à se rapprocher de l'interface avec l'augmentation d'épaisseur du joint, les déviations de fissure sont rares et ponctuelles. Ceci est un peu surprenant vu la différence entre les énergies de rupture d'une fissure cohésive dans la colle et déviée dans le bois.

Enfin, la sensibilité aux défauts (bulles d'air) semble être importante pour les joints les plus épais et se manifeste par une dispersion croissante des caractéristiques avec l'épaisseur du joint.

3.2.2. Assemblages résorcine :

Les diagrammes de répartition des différents types de fissuration dans les assemblages collés sollicités en flexion trois points (tableaux en *Annexe 9*) sont les suivants :

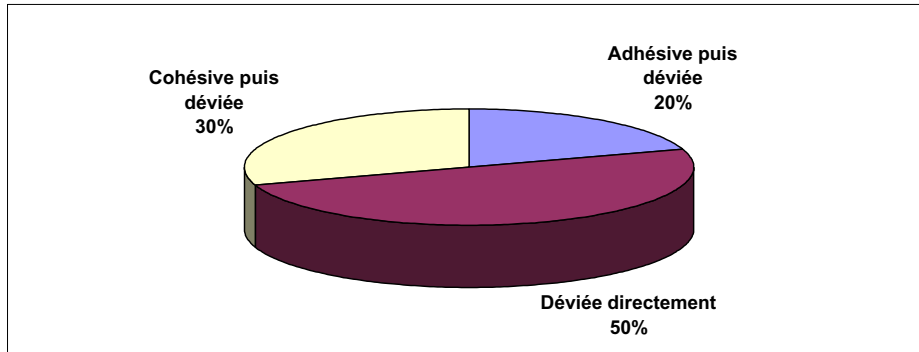


Fig. 3.35 : Fissuration en cisaillement des assemblages résorcine à joint 0.1 mm.

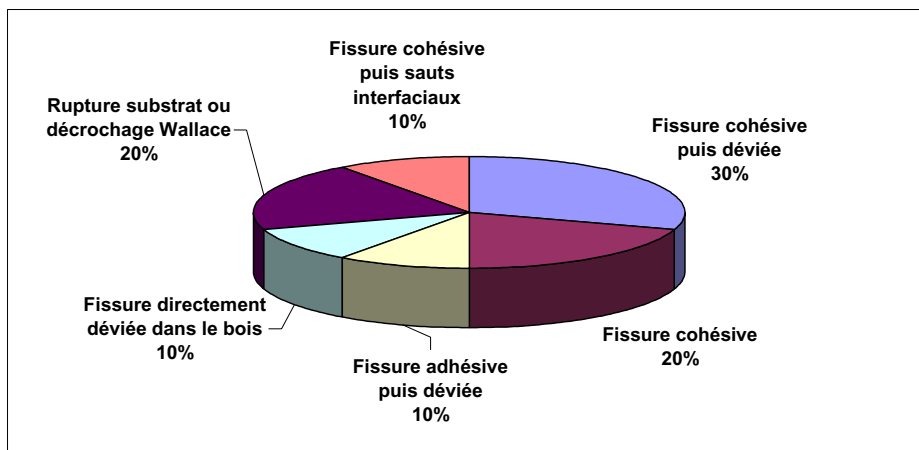


Fig. 3.36 : Fissuration en cisaillement des assemblages résorcine à joint 0.25 mm

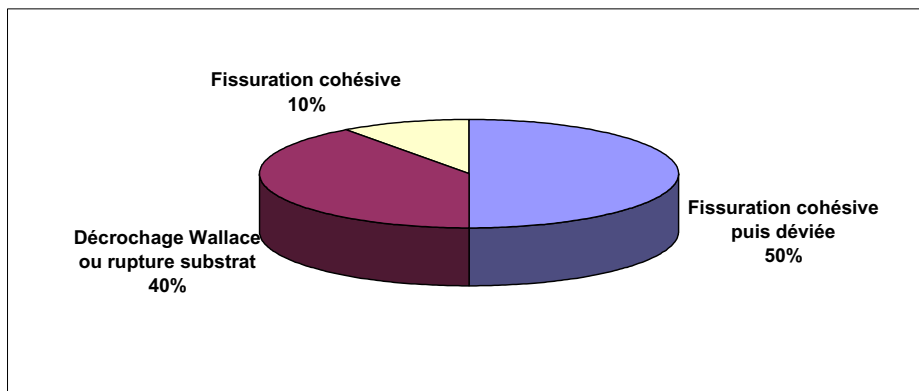


Fig. 3.37 : Fissuration en cisaillement des assemblages résorcine à joint 0.5 mm

On constate que les données sont différentes des assemblages polyuréthane car la fissure, si elle s'initie normalement dans la colle, dévie de façon systématique dans le bois. Les quelques cas isolés restant sont des ruptures adhésives et quelques ruptures cohésives ponctuelles. La répartition des raideurs en fonction de la masse volumique anhydre des substrats pour les épaisseurs de joint testées est représentée figure 3.38.

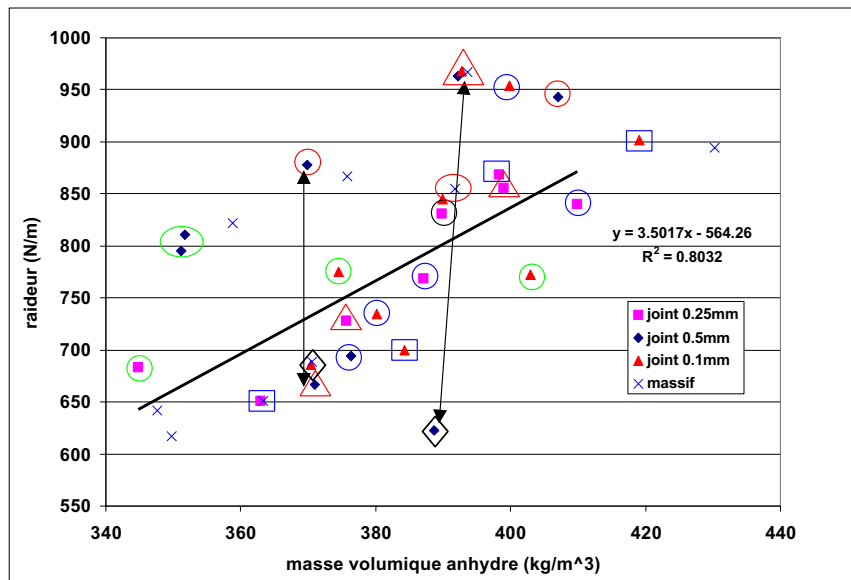


Fig. 3.38 : Raideur des assemblages résorcine en flexion en fonction de la masse volumique anhydre des substrats

Les symboles de couleur de la figure 3.38 correspondent au dates de collage suivantes :

- □ collage du 2 juin 1998
- △ collage du 3 juin 1998
- ◇ collage du 4 juin 1998
- ○ collage du 5 juin 1998
- ⊙ collage du 8 juin 1998
- ⊖ collage du 9 juin 1998

Les raideurs en flexion des assemblages obtenus sont de l'ordre de celles des spécimens massifs pour les joints d'épaisseur 0.1 et 0.25 mm et légèrement supérieures pour les joints de 0.5 mm. L'effet de l'épaisseur du joint est moindre entre les joints de 0.1 et 0.25 mm mais apparaît pour le joint de 0.5 mm d'épaisseur. La tendance générale d'accroissement de la raideur en flexion de l'assemblage avec la masse volumique anhydre des substrats est à nouveau visible sur cette figure, à l'exception de quelques cas isolés. En s'intéressant uniquement aux joints de 0.1 mm d'épaisseur, on peut voir que les résultats sont légèrement plus dispersés que pour les joints les plus fins en polyuréthane. Mais la régression obtenue est acceptable. Par contre, quand on passe à des épaisseurs de joint supérieures, on retrouve une dispersion des résultats assez importante. Par conséquent, le phénomène de sensibilité aux défauts en flexion que l'on avait vu pour le polyuréthane se retrouve pour les assemblages

résorcine à joints « épais ». Cependant, les défauts mis en jeu devraient être différents du fait de la différence notable de caractéristiques entre les deux adhésifs. De plus, on obtient dans certains cas de grandes disparités de raideur entre assemblages considérés comme équivalents surtout dans le cas des joints les plus épais (matérialisées par les flèches noires sur la figure). Ces disparités étudiées par D.S.C. ne sont pas dues à un défaut de polymérisation mais certainement à des défauts de conception de l'assemblage. Si l'on réduit l'épaisseur du joint, ces disparités semblent s'amenuiser entre les diverses batteries de collage pour obtenir des valeurs reproductibles à même masse volumique de substrat (joints 0.25 mm du 2/06 et du 3/06). De plus, vu la faible proportion de ruptures adhésives, ces différences de comportement ne peuvent être imputées à des défauts d'adhésion à l'interface. Ceci confirme d'une part la sensibilité croissante aux défauts critiques des joints épais et le résultat des essais effectués par le C.T.B.A. [144] sur cet adhésif indiquant que l'épaisseur maximale de joint prescrite pour cet adhésif est 0.5 mm.

Si on compare les pentes des deux régressions linéaires effectuées précédemment, l'augmentation de raideur en fonction de la masse volumique anhydre des substrats est plus forte pour les assemblages résorcine car cet adhésif, de module de Young plus fort, accroît la raideur en flexion de façon plus marquée. A joints fins, le phénomène d'homogénéisation des caractéristiques de raideur observé pour le polyuréthane se retrouve dans le cas de la résorcine mais avec une dispersion légèrement supérieure.

La répartition des forces d'initiation de la fissuration apparaît sur la figure 3.38. Celles ci sont en moyenne plus faibles en flexion dans le cas des assemblages collés. L'effet de l'épaisseur du joint se manifeste par une diminution conséquente des P_u quand on passe de 0.1 mm à 0.5 mm. On a vu précédemment que les adhésifs résorcine ont la caractéristique d'offrir une forte résistance au délaminage ; ainsi, la fissure, même si elle est toujours initiée dans la colle, dévie systématiquement dans le bois. La sensibilité aux défauts des joints épais se traduit à nouveau par des forces d'initiation de la fissuration beaucoup plus faible que pour les joints minces (1375 N pour un joint de 0.5 mm contre 1670 N pour un joint de 0.25 mm). On peut noter que les niveaux de charge atteints par les spécimens collés à la résorcine sont bien moindres que ceux collés au polyuréthane. En effet, à joints équivalents d'épaisseur 0.25 mm, la moyenne des P_u est de 2490 N pour le polyuréthane contre 1670 N pour la résorcine. De même, vu la forte différence de module entre les deux adhésifs, les déplacements associés varient de 4.2 mm pour le polyuréthane à 2.7 mm pour la résorcine alors que ceux des spécimens massifs sont en moyenne de 3.2 mm. On voit donc que le gain de raideur de l'assemblage résorcine pénalise fortement son comportement en flexion malgré sa forte résistance théorique au délaminage.

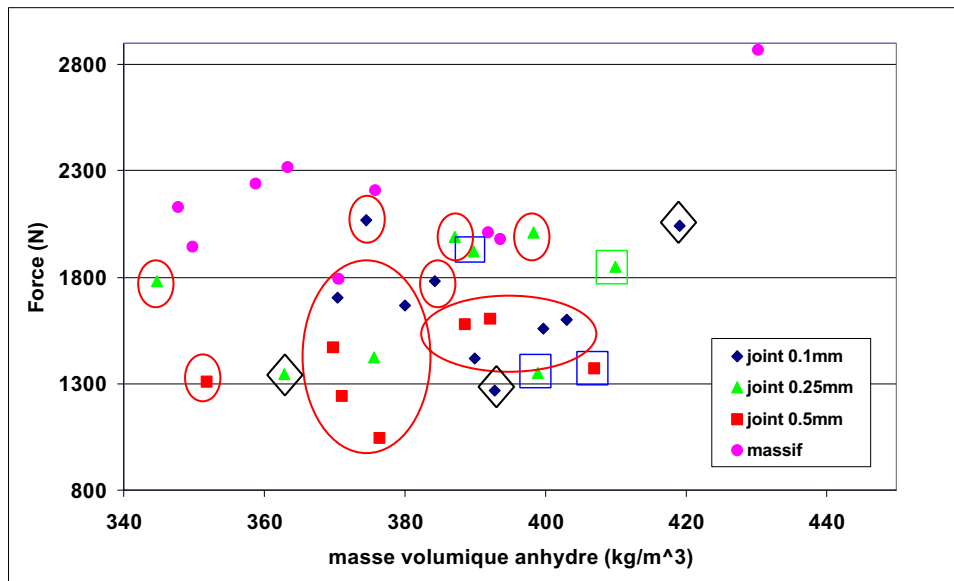


Fig. 3.39 : Forces d'initiation de la fissuration des assemblages résorcine en flexion en fonction de la masse volumique anhydre des substrats

Les symboles apparaissant sur la figure 3.39 correspondent à une fissuration :

- cohésive
- cohésive et adhésive
- cohésive puis déviée dans le bois
- adhésive puis déviée dans le bois

Par conséquent, les énergies de rupture calculées apparaissent beaucoup plus faibles que celles calculées pour les assemblages polyuréthane mais supérieures tout de même à celles des spécimens massifs. Comme précédemment, leur valeur peut varier fortement selon le type de fissuration adopté et dans le cas des fissures déviées dans le bois, selon la position de départ de la déviation et de son angle.

Ces essais de flexion montrent qu'à substrat identique la résistance au cisaillement d'un assemblage collé dépend fortement de la capacité de l'adhésif à supporter le glissement des deux substrats l'un par rapport à l'autre sans se fissurer. Pour cela, un adhésif présentant une certaine souplesse semble être préconisé car il permet d'atteindre des niveaux de charge et de déplacement bien supérieurs. Ainsi, même s'il présente des caractéristiques intrinsèques à la rupture plus faibles, l'adhésif polyuréthane confère à l'assemblage une résistance à la flexion et au cisaillement bien supérieure à celle de l'adhésif résorcine. Cependant, l'adhésif résorcine interdit quasiment toute fissuration dans le joint alors que le polyuréthane semble, de par sa résistance au délaminage plus faible, favoriser ce type de rupture qui, malgré tout, s'avère contrôlable et rarement fragile.

3.3. Cycles de charges successives :

Tous les résultats énoncés auparavant sont issus des essais de rupture des assemblages. Cependant, des essais complémentaires ont été réalisés afin de mettre en évidence le phénomène d'endommagement se produisant en fond de fissure avant sa propagation. L'une des possibilités de mise en évidence de ce phénomène est d'effectuer des cycles de charge-décharge espacés d'un certain temps pendant lequel les effets différés dus au caractère visqueux du bois et du joint de colle pourront se dissiper. Ce type de manipulation permet de différencier les non linéarités de comportement mécanique issues d'un comportement plastique et endommageable. En effet, la recharge d'un matériau plastifié se faisant selon une pente identique à son domaine élastique, on peut la distinguer de la recharge d'un matériau endommagé dont la pente sera plus faible que celle de son domaine élastique. La difficulté d'un tel travail est de maîtriser la fissure et d'être sûr que la diminution de complaisance n'est pas due à une légère propagation de celle-ci. De plus, dans le cas des chargements de Mode II, on a vu qu'un frottement des lèvres de la fissure était toujours possible malgré nos précautions, et pouvait être la source d'une non linéarité de comportement supplémentaire, analogue à la progression d'un endommagement. C'est pourquoi nous avons effectué ces essais sur des assemblages sollicités en ouverture.

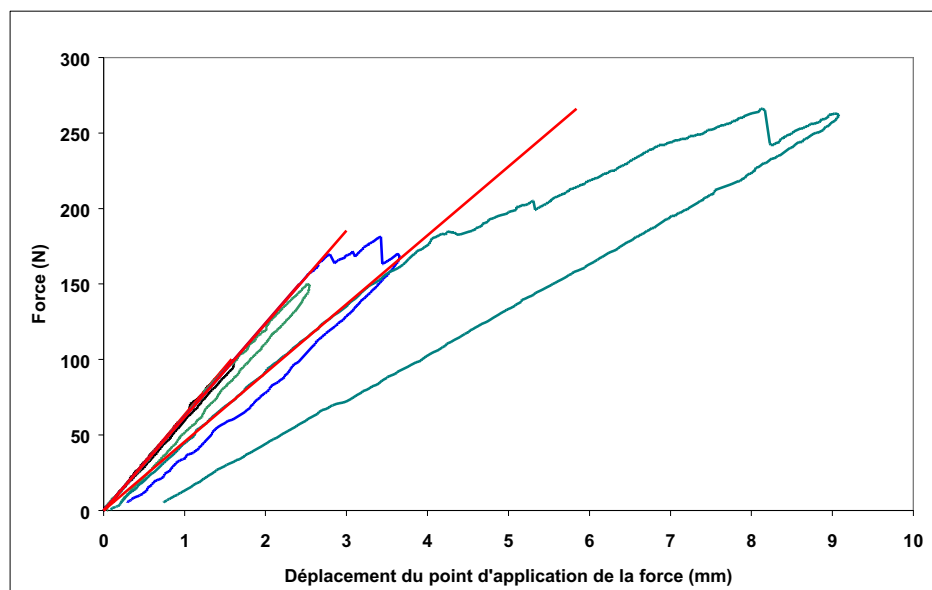


Fig. 3.40 : Charges successives du Spécimen résorcine ER25 8/10/98 sous sollicitation de Mode I

Si on s'intéresse à un spécimen résorcine de joint d'épaisseur 0.25 mm, les premières charges matérialisées sur la figure 3.40 par les couleurs noire et verte montrent que l'on reste dans le domaine de réversibilité avec une légère non linéarité en fin de la deuxième charge. La

troisième charge se fait selon la même pente que les deux précédentes jusqu'à une amorce brutale de fissuration cohésive (courbe bleue). Le caractère fragile de la colle apparaît ici par l'absence de non linéarité avant la rupture qui, de plus, se produit par sauts successifs et instables. Après une nouvelle décharge, on recharge jusqu'à rupture de l'assemblage. Comme il y a eu propagation, la pente de la recharge est inférieure à la précédente et la figure repasse quasiment par le précédent point de décharge. Après une légère reprise en charge suivie d'un court moment de fissuration, on peut observer une forte reprise en charge du à la déviation de la fissure dans le bois, comme le montre la figure 3.40 ci-dessus.

La figure 3.40 montre la même opération effectuée sur un assemblage polyuréthane. La différence réside surtout dans le fait que l'on obtient une non linéarité de comportement sans propagation de la fissure (courbe bleue) avant une charge finale (courbe noire) qui passe par le point de décharge de la courbe bleue. On peut ensuite voir une propagation stable de la fissure conclue par un léger saut fragile avant la décharge finale (figure 3.41).

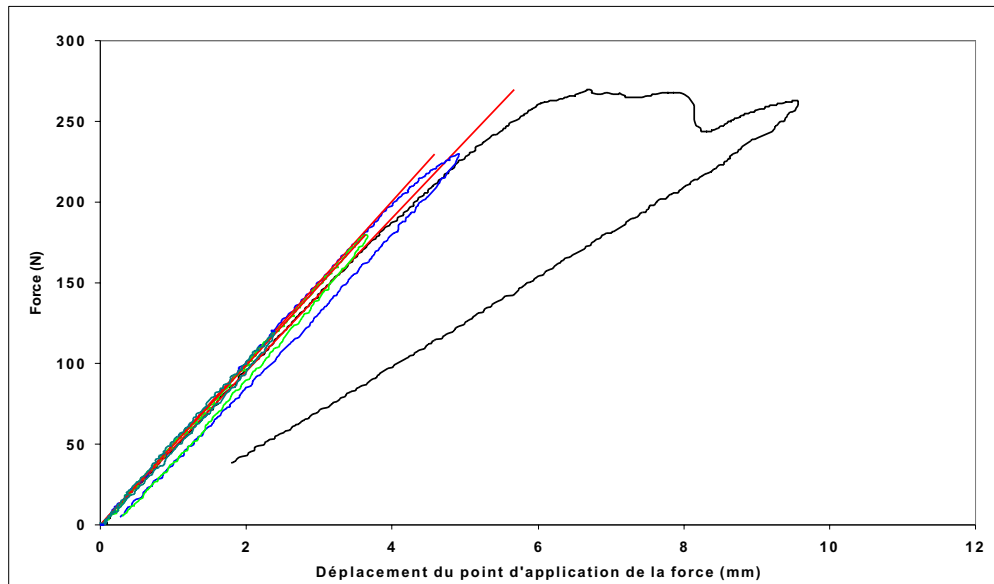


Fig. 3.41 : Charges successives du Spécimen polyuréthane EP75 15/6/98 sous sollicitation de Mode I

La différence entre ces deux types de manipulation réside surtout dans le fait que l'adhésif résorcine ayant un comportement fragile, la non linéarité de comportement est délicate à mettre en évidence. De plus, l'initiation de la fissuration apparaît immédiate et instable et suivie d'une déviation quasi systématique dans le bois.

Les essais de mécanique de la rupture effectués, des observations ont été réalisées en Microscopie électronique à balayage dans le but d'identifier des caractéristiques mésoscopiques ou microscopiques permettant d'expliquer la grande dispersion des résultats de rupture.

4. Analyse fractographique des surfaces de rupture:

L'étude fractographique a pour objectif de recueillir deux types d'informations sur les faciès de rupture. Une première série d'observations aura pour but de collecter tout d'abord des informations microscopiques sur l'état de la surface fissurée afin d'isoler et d'identifier les phénomènes se produisant dans l'assemblage pour tous les différents types de rupture observés. Ainsi, par rapport à la dispersion de nos résultats au niveau des énergies de rupture, ce type d'observations devrait permettre d'ordonner les énergies mesurées en fonction des phénomènes observés sur les faciès et de comprendre certaines causes de cette dispersion. Une deuxième série d'observations plus précises se fera sur les spécimens ayant présenté une rupture cohésive dans la colle afin d'identifier l'influence du mode de sollicitation sur l'endommagement du joint, et ce pour chacun des adhésifs et chaque épaisseur de joint. Une telle démarche devrait permettre d'identifier des paramètres d'endommagement de l'adhésif qu'il sera bon d'intégrer dans nos simulations numériques. Pour toutes les photos présentées dans ce document, la propagation de la fissure se fait de la gauche vers la droite.

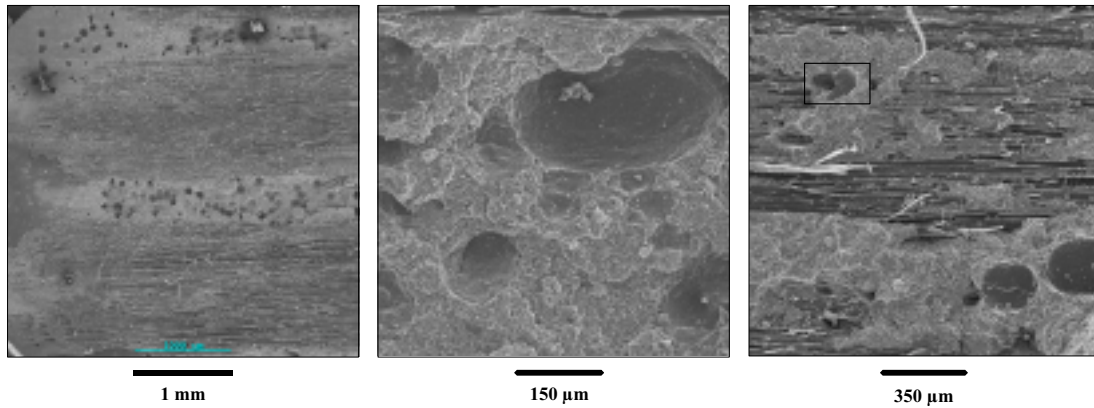
4.1. Sollicitations de Mode I :

4.1.1. Assemblages polyuréthane :

Différents types de fissuration ayant été observés lors des essais de rupture, et plus particulièrement lors des essais d'ouverture, un grand nombre de faciès de rupture ont été étudiés. On a pu voir dans les essais de rupture que l'épaisseur du joint n'avait qu'un effet négligeable en ouverture sur les grandeurs déterminées. Ainsi, l'étude des faciès se fera en fonction du type de fissuration sans tenir compte de l'épaisseur du joint concerné. On peut aussi noter que la rupture adhésive à l'interface bois-colle laissant apparaître un faciès totalement lisse (le joint est indemne et aucune fibre de bois n'y est présente), celui-ci ne présente pas d'intérêt pour cette étude.

Une fissuration cohésive totale n'a jamais été atteinte pour les assemblages polyuréthane et a toujours été suivie d'une déviation dans le bois. Cependant, on peut observer un phénomène particulier avant déviation totale de la fissure. Ainsi, on peut observer sur la photo 1a) une fissuration cohésive au niveau du bois d'été et dans le bois au niveau du bois de printemps, moins dur. On peut aussi observer sur la partie gauche de la photo une partie de rupture adhésive avant la déviation où le joint apparaît lisse et terne. En s'intéressant à la zone de rupture cohésive, plusieurs détails méritent d'être relevés ; on peut tout d'abord observer une forte porosité au niveau de la zone fissurée. Celle-ci semble en grande partie due à la mise en œuvre du joint lors de la fabrication du spécimen car l'initiation de la fissure faite

à la lame de rasoir (partie supérieure gauche de la photo) laisse apparaître cette même porosité. Les différentes prises de vue nous permettent d'affirmer ceci car l'adhésif, dès qu'il commence à s'endommager, subit une forte décoloration (du noir brillant au gris terne).



*Photo 3.1 : a) Initiation de la déviation de fissure dans le spécimen EP75 12/6/98B en Mode I
b) Cavitation apparaissant dans la rupture cohésive du spécimen EP75 12/6/98B
c) Fissuration dans l'interphase du spécimen de Mode I EP75 12/6/98A*

Si l'on s'intéresse à l'une de ces cavités, sa couleur reste caractéristique du joint intact et semble indiquer que sa présence est antérieure à l'endommagement. Cependant, cette observation n'est pas vérifiée pour la totalité de ces cavités. En effet, l'observation plus précise d'un spécimen présentant le même phénomène de rupture permet de voir que les bords de la cavité sont endommagés alors que le fond reste intact (cavité du bas à gauche photo 3.1b).

Ainsi, chaque cavité crée une singularité de contrainte propice à la propagation de la fissure. La sollicitation imposée, même si elle n'est pas à l'origine de ce phénomène, semble toutefois l'amplifier par coalescence des cavités lors de l'endommagement du joint (photo 3.1b). Cette coalescence se caractérise alors par des cavités dont le fond est marqué par des lignes sinueuses et ternes, synonymes de la colle endommagée (localisées par le rectangle sur la photo 3.1c). De plus, des mesures sur les échantillons observés montrent que la taille de cette porosité varie de 85 à 100 μm pour les joints de 0.5 mm et varie en général de 130 à 330 μm pour les joints de 0.75 mm. Cependant, on a pu relever dans le spécimen EP75 12/6/98 A une cavité atteignant la longueur de 1.5 mm mais ceci est exceptionnel. Il semblerait ainsi que l'hypothèse formulée dans la première partie sur la sensibilité variable aux défauts du spécimen par rapport à l'épaisseur du joint soit confirmée pour l'adhésif polyuréthane. Le processus de collage utilisé ne garantit pas le dégazage total du joint et s'avère au contraire propice à l'inclusion de défauts grandissant avec son épaisseur. Ceux-ci ne semblent pas jouer de rôle dominant sur le comportement de l'assemblage en Mode I, mais on a vu que le

comportement en flexion s'en trouvait fortement modifié. La photo 3.1c) montre que la fissure peut se propager aussi dans une zone mixte de bois et de colle, l'interphase.

Dans nos essais, la fissure est rarement restée dans l'interphase pour généralement dévier dans le bois. On retrouve alors le faciès caractéristique du bois rompu en Mode I, c'est-à-dire une surface assez rugueuse, présentant des fibres arrachées « proprement » et laissant apparaître périodiquement les rayons ligneux. Cependant, on peut obtenir une rupture dans une zone présentant une faible cavitation où l'on voit que le clivage du joint de colle provoque la naissance d'une crevasse orientée selon le sens de la propagation de la fissure et perpendiculaire au plan de rupture (photo 3.2a).

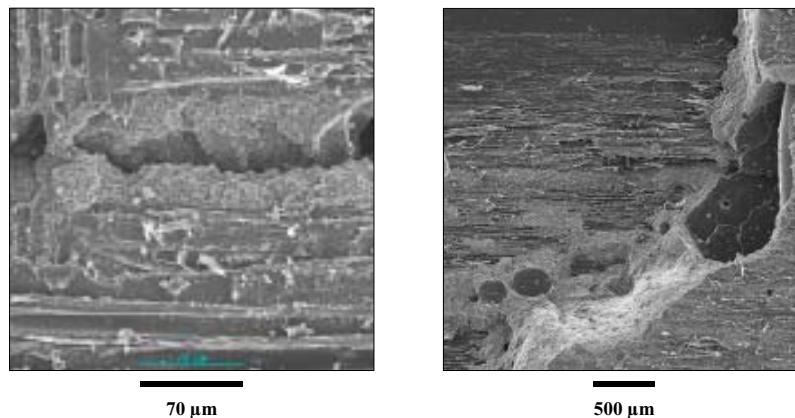


Photo 3.2 : a) Fissuration en Mode I du spécimen EP50 16/6/98 A

b) Fissuration oscillante de Mode I du spécimen EP75 12/6/98 A

Enfin, il est possible d'obtenir un phénomène d'oscillation de la fissure d'une interface à l'autre en faisant converger le fil du bois de chaque substrat d'un angle d'au moins 8 degrés vers le plan de collage. Cette manipulation, inapplicable au niveau industriel, permet de contraindre la fissure à se propager dans la zone délimitée par le joint et les interphases. Le résultat apparaît sur la photo 3.2b) sur le spécimen EP75 12/6/98 A où l'on voit que la fissure dévie brutalement et sans raison apparente (sûrement à cause du défaut mais la bifurcation semble s'amorcer auparavant). On aperçoit au sommet de la cavité une bande brillante dénotant un clivage brutal de l'adhésif à cet endroit et par conséquent un saut instable jusqu'à l'autre interphase. Une fois que la fissure a atteint l'autre interphase, la propagation se fait comme sur la photo 1a, dans l'interphase au niveau du bois de printemps et dans la colle au niveau du bois d'été.

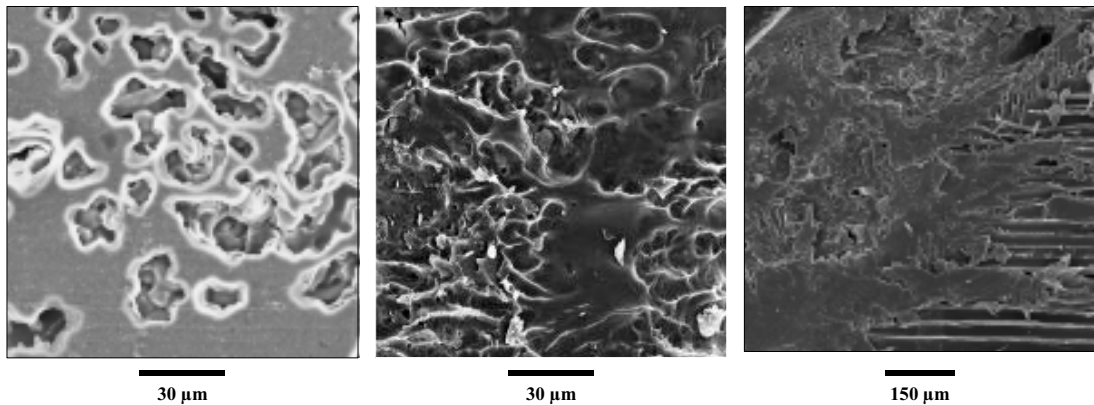
On a vu sur ces quelques photos que la rupture cohésive des assemblages polyuréthane s'effectue au niveau des cernes de bois d'été. Si on veut généraliser ce type de fissuration sous

sollicitation d'ouverture avec l'adhésif polyuréthane, il serait certainement judicieux d'utiliser une essence de bois présentant des caractéristiques mécaniques proches du bois d'été de l'épicéa, c'est-à-dire une essence telle que le hêtre, par exemple. De plus, le phénomène de porosité de mise en œuvre ne peut pas être éludé et doit être pris en compte dans la procédure de collage.

4.1.2. Assemblages résorcine :

Les faciès de rupture des assemblages résorcine apparaissent totalement différents des précédents. En effet, la différence de caractéristiques mécaniques entre les deux adhésifs induit des mécanismes de rupture observables par microscopie qui s'avèrent bien distincts malgré l'application de la même sollicitation et l'utilisation du même substrat. Ainsi, la rupture cohésive d'assemblages collés à la résorcine se fait par arrachements multiples de petites zones de dimensions proches les unes des autres. Ce phénomène est visible sur la photo 3.3a) et on peut constater que l'adhésif laisse apparaître aux frontières de ces arrachements des zones fort brillantes synonymes de la rupture fragile et brutale des matériaux fragiles. On ne retrouve pas le phénomène d'endommagement visible sur le polyuréthane. De plus, la rupture n'est pas totalement cohésive et alterne avec une rupture adhésive matérialisée par les zones grises et ternes de la photo 3.3a. L'aspect brillant aux bords des arrachements semble indiquer qu'il s'agirait d'une rupture par clivage de l'adhésif plutôt que d'un phénomène d'endommagement. Dans ce cas de figure, les arrachements se font uniquement au niveau de la colle et le bois n'apparaît pas.

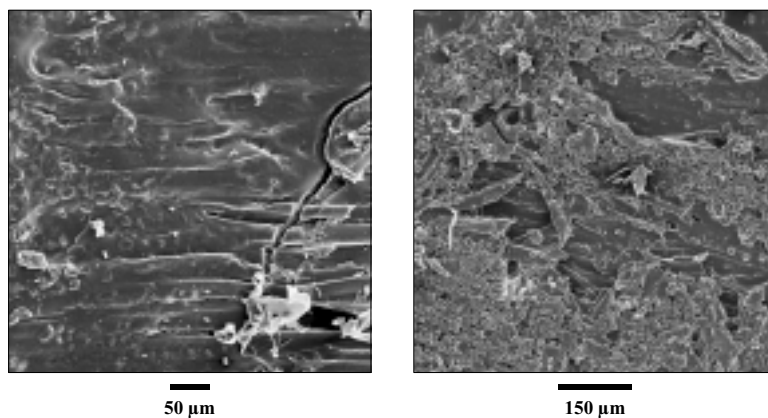
La photo 3.3b montre à nouveau une fissuration cohésive mais les arrachements se font alors de manière moins profonde dans le joint. On s'approche d'une rupture interfaciale, non pas par faiblesse de la liaison adhésif-substrat mais parce que la propagation de la fissure se fait dans une zone très proche de cet interface. La différence de rupture cohésive est peut-être due à la différence d'épaisseur de joint qui, dans le second cas, n'est pas suffisamment épais pour promouvoir une propagation dans la masse de la colle. L'aspect tourmenté de la surface fissurée semble indiquer un fort état de contrainte à ce niveau vu les déformations résiduelles du joint. Les parties de couleur mate de la zone fissurée laissent apparaître une surface tourmentée et irrégulière ce qui semble indiquer une micro ductilité. Par contre, les zones brillantes laissent apparaître un faciès particulièrement plan et lisse, synonyme de rupture par clivage. Il semble qu'il existe une porosité au niveau de l'adhésif mais celle-ci n'a rien à voir avec celle observée dans le cas du polyuréthane. Cette dernière est vraisemblablement issue, dans le cas de l'adhésif résorcine, des gaz de condensation de la colle lors de la polymérisation.



*Photo 3.3 : a) Fissuration cohésive de l'assemblage ER25 6/10/98 sollicité en Mode I
 b) Rupture en Mode I de l'assemblage résorcine ER10 2/6/98 A
 c) Déviation progressive de la fissure pour le spécimen ER25 30/9/98 B*

La photo 3.3c montre la déviation progressive de la fissure depuis la masse de la colle (aspect tourmenté), à l'interface bois-colle où la surface est terne et lisse jusque dans le bois où on voit apparaître les fibres arrachées.

Un détail apparaît systématiquement lors de la déviation de la fissure dans le bois. A l'endroit de la déviation, le joint de colle semble brisé par l'apparition d'une fissure délimitant la zone de déviation. Il semblerait (photo 3.4a) que l'instant de déviation de la fissure dans le bois corresponde à une reprise de l'adhésion entre le bois et le joint de colle au niveau de l'interface.



*Photo 3.4 : a) Déviation brutale de la fissure dans le bois du spécimen ER10 2/6/98 A
 b) Fissuration en mode I à l'interphase de l'assemblage ER10 30/9/98 A*

En effet, on peut interpréter la photo 3.4a de la façon suivante ; la fissure, initiée dans la colle se propage vers l'interface suite à un défaut d'adhésion. Une fois cette déficience

passagère du collage éliminée, la reprise brutale de l'adhésion au niveau de l'interface provoque la déviation instantanée de la fissure dans le bois et se matérialise par une rupture brutale du joint selon sa largeur, ce qui expliquerait la fissure observée tout le long de la déviation sur la photo 3.4a). De même que pour les assemblages polyuréthane, la notion d'interphase se manifeste par une pénétration de la colle dans le bois et donne alors lieu à une surface fissurée laissant apparaître un mélange de fibres de bois entremêlées dans une matrice de colle. Ce phénomène apparaît sur la photo 3.4b).

Ce type de propagation est fréquent dans les assemblages résorcine sollicités en ouverture, certainement à cause de la viscosité de l'adhésif qui permet une pénétration facile dans le bois durant l'étape de serrage lors du collage. On peut aussi noter que la fissuration dans l'interphase est souvent associée à des arrachements ponctuels de colle, non pas comme pour la fissuration cohésive dans la masse de la colle mais plutôt entre les deux interphases. Les grains apparaissant sur la photo 3.4b) correspondent à la colle rompue en mode I.

La fissuration de Mode I s'avère totalement différente pour l'adhésif résorcine. L'endommagement de la colle semble être remplacé par une rupture par clivage de zone particulièrement contrainte délimitant des arrachements de blocs massifs de colle. Le phénomène d'interphase semble être plus récurrent et par contre, la cavitation dans le joint de colle est rare, voire inexistante par rapport au polyuréthane.

4.2. Sollicitations de Mode II :

4.2.1. Assemblages polyuréthane :

Le type de fissuration dominant pour tous les spécimens observés est la fissuration cohésive dans la masse de la colle. Les essais de rupture ont montré une forte sensibilité du comportement du spécimen par rapport à l'épaisseur du joint. Ainsi, nous allons nous intéresser en premier lieu à ce type de rupture pour chaque épaisseur de joint considérée. La photo 3.5a) montre la rupture du spécimen EP25 28/5/98 d'épaisseur de joint 0.25 mm. On peut constater sur cette photo que le plan de fissuration change durant la propagation. En effet, la fissure se propage d'abord dans un plan proche de l'interface inférieur, subit un saut brutal matérialisé par la marche claire, se propage faiblement à l'interface en arrachant ponctuellement quelques fibres de bois puis replonge ensuite dans la masse de la colle. On peut observer aussi, hormis quelques exceptions, que la porosité est relativement faible mais qu'il se produit une fissuration dans le sens longitudinal qui n'existait pas pour la sollicitation de Mode I. Cette fissuration se produit de façon importante et assez dense dans certaines

zones du joint et apparaît sur la photo 3.5b). On peut à nouveau constater que la porosité est très faible dans ce cas.

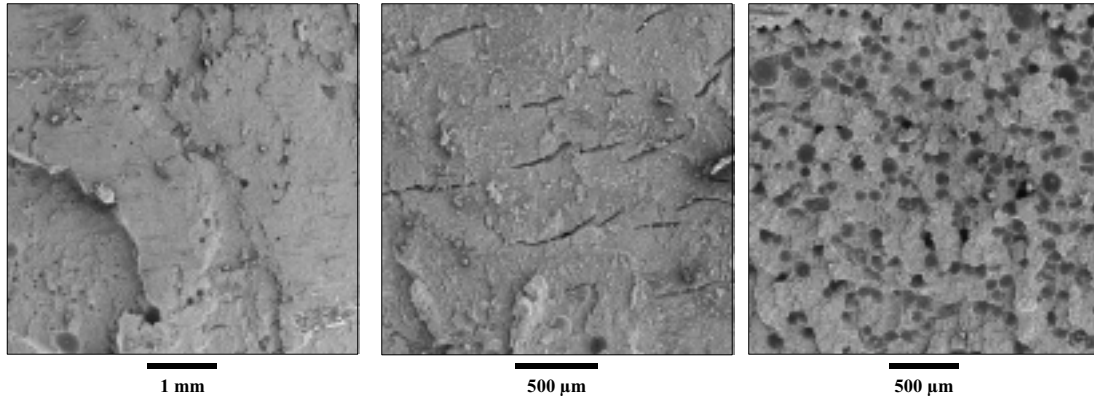


Photo 3.5 : a) Rupture cohésive de Mode II du spécimen EP25 28/5/98
b) Fissuration secondaire du spécimen de Mode II EP25 28/5/98
c) Fissuration cohésive de Mode II du spécimen EP50 25/5/98 B

Il semblerait donc que le processus d'endommagement du joint de colle soit, dans ce cas, une micro fissuration du joint selon une direction bien définie qui n'est pas exactement la direction de propagation de la fissure.

Pour le joint d'épaisseur 0.5 mm, une fissuration cohésive de l'adhésif apparaît sur la photo 3.5c). On peut constater d'une part que la fissure se rapproche de l'interface supérieur et que la porosité que l'on avait pu visualiser dans le cas des spécimens de Mode I est à nouveau bien présente. Celle-ci apparaît uniformément répartie selon toutes les directions du joint et la taille des inclusions est relativement homogène (80 à 100 µm de diamètre). La fissuration se produit toujours dans la masse de la colle mais reste dans le même plan tout le long de la propagation qui s'avère stable mettant en évidence un endommagement continu et progressif de l'adhésif. La porosité, de par la couleur sombre des inclusions rappelant fortement celle de l'adhésif non endommagé, est certainement née de la mise en forme de l'assemblage et se produit lors de la polymérisation de ce type d'adhésif qui crée un dégagement de dioxyde de carbone (plus le joint est épais, plus le dégagement est important ce qui limite l'épaisseur du joint pour de tels adhésifs). Il n'apparaît pas sur ce spécimen de micro fissuration comme pour le spécimen précédent. La présence de cette forte porosité entraîne de telles singularités de contrainte que le joint ne subit pas d'autre endommagement avant la propagation de la fissure. Celle-ci est, de plus, certainement responsable de la propagation de la fissure dans un plan unique sans changement d'interface comme ce fut le cas auparavant. Ceci peut s'expliquer par le fait que les cavités ayant sensiblement les mêmes dimensions, celles-ci se trouvent emprisonnées à la même hauteur dans le joint. La partie la

plus faible de ces cavités se trouvant au niveau de leur demi hauteur, la fissure aura donc tendance à rester dans un plan proche du plan médian reliant le maximum de ces cavités.

La rupture cohésive du joint de 0.75 mm peut être visualisée sur la photo 3.6a) où l'on peut observer que l'on assiste au même processus de fissuration que pour le spécimen à joint de 0.25 mm d'épaisseur. De plus, ce dernier appartient à la même batterie de collage que le joint étudié sur la photo 3.6a), la mise en œuvre est donc parfaitement identique. On peut donc comparer la différence de cavitation entre les deux épaisseurs provenant d'un même collage et d'une même préparation. On voit à nouveau que l'accroissement de l'épaisseur du joint provoque une fissuration de plus en plus proche de l'interface (on peut voir des fibres de bois avant le saut de la fissure). La cavitation est beaucoup plus forte que pour le joint de 0.25 mm d'épaisseur et la taille des inclusions va jusqu'à 450 μm . En effectuant un zoom sur le rectangle noir, on obtient la photo 3.6b) ci dessous.

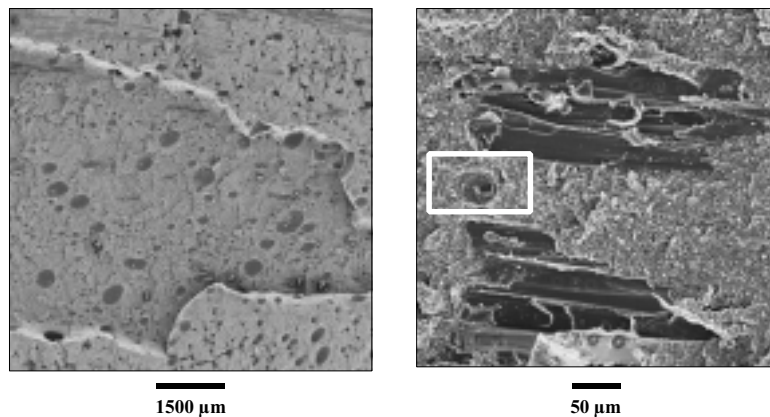


Photo 3.6 : a) Fissuration cohésive de Mode II du spécimen EP75 28/5/98 A.
b) Fissuration cohésive en cisaillement d'un joint de 0.75 mm.

On peut observer que les micro fissures présentes dans le joint de 0.25 mm ne se retrouvent pas ici même si on peut trouver ici et là des arrachements de matière entraînant la présence de fissures. Si on s'intéresse à la cavité présente entre les deux régions où les fibres de bois apparaissent, on peut observer que l'adhésif est endommagé pour la quasi totalité de la surface de l'inclusion et on peut supposer que celle-ci est le fruit de l'endommagement du joint. On a donc une cavitation à la fois due à la mise en œuvre de l'adhésif mais aussi à son endommagement. Ce dernier semble donc se matérialiser par cette cavitation dans le cas des joints épais alors qu'il se manifestait par une micro fissuration pour les joints les plus minces.

Ainsi, la fissuration cohésive des assemblages polyuréthane met en œuvre des processus d'endommagement différents selon l'épaisseur de joint utilisée. La mise en œuvre de l'assemblage influe beaucoup sur son comportement par la sensibilité très prononcée de cet

adhésif pour l'inclusion de bulles d'air. Malgré tout, on a vu que dans une même batterie de collage (donc pour un adhésif identique au niveau de sa préparation), la proportion et la taille des inclusions augmentent avec l'épaisseur du joint. Ceci confirme les observations faites lors des essais de rupture.

4.2.2. Assemblages résorcine :

La sollicitation de cisaillement des assemblages résorcine a conduit dans de grandes proportions à des fissurations initiées dans la colle puis généralement déviées dans le bois. Ce phénomène apparaît sur la photo 3.7a) ci dessous.

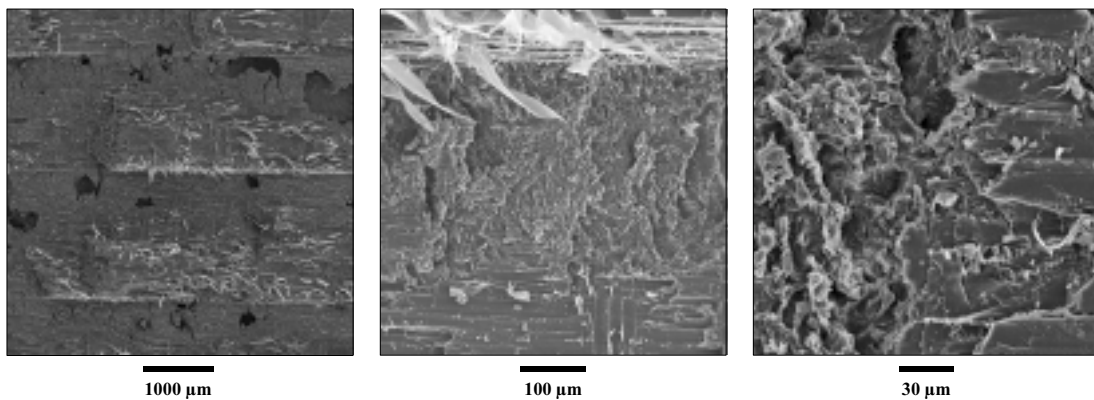


Photo 3.7 : a) Fissuration en cisaillement cohésive puis déviée du spécimen ER25 8/6/98 B
 b) Fissuration cohésive en cisaillement au niveau d'un cerne de bois d'été du spécimen ER25 8/6/98 B
 c) Déviation de fissure dans le bois du spécimen ER25 8/6/98 B

La prise de vue 3.7a) montre un processus déjà observé pour les assemblages polyuréthane en Mode I. On a une fissuration cohésive au niveau du bois d'été et déviée dans le bois de printemps. On peut observer une cavitation dans le joint provenant en majorité d'arrachement localisés de parties du joint, mais aussi de la fabrication de l'assemblage. Ce phénomène est visible dans la majorité des spécimens où la fissure dévie dans le bois très rapidement. Le faciès lumineux et brillant de l'adhésif rompu en ouverture laisse place à un aspect plus sombre et uniforme pour l'adhésif rompu en cisaillement. Les processus d'endommagement différent entre les deux modes et le cisaillement laisse apparaître sur la photo 3.7b) que les parties du joint arrachées sont beaucoup plus petites et que l'adhésif ne subit plus les fortes déformations plastiques (visibles par une grande brillance à l'observation) mais plutôt un endommagement se rapprochant dans ce cas du polyuréthane.

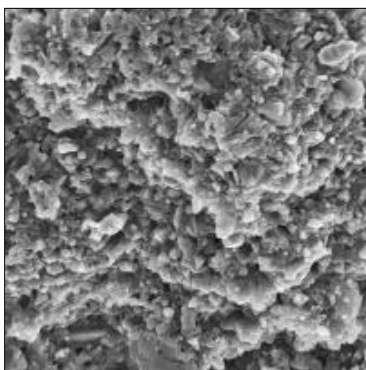
La déviation de fissure en Mode II se fait différemment du mode I dans la mesure où la fissure ne passe pas par le stade de l'interface et dévie directement dans le bois comme le

montre la photo 3.7c). Le faciès de rupture cohésive diffère lui aussi du mode I et apparaît comme décrit ci dessus. La fissuration dans l'interphase est un phénomène que l'on retrouve aussi dans le cas des assemblages résorcine sollicités en Mode II. Ce type de rupture donne les mêmes indications que les précédentes.

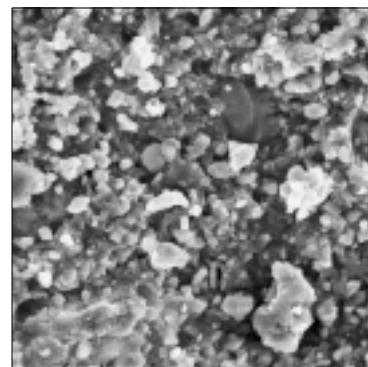
Les observations faites sur les assemblages résorcine rompus en cisaillement semblent indiquer une différence flagrante de mécanismes de rupture et d'endommagement par rapport au mode I. Ainsi, la fissure propagée selon un mode de cisaillement laisse un adhésif de couleur terne et d'aspect déchiqueté. Des observations à des grossissements plus forts de la structure de l'adhésif polymérisé puis rompu semblent être nécessaires afin de confirmer cette impression.

4.3. Observations à forts grossissements des adhésifs rompus :

4.3.1. Mastic polyuréthane :



Mode I

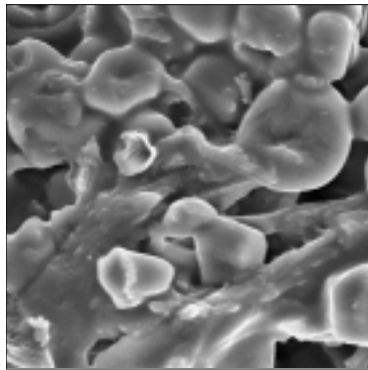


Mode II

—
10 μm

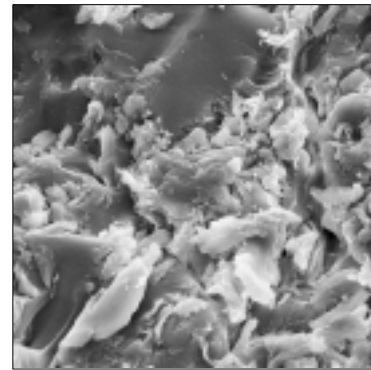
Le mode I laisse un adhésif polyuréthane endommagé de couleur terne alors que l'adhésif endommagé en Mode II apparaît plus brillant. La taille des grains observés semble plus faible en cisaillement qu'en ouverture où il semble que la rupture se fasse par séparation de blocs massifs de colle. La rupture en cisaillement semble provoquer un phénomène destructif plus profond de l'adhésif. Ces observations confirment bien le fait que l'endommagement est réalisé en cisaillement même si la propagation se produit en mode mixte.

4.3.2. Colle résorcine :



Mode I

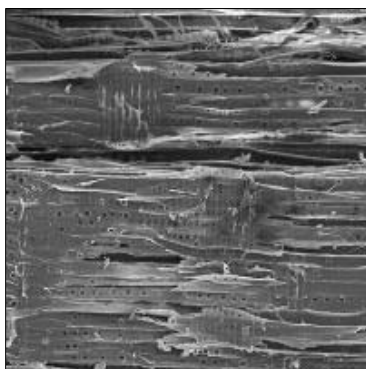
10 μm



Mode II

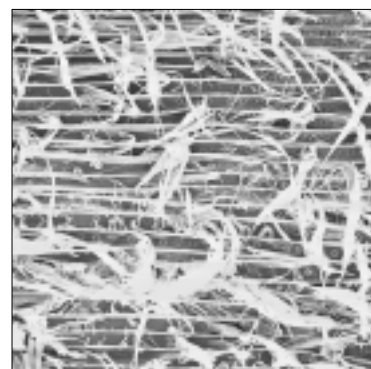
La résorcine semble encore plus sensible à la différence de sollicitation que le mastic polyuréthane. En effet, la colle rompue en ouverture laisse apparaître des grains liés dans une sorte de matrice alors que la résorcine rompue en cisaillement ne laisse plus paraître aucun grain mais plutôt un enchevêtrement de matière déchiquetée. L'endommagement de cisaillement semble être beaucoup plus néfaste pour la structure de l'adhésif polymérisé. La haute résistance de la résorcine au délaminage pourrait expliquer ceci.

Les deux adhésifs semblent posséder une sensibilité différente de comportement par rapport à la sollicitation imposée. Le mastic polyuréthane réagit peu différemment à une sollicitation d'ouverture ou de cisaillement au niveau de sa structure alors que l'adhésif résorcine a un comportement totalement différent selon le type de sollicitation. De même, le bois présente un faciès de rupture bien distinct à faible grossissement comme le montrent les photos suivantes.



Mode I

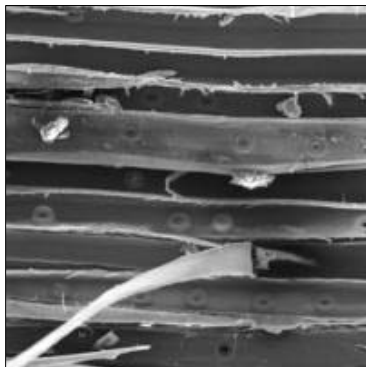
100 μm



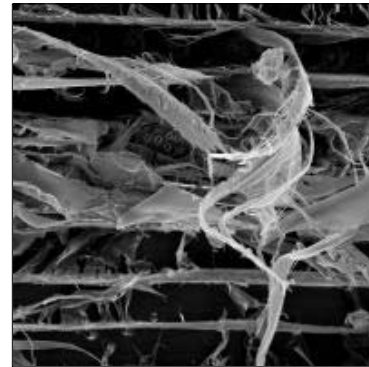
Mode II

Le phénomène de clivage apparaît bien sur la photo de Mode I où l'on assiste à un arrachement des fibres les unes par rapport aux autres laissant la place à un faciès présentant

une surface assez propre mais incluant des zones sombres plus profondes. Le cisaillement agit différemment dans la mesure où il provoque le redressement de paquets de fibres. Cependant, si l'on observe les deux surfaces à très fort grossissement, l'endommagement des fibres apparaît identique et il semblerait que le Mode II appliqué à l'échelle de l'assemblage entraîne un endommagement identique à celui créé par le mode I au niveau microscopique.



Mode I



Mode II

—
20 μm

Hormis l'aspect différent globalement laissant apparaître des fibrilles dont la présence est due au frottement de Mode II, on peut voir que si on se place à plus fort grossissement au niveau d'une fibre de cellulose, la différence entre les deux types de sollicitations est vraiment difficile à faire à un niveau local. On aurait donc, à un niveau local, dans le bois, un mode de clivage pour chacune des sollicitations pourtant différentes à l'échelle macroscopique. Ce phénomène semble se retrouver pour l'adhésif polyuréthane mais pas du tout pour l'adhésif résorcine où, même à l'échelle locale, la différence de faciès est flagrante.

Enfin, une observation de coupes transversales par rapport au joint a été effectuée afin de déterminer s'il existait une différence de pénétration dans le bois entre les deux adhésifs. Le résultat est qu'il existe une différence de pénétration entre le bois d'été et le bois de printemps. L'observation des coupes permet clairement de différencier le joint du bois d'été mais difficilement du bois de printemps. La colle peut donc pénétrer dans la partie la plus poreuse des cernes mais cette pénétration n'a pas été quantifiable. Cette différence de pénétration pourrait expliquer les faciès de rupture observés précédemment différenciant les cernes du bois, tant en mode I qu'en Mode II.

5. Analyse D.S.C. :

Cette analyse par calorimétrie différentielle de l'état de polymérisation de la colle au sein du joint est un processus de contrôle physico-chimique intéressant. En effet, une différence de polymérisation résiduelle entre deux joints considérés comme identiques peut entraîner une forte différence d'énergie de rupture pour un même type de fissuration. Cette analyse a pour objectif de vérifier l'état de polymérisation des joints de colle d'assemblages présumés identiques, à densité de substrats égales mais présentant des caractéristiques différentes avant propagation de la fissure. Une telle démarche permet de vérifier d'une part si le processus de collage est adapté et reproductible et d'autre part, d'identifier les spécimens présentant des défauts de polymérisation. Enfin, dans le cas où la polymérisation est identique, ces disparités pourraient être dues à des déficits d'adhésion à l'interface (poussières, impuretés...) toutefois possibles malgré toutes les précautions prises lors du processus de collage. Le principe et le descriptif des essais apparaît en *Annexe 10*.

5.1. Assemblages résorcine :

Différents essais ont été réalisés sur l'adhésif résorcine précédemment étudié dans la partie mécanique de la rupture puis microscopie électronique.

Les échantillons testés sont les suivants :

- ER10 2/6/98 A et B.
- ER25 2/6/98 A et ER25 3/6/98 A.
- ER50 3/6/98 A.

Le choix de tester ces échantillons plutôt que d'autres provient de l'observation de la figure 3.29 de ce mémoire, sachant que le temps d'essai très long (chaque essai dure environ 1h30) limite le nombre de spécimens pouvant être testés.

Si l'on observe les courbes obtenues donnant le flux de chaleur en fonction de la plage de température balayée, plusieurs remarques peuvent être effectuées :

- toutes les courbes obtenues sont d'aspect identique quelle que soit l'épaisseur de joint concernée. En effet, il n'y a aucune différence de valeurs caractéristiques entre l'adhésif provenant du joint le plus fin et l'adhésif provenant du joint le plus épais. De même, il n'y a aucune différence entre 2 joints de même épaisseur mais de date de collage différente. Si on calcule l'aire délimitée par la courbe résultat entre 30°C et 200°C, la valeur d'enthalpie obtenue est identique quel que soit l'échantillon et vaut environ 270 J/g.

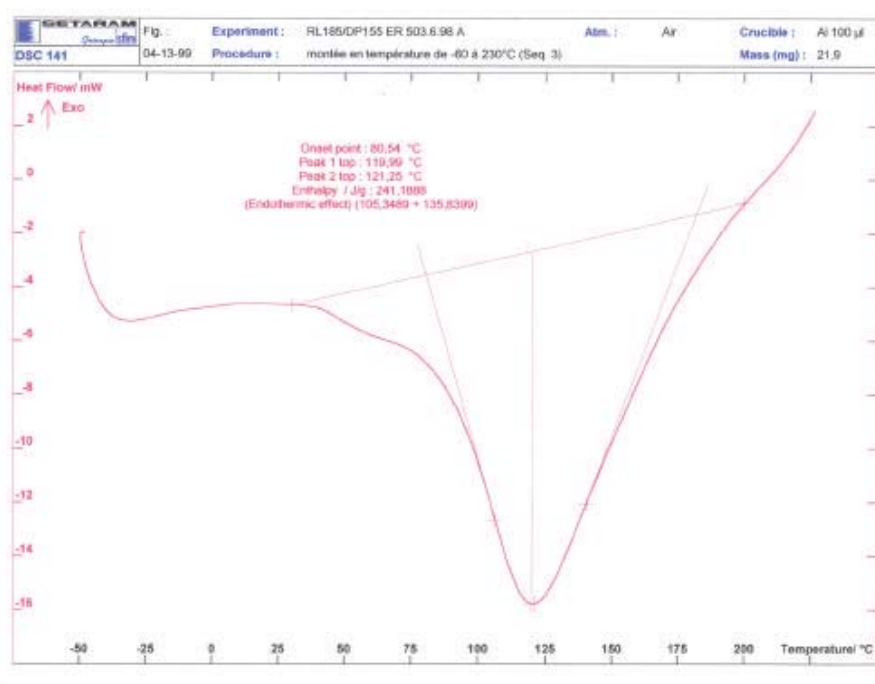


Fig. 3.42 : Courbe expérimentale d'analyse D.S.C. de l'adhésif résorcine phénol formol.

- il apparaît un pic endotherme dans chaque cas pour une température comprise entre 120°C et 125°C. Ce pic est certainement du au départ d'un reliquat d'eau de condensation piégée dans l'adhésif lors de sa polymérisation. Nous avons déjà observé la présence de cette eau de condensation durant l'analyse par microscopie électronique. Afin de bien isoler ce phénomène, un deuxième essai sur un échantillon déjà testé a été réalisé. Il n'apparaît plus, lors du deuxième balayage en température de pic endotherme ce qui confirme bien que toute l'eau de condensation a été libérée.

- Les courbes expérimentales obtenues peuvent être décomposées en 3 régions bien distinctes. Une première zone matérialisée par un plateau situé entre -30°C et +25°C suivie par une zone où apparaît un léger point d'inflexion généralement compris entre +30°C et +60°C. Cette transition pourrait être une transition vitreuse située alors aux environs de +40°C mais ceci reste à confirmer. Lors du 2^{ème} passage de l'échantillon ER25 3/6/98 A, l'adhésif ayant été exposé à une température de 230°C, il a subi un vieillissement accéléré qui doit normalement décaler la phase de transition vitreuse vers des températures supérieures. Le point d'inflexion déterminé dans ce cas est environ à une température de +70°C. Ceci confirme qu'il pourrait s'agir d'une transition vitreuse mais sans toutefois être catégorique vu que la composition de l'adhésif nous est inconnue. La deuxième partie de la courbe est, en fait, le pic endotherme décrit précédemment. La troisième partie de la courbe n'apparaît pas de manière explicite sur nos essais car il s'agit du phénomène de dégradation de l'adhésif

intervenant à plus ou moins haute température selon le polymère testé. Cette troisième partie est normalement composée d'un léger plateau suivi généralement d'une très forte croissance de la courbe (fort dégagement exothermique). Dans le cas de la résorcine, la température de dégradation est normalement située aux environs de +320°C. C'est pour cela que cette zone n'apparaît pas sur nos courbes résultats.

La conclusion de ces essais de calorimétrie différentielle sur l'adhésif résorcine phénol formol est qu'il n'apparaît aucun pic de polymérisation résiduelle lors du balayage en température. S'il existait un quelconque défaut de polymérisation entre les différents échantillons testés, ce défaut apparaîtrait sous la forme d'un pic exotherme durant l'essai. Ce ou ces pics n'apparaissent sur aucun de nos échantillons. Ainsi, ces observations nous permettent de conclure que, dans le cas des assemblages résorcine, les disparités relevées entre spécimens lors des essais mécaniques ne sont en aucun cas dues à des déficits de polymérisation de l'adhésif. Le processus de collage utilisé permet donc d'atteindre une polymérisation totale de l'adhésif composant le joint de colle dans le cas des assemblages résorcine.

5.2. Assemblages polyuréthane :

Différents essais ont été réalisés sur l'adhésif polyuréthane précédemment étudié dans la partie mécanique de la rupture puis microscopie électronique.

Les échantillons testés sont les suivants :

-EP25 29/5/98 A et B.

-EP50 19/5/98 A et B.

-EP75 29/5/98 A.

Le choix de tester ces échantillons plutôt que d'autres provient de l'observation de la figure 3.33 de ce mémoire qui laissait apparaître des disparités de comportement entre ces spécimens.

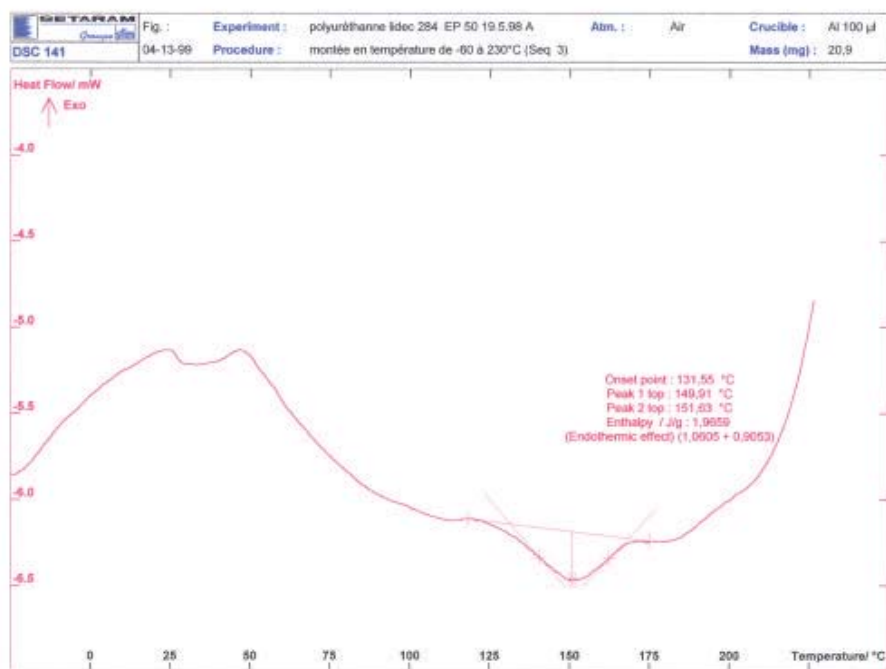


Fig. 3.43 : Courbe expérimentale d'analyse D.S.C. de l'adhésif polyuréthane.

L'observation des courbes de flux thermique en fonction de la plage de température balayée permet les remarques suivantes :

- tout d'abord, les courbes obtenues se distinguent fortement de celles obtenues pour les assemblages résorcine. En effet, si le plateau que l'on pouvait observer précédemment aux alentours de +25°C apparaît bien dans le cas des adhésifs polyuréthane, la transition comprenant le point d'inflexion (transition vitreuse ?) n'apparaît pas de façon aussi bien marquée pour tous les échantillons testés. L'amplitude des courbes est nettement plus faible dans le cas de l'adhésif polyuréthane qui ne laisse pas apparaître de pic endotherme aussi prononcé que la résorcine. Ceci est certainement dû à la particularité qu'ont les adhésifs polyuréthane de polymériser en utilisant l'humidité ambiante. Par conséquent, toute l'eau présente dans le joint et à la surface des substrats a été utilisée pour sa polymérisation et ne peut donc être libérée lors du balayage en température. Ainsi, le pic exotherme apparaissant dans chacune des courbes résultats est peut-être dû à la dégradation d'un des composants de l'adhésif (donc libération de chaleur) toujours située à environ +125°C. Vient ensuite un très léger pic endotherme matérialisant certainement la fusion partielle de ce composant. Ce pic endotherme est suivi alors d'une phase de croissance peu marquée ponctuée par un léger plateau précédant une forte croissance de la courbe matérialisant la dégradation probable de l'adhésif.

- la phase de transition vitreuse n'a pas pu être abordée pour le polyuréthane car faiblement marquée voire inexistante dans certains échantillons. On sait cependant qu'elle

peut être comprise entre +35°C et+100°C pour certains polyuréthanes dont la composition chimique nous est inaccessible.

· les courbes apparaissent identiques pour chacun des échantillons testé. Le léger pic endotherme laisse apparaître une surface quasi identique entre chaque échantillon testé ainsi qu'une forte reproductibilité au niveau de la température (environ +150°C). Une tentative de détermination de la valeur des aires des pics exothermes a été réalisée pour tous les échantillons mais la faiblesse de l'amplitude du signal ne donne pas de résultats significatifs entre les différentes épaisseurs de joint. De plus, il existe un « bruit électronique » inhérent dans le signal capté qui peut intervenir et qui ne peut être négligé vu la faiblesse des amplitudes mesurées. La détermination de l'aire délimitée par la courbe entre des températures de +50°C et +180°C donne des valeurs d'enthalpies proches quelle que soit l'épaisseur du joint (environ 14 J/g).

Les résultats de ces essais de calorimétrie différentielle effectués sur l'adhésif polyuréthane montrent à nouveau que les disparités de caractéristiques mécaniques ne proviennent pas d'un déficit de polymérisation de l'adhésif. Quelle que soit l'épaisseur de joint testée, les courbes de balayage en température sont rigoureusement identiques et ne permettent pas d'identifier de différence flagrante de comportement en température entre les divers échantillons. Cependant, le comportement de l'adhésif polyuréthane semble plus complexe que celui de l'adhésif résorcine et sa plage d'utilisation en température est beaucoup plus restreinte. On peut observer aussi la différence de polymérisation entre les deux types d'adhésif ; la résorcine, lors de sa polymérisation, emprisonne de l'eau de condensation qu'elle libère ensuite à une température voisine de +125°C (peut-être la température de dégradation du composant qui « emprisonne » cette eau de condensation). Le polyuréthane, quant à lui, utilise l'humidité ambiante pour sa polymérisation. C'est pour cela qu'un tel adhésif n'a pas les mêmes contraintes d'utilisation que la résorcine dans le cas de l'humidité relative des substrats.

6. Conclusion :

Les assemblages en épicéa testés lors de cette campagne d'essai ont été soumis à trois types de manipulations :

- des essais des rupture en ouverture et en cisaillement, couplés ou non à des observations par acquisition d'images de l'endommagement du joint lors de la sollicitation.
- des analyses par microscopie électronique à balayage des surfaces de rupture.
- des analyses de calorimétrie différentielle des adhésifs polymérisés.

Le but de cette campagne expérimentale comportait divers objectifs qu'il est utile de rappeler :

- élaborer un spécimen d'essai proposant une fissuration cohésive des assemblages collés tant en ouverture qu'en cisaillement.
- élaborer un processus de collage permettant d'atteindre une reproductibilité optimale du collage et des caractéristiques à rupture de l'assemblage.
- déterminer les caractéristiques à rupture des adhésifs étudiés (taux de restitution d'énergie et énergie de rupture totale) par des essais de Mécanique de la Rupture.
- étudier les faciès de rupture afin d'identifier des paramètres d'endommagement de l'adhésif en fonction de la sollicitation à laquelle est soumis l'assemblage.
- visualiser des paramètres d'endommagement du joint par des observations en temps réel afin d'identifier des modes de rupture du joint.

Le comportement à rupture de l'assemblage épicéa collé laisse apparaître une concurrence entre différents types de fissuration allant de la fissuration cohésive dans le bois ou la colle à un mélange de fissuration cohésive, adhésive, dans l'interphase ou oscillant entre les deux interfaces. Cette concurrence induit une grande dispersion au niveau des résultats, en particulier au niveau des forces d'initiation à la rupture et, par conséquent, des énergies calculées. Malgré cela, une configuration de collage à fil du bois convergent vers le joint permet de limiter cette dispersion, même si cette limitation est certainement liée à l'adhésif. Cependant, des remarques générales peuvent tout de même être effectuées ; dans le cas des assemblages sollicités en mode I, le substrat en épicéa ne permet qu'à de rares exceptions la fissuration cohésive dans la colle de l'assemblage et conduit à la rupture du bois ou de l'interphase dont les propriétés mécaniques sont difficilement accessibles. L'utilisation d'une essence plus résistante telle que le hêtre ou le chêne plus résistante devrait permettre d'atteindre la fissuration souhaitée, d'autant plus que les observations de microscopie électronique laissent apparaître une fissuration cohésive au niveau du bois d'été, plus dur, et

dans le bois au niveau du bois de printemps, dont les cellules sont beaucoup moins résistantes de par leur taille et la faible épaisseur et lignification de leur paroi. De plus, les caractéristiques propres des adhésifs, en particulier la forte résistance au délaminage de l'adhésif résorcine, laissent entrevoir une répugnance à la fissuration cohésive en cisaillement qui a pu être vérifiée expérimentalement. Par contre, la fissuration cohésive du polyuréthane semble beaucoup plus accessible de par sa résistance au délaminage plus faible. Cependant, sa capacité de déformation en cisaillement avant fissuration, accrue avec l'épaisseur du joint, apparaît critique pour le substrat en épicéa qui ne supporte pas la flexion imposée. Mais les caractéristiques à rupture déterminées apparaissent largement supérieures à celles du bois massif et des assemblages résorcine. Il n'apparaît pas d'effet épaisseur de joint significatif tant en mode I qu'en mode II pour les assemblages résorcine même si on peut toutefois souligner que l'augmentation de l'épaisseur du joint à 0.5 mm semble critique pour cet adhésif et à éviter. Ceci est certainement dû au caractère fragile de la résorcine couplé à sa forte sensibilité aux défauts. L'effet joint apparaît fortement dans les essais de flexion des assemblages polyuréthane qui supportent des forces et des déplacements à rupture (donc des énergies) croissants avec l'épaisseur du joint. Ce phénomène est toutefois limité par la capacité du spécimen en épicéa à supporter la flexion imposée comme signalé précédemment. Les deux types de fissuration cohésive de l'assemblage polyuréthane montrent bien l'importance du processus de collage et en particulier le rôle de la couche de faible cohésion dans la résistance de l'assemblage. Les observations du joint par acquisition d'images ont permis d'identifier le processus de propagation de la fissure et d'expliquer pourquoi il existe une telle différence énergétique entre différentes propagations cohésives de la fissure.

Les analyses effectuées par D.S.C. montrent que le processus de collage utilisé lors de la fabrication des spécimens permet d'obtenir une polymérisation totale du joint dans tous les cas de figure et pour les deux types d'adhésifs. Cependant, les observations des surfaces fissurées laissent apparaître une cavitation de mise en œuvre importante dans le cas de l'adhésif polyuréthane dont la taille et la densité varient avec l'épaisseur du joint. Cette cavitation semble négligeable pour les joints de 0.25 mm d'épaisseur mais apparaît critique pour les joints d'épaisseurs supérieures, certainement à cause d'un mauvais dégazage du joint. Pour les joints fins, la pression appliquée lors du collage semble suffisante à ce dégazage mais ne suffit pas pour les joints d'épaisseurs supérieures. Deux solutions sont envisageables : soit le mélange est effectué sous vide, soit il faut utiliser un polyuréthane mono-composant ce qui nous permettrait d'éviter la phase de mélange responsable de cet emprisonnement d'air dans le mastic fortement visqueux. L'adhésif résorcine laisse apparaître, quant à lui, une très faible cavitation due à la présence de condensation dans le joint. Ceci semble difficilement évitable car est directement lié au procédé de polymérisation de la colle. De plus, l'observation des surfaces de rupture laisse apparaître des zones particulières en bord de joint. Ces zones sont liées au mode de fixation des cales en PTFE avant le collage proprement dit. La fixation de

ces cales à l'aide d'une colle cyanolite semble créer soit une prépolymérisation de l'adhésif, soit un changement de l'état de surface par apparition d'un film entre le bois et l'adhésif ou une variation des propriétés intrinsèques du bois en surface, certainement nuisibles à l'obtention d'un bon collage. Ce mode de fixation des cales, remplacé ensuite par l'utilisation d'un film adhésif double face très fin est à bannir car certainement à l'origine de la forte dispersion des résultats des essais mécaniques car il atteint l'intégrité du joint sur des surfaces de taille variable. Une tentative de correction des résultats a été faite par rapport à ces surfaces observées mais n'a rien donné car l'influence au niveau du bois et de l'adhésif est certainement plus profonde (variation des propriétés chimiques, par exemple. De plus, l'influence du rabotage est primordiale sur les caractéristiques à rupture de l'assemblage. des essais effectués sur des surfaces rabotées juste avant d'être collées permettent d'accroître d'environ 25% les forces à rupture de l'assemblage. Toutes ces observations laissent penser que la source de dispersion des résultats n'est pas seulement due à la variation naturelle du bois et du collage mais à des paramètres intervenant lors de la préparation et la fabrication des spécimens.

Enfin, les observations de microscopie électronique ont permis de déterminer une sensibilité différente des adhésifs par rapport à la sollicitation imposée. L'adhésif polyuréthane ne semble pas réagir différemment au clivage ou au cisaillement. En effet, les deux types de sollicitation laissent apparaître des zones d'écoulement ductiles et de plastification. La résorcine, quant à elle, montre deux types de rupture bien distinctes ; la rupture en ouverture laisse apparaître des zones de clivage brutal fortement marquées et une désolidarisation des grains de durcisseur de la matrice de résine alors que la rupture en cisaillement semble atteindre le mélange dans sa masse et entraîne l'apparition d'une surface que l'on pourrait qualifier de « déchiquetée ». Cette différence de faciès de rupture est certainement explicable par la forte résistance au délaminage de cet adhésif. Enfin, il a été observé dans le cas de l'adhésif polyuréthane la création d'une cavitation d'endommagement lors de la sollicitation et d'une micro fissuration du joint. Le phénomène de changement d'interface semble lui aussi jouer un rôle important dans la fissuration du joint, de même que le rapprochement de la fissure de l'interface avec l'augmentation de l'épaisseur du joint.

En conclusion, cette campagne expérimentale permet de collecter de nombreux renseignements sur les diverses étapes d'endommagement et de rupture d'un assemblage collé. Cependant, l'utilisation de l'épicéa, et même du bois comme substrat ne facilite pas la tâche et la reproductibilité des résultats. Peut-être serait-il nécessaire de travailler sur des substrats dont le comportement mécanique moins complexe permettrait une étude plus précise du collage lui-même, comme l'ont laissé entrevoir les essais de photoélasticimétrie.

Chapitre 4

Application de la modélisation à la rupture des
assemblages bois collés.

Nous avons vu et étudié expérimentalement les différents types de rupture observés tant en cisaillement qu'en ouverture. Le nombre de paramètres intervenant dans ces différents résultats ne permet pas d'étudier la totalité de ces phénomènes. Ainsi, l'approche retenue par rapport à ces résultats est d'étudier numériquement l'initiation de la fissuration (voire la propagation) dans la masse de la colle, conformément à l'objectif expérimental fixé. Deux cas de figure peuvent se présenter : soit la fissure est initiée dans la masse de la colle comme dans le cas des essais, soit la fissure est initiée par un défaut de collage à l'interface. En effet, si dans le premier cas, les méthodes classiques peuvent être utilisées directement, il n'en est pas de même dans le deuxième cas de figure où la fissure se situe à l'interface du bois et de la colle. Dans ce cas là, la difficulté provient essentiellement de la juxtaposition d'un matériau isotrope (la couche d'adhésif) et d'un matériau orthotrope (le substrat bois) mais aussi de la prise en compte de l'interface entre ces deux matériaux. Nos résultats expérimentaux montrent qu'un collage correctement réalisé permet d'exclure en majorité les problèmes de rupture adhésive, donc le traitement de ce problème particulier. Cependant, dans le cas d'une étude de la propagation de la fissure et d'une déviation vers l'une ou l'autre interface, il est nécessaire de savoir résoudre ce cas de figure [153]. Dans la suite de ce mémoire, nous ne nous intéresserons qu'au premier cas de figure, c'est-à-dire à l'initiation de la fissure dans la masse de la colle (comme cela est réalisé expérimentalement). La démarche proposée ici consiste plus dans une interprétation des résultats expérimentaux par l'outil numérique que dans une modélisation purement théorique de la rupture des assemblages collés. Le travail réalisé en simulation numérique sur les assemblages collés porte sur les deux points suivants, sachant que l'étude préalable de la stabilité théorique de la fissuration de cette éprouvette en élasticité linéaire a été réalisée dans la partie traitant du spécimen d'essai pour chacune des sollicitations et des épaisseurs de joint :

- l'étude du comportement à rupture du spécimen massif de colle (polyuréthane) en appliquant au matériau trois types de comportement bien distincts : élastique linéaire, plastique parfait, élasto plastique endommageable (Modèle d'Ottosen) adapté aux matériaux quasi fragiles tels que le béton par exemple.
- l'étude du comportement à rupture du spécimen collé sollicité en ouverture et en cisaillement. Dans ces deux cas de charge, chaque adhésif sera testé pour diverses épaisseurs de joint en attribuant à l'adhésif deux types de comportement : soit un comportement élastique linéaire afin d'observer l'évolution des facteurs d'intensité de contraintes en fond de fissure en fonction de l'adhésif et de l'épaisseur du joint mais aussi l'influence sur le mode de rupture de défauts présents en avant du fond de fissure, soit le comportement élasto plastique endommageable d'Ottosen pour réaliser des calculs non linéaires plus proches du comportement réel du matériau.

1. Outils numériques utilisés :

L'outil numérique employé pour cette étude, Castem 2000 [154], pour lequel les nombreux opérateurs de la Mécanique de la Rupture ont été développés dans la version standard (CEA), mais aussi au niveau de laboratoires de recherche (LERMES, LRBB), permet d'étudier ainsi la rupture des assemblages collés. Le choix de ce logiciel d'éléments finis a été guidé par le fait que bon nombre de procédures de Mécanique de la Rupture sont déjà intégrées au code de calcul, mais aussi par le fait que le modèle de comportement envisagé pour l'adhésif est lui implanté dans le code.

1.1. Détermination des grandeurs caractéristiques de la rupture [155] :

Vis à vis de la rupture d'un matériau, les grandeurs couramment déterminées sont le taux de restitution d'énergie critique G_c dans le cas d'un matériau élastique ou l'énergie de rupture G_f s'il existe une non linéarité de comportement mais aussi le facteur d'intensité de contraintes K , tant en mode I qu'en Mode II (K_I et K_{II}) permettant de déterminer un mode mixte de rupture dans le domaine élastique. Pour le calcul numérique de ces grandeurs, nous avons utilisé une méthode énergétique de résolution (méthode G_θ) permettant le calcul de toutes ces grandeurs pour un matériau isotrope (tel que la colle par exemple) mais seulement le calcul de G pour un matériau orthotrope. Cette méthode énergétique consiste à évaluer l'intégrale de Rice par intégration sur une couronne d'éléments entourant la pointe de la fissure. En considérant le champ $\theta = (\theta_1; \theta_2)$ continu et dérivable par morceaux tel que $(\theta_1 = 1; \theta_2 = 0)$ sur Γ et $(\theta_1 = 0; \theta_2 = 0)$ sur Γ' , le taux de restitution d'énergie est obtenu en évaluant l'intégrale suivante :

$$G_\theta = \int_{\Omega} (-\omega \theta_{k,k} + \sigma_{ij} u_{i,k} \theta_{k,j}) dV \quad (4.1).$$

ω étant la densité d'énergie de déformation, σ le champ de contraintes et u le champ de déplacement.

Dans cette formulation, l'isotropie du matériau constitutif n'est pas nécessaire et celle-ci peut donc être utilisée pour un matériau orthotrope. Pour éviter tout problème numérique, la couronne d'intégration reste dans la masse de la colle et n'intercepte à aucun moment l'interface bois-colle. Cependant, dans le cas des joints les plus fins, cette option va nécessiter une taille de zone rayonnante très faible donc induire un nombre d'éléments conséquent à la fois dans le joint aux abords de la zone rayonnante mais aussi à l'interface bois-colle. Par conséquent, la densité d'éléments aux abords du fond d'entaille est très importante quelle que soit l'épaisseur du joint puisque si l'on augmente ce paramètre, le nombre d'éléments dans l'épaisseur suit la même tendance pour éviter tout phénomène de distorsion.

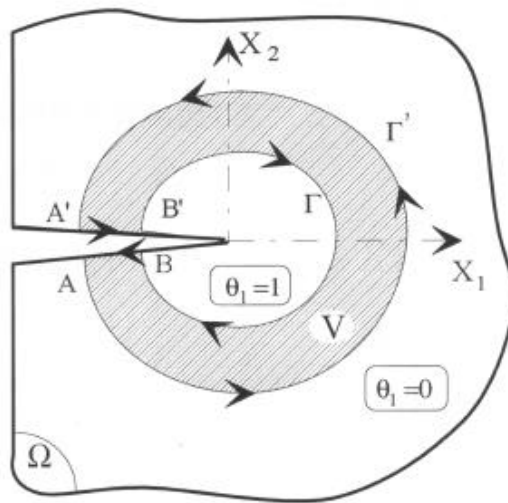


Fig. 4.1 : Domaine et contour d'intégration pour le calcul de l'intégrale de Rice

1.2. Formulation du modèle d'Ottosen [156, 157] :

Les résultats expérimentaux portant sur la rupture des éprouvettes massives de colle ainsi que les hypothèses posées dans la détermination du taux de restitution d'énergie critique et de l'énergie de rupture nous ont conduit vers l'utilisation d'un modèle de comportement adoucissant pour les adhésifs utilisés.

Ce comportement particulier des matériaux sous entend l'apparition de micro fissures et d'un endommagement en avant du fond de fissure avant propagation de la rupture. Ces phénomènes dissipatifs sont en partie responsables de la non linéarité de comportement du matériau avant propagation. Dans les matériaux quasi fragiles tels que le béton, le bois ou ici la colle, les deux phénomènes dissipatifs clairement identifiés dans la littérature pour les deux premiers matériaux puis dans nos essais pour le troisième sont l'apparition de micro fissures mais aussi de micro vides dont la coalescence au cours de la sollicitation permet une ruine progressive du matériau. Si l'on s'intéresse à une courbe expérimentale obtenue sur une éprouvette massive de colle, on peut décomposer l'évolution de la courbe force déplacement en quatre domaines bien distincts :

- 1) domaine élastique linéaire
- 2) développement des phénomènes dissipatifs en fond de fissure (micro fissuration...)
- 3) propagation de la rupture
- 4) rupture globale de la structure

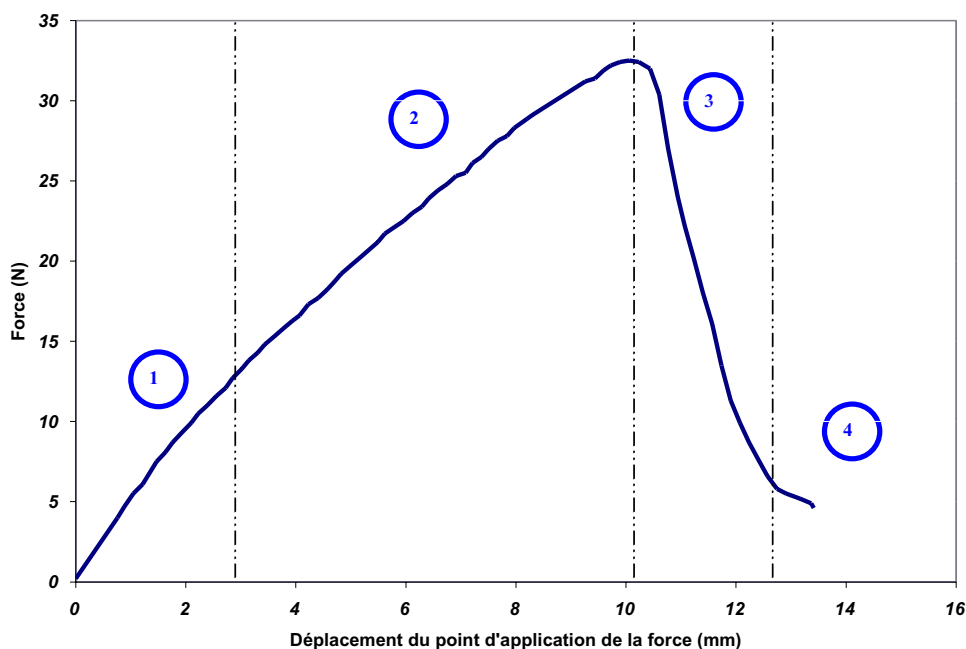


Fig. 4.2 : Comportement à la rupture de l'adhésif polyuréthane.

Cette courbe expérimentale montre la forte non linéarité de comportement de ce type d'adhésif avant propagation de la fissure et la ruine progressive du matériau. Par conséquent, l'utilisation d'une loi de comportement décrivant ces deux phénomènes est indispensable si l'on veut que les simulations numériques décrivent au mieux la globalité des phénomènes physiques.

Ainsi, un modèle de fissure diffuse peut être utilisé dans une approche un peu particulière puisque on associe à ce modèle un endommagement diffus du matériau en avant du fond de fissure (smeared crack approach). Un tel modèle a été développé pour le béton par Ottosen et Dahlblom [156] et possède l'avantage d'être déjà implanté sous le code de calcul Castem 2000.

1.2.1. Formulation mathématique du modèle :

Le modèle de la fissure fictive d'Hillerborg est fondé sur le fait expérimentalement observé que la fissuration est un phénomène localisé provoquant un comportement adoucissant lié aux contraintes de cohésion dans la zone micro fissurée. Dans le cas d'une barre de béton sollicitée en tension jusque dans le domaine post pic de la courbe force déplacement, le modèle de la fissure fictive suppose que la décharge élastique se produit sur la totalité de la longueur de la barre mais qu'il existe aussi une déformation résiduelle se produisant dans une

zone endommagée infiniment petite. Ainsi, le processus de fissuration n'est plus décrit à partir d'une relation contrainte déformation mais plutôt à partir du comportement de cette zone endommagée par une relation exprimée en termes de contrainte normale σ et d'ouverture de fissure perpendiculairement au plan de chargement w_n , c'est à dire :

$$w_n = f(\sigma) \quad (4.2).$$

En poursuivant ces hypothèses, le modèle de la fissure fictive décrit le domaine post pic du comportement en tension de cette barre de béton de longueur L par une relation linéaire entre σ et w_n telle que le montre la figure 4.3 et l'exprime la relation (4.3) :

$$w_n = \frac{1}{N}(\sigma - \sigma_t) \quad (4.3).$$

où σ_t est la résistance en traction uniaxiale et N la pente de la courbe σ - w_n .

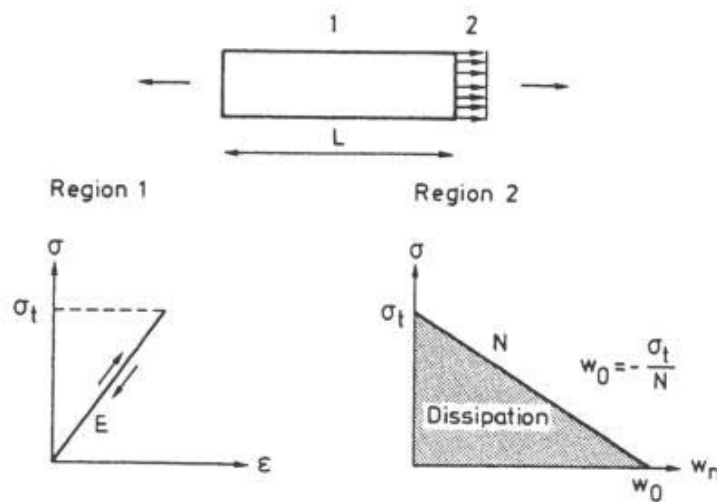


Fig. 4.3 : Modèle de la fissure fictive par Hillerborg [156].

L'allongement total de la barre devient alors :

$$u = L \frac{\sigma}{E} + \frac{1}{N}(\sigma - \sigma_t) \quad (4.4).$$

Avec E module d'Young du matériau. L'énergie totale dissipée jusqu'à la fin du chargement D_t est liée à l'aire sous tendue à la courbe σ - w_n de la figure 4.3 et peut être estimée par la relation suivante :

$$D_t = \frac{1}{2} \sigma_t w_o A = G_f A \text{ soit } G_f = \frac{1}{2} \sigma_t w_o \quad (4.5).$$

Où A est la section du barreau de béton, G_f l'énergie de rupture, et w_o apparaît sur la figure et vaut $w_o = -\sigma_t / N$.

On obtient alors grâce à la relation (4.5) :

$$N = -\frac{\sigma_t^2}{2G_f} \quad (4.6).$$

On peut définir λ paramètre du matériau par :

$$\lambda = -\frac{2G_f E}{\sigma_t^2} \text{ et } N = \frac{-E}{\lambda} \quad (4.7).$$

Le paramètre du matériau λ a la dimension d'une longueur et sera par la suite nommé longueur caractéristique du matériau. Cependant, le modèle original de la fissure fictive considère uniquement le comportement d'une fissure chargée perpendiculairement à ses lèvres. Dans la réalité, les plans de fissuration sont aussi sollicités en cisaillement. Ainsi, pour tenir compte de cette réalité physique, il est naturel d'étendre le modèle de la fissure fictive en faisant intervenir le déplacement transverse w_t (c'est à dire dans le plan de la fissuration) mais aussi la contrainte de cisaillement τ . En définitive, les quatre paramètres caractéristiques de l'état d'une fissure (τ , σ , w_n , w_t) sont fortement couplés par des phénomènes de friction et de dilatance. Il est bien entendu difficile de prendre en compte tous ces phénomènes car cela introduirait un grand nombre de paramètres difficiles à ajuster. De plus, nous ne souhaitons retenir que les phénomènes prédominants d'endommagement. Ainsi, on considère que la friction se manifeste par un couplage entre le cisaillement, le déplacement transversal et l'ouverture tel que :

$$w_t = f(\tau, w_n) \quad (4.8).$$

En accord avec la relation liant σ et w_n , on obtient l'expression simple suivante :

$$w_t = \frac{w_n}{G_s} \tau \quad (4.9).$$

Où G_s est une constante du matériau représentative de la perte de résistance au cisaillement d'une fissure lors de l'accroissement de son ouverture. La principale cause du déplacement transverse est le cisaillement au travers de la friction tandis que celle de l'ouverture est le

chargement normal. C'est pour cette raison que par la suite, le phénomène de dilatance sera négligé du fait des paramètres supplémentaires à intégrer au modèle. Ceci apparaît contestable car seule la dilatance peut rendre compte de l'endommagement du matériau lors d'une sollicitation de cisaillement pur.

Par conséquent, le comportement d'une fissure selon le modèle d'Ottosen peut se résumer par l'écriture suivante :

$$\begin{bmatrix} w_n \\ w_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{N} & 0 \\ \frac{\tau}{G_s \cdot N} & \frac{w_n}{G_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma \\ \tau \end{bmatrix} \quad (4.10).$$

Si l'on cherche maintenant à écrire les relations en termes de contraintes et déformations utilisables dans un calcul éléments finis, l'ouverture et le glissement dans les trois directions x, y, z s'expriment par les équations suivantes :

$$\begin{cases} w_{xx} = \frac{1}{N} (\sigma_{xx} - \sigma_t); w_{xy} = \frac{w_{xx}}{G_s} \cdot \sigma_{xy}; w_{xz} = \frac{w_{xx}}{G_s} \cdot \sigma_{xz} \\ w_{yy} = \frac{1}{N} (\sigma_{yy} - \sigma_t); w_{yx} = \frac{w_{yy}}{G_s} \cdot \sigma_{yx}; w_{yz} = \frac{w_{yy}}{G_s} \cdot \sigma_{yz} \\ w_{zz} = \frac{1}{N} (\sigma_{zz} - \sigma_t); w_{zx} = \frac{w_{zz}}{G_s} \cdot \sigma_{zx}; w_{zy} = \frac{w_{zz}}{G_s} \cdot \sigma_{zy} \end{cases} \quad (4.11).$$

La suite du calcul nécessite l'introduction des distances équivalentes L_x , L_y et L_z associées respectivement aux axes X, Y, Z. La définition de ces paramètres de taille sera donnée un peu plus tard mais on peut d'ores et déjà retenir que les ouvertures et les glissements des fissures sont répartis uniformément sur ces longueurs. On peut par conséquent établir les déformations de fissuration correspondantes grâce à la définition usuelle du tenseur des déformations exprimé dans l'hypothèse des petits déplacements. En accord avec cette définition, les déformations anélastiques issues d'un endommagement diffus s'écrivent :

$$\left[\begin{array}{l} \varepsilon_{xx}^f = \frac{w_{xx}}{L_x} \\ \varepsilon_{yy}^f = \frac{w_{yy}}{L_y} \\ \varepsilon_{zz}^f = \frac{w_{zz}}{L_z} \\ \varepsilon_{xy}^f = \frac{1}{2} \left(\frac{w_{xy}}{L_x} + \frac{w_{yx}}{L_y} \right) \\ \varepsilon_{xz}^f = \frac{1}{2} \left(\frac{w_{xz}}{L_x} + \frac{w_{zx}}{L_z} \right) \\ \varepsilon_{yz}^f = \frac{1}{2} \left(\frac{w_{yz}}{L_y} + \frac{w_{zy}}{L_z} \right) \end{array} \right] \quad (4.12).$$

Les déformations de fissuration sont liées à l'état de contrainte de la fissure par les relations (4.11) et (4.12).

$$\left[\begin{array}{l} \varepsilon_{xx}^f \\ \varepsilon_{yy}^f \\ \varepsilon_{zz}^f \\ \varepsilon_{xy}^f \\ \varepsilon_{xz}^f \\ \varepsilon_{yz}^f \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cccccc} J_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{xz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{yz} \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{l} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{array} \right] - \sigma_t \cdot \left[\begin{array}{l} J_x \\ J_y \\ J_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] \quad (4.13).$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} J_x = \frac{1}{N.L_x}; J_y = \frac{1}{N.L_y}; J_z = \frac{1}{N.L_z} \\ K_{xy} = \frac{1}{G_s} \left(\frac{w_{xx}}{L_x} + \frac{w_{yy}}{L_y} \right); K_{xz} = \frac{1}{G_s} \left(\frac{w_{xx}}{L_x} + \frac{w_{zz}}{L_z} \right); K_{yz} = \frac{1}{G_s} \left(\frac{w_{yy}}{L_y} + \frac{w_{zz}}{L_z} \right) \end{array} \right.$$

On peut noter que s'il n'existe que deux fissures selon les axes x et y, l'expression (4.13) reste vérifiée en prenant uniquement L_z infinie conduisant naturellement à J_z nul. Si le seul phénomène non linéaire est la fissuration, les déformations totales se décomposent en déformations élastiques et de fissuration.

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{\varepsilon}}^e + \underline{\underline{\varepsilon}}^f \quad (4.14).$$

Relation dans laquelle les déformations élastiques sont obtenues à partir de la loi de Hooke, à savoir :

$$\underline{\underline{\varepsilon}}^e = \frac{1+\nu}{E} \cdot \underline{\underline{\sigma}} - \frac{\nu}{E} \cdot \underline{\underline{I}} : \underline{\underline{\sigma}} \quad (4.15).$$

Les calculs réalisés sur les assemblages collés prennent pour hypothèse un état de contraintes planes. On peut ainsi reprendre l'expression (4.13) en imposant $\sigma_{zz}=\sigma_{xz}=\sigma_{yz}=0$. On obtient alors :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} + J_x & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} + J_y & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} + K_{xy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} - \sigma_t \cdot \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.16).$$

Plutôt que l'expression explicite des déformations totales, l'implantation dans un code de calcul éléments finis nécessite une écriture incrémentale. Notons que le coefficient K_{xy} dépend des ouvertures w_{xx} et w_{yy} de la fissure. Ce paramètre évoluera donc au cours du temps et donc du chargement. La différenciation et l'inversion de l'expression (4.16) donnera donc :

$$\begin{bmatrix} \underline{\underline{d}}_{xx} \\ \underline{\underline{d}}_{yy} \\ \underline{\underline{d}}_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 & d_6 & 0 \\ d_6 & d_2 & 0 \\ d_{10} & d_{11} & d_7 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\underline{d}}_{xx} \\ \underline{\underline{d}}_{yy} \\ 2\underline{\underline{d}}_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.17).$$

Avec

$$d_1 = \frac{1}{d} \left(\frac{1}{E} + J_y \right) \quad d_2 = \frac{1}{d} \left(\frac{1}{E} + J_x \right) \quad d_6 = \frac{1}{d} \cdot \frac{\nu}{E} \quad d_7 = \frac{G}{1 + G \cdot K_{xy}}$$

$$d_{10} = -\frac{d_7 \cdot \sigma_{xy}}{G_s \cdot d} \left(\frac{J_x + \nu \cdot J_y}{E} + J_x \cdot J_y \right) \quad d_{11} = -\frac{d_7 \cdot \sigma_{xy}}{G_s \cdot d} \left(\frac{J_y + \nu \cdot J_x}{E} + J_x \cdot J_y \right)$$

où d représente le déterminant de la matrice extraite composée des deux premières lignes et colonnes de la matrice donnée dans l'expression (4.16) soit :

$$d = \frac{1-\nu^2}{E^2} + \frac{1}{E} (J_x + J_y) + J_x \cdot J_y$$

1.2.2. Paramètres physiques du modèle :

Les différents paramètres du modèle ont diverses significations qu'il apparaît utile de préciser.

1.2.2.1. Le coefficient G_f :

D'un point de vue physique, il faut reconnaître que si l'apparition d'une fissure dépend de l'état de contrainte, la formation et le développement d'une fissure nécessite une certaine énergie. Celle-ci est notée G_f et représente l'énergie nécessaire à l'ouverture d'une fissure répartie sur une unité de surface. G_f est symbolisée par l'aire de la courbe de réponse contrainte déplacement d'une éprouvette chargée en traction uniaxiale et dont le profil de fissuration est localisé (figure 4.3). Cependant, même si la définition de G_f dans le modèle semble correspondre à l'énergie totale de rupture, son utilisation et les termes de la Mécanique de la Rupture montrent qu'en réalité, G_f correspond au taux de restitution d'énergie critique puisque le phénomène de fissuration en traction suit un mécanisme de fissuration par rupture fragile. Ainsi, la grandeur physique à intégrer au modèle est réellement le G_c du matériau dans le cas où l'on veut extrapoler ce modèle à d'autres matériaux. Par conséquent, tant que le taux de restitution d'énergie du matériau G est inférieur à sa valeur critique G_c , il n'y a pas propagation de la fissure. Par contre, si G atteint G_c , il y a propagation. L'attention doit être ainsi portée dans l'utilisation de ce modèle non linéaire sur les grandeurs à intégrer puisque G_c est une grandeur élastique linéaire.

1.2.2.2. Le coefficient G_s :

Ce coefficient est représentatif de la perte de résistance au cisaillement d'une fissure lors d'un accroissement de son ouverture. Il est introduit par la relation 4.9 donnant $w_t = w_n \cdot \tau / G_s$. Lors d'un chargement en cisaillement pur d'un barreau, la relation élastique entre déformation et contrainte de cisaillement est donnée par :

$$\tau = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{xy} \quad (4.18).$$

Cependant, dans le cas d'un endommagement surfacique du matériau, cette relation s'écrit plus généralement :

$$\tau = 2 \cdot G_{eff} \cdot \varepsilon_{xy} \quad (4.19).$$

Où G_{eff} traduit la perte de résistance au cisaillement avec l'augmentation de l'endommagement du matériau. Ainsi, on trouve alors un lien avec les approches classiques de l'endommagement par l'apparition d'un paramètre semblable à un paramètre d'endommagement couramment défini dans les modèles, compris entre 0 et 1 tel que

$G_{eff} = \alpha.G$. Ce paramètre α est ici nommé coefficient de rétention en cisaillement et contrairement à la définition classique des paramètres d'endommagement, vaut 1 quand le matériau est sain et 0 quand il est rompu. Il décroît donc continuellement à partir de 1. Dans notre cas, ce coefficient est directement déduit de la relation (4.13) et dépend de l'ouverture de la fissure. On a alors :

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{w_{xx} \cdot G}{L_x \cdot G_s}} \quad (4.20).$$

1.2.2.3. Signification et calcul du paramètre de taille :

Des longueurs L_x , L_y , L_z interviennent dans les définitions des coefficients J_x , J_y , J_z mais aussi K_{xy} , K_{xz} et K_{yz} . Ces longueurs apportent une mesure de la région dans laquelle les ouvertures de fissure sont à prendre en compte. Bien entendu, ces longueurs sont mesurées dans les directions normales au plan de fissuration. Dans le cas de calculs bidimensionnels, on peut observer par exemple sur des éléments TRI3 ou QUA4 la signification de ces longueurs sur la figure 4.4.

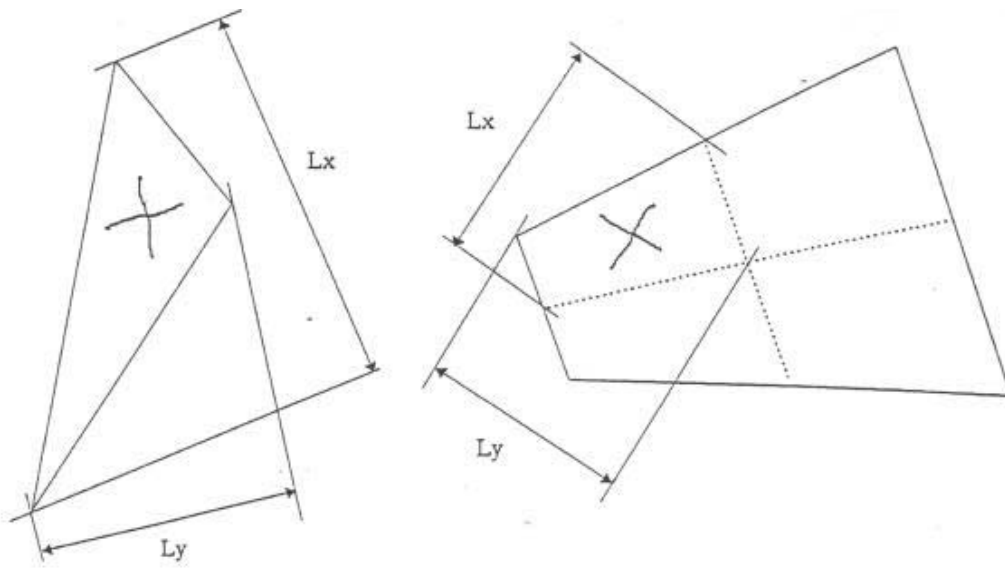


Fig. 4.4 : Visualisation des paramètres de taille du modèle d'Ottosen pour 2 types d'éléments en calcul 2D [156].

Il faut toutefois retenir que ces paramètres sont une information géométrique entièrement déterminée par la taille, la forme des éléments employés et les directions de fissures calculées. Le calcul de ces paramètres se fait numériquement à l'aide de l'opérateur TAILLE dans Castem quel que soit le nombre de points d'intégration des éléments employés.

La valeur du paramètre de taille est sujette à certaines limitations. Lors d'un essai de traction uniaxiale d'un barreau, l'état de contrainte suit la relation :

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{1 + \frac{E}{N.L_x}} \cdot \epsilon_{xx} = \frac{E}{1 - \frac{\lambda}{L_x}} \quad (4.21).$$

Où λ est la longueur caractéristique du matériau sollicité (relation 4.6). Comme le montre la figure 4.3, les hypothèses posées induisent que la pente de l'écoulement est forcément négative, ce qui implique que :

$$\left(1 - \frac{\lambda}{L_x}\right) < 0 \Leftrightarrow L_x < \lambda \quad (4.22).$$

Plus généralement, un incrément de déformation dans la direction normale à un plan de fissuration doit être accompagné d'un décrétement de contrainte dans cette direction. Il peut être montré qu'une condition suffisante s'exprime par (voir relation 4.16) :

$$L_x < \frac{\lambda}{1 + \nu} ; L_y < \frac{\lambda}{1 + \nu} ; L_z < \frac{\lambda}{1 + \nu} \quad (4.23).$$

Plus généralement, ce modèle est applicable à tous les matériaux fragiles et par extension quasi fragiles. De ce fait, il semble approprié de l'appliquer aux adhésifs que nous avons choisi d'utiliser, et tout particulièrement au polyuréthane pour lequel nous avons des résultats expérimentaux à la fois sur les spécimens massifs de colle et les assemblages bois collés.

2. Spécimen massif de colle :

La première partie de l'étude numérique porte sur les spécimens massifs de colle. En effet, les grandeurs caractéristiques de l'adhésif polyuréthane étant déjà déterminées expérimentalement, il a été décidé d'appliquer le modèle d'Ottosen sur ce type de simulations afin de caler les paramètres du modèle sur des structures « simples » avant de passer à des calculs beaucoup plus lourds sur les assemblages collés. De plus, afin de quantifier l'apport d'un tel modèle par rapport à des approches plus simples, la même démarche a été réalisée avec un modèle élasto plastique parfait. Le maillage des spécimens massifs de colle apparaît sur la figure suivante (fig. 4.5).

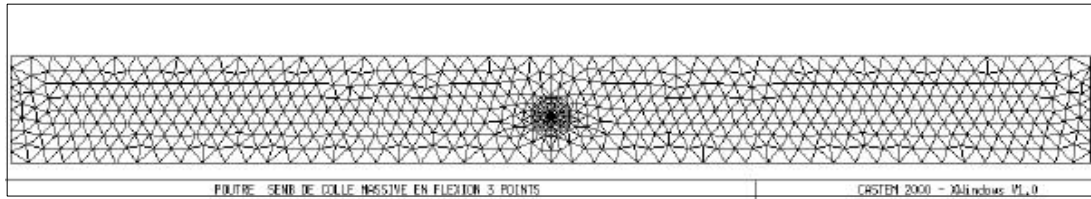


Fig. 4.5 : Maillage de l'éprouvette massive de colle.

Le chargement appliqué est en tout point identique à l'expérience. Cependant, une petite difficulté est survenue lors des calculs. La version disponible du modèle d'Ottosen ne permet pas de réaliser numériquement la propagation de la fissure. Nous avons donc été obligés de reconstruire une courbe de propagation de la fissure par chargements successifs pour des longueurs de fissure croissantes, la simili propagation se produisant lorsque l'énergie de rupture calculée atteint la valeur critique déterminée expérimentalement.

2.1. Modèle élasto plastique parfait.

Les paramètres mécaniques retenus pour la simulation sont les suivants :

- module d'Young : 100 MPa
- coefficient de Poisson : 0.4
- limite élastique : 5 MPa

On peut observer sur la courbe suivante que pour les longueurs de fissure les plus faibles, le palier plastique n'est pas totalement atteint alors que le critère de propagation fixé au préalable est atteint. Par contre, pour des longueurs de fissure plus importantes, le palier plastique est atteint avant la propagation. Ainsi, la tendance générale de comportement à la rupture expérimentalement observée est relativement bien retranscrite même si la non linéarité avant la première propagation est relativement faible. En revanche, la répartition des contraintes en fond de fissure ne semble pas trop correspondre à la réalité dans la mesure où la zone de localisation des déformations plastiques au moment de la propagation n'est pas située dans l'axe de la fissure, mais plutôt perpendiculairement à cette fissure (figure 4.7). On peut ainsi tracer en coordonnées polaires l'évolution des contraintes le long d'une couronne de la zone rayonnante où l'on peut observer (figure 4.8) que la contrainte d'ouverture maximale $\sigma_{\theta\theta}$ est bien située dans l'axe de la fissure contrairement à la contrainte radiale σ_r qui semble, pour sa part, plutôt agir dans les zones énoncées précédemment.

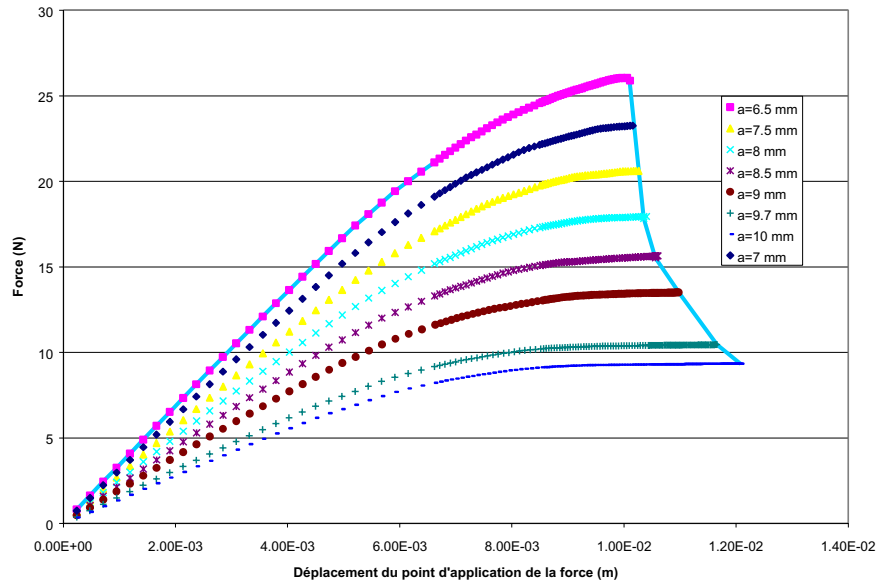
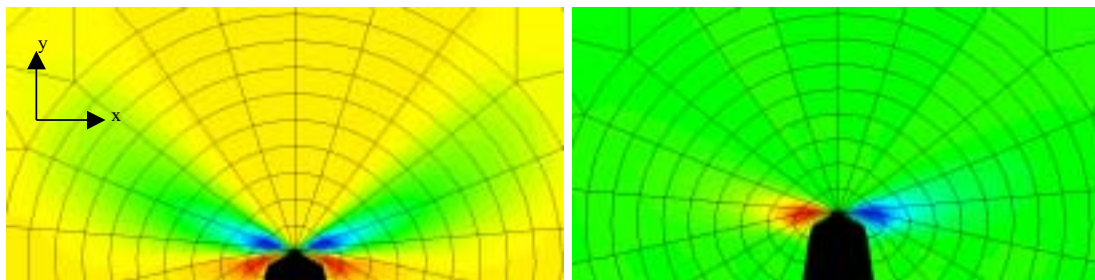


Fig. 4.6 : Comportement de l'éprouvette massive de colle en régime élasto plastique parfait.



a) $\epsilon_{plast}(xx)$

b) $\epsilon_{plast}(yy)$

Fig. 4.7 : Répartition des déformations inélastiques en fond de fissure.

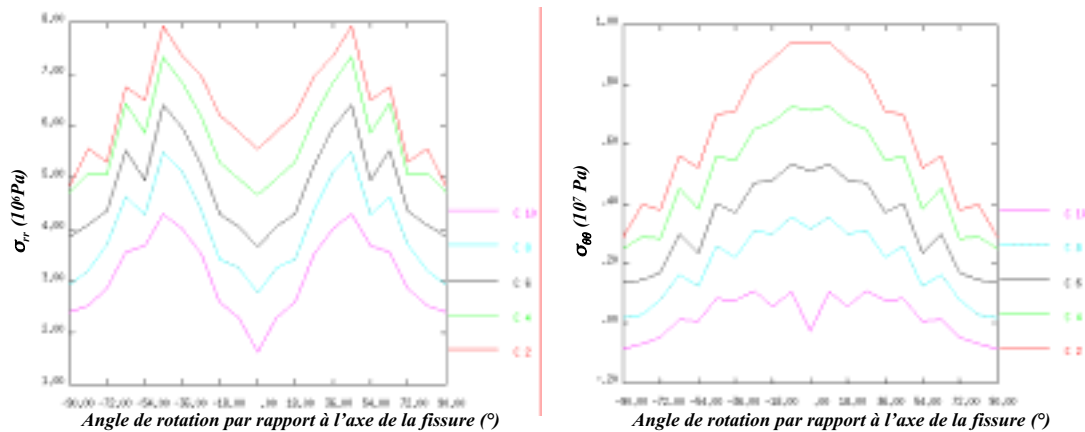


Figure 4.7 : Diagrammes polaires de répartition des contraintes sur les couronnes de la zone rayonnante.

2.2. Modèle d'Ottosen.

Les paramètres du modèle retenus pour le spécimen massif de colle polyuréthane sont les suivants:

- module d'Young : 100 MPa
- coefficient de Poisson : 0.4
- limite en traction : 10 MPa
- G_f : 950 J/m²
- G_s : 0.2 MPa

La combinaison de ces paramètres permet d'atteindre la meilleure correspondance possible vis à vis des résultats expérimentaux. On peut cependant souligner la faible influence du paramètre G_s sur les résultats vue la sollicitation appliquée. On peut toutefois supposer que la sollicitation de cisaillement sur les assemblages collés sera beaucoup plus réceptive à l'évolution de ce paramètre. Comme pour le modèle élasto plastique parfait, la construction de la courbe de pseudo propagation permet de retrouver une courbe correspondant aux observations expérimentales (figure 4.8). Le modèle appliqué ici semble bien adapté aux phénomènes observés dans la mesure où la courbe force déplacement amorce une décroissance lorsque le critère de propagation adopté est atteint. Il semblerait donc que le modèle d'Ottosen agisse bien comme un modèle d'endommagement diffus.

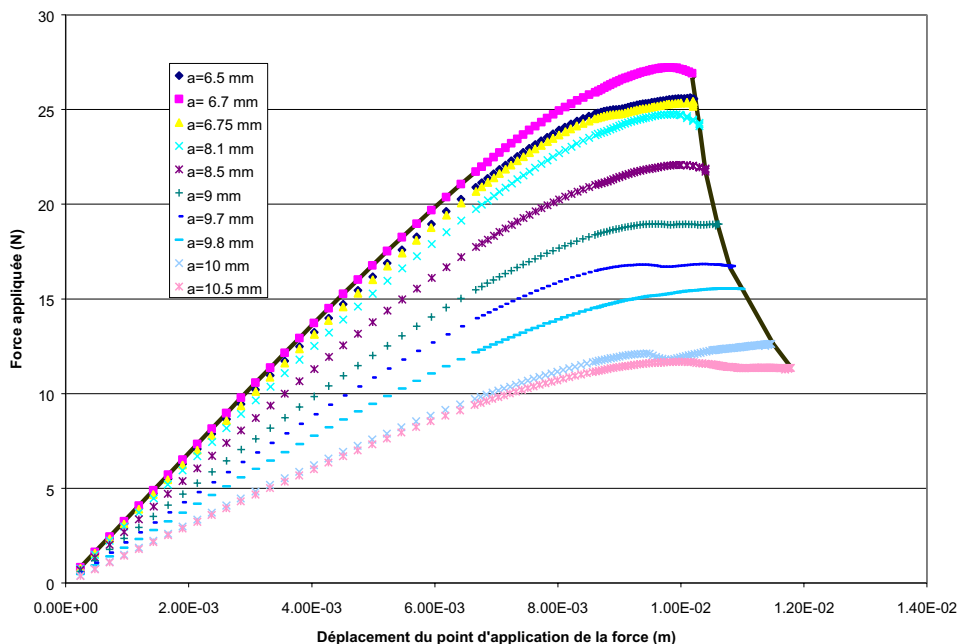


Fig. 4.8 : Comportement de l'éprouvette massive de colle avec le modèle d'Ottosen.

On peut aussi noter l'instabilité du modèle qui n'a pas permis de réaliser les calculs pour toutes les longueurs de fissure prévues. L'observation des déformations anélastiques en avant du fond de fissure (figure 4.9) est révélatrice du mécanisme utilisé par ce type de modèle, de même que les diagrammes de répartition des contraintes en avant du fond de fissure (figure 4.10).

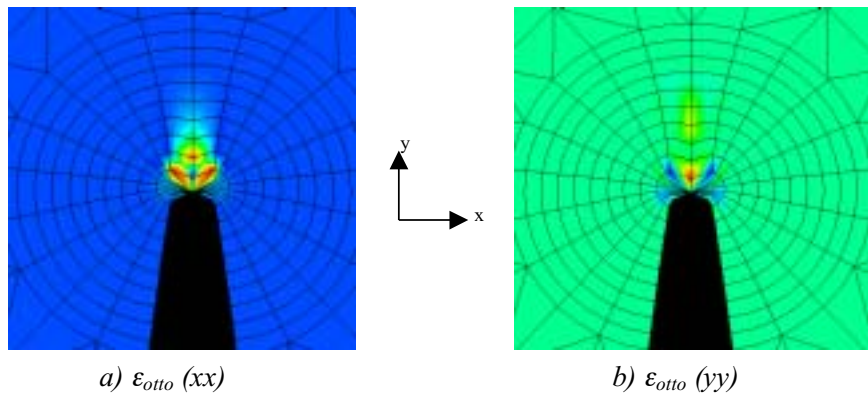


Fig. 4.9 : Répartition des déformations inélastiques en fond de fissure.

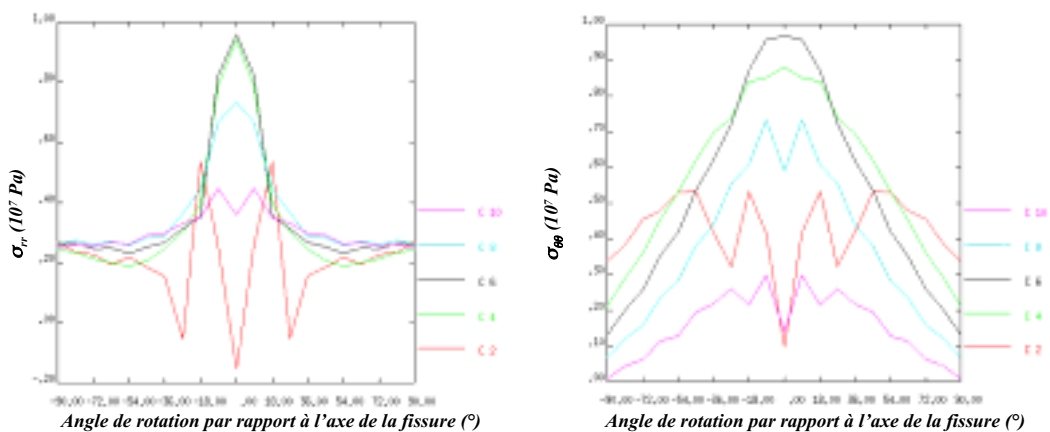


Figure 4.10 : Diagrammes polaires de répartition des contraintes sur les couronnes de la zone rayonnante.

On peut observer sur les deux figures précédentes que la répartition des contraintes dans la zone de localisation des déformations anélastiques subit de fortes modifications. En effet, on peut voir qu'au moment où le critère de propagation est atteint, les contraintes σ_{rr} et $\sigma_{\theta\theta}$ s'annulent dans l'axe de la fissure sur la 2^{ème} couronne et atteignent leur maximum sur les couronnes 4 et 6. Le matériau est donc tellement endommagé qu'il n'exerce plus aucune contrainte dans ces deux directions. Le critère de rupture adopté ici semble donc être valable dans la mesure où il correspond à une annulation des contraintes en avant du fond de fissure (matériau rompu). De plus, cette direction de rupture est tout à fait en accord avec les

observations expérimentales. Ces observations sont confirmées par le fait que si l'on poursuit le chargement, cet état de contraintes est fortement modifié en avant du fond de fissure, comme le montre la figure 4.11.

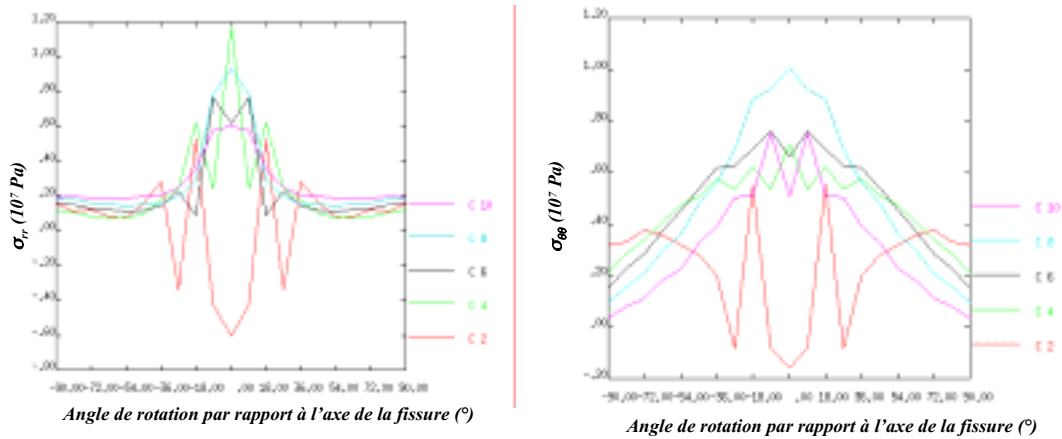


Fig. 4.11 : Diagrammes polaires de répartition des contraintes sur les couronnes de la zone rayonnante

Les couronnes 4, 6 et 8 semblent subir d'importantes modifications de l'état de contraintes par rapport à la figure 4.10. On peut aussi voir que la zone d'annulation des contraintes au niveau de la 2^{ème} couronne semble se propager le long de la couronne du fait de l'adoucissement du pic de la courbe. La visualisation des isocontraintes selon les axes x et y sur le maillage déformé confirme bien toutes ces observations. Comme le prévoit le modèle d'Ottosen, la non linéarité de comportement est effectivement due au développement en avant du fond de fissure d'une zone micro fissurée (équivalente à une zone endommagée).

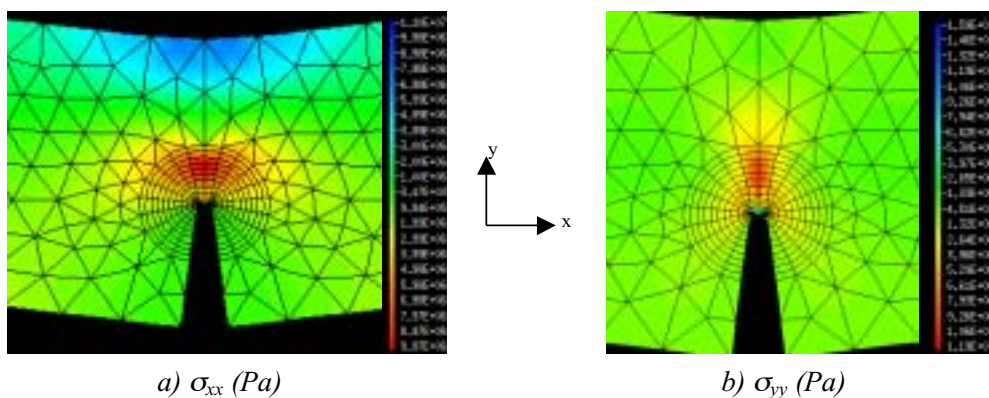


Fig. 4.12 : Répartition des contraintes en fond de fissure.

Un intérêt de la méthode aurait été de prolonger le chargement jusqu'à propagation plus importante de cette endommagée. Il faut toutefois garder à l'esprit que le modèle d'Ottosen

n'a pas été établi pour être appliqué à des structures entaillées. Dans ce cas, il persiste un phénomène de distorsion des éléments trop important qui ne permet pas de réaliser ce type de simulation. Enfin, la courbe suivante montre le cas où l'on poursuit le chargement au delà du critère de propagation, sans toutefois atteindre de distorsion trop importante des éléments.

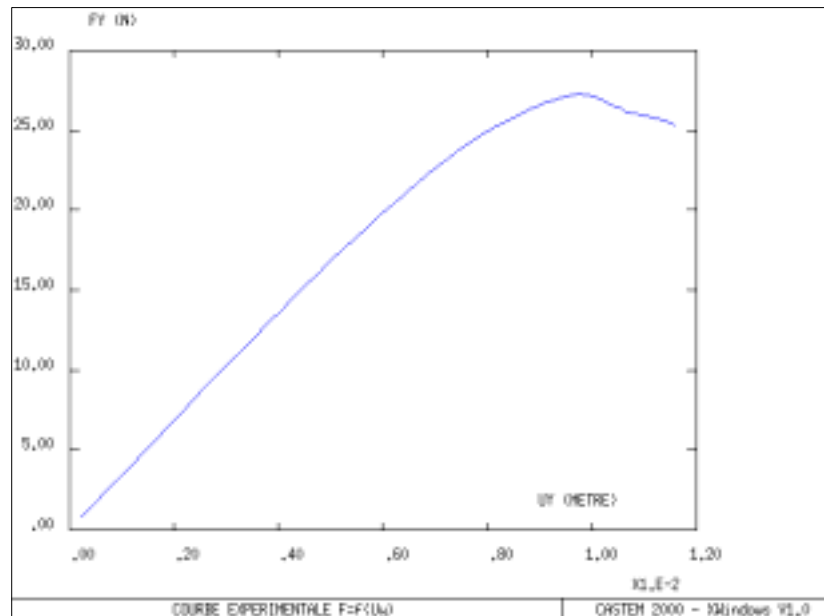


Fig. 4.13 : Courbe force déplacement d'une éprouvette entaillée de colle massive obtenue avec le modèle d'Ottosen.

On peut observer sur cette courbe que le développement de la zone endommagée ne suffit pas à obtenir un comportement proche de l'expérimental. Les hypothèses ainsi posées dans la détermination des énergies de rupture semblent donc être adaptées à ce type d'adhésif dans la mesure où la zone endommagée semble se développer jusqu'à la propagation puis garder une longueur critique durant cette propagation. C'est pour cela que les pseudo propagations réalisées auparavant coïncident bien avec l'expérimental, comme le montre la figure 4.14, et en particulier la partie concernant la rupture du spécimen (domaine post pic). L'apport du modèle d'Ottosen par rapport à un modèle classique élasto plastique parfait semble donc important et correspondre aux phénomènes expérimentalement observés. De plus, des essais de simulations de décharge de l'éprouvette massive de colle montrent bien une augmentation de la complaisance de l'éprouvette avec la non linéarité de comportement sans aucune propagation de fissure. La confirmation de l'endommagement en fond de fissure est ainsi obtenue même s'il persiste une instabilité numérique en fin de décharge ne permettant pas d'identifier si le modèle appliqué induit un déplacement résiduel ou non.

Les simulations sous estiment légèrement le comportement du spécimen par rapport à l'expérimental, mais correspondent globalement aux trois spécimens moyens. Enfin, même si

la différence entre les deux modèles est infime dans la courbe force déplacement, l'étude en avant du fond de fissure tend à confirmer l'importance des modèles d'endommagement dans la retranscription des phénomènes physiques réels.

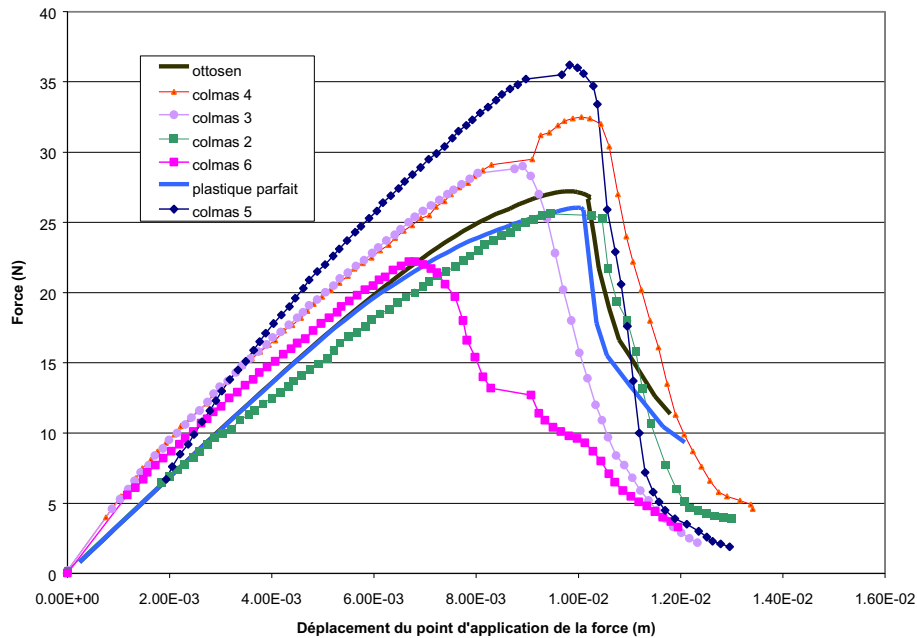


Fig. 4.14 : Comparaison entre numérique et expérimental pour le spécimen massif de polyuréthane.

Le modèle d'Ottosen semble donc être en mesure de retranscrire le phénomènes d'endommagement en avant du fond de fissure dans certains adhésifs quasi fragiles. Il reste toutefois à appliquer ce type de modèle aux assemblages bois collés.

3. Assemblages Bois Collés :

L'objectif de cette partie est d'appliquer ce modèle aux joints de colle inclus dans un assemblage tel que ceux que nous avons étudiés expérimentalement. Ainsi, nous n'appliquerons ces simulations qu'aux assemblages polyuréthane puisque c'est le seul adhésif pour lequel nous avons déterminé les caractéristiques à la rupture nécessaires à l'application du modèle. Nous avons de plus observé expérimentalement l'importance des défauts sur le type de propagation lors de la rupture. Ainsi, une étude préalable a été menée dans le domaine élastique linéaire pour quantifier numériquement l'influence de ces défauts sur la propagation de la fissure en fonction du type de colle et de sollicitation.

3.1. Influence des défauts sur la rupture des assemblages collés ; hypothèses des milieux élastiques linéaires.

Différentes observations sur la propagation de la fissure ont pu être réalisées expérimentalement à l'aide du procédé d'acquisition d'images. L'une des conclusions de ces observations est que lors de la sollicitation de cisaillement, l'endommagement du joint de colle était réalisé principalement en Mode II mais que la propagation de la fissure se faisait en mode mixte d'ouverture et de cisaillement. Il est bien évident que tout défaut à l'intérieur du joint de colle influe sur le mode de propagation de la fissure. Par contre, quelle est l'influence de ce défaut et surtout quel type de défaut provoque un changement de mode de propagation ? Il est bien évident que nous n'avons pas passé en revue tous les types de défauts mais seulement ceux susceptibles d'intervenir dans nos différentes configurations expérimentales, et plus particulièrement dans l'initiation de la fissuration. La porosité observée lors de l'étude fractographique n'a pas été modélisée non plus simplement à cause du fait qu'il fallait donner à cette porosité incluse dans le joint d'autres propriétés mécaniques. Ces simulations ont été réalisées sur des joints de 0.5 mm d'épaisseur et les calculs portent sur des fissures droites plus ou moins proches de l'interface inférieure ou orientées selon des angles différents. Ainsi, les défauts étudiés sont les suivants :

- fissure droite située à 0.2 mm de l'interface inférieure
- fissure droite située à 0.15 mm de l'interface inférieure
- fissure droite située à 0.125 mm de l'interface inférieure
- fissure située à 0.15 mm de l'interface inférieure et orientée de 15°
- fissure située à 0.15 mm de l'interface inférieure et orientée de 30°

Tous ces cas apparaissent sous sollicitation d'ouverture sur la figure suivante :

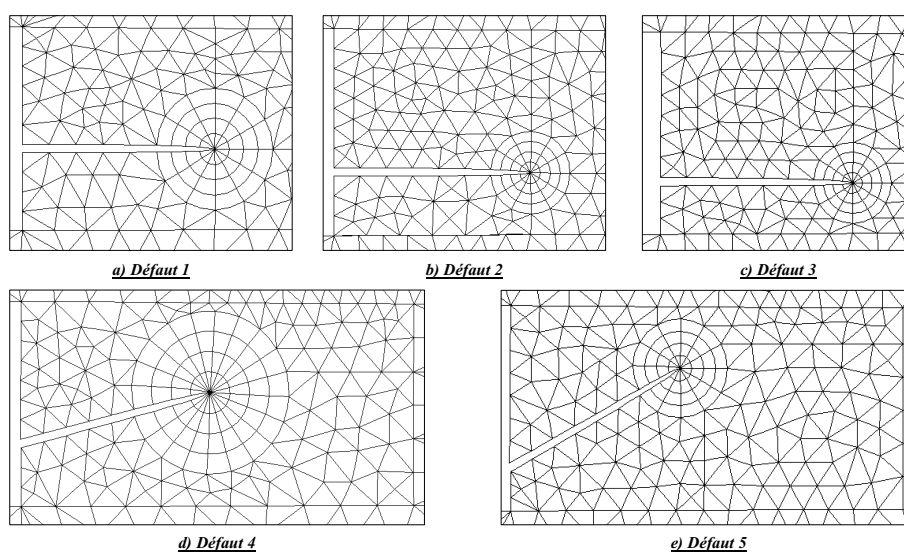


Fig. 4.15 : Défauts intervenant dans la fissuration des assemblages collés.

3.1.1. Sollicitation de Mode I

Tous les résultats des assemblages collés sollicités en ouverture par deux forces ponctuelles de 100 N appliquées sur chacun des bras de l'éprouvette apparaissent dans le tableau suivant (tableau 4.1). On peut souligner à ce titre que chaque défaut d'initiation est répertorié en fonction de l'ordonnée de la fissure par rapport à l'interface inférieure et par son inclinaison. A titre de comparaison, le cas d'une fissure droite sur la fibre neutre de l'éprouvette est lui aussi traité. Les calculs effectués sont les facteurs d'intensité de contrainte en ouverture et cisaillement (exprimés en $MPa.\sqrt{m}$) mais aussi l'angle de bifurcation possible de la fissure. Cet angle est déterminé selon la contrainte d'ouverture maximale $\sigma_{\theta\theta}$ et est exprimé par rapport au repère local, c'est à dire l'axe de la fissure.

Type de fissure modélisé (ordonnée et direction)	Adhésif polyuréthane			Adhésif résorcine		
	KI	KII	θ (°)	KI	KII	θ (°)
0.25 mm , droite	6.13E-02	0	0	0.305	0	0
0.2 mm , droite	6.07E-02	1.39E-03	2.63	0.269	1.48E-04	0
0.15 mm , droite	5.77E-02	3.27E-03	6.45	0.254	1.50E-03	0.68
0.125 mm , droite	6.04E-02	3.88E-03	7.28	0.267	6.01E-04	0.26
0.15 mm , inclinée de 15°	5.85E-02	1.14E-02	-20.65	0.262	3.71E-02	-15.5
0.15 mm , inclinée de 30°	5.09E-02	2.14E-02	-36.4	0.241	6.72E-02	-27.6

Tableau 4.1 : Influence de l'initiation de la fissure sur la propagation en Mode I

3.1.1.1. Adhésif résorcine :

Dans le cas de la sollicitation d'ouverture, l'adhésif résorcine apparaît peu sensible à la présence des défauts simulés dans nos calculs. Même si l'importance de K_{II} croît lorsque la fissure se rapproche de l'interface, elle reste négligeable par rapport à K_I et n'entraîne pas de modification notable sur l'angle de bifurcation de la fissure qui semble vouloir s'amorcer selon l'axe de la fissure. On peut toutefois souligner dans le cas des fissures orientées, la déviation semble plus importante mais la propagation d'ouverture est prédominante (rapport 4 entre K_I et K_{II}).

3.1.1.2. Adhésif polyuréthane :

Le cas de l'adhésif polyuréthane est un peu différent du précédent. En effet, on peut observer dès les premières simulations la plus forte sensibilité de cet adhésif tout d'abord à la position de la fissure puis à son orientation. Cette sensibilité se traduit par un angle de déviation de la fissure plus sensible à ces défauts répercutant un rapport K_I/K_{II} qui varie plus rapidement que dans la partie précédente (égal à 2 dans le dernier cas).

3.1.2. Sollicitation de Mode II

La force appliquée est maintenant une force ponctuelle d'intensité 2000 N sollicitant le spécimen collé en flexion 3 points. Les résultats concernant toutes les configurations testées apparaissent dans le tableau 4.2.

Type de fissure modélisé (ordonnée et direction)	Adhésif polyuréthane			Adhésif résorcine		
	K_I	K_{II}	θ (°)	K_I	K_{II}	θ (°)
0.25 mm , droite	5.73E-03	0.229	-70	9.35E-04	-0.928	-70
0.2 mm , droite	2.76E-02	-0.206	68	0.139	-0.82	67.3
0.15 mm , droite	2.99E-02	-0.198	67.7	0.149	-0.786	66.9
0.125 mm , droite	1.75E-02	-0.198	68.8	0.111	-0.784	67.8
0.15 mm , inclinée de 15°	0.109	-0.183	59.6	0.487	-0.735	58.5
0.15 mm , inclinée de 30°	0.167	-0.12	47.5	0.755	-0.517	46.6

Tableau 4.2 : Influence de l'initiation de la fissure sur la propagation en Mode II

3.1.2.1. Adhésif résorcine :

L'évolution de la sensibilité vis à vis des défauts du joint de colle est différente pour ce type de sollicitation. Hormis dans le cas « idéal » où on peut observer un mode II pur (rapport 1000 entre K_I et K_{II}), le rapprochement de la fissure vers l'interface inférieure induit une forte augmentation du K_I et une légère diminution du K_{II} . Dans le cas des fissures inclinées, cette tendance est encore accrue pour aboutir dans le dernier cas à un K_I supérieur au K_{II} . La propagation de la fissure se produit alors principalement en ouverture. On peut noter la valeur de l'angle de bifurcation par rapport au repère local qui évolue peu et qui indique une propagation probable fortement orientée vers l'interface supérieure. La valeur de l'angle de bifurcation pour le cas idéal semble annoncer, quant à elle, un possible amorçage de la fissure orienté vers l'interface inférieure.

3.1.2.2. Adhésif polyuréthane :

On peut observer la même tendance pour l'adhésif polyuréthane en soulignant toutefois que les rapports entre K_I et K_{II} semblent un peu plus faibles que pour l'adhésif résorcine. Les observations expérimentales sont confirmées par les simulations par le fait que la tendance de propagation d'une fissure est de se rapprocher de l'une ou l'autre des interfaces et que dans le cas où une micro fissure orientée apparaît, celle-ci induit une propagation majoritairement en ouverture.

Cette tendance d'ouverture de la fissure apparaît de façon suffisamment claire sur la figure suivante montrant le maillage déformé du spécimen collé dont l'entaille initiale du joint est prolongée par une fissure orientée à 30°.

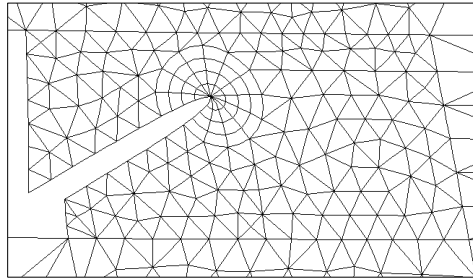


Fig. 4.16 : Maillage déformé d'un joint polyuréthane à fissure orientée sollicité en cisaillement.

Dans le but de poursuivre cette étude de sensibilité vis à vis des défauts potentiellement présents dans le joint de colle, un réseau de trois micro fissures orientées à 30° a été modélisé dans un joint de colle épais de 0.5 mm pour chacun des adhésifs étudiés.

3.1.3. Réseau de micro fissures dans le joint de colle

Cette modélisation a été réalisée dans le but d'observer les interactions entre ces trois micro fissures selon l'adhésif et le mode de sollicitation. Les facteurs d'intensité de contrainte sont comme auparavant exprimés en $MPa\cdot\sqrt{m}$ et les angles de déviation sont exprimés par rapport au repère local de la fissure. Le réseau décrit auparavant apparaît figure 4.17.

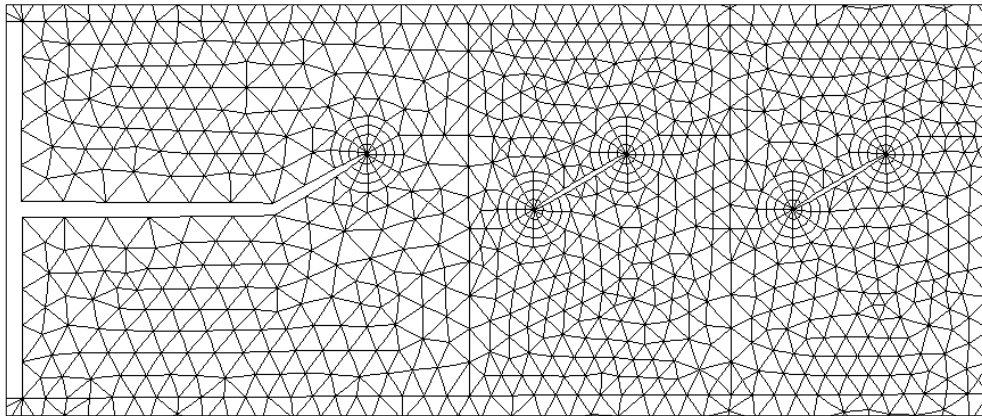


Fig. 4.17 : Réseau de micro fissures orientées à 30° dans un joint de 0.5 mm d'épaisseur.

Chaque configuration d'assemblage a été testée en ouverture sous un chargement de deux forces distinctes d'intensité 100 N ou en flexion 3 points sous un chargement de 2000 N.

3.1.3.1. Sollicitation de Mode I :

Les résultats des calculs sont inscrits dans le tableau 4.3 et chaque étape comprend le calcul des facteurs d'intensité de contrainte en Mode I et II et l'angle de déviation à chacune des pointes de fissure modélisées.

Micro fissure (numéro, partie sup. ou inf.)	Adhésif polyuréthane			Adhésif résorcine		
	K _I	K _{II}	θ (°)	K _I	K _{II}	θ (°)
1ère micro fissure, partie sup.	5.36E-02	2.17E-02	-35.62	0.251	6.99E-02	-27.58
2ème micro fissure, partie inf.	4.21E-02	1.16E-02	-27.34	0.13	6.11E-03	-5.38
2ème micro fissure, partie sup.	4.03E-02	1.14E-02	-27.85	0.113	5.57E-03	-5.59
3ème micro fissure, partie inf.	3.56E-02	9.78E-03	-27.26	8.34E-02	1.04E-03	-1.43
3ème micro fissure, partie sup.	3.40E-02	9.52E-03	-27.6	7.59E-02	5.77E-04	-0.87

Tableau 4.3 : Calcul des facteurs d'intensité de contrainte pour chacune des micro fissures sous sollicitation d'ouverture.

Les résultats des simulations montrent un comportement distinct des deux types d'adhésifs. En effet, l'adhésif le plus souple permet, pour un même niveau de chargement, une sollicitation plus forte du joint et des micro fissures situées en amont. Celles ci semblent se développer contrairement à celles incluses dans l'adhésif résorcine. On peut observer l'évolution des K_I entre les micro fissures pour chaque adhésif ; dans le cas du polyuréthane, le facteur d'intensité de contrainte en ouverture subit une décroissance progressive plus on s'éloigne du fond d'entaille alors que pour l'adhésif résorcine, la décroissance est beaucoup plus brutale (facteur 2 entre les deux premières zones rayonnantes) du fait de sa plus grande rigidité. Pour chacune des micro fissures, le rapport K_I/ K_{II} reste à peu près constant (sauf pour la première où le cisaillement intervient un peu plus) alors que dans le cas de la résorcine, il passe de 3.6 à 131. Pour ce cas de charge, les micro fissures sont surtout sollicitées en ouverture dans le cas de l'adhésif résorcine. On n'observe pas de différence significative au niveau des angles de déviation de la fissure, les valeurs calculées étant relativement proches de celles précédemment énoncées pour le même type de défaut dans le tableau 4.1. La présence des micro fissures ne semble pas influencer les résultats précédents dans le cas de l'adhésif résorcine pour ce cas de charge, contrairement à l'adhésif polyuréthane qui, bien plus souple, subit une déformation plus importante qui se répercute sur les fissures suivantes.

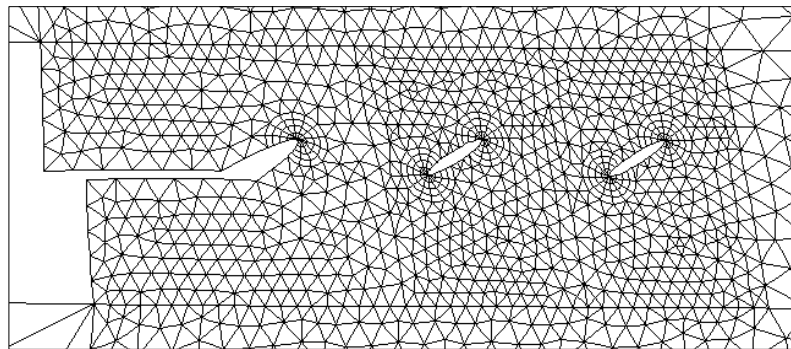
3.1.3.2. Sollicitation de Mode II :

Les résultats des calculs effectués en flexion 3 points apparaissent dans le tableau 4.4.

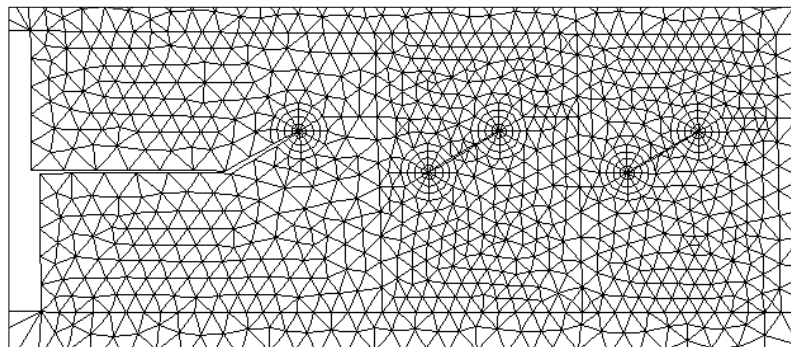
Micro fissure (numéro, partie sup. ou inf.)	Adhésif polyuréthane			Adhésif résorcine		
	KI	KII	θ (°)	KI	KII	θ (°)
1ère micro fissure, partie sup.	0.175	-0.128	47.8	0.792	-0.548	46.8
2ème micro fissure, partie inf.	0.13	-4.99E-02	34.4	0.471	-0.179	34.2
2ème micro fissure, partie sup.	0.125	-5.15E-02	35.9	0.436	-0.193	37.5
3ème micro fissure, partie inf.	0.116	-4.76E-02	35.9	0.356	-0.152	36.9
3ème micro fissure, partie sup.	0.115	-4.93E-02	36.9	0.341	-0.163	39.2

Tableau 4.4 : Calcul des facteurs d'intensité de contrainte pour chacune des micro fissures sous sollicitation de flexion 3 points.

Les critères locaux montrent une sollicitation principalement en ouverture des pointes de chaque micro fissure. La différence de déformation entre adhésifs apparaît de façon flagrante sur la figure 4.18.



a) adhésif polyuréthane



b) adhésif résorcine

Fig. 4.19 : Sollicitation de cisaillement du réseau de micro fissures pour chaque type d'adhésif.

Cependant, contrairement au cas précédent, les rapports entre K_I et K_{II} sont très voisins pour chaque micro fissure pour les deux adhésifs, et restent à peu près constants, sauf pour la première où le cisaillement est légèrement plus élevé.

Ainsi, autant le premier cas de charge laisse apparaître une différence entre les deux adhésifs, autant la sollicitation de cisaillement ne révèle pas de comportement distinct, même si les apparences données par la figure 4.19 peuvent s'avérer trompeuses. Cependant, les observations réalisées expérimentalement sont confirmées par ces simulations dans la mesure où, si des micro fissures orientées apparaissent en avant du fond de fissure réel, la propagation va certainement s'effectuer principalement sous un mode d'ouverture.

Le comportement à rupture de l'assemblage dépendra donc en grande partie du développement de ces micro fissures en avant du fond de fissure et donc de la sensibilité de l'adhésif vis à vis de ce type de défaut.

3.2. Application du modèle d'Ottosen au joint polyuréthane sollicité en Mode I.

L'objectif de ce travail est de voir si l'application d'un modèle non linéaire uniquement au joint collé suffit à décrire le comportement de l'assemblage, au moins dans la partie non linéaire de la courbe force déplacement avant propagation de la fissure. Comme déjà souligné auparavant, la plus grande difficulté numérique vient du fait que l'épaisseur du joint est très faible devant celle des substrats. Enfin, ce type de simulations sera uniquement réalisé dans le cas des assemblages polyuréthane, vu que seule cette configuration nous a permis d'atteindre une rupture cohésive, c'est à dire principalement dirigée par le joint de colle. Les calculs ont été réalisés pour quatre épaisseurs de joint (de 0.25 à 1 mm) en intégrant au modèle les paramètres déterminés pour les spécimens massifs de colle qui sont :

- module d'Young : 100 MPa
- coefficient de Poisson : 0.4
- limite en traction : 10 MPa
- G_f : 950 J/m²
- G_s : 0.2 MPa

Le spécimen collé sollicité en ouverture apparaît sur la figure suivante :

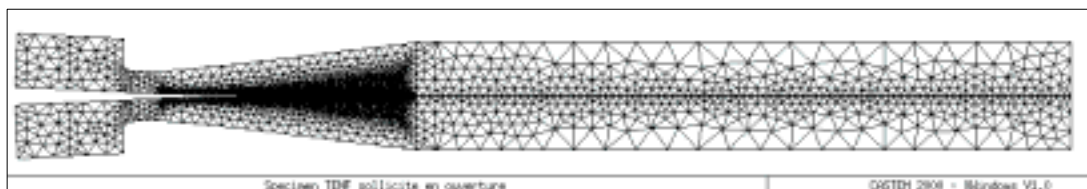


Fig. 4.20 : Sollicitation de Mode I appliquée au spécimen bois collé (ouverture de 6 mm de l'entaille pour un joint de 0.5 mm d'épaisseur)

Les différents calculs menés sur ce type de spécimen ont été réalisés dans le but :

- d'observer l'influence de l'épaisseur du joint sur la taille et la localisation de l'endommagement pour un même chargement.
- d'observer pour une épaisseur de joint donnée l'évolution de l'état de contrainte dans le joint au cours du chargement.
- d'expliquer la déviation quasi systématique de la fissure dans le bois ou l'interphase.

3.2.1. Influence de l'épaisseur du joint sur la localisation de l'endommagement.

Expérimentalement, la vitesse de chargement appliquée au spécimen permet d'atteindre la rupture en 3 minutes environ. Le même chargement est appliqué dans nos simulations pour chacune des épaisseurs de joint afin d'observer l'influence de l'épaisseur du joint sur la valeur du G_I calculé pour une même sollicitation et la répartition des points endommagés en avant du fond de fissure. On obtient les résultats suivants :

<i>Epaisseur du joint de colle</i>	<i>Gf calculé (J/m^2)</i>
<i>0.25 mm</i>	<i>147.9</i>
<i>0.5 mm</i>	<i>243.3</i>
<i>0.75 mm</i>	<i>297.1</i>
<i>1 mm</i>	<i>270.7</i>

Tableau 4.5 : Variation du G_I calculé en fonction de l'épaisseur du joint

On peut observer que l'énergie de rupture calculée numériquement augmente avec l'épaisseur du joint jusqu'à une épaisseur de 0.75 mm puis semble ensuite légèrement décroître. Les ordres de grandeurs correspondent aux résultats des assemblages épicea collés, même si la fissuration cohésive totale n'a jamais été atteinte. Ceci peut s'expliquer par l'accroissement de complaisance avec l'épaisseur de joint en partie due à la souplesse de l'adhésif.

Concernant la localisation de l'endommagement en avant du fond de fissure, les simulations réalisées sur les quatre épaisseurs de joint ne permettent malheureusement pas d'observer d'évolution flagrante de la localisation des déformations anélastiques avec l'accroissement de l'épaisseur. Vue la forte singularité de contraintes induite par la fissure, la localisation de l'endommagement est concentrée en pointe de fissure, comme le montre la figure 4.21. Cet endommagement ne subit apparemment pas d'influence marquée de la part des interfaces même si leur présence permet de le canaliser du fait des hypothèses de calcul posées.

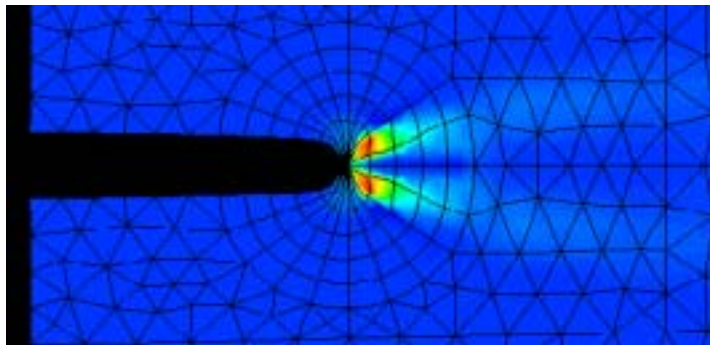
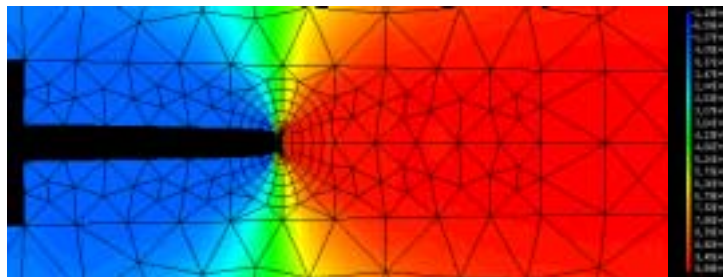
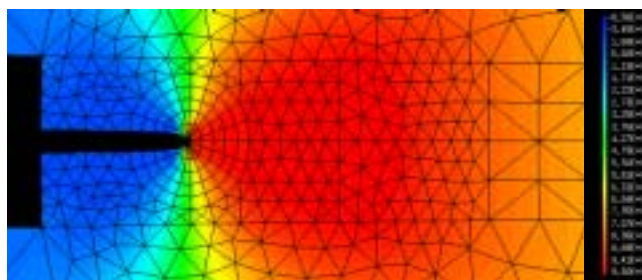


Fig. 4.21 : Localisation des déformations anélastiques en avant du fond de fissure pour un joint d'épaisseur 0.5 mm.

Par contre, l'observation des états de contrainte dans le joint pour un même chargement (figure 4.22) montre une forme de la zone la plus sollicitée du joint différente selon l'épaisseur et canalisée par les deux interfaces.



a) joint de 0.25 mm



b) joint de 0.5 mm

Fig. 4.22 : Répartition des contraintes σ_{yy} en avant du fond de fissure à chargement identique pour deux épaisseurs de joints distinctes.

La zone du joint la plus sollicitée est bien distincte pour les deux épaisseurs étudiées. Dans le cas du joint le plus fin, la zone la plus sollicitée apparaît bien en avant du fond de fissure du fait de l'endommagement présent à la pointe du défaut. Dans le cas du joint de 0.5

mm, le « bulbe » de contrainte maximale apparaît en pointe de fissure et se développe jusqu'aux deux interfaces. La présence d'une surcontrainte suivant x dans le bois près de l'interface est liée à la forte valeur du module de Young du bois dans cette direction. Celle-ci atteint des valeurs élevées jouant certainement un rôle prédominant dans la déviation de la fissure vers le substrat.

3.2.2. Evolution de l'endommagement dans le joint au cours du chargement.

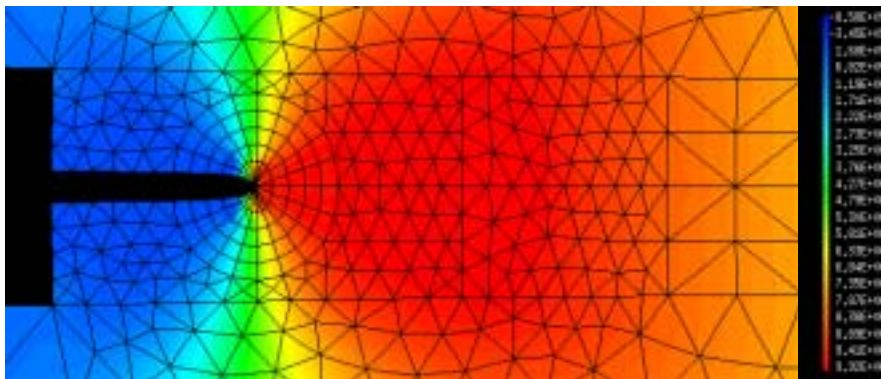
Ces simulations ont été menées sur un joint d'épaisseur 0.5 mm à différents stades de chargement afin d'observer l'évolution de l'état de contraintes dans le joint et par conséquent, d'en déduire la localisation et la taille des zones micro fissurées par le modèle d'Ottosen.

La figure 4.23 montre l'évolution sous chargement croissant de la répartition des contraintes d'ouverture σ_{yy} sous une ouverture d'entaille de 4.2, 7 puis 8 mm. Le phénomène de distorsion des éléments souligné précédemment apparaît de façon flagrante en fond de fissure mais la rupture apparente des éléments n'est pas réelle et correspond aux limites de résolution graphique. Les observations que l'on peut faire sur cette figure sont les suivantes :

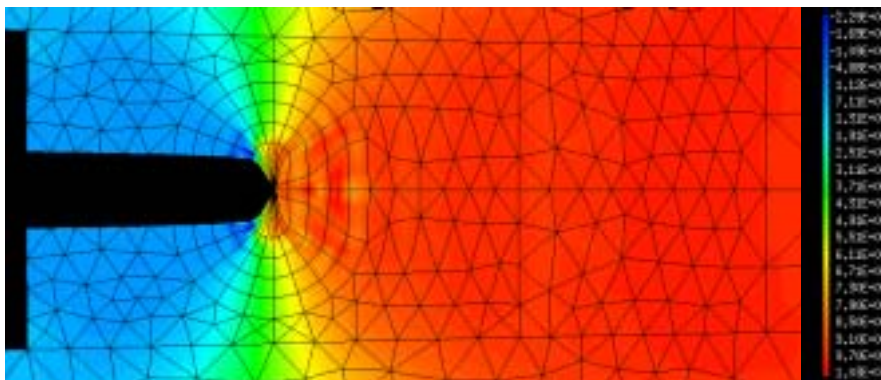
- l'intensité des contraintes dans le joint n'évolue pas avec le chargement ; le caractère adoucissant du modèle d'Ottosen entraîne l'apparition en avant du fond de fissure d'une zone endommagée et micro fissurée dans laquelle on peut observer une diminution des σ_{yy} . Ainsi, si on calcule l'intégrale de Rice sur la 4^{ème} couronne à partir du fond de fissure, la valeur va croître jusqu'au cas de charge a) puis décroître ensuite pour les deux autres cas de charge à cause de la relaxation des contraintes dans la zone endommagée.

- la forme et la position de la zone la plus contrainte subissent une modification au cours du chargement dans la mesure où le « bulbe » de répartition des contraintes σ_{yy} maximales du chargement a) n'apparaît plus de façon aussi flagrante dans les autres cas. La zone endommagée croît avec le chargement et l'évolution de l'état de contraintes dans la zone rayonnante est assez révélateurs des mécanismes du modèle.

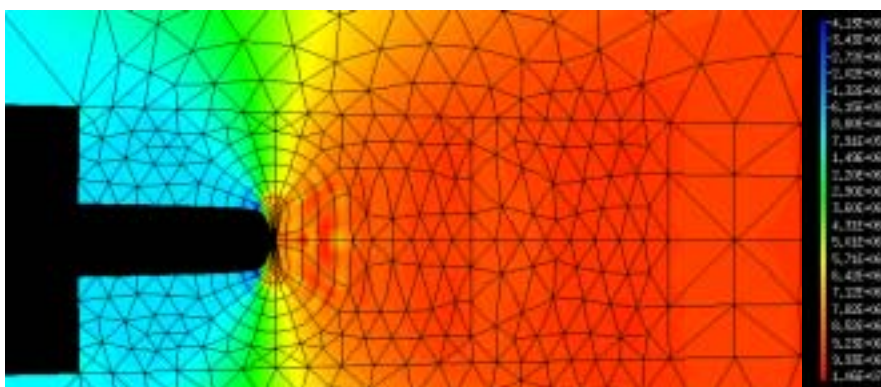
La figure 4.24 montre l'évolution des contraintes le long des couronnes de la zone rayonnante en coordonnées polaires pour ces mêmes cas de charge. On peut observer une évolution flagrante de la valeur de ces contraintes avec l'endommagement en avant du fond de fissure. En effet, les contraintes le long de la couronne 1 subissent de profondes modifications entre les deux premiers cas de charge. On peut aussi observer que les couronnes ne sont pas sollicitées selon leur ordre dans la zone rayonnante puisque la couronne 4 subit une décroissance des contraintes alors que les deux précédentes ne les subissent pas de façon aussi marquée. Les deux graphiques concernant le dernier chargement montrent une annulation progressive des deux contraintes étudiées synonyme de rupture de l'adhésif dans la zone considérée.



a) Cas de charge n°1:



b) Cas de charge n°2:



c) Cas de charge n°3:

Fig. 4.23 : Chargement progressif d'un joint d'épaisseur 0.5 mm : évolution des contraintes σ_{yy} en avant du fond de fissure (exprimées en Pa)

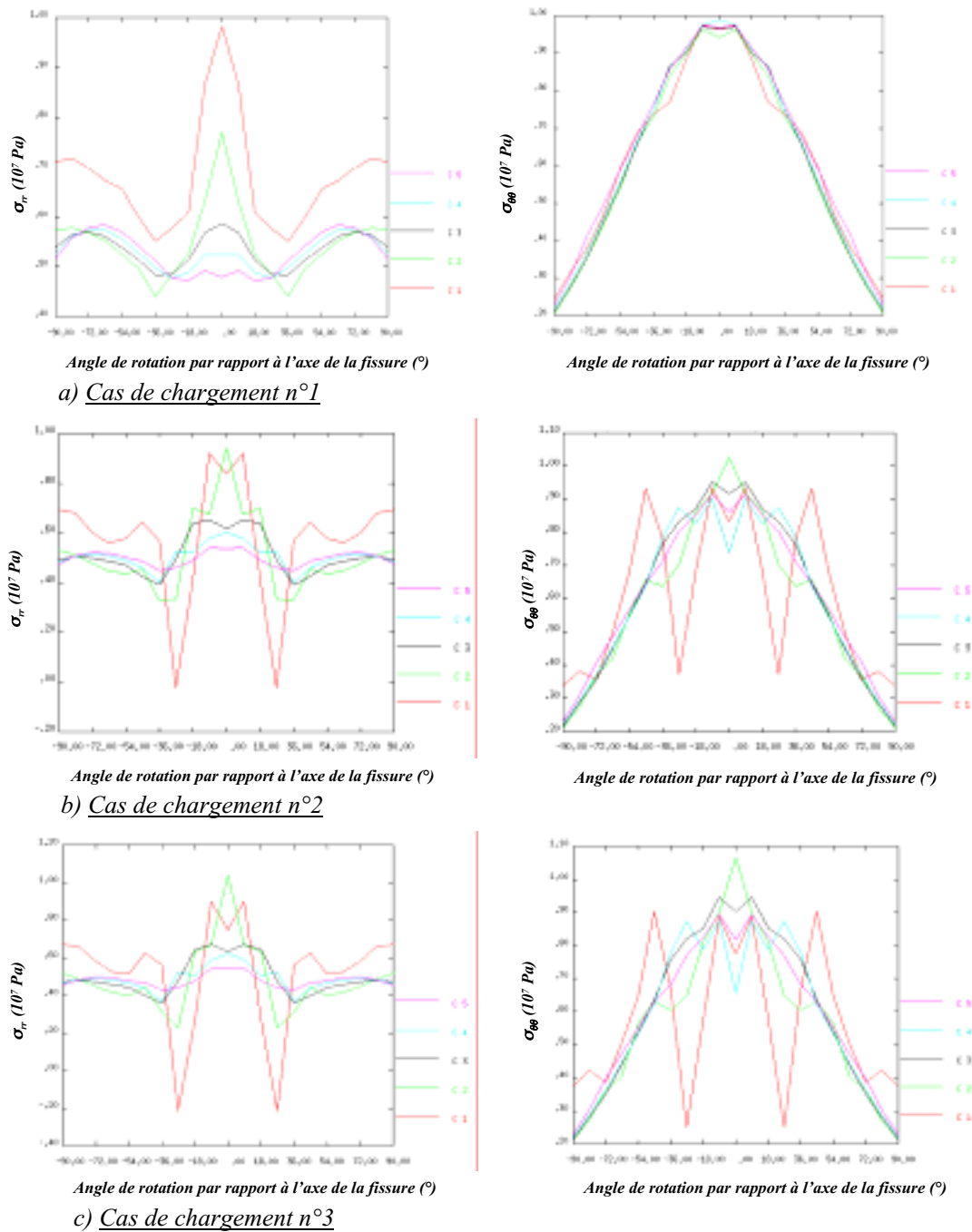


Fig. 4.24 : Evolution des contraintes σ_{rr} et $\sigma_{\theta\theta}$ dans la zone rayonnante en fonction du chargement et de l'endommagement du joint d'épaisseur 0.5 mm.

L'application du modèle d'Ottosen au joint de colle sollicité en ouverture permet d'obtenir un endommagement du joint correspondant a priori aux phénomènes physiques se produisant dans l'adhésif. Cependant, la non linéarité de comportement induite par cet

endommagement progressif ne permet malheureusement pas d'obtenir de courbe force déplacement semblable à l'expérimental du fait du comportement purement élastique des substrats dans les simulations. L'intensité des contraintes dans le bois aux interfaces induit la nécessité d'introduire un modèle d'endommagement dans cette région (qui correspond à l'interphase identifiée expérimentalement). Ainsi, la non linéarité de comportement obtenue par l'association de ces deux modèles correspondrait certainement plus précisément au comportement réel de l'assemblage sous ce type de sollicitation. Une difficulté persiste toutefois dans la détermination des propriétés mécaniques de ce mélange bois colle afin de les intégrer au modèle. Les mêmes simulations ont été menées sur les assemblages sollicités en flexion 3 points.

3.3. Application du modèle d'Ottosen au joint polyuréthane sollicité en Mode II.

Le même type de calcul que pour la sollicitation d'ouverture va être réalisé dans le cas de la flexion 3 points. Cependant, ce type de chargement induit des complications au niveau des lèvres de la fissure et de l'entaille, en particulier par des phénomènes de friction. Ce frottement au niveau de l'entaille est supprimé expérimentalement par la présence de cales en PTFE qui permettent le cisaillement en éliminant tout frottement. Numériquement, ces conditions sont obtenues en imposant aux lèvres de l'entaille puis de la fissure des conditions de non pénétration. Les paramètres introduits dans le modèle pour ce type de sollicitation sont les suivants :

- module d'Young : 100 MPa
- coefficient de Poisson : 0.4
- limite en traction : 10 MPa
- G_f : 1500 J/m²
- G_s : 0.2 MPa

Le seul changement intervient au niveau de G_f pour lequel une valeur supérieure est attribuée du fait de la sollicitation de cisaillement, comme nous avons pu le remarquer expérimentalement. Le spécimen sollicité en flexion 3 points apparaît dans le cas d'un déplacement de 5 mm du point d'application de la force sur la figure suivante.

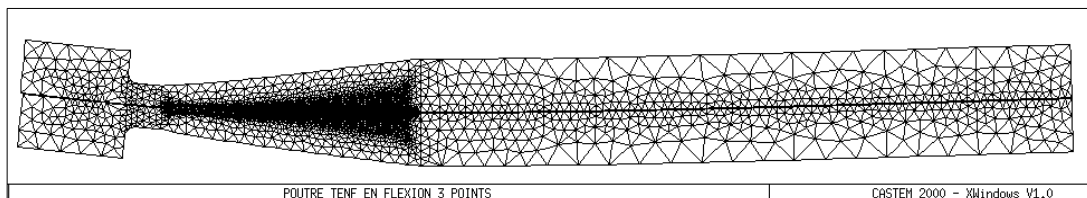
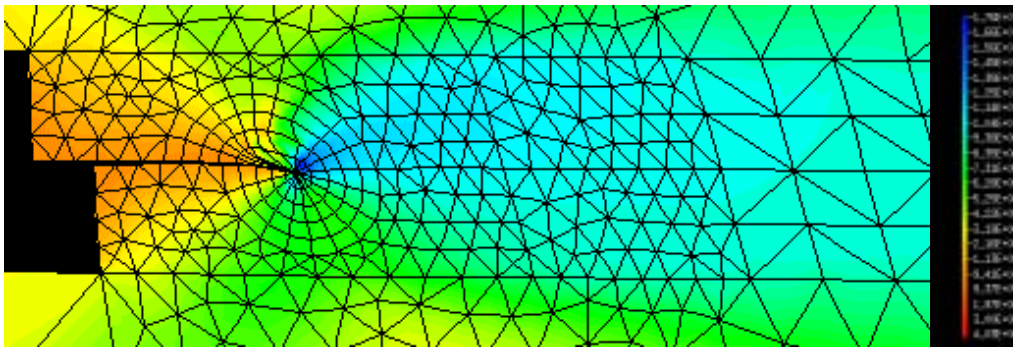
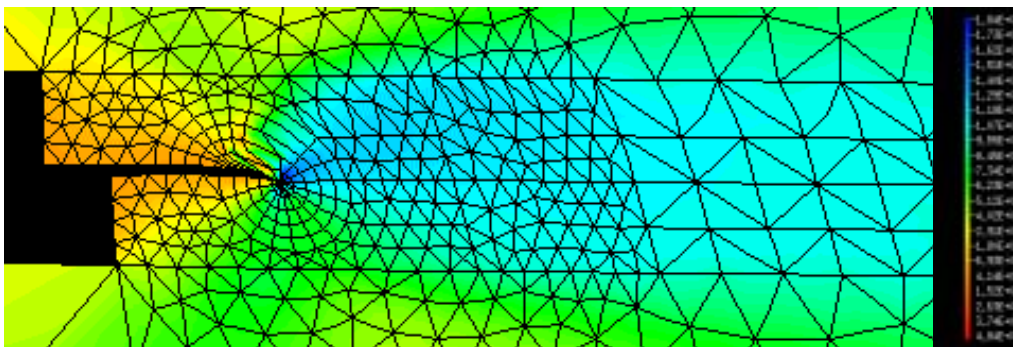


Figure 4.25 : Flexion 3 points appliquée à un spécimen TENF collé à joint de 0.5 mm d'épaisseur.

La sensibilité du modèle par rapport aux paramètres est accentuée par la sollicitation et plus particulièrement par rapport au paramètre G_s caractérisant la perte de rigidité en cisaillement due à la propagation de micro fissure. De plus, nous avons déjà constaté expérimentalement le fort niveau de déformation atteint par l'adhésif avant fissuration. De ce fait, la distorsion des éléments présents en fond de fissure (plus particulièrement dans la zone rayonnante) déjà observée en ouverture est encore accentuée en cisaillement. Cependant, cette distorsion se révélera être un précieux indicateur de la direction privilégiée de propagation de la fissure puisque la procédure utilisée auparavant n'était valable qu'en régime élastique linéaire. La figure 4.26 montre l'évolution de la répartition des contraintes de cisaillement pour deux chargements distincts, le premier correspondant à un déplacement de la force de 3.5 mm et le second à un déplacement de 4.2 mm synonyme de rupture d'après les résultats expérimentaux.



a) Cas de charge n°1

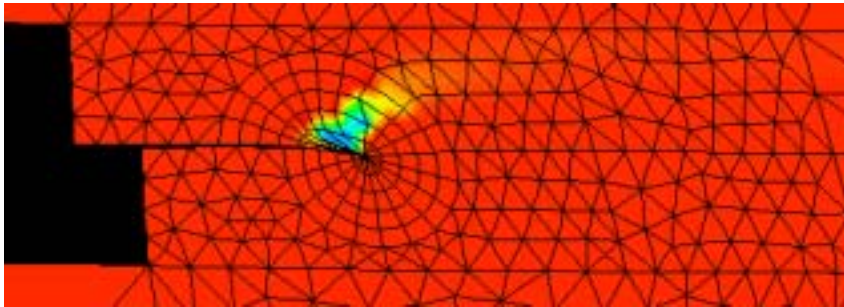


b) Cas de charge n°2

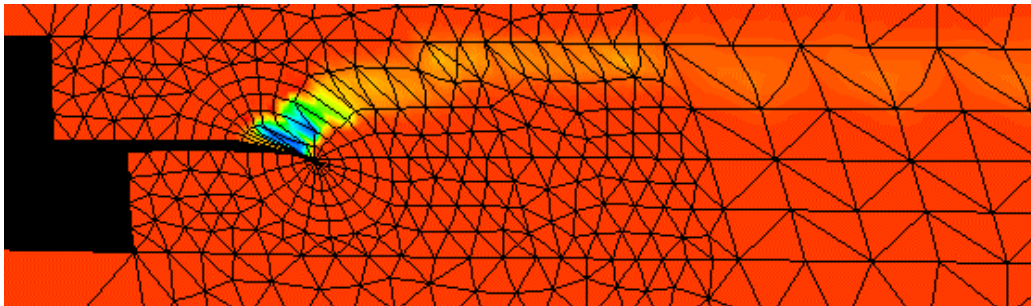
Fig. 4.26 : Evolution des contraintes de cisaillement avec le chargement en avant du fond de fissure dans un joint collé de 0.5 mm sollicité flexion 3 points

On peut observer sur cette figure la distorsion des éléments de la partie supérieure de la couronne qui évolue avec le chargement. De plus, entre les deux cas de charge, l'ouverture de

la fissure semble s'accroître confirmant les observations expérimentales. Enfin, le cisaillement du joint est important mais la contrainte est négative à cause de la forte intensité de la flexion agissant sur le spécimen. La figure suivante montre l'évolution des déformations anélastiques de cisaillement pour les deux mêmes cas de charge.



a) Cas de charge n°1



b) Cas de charge n°2

Fig. 4.27 : Evolution des déformations anélastiques avec le chargement dans un joint de 0.5 mm d'épaisseur sollicité en cisaillement.

On peut observer que les déformations anélastiques dans le joint sont concentrées dans la partie supérieure de la zone rayonnante au départ puis bifurquent rapidement vers l'interface supérieure de l'assemblage. Ces simulations sont en parfait accord avec les résultats expérimentaux qui montrent une déviation quasi systématique de la fissure vers cette interface. Dans le cas de l'adhésif polyuréthane, s'il existe une zone de faible cohésion dans cette zone, la fissure s'y développera ou bifurquera dans le bois. Dans le cas contraire ou si le fil du bois ne permet pas cette bifurcation, on pourra alors se trouver dans le cas d'une propagation dans la masse de l'adhésif. Si on poursuit le chargement jusqu'à atteindre une très forte distorsion des éléments, on peut noter que le GIIf calculé atteint un maximum puis décroît ensuite très rapidement comme dans le cas d'un endommagement important du joint avant rupture. Vue la distorsion des couronnes de la zone rayonnante, l'évolution des contraintes le long de tels contours n'apporte pas de données supplémentaires surtout que dans ce cas la zone la plus sollicitée apparaît de façon assez explicite.

4. Conclusion :

La partie de modélisation par éléments finis apporte des éléments nouveaux dans la compréhension des phénomènes qui peuvent se produire dans le joint pendant la sollicitation à laquelle il est soumis. En premier lieu, l'application d'un modèle d'endommagement tel que le modèle d'Ottosen permet de retranscrire de façon plus que satisfaisante le comportement à la rupture d'éprouvette entaillée de colle massive sollicitées en flexion 3 points. En effet, les résultats de nos simulations correspondent à la moyenne de nos courbes expérimentales et surtout, contrairement à un modèle plastique parfait, permettent de décrire l'endommagement en fond de fissure et de prévoir la direction de propagation. De plus, l'hypothèse faite concernant la zone endommagée et plus particulièrement l'atteinte d'une longueur critique au moment de la propagation semble appuyée par ces simulations dans la mesure où les domaines post pic de l'expérimental et du calcul évoluent selon la même tendance. Ainsi, dans nos simulations, si la longueur de la zone endommagée évoluait avec la longueur de fissure, la pente du domaine post pic divergerait fortement de la courbe expérimentale.

Les calculs réalisés dans le cas des assemblages collés s'avèrent insuffisants pour retranscrire le comportement réel lors d'un essai, que ce soit en traction ou en cisaillement. Cependant, les calculs de Mode I montrent une tendance satisfaisante dans la mesure où il existe bien une zone endommagée dont la taille et la position varient avec le chargement. Cet endommagement est, de plus, variable en avant du fond de fissure, comme l'ont montré les courbes d'évolution des contraintes en coordonnées polaires le long des couronnes de la zone rayonnante. Malheureusement, la non linéarité de comportement obtenue est insuffisante vue la très forte localisation de l'endommagement et la faible épaisseur du joint. La répartition des contraintes dans les substrats, dans une zone mitoyenne aux interfaces, laisse présager un endommagement du bois dans cette région dont il faudrait tenir compte. Malheureusement, cette zone correspond à l'interphase, composée de bois dont la porosité naturelle abrite de la colle polymérisée dont les propriétés mécaniques sont, à l'heure actuelle, peu accessibles. Enfin, les simulations de flexion trois points permettent de confirmer le fort niveau de cisaillement auquel l'adhésif peut être soumis et la bifurcation systématique de la fissure vers l'interface supérieure. Des essais supplémentaires seraient certainement nécessaires sur l'adhésif massif sollicité en cisaillement afin d'identifier les paramètres du modèle d'Ottosen.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été réalisé dans le but d'identifier les paramètres d'endommagement et de rupture d'un assemblage collé, dans le souci permanent d'appliquer toutes les méthodes utilisées au collage du bois. La quantité de paramètres intervenant dans les caractéristiques mécaniques d'un assemblage collé, joue un rôle décisif depuis sa mise en forme jusqu'à sa rupture et induit de grandes difficultés dans l'obtention de résultats fiables et surtout reproductibles. De plus, l'ajout d'un substrat orthotrope tel que le bois aux propriétés mécaniques naturellement dispersées, sensible aux défauts naturels et aux variations d'humidité complique singulièrement la reproductibilité des essais de rupture. L'objectif d'élaborer une méthode expérimentale de dimensionnement à la rupture des assemblages bois collés, puis de la modéliser par éléments finis, était certes ambitieux, mais la quantité et la diversité des résultats obtenus prouve la validité et l'intérêt de la démarche.

Ainsi, le premier chapitre de ce mémoire a été consacré à une étude systématique des techniques de dimensionnement des assemblages collés, sans aucune restriction vis à vis du substrat utilisé dans l'assemblage. Cette approche multi matériaux a permis de poser des bases indispensables à ce travail et surtout de fixer les limites d'application possible de ces techniques à l'étude du collage du bois. De plus, la connaissance des paramètres physico chimiques intervenant dans la qualité d'un collage est indispensable à la compréhension des phénomènes pouvant induire la rupture de l'assemblage. Par conséquent, le premier chapitre de ce mémoire correspond à la culture générale indispensable à tout mécanicien désireux d'étudier le comportement des assemblages collés. Le grand nombre de références apparaissant dans la bibliographie concernant ce chapitre témoigne des nombreux travaux déjà réalisés sur les assemblages collés. Cependant, ces approches classiques ne permettent pas, à mon sens, d'obtenir des résultats pleinement satisfaisants pour les assemblages bois collés. Il a été ainsi décidé de s'orienter vers une approche de dimensionnement par la Mécanique de la Rupture.

Après un nouvel état de l'art concernant les techniques de dimensionnement des assemblages collés par la Mécanique de la Rupture, un peu moins dense du fait du développement plus tardif de ce type d'approche, nous nous sommes orientés vers une approche non linéaire. Cette orientation a été définie à la fois par les caractéristiques mécaniques du substrat bois mais aussi des polymères utilisés comme adhésifs. De plus, nous avons décidé de concentrer nos efforts sur la rupture cohésive de l'assemblage car c'est la seule approche qui, d'après nous, permet d'appréhender le comportement mécanique de l'adhésif sous la forme d'un joint collé. Quand on connaît le nombre incroyable d'interactions entre le bois et l'adhésif, cette approche semble aller dans le bon sens. Malheureusement, l'état désertique de la bibliographie concernant cet aspect de la rupture des assemblages bois collés ne laissait rien présager de bon quant au choix de cette option. Il a donc été décidé de

développer un spécimen d'essai capable de nous permettre d'étudier ce type de rupture à la fois sous sollicitation d'ouverture et de cisaillement mais aussi capable de proposer une fissuration stable et contrôlée du spécimen. Les différentes prévisions et simulations ont permis dans un premier temps de définir la géométrie de l'éprouvette puis par la suite, d'envisager le comportement à la rupture des spécimens collés. Les résultats de ces simulations ont montré la sensibilité différente des deux adhésifs pressentis par rapport à la sollicitation imposée à l'assemblage.

Par conséquent, il a été décidé d'étudier deux types d'adhésifs dans la partie expérimentale ; un adhésif résorcine phénol formol couramment utilisé dans l'industrie du lamellé collé et un mastic polyuréthane beaucoup plus souple. Le choix de ces deux adhésifs a été guidé par le fait que l'adhésif polyuréthane, utilisé pour des joints plus épais, pouvait apporter une plus grande déformabilité au spécimen et par conséquent de meilleures performances. De plus, ses performances mécaniques un peu moins élevées laissent présager une fissuration cohésive plus systématiquement atteinte. Cette fissuration cohésive a tout d'abord été étudiée par photoélasticité pour les deux types de sollicitations. Dans les deux cas, la zone de perturbation des isochromes observées laisse penser qu'il existe en avant du fond de fissure un endommagement progressif de l'adhésif. L'évolution de cette zone perturbée avec le chargement puis la propagation de la fissure semble converger vers les données de la littérature concernant la rupture de matériaux quasi fragiles. Cependant, la zone de perturbations des franges inclut certainement cette zone endommagée mais en l'état actuel de nos connaissances, nous ne pouvons pas conclure sur sa longueur réelle. Nous nous sommes ensuite intéressés à la rupture cohésive des assemblages bois collés. Comme pressenti, l'adhésif polyuréthane permet d'étudier ce type de rupture mais seulement en cisaillement. Les théories de l'adhésion concernant la couche de faible cohésion de Bickermann ont été confirmées par nos observations expérimentales mettant en évidence deux types de rupture facilement dissociables tant par les énergies mises en jeu que par les faciès des surfaces fissurées. Par la suite, la mise en place du système d'acquisition d'images a permis de suivre l'évolution de l'endommagement en avant du fond de fissure à la périphérie du joint de colle. En plus des paramètres d'endommagement identifiés, cette étude a permis la mise en évidence d'une propagation de la fissure principalement sous un mode d'ouverture alors que la sollicitation imposée est en majorité du cisaillement. Enfin, l'étude plus systématiques du comportement des deux adhésifs sollicités en traction ou cisaillement pour 3 épaisseurs de joint chacun laisse apparaître une grande diversité (voire concurrence) entre différents types de ruptures. Il ne nous a malheureusement pas été possible de définir de critère pour chacune des ruptures observées tant les paramètres sont variables et dispersés. On peut cependant dire que l'objectif du formulateur de colle est fréquemment atteint dans la mesure où l'adhésif supporte en général la sollicitation imposée au détriment du bois dans lequel se produit la rupture. En revanche, dans le cas des spécimens fléchis, nous avons montré que la

rupture cohésive permettait d'atteindre non seulement une résistance plus importante de l'assemblage par rapport à la sollicitation (de l'ordre de 30%) mais aussi une rupture stable et contrôlée (alors que la rupture du substrat est assez souvent ... « explosive »). L'analyse fractographique a elle aussi permis la mise en évidence de paramètres d'endommagement tels que la micro fissuration, la création de micro vides dans l'adhésif polyuréthane et de mettre en évidence sa très forte sensibilité à une porosité de mise en forme. L'application de ce type d'adhésif doit être précédée d'un dégazage du mélange et si possible réalisée sous vide afin d'éviter ce phénomène. L'observation à très fort grossissement a aussi démontré une sensibilité différente des deux adhésifs par rapport à la sollicitation imposée. Enfin, l'analyse DSC des adhésifs prélevés sur des assemblages présentant des caractéristiques fortement différentes n'a pas révélé de différence de polymérisation et exclut par conséquent tout accident de polymérisation lors de la mise en forme de l'assemblage. Ces différences de caractéristiques mécaniques de l'assemblage sont peut être imputables à la présence de défauts, d'une zone de faible cohésion ou de décollement partiel.

Enfin, le dernier chapitre avait pour objectif de modéliser la rupture de ces assemblages collés. Le type de rupture que nous avons cherché à modéliser est celui que nous avons le mieux réussi à étudier, c'est à dire la rupture des assemblages polyuréthane. Le type de rupture observé sur les spécimens massifs de colle mais aussi sur les assemblages nous a conduit à utiliser un modèle non linéaire type Smeared Crack Approach. Si la corrélation entre numérique et expérimental dans le cas du spécimen massif de colle est acceptable, celle ci ne peut nous satisfaire dans le cas des assemblages collés. L'étude de la sensibilité aux défauts permet la compréhension de certains phénomènes locaux en fond de fissure et expliquent bon nombre d'observations expérimentales mais l'application du modèle d'Ottosen au joint de colle n'a pas permis de simuler le comportement réel de l'assemblage avant rupture. L'hypothèse que seul le joint de colle est endommagée est insuffisante du fait de sa faible proportion par rapport au substrat. La non linéarité de comportement obtenue est trop faible et prouve que le bois est lui aussi fortement sollicité, en partie au niveau des interfaces où les niveaux de contraintes sont forts. Les ruptures observées expérimentalement le confirment de toute façon. Un modèle d'endommagement d'interface serait certainement une solution même si la prévision du comportement de l'assemblage dépend avant tout de la connaissance de l'importance et des propriétés mécaniques de l'interphase présente entre le bois et la colle.

Ainsi, ce travail mériterait d'être complété par certains points tant expérimentaux que numériques. En effet, d'un point de vue expérimental, des analyses de rugosité des surfaces de rupture de la colle permettraient d'établir une corrélation entre l'énergie de rupture déterminée dans la zone de faible cohésion et celle déterminée dans la masse de la colle. De plus, en association avec l'acquisition d'images, un procédé d'émission acoustique permettrait d'identifier et de localiser de nouveaux paramètres d'endommagement. A ce titre, je pense

que ce procédé sera difficilement applicable à un substrat bois dont les craquements à ce niveau de sollicitation sont assez importants. Mais des filtres adaptés pourraient être appliqués et pallier à cette difficulté. En revanche, dans le cas d'autres substrats, l'apport de ce procédé devrait être intéressant. Des essais supplémentaires sur d'autres essences plus résistantes devraient permettre d'obtenir une rupture cohésive du joint en Mode I puisque l'on a pu l'obtenir au niveau de cernes de bois d'été de l'épicéa. Par contre, le changement d'essence pourrait influencer sur la mouillabilité de l'adhésif. En revanche, la haute résistance au délaminage de l'adhésif résorcine hypothèque les chances de rupture cohésive du joint en cisaillement. Enfin, des études sur la pénétration de l'adhésif dans les pores du bois permettrait certainement de quantifier l'importance de l'interphase pour différents adhésifs et diverses essences de bois. Par contre, comment quantifier l'influence de l'interphase sur la résistance de l'assemblage et comment obtenir ses caractéristiques mécaniques ?

Annexes

ANNEXE 1. Processus expérimental

A1.1.Préparation des assemblages collés :

Si on veut considérer un couple adhésif substrat idéal permettant d'exclure toute rupture adhésive de l'assemblage, il faut optimiser le collage afin de favoriser au maximum les liaisons qui vont s'établir au niveau de l'interface colle substrat. C'est pour cela qu'il faut définir *un processus de collage* incluant le choix des adhésifs par rapport aux essences utilisées, la préparation de la surface, les conditions d'accostage des éléments de l'assemblage, les conditions extérieures durant la prise de l'adhésif (pression, température, % d'humidité...) [50]. Le choix de ces différents paramètres est fait en fonction des recommandations techniques des formulateurs des adhésifs [141, 142]. La valeur de l'interprétation des résultats des essais dépend de la mise en place d'une procédure de collage permettant la définition précise des paramètres intervenant dans la qualité de ce collage afin d'assurer la plus grande reproductibilité possible des joints. Ce processus se divise en diverses étapes :

Préparation des substrats :

Cette phase comprend l'usinage des substrats, la préparation de surface avant collage et le stockage du bois avant et après collage.

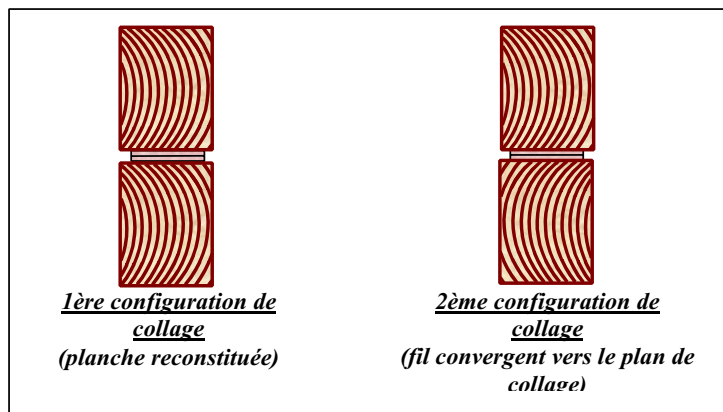
L'usinage se fait en étant le plus précis possible dans le plan de collage R-L par souci d'homogénéisation du bois (limitation de la différence entre le bois de printemps et d'été) sur un même échantillon de bois (même provenance, même rythme de croissance ?). Si on prend l'exemple du rabotage, celui-ci doit se faire dans le même sens de fil, avec des lames aiguisées car une lame usée endommage la fibre et provoque une faiblesse de liaison bois colle [115]. Le stockage du bois se fait ensuite en atmosphère contrôlée à 20°C et 60% d'humidité relative. Le traitement de surface appliqué au substrat est le suivant : dépoussiérage, dégraissage et élimination de la résine par passage d'un mélange toluène éthanol 1-2. Un léger ponçage (suivi d'un dépoussiérage) est ensuite réalisé afin d'augmenter la rugosité de surface du substrat et par conséquent l'ancrage mécanique de l'adhésif.

Stockage de l'adhésif :

Le stockage se fera dans les mêmes conditions que le bois afin d'éviter tout gradient de diffusion thermique lors de l'accostage entre adhésif et substrat.

Assemblage :

Différentes épaisseurs de joint vont être testées ; cependant, même si leur épaisseur varie, le processus de mise en forme est identique. Afin d'avoir un joint d'épaisseur constante et fixée, une bande de P.T.F.E. prédécoupée sera disposée et légèrement collée (par un adhésif Loctite 401 ou une bande adhésive double face de très faible épaisseur) sur l'un des deux substrats de l'assemblage. De plus, cette bande permet d'obtenir un joint qui ne couvre pas toute la surface du plan de collage et de largeur fixée (15 mm) afin d'accroître la singularité de contraintes dans le joint. Afin de maîtriser au mieux tous les paramètres de collage, un bâti de collage permettant d'appliquer une pression uniforme à l'aide de deux vérins hydrauliques a été réalisé. La pression appliquée est fonction de l'adhésif utilisé et de l'essence de bois choisie. Ce bâti est placé en atmosphère contrôlée afin d'éviter toute fluctuation de température ou d'humidité lors de la polymérisation (20°C et 60% H.R.) pouvant influencer sur la qualité et la reproductibilité du joint. Le temps de mise sous presse est fixé à 8 heures et celui de stabilisation à une semaine pour chaque assemblage. En effet, le temps de stabilisation peut influencer sur le comportement du joint [115]. Deux configurations de collage vont être étudiées ; une première configuration qui va permettre un assemblage de deux substrats provenant de la même coupe, en orientant ces substrats de telle sorte à reconstituer la planche initiale et une deuxième configuration à fil du bois convergent vers le plan de collage afin de canaliser la fissure dans le joint et d'éviter une déviation dans le bois. Ces deux configurations apparaissent sur la figure suivante.



2ème configuration de collage: fil du bois convergent vers le plan de collage

Ainsi, une bonne reproductibilité des joints de mêmes caractéristiques peut être envisagée. Les assemblages obtenus se présentent donc sous la forme suivante:

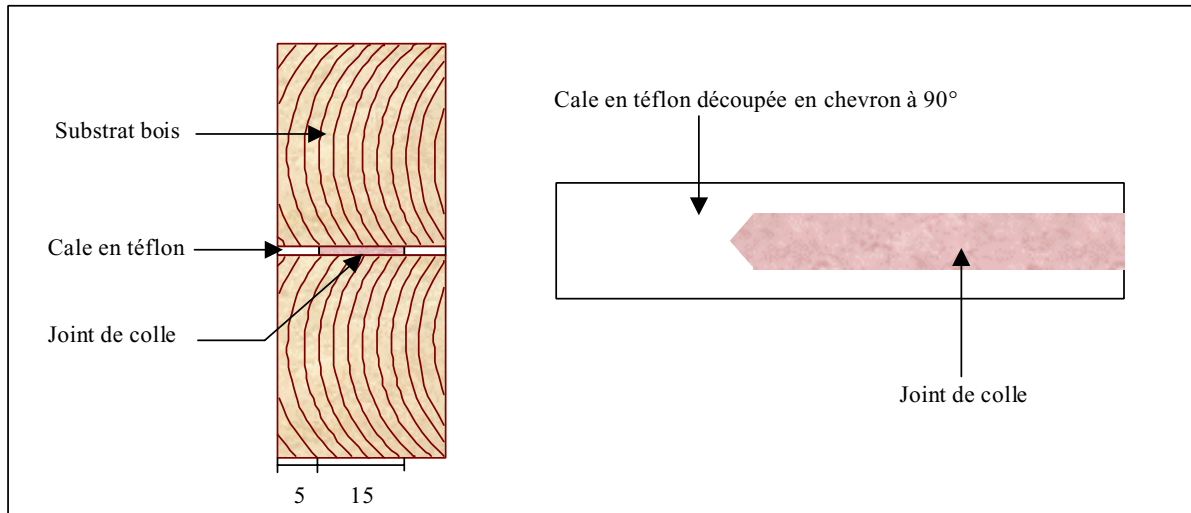


Fig. A1.1 : Coupes transversales et longitudinales de l'éprouvette.

A1.2. Essais de rupture :

Tous les essais de rupture sont réalisés à l'aide d'une machine de traction compression de type ADAMEL DY 26 pilotée par le logiciel d'acquisition TESTWORKS 3.07. La mesure du déplacement réel du point d'application de la force se fait à l'aide d'un extensomètre optique de type WALLACE ce qui permet d'éliminer tous les déplacements parasites au niveau du bâti. La mesure de la force se fait par l'intermédiaire d'un dynamomètre de capacité 100 daN pour les essais de Mode I et 500 daN pour ceux de Mode II. Ces essais sont réalisés à température ambiante et à vitesse de déplacement de la traverse imposée et constante. En effet, de manière à limiter les effets viscoélastiques du bois, on considère que la rupture devra être atteinte en 3 ± 1 minutes.

Au cours de l'essai, on laisse la fissure se propager jusqu'à la fin de la zone à inertie variable de l'éprouvette puis l'opérateur provoque la décharge. L'acquisition de la force et du déplacement se fait jusqu'à décharge complète de l'éprouvette.

Chaque courbe résultat sera alors dépouillée comme décrit précédemment.

Dans le cas de l'essai de clivage, les cibles de l'extensomètre sont disposées à la verticale des points de chargement ce qui permet d'améliorer la qualité de la mesure du déplacement et d'éviter de prendre en compte tout effet d'indentation.

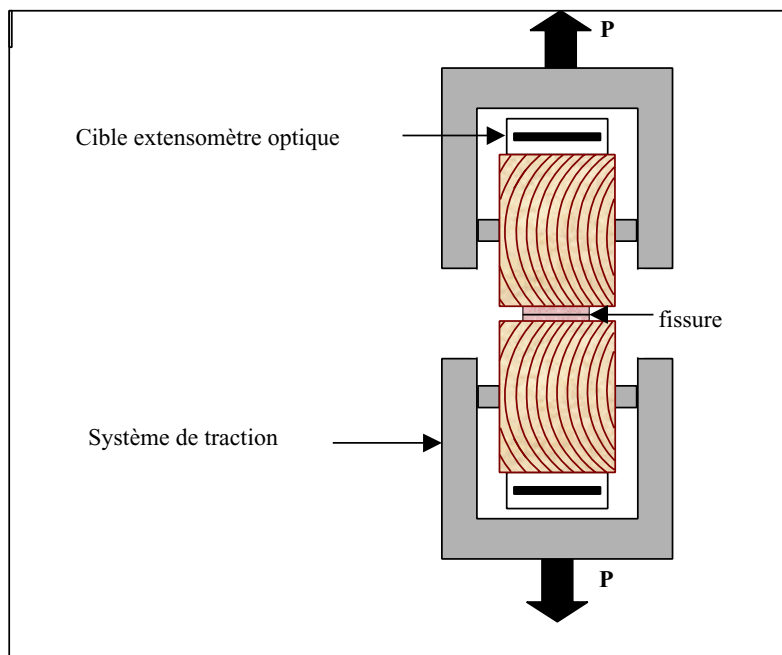


Fig. A1.2 : Essai de clivage de l'éprouvette T.E.N.F. modifiée collée.

De plus, le système de traction est adapté sur un montage de rotules lui conférant une liberté totale afin d'éviter toute sollicitation parasite autre que l'ouverture. Enfin, l'assiette de l'éprouvette est maintenue horizontale en permanence durant l'essai par un système de poulies lié à la traverse afin de maintenir constante la direction du chargement.

Si l'on s'intéresse à l'essai de flexion trois points réalisé à l'aide de l'extensomètre optique, le déplacement est mesuré par l'intermédiaire d'une cible disposée au niveau de la fibre neutre de l'assemblage et d'une autre disposée sur la face inférieure de l'assemblage, comme on peut le constater sur la figure suivante. La première cible est disposée sur un réglet en aluminium de déplacement libre en rotation à une extrémité et libre en glissement à l'autre extrémité. Les fixations du réglet sont bien évidemment faites à la verticale des appuis pour éviter tout effet de flexion de l'éprouvette. Deux cales en PTFE sont disposées dans l'entaille afin d'éviter que celle-ci ne se referme et provoque des effets de frottements des lèvres de la fissure. L'éprouvette est disposée sur deux cales en acier (dimensions 25*15 mm et d'épaisseur 30 mm) reposant d'un côté sur un appui en forme de bille (diamètre 25 mm) et de l'autre côté sur un appui en forme de rouleau (diamètre 30 mm). La présence des cales étant justifiée pour limiter l'indentation du spécimen, celles-ci sont graissées à la vaseline afin de supprimer toute perturbation dues aux frottements sur les appuis. La force ponctuelle est appliquée par l'intermédiaire d'une bille (diamètre 15 mm) sur une cale de mêmes dimensions que les précédentes au milieu du spécimen, afin d'éviter là aussi toute indentation de l'éprouvette au niveau du point d'application. L'intérêt de ce procédé de mesure du

déplacement est d'éliminer de la mesure du déplacement toutes les indentations élastiques et anélastiques se produisant lors de l'essai au niveau du point d'application de la force et des appuis. Ces indentations peuvent être relativement conséquentes vu les charges appliquées lors de l'essai de flexion.

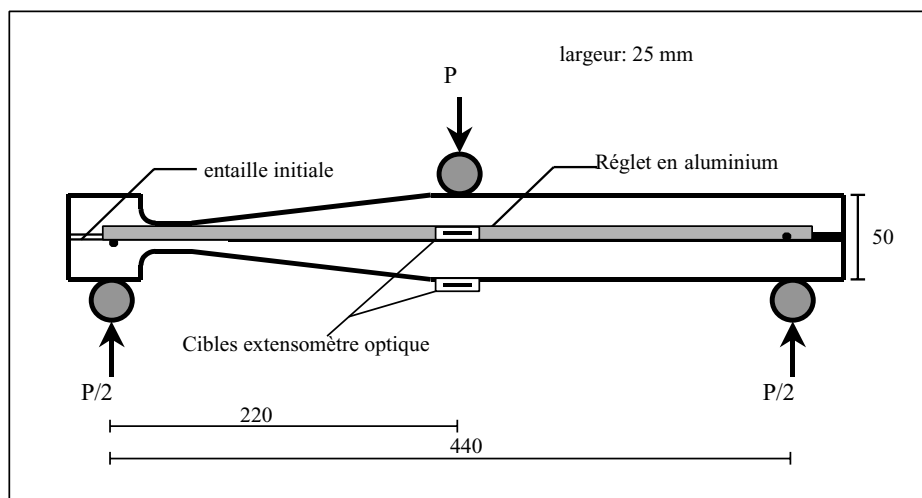


Fig. A1.3 : Essai de flexion 3 points de l'éprouvette T.E.N.F. modifiée collée.

Certains essais seront réalisés avec la mise en place d'un système de suivi de la fissuration par acquisition d'images. Le système d'éclairage mis en place pour la caméra n'étant pas compatible avec le système de mesure du Wallace qui ne supporte pas de faisceaux lumineux autres que celui qu'il utilise, des capteurs de déplacement laser vont être utilisés. Ces capteurs laser sont des capteurs de mesure sans contact et qui utilisent le principe de triangulation pour réaliser leurs mesures. Un faisceau pulsé est envoyé sur l'objet à mesurer de façon à ne pas subir de perturbations par les lumières ambiantes et externes. Le capteur émet un faisceau focalisé sur l'éprouvette, la lumière rétrodiffusée par l'éprouvette est renvoyée à l'aide d'une lentille sur un récepteur de position se trouvant dans le capteur PSD (position sensitive device). Ce récepteur PSD délivrera un signal proportionnel à la position du faisceau reçu. Ce principe de mesure est repris sur la figure A1.4.

Ainsi, pour la mesure du déplacement réel du point d'application de la force dans l'essai de flexion 3 points, deux capteurs de ce type seront utilisés afin d'éliminer tout déplacement parasite lors de l'essai (rattrapage des jeux, indentation élastique et anélastique). Ces deux capteurs sont disposés sur le spécimen de la façon suivante ; l'un mesure le déplacement de la fibre neutre de l'éprouvette et l'autre celui de la fibre inférieure du spécimen. Les deux mesures sont réalisées au niveau du point d'application de la force comme le montre la figure A1.3

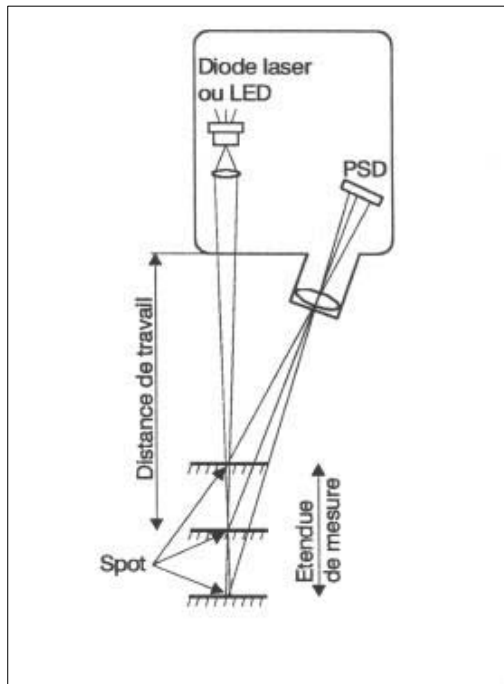


Fig. A1.4 : Système de mesure de déplacement en flexion 3 points par triangulation laser.



Fig. A1.5 : Montage expérimental de flexion 3 points associant l'extensométrie laser et l'acquisition d'images.

L'acquisition et le traitement d'images se font à l'aide du logiciel National Instrument Imaq Vision Builder et de caméras numériques haute résolution Sony XC75 ou Hamamatsu C4742-95 associés à des objectifs adaptés au grossissement désiré. Les zones observées varient de la zone à inertie variable de l'éprouvette jusqu'à une fenêtre d'à peine 5 mm de côté, ce qui permet d'observer le joint à très fort grossissement et donc d'obtenir des renseignements en temps réel durant l'essai sur les phénomènes d'endommagement et de rupture se produisant à la périphérie du joint. La limite de ce système d'observation est que les renseignements obtenus ne sont représentatifs qu'au bord du joint observé, sachant que la progression de la fissure n'est pas plane lors d'une fissuration cohésive par exemple.

De tels essais permettent d'étudier le comportement à rupture des assemblages bois collés. Il faut toutefois noter que l'utilisation de substrats bois impose une première série d'essais sur des spécimens massifs afin de caractériser les propriétés du lot et surtout leur dispersion. De plus, le choix du couple adhésif essence de bois apparaît très important dans le comportement de l'assemblage et en particulier dans le type de fissuration obtenue. Enfin, des données sur les caractéristiques mécaniques des colles utilisées s'avèrent nécessaires dans le choix de l'adhésif face aux objectifs qui ont été établis.

Annexe 2: Résultats des essais d'ouverture et de cisaillement réalisés sur les spécimens massifs en épicea.

Spécimens sollicités en ouverture (MODE I)

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Fmax (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	GIc (J/m ²)	GI _f (J/m ²)	Humidité relative (%)	μ anhydre (kg/m ³)	Fnl (N)
MEO 110-1	79,3	247	3,9	251	5,6	241,1	stable avec léger saut fragile	165	226	15,0	426,7	151
MEO 110-3	58	206,1	4,07	212	6,01	208,1	stable avec léger saut fragile, peu déviée	206	282	15,2	372,8	119
MEO 110-4	71,8	248	4,56	255	6,36	246	stable selon fibre neutre	162	221	15,0	389,2	118
MEO 110-5	76	239,2	4,01	248	6,02	247,2	stable légèrement déviée vers le haut	163	224	15,1	418,8	113
MEO 110-6	62,8	243,2	4,79	345	10,36	339,2	stable selon fibre neutre	151	207	15,1	414,2	122
MEO 110-7	51,8	270,2	6,42	270	9,3	266,2	stable avec léger saut fragile initial	172	235	15,3	395,2	120
MEO 110-8	73,6	215	3,68	260	6,5	261	instable et fragile	141	193	15,5	414,1	105
<i>Moyenne</i>	67,6	238,4	4,5	263,0	7,2	258,4	<i>fissuration en général stable et très peu déviée dans la majorité des cas</i>	166	227	15,2	404,4	121,1
<i>Ecart Type</i>	10,2	21,6	0,9	40,4	1,9	40,2		20,5	28,0	0,18	19,19	13,3
<i>Coef. Variation</i>	0,15	0,09	0,21	0,15	0,26	0,16		0,12	0,12	0,01	0,05	0,11

Spécimens sollicités en cisaillement (MODE II)

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Fmax (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	GIc (J/m ²)	GI _f (J/m ²)	Humidité relative (%)	μ anhydre (kg/m ³)	Fnl (N)
MEC 110-1	651	2320	4,11	2520	5,76	2520	Fortement déviée vers le bas	880	1160	15	363,3	1324
MEC 110-3	867	2209	2,82	2339	4,3	2169	non déviée, stable	600	690	15,2	375,8	1509
MEC 110-4	642	2129	3,73	2269	5,37	2259	non déviée, stable	680	830	14,2	347,7	1293
MEC 110-5	967	1980	2,25	2309	3,97	2259	Fortement déviée vers le haut	560	620	15	393,6	1343
MEC 110-6	822	2240	3,1	2350	4,55	2140	légère instabilité finale	760	890	15,2	358,8	1229
MEC 110-7	617	1945	3,58	2150	5,74	2140	Légèrement déviée vers le haut	740	890	14,4	349,7	1228
MEC 110-8	855	2010	2,67	2200	4,15	2160	Légèrement déviée à la fin	480	590	14,9	391,8	1298
<i>Moyenne</i>	774,4	2119,0	3,18	2305,3	4,83	2235,3	<i>spécimen bien adapté à la sollicitation fissuration stable et non déviée dans la majorité des cas</i>	671	810	14,8	368,7	1317,7
<i>Ecart Type</i>	136,6	144,2	0,66	119,6	0,77	135,7		135,6	197,7	0,39	18,9	95,0
<i>Coef. Variation</i>	0,18	0,07	0,21	0,05	0,16	0,06		0,20	0,24	0,03	0,05	0,07

ANNEXE 3.

Caractéristiques mécaniques des adhésifs étudiés.

A3.1. Adhésif résorcine-phénol-formol :

L'ENOCOL RLF185 fabriqué par la société CECA [141] est un adhésif résorcine-phénol-formol couramment utilisé dans l'industrie du bois et en particulier dans la fabrication de lamellé collé. L'ENOCOL RLF185 est un liquide rouge-violet d'aspect relativement visqueux, qui, combiné à un durcisseur en poudre beige (DP155), donne un adhésif synthétique à applications multiples dont l'utilisation est préconisée pour tous les collages devant présenter des performances mécaniques élevées, une parfaite tenue aux intempéries, à l'immersion prolongée dans l'eau froide, à la chaleur ainsi qu'à de nombreux agents chimiques tels que les solvants, les acides et les bases faibles. Cet adhésif doit être utilisé pour une humidité relative du bois comprise 10 et 16% et une température de collage comprise entre 18 et 25°C. La mise en œuvre de cet adhésif peut se faire à froid et nécessite alors un temps de serrage minimal de 8 heures à 20°C sous une pression variant de 7 à 14 bars. Une polymérisation à chaud est possible (presse à haute fréquence) jusqu'à 1 mn 30 à 100°C. Une période de stabilisation de 24 heures est cependant conseillée avant le desserrage. Le grammage varie en fonction de l'état de surface de 300 à 600 g/m² pour un encollage simple face et de 400 à 800 g/m² pour un encollage double face. Ce dernier est préconisé dans le cas d'assemblages avec des joints épais ou de collages longue durée.

La formule du mélange collant est la suivante :

- ENOCOL RLF185 : 100 parties pondérales
- Durcisseur DP155 : 20 parties pondérales

La norme NF EN 386 « Bois Lamellé-collé – Prescriptions de performance et prescriptions minimales de fabrication » (paragraphe 6.4.1.2, page 12) indique que l'écart maximal admissible par rapport à l'épaisseur moyenne, sur une longueur de lamelle de 1 m, est égal à 0.2 mm. Ainsi, l'épaisseur de joint usuelle est de 0.1 mm et cette norme interdit tout joint d'épaisseur supérieure à 0.5 mm. Cependant, l'ENOCOL RLF185 et son durcisseur DP 155 doivent être agréés selon les normes NF EN 301 et NF EN 302 parties 1 à 4.

Lors du test NF EN 302 partie 1, l'adhésif est testé en joints épais (1 mm). Au delà de cette épaisseur, il n'existe aucune norme permettant d'établir un comparatif valable entre adhésifs. De plus, un collage effectué avec des joints supérieurs à 1 mm doit être considéré comme un mauvais collage provenant soit d'un défaut d'usinage du bois, soit d'un défaut de serrage lors de l'assemblage. En se référant au rapport d'essai de certification Type I du C.T.B.A [143], on peut voir que la résistance d'un joint épais est moindre que celle d'un joint mince. A ce titre, il est conseillé de réaliser des collages de 0.1 mm d'épaisseur en encollant le bois avec un grammage de 500 g/m² et en serrant à la pression de 0.5 N/mm². C'est ce processus de collage qui a été adopté en faisant cependant varier les épaisseurs de joint de 0.1 à 0.5 mm.

Cet adhésif a déjà fait l'objet d'une étude détaillée par Dinkel [101] dont les résultats suivants sont issus d'essais sur spécimens de colle massifs moulés.

Caractéristiques mécaniques de l'ENOCOL RLF 185 en traction :

Eprouvettes d'essai :

Dimensions de la section utile avant retrait :

Epaisseur : 6.0 mm

Largeur : 8.0 mm

Longueur : 40.0 mm

Volume avant retrait V_0 : 1920 mm³

Dimensions de la section utile après retrait :

Epaisseur : 5.0 mm

Largeur : 7.1 mm

Longueur : 34.4 mm

Volume avant retrait V : 1221 mm³

Résultats des essais de traction effectués sur 7 spécimens

Retrait volumique = $100 \cdot (V - V_0) / V_0$: 37%

Module moyen d'élasticité E : 2712 MPa

Contrainte à la limite élastique σ_e : 14 MPa

Contrainte à la rupture σ_r : 17 Mpa

Rapport des contraintes σ_e / σ_r : 0.82

Caractéristiques mécaniques de l'ENOCOL RLF 185 en flexion :

Eprouvettes d'essai :

Dimensions de la section utile avant retrait :

Epaisseur : 6.0 mm

Largeur : 16.0 mm

Longueur : 100.0 mm

Volume avant retrait V_0 : 9600 mm³

Dimensions de la section utile après retrait :

Epaisseur : 5.3 mm

Largeur : 14.0 mm

Longueur : 87.7 mm

Volume avant retrait V : 6582 mm³

Résultats des essais de flexion effectués sur 6 spécimens

Retrait volumique = $100 \cdot (V - V_0) / V_0$: 31%

Module moyen d'élasticité E : 2982 MPa

Contrainte à la limite élastique σ_e : 16 MPa

Contrainte à la rupture σ_r : 20 MPa

Rapport des contraintes σ_e / σ_r : 0.80

D'autres études un peu plus récentes réalisées en Suède par Serrano [132] sur un autre type d'adhésif Résorcine Phénol Formol (Casco Nobel nr 1711+2620) sur une configuration de joints à entures multiples permettent d'obtenir les valeurs expérimentales suivantes :

Contrainte limite en traction : 6.5 MPa.

Contrainte limite en cisaillement : 19.3 MPa.

Energie de rupture totale en traction : 440 J/m².

Energie de rupture totale en cisaillement : 1250 J/m².

La forte résistance au délaminage de ce type d'adhésif apparaît à nouveau dans ces résultats expérimentaux, qui toutefois n'indiquent pas clairement le type de rupture observée.

En conclusion de ces données, on peut dire que les adhésifs phénoliques, une fois polymérisés, sont assimilés à des solides isotropes fragiles. Les caractéristiques trouvées en flexion sont légèrement supérieures à celles déterminées en traction mais on peut estimer que cet écart provient de la différence de section utile. De plus, l'une des principales caractéristiques des colles phénoliques est de proposer une forte résistance au délaminage en cisaillement, que l'on retrouve aussi bien sur les éprouvettes de colle massives que sur les essais réalisés par Serrano [132]. Cependant, les contraintes à rupture en Mode I diffèrent assez fortement, bien que nous ayons affaire à deux produits appartenant à la même classe d'adhésifs. L'essai sur une éprouvette de colle de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur (taille de joint d'utilisation courante) étant très difficile à réaliser, on suppose que les caractéristiques mécaniques pour les faibles dimensions sont au moins supérieures ou égales à celles déterminées ici sachant que la probabilité d'induire un défaut critique est beaucoup plus importante sur une éprouvette de 6 mm d'épaisseur que dans un joint de 0.1 mm d'épaisseur. De plus, les contraintes résiduelles intervenant dans le joint dues à la pression de serrage ne sont pas prises en compte sur un spécimen de colle massif alors qu'elles influent fortement sur le comportement de l'assemblage. Ces caractéristiques mécaniques servent toutefois d'indication sur le matériau colle pris séparément de l'assemblage, mais ne sont malheureusement pas toujours représentatives.

A3.2. Adhésif polyuréthane :

Le LIDEC A284 fabriqué par la société C.F.P.I. (HENKEL France) [142] est une colle mastic polyuréthane structurale bicomposant sans solvant. Il se présente sous la forme de deux composants liquides, une partie A fluide et ocre (polyols) et une partie B brune et visqueuse (isocyanates) facilement mis en œuvre manuellement ou à l'aide d'une machine doseuse mélangeuse. Une fois mélangé, le LIDEC A284 se transforme en un gel thixotrope lissable et spatulable qui, après polymérisation, conduit à une masse compacte, rigide, ponçable, conservant ces propriétés sur une large plage de températures et en particulier aux très basses températures pour la cryogénie. Il présente une bonne résistance aux intempéries

(eau chaude, vapeur d'eau, atmosphère marine), aux agressions chimiques (huiles minérales, hydrocarbures, solutions acides ou alcalines diluées) et aux gaz liquéfiés (méthane, ammoniac). Le LIDEC A284 permet un assemblage structural de nombreux matériaux (polyesters renforcés fibres de verre, métaux apprêtés ou peints, les plastiques, les matériaux isolants, le bois contre plaqué) et est particulièrement recommandé dans l'industrie du bois pour le collage bois bois. Cet adhésif, contrairement à l'adhésif précédent, n'a pas d'exigence particulière sur la teneur en eau du bois et il est fréquent que les adhésifs polyuréthane soit employés dans le collage du bois vert. Le temps d'utilisation d'un mélange manuel de 1 kg est d'environ 20-30 minutes à 20°C et varie fortement avec la température. Sa polymérisation totale théorique est atteinte en 4 heures lorsque le produit atteint à cœur la température de 20°C pour aller jusqu'à 5 minutes à 90°C.

La formule du mélange collant est la suivante :

-Partie A : 100 parties pondérales

-Partie B : 18 parties pondérales

Les résultats présentés ci-dessous sont issus de la fiche technique de l'adhésif et ont donc été effectués par le formulateur [142].

Résistance du LIDEC A 284 en traction cisaillement (ME NF-T76-107) :

Epaisseur du joint : 2 mm

Surface de collage : 500 mm²

Conditionnement : 7 jours à 23°C

Vitesse de traction : 10 mm/mn

Température de traction : 23°C

Bois contre plaqué : 4-5 MPa en délaminage

Extensibilité du LIDEC A 284 (ME 1545 RNUR) :

Eprouvette haltère type ISO

Vitesse de traction : 10mm/mn

Température d'essai : 23°C et 50% HR

Conditionnement : 7 jours à 23°C

Allongement à la rupture : 12-16%

Module à la rupture : 10-12 MPa

Les températures limites d'utilisation vont, en service continu de -40°C à +100°C et peuvent aller ponctuellement de -150°C à +200°C.

Un encollage simple est recommandé par le formulateur et le temps d'accostage de la seconde pièce devra se faire dans un temps qui n'excédera pas les 20-25 minutes à 20°C. les surfaces à assembler seront propres, sèches et exemptes de poussières, graisse ou huile.

Aucune indication de pression de serrage n'est donnée par le formulateur. Par conséquent, la même pression que pour l'autre adhésif sera appliquée.

Ainsi, cet adhésif polyuréthane, une fois polymérisé, est assimilé à un solide isotrope fragile endommageable car son allongement à rupture reste faible pour un matériau de ce genre. Sa résistance en traction cisaillement laisse présager un comportement intéressant dans le cadre des essais de Mode II dans le but d'obtenir une fissuration cohésive dans la colle. L'essai sur une éprouvette de colle de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur (taille de joint d'utilisation courante) étant très difficile à réaliser, on suppose à nouveau que les caractéristiques mécaniques pour les faibles dimensions sont au moins supérieures ou égales à celles déterminées ici sachant que vue la forte viscosité du mélange, l'augmentation de l'épaisseur du joint induit une augmentation de la taille des défauts que l'on peut inclure dans le joint (en particulier des bulles d'air). Ces défauts sont normalement supprimés par la mise sous pression lors du serrage qui permet un dégazage relatif du joint. On peut noter que pour les joints très épais (supérieurs à 1 mm d'épaisseur) la pression appliquée dans notre cas qui garantit l'intégrité du substrat bois s'avère insuffisante à chasser ces défauts. De plus, les contraintes résiduelles intervenant dans le joint dues à la pression de serrage ne sont pas prises en compte sur un spécimen de colle massif alors qu'elles peuvent fortement influencer sur le comportement de l'assemblage. De même que pour l'autre adhésif, ces caractéristiques mécaniques servent toutefois d'indication sur le matériau colle pris séparément de l'assemblage.

**Essais complémentaires réalisés sur l'adhésif Polyuréthane.
Méthode expérimentale.**

Essais de rupture en flexion 3 points :

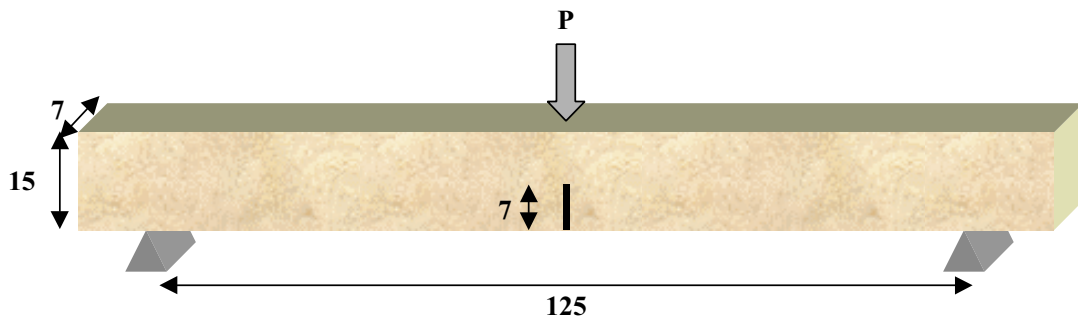


Fig. A4.1 : Eprouvette entaillée ASTM massive de colle sollicitée en flexion 3 points (dimensions en mm).

Le polynôme de calibration utilisé pour ce type de spécimen provient de la norme ASTM E399 de détermination du facteur d'intensité de contrainte pour les matériaux tels que l'acier sollicités en déformations planes [144]. Il s'écrit sous la forme suivante :

$$K_Q = (P_Q S / BW^{3/2}).(f(a/W)) \quad (A4.1).$$

Avec, dans notre cas, un rapport a/W valant 0.466 soit une valeur de $f(a/W)$ égale à 2.40.

Les grandeurs utilisées dans l'équation sont les suivantes :

- P_Q : Charge ultime.
- S : Distance entre les appuis.
- B : Epaisseur du spécimen.
- W : Hauteur du spécimen.
- a : longueur d'entaille.

Dans ce premier cas, la mesure du déplacement se fait à l'aide d'un réglet d'aluminium déposé sur la fibre neutre du spécimen, libre de glisser afin de ne subir aucune déformation de flexion et d'un repère fait sur l'éprouvette.

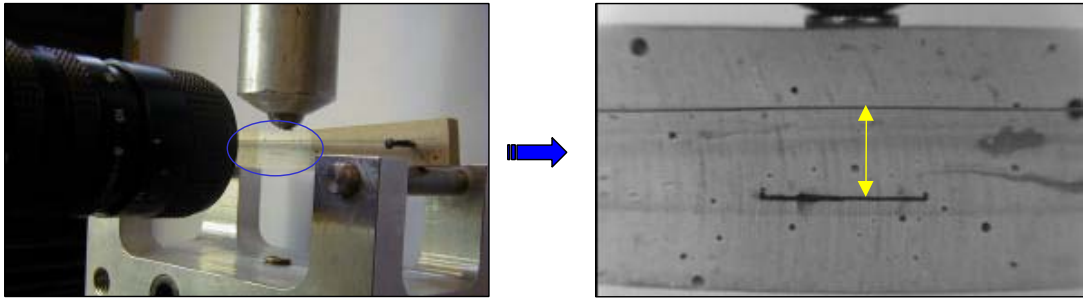
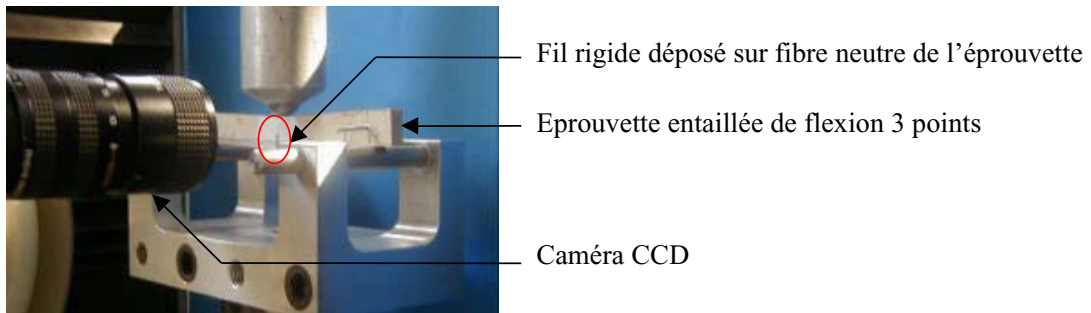
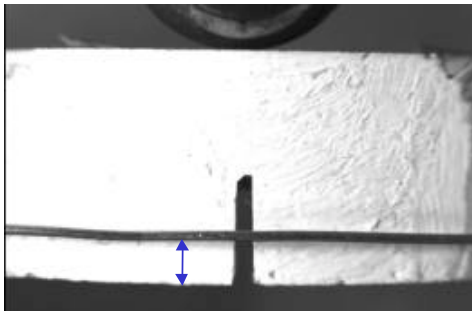


Fig. A4.2 : Mesure de déplacement du point d'application de la force par traitement d'images.

L'essai réalisé sur l'éprouvette entaillée permet selon le même procédé de traitement d'images les mesures de flèche et d'ouverture de la fissure. Dans le deuxième cas, la nécessité d'avoir une gamme de mesure importante à cause de la présence de l'entaille oblige le décalage de la référence liée à la fibre neutre vers le bas du spécimen, comme le montre la figure A4.3.



Etat initial



Etat final

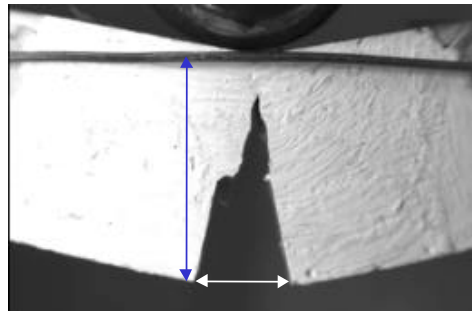


Fig. A4.3 : Essai de flexion 3 points d'éprouvette entaillée de colle massive.

ANNEXE 5.
Photoélasticimétrie.

Description de la Méthode :

La photoélasticimétrie, méthode optique d'analyse des contraintes aujourd'hui délaissée au profit des simulations numériques, utilise la propriété de biréfringence accidentelle de certains matériaux. Ces matériaux transparents et initialement isotropes deviennent optiquement anisotropes lorsqu'ils sont sollicités ou déformés.

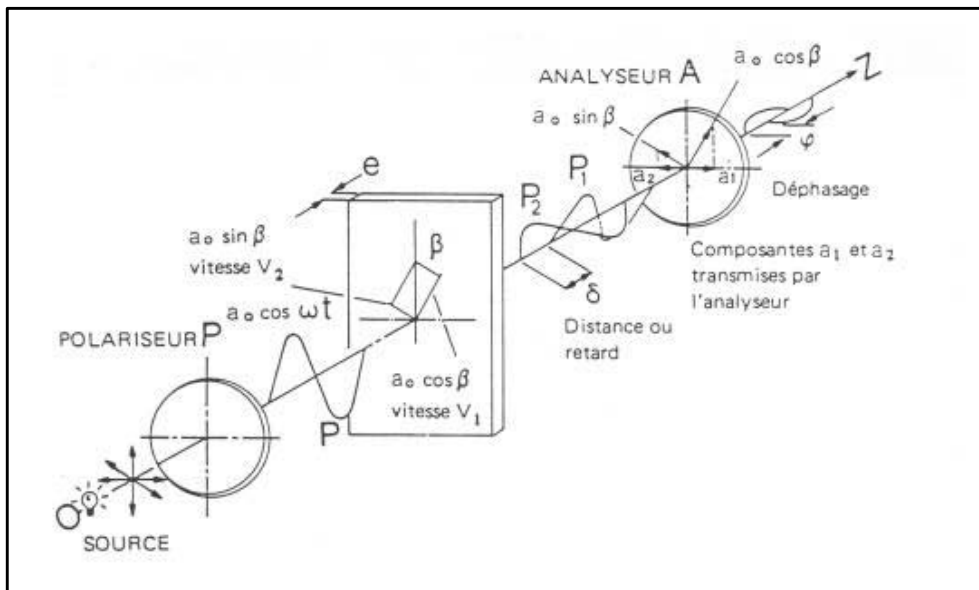


Fig. A5.1 : Principe de la photoélasticimétrie :

L'intensité de la radiation lumineuse traversant le système pour arriver jusqu'à l'œil de l'observateur vaut :

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \sin^2 2\beta = I_0 \sin^2 \frac{2\pi\delta}{\lambda} \sin^2 2\beta \quad (\text{A5.1}).$$

Or, polariseur et analyseur sont orientés perpendiculairement l'un à l'autre. Suite au déphasage entre les directions des ondes a et b après traversée du spécimen chargé, l'intensité lumineuse en certains points est nulle.

Dans ce cas,

$$\beta = \frac{k\pi}{2} \text{ ou } \delta = n\lambda \quad (\text{A5.2}).$$

On obtient alors deux types de franges :

- ◆ les isoclines dans le premier cas qui permettent d'identifier les directions principales de sollicitation parallèles aux directions de polarisation.

- ◆ les isochromes permettant d'identifier les lignes d'isocisaillement maximum décrites par la relation (A5.3). En lumière blanche, les isochromes sont colorées de la couleur complémentaire de la longueur d'onde éteinte (spectre de Newton).

Ainsi, en photoélasticité bidimensionnelle par transmission (état de contrainte plane), l'objet sollicité laisse apparaître différentes franges colorées selon le spectre de Newton: les isochromes ou lignes d'isocisaillement qui répondent à la loi suivante :

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{N\lambda}{Ce} = \tau_m \quad (A5.3).$$

où τ_m est le cisaillement maximum, λ la longueur d'onde de la lumière polarisée, e l'épaisseur de l'échantillon traversé, C la constante de franges caractéristique du matériau et N l'ordre de la frange observée.

Pour un état de charge donné, il est possible d'utiliser les expressions des contraintes de la Mécanique Linéaire Elastique de la Rupture en fond de fissure afin de déterminer les isochromes théoriques (relation A5.3) pour chacun des modes de sollicitation (figure A5.2). Dans le cas où la fissure se trouve selon l'axe 0, on obtient :

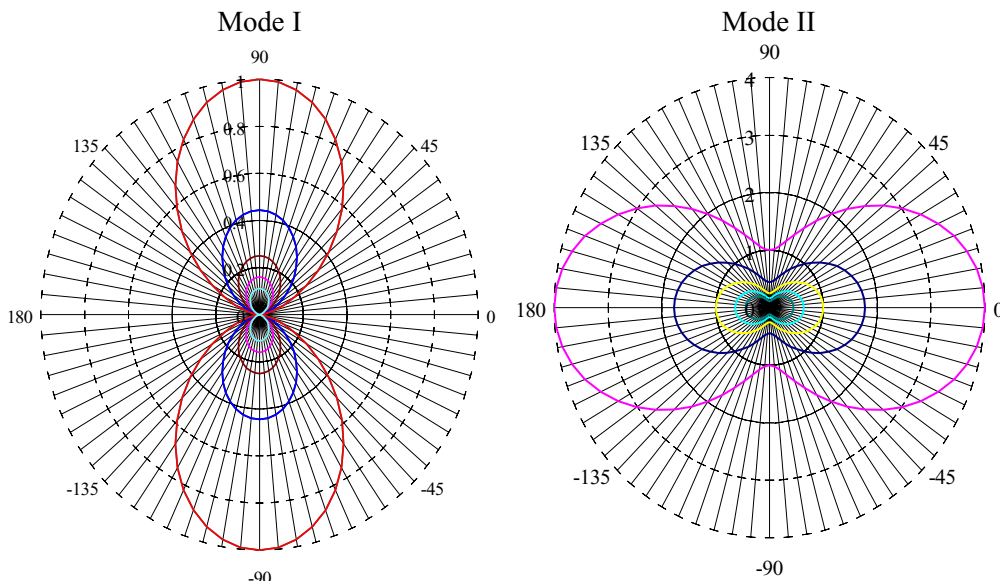


Fig. A5.2 : Isochromes théoriques en fond de fissure sollicitée en ouverture (Mode I) ou en cisaillement (Mode II).

Annexe 6: Résultats des essais de rupture en cisaillement de spécimens collés PU à joint d'épaisseur 0.25 mm

Ruptures dans la zone de faible cohésion (faible rugosité de surfaces de rupture)

Référence spécimen	Module d'Young substrats (MPa)	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Pmax (N)	dmax (mm)	Fdep max (N)	GIIC (J/m ²)	GIIf (J/m ²)
EP25 27/5/98 B	(μ anhydre (kg/m ³)) 386,5	665	2160	3,57	2290	4,86	2290	1120	1440
EP25 28/5/98	(μ anhydre (kg/m ³)) 361,3	597	2280	4,23	2380	5,5	2380	970	1270
EP25 29/5/98 A	(μ anhydre (kg/m ³)) 376,7	644	2590	4,48	2680	5,71	2680	1430	1940
EP25 29/5/98 B	(μ anhydre (kg/m ³)) 412	697	2650	4,17	2700	5,57	2680	1120	1390
EP25 8/7/99-5	14174 14345	663	2279	4,01	2599	5,96	2599	1340	1830
EP25 9/7/99-2	13927 12809	709	2930	4,01	2950	5,47	2900	1260	1850
EP25 9/7/99-3	6677 7977	472	2033	4,77	2043	5,96	1973	1070	1350
EP25 9/7/99-4	8541 8027	499	1856	4,6	1921	6,06	1830	760	1150
Eprouvette 8	12973 13017	746	2669	4,3	2709	5,84	2509	1390	1830
Eprouvette 9	14320 14449	833	2959	4,03	3169	5,9	2699	1780	2050
Eprouvette 13	8309 7952	460	1442	3,73	1467	4,96	1467	1041	1501
Eprouvette 22	13954 12918	723	2638	4,42	2678	5,71	2548	860	1200
Eprouvette 23	10176 12772	743	2310	3,46	2590	5,29	2590	1050	1270
Eprouvette 24	9374 10009	632	2438	4,71	2468	5,11	2458	635	1810
Eprouvette 25	11580 11994	666	2618	4,67	2668	5,32	2598	693	1280
Eprouvette 26	7994 8583	534	1892	3,99	1931	5,57	1931	1430	1834
Eprouvette 29	9616 9190	551	1838	3,76	1983	5,46	1981	1108	1398
Moyenne	11087,75	637	2328	4,17	2425	5,54	2360	1121	1553
Ecart type	2544,2	105,3	418,3	0,40	433,8	0,35	387,8	297,9	297,1
C. variation (%)	22,9	16,5	18,0	9,7	17,9	6,4	16,4	26,6	19,1

Ruptures fragiles et instables ou présentant une partie adhésive ou un défaut de polymérisation de l'adhésif.

<i>Référence spécimen</i>	<i>Module d'Young substrats (MPa)</i>	<i>Raideur (N/mm)</i>	<i>Pu (N)</i>	<i>du (mm)</i>	<i>Pmax (N)</i>	<i>dmax (mm)</i>	<i>Fdep max (N)</i>	<i>GIIc (J/m²)</i>	<i>GII_f (J/m²)</i>
EP25 27/5/98 A	(m anhydre (kg/m ³)) 425,9	742	2750	4,51	2840	5,04	2680	570	920
Eprouvette 6	8464 10255	557	1403	3,24	1556	4,19	1556	333	720
Eprouvette 12	10265 9907	521	1652	3,7	1952	5,73	1952	546	732
Eprouvette 14	13204 14390	706	2248	4,29	2378	5,78	2378	464	766
Eprouvette 21	9466 8083	450	1689	4,4	1802	5,74	1802	582	890
Eprouvette 28	10224 10776	621	1776	3,24	1909	5,34	1909	630	778
Eprouvette 30	15586 13209	759	2369	3,43	2489	5,34	2489	701	807
Eprouvette 31	8930 9113	461	1545	3,86	1604	4,68	1604	286	550
<i>Moyenne</i>	10848	602,125	1929	3,83375	2066,25	5,23	2046,25	514	770,375
<i>Ecart type</i>	2320,8	123,6	470,8	0,5	456,1	0,6	419,4	143,7	113,8
<i>C. variation (%)</i>	21,4	20,5	24,4	13,5	22,1	10,9	20,5	27,9	14,8

Ruptures dans la masse de la colle (forte rugosité des surfaces de rupture)

<i>Référence spécimen</i>	<i>Module d'Young substrats (MPa)</i>	<i>Raideur (N/mm)</i>	<i>Pu (N)</i>	<i>du (mm)</i>	<i>Pmax (N)</i>	<i>dmax (mm)</i>	<i>Fdep max (N)</i>	<i>GIIc (J/m²)</i>	<i>GII_f (J/m²)</i>
EP25 8/7/99-4	14553 14586	813	2789	4,02	3019	5,85	2999	2590	3340
Eprouvette 27	8576 9271	589	2177	4,15	2257	5,68	2177	2031	2525
Eprouvette 30	15586 13209	465	2211	5,22	2221	6,45	2221	1670	2280
<i>Moyenne</i>	12630	622	2392	4	2499	6	2466	2097	2715
<i>Ecart type</i>	2977,1	176,4	343,9	0,7	450,7	0,4	462,4	463,5	555,0
<i>C. variation (%)</i>	23,6	28,3	14,4	14,8	18,0	6,7	18,8	22,1	20,4

Annexe 7: Assemblages épicea collés sollicités en ouverture

Polyuréthane à joint 0.25 mm d'épaisseur.

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Fmax (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	G _{Ic} (J/m ²)	G _{I_f} (J/m ²)	Hum. Rel. (%)	μ anhydre (kg/m ³)
EP25 10.6.98 A	69,6	272,5	7,33	274	8,97	258,5	initiation proche interf, ds bois puis forte déviation	218	423	14,0	394,9
EP25 10.6.98 B	56,5	201	3,58	359	10,84	352	initiation adhésive puis forte déviation	/	95	14,3	400,0
EP25 11.6.98	64,2	181,3	3,15	273	7,41	270	initiation adhésive puis forte déviation	253	276	14,3	383,0
EP25 12.6.98 A	54,7	291,1	6,89	335	9,54	307,1	initiation interphase, cohésive par moment puis forte déviation	316	448	13,4	400,4
EP25 12.6.98 B	45,4	/	/	123	13,16	82	forte initiation adhésive puis forte déviation	/	/	14,1	373,3
EP25 15.6.98 A	45,9	177,4	4,57	203	7,26	151,6	totalemment déviée dans le bois	287	328	14,3	340,5
EP25 15.6.98 B	52,2	/	/	/	/	/	cohésive puis déviée dans le bois	/	/	14,3	382,7
EP25 16.6.98	70,2	207,1	3,37	209	5,71	158,4	cohésive puis déviée dans le bois avec rupt adhés aux bords	278	317	13,8	412,3
EP25 3.9.98 A	56,1	/	/	/	/	/	Cycles charge-recharge, déviée	/	/	14,1	394,1
EP25 3.9.98 B	46,2	201,9	4,7	333	13,94	331,9	1/2 cohésive, 1/2 déviée puis déviée dans le bois	607	635	12,7	343,2
Moyenne	54,6	210,0	4,4	262,1	9,7	236,1	fissuration variée mais souvent déviée dans le bois	348,2	349,8	13,9	381,1
Ecart Type	8,5	41,5	1,4	87,1	3,1	104,7	quelques ruptures adhésives, peu de cohésives et interphases	146,4	180,5	0,55	25,06
Coef. Variation	0,16	0,20	0,32	0,33	0,32	0,44	mais modes de ruptures souvent associés	0,42	0,52	0,04	0,07

Polyuréthane à joint 0.5 mm d'épaisseur.

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Fmax (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	G _{Ic} (J/m ²)	G _{I_f} (J/m ²)	Hum. Rel. (%)	μ anhydre (kg/m ³)
EP50 10.6.98 A	44,3	184,4	5,22	249	10,37	248	cohésive puis fortement déviée dans le bois	448	529	14,6	347,1
EP50 10.6.98 B	59	130,9	2,54	131	5,28	88,9	initiation cohésive puis rupture adhésive	136	151	13,5	402,6
EP50 11.6.98 A	55,4	281	7,55	325	10,79	302	cohésive puis fortement déviée dans le bois	465	740	14,2	379,3
EP50 11.6.98 B	48,2	/	/	/	/	/	cohésive puis fortement déviée dans le bois	/	/	14,3	376,3
EP50 12.6.98	82,7	181,5	2,65	184	4,21	183,6	rupture interphase bois colle	62	72	14,5	383,6
EP50 15.6.98 A	54,6	182,8	3,76	245	8,66	235	cohésive, déviée puis retour dans l'interphase	144	154	14,5	362,7
EP50 15.6.98 B	63,3	228	4,05	347	10,39	308	1/2 cohésive, 1/2 déviée avec arrachement de fibres	703	740	13,8	407,9
EP50 16.6.98 A	57,2	189,6	3,7	209	8,19	203	rupture interphase bois colle	105	112	14,5	361,2
EP50 16.6.98 B	51,3	/	/	/	/	/	Cycles charge-recharge, 1/2 cohes, 1/2 adhés avec arrach fin	/	/	14,7	381,7
EP50 3.9.98	46,7	/	/	/	/	/	décrochage Wallace	/	/	14,0	349,9
Moyenne	57,6	199,0	4,0	240,2	7,9	220,1	fissuration variée mais souvent déviée dans le bois	269,2	328,2	14,2	378,4
Ecart Type	10,8	50,7	1,8	83,3	2,7	81,8	quelques ruptures adhésives, peu de cohésives et interphases	256,8	320,4	0,39	18,89
Coef. Variation	0,19	0,25	0,45	0,35	0,34	0,37	mais modes de ruptures souvent associés	0,95	0,98	0,03	0,05

Polyuréthane à joint 0.75 mm d'épaisseur.

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Fmax (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	G _{Ic} (J/m ²)	G _{If} (J/m ²)	Hum. Rel. (%)	μ anhydre (kg/m ³)
EP75 10.6.98	53,7	185,7	3,9	217	8,85	194,4	fortement déviée dans le bois	420	444	14,1	366,5
EP75 11.6.98 A	63,9	130,1	2,3	184	7,98	166,4	1/2 adhésive, 1/2 déviée dans sens longitudinal	305	314	14,8	380,9
EP75 11.6.98 B	61,9	202,1	3,97	210	6,33	210,1	1/2 cohésive, 1/2 interphase puis déviée faiblement	153	175	14,5	348,0
EP75 12.6.98 A	56,2	236,1	5,22	321	10,78	321,1	fissure oscillant d'1 interf à l'autre puis dans l'interphase	136	161	14,4	374,1
EP75 12.6.98 B	68	219,1	3,6	247	7,25	243,1	faiblement cohésive puis déviée	254	277	14,5	428,8
EP75 15.6.98	51,2	/	/	/	/	/	Cycles charge-recharge, fissure dans l'interphase	/	/	13,8	355
EP75 16.6.98 A	61,1	194,2	6,4	198	6,4	193,4	déviée dans le bois	84	97	14,6	389,5
EP75 16.6.98 B	61,5	277,9	5,02	279	6,78	264,9	rupture interphase bois colle	327	401	14,5	436,1
EP75 3.9.98 A	76,9	170,4	2,42	210	6,29	123,3	déviée dans le bois	211	215	14,6	388,7
EP75 3.9.98 B	36,5	189,4	5,22	/	/	/	fortement déviée dans le bois	566	669	13,2	328,9
Moyenne	59,7	202,4	4,3	235,6	7,4	217,5	fissuration variée mais souvent déviée dans le bois	254,5	288,6	14,3	381,1
Ecart Type	11,3	44,1	1,5	49,5	1,6	65,5	quelques ruptures adhésives, peu de cohésives et interphases	151,3	181,0	0,50	35,32
Coef. Variation	0,19	0,22	0,34	0,21	0,22	0,30	mais modes de ruptures souvent associés	0,59	0,63	0,04	0,09

Résorcine à joint 0.1 mm d'épaisseur

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Fmax (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	G _{Ic} (J/m ²)	G _{If} (J/m ²)	Hum. Rel. (%)	μ anhydre (kg/m ³)
ER10 30.9.98 A	57	191,1	3,65	231	7,12	224,4	cohésive, déviée puis à nouveau cohésive	77	82	14,8	399,5
ER10 30.9.98 B	79,3	169,2	2,47	266	7,33	264,4	cohésive puis déviée	280	296	14,5	409,8
ER10 1.10.98	58,9	165,2	4,14	165	5,77	145,6	1/2 adhésive, 1/2 déviée dans sens longitudinal	130	200	14,3	359,9
ER10 2.10.98 A	62,3	157,3	2,68	287	8,17	280,9	fortement déviée dans le bois	316	325	14,6	380,6
ER10 2.10.98 B	63,6	188,3	3,26	278	9,39	278	fortement déviée dans le bois, fissuration antiplane et vrillée	447	451	14,7	347,8
ER10 5.10.98 A	57,9	270,9	7,87	275	9,03	258,5	cohésive puis fortement déviée dans le bois	303	667	15,0	387,5
ER10 5.10.98 B	61,6	/	/	/	/	/	Cycle charge-recharge, dans l'interphase puis déviée	/	/	14,5	349,2
ER10 6.10.98 A	78,3	176,2	2,45	204	5,39	190,3	faiblement déviée dans le bois mais pas dans l'interphase	271	283	14,5	418,0
ER10 6.10.98 B	59,8	174,1	3,36	313	10,77	312,3	cohésive puis fortement déviée dans le bois	416	439	14,6	370,8
ER10 8.10.98 A	76	127,9	2,05	205	5,46	203,3	1/2 interphasiale, 1/2 déviée (au centre) dans sens longitudinal	140	165	14,2	374,5
ER10 8.10.98 B	43,8	138,2	3,33	251	9,69	242,3	1/2 adhésive, 1/2 déviée dans sens longitudinal	300	312	15,0	329,3
Moyenne	62,5	174,8	3,6	247,3	8,0	238,9	fissuration variée mais souvent déviée dans le bois	290,4	355,3	14,6	368,6
Ecart Type	10,2	43,7	1,8	50,8	2,1	55,3	quelques ruptures adhésives, peu de cohésives et interphases	113,3	161,1	0,27	26,01
Coef. Variation	0,16	0,25	0,50	0,21	0,27	0,23	mais modes de ruptures souvent associés	0,39	0,45	0,02	0,07

Résorcine à joint 0.25 mm d'épaisseur

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Fmax (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	G _{Ic} (J/m ²)	G _{If} (J/m ²)	Hum. Rel. (%)	μ anhydre (kg/m ³)
ER25 30.9.98 A	45,2	224,1	8,39	240	10,9	235,1	fortement déviée dans le bois	211	350	14,5	350,4
ER25 30.9.98 B	48,8	120,4	3,02	240	9,35	240	dans l'interphase puis déviée dans le bois	226	258	14,4	332
ER25 1.10.98 A	57,6	/	/	/	/	/	dans l'interphase puis fortement déviée dans le bois	/	/	14,2	425,6
ER25 1.10.98 B	46,7	179,2	4,12	228	8,81	221	cohésive puis fortement déviée dans le bois	224	239	14,6	330,3
ER25 2.10.98	70,5	140,6	2,28	235	7,16	235	1/2 cohésive puis déviée, 1/2 déviée dans sens longitudinal	211	230	14,4	416
ER25 5.10.98 A	69,1	251	5,39	330	10,18	320	cohésive aux bords puis déviée	410	525	14,6	418,9
ER25 5.10.98 B	46,2	252	7,53	268	10,18	236	fortement déviée dans le bois	99	140	15,0	365,3
ER25 6.10.98	69,5	103,8	1,86	167	4,57	101,7	1/2 interphase, 1/2 cohésive	159	173	14,4	336,4
ER25 8.10.98	63,4	/	/	/	/	/	Cycle charge-recharge, cohésive puis déviée	/	/	14,2	356,9
Moyenne	57,4	181,6	4,7	244,0	8,7	227,0	fissuration variée mais souvent déviée dans le bois	220,0	273,6	14,5	370,2
Ecart Type	10,9	62,0	2,6	48,8	2,2	64,2	quelques ruptures adhésives, peu de cohésives et interphases	95,5	129,3	0,24	39,25
Coef. Variation	0,19	0,34	0,55	0,20	0,25	0,28	mais modes de ruptures souvent associés	0,43	0,47	0,02	0,11

Résorcine à joint 0.5 mm d'épaisseur

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Fmax (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	G _{Ic} (J/m ²)	G _{If} (J/m ²)	Hum. Rel. (%)	μ anhydre (kg/m ³)
ER50 30.9.98	61,6	120,6	2,62	148	4,36	82,8	1/2 interphase, 1/2 cohésive	185	226	14,0	365,0
ER50 1.10.98 A	50,1	190,3	5,18	206	9,73	203	cohésive puis déviée	307	379	14,6	336,9
ER50 1.10.98 B	82,3	127,1	2,28	189	5,97	101,7	1/2 interphase, 1/2 cohésive puis déviée	322	366	14,7	412,8
ER50 2.10.98 A	65,4	/	/	168	5,07	168,3	interphase avec arrachements locaux de colle	/	/	14,6	354,4
ER50 2.10.98 B	67,7	155,8	2,78	198	6,3	197,6	cohésive proche de l'interface	210	234	14,9	347,5
ER50 5.10.98	55,1	/	/	/	/	/	Cycle charge-recharge, 1/2 coh, 1/2 adh puis déviée	/	/	14,8	356,5
ER50 6.10.98 A	53,8	128,3	2,98	195	7,07	180,1	interphase avec arrachements locaux de colle	192	215	14,6	358,7
ER50 6.10.98 B	68,6	247,1	6,23	263	8,17	262,1	déviée dans le bois	177	345	14,7	397,7
ER50 8.10.98 A	55,3	225,1	6,9	291	11,81	287,1	déviée dans le bois	283	413	15,1	351,6
ER50 8.10.98 B	80,2	170,3	2,37	205	5,42	205,1	interphase avec arrachements locaux de colle et de fibres	158	163	14,6	434,2
Moyenne	64,3	177,7	4,1	214,4	7,4	200,6	fissuration variée mais souvent déviée dans le bois	235,6	302,1	14,7	372,3
Ecart Type	11,6	46,1	2,0	41,1	2,3	56,8	quelques ruptures adhésives, peu de cohésives et interphases	66,9	96,4	0,17	33,85
Coef. Variation	0,18	0,26	0,48	0,19	0,31	0,28	mais modes de ruptures souvent associés	0,28	0,32	0,01	0,09

Annexe 8: Assemblages épicea collés résorcine à joint d'épaisseur 0.1 mm sollicités en ouverture (rabotage avant collage)

Référence éprouvette	Modules d'Young Substrats (MPa)		Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Fmax (N)	Dep max. (mm)	F dep max. (N)	Glc (N/mm)	Glf (N/mm)	Hum. Rel. (%)		μ anhydre (kg/m ³)	
ER10 5/02/99-1	10446	10929	53,6	152	3,2	330	10,87	34	457	464	15,9	16	392,5	400,5
ER10 5/02/99-2	11968	12184	77,1	301	7,11	301	8,97	240	272	433	17,1	16,7	458,4	417,8
ER10 5/02/99-3	12680	11005	63,6	398	13,3	400	16,97	64	418	502	15,3	15,2	443,7	462,1
ER10 5/02/99-4	11760	11941	58,6	164	3,51	220	9,63	168	332	362	16,9	17,7	422,5	401,1
ER10 5/02/99-5	10775	10989	86,3	189	5,09	206	10,14	205	209	292	17,2	17,4	416,5	400,6
ER10 8/02/99-1	9918	11081	81,9	355	8,14	359	9,47	275	292	450	15,1	15,9	431,7	428,1
ER10 8/02/99-2	11226	11504	65,5	190	3,32	264	10,03	62	301	309	16,4	15,7	401,5	403,1
ER10 8/02/99-3	9593	9593	65,6	163	3,47	225	6,94	106	246	273	15,6	15,4	466,9	398,7
ER10 8/02/99-4	12720	12318	/	/	/	/	/	/	/	/	15,4	15,7	441,5	400,4
ER10 8/02/99-5	11508	11623	103,1	305	6,59	318	10,29	269	424	620	16	17	475,5	408,3
Moyenne	11288		72,8	246,3	5,97	291,4	10,37	158,1	327,9	411,7	16,2		423,6	
Ecart type	920,8		15,7	93,8	3,31	67,3	2,7	94,3	86,6	113,3	0,8		26,2	
Coef. Variation	0,08		0,22	0,38	0,56	0,23	0,26	0,60	0,26	0,28	0,05		0,06	

Référence éprouvette	état fissuration
ER10 5/02/99-1	fortement déviée vers subs. plus raide
ER10 5/02/99-2	déviée vers sbs. plus raide sur largeur du joint
ER10 5/02/99-3	fortement déviée vers subs. plus raide
ER10 5/02/99-4	cohésive puis déviée
ER10 5/02/99-5	déviée vers subs. plus raide sur largeur du joint
ER10 8/02/99-1	fortement déviée vers subs. moins raide
ER10 8/02/99-2	cohésive
ER10 8/02/99-3	cohésive + poche de résine
ER10 8/02/99-4	décrochage Wallace
ER10 8/02/99-5	déviée vers subs. moins raide

la déviation semble s'orienter vers le substrat le plus raide. Cependant, 2 cas de rupture cohésive apparaissent. Fissuration contrôlée sauf pour un cas

Annexe 9: Assemblages épicea collés sollicités en cisaillement

Polyuréthane à joint d'épaisseur 0.25 mm

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	F max (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	GIc (J/m ²)	GIIf (J/m ²)	Hum. Rel. (%)	μ anhydre (kg/m ³)
EP25 19.5.98 A	724	/	/	2789	/	/	Pb mise en place essai	/	/	/	/
EP25 19.5.98 B	609	/	/	2890	/	/	déviée dans le bois	/	/	/	/
EP25 25.5.98	/	/	/	/	/	/	Pb mise en forme éprouvette	/	/	/	/
EP25 26.5.98 A	/	/	/	/	/	/	Rupture substrat (usinage)	/	/	/	/
EP25 26.5.98 B	658	/	/	2758	/	/	déviée dans le bois (surf. Faible)	/	/	/	/
EP25 27.5.98 A	742	2750	4,51	2840	5,04	2680	fragile	570	920	13,8	425,9
EP25 27.5.98 B	665	2160	3,57	2290	4,86	2290	cohésive puis saut interfacial	1120	1440	14,9	386,5
EP25 28.5.98	597	2280	4,23	2380	5,5	2380	non déviée, stable	970	1270	14,9	361,3
EP25 29.5.98 A	644	2590	4,48	2680	5,71	2680	saccadée à niveaux F et d élevés	1430	1940	14,6	376,7
EP25 29.5.98 B	697	2650	4,17	2700	5,57	2680	non déviée, stable	1120	1390	14,8	412
<i>Moyenne</i>	658,9	2486	4,19	2648,3	5,34	2542	<i>bonne fissuration générale</i>	1042	1392	14,6	392,5
<i>Ecart Type</i>	49,9	253,0	0,38	227,8	0,37	191,6	<i>plateau bien marqué (stabilité)</i>	312,5	367,5	0,5	26,2
<i>Coef. Variation</i>	0,08	0,10	0,09	0,09	0,07	0,08	<i>fort niveau de déformation</i>	0,30	0,26	0,03	0,07

Polyuréthane à joint d'épaisseur 0.5 mm

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	F max (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	GIc (J/m ²)	GIIf (J/m ²)	Hum. Rel. (%)	μ anhydre (kg/m ³)
EP50 19.5.98 A	566	2101	4,08	2761	6,95	2441	fragile	1600	1780	14,5	354,1
EP50 19.5.98 B	649	2611	4,62	2611	5,22	2051	fragile, mi interf., mi cohésive	1111	1430	14,1	391,1
EP50 25.5.98 A	525	2109	4,52	2639	7,77	2619	cohésive puis remontée en charge	990	1190	14,7	364
EP50 25.5.98 B	467	1771	4,23	1962	6,27	1943	cohésive	1020	1250	15,3	422,7
EP50 26.5.98	/	/	/	/	/	/	décrochage Wallace	/	/	/	/
EP50 27.5.98 A	564	2120	4,23	2610	7,61	2590	stable puis déviée dans bois	1540	1760	14,4	399,9
EP50 27.5.98 B	/	/	/	/	/	/	nœud substrat inférieur	/	/	13,9	366,6
EP50 28.5.98 A	635	3070	5,59	3130	7,2	3130	stable, cohésive puis interf.	1620	2260	14,8	429,1
EP50 28.5.98 B	/	/	/	/	/	/	stable puis déviée dans bois	/	/	14,7	379,6
EP50 29.5.98	/	/	/	/	/	/	explosion !!	/	/	/	/
<i>Moyenne</i>	568	2336,2	4,64	2590,4	6,81	2466,6	<i>bonne fissuration générale</i>	1256	1578	14,6	393,3
<i>Ecart Type</i>	76,0	507,9	0,56	415,1	1,06	481,0	<i>plateau bien marqué (stabilité)</i>	300,3	441,1	0,5	25,7
<i>Coef. Variation</i>	0,13	0,22	0,12	0,16	0,16	0,20	<i>fort niveau de déformation</i>	0,24	0,28	0,03	0,07

Polyuréthane à joint d'épaisseur 0.75 mm

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Fmax (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	GIc (J/m ²)	GIIf (J/m ²)	Hum. Rel. (%)	μ anhydre (kg/m ³)
EP75 19.5.98	492	1965	4,84	2320	7,51	2310	stable puis déviée dans bois	2840	3800	14,5	358,7
EP75 25.5.98 A	552	2659	5,47	2689	7,08	2219	stable puis déviée dans bois	1250	1510	14,7	379,3
EP75 25.5.98 B	501	/	/	2580	/	/	Rupture substrat (usinage)	/	/	/	/
EP75 26.5.98 A	686	2709	4,51	3009	6,25	2999	faible fissuration cohésive	4850	6550	14,8	403,2
EP75 26.5.98 B	583	2660	5,26	2820	6,8	2820	stable, déformation importante	2010	2890	14,4	381,7
EP75 27.5.98	/	/	/	/	/	/	Rupture substrat (usinage)	/	/	/	/
EP75 28.5.98 A	538	2140	4,55	2330	6,38	2320	décrochage Wallace décharge	1060	1380	14,6	356,7
EP75 28.5.98 B	489	2149	4,91	2169	6,77	2079	saccadée mi interf., mi cohésive	1540	1890	14,9	386,3
EP75 29.5.98 A	530	2580	5,62	2810	7,33	2780	coh au milieu du joint et interf aux bords	2660	3880	14,4	398,6
EP75 29.5.98 B	639	2929	5,47	3119	6,81	3099	mi interfaciale, mi cohésive	1520	2470	15,1	368
Moyenne	564,8	2546,6	5,11	2690,8	6,77	2616,6	<i>bonne fissuration générale plateau bien marqué (stabilité) fort niveau de déformation</i>	2127	2939	14,7	382,0
Ecart Type	68,1	295,1	0,46	323,0	0,37	404,6		1312,3	1812,9	0,3	16,3
Coef. Variation	0,12	0,12	0,09	0,12	0,06	0,15		0,62	0,62	0,02	0,04

Résorcine à joint d'épaisseur 0.1 mm

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Fmax (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	GIc (J/m ²)	GIIf (J/m ²)	Hum. Rel. (%)	μ anhydre (kg/m ³)
ER10 2.6.98 A	902	2040	3,41	2730	6,58	2730	mi interfaciale, mi dans le bois	1160	1450	14,5	419,1
ER10 2.6.98 B	700	1781	3,39	1910	4,34	1668	déviée dans bois puis rupt.substrat	790	1140	14,4	384,3
ER10 3.6.98	968	1270	1,49	1977	3,77	1977	sauts interf. Puis déviée dans bois	540	610	14,8	392,8
ER10 4.6.98 A	686	1703	2,79	1905	4,39	1905	déviée dans le bois	980	1150	15,2	370,4
ER10 4.6.98 B	435	1410	3,75	1887	6,72	1886	déviée dans le bois	1530	1820	15,1	324
ER10 5.6.98 A	954	1560	1,92	1897	3,44	1894	mi cohésive, mi déviée dans le bois	460	570	14,9	399,8
ER10 5.6.98 B	735	1668	3,08	1769	4,37	1755	déviée dans le bois	440	690	14,7	380,1
ER10 8.6.98	845	1417	1,87	1868	4,1	1868	dans le bois au dessus de l'interf.	550	630	14,7	389,9
ER10 9.6.98 A	772	1603	2,42	1892	4,11	1892	pas totalement déviée dans le bois	620	770	15,4	403
ER10 9.6.98 B	775	2069	3	2109	4,3	2099	cohésive puis déviée	720	900	14,2	374,5
Moyenne	763,3	1609	2,63	1912,7	4,39	1882,7	<i>souvent déviée dans le bois énergies difficiles à calculer plateau peu marqué (déviation)</i>	737	920	14,8	379,9
Ecart Type	159,6	236,5	0,76	91,3	0,93	122,0		343,4	401,5	0,4	23,6
Coef. Variation	0,21	0,15	0,29	0,05	0,21	0,06		0,47	0,44	0,03	0,06

Résorcine à joint d'épaisseur 0.25 mm

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Fmax (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	GIIC (J/m ²)	GIIF (J/m ²)	Hum. Rel. (%)	μ anhydre (kg/m ³)
ER25 2.6.98 A	869	2010	2,71	2200	4,28	2200	cohésive puis déviée	660	830	14,5	398,3
ER25 2.6.98 B	651	1344	2,41	2169	5,76	2159	mi interfaciale, mi dans le bois	830	970	14,5	362,9
ER25 3.6.98 A	856	1350	1,72	1585	3,57	1576	saccadée et cohésive	420	470	14,6	399
ER25 3.6.98 B	728	1426	2,11	2060	4,86	2000	cohésive puis déviée	1050	1110	15,1	375,6
ER25 4.6.98	831	1921	2,4	1921	3,37	1646	déviée dans le bois puis cohésive	410	480	14,6	389,8
ER25 5.6.98 A	769	1989	3,4	2130	5,15	2130	cohésive puis déviée	740	1070	14,1	387,1
ER25 5.6.98 B	840	1852	2,39	2040	4,09	1858	cohésive puis sauts interfaciaux	670	740	14,5	409,9
ER25 8.6.98 A	/	/	/	/	/	/	cohésive puis déviée	/	/	14,5	429,9
ER25 8.6.98 B	/	/	/	/	/	/	cohésive puis décrochage Wallace	/	/	14,9	342
ER25 9.6.98	683	1781	4,21	1892	5,53	1857	déviée dans le bois	700	1350	14,5	344,8
<i>Moyenne</i>	765,4	1666,1	2,66	1971	4,62	1889,4	<i>souvent déviée dans le bois énergies difficiles à calculer plateau peu marqué (déviation)</i>	689	884	14,6	382,3
<i>Ecart Type</i>	81,0	282,3	0,85	197,9	0,95	224,5		224,9	333,1	0,3	29,2
<i>Coef. Variation</i>	0,11	0,17	0,32	0,10	0,21	0,12		0,33	0,38	0,02	0,08

Résorcine à joint d'épaisseur 0.5 mm

Référence éprouvette	Raideur (N/mm)	Pu (N)	du (mm)	Fmax (N)	Dep max. (mm)	Fdepmax (N)	état fissuration	GIIC (J/m ²)	GIIF (J/m ²)	Hum. Rel. (%)	μ anhydre (kg/m ³)
ER50 2.6.98	/	/	/	/	/	/	déviée puis décrochage Wallace	/	/	14,7	418,1
ER50 3.6.98 A	667	1241	1,87	1774	4,92	1773	décrochage Wallace décharge	760	770	14,4	371
ER50 3.6.98 B	963	1607	2,19	2351	5,28	2351	cohésive, déviée puis décrochage Wallace	700	840	14,1	392,2
ER50 4.6.98 A	/	/	/	/	/	/	décrochage Wallace	/	/	/	/
ER50 4.6.98 B	623	1580	2,78	2260	6,41	2240	cohésive puis déviée	1480	1580	14,7	388,6
ER50 5.6.98	694	1046	1,58	1677	4,25	1662	cohésive puis déviée	410	440	14,8	376,4
ER50 8.6.98 A	878	1469	1,77	1897	4,14	1871	cohésive puis déviée	770	800	14,7	369,8
ER50 8.6.98 B	943	1370	1,48	1483	2,98	1476	cohésive puis fragile	380	400	14,9	407
ER50 9.6.98 A	811	1309	1,71	1543	3,31	1542	cohésive puis déviée	430	470	14,5	351,8
ER50 9.6.98 B	795	/	/	2110	/	/	cohésive puis déviée, problème de cibles	/	/	15	351,2
<i>Moyenne</i>	796,8	1374,6	1,91	1886,9	4,47	1845	<i>souvent déviée dans le bois énergies difficiles à calculer plateau peu marqué (déviation)</i>	704	757	14,6	376
<i>Ecart Type</i>	127,3	198,0	0,45	325,7	1,18	336,5		382,1	407,5	0,3	19,4
<i>Coef. Variation</i>	0,16	0,14	0,23	0,17	0,26	0,18		0,54	0,54	0,02	0,05

ANNEXE 10.

Méthode d'analyse de la polymérisation des adhésifs par DSC.

Un matériau, lorsqu'il est chauffé ou refroidi, est le siège de transformations affectant sa structure, sa composition chimique, sa réactivité moléculaire...

Ces transformations sont toujours accompagnées d'absorption ou de dégagement de chaleur. La mesure de ces effets thermiques par calorimétrie est donc une méthode générale d'examen des matériaux, en particulier des polymères, applicable à leur étude fondamentale ou au contrôle de leur état en cours de transformation. Ce procédé peut par conséquent être appliqué aux adhésifs durant leur polymérisation ou une fois celle-ci terminée comme processus de contrôle de l'état de polymérisation final.

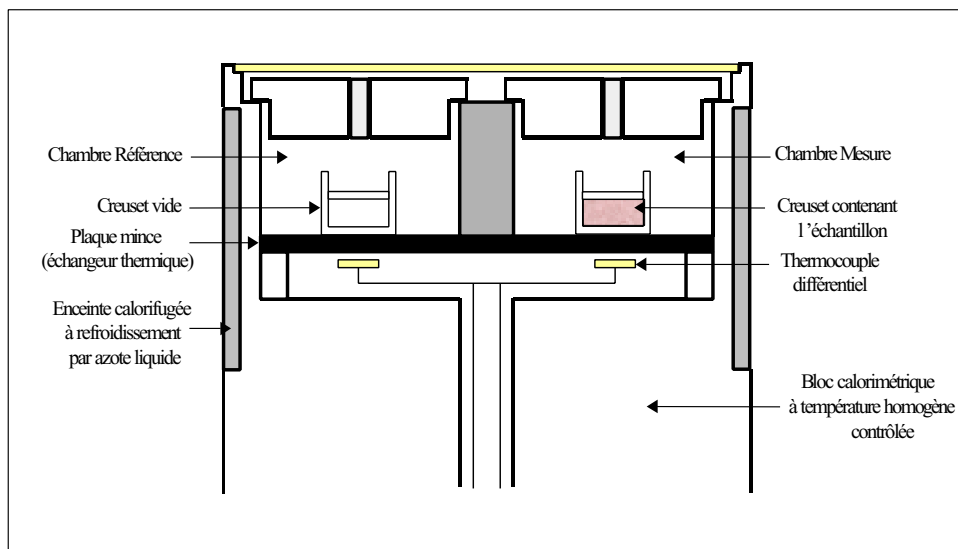


Fig. A10.1 : Coupe de l'appareil de mesure de calorimétrie différentielle DSC 141 (SETARAM)

Le D.S.C. 141 (SETARAM) se compose essentiellement d'un capteur calorimétrique et d'un ensemble électronique de régulation et de programmation de la température. La partie active du calorimètre, ou détecteur calorimétrique, est constituée de deux chambres cylindriques distinctes, creusées dans un même bloc calorimétrique à température homogène contrôlée. Dans l'axe de chacune de ces chambres à fond circulaire, un logement porte échantillon est supporté par une plaque mince : la chambre « Mesure » reçoit l'échantillon à analyser, et la chambre « Référence » un témoin inerte ou un creuset vide. La plaque sert d'échangeur thermique à conductance radiale uniforme entre l'échantillon et le bloc. Un jeu de thermocouples différentiels, placés sous la plaque permet de déterminer la différence des

flux thermiques concernant respectivement les deux creusets. Le signal résultant caractérise ainsi l'échantillon actif.

L'indépendance des chambres permet une bonne précision calorimétrique et une enceinte étanche, en verre ou en métal suivant la température d'utilisation, enveloppe le détecteur et permet le contrôle atmosphérique.

Vue la plage de température que nous nous sommes fixée, le refroidissement de la chambre se fait à l'aide d'une enceinte calorifugée à refroidissement par azote liquide (-133°C) qui permet d'une part un retour rapide à l'ambiante entre deux essais, et, d'autre part d'atteindre de très basses températures.

L'essai imposé aux échantillons est un balayage en température allant de -60°C à $+230^{\circ}\text{C}$ avec une vitesse de chauffage de 10 K/min .

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1.	7
Approches classiques d'analyse des assemblages collés.	
<u>1. Les théories de l'adhésion :</u>	10
1.1. Approche physique de l'adhésion :	10
1.1.1. <i>L'ancrage mécanique.</i>	10
1.1.2. <i>L'adhésion électrique ou électrostatique.</i>	11
1.1.3. <i>L'adhésion par interdiffusion.</i>	11
1.1.4. <i>La théorie des couches interfaciales de faible cohésion.</i>	12
1.1.5. <i>Les liaisons moléculaires.</i>	13
1.1.5.1. <i>Liaisons faibles:</i>	13
1.1.5.2. <i>Liaisons fortes:</i>	14
1.2. Approche thermodynamique et mouillabilité.	15
1.2.1. <i>Adsorption – mouillabilité.</i>	15
1.2.2. <i>Aspect rhéologique de l'adhésion.</i>	16
<u>2. L'adhérence :</u>	17
2.1. Traitements de surface du matériau bois.	18
2.2. Méthodes de caractérisation physico-chimique des surfaces et des interfaces.	20
<u>3. Durabilité des joints collés :</u>	22
3.1. Hygro thermo mécanique de l'adhésif.	22
3.2. Révélateurs d'endommagement de l'assemblage collé en service.	23
<u>4. Mesure de l'adhérence des assemblages collés :</u>	26
4.1. Procédés non destructifs de contrôle des assemblages collés :	26
4.2. Procédés destructifs de contrôle des assemblages collés :	28
4.2.1. <i>Configurations provoquant une localisation des contraintes.</i>	29
4.2.1.1. <i>L'essai de pelage :</i>	29
4.2.1.2. <i>L'essai de clivage :</i>	30
4.2.1.3. <i>Joint à simple recouvrement :</i>	31
4.2.1.3.1. <i>Approches analytiques élastiques pures :</i>	32

<u>Approche élastique linéaire :</u>	32
<u>Analyse de Goland et Reissner :</u>	34
4.2.1.3.2. <i>Approches analytiques élastoplastique, viscoélastique, viscoplastique :</i>	37
4.2.1.3.3. <i>Influence de la géométrie du joint à simple recouvrement sur ses propriétés mécaniques :</i>	40
4.2.1.4. <u>Joint aboutés :</u>	45
<u>5. Conclusion :</u>	49
CHAPITRE 2.	51
Dimensionnement par la Mécanique de la rupture des assemblages collés.	
<hr/>	
<u>1. Etude par la Mécanique de la rupture des assemblages collés :</u>	54
1.1. Mécanique Linéaire Elastique de la Rupture (MLER) :	56
1.1.1. <i>Relations fondamentales de la MLER :</i>	56
1.1.2. <i>Rupture des assemblages collés en ouverture :</i>	58
1.1.3. <i>Rupture des assemblages collés en cisaillement :</i>	61
1.2. Mécanique Non Linéaire de la Rupture (MNLR) :	63
1.2.1. <i>Relations fondamentales en élasto plasticité</i>	63
1.2.1.1. <i>Cas de la plasticité confinée : Modèle d'Irwin</i>	64
1.2.1.2. <i>Modèle de Dugdale Barenblatt</i>	64
1.2.1.3. <i>Intégrale de Rice</i>	66
1.2.2. <i>Etude des assemblages collés par la mécanique non linéaire de la rupture :</i>	67
<u>2. Spécimen d'essai :</u>	73
2.1. Notion de stabilité de fissuration en MLER.	74
2.2. Eprouvette T.D.C.B. (Tapered Double Cantilever Beam).	75
2.3. Eprouvette T.E.N.F. (Tapered End Notched specimen in Flexure).	77
2.4. Calculs numériques : Etude de la stabilité de fissuration des assemblages bois collés.	79
2.4.1. <i>Stabilité de fissuration en ouverture :</i>	81
2.4.2. <i>Stabilité de fissuration en cisaillement :</i>	84

<u>3. Calcul de l'énergie de rupture :</u>	85
3.1. Cycles de charges décharges successifs.	86
3.1.1. <i>1^{ère} étape de chargement :</i>	86
3.1.2. <i>2^{ème} étape de chargement :</i>	88
3.2. Détermination des deux types d'énergie de rupture :	89
<u>4. Conclusion :</u>	90

CHAPITRE 3. 91 **Etude expérimentale**

<u>1. Caractéristiques mécaniques des adhésifs :</u>	93
<u>2. Rupture cohésive des assemblages polyuréthane :</u>	97
2.1. Rupture cohésive observée par photoélasticité.	97
2.1.1. <i>Comportement mécanique des assemblages collés:</i>	99
2.1.2. <i>Essais de photoélasticité ; Visualisation des contraintes :</i>	100
2.1.2.1. <i>Mode I :</i>	100
2.1.2.2. <i>Mode II :</i>	101
2.1.2.3. <i>Localisation du fond de fissure et interprétation :</i>	102
2.2. Rupture cohésive en cisaillement des assemblages épicea-polyuréthane :	104
2.2.1. <i>Grandeurs énergétiques déterminées.</i>	106
2.2.2. <i>Suivi de la fissuration par acquisition d'images.</i>	108
<u>3. Rupture des assemblages bois collés.</u>	114
3.1. Essais de Mode I :	114
3.1.1. <i>Assemblages polyuréthane :</i>	115
3.1.2. <i>Assemblages résorcine :</i>	119
3.2. Essais de Mode II :	123
3.2.1. <i>Assemblages polyuréthane :</i>	123
3.2.2. <i>Assemblages résorcine :</i>	129
3.3. Cycles de charges successives :	133
<u>4. Analyse fractographique des surfaces de rupture:</u>	135
4.1. Sollicitations de Mode I :	135
4.1.1. <i>Assemblages polyuréthane :</i>	135
4.1.2. <i>Assemblages résorcine :</i>	138

4.2. Sollicitations de Mode II :	140
4.2.1. <i>Assemblages polyuréthane :</i>	140
4.2.2. <i>Assemblages résorcine :</i>	143
4.3. Observations à forts grossissements des adhésifs :	144
4.3.1. <i>Mastic polyuréthane :</i>	144
4.3.2. <i>Colle résorcine :</i>	145

5. Analyse D.S.C. : **147**

5.1. Assemblages résorcine : 147

5.2. Assemblages polyuréthane : 149

6. Conclusion : **152**

CHAPITRE 4. **155**

Application de la modélisation à la rupture des assemblages bois collés.

1. Outils numériques utilisés : **158**

1.1. Détermination des grandeurs caractéristiques de la rupture : 158

1.2. Formulation du modèle d'Ottosen : 159

 1.2.1. *Formulation mathématique du modèle :* 160

 1.2.2. *Paramètres physiques du modèle :* 166

 1.2.2.1. *Le coefficient G_f :* 166

 1.2.2.2. *Le coefficient G_s :* 166

 1.2.2.3. *Signification et calcul du paramètre de taille :* 167

2. Spécimen massif de colle : **168**

2.1. Modèle élasto plastique parfait : 169

2.2. Modèle d'Ottosen : 171

3. Assemblages Bois collés : **175**

3.1. Influence des défauts sur la rupture des assemblages collés ;
hypothèses des milieux élastiques linéaires. 176

 3.1.1. *Sollicitation de Mode I* 177

 3.1.1.1. *Adhésif résorcine :* 177

 3.1.1.2. *Adhésif polyuréthane :* 177

 3.1.2. *Sollicitation de Mode II* 178

 3.1.2.1. *Adhésif résorcine :* 178

 3.1.2.2. *Adhésif polyuréthane :* 178

 3.1.3. *Réseau de micro fissures dans le joint de colle* 179

3.1.3.1. <i>Sollicitation de Mode I :</i>	180
3.1.3.2. <i>Sollicitation de Mode II :</i>	180
3.2. Application du modèle d'Ottosen au joint polyuréthane sollicité en Mode I.	182
3.2.1. <i>Influence de l'épaisseur du joint sur la localisation de l'endommagement.</i>	183
3.2.2. <i>Evolution de l'endommagement dans le joint au cours du chargement.</i>	185
3.3. Application du modèle d'Ottosen au joint polyuréthane sollicité en Mode II.	188
<u>4. Conclusion :</u>	191
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	193
<hr/>	
<i>ANNEXES</i>	197
<hr/>	
Annexe 1 : Processus expérimental	199
Annexe 2 : Résultats des essais d'ouverture et de cisaillement réalisés sur les spécimens massifs en épicea	206
Annexe 3 : Caractéristiques mécaniques des adhésifs étudiés	207
Annexe 4 : Essais complémentaires réalisés sur l'adhésif polyuréthane	212
Annexe 5 : Photoélasticimétrie	214
Annexe 6 : Résultats des essais de rupture en cisaillement de spécimens collés polyuréthane à joint d'épaisseur 0.25 mm	216
Annexe 7 : Assemblages épicea collés sollicités en ouverture : Résultats expérimentaux	218
Annexe 8 : Assemblages épicea collés résorcine à joint 0.1 mm d'épaisseur sollicités en ouverture.	221
Annexe 9 : Assemblages épicea collés sollicités en cisaillement : Résultats expérimentaux	222
Annexe 10 : Méthode d'analyse de la polymérisation des adhésifs par DSC	225
<i>REFERENCES</i>	227
<hr/>	

Résumé

Une approche par la Mécanique de la Rupture du comportement mécanique des joints collés a été retenue dans ce travail en privilégiant une approche non linéaire mettant en évidence les phénomènes d'endommagement se produisant dans l'adhésif avant la rupture de l'assemblage. Une étude numérique préalable a abouti à la détermination d'un spécimen d'essai produisant une fissuration stable des assemblages bois collés sous sollicitation d'ouverture ou de cisaillement. L'étude du comportement mécanique des adhésifs étudiés a montré qu'une observation de la rupture cohésive de l'assemblage peut être un bon moyen d'appréhender le comportement d'un adhésif sous la forme d'un joint de colle. Ce type de rupture est étudié à l'aide de diverses techniques expérimentales telles que suivi de la fissuration par acquisition et traitement d'images, photoélasticimétrie, analyse fractographique des surfaces fissurées et analyse DSC des adhésifs polymérisés. A la lumière de toutes ces observations expérimentales, une étude plus systématique a été menée afin de quantifier la sensibilité de l'adhésif à la sollicitation appliquée (ouverture ou cisaillement) ou à l'épaisseur du joint et de lier les grandeurs à rupture déterminées en fonction du type de rupture observé : cohésive, adhésive, dans l'interphase ou déviée dans le bois. Une modélisation du comportement mécanique des éprouvettes de colle massive puis des assemblages bois collés a ainsi été développée grâce au code de calcul Castem 2000. L'application d'un modèle d'endommagement diffus de l'adhésif (Smearred Crack Approach) dans la description des phénomènes expérimentalement observés permet une bonne simulation du comportement des éprouvettes de colle massive mais s'avère insuffisante dans le cas des assemblages bois collés. Toutefois, ce travail numérique permet d'identifier les mécanismes potentiels de rupture des joints collés fournissant ainsi un cadre plus rigoureux à des études ultérieures.

Mots clés : *Mécanique non linéaire de la rupture, rupture cohésive, joints collés, Mode I et II.*

Abstract :

Mechanical behaviour of wood bonded joints has been studied with non linear fracture mechanics approach focusing on damage occurring in the adhesive joint before specimen failure.

From numerical study of one specimen type especially designed to give stable crack propagation in the joint for Mode I and Mode II loading and bulk adhesive specimen failure, efforts were focused on the cohesive failure of wooden adhesive joints because such a crack propagation path may provide a good way to study the mechanical behaviour of the adhesive as a joint. Such a crack propagation path has been experimentally studied with an high magnification video camera, photoelasticity, SEM observations of the cracked surfaces and DSC analysis of the adhesive joint. Then, the sensitivity of the adhesive to the joint thickness and to the loading mode has been studied to link all the results to the crack propagation path (cohesive, adhesive, deviated into wood or into the interphase). Numerical calculations have been performed for the bulk adhesive specimen and wooden adhesive joints with a finite element code (CASTEM 2000) assuming that the bond line displays a softening behaviour (Smearred Crack Approach). The predictions of the non linearity of load displacement relation and the crack path of our model are in fair agreement with the experimental results for the bulk adhesive specimen. In case of wooden adhesive joints, calculations give only qualitative results on the damage occurring in the joint for a cohesive failure.



Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux
Domaine de l'Hermitage, BP n°10 – Pierroton
33610 CESTAS-GAZINET