

RESUME

Une tendance actuelle dans notre société est la préservation du patrimoine bâti, ce qui inclut en particulier la réhabilitation des ouvrages anciens en bois. Le matériau bois est très sensible aux variations des conditions de service et le maintien de l'intégrité des structures nécessite des interventions de réparation/renforcement. Celles-ci ont recours, depuis une trentaine d'années, à la technique du collage structural.

Cette technique consiste en l'adjonction, en surface ou à l'intérieur des éléments bois altérés, de profils acier ou composite maintenus au moyen de résine. Ceux-ci, selon le degré de détérioration de l'élément original en bois, participent ou assurent intégralement la transmission des efforts mécaniques. Eprouvée en pratique, la confiance à accorder à ce type d'intervention reste à démontrer d'un point de vue plus théorique. Les approches de conception permettant aux professionnels de valider leurs interventions restent en effet à ce jour très clairsemées.

Les travaux présentés dans cet ouvrage s'évertuent à combler certaines zones d'ombre. En aval de larges études concernant les classiques goujons acier collés, ils s'emploient à améliorer les approches de calcul existantes afin de contribuer à leur acceptation en tant que règles de dimensionnement de l'Eurocode 5. En amont des recherches sur les méthodologies d'intervention moins répandues (plats, matériaux composites), ils s'attachent à démontrer la pertinence de certaines d'entre elles et à établir les fondements, analytiques et expérimentaux, utiles à la caractérisation mécanique des autres.

MOTS CLES

Bois, Résistance mécanique, Renforcement, Réparation, Collage structural, Goujons, Plats

SUMMARY

A current trend in modern societies is to preserve building of the cultural heritage and especially to rehabilitate old timber structures. Timber elements are particularly sensitive to the variations of service conditions and their integrity must be ensured by performing reinforcements and repairs. Structural gluing is often the best method to carry out such operations.

This method consists in gluing rigid materials at the surface or into the timber elements. Depending on the wood deterioration level, forces are partially or integrally transmitted by the bonded (in) components. The performance of these interventions has been validated for a practical use but must now be proved by theoretical approaches. Calculation methods available for practising professionals are effectively quite rare and unachieved.

This work aims at completing the knowledge on glued joint design. Improvements are proposed for the prediction of the steel rod based repair load carrying capacities. The ultimate goal is to include glued-in rods into the Eurocode 5. Concerning other joint configurations (plates, composite materials), the viability of some particular joint details has been theoretically demonstrated and an experimental and analytical database has been provided for further investigations.

KEY WORDS

Timber, Load carrying capacity, Reinforcement, Repair, Structural gluing, Rods, Plates

N° d'ordre : 3073

THÈSE

PRÉSENTÉE À

L'UNIVERSITE BORDEAUX I

PAR

Vincent GARDELLE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : SCIENCES DU BOIS

MÉCANIQUE DES ASSEMBLAGES ET RENFORTS COLLÉS EN CONSTRUCTION BOIS

Soutenue le :

Vendredi 25 novembre 2005

Après avis de MM :

Francis COLLOMBET
Patrick RACHER

Rapporteurs

Devant la Commission d'examen formée de MM. :

Gérard VALENTIN

Professeur, Université Bordeaux 1

Président

Francis COLLOMBET
Patrick RACHER
Paolo LAVISCI
Pierre MORLIER

Professeur, Université Paul Sabatier, Toulouse
Maître de Conférences, Université Blaise Pascal, Clermont F^d
Docteur, Legno'piu SNC, Firenze, Italie
Professeur Emérite, Université Bordeaux 1

Et révisée conformément aux directives de M.

Gérard VALENTIN

Rapporteur de soutenance

| |
|----------------------|
| REMERCIEMENTS |
|----------------------|

Je tiens à remercier tout particulièrement les personnes suivantes sans lesquelles les travaux décrits dans cet ouvrage présenteraient un bien moindre état d'avancement.

Monsieur **PIERRE MORLIER**, tuteur de cette thèse, dont les conseils, l'expérience et l'enthousiasme m'ont permis de m'épanouir pleinement dans le petit monde de la "recherche en génie civil bois" et d'y progresser aussi bien à titre professionnel que personnel.

Monsieur **DAVE SMEDLEY**, dirigeant de l'entreprise Rotafix Ltd et coordinateur du projet européen LICONS, dont le soutien intellectuel, matériel et humain fut des plus assidu.

Mademoiselle **JULIETTE SURLEAU** et Monsieur **JEAN-LUC COUREAU**, auteurs au LRBB de recherches sur les assemblages et renforts collés en construction bois, dont les connaissances, la disponibilité et l'amitié m'ont été et me restent très précieuses.

Messieurs **FRANCIS COLLOMBET**, **GERARD VALENTIN**, **PAOLO LAVISCI** et **PATRICK RACHER**, en charge de l'évaluation de ce travail, dont les remarques, critiques et approbations furent à la fois pertinentes, franches et cordiales.

Les membres du **LRBB** et du projet européen **LICONS** pour les moments de travail, de rires et de détente vécus ensemble.

Mes parents, **MICHELLE & JEAN-MICHEL**, qui ont systématiquement fait leurs mes objectifs et dont les encouragements furent constants tout au long de mes études.

MAUDE, qui a partagé d'on ne peut plus près les moments de doutes, de routine et de joies inhérents à la préparation d'une thèse.

| |
|---------------------------|
| TABLE DES MATIERES |
|---------------------------|

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION..... | 1 |
| PARTIE I: LES ASSEMBLAGES ET RENFORTS COLLES EN CONSTRUCTION BOIS | 5 |
| I.1. Nécessité d’assembler, de réparer ou de renforcer les éléments de structure bois..... | 5 |
| I.1.1. Assembler ou renforcer des éléments de structures neuves en bois..... | 5 |
| a) <i>Définition d’une structure bois.....</i> | <i>5</i> |
| b) <i>Utilisations nécessitant un renforcement des éléments bois</i> | <i>6</i> |
| I.1.2. Réparer ou renforcer des éléments de structures anciennes en bois | 7 |
| a) <i>Pathologies des éléments de structures anciennes en bois.....</i> | <i>7</i> |
| b) <i>Rupture différée du bois</i> | <i>9</i> |
| I.2. Le collage structural pour les assemblages, réparations ou renforcements d’éléments de structures bois : Présentation et intérêts | 9 |
| I.2.1. Assemblages, réparations et renforcements abordés..... | 9 |
| a) <i>Les assemblages collés</i> | <i>9</i> |
| b) <i>Les réparations collées.....</i> | <i>11</i> |
| c) <i>Les renforcements collés.....</i> | <i>12</i> |
| d) <i>Lien entre assemblages, réparations et renforcements</i> | <i>14</i> |
| I.2.2. Intérêt du collage structural pour ce type d’intervention | 14 |
| a) <i>L’esthétisme</i> | <i>14</i> |
| b) <i>La souplesse d’intervention.....</i> | <i>14</i> |
| c) <i>Le coût de l’intervention.....</i> | <i>15</i> |
| I.3. Spécificité des composants et de la zone d’intervention..... | 16 |
| I.3.1. Les connecteurs et renforts..... | 16 |
| I.3.2. L’adhésif..... | 17 |
| I.3.3. L’élément bois..... | 18 |
| I.3.4. Comportement global de l’assemblage ou du renforcement..... | 20 |
| I.4. Validation de ce type d’assemblage, état de la normalisation | 20 |
| I.4.1. Les exigences vis-à-vis d’un assemblage ou d’un renforcement collé | 20 |
| a) <i>La résistance mécanique</i> | <i>20</i> |
| b) <i>Exigence de durée de vie</i> | <i>21</i> |
| c) <i>Exigence de résistance aux actions accidentelles : stabilité au feu</i> | <i>22</i> |
| I.4.2. Etat de la normalisation / démarche qualité | 23 |
| a) <i>Etat de la normalisation</i> | <i>23</i> |
| b) <i>Nécessité d’une démarche qualité</i> | <i>23</i> |
| I.5. Limites de la présente étude..... | 24 |

| | | |
|--|---|-----------|
| I.5.1. | Aspect mécanique | 24 |
| I.5.2. | Résistance instantanée..... | 24 |
| I.5.3. | Renforcements locaux dans le sens du fil | 24 |
| I.5.4. | Un comportement fragile de l'assemblage..... | 25 |
| PARTIE II: ASPECTS SCIENTIFIQUES ET APPROCHES DE DIMENSIONNEMENT..... | | 27 |
| II.1. | Les facteurs conditionnant la résistance d'un assemblage par goujons collés..... | 27 |
| II.1.1. | Les paramètres géométriques | 27 |
| a) | <i>La longueur d'ancrage des goujons collés.....</i> | 27 |
| b) | <i>Le diamètre du goujon.....</i> | 27 |
| c) | <i>L'épaisseur du joint de colle / le diamètre de perçage.....</i> | 28 |
| d) | <i>Distance à l'extrémité de l'élément / entraxe entre goujons</i> | 28 |
| II.1.2. | Les paramètres mécaniques | 28 |
| a) | <i>Les modules élastiques</i> | 28 |
| b) | <i>Les résistances mécaniques</i> | 28 |
| c) | <i>Les lois de comportement</i> | 28 |
| II.1.3. | Schémas récapitulatifs : paramètres géométriques et mécaniques | 29 |
| II.1.4. | Les conditions d'essai..... | 30 |
| a) | <i>Conditions limites de l'essai.....</i> | 30 |
| b) | <i>Conditions environnementales</i> | 30 |
| II.1.5. | Les détails constructifs | 30 |
| a) | <i>Le nombre de goujons.....</i> | 30 |
| b) | <i>Le type de goujon.....</i> | 31 |
| c) | <i>L'angle par rapport au fil du bois</i> | 31 |
| II.2. | Les modes de rupture envisageables | 31 |
| II.2.1. | Rupture en cisaillement d'une interface | 32 |
| a) | <i>Rupture en cisaillement de l'interface goujon/adhésif.....</i> | 32 |
| b) | <i>Rupture en cisaillement de l'interface adhésif/bois</i> | 33 |
| II.2.2. | Rupture de l'un des matériaux constitutifs de l'assemblage | 33 |
| a) | <i>Rupture des goujons</i> | 33 |
| b) | <i>Rupture dans le joint de colle</i> | 34 |
| c) | <i>Rupture dans le bois</i> | 35 |
| II.3. | Bases de données expérimentales disponibles | 37 |
| II.3.1. | Campagne expérimentale réalisée au CTBA [31] [32] [33]..... | 38 |
| a) | <i>Facteurs d'influence étudiés.....</i> | 38 |
| b) | <i>Facteurs maintenus constants</i> | 38 |
| c) | <i>Conditions particulières d'essai (dimensions structurales) (Fig. 29, Fig. 30).....</i> | 38 |
| d) | <i>Charges et modes de rupture obtenus (Tab. 8, Tab. 9).....</i> | 39 |
| e) | <i>Principaux enseignements</i> | 40 |
| II.3.2. | Thèse de J. Surleau [14]..... | 40 |
| a) | <i>Facteurs d'influence étudiés.....</i> | 40 |
| b) | <i>Facteurs maintenus constants</i> | 41 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| c) | <i>Conditions particulières d'essai (Fig. 31)</i> | 41 |
| d) | <i>Contraintes moyennes et modes de rupture (Tab. 10)</i> | 41 |
| e) | <i>Principaux enseignements</i> | 42 |
| II.3.3. | Campagne expérimentale GIROD | 42 |
| a) | <i>Facteurs d'influence étudiés</i> | 43 |
| b) | <i>Facteurs maintenus constants</i> | 43 |
| c) | <i>Contraintes moyennes à la rupture (Tab. 11, Tab. 12, Tab. 13)</i> | 43 |
| d) | <i>Principaux enseignements</i> | 44 |
| II.3.4. | Travaux expérimentaux de E. Serrano [29] | 45 |
| a) | <i>Facteurs d'influence étudiés</i> | 45 |
| b) | <i>Facteurs maintenus constants</i> | 45 |
| c) | <i>Conditions particulières d'essai (Fig. 32)</i> | 45 |
| d) | <i>Résultats expérimentaux (Tab. 14)</i> | 46 |
| e) | <i>Principaux enseignements</i> | 46 |
| II.3.5. | Campagne expérimentale de L. Féligioni [36] [37] | 47 |
| a) | <i>Facteurs d'influence étudiés</i> | 47 |
| b) | <i>Facteurs maintenus constants</i> | 47 |
| c) | <i>Conditions particulières d'essai (Fig. 33)</i> | 47 |
| d) | <i>Charges et modes de rupture (Tab. 15)</i> | 48 |
| e) | <i>Principaux enseignements</i> | 48 |
| II.3.6. | Campagne expérimentale de H.J. Blass [38] | 48 |
| a) | <i>Facteurs d'influence étudiés</i> | 49 |
| b) | <i>Facteurs maintenus constants</i> | 49 |
| c) | <i>Conditions d'essai particulières (Fig. 34)</i> | 49 |
| d) | <i>Charges et modes de rupture (Tab. 16, Tab. 17, Tab. 18)</i> | 49 |
| e) | <i>Principaux enseignements</i> | 51 |
| II.4. | Approches prédictives disponibles | 51 |
| II.4.1. | Rupture en cisaillement de l'adhésif | 51 |
| a) | <i>Approches élastiques concernant l'assemblage à double recouvrement</i> | 52 |
| b) | <i>Approche de P.J. Gustafsson [43] par la Mécanique Non Linéaire de la Rupture</i> | 57 |
| c) | <i>La théorie élastique de O. Volkersen, un cas particulier de l'approche Mécanique Non Linéaire de la Rupture de P.J. Gustafsson</i> | 60 |
| d) | <i>Adaptation de la théorie de P.J. Gustafsson aux goujons collés</i> | 61 |
| e) | <i>Les approches empiriques</i> | 63 |
| II.4.2. | Rupture du goujon | 65 |
| a) | <i>Cas d'un effort axial</i> | 65 |
| b) | <i>Cas d'un effort latéral</i> | 65 |
| II.4.3. | La fissuration du bois due à la traction transverse | 66 |
| II.4.4. | Autres types de rupture affectant le bois | 67 |
| II.5. | Approches de dimensionnement disponibles | 67 |
| II.5.1. | Goujons sollicités axialement, rupture au niveau du goujon ou du joint d'adhésif | 67 |
| a) | <i>Simplification de la formule de P.J. Gustafsson</i> | 67 |

| | | |
|---|--|-----------|
| b) | <i>Formule empirique du guide professionnel français</i> | 69 |
| c) | <i>Intégration d'une rupture possible du goujon</i> | 69 |
| d) | <i>Comparaison aux grandeurs expérimentales concernant l'époxy</i> | 70 |
| II.5.2. | Rupture par fissuration du bois (R6b, R10a)..... | 72 |
| a) | <i>Goujon inséré parallèlement au fil et sollicité latéralement</i> | 73 |
| b) | <i>Goujon inséré perpendiculairement au fil et sollicité axialement</i> | 75 |
| II.5.3. | Conclusion sur les approches de dimensionnement disponibles | 75 |
| | | |
| PARTIE III: RESISTANCE À COURT TERME D'UN GOUJON COLLE INSERE PARALLELEMENT AU FIL DU BOIS ET SOLLICITE AXIALEMENT | | 77 |
| | | |
| III.1. | Hypothèses et outils développés pour l'étude | 77 |
| III.1.1. | Hypothèses | 77 |
| a) | <i>Un assemblage élémentaire</i> | 77 |
| b) | <i>Les modes de rupture concernant le bois</i> | 77 |
| c) | <i>Une rupture fragile de l'assemblage</i> | 78 |
| d) | <i>Les paramètres géométriques</i> | 78 |
| e) | <i>Support de l'étude</i> | 78 |
| III.1.2. | Modélisation par éléments finis en élasticité linéaire | 78 |
| | | |
| III.2. | Encadrement théorique de la résistance expérimentale de l'assemblage | 80 |
| III.2.1. | Encadrement des résultats expérimentaux issus de GIROD | 80 |
| a) | <i>Utilisation des formules théoriques issues de GIROD</i> | 80 |
| b) | <i>Validation du modèle élastique éléments finis</i> | 81 |
| c) | <i>Utilisation du modèle éléments finis et confrontation des prédictions aux résultats expérimentaux de GIROD pour l'époxy</i> | 82 |
| III.2.2. | Encadrement des essais réalisés au CTBA..... | 84 |
| III.2.3. | Discussion | 84 |
| | | |
| III.3. | Détermination du volume de bois contraint aux alentours d'un goujon collé | 85 |
| III.3.1. | Description des contraintes mécaniques dans l'assemblage | 86 |
| III.3.2. | Augmentation de la distance à l'arête de l'élément "a ₂ " | 87 |
| III.3.3. | Estimation de la section efficace de bois autour d'un goujon collé | 88 |
| a) | <i>Observation numérique</i> | 88 |
| b) | <i>Travaux analytiques</i> | 89 |
| c) | <i>Comparaison des approches numériques et analytiques</i> | 90 |
| d) | <i>Validité de l'approche analytique dans le cas général</i> | 91 |
| III.3.4. | Comparaison aux travaux de H.J. Blass et règles de dimensionnement..... | 91 |
| a) | <i>Travaux expérimentaux de H.J. Blass</i> | 91 |
| b) | <i>Projets de règlement</i> | 92 |
| | | |
| III.4. | Résistance au cisaillement de l'interface adhésif/bois | 93 |
| III.4.1. | Problématique..... | 93 |
| III.4.2. | Détermination des contraintes d'ouverture | 94 |

| | | |
|---|--|------------|
| a) | <i>Vérification des prédictions du modèle élastique éléments finis</i> | 94 |
| b) | <i>Contraintes d'ouverture dans les conditions d'essai de L. Féligioni</i> | 97 |
| c) | <i>Perspectives d'une résolution de l'équation de II.4.1.a)</i> | 98 |
| III.4.3. | Impact de la géométrie de l'assemblage sur la résistance en cisaillement de l'interface adhésif/bois | 99 |
| a) | <i>Influence du diamètre du perçage</i> | 99 |
| b) | <i>Vérification au moyen de l'approche GIROD</i> | 100 |
| III.5. | Perspectives ouvertes par ces résultats | 101 |
| III.5.1. | Une base de données expérimentales allégée..... | 101 |
| III.5.2. | Prédiction de la charge de rupture des éprouvettes GIROD | 102 |
| a) | <i>Correction de la formule simplifiée de GIROD</i> | 102 |
| b) | <i>Confrontation aux résultats expérimentaux</i> | 103 |
| PARTIE IV: APPROCHE EXPERIMENTALE DES AUTRES CAS D'ASSEMBLAGE..... | | 105 |
| IV.1. | Matériel et methode | 105 |
| IV.1.1. | Géométrie des assemblages testés..... | 105 |
| IV.1.2. | Matériaux employés | 107 |
| IV.1.3. | Les essais réalisés..... | 108 |
| IV.1.4. | Machine d'essai et dispositifs de mesure | 110 |
| a) | <i>Machine d'essai</i> | 110 |
| b) | <i>Dispositifs de mesure</i> | 111 |
| c) | <i>Les capteurs potentiométriques développés</i> | 111 |
| d) | <i>Disposition des capteurs potentiométriques</i> | 112 |
| IV.2. | Charges, déplacements et modes de rupture | 113 |
| IV.2.1. | Un positionnement différent selon l'angle de réalisation de l'assemblage | 113 |
| IV.2.2. | Charges et flèches à la rupture | 114 |
| a) | <i>Résultats des essais de flexion quatre points</i> | 114 |
| b) | <i>Résultats des essais de flexion trois points</i> | 116 |
| IV.2.3. | Modes de rupture..... | 117 |
| a) | <i>Essais de flexion quatre points</i> | 117 |
| b) | <i>Essais de flexion trois points</i> | 119 |
| IV.2.4. | Déplacements dans la zone d'assemblage..... | 121 |
| a) | <i>Intérêt de capteurs économiques</i> | 121 |
| b) | <i>Déplacements mesurés</i> | 121 |
| IV.3. | Exploitation des résultats | 122 |
| IV.3.1. | Rigidités des poutres réparées | 122 |
| IV.3.2. | Comparaison acier/composite | 124 |
| IV.3.3. | Comparaison goujons/plats | 124 |
| IV.3.4. | Assemblages chargés latéralement..... | 125 |
| a) | <i>Rupture par fissuration du bois</i> | 125 |

| | |
|---|------------|
| b) Comparaison de la résistance des assemblages à 45 et à 90 degrés..... | 127 |
| c) Exploitation des déplacements mesurés par les potentiomètres linéaires..... | 128 |
| d) Apport d'un assemblage à 45 degrés | 129 |
| IV.3.5. Joint de continuité à la résine | 130 |
| PARTIE V: APPROCHES ANALYTIQUES ORIGINALES | 131 |
| V.1. Réalisation de perçages lamés..... | 131 |
| V.1.1. Intérêt de perçages lamés..... | 131 |
| V.1.2. Constat expérimental | 132 |
| V.1.3. Observations numériques | 133 |
| V.1.4. Approche analytique..... | 134 |
| V.1.5. Comparaison des approches expérimentales, numériques et analytiques..... | 136 |
| V.1.6. Perspectives | 137 |
| V.2. Renforcement d'un élément bois | 138 |
| V.2.1. Renforcement local..... | 138 |
| a) Configuration de référence retenue..... | 138 |
| b) Rigidité équivalente en flexion de l'élément..... | 139 |
| c) Vérification analytique du cisaillement dans le joint d'adhésif | 139 |
| d) Vérification numérique du cisaillement dans le joint d'adhésif..... | 141 |
| e) Comparaison des prédictions numériques et analytiques | 143 |
| V.2.2. Renforcement global | 146 |
| CONCLUSION..... | 147 |
| BIBLIOGRAPHIE | 149 |
| RESUME..... | 156 |
| MOTS CLES..... | 156 |
| SUMMARY..... | 156 |
| KEY WORDS | 156 |

INTRODUCTION

Evoluant dans un monde résolument tourné vers l'avenir, les hommes n'en éprouvent pas moins le besoin de conserver quelques bribes, matérielles ou immatérielles, de leur passé. Si certains de ces héritages sont préservés en marge des activités du moment, d'autres, tel le patrimoine bâti, trônent au cœur de cette agitation ambiante et doivent se plier à de nouvelles exigences. Parmi celles-ci figure une exigence de fiabilité face aux diverses contraintes en vigueur: environnementales (variations climatiques, attaques biologiques), mécaniques (charges permanentes, charges d'exploitation), réglementaires (évolution des règlements) ou accidentelles (incendies, séismes). Les éléments en bois ne dérogent pas à cette règle. Présents dans les bâtiments depuis plus ou moins longtemps, dans des structures plus ou moins complexes, ils se doivent eux aussi de s'adapter aux sollicitations actuelles. A cette nécessité répondent les activités de renforcement et de réparation des structures anciennes en bois. Du remplacement à l'identique ou de l'adjonction de renforts en surface, celles-ci ont également évolué et ont désormais recours à la technologie plus discrète du collage structural. Cette dernière évolution des procédés d'intervention constitue la thématique de cet ouvrage.

Le travail réalisé s'inscrit dans un contexte de fiabilité. Celle-ci se définit de la manière suivante. Il s'agit de la "probabilité de fonctionnement sans défaillance d'un dispositif dans des conditions spécifiées et pendant une période de temps déterminée". Le dispositif sera d'autant plus fiable que la probabilité sera haute c'est-à-dire proche de 1. Cette définition doit être sensiblement modifiée pour une application en construction. Si les notions de "conditions spécifiées" et de "période de temps déterminée" se prêtent bien à ce propos, une probabilité autre que 1 ne peut être acceptable pour une structure d'utilisation ne serait-ce que ponctuelle. Les coefficients et hypothèses sécuritaires, innombrables en conception, agissent bien évidemment en ce sens. Dans cet ouvrage, une intervention de réparation/renforcement et les approches de dimensionnement correspondantes seront qualifiées de fiables dès lors qu'elles répondront de façon optimale aux exigences initiales.

Parmi les exigences évoquées, la résistance mécanique fait ici l'objet d'une attention toute particulière. Il s'agit de déterminer l'état mécanique des zones réparées ou renforcées via la technologie du collage structural et de le comparer au niveau de sollicitation admissible par chacun des matériaux ou par chacune des interfaces en présence. Vis-à-vis des notions de "période de temps" et de "conditions spécifiées" figurant dans la définition de la fiabilité, des délimitations ont été établies pour cette étude. Concernant l'exigence de durée de vie, le comportement mécanique à long terme de telles interventions a été simultanément abordé au Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux (LRBB) par J. Surleau, il ne sera par la suite qu'évoqué. Concernant les conditions d'intervention, les travaux rapportés portent essentiellement sur des renforcements ou des réparations réalisés selon l'axe des éléments c'est-à-dire parallèlement au fil du bois. Là encore, des recherches ont d'ores et déjà été menées, au sein de notre laboratoire, par J.L. Coureau sur le renforcement selon la direction perpendiculaire au fil du bois. Plus synthétiquement, l'objet de ce doctorat est d'établir la résistance instantanée d'éléments bois réparés ou renforcés selon la direction du fil et via la technique du collage structural.

Par réaction aux enjeux sociaux précités, ce type d'interventions est désormais en plein essor. Il reste cependant l'apanage d'un petit nombre de spécialistes pour la plupart impliqués

dans les projets de recherche et développement liés à cette thématique. Leur proximité a permis un inventaire concerté de leurs activités, de leurs acquis et de leurs besoins. Les méthodologies retenues sont généralement cohérentes et bien maîtrisées. Il s'agit d'insérer, dans des saignées ou des perçages, des profils (plats, goujons) rigides (acier, composites) dans l'élément et de les maintenir au moyen de résine. Si ces pratiques sont en constante évolution, les moyens utiles à leur validation (procédures de diagnostic, conception, mise en œuvre, contrôle, suivi, qualité) accusent un certain retard. Le projet européen LICONS (Low Intrusion CONservation Systems for timber structures) a pour ambition de combler ces lacunes (Partie 1). Les outils de conception disponibles sont, en particulier, très limités et ne constituent pas des règlements à part entière. Les assemblages par goujons collés, pourtant classiques, ont fait l'objet de larges travaux théoriques, numériques et expérimentaux qui ont permis d'en déterminer les paramètres influents et les modes de rupture probables. Les approches de dimensionnement découlant de ces travaux n'ont pourtant pas été reconnues d'un point de vue réglementaire. Les autres géométries de renforcement ou réparation n'ont, quant à elles, que très peu été abordées (Partie 2).

Le cas particulier des goujons collés étant le plus avancés en terme d'approches de dimensionnement, il a été jugé opportun de tout d'abord revenir sur le refoulement systématique de ces dernières par les organismes normalisateurs et d'en analyser les raisons. La proposition du projet européen GIROD (Glued-In ROD for timber structures), qui vise à établir la résistance instantanée de goujons collés sous chargement axial en vue de leur introduction dans l'Eurocode 5, constitue une base de travail pour le moins intéressante. Un retour aux fondements théoriques de la formulation proposée ainsi qu'une analyse de la méthode de calibration employée se sont avérés nécessaires quant à l'estimation de sa pertinence. Ce travail de fond a fait l'objet de deux publications ^(I) ^(II) et d'une présentation par poster ^(II). Parmi les grandeurs mises en jeu dans cette approche, la résistance au cisaillement de l'adhésif s'est avérée déterminante. Une analyse approfondie des bases de données expérimentales disponibles a permis de déceler une dépendance de ce paramètre vis-à-vis de certaines caractéristiques géométriques de l'assemblage. Quelques considérations originales portant sur la zone effectivement sollicitée autour d'un goujon collé et sur les contraintes d'ouverture à l'interface adhésif/bois ont ainsi permis de mettre en évidence une influence prononcée du diamètre de perçage et de corriger l'approche initiale de GIROD afin d'en améliorer la fiabilité (Partie 3). Ces derniers développements ont fait l'objet d'un article actuellement entre les mains d'un comité de lecture ^(III).

Un autre profil de renfort (plat), un autre cas de charge (axiale + latérale) ainsi qu'un autre type de réparation (jonction à 45°) ont ensuite été abordés dans le cadre de la campagne expérimentale de LICONS. L'assemblage classique par goujons collés, largement abordé dans les deux parties précédentes, a été choisi comme assemblage témoin dans le cadre de cette vaste étude comparative. Ont été confrontées des réparations à connecteurs aciers ou composites, usant de plats ou de goujons, sous sollicitations axiales ou latérales, présentant des jonctions à 45° ou 90°. Outre la constitution d'une large base de données expérimentales, ce programme d'étude a permis de se prononcer quant à la pertinence de certains détails constructifs, en particulier quant à celle des jonctions à 45°. Il a en outre servi de support au développement, dans notre laboratoire, de toute une gamme de capteurs potentiométriques, à la fois économiques et précis, dont les applications sont multiples en diagnostic ou surveillance des structures (Partie 4). Les principaux résultats de ces travaux ont fait l'objet d'une publication ^(IV) et d'une communication orale.

Deux approches analytiques originales ont finalement été proposées pour répondre à des cas pratiques. La première concerne l'amélioration de la résistance à l'arrachement des goujons collés par la réalisation de perçages lamés. Elle permet la détermination de la profondeur de lamage optimale et l'estimation du gain de résistance engendré. Validée par les résultats numériques et expérimentaux de J.G. Broughton d'Oxford Brookes University (OBU), elle a fait l'objet d'une publication commune^(V) et d'une présentation par poster. La seconde concerne le renforcement local d'élément bois fléchis au moyen de plats collés. Elle décrit, dans le cas d'une zone renforcée de petite taille devant les dimensions de l'élément, la distribution des contraintes de cisaillement dans l'adhésif. Vérifiée numériquement et aisément transposable à d'autres géométries de renforcement, son développement en vue d'une utilisation en dimensionnement passe maintenant par une confrontation à des résultats expérimentaux.

(I) **V. GARDELLE, P. MORLIER.** "*Les assemblages par goujons collés, Partie II : Prédiction de la résistance à l'arrachement d'un goujon collé parallèle au fil du bois*" Annales GC Bois, pp 31-52, Volume 7, 2004.

(II) **V. GARDELLE, P. MORLIER.** "*Mechanical modelling of glued-in rods in timber structures*" 7th European Adhesion Conference EURADH 2004, Volume 2: Book of abstracts for Poster Presentations, pp 519-524, Freiburg im Breisgau, Germany, 2004.

(III) **V. GARDELLE, P. MORLIER.** "*Geometrical parameters involved in the short term resistance of an axially loaded glued-in rod*", soumis à "*Materials and Structures*", évaluation en cours, 2005.

(IV) **V. GARDELLE, P. MORLIER, D. SMEDLEY.** "*Ultimate strength of timber beams repaired with glued-in composite rods and plates*", Composites in Construction 2005 – Third International Conference, pp 299 - 306, Lyon, France, 2005.

(V) **J.G. BROUGHTON, V. GARDELLE.** "*An analytical method for the determination of end-of-hole profiling in bonded-in rod connections for structural timber*", Ninth International Conferences on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives, Oxford, United Kingdom, 2005.

PARTIE I:
LES ASSEMBLAGES ET RENFORTS COLLES EN CONSTRUCTION BOIS

Cette première partie vise à établir le contexte général dans lequel s’inscrit cette étude. Elle rappelle quelques spécificités du matériau bois, évoque les causes et l’intérêt d’un recours à la technique du collage structural pour assembler ou renforcer les éléments de structure, dresse un rapide panorama des méthodologies d’intervention les plus répandues et s’attarde sur la validation technique de cette pratique.

I.1. NECESSITE D’ASSEMBLER, DE REPARER OU DE RENFORCER LES ELEMENTS DE STRUCTURE BOIS

I.1.1. Assembler ou renforcer des éléments de structures neuves en bois

a) Définition d’une structure bois

Une structure bois est un assemblage majoritairement constitué d’éléments bois dont la cohérence d’ensemble permet la transmission d’efforts mécaniques sans déformations préjudiciables. Dans cet ouvrage, seuls les assemblages ayant trait à la construction et au patrimoine bâti (Fig. 1) seront regroupés sous le terme générique de “structures bois”.



Fig. 1 : Exemple de structure bois

La stabilité de la structure, face aux sollicitations extérieures, est préservée par des liaisons locales entre ses éléments constitutifs. Ces connexions, pouvant être réalisées à partir de divers matériaux, sont plus communément appelées : assemblages. Les assemblages doivent assurer le transfert, d'éléments à éléments, d'efforts mécaniques inhérents au chargement tout en maintenant la structure dans une forme préétablie. L'art du concepteur réside ainsi en partie dans le choix d'assemblages adaptés au dessein final de la structure.

b) Utilisations nécessitant un renforcement des éléments bois

Une structure bois, définie comme un assemblage d'éléments bois reliés entre eux au moyen d'assembleurs, doit présenter une certaine résistance et ne tolérer que des déplacements limités (translations et rotations). Il en va de même pour ses éléments constitutifs. Or le bois, matériau de construction à part entière, présente quelques spécificités.

Il est tout d'abord beaucoup plus souple que les autres matériaux de construction. Les modules d'élasticité de trois des principaux matériaux de construction sont comparés Tab. 1.

Tab. 1 : Ordres de grandeur des modules d'Young de l'acier, du béton et du bois [1]

| Matériaux | Acier | Béton | Bois (// au fil) |
|---------------------|------------|-----------|------------------|
| Module d'élasticité | 210000 MPa | 30000 MPa | 10000 MPa |

Le bois est un matériau orthotrope. Cela signifie que ses propriétés physiques et mécaniques dépendent de la direction selon laquelle elles sont mesurées. Le bois présente trois directions naturelles d'orthotropie, explicables par son anatomie, et usuellement qualifiées de longitudinale, radiale et tangentielle (Fig. 2).

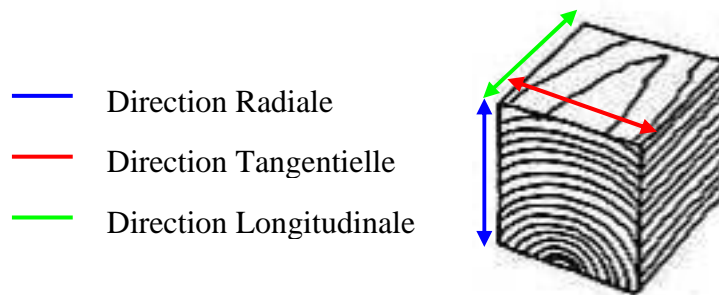


Fig. 2 : Les trois directions principales d'orthotropie du bois

Les éléments élancés, de type poutre, sont systématiquement prélevés selon la direction longitudinale du bois qui présente des caractéristiques mécaniques supérieures. Les directions radiales et tangentielles apparaissent comme très similaires mécaniquement et sont communément regroupées sous la dénomination de "direction transverse". Des trois directions initiales d'orthotropie, le calculateur n'en mémorise ainsi que deux et considère le bois comme un matériau isotrope transverse (directions axiale et transversale). Les caractéristiques mécaniques d'un bois de classe C24 sont données, à titre d'exemple, Tab. 2 suivant.

Tab. 2 : Caractéristiques mécaniques d'un bois de classe C24 [2]

| Caractéristiques | Symboles | Valeurs |
|--|----------------|-----------------------|
| Résistance en flexion | $f_{m,k}$ | 24 MPa |
| Résistance en traction selon la direction longitudinale | $f_{t,0,k}$ | 14 MPa |
| Résistance en traction selon la direction transverse | $f_{t,90,k}$ | 0,4 MPa |
| Résistance en compression selon la direction longitudinale | $f_{c,0,k}$ | 21 MPa |
| Résistance en compression selon la direction transverse | $f_{c,90,k}$ | 5,3 MPa |
| Résistance au cisaillement | $f_{v,k}$ | 2,5 MPa |
| Module d'Young moyen selon la direction longitudinale | $E_{0,moyen}$ | 11000 MPa |
| Module d'Young à 5 % selon la direction longitudinale | $E_{0,05}$ | 7400 MPa |
| Module d'Young moyen selon la direction transverse | $E_{90,moyen}$ | 370 MPa |
| Module de cisaillement moyen | G_{moyen} | 690 MPa |
| Masse volumique caractéristique | ρ_k | 350 kg/m ³ |

NB : Le symbole “f” signifie “résistance”.

L'indice “k” signifie “valeur caractéristique”, notion définie en I.3.3.

Les indices “0” et “90” signifient respectivement : “selon un angle de 0° par rapport au fil du bois” (direction longitudinale) et “selon un angle de 90° par rapport au fil du bois” (direction transverse).

Les indices “m”, “t”, “c” et “v” signifient respectivement “flexion”, “traction”, “compression” et “cisaillement”

L'indice “moyen” signifie qu'il s'agit d'une “valeur moyenne” au sens statistique.

L'indice “0,05” signifie “valeur minimale assurée à 95 %”.

Parmi les caractéristiques mécaniques de ce bois résineux d'utilisation courante, sont particulièrement remarquables ses faibles résistances au cisaillement et à la traction transverse. L'une de ces caractéristiques s'avère souvent le facteur limitant de la résistance des éléments bois et assemblages. Les contraintes de cisaillement et de traction transverse contribuent, de plus, à initier la fissuration du bois.

Ces quelques spécificités du bois expliquent d'elles même le fait que sa mise en oeuvre puisse nécessiter un recours aux techniques de renforcement. Il peut s'agir de limiter les déformations inhérentes à sa souplesse, de pallier ses caractéristiques mécaniques les plus critiques (résistances au cisaillement et à la traction transverse) ou de le conforter dans des utilisations des plus audacieuses. Le bois présente néanmoins des caractéristiques mécaniques parfaitement adaptées à son utilisation courante et le renforcement d'éléments neufs reste, à ce jour, une pratique des plus exceptionnelles.

I.1.2. Réparer ou renforcer des éléments de structures anciennes en bois

a) Pathologies des éléments de structures anciennes en bois

Les agents d'altération du bois sont essentiellement de nature biologique. Deux grands groupes doivent être distingués : les champignons et les insectes [3].

Le bois constitue le support de développement de deux types de champignons : les champignons lignicoles et lignivores.

Les dégâts occasionnés par les champignons lignicoles sont essentiellement d'ordre esthétiques. Ces champignons se nourrissent des substances présentes à l'intérieur des cellules du bois sans en endommager la structure. Le mycélium se propage de cellules en cellules en empruntant les ponctuations ou en perforant les parois. Ces perforations n'altèrent que très peu les propriétés mécaniques du bois et la principale gêne occasionnée réside en une décoloration plus ou moins prononcée du matériau consécutive à la prolifération du champignon.

Les champignons lignivores, au contraire, consomment la matière ligneuse pour assurer leur cycle biologique. Par divers procédés enzymatiques, ils détruisent les fibres et les décomposent en leurs principaux constituants (lignine, cellulose, hémicelluloses). Ils sont à terme responsables de divers types de pourriture (cubique, molle, fibreuse). Les conséquences mécaniques de l'attaque dépendent du degré de prolifération du champignon, l'élément peut être partiellement affaibli comme totalement détruit.

Le développement des champignons, lignicoles ou lignivores, nécessite des conditions précises de température et d'humidité. Il est, pour la plupart des espèces, optimal pour des températures situées entre 20°C et 35°C et pour des bois d'humidité supérieure à 20%. En structure bois, les champignons apprécient ainsi tout particulièrement les espaces confinés.

Même si le prédateur du bois le plus coriace est bien entendu le termite, d'autres insectes xylophages sont à l'origine de détériorations non négligeables.

Les termites, insectes sociaux au même titre que les fourmis, décomposent totalement la matière ligneuse pour en extraire les éléments nutritifs nécessaires à la pérennité de la colonie. Les éléments bois attaqués ne proposent plus aucune résistance mécanique.

Les autres insectes, pour la plupart de l'ordre des coléoptères (capricornes des maisons, vrillettes, lyctus), font du bois une véritable nursery. Ces insectes présentent en effet un cycle biologique marqué par deux stages majeurs : les stages larvaire et imaginal. L'insecte naît, sous forme larvaire, d'un œuf déposé dans le bois. Durant son développement, pouvant aller jusqu'à dix ans, la larve va se mouvoir dans le bois afin d'y rechercher ses éléments nutritifs. Elle va pour cela forer le matériau, pratiquant des galeries dont le diamètre peut atteindre quinze millimètres. Après un stage nymphal, la larve devient un insecte parfait ou imago. Celui-ci s'extirpe alors du bois où il ne reviendra que pour déposer de nouveaux œufs. Tout comme les champignons, les insectes apprécient des conditions environnementales particulières. D'un point de vue mécanique, l'affaiblissement causé à l'élément est fonction de l'ampleur de l'attaque.

Champignons et insectes constituent ainsi les principaux agents de détérioration des éléments de structure bois. Ils touchent tout particulièrement les structures anciennes dont la durée d'exposition aux variations environnementales est conséquente. Dans un souci de préservation de l'intégrité de la structure, les éléments altérés doivent être, selon l'ampleur des dégâts constatés, traités, renforcés, réparés ou même remplacés.

b) Rupture différée du bois

Il est bien connu que le bois se déforme (retrait, gonflement) sous l'effet des mouvements d'eau qui l'affectent (absorption, désorption) : on parle de comportement hygroscopique.

Par ailleurs, la résistance d'un élément bois diminue et ses déformations augmentent avec la durée de chargement (viscosité du matériau) Cette viscosité peut être mise en évidence notamment par le fluage qui se caractérise par une perte progressive de rigidité de l'élément sous chargement constant. L'élément s'oppose de moins en moins au chargement imposé et s'y adapte en se déformant davantage jusqu'à atteindre la rupture. Ces déformations sont amplifiées lorsque le matériau est soumis à des variations de teneur en eau. Elles engendrent des contraintes supplémentaires, de l'endommagement et de la fissuration qui accentuent les effets du fluage (mécanosorption).

Ces phénomènes interfèrent. La déformation et la résistance des éléments bois, toutes deux primordiales quant à la caractérisation mécanique de ces derniers, dépendent de facteurs extérieurs. Ces phénomènes peuvent être à l'origine de ruptures prématurées ou de déformations excessives au sein de la structure. Des réparations ou des renforcements peuvent s'avérer nécessaires pour y remédier.

I.2. LE COLLAGE STRUCTURAL POUR LES ASSEMBLAGES, REPARATIONS OU RENFORCEMENTS D'ELEMENTS DE STRUCTURES BOIS : PRESENTATION ET INTERETS

I.2.1. Assemblages, réparations et renforcements abordés

Une solution envisageable pour assembler, réparer ou renforcer les éléments de structures bois est la pratique du collage structural. Cette technique, empruntée aux industries de pointe (aéronautique et automobile), trouve de multiples débouchés dans la filière bois-construction. A l'origine principalement voué à l'élaboration de matériaux reconstitués (lamellé-collé, LVL, panneaux), le collage structural revendique désormais des applications plus valorisantes. Sa mise en œuvre pour les assemblages et les renforcements lui confère certaines responsabilités vis à vis du comportement mécanique de la structure. Ce développement suscite naturellement de nombreuses recherches en rhéologie des adhésifs et caractérisation mécanique des interfaces et joints de colle. Un premier état de l'art des solutions innovantes dues à l'utilisation du collage dans le Génie Civil Bois est effectué dans [4] et [5].

a) Les assemblages collés

Parmi les assemblages collés existant en construction bois, seuls les assemblages mixtes sont abordés. Sera considéré comme un assemblage mixte collé tout assemblage présentant des matériaux différents de part et d'autre du joint de colle. Les assemblages collés les plus significatifs sont les assemblages par goujons collés.

Un goujon classique est un connecteur de type tige permettant le blocage de deux éléments de structure (Fig. 3). Contrairement aux boulons, tire-fonds et assimilés, les goujons ne sont pas ancrés mécaniquement dans le bois. La résistance à l'arrachement d'un goujon se résume ainsi aux efforts de frottement à l'interface goujon bois. Les goujons classiques doivent par conséquent être disposés perpendiculairement à la direction de sollicitation (Fig. 3) et ne conviennent pas pour la reprise de chargement à trois dimensions.

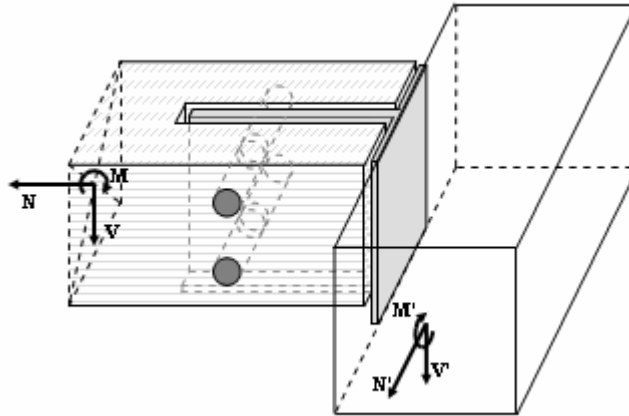


Fig. 3 : Exemple d'utilisation de goujons classiques : Etrier à âme intérieure invisible

La technique du goujon collé met en oeuvre le collage structural pour pallier les insuffisances d'un goujon classique. Le goujon n'est toujours pas ancré directement dans le bois mais est maintenu par un joint de colle d'une certaine épaisseur. Ce dernier assure la transmission des efforts et confère au goujon une résistance à l'arrachement significative (Fig. 4). Ce procédé permet de conserver les propriétés mécaniques des goujons classiques tout en étendant leur champ d'application.

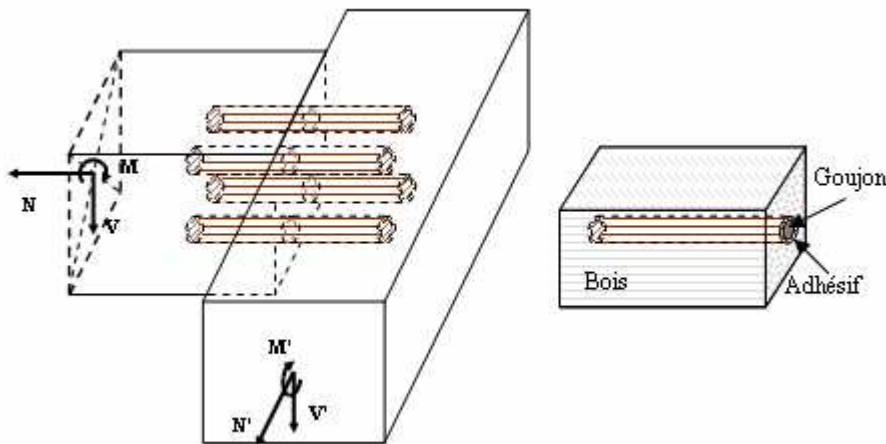


Fig. 4 : Principe d'un goujon collé, retour sur l'exemple précédent (Fig. 3)

D'autres types de connecteurs collés peuvent être utilisés pour l'assemblage d'éléments bois. L'utilisation de plaques assure l'élaboration d'assemblages mixtes collés à simple ou double recouvrement (Fig. 5).

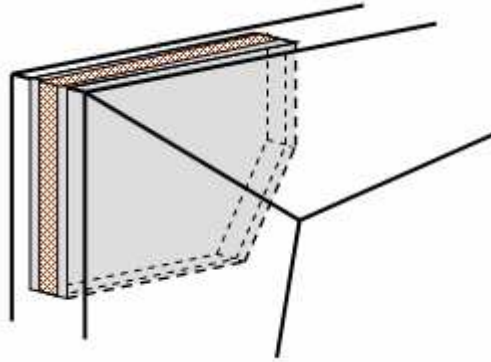


Fig. 5 : Assemblage par plats collés d'un rein de portique

b) Les réparations collées

Une activité prolongée de champignons et/ou d'insectes xylophages conduit à la détérioration des éléments d'une structure bois. Les dégâts, occasionnés localement, peuvent ôter toute résistance mécanique à l'élément. Ces affaiblissements locaux conduisent inévitablement à une fragilisation globale de la structure. Des interventions locales s'avèrent ainsi nécessaires à sa réhabilitation. Elles consistent généralement en un remplacement du tronçon d'élément affecté. Deux méthodologies basées sur le collage structural existent.

La première méthodologie consiste en un remplacement du tronçon de bois détérioré par une pièce de bois neuve de dimensions identiques. L'assemblage entre la partie d'élément conservée et la "prothèse" ajoutée est réalisé via la technique du collage structural. Deux modes d'intervention sont envisageables.

Le premier mode d'intervention consiste en l'emploi de goujons collés disposés selon la direction axiale de l'élément (Fig. 6). La mise en place de la prothèse, après étaieage de la structure, requiert cependant une certaine accessibilité et un certain volume d'action. Ce qui n'est pas toujours le cas lorsque l'intervention a lieu au sein d'une structure complexe ou à proximité de la maçonnerie.

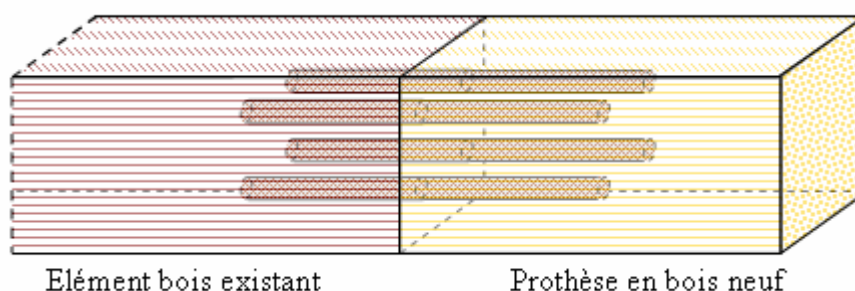


Fig. 6 : Réparation d'un about de solive par goujons collés

Le second mode d'intervention consiste en la pratique d'une saignée en surface de l'élément conservé et/ou de la prothèse ajoutée. Des connecteurs de type goujons ou plats sont ensuite introduits de manière rationnelle dans la saignée et enrobés de résine (Fig. 7). Cette opération est de mise en œuvre plus aisée dans la mesure où les éléments conservés et ajoutés peuvent être disposés, par étaieage, avant d'entreprendre la réparation.

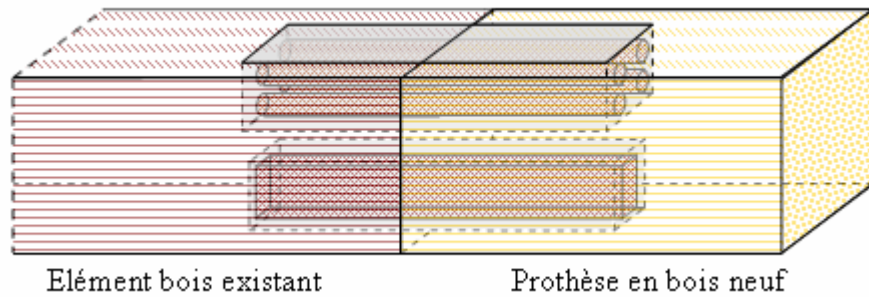


Fig. 7 : Réparation d'un about de solive par plats ou goujons introduits dans une saignée

Pour ces deux modes d'intervention, la réparation est finalement assimilable à un assemblage collé entre deux éléments neuf et ancien.

La seconde méthodologie consiste en un remplacement du tronçon de bois détérioré par une pièce modelée en résine de dimensions identiques (Fig. 8). Après étaieage et retrait du tronçon dégradé, des goujons ou autres connecteurs sont insérés selon la direction axiale de l'élément conservé. Un coffrage correspondant aux dimensions désirées et englobant les parties encore apparentes des connecteurs est ensuite réalisé. Des résines d'accroche et de remplissage sont ensuite respectivement appliquées et coulées à l'intérieur du coffrage. Après séchage, le coffrage est retiré laissant place à un tronçon en résine modelé à l'identique.

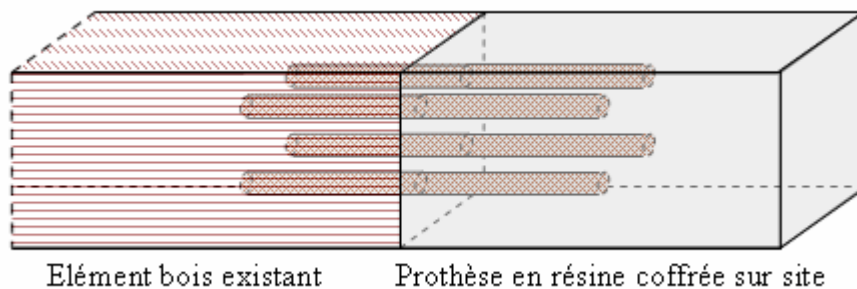


Fig. 8 : Réparation d'un about de solive par la technique du modelage

En négligeant la résistance de la jonction bois/résine, la réparation est ainsi assimilable à un assemblage collé entre deux éléments bois et résine.

c) *Les renforcements collés*

Le renforcement concerne aussi bien les éléments de structures bois neuves que les éléments de structures bois anciennes. Ils répondent à deux principales nécessités.

La première nécessité est le renforcement de l'élément selon sa direction axiale (Fig. 9). Il s'agit ou bien d'améliorer sa résistance mécanique ou bien de limiter sa déformation. Dans une optique de renforcement, les éléments ne sont pas sectionnés et les renforts ne peuvent, par conséquent, être introduits au sein même de l'élément bois. Les techniques de renforcement sont ainsi exclusivement praticables depuis la surface extérieure de l'élément.

Elles consistent généralement en la réalisation de perçages ou de saignées dans lesquels sont insérés des renforts de diverses natures (goujons, plats). Ceux-ci sont parfois directement collés en surface de l'élément. Le renforcement ne peut concerner qu'un tronçon d'élément (renforcement local) ou l'élément dans son ensemble (renforcement global).

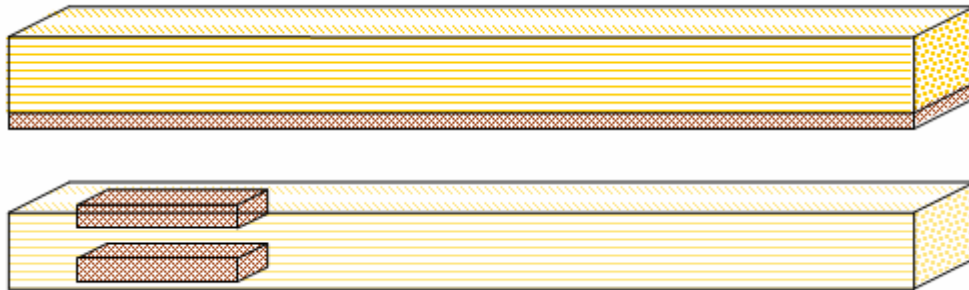


Fig. 9 : Renforcement axial : global ou local

La seconde nécessité est le renforcement de l'élément selon sa direction transverse. La fissuration apparaît comme l'un des principaux modes de ruine des éléments et assemblages. La fissure, conséquence de la libération de l'énergie de déformation accumulée par l'élément durant son chargement, s'initie à un certain niveau d'énergie puis se propage sous l'action des contraintes de traction transverse et/ou de cisaillement. La mise en oeuvre de renforts selon la direction transverse permet un pontage du plan de fissuration de l'élément et a un effet retardateur sur sa rupture. Les renforts prennent en charge une partie des efforts et limitent les déplacements relatifs (ouverture et glissement) des "lèvres" de la fissure. Ils sont généralement collés en surface ou insérés dans un perçage ou une saignée traversant l'élément de part en part (Fig. 10).

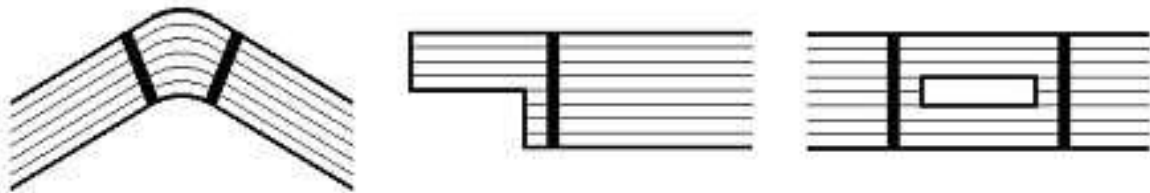


Fig. 10 : Renforcement local selon la direction transverse

Certaines configurations de renforcement peuvent simultanément satisfaire ces deux nécessités. La méthode du ferrailage de l'élément bois est illustrée Fig. 11.

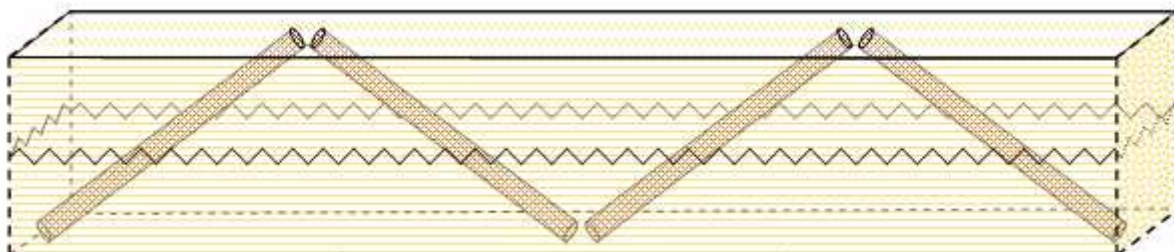


Fig. 11 : Ferrailage d'une poutre par goujons collés

d) *Lien entre assemblages, réparations et renforcements*

Des rapprochements entre assemblages, réparations et renforcements ont été effectués dans les trois paragraphes précédents. Il est apparu que toutes les interventions abordées dans la partie “les réparations collées” peuvent être regroupées sous le terme générique d’assemblage collé. Ainsi, le terme de réparation ne sera par la suite employé que lorsqu’il s’avérera nécessaire à une meilleure lisibilité.

I.2.2. Intérêt du collage structural pour ce type d’intervention

Il est incontestable que la plupart des interventions citées en I.2.1 auraient pu être menées à bien au moyen de techniques plus classiques. Il est donc légitime de s’interroger sur l’intérêt du collage structural pour ces applications.

a) *L’esthétisme*

Le principal avantage du collage structural en assemblage et renforcement est la préservation de l’aspect des éléments. Cette discrétion explique l’intérêt que suscite cette technologie dans les projets relevant, entre autres, des Monuments Historiques.

Pour les goujons collés, totalement noyés dans la masse du bois, les seuls signes de présence sont les cheminées d’injection et de dégazage nécessaires à l’introduction de la résine. Ces détails très discrets peuvent être facilement cachés par l’utilisation de pastilles de recouvrement en bois.

Les interventions pratiquées en surface de l’élément (réalisation de saignées) sont, par définition, visibles. La surface apparente de résine peut cependant être revêtue, avant séchage, d’un plaquage bois ou bien être enduite de toutes sortes de vernis et produits de finition élaborés à cet effet.

La technique du modelage peut de même s’avérer très discrète. Outre l’application d’un produit de coloration, le coffrage peut être réalisé de façon soignée et, via l’utilisation d’une résine d’accroche, devenir partie intégrante de la réparation.

Les opérations d’assemblage et de renforcement réalisées via la technologie du collage structural sont ainsi particulièrement faciles à dissimuler.

b) *La souplesse d’intervention*

Un autre intérêt du collage structural dans une optique d’assemblage ou de renforcement des éléments bois est sa souplesse de mise en œuvre [6].

Les interventions locales pratiquées n’induisent aucun chamboulement de la structure existante. La seule précaution indispensable est l’étalement des éléments environnants durant

l'opération puis durant la phase de polymérisation de la résine. L'outillage spécifique employé est portatif et les prothèses d'éléments peuvent être réalisées au préalable en atelier. La ponctualité des interventions ne nécessite généralement pas d'importants moyens de dégagement des tronçons détériorés et d'acheminement des tronçons neufs.

Les interventions ne nécessitant que peu de préparatifs et certaines étapes de l'opération pouvant être effectuées au préalable en atelier, le temps de présence de la main d'œuvre sur le site est relativement restreint. Tout comme son intégrité, la fonctionnalité de la structure n'est pas non plus affectée.

c) Le coût de l'intervention

Les opérations d'assemblage et de renforcement des éléments bois via la technique du collage structural restent à ce jour assez coûteuses. La compétitivité de ce type d'interventions ne doit néanmoins pas être jugée sur ce seul critère. Les tarifs pratiqués résultent en premier lieu d'un constat économique simple : la demande est beaucoup plus importante que l'offre. Seules une douzaine d'entreprises en France proposent en effet cette prestation. Ils résultent en second lieu du peu d'outils fournis aux professionnels pour valider ce type de pratiques. Les performances des adhésifs sont sous-estimées et les méthodes de calcul employées sont des plus pénalisantes dans un souci légitime de sécurité. Il s'en suit un surdimensionnement de la zone d'intervention et une utilisation surabondante de renforts et résines, matières premières en grande partie responsables du coût final de l'opération.

La mise en place de procédures de diagnostic, de conception, de calcul, de mise en œuvre et de traçabilité des opérations d'assemblage et de renforcement par le collage structural s'avère ainsi déterminante quant à leurs développements. La formalisation de cette activité susciterait effectivement une plus grande confiance des entrepreneurs et bureaux d'étude, permettrait d'optimiser les interventions et contribuerait ainsi à renforcer sa compétitivité face aux techniques usuelles.

La promotion de l'activité et l'amélioration des rendements matières, conjugués à une grande souplesse et à un temps restreint d'intervention, permettront à terme aux professionnels de réduire les coûts.

Les entrepreneurs ayant déjà fait de cette activité leur "marque de fabrique" ne s'enthousiasment légitimement pas d'une telle perspective. Même si leur marge ne serait pas directement affectée, leur environnement concurrentiel s'en trouverait renforcé. Ils restent néanmoins parfaitement conscients du fait qu'à moyen terme il leur sera demandé ou peut être imposé de justifier leurs pratiques selon une procédure formelle. La plupart d'entre eux se sont ainsi associés au sein de différents projets d'étude afin de franchir au mieux ce cap d'uniformisation des connaissances. Plutôt que de la subir, ils s'évertuent à devenir les moteurs de l'évolution de leur métier.

I.3. SPECIFICITE DES COMPOSANTS ET DE LA ZONE D'INTERVENTION

Un vaste panorama des composants utilisés pour des opérations d'assemblage ou de renforcement des éléments de structure via la technique du collage structural figure dans le rapport final du projet européen COLORETIM [7]. Dans cette partie ne seront introduits que les composants ayant un lien direct avec la présente étude.

I.3.1. Les connecteurs et renforts

Les goujons et les plats sont les connecteurs et renforts les plus communément rencontrés. Ils seront les seuls abordés dans cette étude.

Ils sont généralement en acier ou en composites. Les aciers employés sont d'utilisation courante (fers à béton, tiges filetées). Les propriétés mécaniques usuellement retenues sont résumées Tab. 3. Les composites utilisés appartiennent plus particulièrement au groupe des FRP (Fibre Reinforced Polymers). Ils sont constitués de fibres disposées de manière unidirectionnelle et noyées dans une matrice polymère. Les propriétés du composite dépendent de la nature des fibres et du polymère ainsi que de leurs proportions respectives. La longueur et la direction des fibres peuvent également être prises en compte. Le Fulcrum[®] est, par exemple, un composite constitué de fibres de verre engluées dans une matrice polyuréthane. Les caractéristiques de la fibre de verre, de la matrice polyuréthane et du FRP résultant sont regroupées Tab. 4 et Tab. 5.

Tab. 3 : Propriétés mécaniques de l'acier [7]

| Densité | Module d'Young | Limite élastique | Déformation ultime |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|
| 7800 kg/m ³ | 210000 MPa | > 240 MPa | > 10 % |

Tab. 4 : Ordres de grandeur de quelques propriétés de la fibre de verre et de la matrice polyuréthane [7]

| Matériaux | Densité | Module d'Young | Limite élastique | Déformation ultime |
|------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|
| Fibres de verre | 2600 kg/m ³ | 74000 MPa | 3400 MPa | 4,7 % |
| Polyuréthane | 1300 kg/m ³ | 1133 MPa | 34-68 MPa | 3-6 % |

Tab. 5 : Propriétés mécaniques du Fulcrum [8]

| Fibres verre | Densité | Module d'Young | | Résistance | | Déformation |
|---------------------|------------------------|-----------------------|-------------|-------------------|-------------|--------------------|
| | | flexion | compression | flexion | compression | |
| 66 % | 1860 kg/m ³ | 40000 MPa | 35000 MPa | 1050 MPa | 440 MPa | 1,5 % |

Toute une gamme de résistances et de rigidités peut ainsi être proposée à partir des constituants de base des FRP (fibres et résine). Ces matériaux composites présentent l'avantage d'être plus légers que l'acier. Ils sont en outre moins conducteurs de la chaleur et ne souffrent d'aucune corrosion. Ils sont néanmoins plus coûteux que l'acier qui reste le matériau le plus employé.

D'un point de vue mécanique, ces matériaux présentent des caractéristiques opposées. Les composites employés sont beaucoup plus souples que l'acier mais proposent une résistance en traction plus importante. Leurs comportements à la rupture sont également différents. Les matériaux composites sont fragiles alors que l'acier présente un comportement ductile. Les assemblages ou renforcements incluant des composants d'acier peuvent ainsi être dimensionnés de manière à présenter une certaine ductilité avant que n'intervienne la rupture.

Les matériaux composites ainsi que les plats en acier sont généralement lisses et requièrent une préparation de surface, chimique ou mécanique, avant mise en œuvre. Les goujons acier se rencontrent quant à eux sous forme lisse, filetée ou torsadée.

Il est finalement notable que des produits dérivés du bois peuvent s'avérer intéressants pour le renforcement. Des investigations ont par exemple été menées afin de vérifier la viabilité des panneaux à base de bois comme plats [9] ou des tronçons de bambou comme goujons [10].

I.3.2. L'adhésif

Trois grandes catégories d'adhésif sont employées en collage structural : les adhésifs époxydiques (EP), les adhésifs phénol-résorcinol-formaldehyde (PRF) et les adhésifs polyuréthanes (PUR).

Chaque résine est très spécifique et il est grandement recommandé de consulter les préconisations d'emploi indiquées par le fournisseur.

- Elles sont appliquées seules ou mélangées à un durcisseur.
- Elles requièrent des conditions particulières d'application et de polymérisation.
- Leurs performances ne sont généralement assurées que pour une certaine gamme d'épaisseur de joint.
- Elles sont d'accroche ou, conjuguée à un produit de charge, de remplissage.
- Elles sont sensibles à certains paramètres de leur environnement.

Les conditions de collage déterminent ainsi la fiabilité de l'assemblage ou du renfort collé. La mise en œuvre rationnelle d'un adhésif adapté est un gage de réussite de l'intervention.

Doivent être à ce stade distinguées deux rhéologies d'adhésif : les adhésifs fragiles et les adhésifs ductiles. Comme la plupart des matériaux, les adhésifs présentent un comportement élastique jusqu'à un niveau critique de sollicitation (contraintes, déformations) généralement qualifié de limite élastique. Toute sollicitation au-delà de la limite élastique engendre une déformation irrémédiable du matériau qui, même déchargé, ne recouvrira plus sa forme initiale.

Un adhésif fragile rompt brutalement dès que les contraintes ou déformations auxquelles il est soumis atteignent la limite élastique. La loi de comportement de ce type d'adhésif est linéaire jusqu'à la rupture (Fig. 12a).

Un adhésif ductile tolère un niveau de déformation au-delà de la limite élastique. La structure interne de l'adhésif est néanmoins affectée de manière irréversible. Généralement, en réponse aux sollicitations surabondantes, les adhésifs se déforment plutôt qu'ils ne résistent. Plus que le gain en résistance, généralement insignifiant, la progressivité de la rupture est particulièrement appréciable. La loi de comportement des adhésifs ductiles est linéaire jusqu'à la limite élastique, s'atténue jusqu'au niveau maximal de charge admissible puis présente une tendance polynomiale décroissante, appelée comportement post-pic ou comportement adoucissant, caractéristique du fort niveau de déformations dès lors toléré (Fig. 12b).

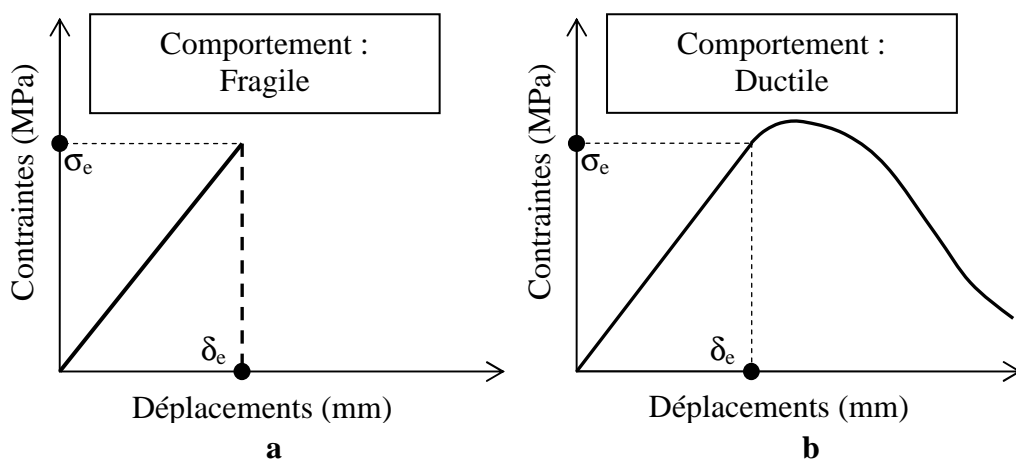


Fig. 12 : Comportements fragile et ductile

I.3.3. L'élément bois

De par ses origines naturelles, le bois est un matériau présentant une forte variabilité. Pour des bois sur pied, outre les spécificités inter essences, cette variabilité existe à l'échelle du peuplement (variabilité inter arbre) mais également à l'échelle de l'arbre (variabilité intra arbre). De manière simplifiée, les propriétés du bois dépendent de l'environnement dans lequel évolue l'arbre (sols, climats, pratiques sylvicoles...) mais également de la partie d'arbre étudiée (racines, tronc, houppier...). Les caractéristiques mécaniques du bois n'étant pas épargnées, cette variabilité s'avère préoccupante pour l'utilisation du bois en tant que matériau de structure. L'établissement des caractéristiques mécaniques du bois fait ainsi appel à des approches statistiques.

Pour deux pièces géométriquement identiques et d'une même essence, les caractéristiques mécaniques peuvent varier de 1 à 10 c'est-à-dire que l'une des pièces peut être jusqu'à dix fois plus résistante que l'autre. Des études statistiques portant sur différents paramètres tels les nœuds, la masse volumique, la texture, la pente du fil et le module d'Young ont permis de distinguer les facteurs influençant la résistance de l'élément. A partir des corrélations observées, des classes de résistance ont été établies et des procédures de

classement, visuel ou mécanique, ont été développées. De par l'origine statistique de l'approche, au sein d'une même classe de résistance, les propriétés mécaniques peuvent néanmoins varier du simple au double (de 1 à 2).

C'est à ce stade qu'intervient le concept de valeur caractéristique évoqué en I.1.1. Parmi les valeurs possibles de résistance au sein d'une même classe, la résistance caractéristique correspond à la résistance minimale proposée par 95% des échantillons. Elle correspond, en termes statistiques, au fractile d'exclusion inférieure à 5 % de la population. Elle est déterminée au moyen de protocoles expérimentaux appliqués à des lots de grande taille. D'autres grandeurs telle la densité sont fréquemment exprimées en valeurs caractéristiques. Le projet de norme PREN 124-4.1, "Structures en bois – Bois lamellé-collé – Partie 4 : Exigences" [11], préconise la relation suivante entre valeur moyenne et valeur caractéristique :

$$x_k = \left[e^{-\left(2,645 + \frac{1}{\sqrt{n}}\right) \text{COV}(x)} + 0,15 \right] x_{\text{moyen}}$$

Eq. 1

" x_k " est la valeur caractéristique de la grandeur " x ".

" x_{moyen} " est la valeur moyenne de la grandeur " x ".

" n " est le nombre de spécimens testés.

" $\text{COV}(x)$ " est le coefficient de variation calculé.

Un autre moyen de limiter la variabilité du bois est l'élaboration de matériaux reconstitués. Sont considérés comme matériaux reconstitués à base de bois les bois lamellés (lamellé collé, LVL) et les panneaux (fibres, particules, contreplaqués, OSB). En plus de proposer des pièces de dimensions inaccessibles pour du bois massif, le rassemblement aléatoire ou rationnel de plusieurs entités de bois (lamelles, fibres, plis, particules) de forte variabilité permet l'obtention d'un produit plus homogène. Dans l'Eurocode 5 [12], le coefficient γ_M , introduit comme diviseur des valeurs caractéristiques, prend en compte cet aspect. Il est en effet plus pénalisant pour le bois massif que pour ses dérivés les plus utilisés. Les valeurs à considérer pour γ_M sont exprimées Tab. 6 .

Tab. 6 : Valeur de γ_M pour différents matériaux à base de bois

| Matériaux | Bois massif | Bois lamellé-collé | LVL, panneaux contreplaqués, de particules, de fibres et OSB | Autres matériaux à base de bois |
|------------|-------------|--------------------|--|---------------------------------|
| γ_M | 1,3 | 1,25 | 1,2 | 1,3 |

Du point de vue du comportement mécanique, le bois est un matériau quasi-fragile. Ce comportement est caractérisé par la croissance stable d'une zone endommagée à partir de la limite élastique et jusqu'à la rupture. Le développement de cette zone, invisible de l'extérieur, se traduit par une perte progressive de rigidité du matériau puis par sa fissuration. Une loi de comportement typique pour un matériau quasi fragile est représentée Fig. 13.

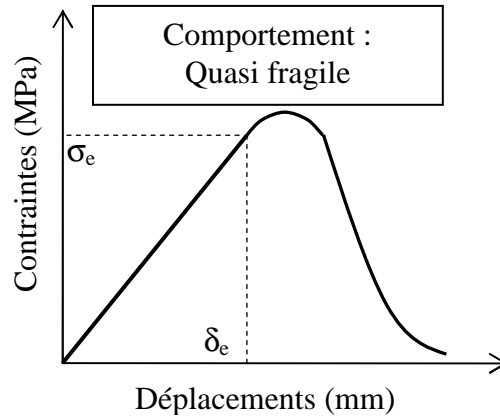


Fig. 13 : Comportement quasi-fragile

I.3.4. Comportement global de l'assemblage ou du renforcement

On a ainsi pu constater que les matériaux constitutifs de l'assemblage peuvent présenter des comportements différents : fragiles, ductiles, quasi-fragiles. S'il y a fort à parier qu'un assemblage regroupant trois composants fragiles ou quasi-fragiles rompra de façon fragile, le comportement global de l'assemblage est beaucoup moins évident à prévoir pour les autres cas. Il dépend en effet des dimensions de l'assemblage et des caractéristiques mécaniques de chacun des composants. Plus de précisions seront fournies sur ce point par la suite.

I.4. VALIDATION DE CE TYPE D'ASSEMBLAGE, ETAT DE LA NORMALISATION

I.4.1. Les exigences vis-à-vis d'un assemblage ou d'un renforcement collé

a) La résistance mécanique

L'intégrité de la structure ne dépend pas seulement de la résistance mécanique de ses éléments constitutifs mais également de leur cohésion. La première exigence vis-à-vis d'un assemblage, collé ou non, est donc une exigence de tenue mécanique.

Suivant sa position dans la structure, l'assemblage sera soumis à au moins une des trois sollicitations suivantes : effort normal N , effort tranchant V ou moment fléchissant M . Il devra être dimensionné de manière à garantir une résistance supérieure à chaque action ou combinaison d'action (Fig. 4).

Des approches analytiques fiables sont ainsi nécessaires à la prédiction de la résistance des assemblages et renforts collés.

b) Exigence de durée de vie

L'intégrité de la structure doit être assurée durant sa durée prévisionnelle d'exploitation. La seconde exigence vis-à-vis d'un assemblage, collé ou non, est donc une exigence de durée de vie.

Le matériau bois est sensible aux variations de son environnement. Les variations de température et d'humidité relative de l'air engendrent des variations de sa teneur en eau. Celle-ci a elle-même une influence sur ses caractéristiques mécaniques. Trois classes de service sont définies pour le matériau bois.

- Classe de service 1 : est caractérisée par une humidité dans les matériaux correspondant à une température de 20°C et une humidité relative de l'air environnant ne dépassant 65 % que quelques semaines par an (pour un résineux, humidité inférieure à 12%).
- Classe de service 2 : est caractérisée par une humidité dans les matériaux correspondant à une température de 20°C et une humidité relative de l'air environnant ne dépassant 85 % que quelques semaines par an (pour un résineux, humidité inférieure à 20%).
- Classe de service 3 : Conditions climatiques amenant des humidités supérieures à celle de la classe de service 2.

Le matériau bois est sensible à la durée de chargement. Sous un chargement donné, sa rigidité décroît au cours du temps donnant lieu à de plus amples déformations. Ce phénomène est mieux connu sous le nom de fluage. Cette perte de rigidité s'accompagne, en supposant un comportement élastique du bois, d'une diminution des contraintes dans le matériau. Toute tentative de prédiction doit néanmoins intégrer le fait que la résistance du bois diminue également avec le temps.

Ces deux phénomènes complexes sont intégrés, dans l'Eurocode 5 [12], via le coefficient k_{mod} . Ce coefficient est directement appliqué aux valeurs caractéristiques de résistance, représentatives de résistances instantanées, pour intégrer une notion de temps et estimer la résistance à plus long terme. Ces coefficients ont été déterminés de manière expérimentale. Ils sont, pour les bois massifs et lamellés, présentés Tab. 7.

Tab. 7 : Valeurs de k_{mod} pour les bois massif, lamellé-collé et LVL

| Classes de service | Classes de durée de chargement | | | | |
|--------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| | Action permanente (> 10 ans) | Action long terme (> 6 mois) | Action moyen terme (> 1 semaine) | Action court terme (< 1 semaine) | Action instantanée (accidentelle) |
| 1 | 0,60 | 0,70 | 0,80 | 0,90 | 1,10 |
| 2 | 0,60 | 0,70 | 0,80 | 0,90 | 1,10 |
| 3 | 0,50 | 0,55 | 0,65 | 0,70 | 0,90 |

La résistance à long terme d'un élément ou d'un assemblage bois, appelée résistance de calcul et notée R_d , est obtenue à partir de sa résistance caractéristique R_k par la relation:

$$R_d = \frac{k_{\text{mod}} R_k}{\gamma_m}$$

Eq. 2

Les assemblages ou renforcements collés mettent en jeu un matériau présentant un comportement très spécifique : la résine. Sa structure, et par conséquent ses propriétés mécaniques, sont très dépendantes de la température. L'évolution temporelle du bois (altérations, variations d'humidité, fluage) peut également s'avérer influente sur la bonne tenue du collage. Par ailleurs, certaines méthodologies (saignées, modelage) conduisent à une exposition directe de la résine aux conditions extérieures. En addition de celle du bois, la durée de vie de la résine sous sollicitations mécaniques et hygrothermiques doit également être abordée. La principale interrogation est dès lors la suivante : les coefficients k_{mod} définis ci-dessus sont ils directement applicables aux assemblages et renforts collés [13] [14] ?

c) Exigence de résistance aux actions accidentelles : stabilité au feu

L'intégrité de la structure doit être préservée un maximum de temps face à une action accidentelle telle que l'incendie. La troisième exigence vis-à-vis d'un assemblage, collé ou non, est une exigence de stabilité au feu.

Certains assemblages et renforts collés peuvent revendiquer un certain à propos à ce sujet. Leur principale force est, en effet, d'être invisible de l'extérieur. Insérés dans la masse de bois, les connecteurs (goujons, plats) se trouvent ainsi isolés des flammes. La possibilité d'employer des matériaux composites, résistants à de fortes températures et peu conducteurs de la chaleur, permet par ailleurs de s'affranchir des problèmes de ramollissement des connecteurs et de propagation de la chaleur.

Le problème reste donc le comportement au feu de l'adhésif. Il est actuellement admis que l'adhésif doit être absolument protégé par le bois. A défaut de l'annihiler, l'isolement de l'assemblage ou du renfort collé permet de retarder la rupture de l'élément. Le processus de combustion et la conductivité thermique du bois étant d'ores et déjà maîtrisés [15], il s'agit maintenant d'estimer, les sollicitations thermiques admissibles par l'adhésif pour déterminer la quantité de bois à préserver afin d'atteindre la durée requise d'exposition au feu [16].

Des alternatives émanent du domaine de la chimie. Des additifs ignifuges, disponibles sur le marché, permettent de maintenir provisoirement les propriétés mécaniques de la résine face à une forte augmentation de température. Des adhésifs sont en outre élaborés, à l'heure actuelle, pour résister à des conditions extrêmes.

Peu de recherches ayant été menées à ce sujet, toute utilisation d'assemblages ou de renforts collés requérant une garantie de résistance au feu nécessite aujourd'hui une démarche de validation auprès de centres techniques agréés.

I.4.2. Etat de la normalisation / démarche qualité

a) Etat de la normalisation

L'utilisation du collage structural à des fins d'assemblage ou de renforcement d'éléments bois ne fait actuellement l'objet d'aucune réglementation définitive. En France, les seuls documents auxquels les professionnels peuvent se référer afin de valider leurs interventions sont le "Projet de guide professionnel assemblages bois : tiges ou goujons collés de grandes dimensions" [16] ou l'annexe C du projet de norme "PrEN1995-2", préluce à l'Eurocode 5 [17]. Le premier résulte d'une action collective coordonnée par le Syndicat National des Constructeurs de Charpentes en Bois Lamellé Collé (SNCCBLC). Une version provisoire, basée sur des résultats de recherche de diverses origines, a été éditée en 1998. Ce projet est depuis resté en l'état et des tractations reprennent actuellement quant à son ajournement et à sa finalisation. Concernant l'introduction des goujons collés dans "Eurocode 5 – Design of timber structures, Part 2 Bridges", une proposition fut envisagée sur la base des résultats du programme européen GIROD [18]. Certaines lacunes scientifiques et techniques ont néanmoins conduit au refus, en 2003, de ce dossier.

Les travaux de recherche sont aujourd'hui orientés vers la préparation d'une proposition plus complète pour 2008, prochaine échéance de révision de l'Eurocode 5. Ils s'intègrent au sein de nouveaux projets, nationaux [19] ou européens [7] [18] [20] [21] et au sein d'actions concertées à l'échelle européenne : COopération Scientifiques et Techniques (COST) et Comité Européen de Normalisation (CEN). Une vaste base de données scientifiques et techniques est ainsi disponible aujourd'hui et des procédures de validation devraient prochainement être proposées aux professionnels.

b) Nécessité d'une démarche qualité

Les paragraphes précédents ont démontré que de nombreux facteurs influent sur la qualité d'un collage structural. Ces facteurs d'influence doivent être pris en compte durant toutes les phases de l'intervention : diagnostic, conception, mise en œuvre, suivi. La multitude de facteurs à maîtriser nécessite la mise en place d'un Plan d'Assurance Qualité (PAQ).

L'assurance qualité consiste en un ensemble de procédures et de dispositions que les professionnels ont à la fois à suivre et à développer. Un Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) complet et agréé de tous les travaux à effectuer est essentiel avant que ne débute la mise en œuvre de l'intervention. Il incombe au chef d'équipe, sous la responsabilité de l'ingénieur des travaux, d'informer le personnel sur site des spécificités de l'intervention (techniques, matériaux, outils), de contrôler la conformité des opérations aux caractéristiques du Plan de Qualité (PQ) et de s'assurer de la mise à jour des documents de traçabilité.

Des supports de démarche qualité adaptés aux assemblages et renforts collés sont actuellement élaborés au sein du projet européen LICONS.

I.5. LIMITES DE LA PRESENTE ETUDE

Le champ d'investigation concernant les assemblages et renforts collés apparaît ainsi comme relativement vaste. Les travaux présentés dans cet ouvrage se concentrent plus particulièrement sur les aspects suivants.

I.5.1. Aspect mécanique

L'aspect "résistance mécanique" des assemblages et renforts collés est privilégié. Une base scientifique est effectivement nécessaire à l'élaboration d'approches de dimensionnement adaptées aux professionnels. Plus que sur la caractérisation des matériaux, les investigations présentées portent sur l'influence des propriétés géométriques de l'assemblage ou du renforcement. Les aspects diagnostic, mise en œuvre et traçabilité ne sont quant à eux pas approfondis.

I.5.2. Résistance instantanée

La résistance à long terme d'un assemblage ou renforcement collé est déterminée à partir de sa résistance instantanée par l'intermédiaire de divers coefficients correctifs. L'applicabilité de ces coefficients, définis pour des techniques ne faisant pas appel au collage structural, a été vérifiée par différents auteurs [13] [14]. Parmi les facteurs environnementaux d'influence, la température et l'humidité relative de l'air ont fait l'objet d'attentions toutes particulières [13] [14] [18] [19] [21] [22]. Le comportement de l'adhésif face aux variations de température est notamment primordial quant à la bonne tenue de la structure au feu ou face à des conditions de service extrêmes. L'impact de la durée de chargement a également été étudié [14] [18] [19]. Ces aspects, nécessitant de lourds moyens expérimentaux et méritant à eux seuls une analyse approfondie, ne sont pas abordés dans ce travail plus particulièrement orienté vers la résistance instantanée des assemblages et renforts collés sous des conditions climatiques standards (20°C, 65% HR).

I.5.3. Renforcements locaux dans le sens du fil

Les interventions considérées dans cet ouvrage sont exclusivement locales. Si une opération d'assemblage appartient systématiquement par définition à cette catégorie d'interventions, il n'en est pas de même pour les renforcements qui peuvent concerner la totalité de l'élément. Cette pratique, aboutissant davantage à la création d'un élément composite qu'à celle d'un élément renforcé, a d'ores et déjà fait l'objet de quelques travaux [23] [24] qui ne seront que très peu approfondis.

Les renforts disposés selon la direction transverse ne sont pas non plus abordés. Disposés à proximité de singularités (entailles, réservations, connecteurs métalliques), ceux-ci ont un effet retardateur sur la fissuration du matériau. Le gain de résistance obtenu peut être estimé par une approche similaire à celle proposée dans [9] et développée dans [25].

La technique du modelage ne sera pas abordée d'un point de vue mécanique.

I.5.4. Un comportement fragile de l'assemblage

Le comportement à la rupture de l'assemblage dépend des caractéristiques géométriques et mécaniques des matériaux en présence. Les approches vouées à la caractérisation mécanique des assemblages collés (aéronautique, automobile) ont pour la plupart été menées en élasticité linéaire. Afin d'estimer leur adaptabilité au dimensionnement de structures bois, il a été jugé opportun de privilégier les assemblages présentant un comportement (quasi) fragile à la rupture. Si ces investigations prenaient une tournure avantageuse, les méthodes développées resteraient sécuritaires pour le cas d'assemblages à comportement ductile.

| |
|---|
| <p style="text-align: center;">PARTIE II: ASPECTS SCIENTIFIQUES ET APPROCHES DE DIMENSIONNEMENT</p> |
|---|

Les travaux scientifiques concernant la résistance instantanée des assemblages et renforts collés en construction bois sont pour la plupart consacrés aux goujons collés. Le champ d'application de ces derniers se limite de surcroît aux assemblages et réparations apparentées (paragraphe I.2.1). Leur utilisation en tant que renforts locaux, selon la direction axiale des éléments, n'a jusqu'alors pas été abordée.

D'un point de vue conditions d'utilisation, les recherches sont essentiellement orientées vers la modélisation mécanique de l'assemblage sous un chargement axial. Il s'agit principalement de prédire la résistance à l'arrachement d'un goujon collé. Peu d'études spécifiques incluent un chargement complet de l'assemblage. Le concepteur est systématiquement invité à se reporter aux considérations concernant les systèmes constructifs de comportement "voisin" (organes de type tige).

Il s'agit ici de synthétiser les acquis scientifiques et préconisations réglementaires concernant la résistance instantanée d'un goujon collé.

II.1. LES FACTEURS CONDITIONNANT LA RESISTANCE D'UN ASSEMBLAGE PAR GOUJONS COLLES

II.1.1. Les paramètres géométriques

Les dimensions de l'assemblage déterminent en partie sa résistance mécanique. Cinq caractéristiques géométriques doivent être considérées.

a) La longueur d'ancrage des goujons collés

La longueur d'ancrage d'un goujon collé, notée " l ", est la longueur selon laquelle l'adhésif est supposé assurer une liaison mécanique entre le goujon et le bois (Fig. 14). Elle est théoriquement assimilable à la profondeur de pénétration de la tige dans le bois. L'emploi de longueurs d'ancrage effectives, notées " l_c ", est néanmoins préconisé dans certains projets de règlement [16].

b) Le diamètre du goujon

Le diamètre nominal du goujon, noté " d_g ", est systématiquement retenu.

c) *L'épaisseur du joint de colle / le diamètre de perçage*

Ces deux paramètres sont bien sûr étroitement liés. L'épaisseur de joint, notée "e", est admise égale à la demi différence entre le diamètre du perçage, noté " d_i ", et le diamètre nominal du goujon " d_g " (Fig. 14).

d) *Distance à l'extrémité de l'élément / entraxe entre goujons*

Est communément appelée "distance à l'extrémité de l'élément" la distance entre l'axe du goujon et l'arête la plus proche de l'élément bois (Fig. 15). Lorsque l'assemblage inclut plusieurs goujons collés, l'entraxe entre goujons correspond à la distance entre les axes de chacun des goujons.

II.1.2. Les paramètres mécaniques

Les caractéristiques mécaniques, résistances et lois de comportement de chacun des composants (goujon, adhésif, bois) sont d'importance pour l'estimation de la résistance ultime de l'assemblage.

a) *Les modules élastiques*

Les modules d'élasticité, d'Young ou de Coulomb, notés respectivement "E" et "G", déterminent, en deçà de la limite élastique, la relation "contraintes-déformations" dans chacun des matériaux (Fig. 14). S'ils sont liés de façon simple, via le coefficient de Poisson "v", pour le goujon et l'adhésif qui sont des matériaux isotropes, il n'en est pas de même pour le bois orthotrope. On repèrera par la suite la direction axiale par L et la direction transversale par T (les directions tangentielles et radiales étant supposées identiques).

b) *Les résistances mécaniques*

La rupture intervenant au sein de l'un des matériaux (rupture cohésive) ou à l'interface entre deux des matériaux (rupture adhésive), les résistances mécaniques des matériaux mis en jeu et de leurs interfaces déterminent la résistance ultime de l'assemblage. Peut être retenue, comme résistance d'un matériau ou d'une interface à une sollicitation donnée, la limite élastique correspondante (Fig. 12).

c) *Les lois de comportement*

Les lois de comportement des matériaux et interfaces, et en particulier celles concernant l'adhésif, peuvent être prises en compte. L'existence d'un comportement post-pic ductile pour l'assemblage dans sa globalité, peut permettre, en outre, d'éviter une rupture soudaine, d'obtenir un léger gain en résistance.

II.1.3. Schémas récapitulatifs : paramètres géométriques et mécaniques

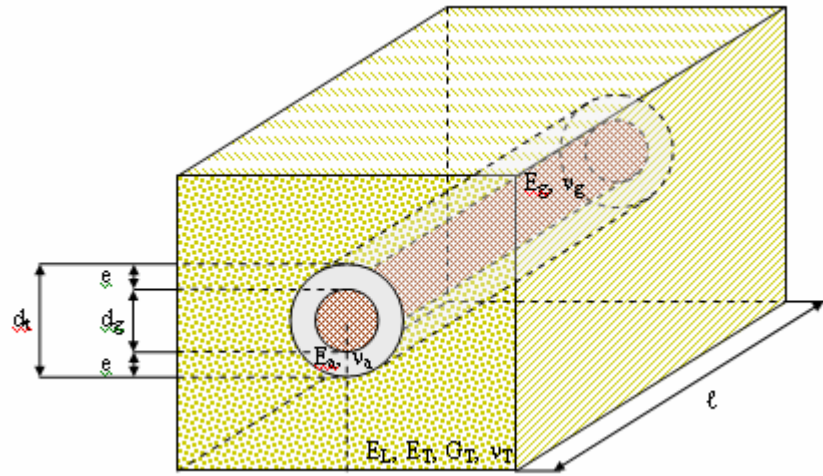


Fig. 14 : Notations retenues pour cette étude

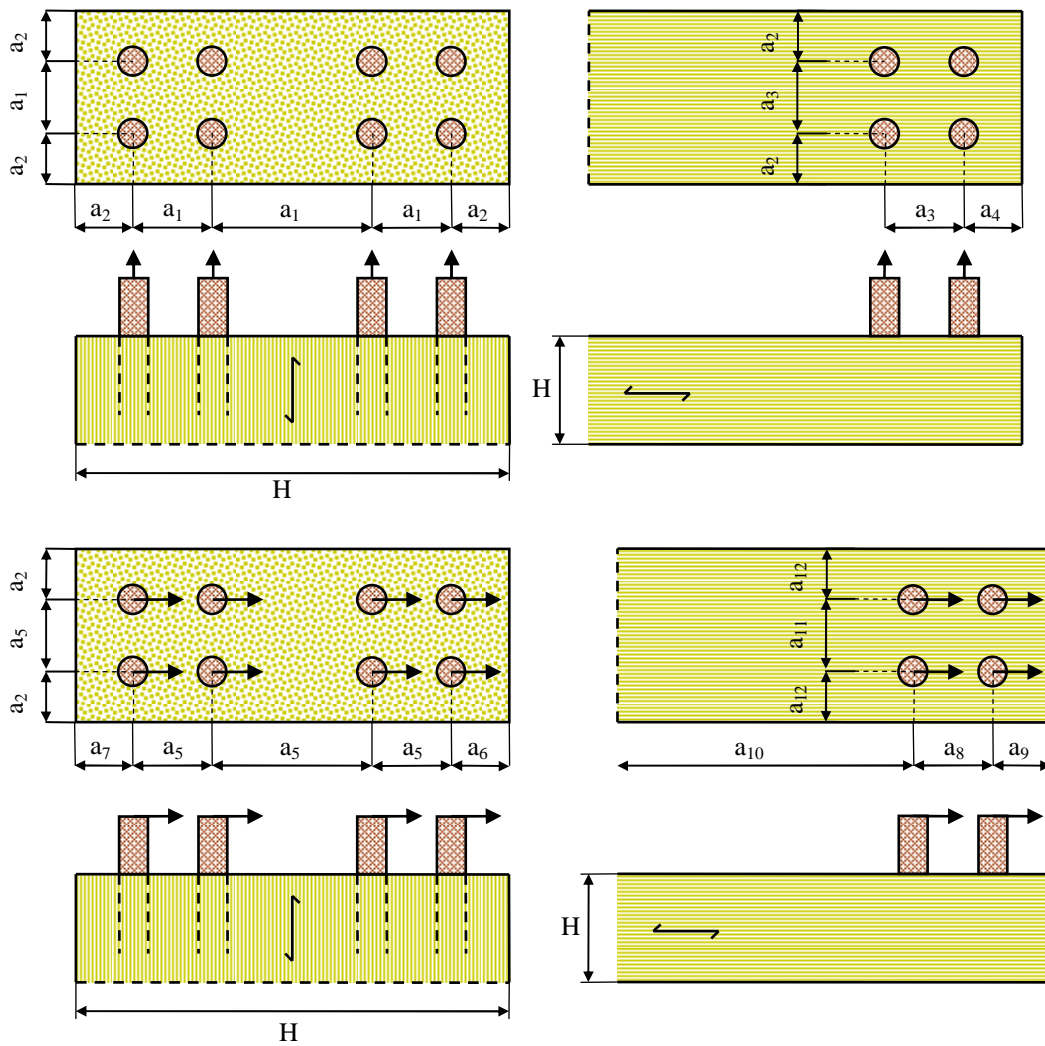


Fig. 15 : Entraxe et distance à l'arête de l'élément la plus proche

II.1.4. Les conditions d'essai

a) *Conditions limites de l'essai*

Les conditions de sollicitation mécanique déterminent la résistance d'un assemblage par goujons collés. Un état de contraintes/déformations différent pour l'un des composants conduit inmanquablement à un état de contraintes/déformations différent pour l'assemblage.

Rien que pour établir la résistance à l'arrachement d'un goujon collé, plusieurs dispositifs expérimentaux peuvent par exemple être envisagés. Les plus significatifs, dénommés essais de "Pull-Pull" (PP) et de "Pull-Compression" (PC), sont représentés Fig. 16. Pour des modes de rupture identiques, le niveau de charge observé est différent selon la configuration d'essai adoptée.

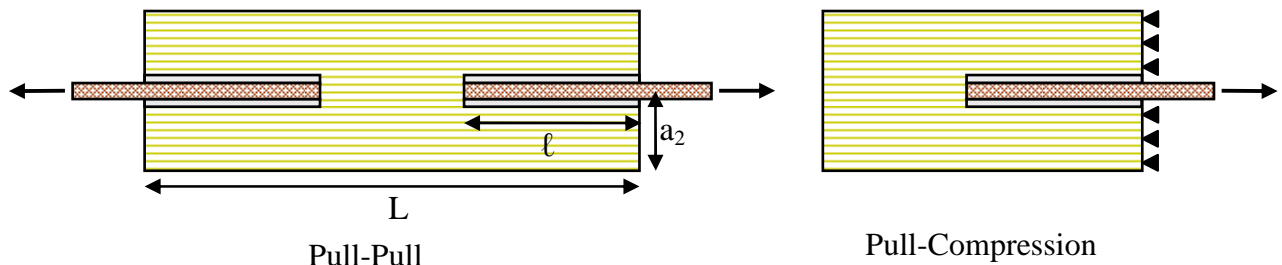


Fig. 16 : Essais de Pull-Pull et de Pull-Compression

b) *Conditions environnementales*

Le conditionnement des échantillons avant essai est tout à fait primordial. En effet, les caractéristiques mécaniques et géométriques du bois sont intimement liées à sa teneur en eau. Le comportement de l'adhésif dépend par ailleurs fortement de sa température. Les résistances instantanées et modes de rupture obtenus expérimentalement peuvent, par conséquent, différer d'un échantillonnage à l'autre. Les paramètres environnementaux peuvent être abordés via leur action sur les paramètres géométriques et mécaniques et ne feront pas l'objet de considérations particulières [26].

II.1.5. Les détails constructifs

a) *Le nombre de goujons*

Le nombre de goujons employés influe bien évidemment sur la résistance finale de l'assemblage. Comme pour les autres connecteurs, un "effet système", pour l'utilisation d'un nombre "n" de goujons collés identiques, pourrait être envisagé. Face à une sollicitation donnée, la résistance d'un système de "n" goujons collés identiques serait ainsi, sous certaines conditions, supérieure à "n" fois la résistance individuelle d'un même goujon collé [27].

b) Le type de goujon

Du fait d'un état de surface plus rugueux, les goujons filetés et torsadés proposent à priori plus grande surface d'adhésion. La résistance de l'interface entre le goujon et l'adhésif s'en trouverait accrue. Il est néanmoins plausible que l'intrusion de singularités macroscopiques (filetage) dans le joint de colle engendre des contraintes parasites. Le potentiel de tel ou tel type de tige, pour une utilisation comme goujon collé, est ainsi à examiner.

c) L'angle par rapport au fil du bois

L'angle d'insertion du goujon par rapport au fil du bois revêt une certaine importance. L'essai de Pull-Pull est choisi comme support d'explication.

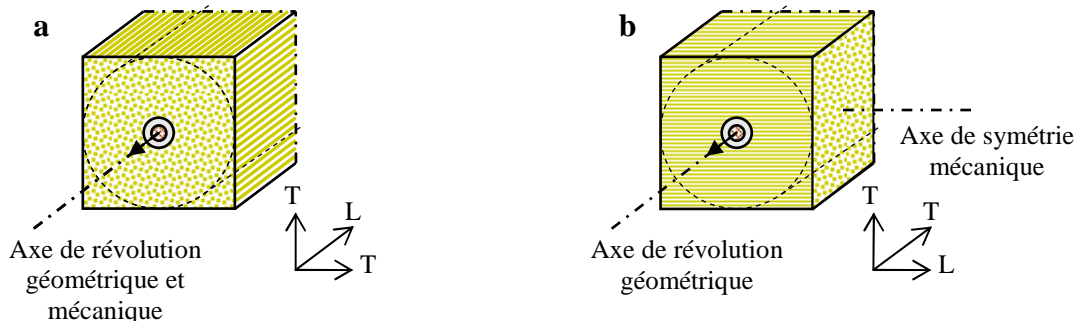


Fig. 17 : Symétries géométrique et mécanique

Un goujon collé inséré parallèlement au fil du bois est perpendiculaire au plan d'isotropie du matériau. L'assemblage présente ainsi une symétrie de révolution d'un point de vue géométrique comme d'un point de vue mécanique (Fig. 17a). Les contraintes et déformations sont par conséquent symétriques et réparties dans tout l'assemblage. Il n'en est pas de même pour un goujon, toujours sollicité axialement, mais inséré selon un angle non nul par rapport au fil du bois. L'assemblage n'est plus symétrique d'un point de vue mécanique (Fig. 17b). Il en résulte l'existence de zones de plus fortes contraintes et déformations.

Du fait du caractère isotrope transverse du bois, des conditions limites identiques, appliquées à des goujons insérés suivant des angles différents, vont conduire à des états de contraintes/déformations différents. La résistance du matériau bois est par ailleurs dépendante de la direction considérée. La résistance de l'assemblage ne peut que s'en trouver affectée.

II.2. LES MODES DE RUPTURE ENVISAGEABLES

De nombreux modes de rupture peuvent être répertoriés pour un assemblage par goujons collés. La rupture se produit ou bien au sein de l'un des matériaux constitutifs de l'assemblage (rupture cohésive) ou bien au niveau d'une interface (interphase) particulière (rupture adhésive).

Sont appelées interphases [28] les zones de transition entre adhésif et substrats (Fig. 18). Ces zones, d'épaisseurs variables selon les propriétés de l'adhésif (viscosité) et des substrats adjacents (porosité, rugosité), sont caractérisées par la présence simultanée de deux matériaux. Les interphases peuvent ainsi être assimilées à des couches mixtes présentant des propriétés mécaniques particulières.

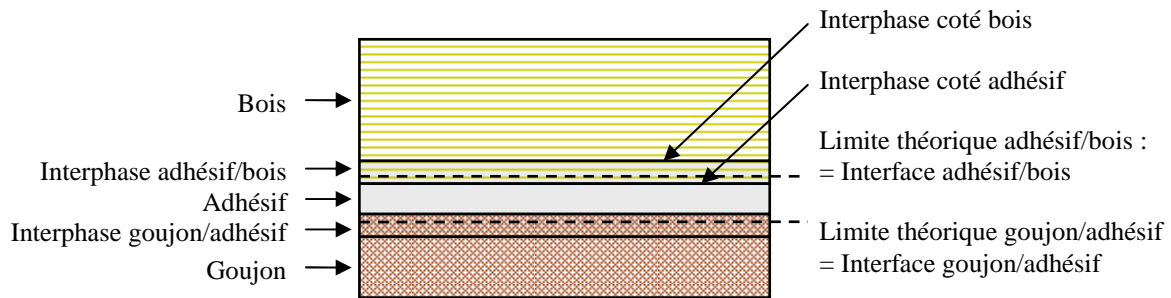


Fig. 18 : Représentation schématique d'une interface

Les modes de rupture envisageables dépendent du chargement appliqué à l'assemblage. Pour cet inventaire, les sollicitations élémentaires axiales (effort parallèle à l'axe des goujons collés) et latérales (effort perpendiculaire à l'axe des goujons collés) sont distinguées.

II.2.1. Rupture en cisaillement d'une interface

Seront regroupés sous ce mode tous types de rupture par cisaillement se produisant à proximité immédiate d'une interface (Fig. 18). Celles-ci interviennent dans le cas de goujons collés sollicités axialement. Une observation approfondie des faciès de rupture (microscopie) a permis à certains auteurs [29] d'estimer l'épaisseur de l'interphase et de se prononcer quand à la localisation exacte de la rupture (interphase coté adhésif, interphase coté bois). Ce dernier aspect ne sera pas approfondi dans cet ouvrage.

a) *Rupture en cisaillement de l'interface goujon/adhésif*

Ce mode de rupture intervient lorsque la résistance au cisaillement de l'interface goujon/adhésif s'avère le facteur limitant de l'assemblage. Cette rupture intervenant entre les matériaux les plus robustes en cisaillement de l'assemblage, ce dernier n'est pas optimisé et l'adhésion entre goujon et adhésif se doit d'être améliorée (Fig. 19).

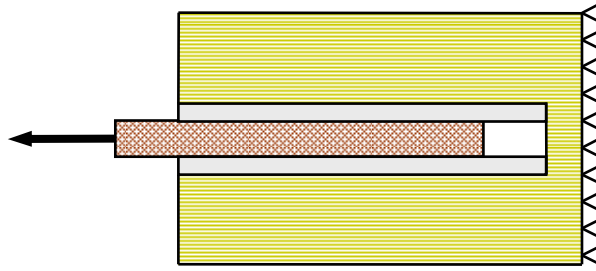


Fig. 19 : Rupture en cisaillement de l'interface goujon/adhésif (R1)

b) Rupture en cisaillement de l'interface adhésif/bois

Ce mode de rupture intervient lorsque la résistance au cisaillement de l'interface adhésif/bois s'avère le facteur limitant de l'assemblage. La rupture concerne cette fois-ci le matériau supposé le plus faible en cisaillement : le bois, ce qui atteste d'un assemblage optimisé. Les goujons collés sont arrachés entourés d'un cylindre d'adhésif. Des fibres de bois sont parfois visibles en surface de ce cylindre, confirmant la mixité (adhésif + bois) de la zone de rupture (Fig. 20). La quantité de fibres arrachées dépend des propriétés de l'adhésif. Une quantité importante de fibres en surface du cylindre d'adhésif extrait conduit parfois à assimiler la résistance en cisaillement de l'interface adhésif/bois à la résistance en cisaillement du bois.

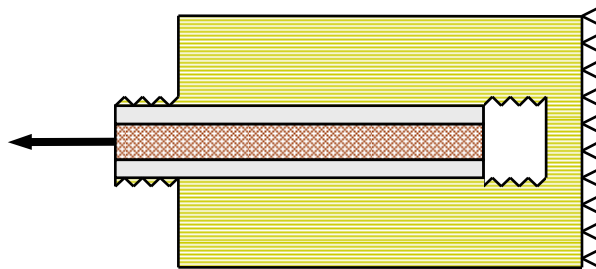


Fig. 20 : Rupture en cisaillement de l'interface adhésif/bois (R2)

II.2.2. Rupture de l'un des matériaux constitutifs de l'assemblage

a) Rupture des goujons

Selon le matériau constitutif du goujon, acier ou composite, deux modes de rupture sont envisageables.

Pour les goujons en acier, la rupture est ductile et se produit par plastification. Au-delà de la limite élastique, la tige s'allonge de façon démesurée dans le cas d'un chargement axial ou forme une rotule plastique dans le cas d'un chargement latéral. Ces deux modes de rupture sont illustrés Fig. 21.

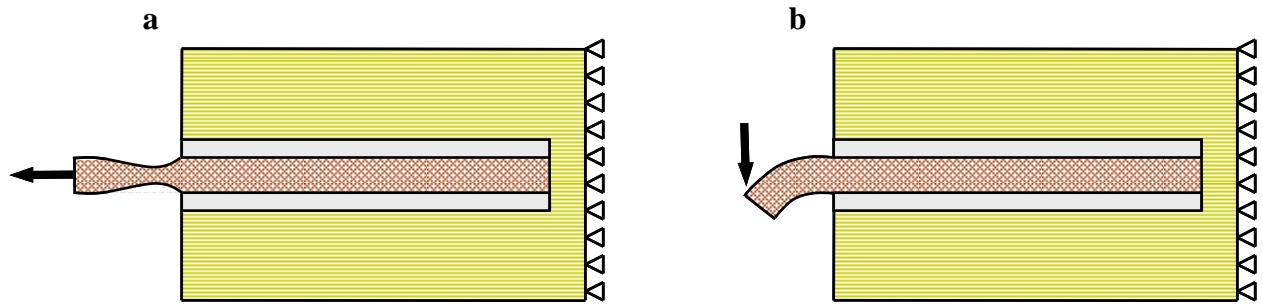


Fig. 21 : Plastification du goujon en acier (R3)

Pour les goujons en matériaux composites (FRP), la rupture est au contraire fragile. Elle intervient lorsque la résistance en traction du composite est atteinte pour un chargement axial et lorsque la résistance en cisaillement transversal du composite est atteinte pour un chargement latéral. Ces deux modes de rupture sont illustrés Fig. 22.

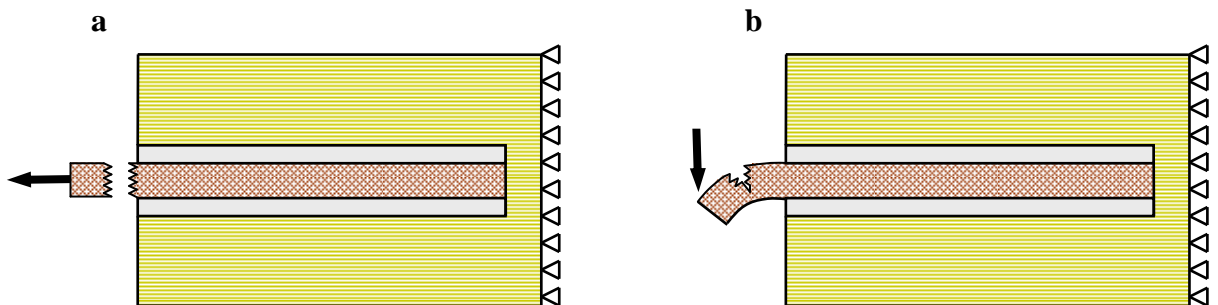


Fig. 22 : Rupture du goujon en composite (R4)

Ce type de rupture concerne le matériau le plus robuste de l'assemblage. La rupture de l'acier est désormais bien maîtrisée et, de par sa ductilité, intervient de manière douce et progressive. Cet aspect conduit certains calculateurs à privilégier ce mode de rupture au détriment d'un assemblage optimisé. Ce choix est entièrement compréhensible compte tenu des incertitudes liées à la rupture du bois et de l'adhésif (sensibilité aux facteurs environnementaux).

b) Rupture dans le joint de colle

Il s'agit, pour un chargement axial, d'une rupture en cisaillement comparable à celles intervenant aux interfaces (Fig. 23). Elle apparaît comme plus probable dans le cas de joints épais d'adhésif.

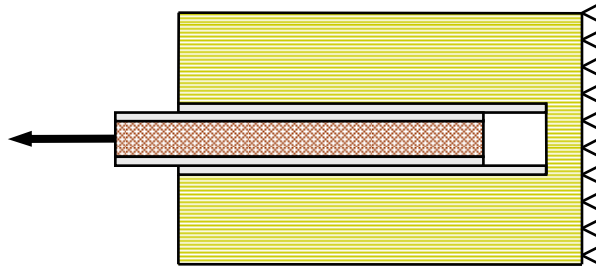


Fig. 23 : Rupture en cisaillement au sein du joint d'adhésif (R5)

Dans le cas d'un chargement latéral, certains modes de rupture plus particulièrement liés au matériau bois peuvent également concerner l'adhésif. La pénétration du goujon dans le bois ainsi que l'arrachement du bloc de bois sous-jacent au goujon collé seront abordés dans le paragraphe suivant.

c) *Rupture dans le bois*

De nombreux modes de rupture incluent le matériau bois dont les résistances au cisaillement et à la traction transverse sont limitées. L'angle d'insertion du goujon collé par rapport au fil du bois est également à prendre en compte.

Trois modes de rupture sont répertoriés dans le cas d'un chargement axial des goujons collés.

Le premier mode de rupture est la rupture par traction de l'élément bois en arrière d'assemblage (Fig. 24). Cette rupture se produit à un niveau de charge dépendant de l'angle d'insertion du goujon par rapport au fil du bois. Un retour Tab. 2 permet effectivement de constater l'écart des résistances en traction selon les directions longitudinale et transverse du bois. Ces modes de rupture sont illustrés Fig. 24 pour des goujons insérés selon des angles de 0° et 90° par rapport au fil.

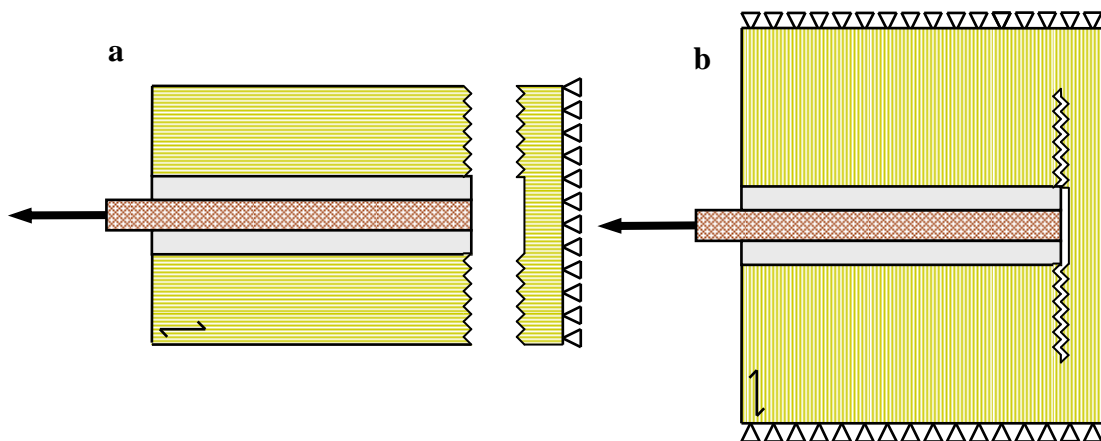


Fig. 24 : Rupture en traction en arrière d'assemblage (R6)

Le second mode de rupture, toujours sous chargement axial des goujons, est l'éclatement du bois (Fig. 25). Il concerne plus particulièrement les goujons insérés suivant un

angle de 0° par rapport au fil. Celui-ci semble intervenir lorsque les goujons sont disposés trop près des arêtes de l'élément ou lorsque l'entraxe préservé entre goujons est insuffisant. Des commentaires seront par la suite apportés quant à la reconnaissance de ce mécanisme de ruine en tant que mode de rupture particulier.

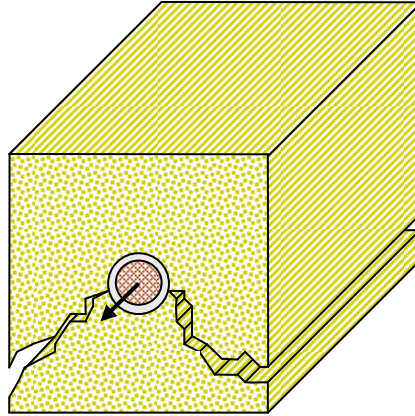


Fig. 25 : Rupture par éclatement du bois (R7)

Le troisième mode de rupture, toujours pour des goujons insérés parallèlement au fil du bois, est la rupture en bloc de l'assemblage. Les goujons sont arrachés encerclés d'un bloc de bois (Fig. 26). Un tel mode de rupture est susceptible d'intervenir lorsque la force à appliquer pour arracher simultanément chaque goujon de l'assemblage est supérieure à celle à appliquer pour l'extraction par cisaillement du bloc de bois.

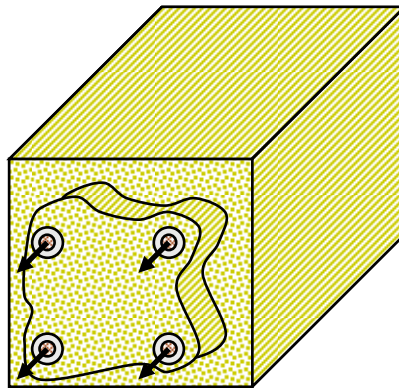


Fig. 26 : Rupture par bloc de l'assemblage (R8)

Les autres modes de rupture interviennent suite à un chargement latéral des goujons collés.

Que le goujon soit inséré parallèlement ou perpendiculairement au fil, un chargement latéral peut conduire à son enfoncement dans le bois (Fig. 27). La capacité du bois à résister à l'enfoncement du goujon est caractérisée par sa portance locale. La portance locale, qui peut être qualifiée de résistance à l'écrasement, est fonction de la surface écrasée (soit du diamètre du goujon) et de la direction selon laquelle se produit l'écrasement. Elle serait en outre liée d'une manière plus ou moins directe à la densité et à la résistance en compression selon cette même direction [30]. Dans certains cas, l'écrasement du bois peut être prolongé d'une

déformation du goujon. Ce mode de rupture est ainsi très similaire à celui présenté par tout connecteur de type "tige" (Fig. 27) [12].

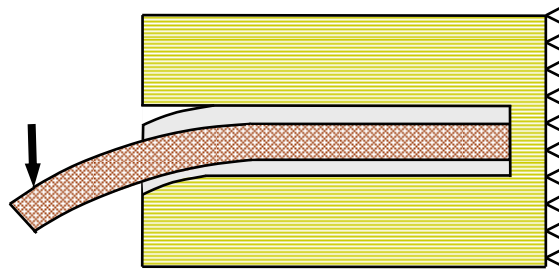


Fig. 27 : Enfoncement du goujon dans le bois, déformation tige (R9)

Suite à un éventuel enfoncement du goujon dans le bois, des fissures sont susceptibles de s'initier, puis de se propager à partir de l'assemblage. Elles résultent de la redistribution et de la transmission, au bois et par les goujons, des efforts latéraux inhérents au chargement. Ces modes de rupture sont représentés Fig. 28 pour des goujons insérés suivant des angles de 0° et 90° par rapport au fil du bois.

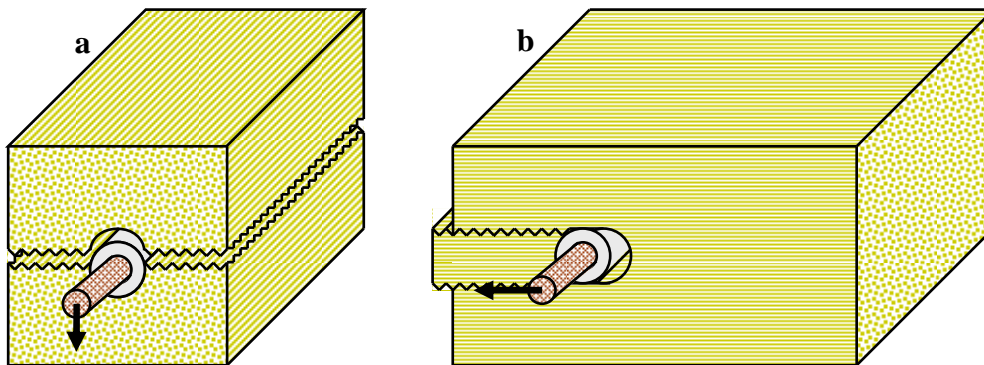


Fig. 28 : Fissuration du matériau (R10)

II.3. BASES DE DONNEES EXPERIMENTALES DISPONIBLES

Le nombre de facteurs d'influence et de modes de rupture envisageables a conduit les différents auteurs à établir des plans d'expérience permettant l'étude d'un maximum de paramètres.

Deux approches expérimentales doivent être distinguées : les essais de caractérisation locale et les essais en grandeur structurale. Les premiers sont réalisés sur des éprouvettes de laboratoire de petites dimensions. Ils permettent une caractérisation locale de l'assemblage et plus particulièrement du joint d'adhésif et de ses interfaces. Les seconds sont réalisés sur des éprouvettes similaires aux éléments utilisés en structure. Ils permettent de tester une géométrie réelle d'assemblage dans des conditions réelles d'utilisation.

Les campagnes expérimentales les plus marquantes concernant la résistance à court terme d'éléments de structure assemblés par goujons collés sont répertoriées par la suite.

II.3.1. Campagne expérimentale réalisée au CTBA [31] [32] [33]

Cette campagne expérimentale a été réalisée par le Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA) suite à la demande d'un avis technique par les établissements Simonin Frères (25) et Fargeot.S.N.C (71).

a) *Facteurs d'influence étudiés*

- Longueur d'ancrage (ℓ)
- Modèle de goujon (Mod.) : fileté ou torsadé (F/T)
- Angle d'insertion du goujon par rapport au fil du bois : $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$
- Conditions de chargement (CC): goujons collés chargés axialement ou latéralement (A/L). Pour les goujons chargés latéralement, le chargement peut être parallèle ou perpendiculaire au fil du bois (L_\perp/L_\parallel)

b) *Facteurs maintenus constants*

- Epaisseur du joint d'adhésif : 3 mm
- Goujon : acier, diamètre 16 mm
- Nombre de goujon : $n_g = 1$
- $a_2 = a_{12} = 2,5d_g = 40$ mm,
- Matériaux : Goujon : acier, Adhésif : Epoxy (EP), Bois : Lamellé-collé GL24h
- Essais en dimensions structurales

c) *Conditions particulières d'essai (dimensions structurales) (Fig. 29, Fig. 30)*

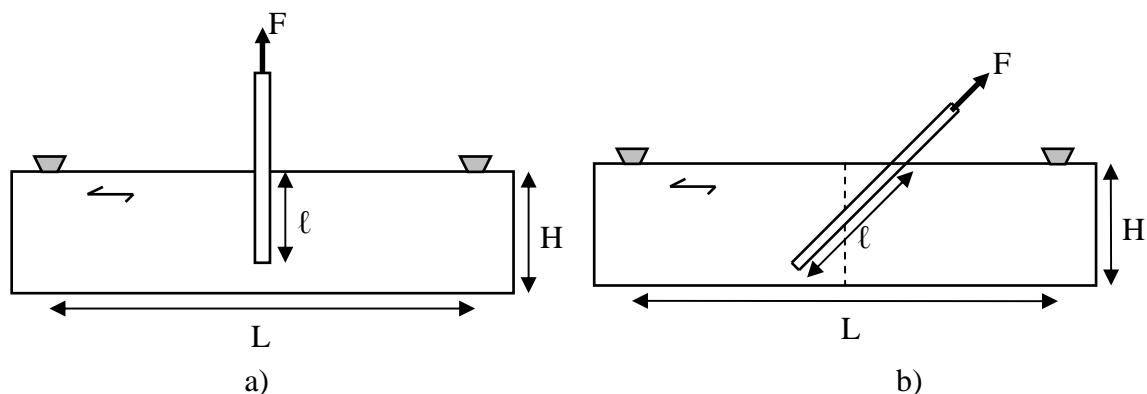
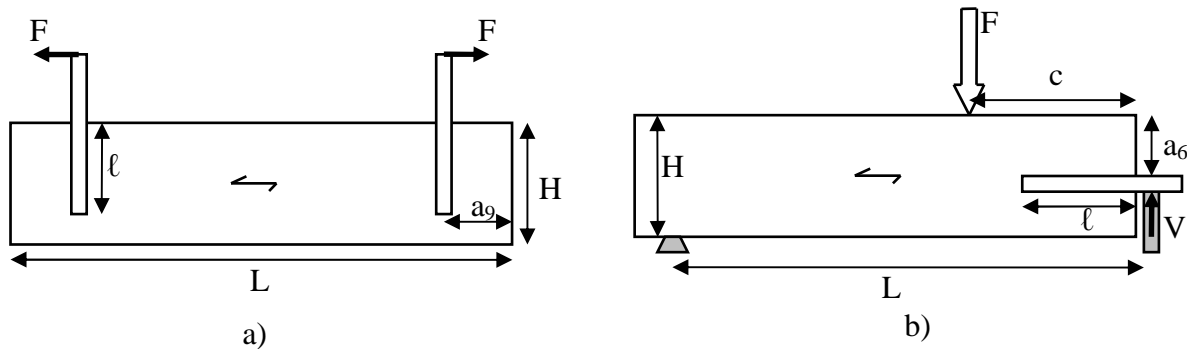


Fig. 29 : Essai de Pull-Beam (PB)


 Fig. 30 : Chargement latéral des goujons collés, a) $\alpha = 90^\circ$, b) $\alpha = 0^\circ$

d) *Charges et modes de rupture obtenus (Tab. 8, Tab. 9)*

Dans cette campagne menée par le CTBA, tous les résultats expérimentaux sont exprimés en termes de charges de rupture F_u calculées sur la base de cinq échantillons par lot (Tab. 8 et Tab. 9). Les assemblages présentent globalement une rupture de type quasi-fragile. Les courbes “force-déplacement” présentées dans les rapports d’essais [31] mettent néanmoins en évidence, pour certaines éprouvettes (notamment issues des lots SF2, SF3, SF5, SF6), un comportement ductile. La tendance des courbes à se rapprocher d’une asymptote horizontale dénote une plastification progressive de l’acier non reportée par les auteurs.

Tab. 8 : Goujons chargés axialement

| lots | essai | mod | α | L | H | ℓ | F_u (COV) | COV | Rupture* Fig. 19 à Fig. 28 | | | | |
|------|-------|-----|----------|----------------------|-----|--------|-------------|------|-------------------------------|---|--------|---|--------|
| | | | | | | | | | 1 7 | 2 | 2 7 | 6 | 6 2 |
| - | - | - | $^\circ$ | mm | | mm | kN | % | | | | | |
| SF1 | PP | T | 0 | 300 + 2 ℓ | 80 | 200 | 67,37 | 8,2 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SF2 | PP | T | 0 | | 80 | 300 | 95,02 | 3,2 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SF3 | PP | T | 0 | | 80 | 400 | 110,78 | 5,7 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| SF4 | PP | F | 0 | | 80 | 200 | 90,19 | 7,1 | 0 | 4 | 1 | 0 | 0 |
| SF5 | PP | F | 0 | | 80 | 300 | 120,93 | 6,3 | 0 | 3 | 2 | 0 | 0 |
| SF6 | PP | F | 0 | | 80 | 400 | 122,38 | 7,8 | 0 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| SF7 | PB | F | 45 | 560 | 200 | 200 | 84,30 | 10,6 | 0 | 3 | 0 | 0 | 2 |
| SF8 | PB | F | 90 | 600 | 200 | 200 | 93,50 | 7,2 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 |

*Plusieurs modes de rupture peuvent être constatés

Tab. 9 : Goujons filetés chargés latéralement

| Lots | essai | α | n_g | L | H | c | ℓ | a_6 | a_9 | F_u | COV | R | |
|------|-------|----------|-------|-----|-----|-----|--------|-------|-------|-------|------|--------------|----|
| - | Fig | $^\circ$ | - | mm | mm | mm | mm | mm | mm | kN | % | 9 10 3 | 10 |
| SF9 | b) | 0 | 1 | 940 | 104 | 200 | 200 | 40 | - | 11,40 | 16,7 | 0 | 5 |
| SF10 | b) | 0 | 1 | 940 | 104 | 200 | 200 | 64 | - | 17,40 | 8,6 | 0 | 5 |
| SF11 | a) | 90 | 1 | 625 | 200 | - | 200 | - | 112 | 35,04 | 17,9 | 5 | 0 |

e) Principaux enseignements

- La charge d'arrachement d'un goujon collé augmente lorsque sa longueur d'ancrage augmente (SF1 à SF3 et SF4 à SF6). Celle-ci semble cependant tendre vers une valeur palière.
- Les modes de rupture observés pour les goujons filetés (SF4 à SF6) et torsadés (SF1 à SF3) ne sont pas les mêmes. Leurs résistances ne peuvent, par conséquent, être directement comparées. Le défaut d'adhésion constaté entre adhésif et acier tors peut s'expliquer par un moins bon état de surface du goujon lors de la réalisation de l'assemblage. Il se peut également que les concentrations de contraintes dans le joint d'adhésif, évoquées paragraphe II.1.5, soient plus prononcées dans le cas d'un profil tors et qu'elles déclenchent une rupture prématurée de la liaison.
- La résistance à l'arrachement d'un goujon collé ne semble que peu dépendante de l'angle d'insertion par rapport au fil du bois (SF4, SF7, SF8). Ce constat doit néanmoins être modéré par le fait que les conditions limites d'essai adoptées pour chaque angle d'insertion du goujon sont différentes.
- Dans le cas de goujons chargés axialement, les modes de rupture prédominants sont R1 et R2 : rupture en cisaillement d'une interface. Pour des goujons insérés parallèlement au fil, ces modes de rupture sont ponctuellement accompagnés d'un éclatement du bois (R7). Pour des goujons débouchants insérés perpendiculairement au fil du bois, c'est une fissuration due aux efforts de traction transverse qui est parfois apparue (R6).
- Dans le cas de goujons chargés latéralement (SF9 à SF11), la rupture intervient par fissuration puis arrachement du goujon par extraction d'un bloc de matériau (R10). Ce mode de rupture peut être précédé d'un écrasement local du bois (R9) avec plastification du goujon (R3).

II.3.2. Thèse de J. Surleau [14]

Des essais instantanés ont été réalisés au LRBB pour servir de référence à des essais de "durée de vie des assemblages par goujons collés sous sollicitations mécaniques et hygrothermiques". Des essais de caractérisation locale et de dimensions structurales ont été effectués et des correspondances entre ces deux types d'approche ont été établies.

a) Facteurs d'influence étudiés

- Essais de caractérisation locale et en dimensions structurales
- Conditions limites : Pull-Pull (PP), Pull-Compression (PC), flexion 4 points (4P)
- Types d'adhésif (adh.): Epoxy (EP), Polyuréthane (PU) (comportements non précisés)
- Types de bois : Chêne ancien (Ca) et lamellé-collé GL24h (LC)
- Diamètres du goujon et du perçage :
 - Dimensions structurales : Lamellé-collé : EP : 12 mm / 18 mm, PU : 12 mm / 14 mm
: Chêne : 10 mm / 14 mm à 18 mm selon provenance
 - Caractérisation locale : Lamellé-collé : EP : 8 mm / 14 mm et 12 mm / 18 mm
: PU : 12 mm/14 mm

b) Facteurs maintenus constants

- Longueur d’ancrage :
Dimensions structurales : 120 mm pour le chêne, 210 mm pour le lamellé collé
Caractérisation locale : 12 mm si $d_g = 12$ mm, 10 mm si $d_g = 8$ mm
- Goujons : acier
- Angle d’insertion des goujons par rapport au fil du bois : $\alpha = 0^\circ$
- Lamellé-collé : $(a_1, a_2) = (80 \text{ mm}, 40 \text{ mm})$, Chêne : $(a_1, a_2) = (60 \text{ mm}, 30 \text{ mm})$,
- Chargement axial des goujons

c) Conditions particulières d’essai (Fig. 31)

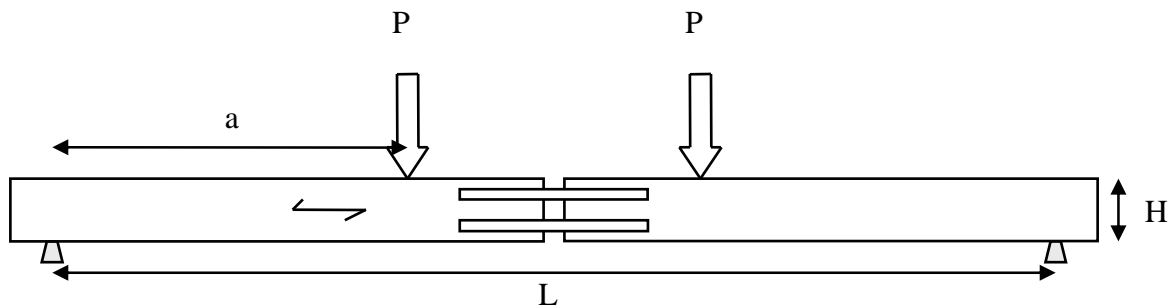


Fig. 31 : Essai de flexion quatre points (4P)

d) Contraintes moyennes et modes de rupture (Tab. 10)

Dans ce travail, les contraintes de cisaillement moyennes à la rupture “ $\bar{\tau}_u$ ” sont systématiquement rapportées à l’interface adhésif/bois et définies par la relation suivante:

$$\bar{\tau}_u = \frac{F_u}{\pi d_t \ell}$$

Eq. 3

Dans le cas des poutres testées en flexion 4 points, il a été vérifié [14] que les goujons collés sont exclusivement sollicités selon leur direction axiale : en compression pour le goujon supérieur, en traction pour le goujon inférieur. La correspondance entre charge appliquée à l’élément “P” et efforts de “traction-compression” “F” transmis par les goujons est ainsi la suivante.

$$F = \frac{Pa}{2a_1}$$

Eq. 4

Les éprouvettes de caractérisation locale, d’époxy ou de polyuréthane, présentent un comportement ductile à la rupture. Les éprouvettes de dimensions structurales, exceptées

celles en chêne ancien qui ont rompu consécutivement à la plastification du goujon, présentent un comportement fragile à la rupture.

Tab. 10 : Synthèse des résultats de J. Surleau

| Lots | essai | a | Adh | bois | n _g | L | ℓ | d _g | d _t | $\bar{\tau}_u$ | COV | R |
|--------------------------------|-------|-----|-----|------|----------------|------|-----|----------------|----------------|----------------|------|---|
| - | type | mm | - | - | - | mm | mm | mm | mm | MPa | % | - |
| Dimensions structurales | | | | | | | | | | | | |
| JS1 | PP | - | EP | LC | 1 | - | 210 | 12 | 18 | 5,5 | 8,7 | 2 |
| JS2 | PP | - | PU | LC | 1 | - | 210 | 12 | 14 | 6,7 | 8,4 | 2 |
| JS3 | 4P | 675 | EP | LC | 2 | 2000 | 210 | 12 | 18 | 5,5 | 10,0 | 2 |
| JS4 | 4P | 675 | PU | LC | 2 | 2000 | 210 | 12 | 14 | 6,5 | 10,9 | 2 |
| JS5 | 4P | 675 | EP | Ca | 4 | 2000 | 120 | 10 | 14/18 | 7,1 | 12,5 | 3 |
| Caractérisation locale | | | | | | | | | | | | |
| JS6 | PC | - | EP | LC | 1 | 10 | 10 | 8 | 14 | 9,7 | 18,2 | 2 |
| JS7 | PC | - | EP | LC | 1 | 12 | 12 | 12 | 18 | 11,0 | 11,7 | 2 |
| JS8 | PC | - | PU | LC | 1 | 12 | 12 | 12 | 14 | 9,4 | 13,3 | 2 |

e) Principaux enseignements

- Le comportement à la rupture des assemblages de caractérisation locale est différent de celui des assemblages de dimensions structurales. Le comportement à la rupture de l'assemblage apparaît ainsi comme dépendant de la longueur d'ancrage.
- Un assemblage par goujons collés exclusivement soumis à un moment fléchissant équivaut, d'un point de vue mécanique, à un assemblage présentant des goujons collés chargés exclusivement axialement (JS1 - JS3 et JS2 - JS4).
- De par des modes de rupture différents, les spécimens en lamellé-collé et chêne ancien n'ont pu être directement comparés.
- De par des épaisseurs de joint différentes, selon les préconisations des fournisseurs, les performances de l'époxy et du polyuréthane ne peuvent être directement comparées en terme de force. Les grandeurs obtenues sont néanmoins d'importance pour toutes utilisations futures de l'adhésif.

II.3.3. Campagne expérimentale GIROD

La campagne expérimentale du projet européen GIROD a été menée afin de valider une approche de dimensionnement préétablie par P.J. Gustafsson [34] (Eq. 41). Elle a été très largement enrichie par S. Aicher [35] qui la jugeait insuffisante pour une bonne calibration de cette approche théorique. Cette large base de données expérimentales a finalement permis la proposition, en 2003, d'une formule simplifiée à l'Eurocode 5 (Eq. 53).

a) Facteurs d'influence étudiés

- Longueur d'ancrage (ℓ)
- Diamètre du goujon (d_g)
- Diamètre du trou (d_t)
- Type d'adhésif : Epoxy (E_p) (comportement non précisé), Phénol-Résorcinol-Formol (PRF) (comportement ductile [35]), Polyuréthane (PUR) (comportement non précisé)
- Conditions limites de l'essai : Pull-Pull, Pull Compression, Pull-Beam
- Angle d'insertion du goujon par rapport au fil du bois : $\alpha = 0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ$ et 90°

b) Facteurs maintenus constants

- Epaisseur du joint d'adhésif : 0,5 mm
- Type de goujon : acier fileté
- Type de bois : Epicéa classe supérieure à C35
- Chargement axial des goujons
- $a_2 > 2,5d_g$

c) Contraintes moyennes à la rupture (Tab. 11, Tab. 12, Tab. 13)

Dans GIROD, les contraintes de cisaillement moyennes à la rupture " $\overline{\tau}_u$ " sont systématiquement rapportées à l'interface goujon/adhésif et définies par :

$$\overline{\tau}_u = \frac{F_u}{\pi d_g \ell}$$

Eq. 5

Tab. 11 : Synthèse des résultats de Pull-Pull de GIROD [18] et de S. Aicher [35]

| ℓ/d_g d_g (mm) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
|--------------------------|---|-------|------|------|------|------|------|------|
| | $\overline{\tau}_u$ en MPa - Epoxy | | | | | | | |
| 8 | 10,25 | 10,01 | 8,56 | 7,09 | 5,54 | 5,91 | 4,55 | 4,67 |
| 12 | 10,43 | 8,25 | 7,88 | 6,37 | 5,58 | 5,35 | 4,81 | 4,09 |
| 16 | 8,53 | 7,12 | 7,20 | 6,48 | 5,20 | 4,26 | 4,12 | 3,60 |
| 20 | 6,71 | 7,64 | 4,81 | 5,24 | 4,14 | 3,44 | 3,22 | 3,14 |
| | $\overline{\tau}_u$ en MPa - Phénol-Résorcinol-Formol | | | | | | | |
| 8 | 6,63 | 6,30 | 6,08 | 7,80 | 6,00 | | | 5,03 |
| 12 | 5,76 | 6,52 | 6,24 | 5,21 | 5,58 | 4,51 | | |
| 16 | 6,00 | 6,87 | 5,95 | 6,32 | 5,05 | 4,40 | 4,32 | 4,48 |
| 30 | 4,28 | 5,03 | | 4,96 | | | | |
| | $\overline{\tau}_u$ en MPa - Polyuréthane | | | | | | | |
| 8 | | | | 7,81 | | | | |
| 16 | | 8,49 | | 5,76 | | | | |

Tab. 12 : Comparaison des résultats de Pull-Pull et de Pull-Compression

| d_g | l/d_g | Adh. | $\bar{\tau}_u$ - Pull-Pull | $\bar{\tau}_u$ - Pull-Compression |
|-------|---------|------|----------------------------|-----------------------------------|
| mm | - | Type | MPa | MPa |
| 16 | 10 | EP | 8,04 | 7,78 |
| 16 | 10 | PRF | 6,94 | 7,94 |
| 16 | 10 | PUR | 7,59 | 7,33 |
| 16 | 20 | EP | 6,72 | 4,81 |
| 16 | 20 | PRF | 5,95 | 6,12 |
| 16 | 20 | PUR | 5,59 | 4,60 |

Tab. 13 : Influence de l'angle d'insertion du goujon par rapport au fil du bois

| d_g | l/d_g | Adh. | essai | α | $\bar{\tau}_u$ | COV |
|-------|---------|------|-------|----------|----------------|-----|
| mm | - | type | - | ° | MPa | % |
| 16 | 10 | PRF | PP | 0 | 6,88 | 5 |
| 16 | 10 | PRF | PB | 90 | 6,33 | 12 |
| 16 | 20 | PRF | PP | 0 | 6,32 | 5 |
| 16 | 20 | PRF | PB | 22,5 | 5,88 | 8 |
| 16 | 20 | PRF | PB | 45 | 6,44 | 7 |
| 16 | 20 | PRF | PB | 90 | 6,43 | 5 |
| 16 | 10 | PUR | PP | 0 | 8,49 | 10 |
| 16 | 10 | PUR | PB | 90 | 7,95 | 5 |

Les modes de rupture obtenus ne sont pas précisés de façon explicite mais l'intérêt de cette campagne expérimentale laisse clairement supposer des ruptures en cisaillement au niveau du joint d'adhésif (R1, R2 ou R5). Du fait de la finesse du joint d'adhésif, la localisation exacte de la rupture ne s'avère pas primordiale. Les courbes "force-déplacement" des essais complémentaires menés sur l'époxy par S. Aicher sont disponibles dans [35]. Leur examen permet de constater que ces assemblages ont un comportement quasi-fragile à la rupture. Pour les plus grandes longueurs d'ancrage, la tendance de certaines courbes à l'aplanissement dénote un processus de plastification du goujon.

d) Principaux enseignements

- Ce programme expérimental, de par son ampleur et sa rationalité, constitue un véritable patrimoine pour les investigations présentes et à venir. La richesse de cette campagne réside plus dans le fait qu'elle puisse servir de référence que dans les enseignements directs qu'elle fournit. Elle confirme néanmoins que la charge ultime de l'assemblage augmente lorsque la longueur d'ancrage et/ou le diamètre du goujon (et par extension celui du perçage) augmentent.
- Du fait de conditions d'essai similaires, les adhésifs étudiés peuvent être comparés entre eux en terme de résistance.

- L'essai de Pull-Compression est apparu comme plus pénalisant pour les goujons collés à l'Epoxy et au Polyuréthane. Pour la Phénol-Résorcinol-Formol, l'inverse a été constaté. Le fait que cette dernière ait été choisie très ductile en est peut être une explication.
- Qu'il s'agisse d'assemblages au Polyuréthane ou à la Phénol-Résorcinol-Formol, l'angle d'insertion du goujon par rapport au fil du bois ne s'est pas révélé un facteur d'influence majeur de la résistance à l'arrachement du goujon collé. Cela va dans le même sens que ce qui transparaissait des essais réalisés au CTBA sur de l'Epoxy.

II.3.4. Travaux expérimentaux de E. Serrano [29]

Ces travaux expérimentaux, menés sur des éprouvettes de caractérisation locale, ont été réalisés parallèlement au projet GIROD dans le cadre de travaux de doctorat.

a) Facteurs d'influence étudiés

- Type de goujon : Acier fileté, FRP
- Type d'adhésif : identiques à ceux du projet GIROD
- Type de bois : épicéa classe C24 et C35
- Angle d'insertion du goujon par rapport au fil du bois : 0° , $22,5^\circ$, 45° , 90°

b) Facteurs maintenus constants

- Longueur d'ancrage (ℓ) : 8 mm
- Diamètre du goujon (d_g) : 16 mm
- Epaisseur du joint de colle : 0,5 mm
- $a_2 = 16$ mm
- Chargement axial des goujons
- Conditions limites de l'essai : Push-Push (Fig. 32)
- Essais de caractérisation locale

c) Conditions particulières d'essai (Fig. 32)

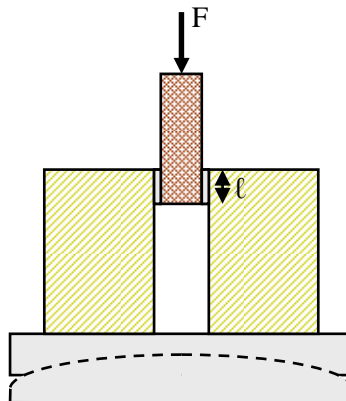


Fig. 32 : Essai de Push-Push

d) Résultats expérimentaux (Tab. 14)

De même que dans GIROD, les contraintes de cisaillement moyennes à la rupture " $\overline{\tau_u}$ " sont rapportées à l'interface goujon/adhésif (Eq. 5).

Les modes de rupture observés sont de trois types correspondant aux trois adhésifs utilisés. Les goujons acier collés à la PRF ont cédé au niveau de l'interface goujon/adhésif (R1). Les goujons acier collés au PUR ont cédé dans l'interphase adhésif/bois coté adhésif (Fig. 18) (R2). Les goujons acier collés à l'époxy ont cédé dans l'interphase adhésif/bois coté bois (fibres en surface du cylindre d'adhésif) (R2). Ces éprouvettes de caractérisation locale, quelque soit l'adhésif employé, présentent un comportement ductile avant la rupture.

Tab. 14 : Synthèse des résultats expérimentaux de Serrano

| Lots | Goujon | Bois | Adh. | α | $\overline{\tau_u}$ | COV |
|------|--------|--------|------|----------|---------------------|-----|
| - | type | classe | type | ° | MPa | % |
| ES1 | Acier | C35 | PRF | 0 | 7,05 | 6 |
| ES2 | Acier | C35 | PUR | 0 | 10,5 | 10 |
| ES3 | Acier | C35 | EP | 0 | 13,1 | 10 |
| ES4 | Acier | C24 | PRF | 0 | 6,18 | 5 |
| ES5 | Acier | C24 | PUR | 0 | 10,6 | 5 |
| ES6 | Acier | C24 | EP | 0 | 11,0 | 12 |
| ES7 | Acier | C35 | EP | 22,5 | 12,8 | 4 |
| ES8 | Acier | C35 | EP | 45 | 10,7 | 6 |
| ES9 | Acier | C35 | EP | 90 | 7,12 | 6 |
| ES10 | FRP | C35 | EP | 0 | 11,8 | 7 |

e) Principaux enseignements

- Les goujons collés en acier fileté présentent, malgré des modes de rupture similaires (R2), une meilleure résistance au cisaillement que les goujons composite.
- Les assemblages réalisés avec la PRF ne peuvent être comparés aux autres car ils présentent un mode de rupture différent. Epoxy et PUR peuvent quant à eux être comparés en vue d'utilisations futures. En ce qui concerne l'époxy, les courbes "force-déplacement" obtenues diffèrent sensiblement selon la nature du goujon utilisé. Le comportement global de l'assemblage reste néanmoins ductile dans les deux cas.
- Les assemblages réalisés au moyen d'épicéa classe C35 présentent globalement une meilleure résistance que ceux réalisés à partir d'épicéa C24. Compte tenu des coefficients de variation correspondants, la différence observée n'apparaît néanmoins que peu significative.
- La résistance à l'arrachement diminue lorsque l'angle d'insertion du goujon augmente (ES3 et ES7 à ES8). Cette diminution n'est que très sensible entre 0° et 45° puis beaucoup plus prononcée entre 45° et 90°. Des différences apparaissent également en terme de

comportement de l'assemblage à la rupture. Les courbes "force-déplacement" obtenues pour chaque angle étudié, disponibles dans [29], attestent toutes de comportements ductiles mais avec des contraintes maximales et des comportements post pic très divers. Ces résultats particuliers pourraient être expliqués par l'utilisation d'éprouvettes de caractérisation locale.

- Le comportement global de l'assemblage collé à la rupture dépend ainsi des caractéristiques mécaniques des substrats impliqués. Avec la même époxy, les éprouvettes du programme expérimental GIROD ont rompu de façon quasi-fragile. Ces deux campagnes expérimentales confirment également l'influence des dimensions sur le comportement à la rupture de l'assemblage.

II.3.5. Campagne expérimentale de L. Féligioni [36] [37]

a) *Facteurs d'influence étudiés*

- Diamètre du goujon (d_g) : 10 mm, 12 mm, 14 mm
- Epaisseur du joint d'adhésif : 1 mm, 3 mm, 5 mm
- Longueur d'ancrage du goujon : 20 mm, 40 mm, 60 mm
- Rhéologie de l'adhésif (Rhéol): fragile et ductile

b) *Facteurs maintenus constants*

- Matériaux : Goujon : acier fileté, Adhésif : Epoxy, Bois : Epicéa sans défauts
- $a_2 = 37,5$ mm
- Angle d'insertion du goujon par rapport au fil du bois : 0°
- Chargement axial du goujon
- Essai de caractérisation locale
- Conditions d'essai : Pull-Compression

c) *Conditions particulières d'essai (Fig. 33)*

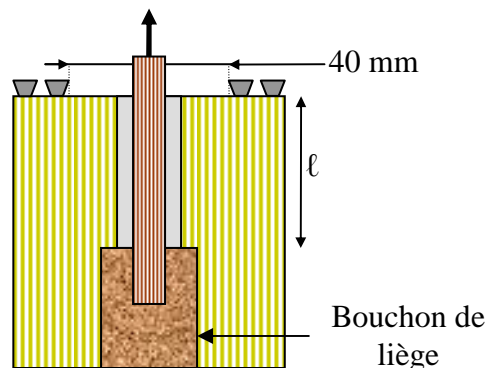


Fig. 33 : Conditions d'essai de L. Féligioni

d) *Charges et modes de rupture (Tab. 15)*

Tab. 15 : Résultats expérimentaux de L. Féligioni

| Lots | Rhéol. | L | d _g | e | ℓ | F _u | COV | R2 | R5 | R1 |
|------|---------|----|----------------|----|----|----------------|------|-----|----|----|
| - | - | mm | mm | mm | mm | N | % | - | - | - |
| LF1 | fragile | 40 | 10 | 1 | 40 | 11104 | 10,6 | 70 | 30 | 0 |
| LF2 | fragile | 40 | 10 | 3 | 40 | 13289 | 9,7 | 90 | 10 | 0 |
| LF3 | fragile | 40 | 10 | 5 | 40 | 12914 | 13,8 | 0 | 90 | 10 |
| LF4 | fragile | 40 | 12 | 1 | 40 | 12331 | 9,5 | 70 | 20 | 10 |
| LF5 | fragile | 40 | 12 | 3 | 40 | 13850 | 13,1 | 80 | 20 | 0 |
| LF6 | fragile | 40 | 12 | 5 | 40 | 13641 | 10,1 | 0 | 90 | 10 |
| LF7 | fragile | 40 | 14 | 1 | 40 | 13896 | 14,2 | 100 | 0 | 0 |
| LF8 | fragile | 40 | 14 | 3 | 40 | 14908 | 13,1 | 50 | 40 | 10 |
| LF9 | fragile | 40 | 14 | 5 | 40 | 15768 | 15,0 | 80 | 20 | 0 |
| LF10 | fragile | 20 | 12 | 3 | 20 | 6123 | 12,4 | 60 | 40 | 0 |
| LF11 | fragile | 60 | 12 | 3 | 60 | 23215 | 7,0 | 90 | 10 | 0 |
| LF12 | ductile | 40 | 10 | 1 | 40 | 13773 | 15,6 | 100 | 0 | 0 |
| LF13 | ductile | 40 | 10 | 3 | 40 | 18132 | 19,0 | 100 | 0 | 0 |
| LF14 | ductile | 40 | 10 | 5 | 40 | 23252 | 6,6 | 30 | 10 | 60 |
| LF15 | ductile | 40 | 12 | 1 | 40 | 14811 | 20,0 | 100 | 0 | 0 |
| LF16 | ductile | 40 | 12 | 3 | 40 | 23607 | 10,8 | 10 | 0 | 90 |
| LF17 | ductile | 40 | 12 | 5 | 40 | 25779 | 10,3 | 90 | 0 | 10 |
| LF18 | ductile | 40 | 14 | 1 | 40 | 23744 | 16,0 | 100 | 0 | 0 |
| LF19 | ductile | 40 | 14 | 3 | 40 | 24491 | 8,0 | 70 | 0 | 30 |
| LF20 | ductile | 40 | 14 | 5 | 40 | 26968 | 4,1 | 30 | 0 | 70 |
| LF21 | ductile | 20 | 12 | 3 | 20 | 11560 | 5,2 | 100 | 0 | 0 |
| LF22 | ductile | 60 | 12 | 3 | 60 | 32759 | 5,1 | 80 | 20 | 0 |

e) *Principaux enseignements*

- Les résultats obtenus pour ces deux rhéologies d'époxy varient du simple au double. Toutes les rhéologies d'époxy envisageables ne peuvent, par conséquent, être décrites par une seule et même approche.
- Le grand nombre d'essais effectué a permis d'établir, pour ces deux rhéologies d'adhésif, une corrélation entre volume d'adhésif et charge ultime de l'assemblage. Un coefficient correcteur a été ajouté, en ce sens, aux approches de dimensionnement existantes.

II.3.6. Campagne expérimentale de H.J. Blass [38]

Cette campagne expérimentale s'inscrit dans le cadre du projet GIROD et plus particulièrement dans la recherche de la disposition idéale des goujons collés entre eux et par rapport aux arêtes de l'élément.

a) **Facteurs d'influence étudiés**

- Distance à l'arête la plus proche de l'élément (a_2)
- Nombre de goujons (n_g) : 1, 2, 3
- Distance entre les goujons (a_1)
- Diamètre du goujon (d_g)
- Longueur d'ancrage (ℓ)
- Angle d'insertion du goujon par rapport au fil du bois : $\alpha = 0^\circ$ et 90°
- Conditions de chargement (CC) : axial (A) et latéral (L_\perp)
- Types d'adhésif : identiques à ceux du projet GIROD
- Types de bois : épicéa C35, lamellé-collé : GL24h, GL28h, GL32h

b) **Facteurs maintenus constants**

- Type de goujon : acier fileté
- Epaisseur du joint de colle : 0,5 mm
- Essais en dimensions structurales
- Conditions d'essai: Pull-Pull (PP), Fig. 29, Fig. 30

c) **Conditions d'essai particulières (Fig. 34)**

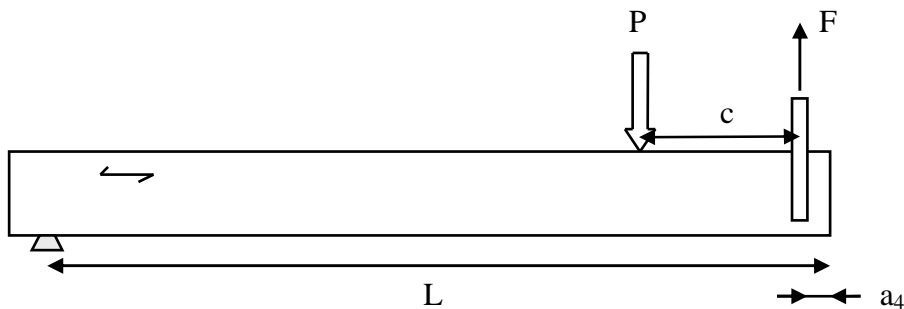


Fig. 34 : Goujon inséré perpendiculairement au fil du bois et chargé axialement

d) **Charges et modes de rupture (Tab. 16, Tab. 17, Tab. 18)**

Lorsque l'assemblage est constitué de plusieurs goujons, F_u correspond à la charge maximale reprise individuellement par chaque goujon.

Toutes les ruptures constatées dans le cas de goujons chargés axialement se sont produites de manière fragile ou quasi-fragile (bois ou joint d'adhésif). Dans le cas des goujons chargés latéralement, l'enfoncement dans le bois et la plastification du goujon ont très probablement conféré à l'assemblage une certaine ductilité avant la rupture.

**Tab. 16 : Distance entre goujons et distance à l'arête de l'élément
 $\alpha = 0$, chargement axiale (Pull-Pull), Epicéa classe C35**

| Lots | adh. | n_g | H=B | L | ℓ | d_g | a_1 | a_2 | F_u | COV | R |
|------|------|-------|-----|------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| - | type | - | mm | mm | mm | mm | mm | mm | kN | % | - |
| B1 | PRF | 2 | 120 | 1088 | 320 | 16 | 101,8 | 24 | 74,9 | 3,2 | 7 |
| B2 | PRF | 2 | 120 | 1088 | 320 | 16 | 79,2 | 32 | 79,9 | 8,0 | 7 |
| B3 | PRF | 2 | 120 | 1088 | 320 | 16 | 56,6 | 40 | 82,5 | 2,9 | 7 |
| B4 | PRF | 2 | 120 | 1088 | 320 | 16 | 33,9 | 48 | 77,1 | 7,5 | 7 |
| B5 | PRF | 1 | 120 | 1088 | 320 | 16 | - | 60 | 87,9 | 6,6 | 1-2 |
| B6 | PUR | 1 | 120 | 1088 | 320 | 16 | - | 60 | 65,9 | - | 1-2 |
| B7 | EP | 1 | 120 | 1088 | 320 | 16 | - | 60 | 73,9 | - | 1-2 |
| B8 | PRF | 1 | 120 | 1360 | 400 | 20 | - | 60 | 88,9 | 26,6 | 1-2 |
| B9 | PRF | 1 | 120 | 816 | 240 | 12 | - | 60 | 47,5 | 1,5 | 1-2 |
| B10 | PRF | 3 | 120 | 1088 | 320 | 16 | 32 | 40 | 68,0 | 14,4 | 7 |
| B11 | PRF | 3 | 120 | 1088 | 320 | 16 | 40 | 40 | 68,7 | 6,7 | 7 |
| B12 | PRF | 3 | 120 | 1088 | 320 | 16 | 48 | 40 | 78,2 | 4,7 | 7 |
| B13 | PRF | 3 | 120 | 1088 | 320 | 16 | 60 | 40 | 82,9 | - | 7 |

**Tab. 17 : Goujon inséré perpendiculairement au fil du bois et chargé axialement
 $\alpha = 90^\circ$, Chargement axial (essai Fig. 34), Lamellé collé GL28h, adhésif PRF**

| Lots | n_g | c | H | B | L | ℓ | d_g | a_2 | F_u | COV | R |
|------|-------|------|-----|-----|------|--------|-------|-------|-------|------|-----|
| - | | mm | mm | mm | mm | mm | mm | mm | kN | % | - |
| B14 | 1 | 640 | 320 | 120 | 3200 | 320 | 16 | 60 | 84,0 | 5,2 | 1-2 |
| B15 | 1 | 800 | 400 | 120 | 4000 | 320 | 16 | 60 | 80,7 | 5,3 | 6 |
| B16 | 1 | 960 | 480 | 120 | 4800 | 320 | 16 | 60 | 70,4 | 12,8 | 6 |
| B17 | 1 | 1120 | 560 | 120 | 5600 | 320 | 16 | 60 | 66,0 | 12,6 | 6 |
| B18 | 1 | 480 | 240 | 120 | 2400 | 160 | 16 | 60 | 42,4 | 13,1 | 6 |
| B19 | 1 | 560 | 280 | 120 | 2800 | 160 | 16 | 60 | 36,5 | 10,8 | 6 |
| B20 | 1 | 640 | 320 | 120 | 3200 | 160 | 16 | 60 | 37,7 | 9,7 | 6 |
| B21 | 1 | 1000 | 500 | 120 | 5000 | 160 | 16 | 60 | 29,7 | 10,8 | 6 |

**Tab. 18 : Goujons insérés parallèlement au fil du bois et chargés latéralement
 $\alpha = 0^\circ$, Chargement latéral (essai Fig. 30, $c = \ell + 2H$), adhésif PRF**

| Lots | bois | n_g | H | B | L | ℓ | d_g | a_5 | a_6 | V_u | COV | R |
|------|------|-------|-----|-----|------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| - | - | - | | | | mm | mm | mm | mm | kN | % | - |
| B22 | GL24 | 1 | 220 | 100 | 2380 | 320 | 16 | - | 110 | 21,28 | 13,8 | 9-10 |
| B23 | GL32 | 1 | 300 | 100 | 3500 | 320 | 16 | - | 50 | 6,18 | 10,6 | 9-10 |
| B24 | GL32 | 1 | 300 | 100 | 3500 | 320 | 16 | - | 100 | 12,95 | 16,8 | 9-10 |
| B25 | GL32 | 1 | 300 | 100 | 3500 | 320 | 16 | - | 150 | 20,62 | 18,8 | 9-10 |
| B26 | GL32 | 1 | 300 | 100 | 3500 | 320 | 16 | - | 200 | 24,48 | 11,8 | 9-10 |
| B27 | GL32 | 1 | 300 | 150 | 3500 | 320 | 16 | - | 50 | 10,97 | 14,6 | 9-10 |
| B28 | GL32 | 2 | 400 | 100 | 4500 | 320 | 16 | 80 | 50 | 17,35 | 10,5 | 9-10 |
| B29 | GL32 | 2 | 400 | 100 | 4500 | 320 | 16 | 80 | 100 | 28,01 | 10,8 | 9-10 |
| B30 | GL32 | 2 | 400 | 100 | 4500 | 320 | 16 | 80 | 150 | 27,26 | 31,8 | 9-10 |
| B31 | GL32 | 2 | 400 | 100 | 4500 | 320 | 16 | 80 | 200 | 39,49 | 19,8 | 9-10 |

e) **Principaux enseignements**

- La résistance à l'arrachement d'un goujon collé inséré dans le sens du fil augmente lorsque sa distance à l'arête de l'élément la plus proche augmente. A partir d'une distance seuil, la rupture serait déplacée du bois (R7) au joint d'adhésif (R1, R2, R5). Ce phénomène n'a pas été observé mais une distance seuil a néanmoins été établie à $2,5d_g$.
- La résistance individuelle à l'arrachement de goujons collés constitutifs d'un assemblage augmente lorsque leur entraxe augmente. Là encore, la rupture serait reportée du bois (R7) vers le joint d'adhésif (R1, R2, R5) à partir d'un entraxe de $5d_g$.
- La résistance à l'arrachement d'un goujon collé de longueur donnée " l ", disposé selon la hauteur " H " de l'élément soit perpendiculairement au fil du bois (Fig. 34), diminue lorsque la hauteur " H " de l'élément augmente. Dans le cas d'un goujon collé débouchant, la rupture intervient par cisaillement au niveau du joint d'adhésif (R1, R2, R5). Dans le cas d'un goujon collé non débouchant, elle se produit par fissuration du bois par traction transverse (R6).
- Pour des goujons insérés parallèlement au fil et sollicités latéralement, la résistance de l'assemblage augmente lorsque la distance à l'extrémité de l'élément " a_6 " augmente. Les performances de l'assemblage sont étonnamment meilleures avec du GL24h qu'avec du GL32h.

II.4. APPROCHES PREDICTIVES DISPONIBLES

A la plupart des modes de rupture présentés en II.2 correspondent une ou plusieurs approches prédictives. Celles-ci portent sur des assemblages élémentaires (goujon unique) soumis à un chargement élémentaire (axial ou latéral). Les assemblages et chargements plus complexes pourront être abordés par décomposition en assemblages et chargements élémentaires.

II.4.1. Rupture en cisaillement de l'adhésif

Sont intégrés dans cette partie les modes de rupture affectant l'adhésif (rupture cohésive R5) et ses interfaces (ruptures adhésives : R1, R2). Toutes interviennent lors d'un chargement axial du goujon. Dans le cas d'un goujon inséré parallèlement au fil du bois, la symétrie de révolution constatée Fig. 35 permet d'établir un lien entre goujons collés et assemblage à double recouvrement.

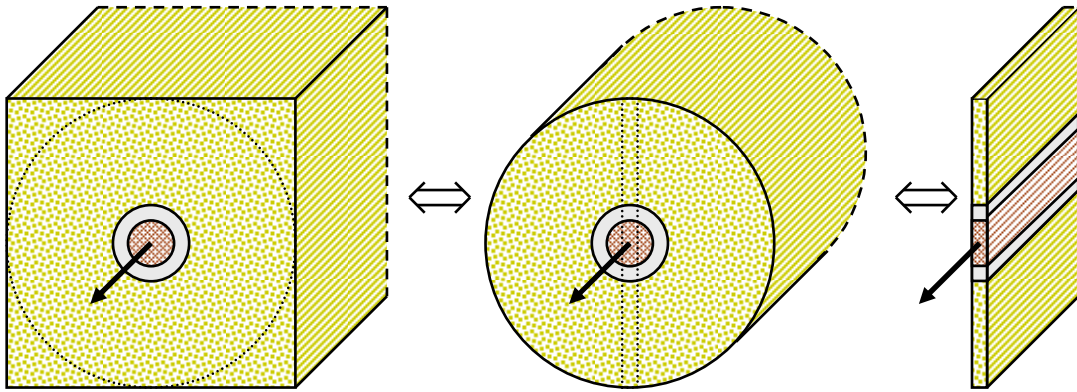


Fig. 35 : Rapprochement entre goujon collé et assemblage à double recouvrement

a) *Approches élastiques concernant l'assemblage à double recouvrement*

L'assemblage à double recouvrement est le plus souvent étudié dans des conditions de chargement similaires à celles de l'essai de Pull-Pull (Fig. 36). Les théories élastiques permettent de déterminer la distribution des contraintes de cisailement dans l'adhésif à partir du bilan des déplacements dans l'assemblage (Eq. 6).

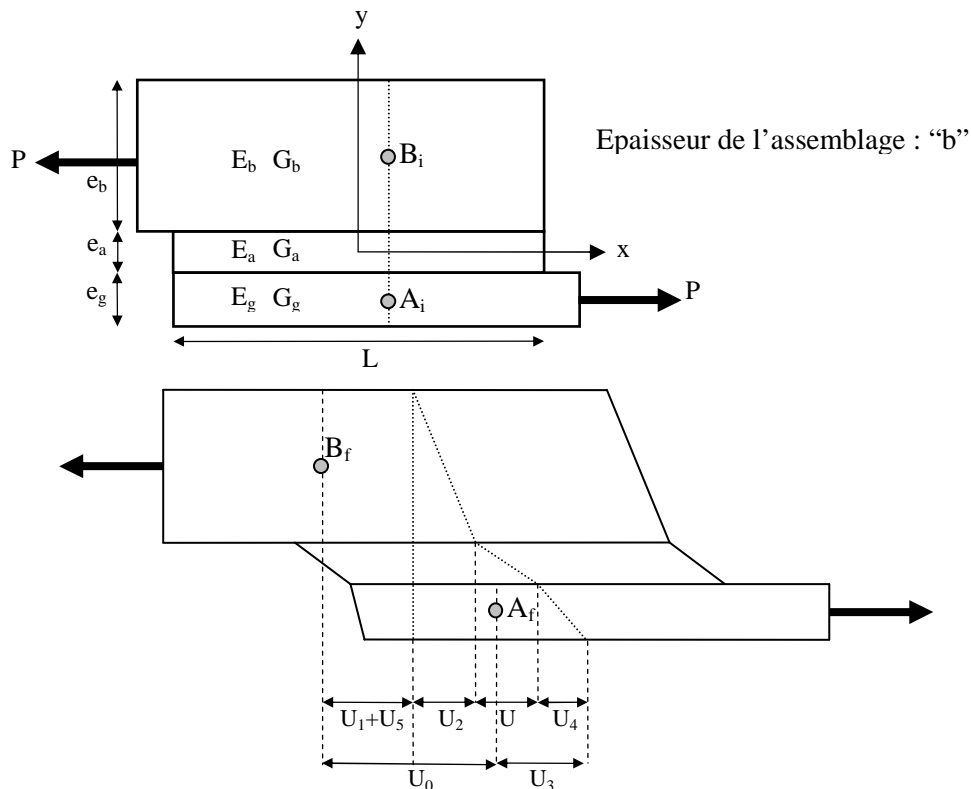


Fig. 36 : Assemblage à double recouvrement, notations et bilan des déplacements

Bilan des déplacements :

$$U_0 = U_2 + U + U_4 + U_1 + U_5 - U_3$$

Eq. 6

Les déplacements recensés correspondent chacun à un effort interne : effort normal N, effort tranchant V ou moment fléchissant M. Ils s'expriment de la manière suivante.

$U_1(x)$: allongement du bois :

$$U_1(x) = \int_{-L/2}^x \frac{\sigma_b(x)}{E_b} dx$$

Eq. 7

$U_2(x)$: déplacement de la face supérieure du bois par rapport à la face inférieure dû au cisaillement :

$$U_2(x) = \frac{\tau(x).e_b}{2.G_b}$$

Eq. 8

$U_3(x)$: allongement du goujon :

$$U_3(x) = \int_{-L/2}^x \frac{\sigma_g(x)}{E_g} dx$$

Eq. 9

$U_4(x)$: déplacement de la face supérieure du goujon :

$$U_4(x) = \frac{\tau(x).e_g}{2.G_g}$$

Eq. 10

$U_5(x)$: déplacement de la face supérieure du bois par rapport à la face inférieure dû à la flexion :

$$U_5(x) = - \int_{-L/2}^x \frac{M(x).e_b}{D} dx$$

Eq. 11

$U(x)$: déplacement de la face supérieure de l'adhésif par rapport à la face inférieure dû au cisaillement :

$$U(x) = \frac{\tau(x) \cdot e_a}{G_a}$$

Eq. 12

Les contraintes axiales dans le bois et le goujon sont obtenues en appliquant le principe fondamental de la statique à l'assemblage (Fig. 37).

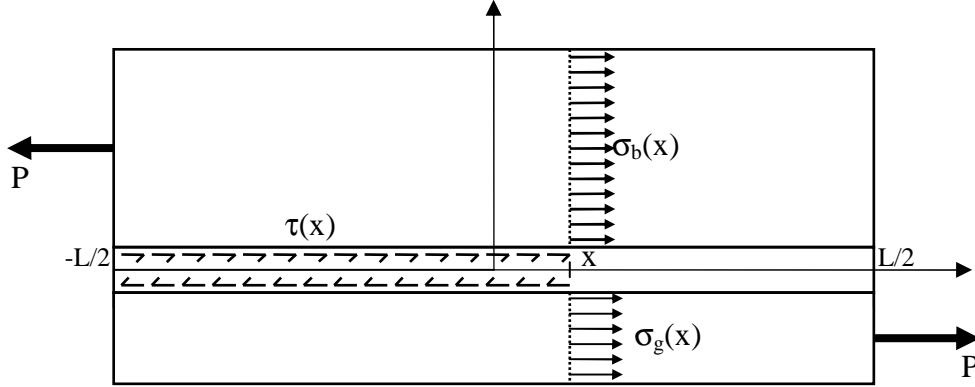


Fig. 37 : Principe fondamental de la statique appliqué à l'assemblage

Equations d'équilibre :

$$\sigma_b(x) = \frac{P}{e_b} - \int_{-L/2}^x \frac{\tau(x)}{e_b} dx$$

Eq. 13

$$\sigma_g(x) = \int_{-L/2}^x \frac{\tau(x)}{e_g} dx$$

Eq. 14

En remplaçant dans Eq. 6, les déplacements par leur expression littérale et en dérivant trois fois, on obtient l'équation différentielle suivante.

$$\left(\frac{e_b}{2.G_b} + \frac{e_a}{G_a} + \frac{e_g}{2.G_g} \right) \frac{d^3 \tau(x)}{dx^3} - \left(\frac{1}{e_g E_g} + \frac{1}{e_b E_b} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} - \frac{e_b}{D} \cdot \frac{d^2 M(x)}{dx^2} = 0$$

Eq. 15

En appelant "σ" la contrainte d'ouverture exercée par la colle sur le bois (Fig. 38), les équations d'équilibre local du substrat bois s'écrivent :

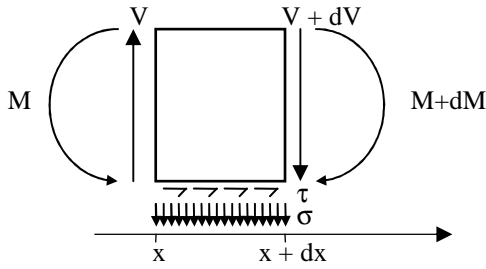


Fig. 38: Equilibre local du substrat bois

$$V - (V + dV) - \sigma dx = 0 \Leftrightarrow \frac{dV}{dx} = -\sigma$$

Eq. 16

$$\tau dx \times \frac{e_b}{2} + M - (M + dM) - V dx = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{dM}{dx} = -V + \tau \frac{e_b}{2}$$

Eq. 17

En conjuguant les deux équations précédentes (Eq. 16 et Eq. 17) on obtient l'équation suivante :

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = +\sigma + \frac{e_b}{2} \frac{d\tau}{dx}$$

Eq. 18

L'équation différentielle initiale devient alors :

$$\left(\frac{e_b}{2G_b} + \frac{e_a}{G_a} + \frac{e_g}{2G_g} \right) \frac{d^3 \tau(x)}{dx^3} - \left(\frac{1}{e_g E_g} + \frac{1}{e_b E_b} + \frac{e_b^2}{2D} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} = \frac{e_b}{D} \sigma(x)$$

Eq. 19

Cette équation différentielle, tenant compte de la totalité des déplacements dans l'assemblage, est généralement simplifiée. Plusieurs résolutions, effectuées à partir d'hypothèses de moins en moins restrictives, ont été successivement proposées.

La plus significative est sans aucun doute la théorie de O. Volkersen [39]. Les substrats se déforment uniquement en traction et l'adhésif se déforme uniquement en cisaillement. Le bilan des déplacements dans l'assemblage se résume alors à :

$$U_0 = U + U_1 - U_3$$

Eq. 20

L'équation différentielle obtenue est:

$$\left(\frac{e_a}{G_a} \right) \frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - \left(\frac{1}{e_g E_g} + \frac{1}{e_b E_b} \right) \tau(x) = 0$$

Eq. 21

La résolution de cette équation permet une description des contraintes de cisaillement dans l'adhésif, supposées uniformes selon l'épaisseur du joint, sous la forme :

$$\tau(x) = \frac{P}{bl} \cdot \frac{\omega l}{2} \left(\frac{\cosh(\omega x)}{\sinh\left(\frac{\omega l}{2}\right)} + \frac{(E_g e_g - E_b e_b)}{E_g e_g + E_b e_b} \frac{\sinh(\omega x)}{\cosh\left(\frac{\omega l}{2}\right)} \right)$$

Eq. 22

$$\text{avec } \omega = \sqrt{\frac{E_a}{2e_a(1+\nu_a)} \left(\frac{1}{E_g e_g} + \frac{1}{E_b e_b} \right)}$$

Eq. 23

Les contraintes de cisaillement selon la longueur du joint d'adhésif sont ainsi distribuées de la manière suivante. (Fig. 39)

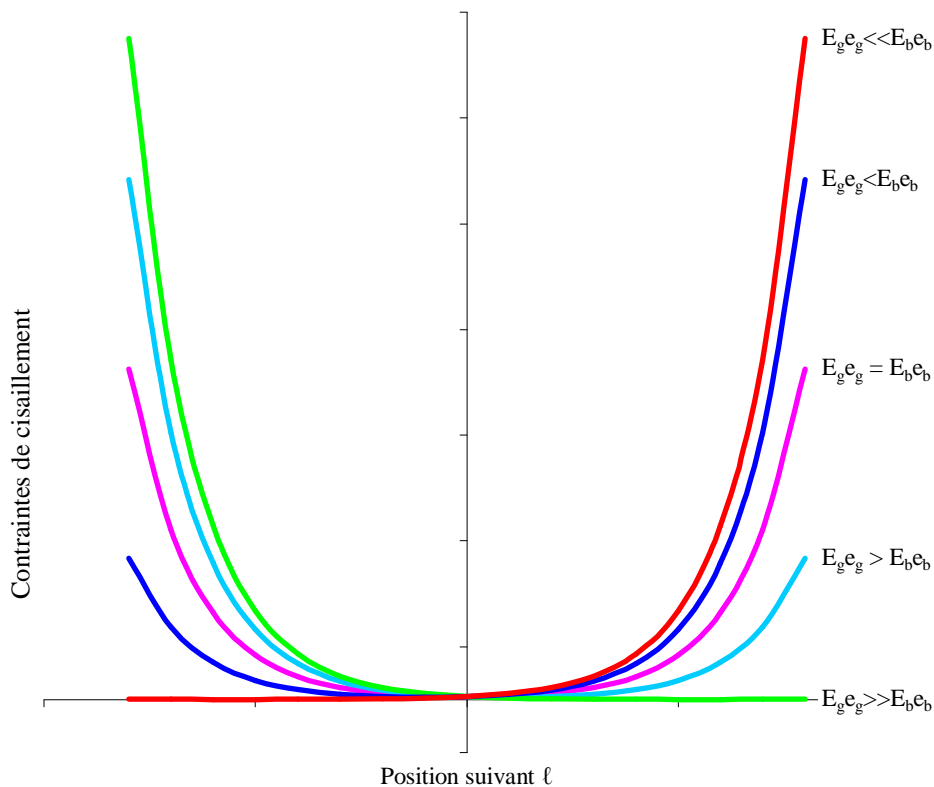


Fig. 39 : Allure des contraintes de cisaillement dans le joint d'adhésif selon les rigidités des substrats

Les zones les plus lourdement sollicitées sont ainsi localisées aux extrémités du joint de colle.

O. Volkersen [40] a, par la suite enrichi sa théorie en intégrant à sa résolution les déplacements dans l'assemblage dus au cisaillement des substrats (U_2 et U_4). M. Goland et E. Reissner [41] ont, quant à eux, proposé une résolution partielle de l'équation différentielle complète présentée ci-dessus (Eq. 19). Le détail de leurs travaux figure dans le rapport de doctorat de V. Ravet [42].

b) Approche de P.J. Gustafsson [43] par la Mécanique Non Linéaire de la Rupture

La théorie précédente est valable lorsque l'assemblage a un comportement élastique c'est-à-dire lorsque l'état de sollicitation de chacun de ses matériaux constitutifs reste en deçà de leur limite élastique. Au-delà de sa limite élastique, l'adhésif peut, en particulier, présenter deux types de comportement : (quasi-) fragile et ductile. P.J. Gustafsson, adoptant des hypothèses et des conditions de chargement similaires à celles de O. Volkersen [39], propose ainsi d'intégrer, aux méthodes prédictives, la loi de comportement de l'adhésif (Fig. 12).

P.J. Gustafsson revient tout d'abord sur deux approches prédictives de la rupture de l'assemblage à double recouvrement : l'approche élastique-plastique parfait et l'approche Mécanique Linéaire de la Rupture (MLR).

Dans la première approche, le joint d'adhésif est pourvu d'une loi de comportement élastique puis parfaitement plastique. Cela signifie que lorsque la limite élastique est localement atteinte dans l'adhésif, la zone concernée se déforme à l'infini sans pour autant rompre ou se décharger. L'assemblage est supposé rompu dès lors que la totalité du joint d'adhésif est plastifié. La charge correspondante peut être estimée de la manière suivante :

$$\frac{P_u}{\tau_u bL} = 1 \text{ avec } \tau_u = \tau_e$$

Eq. 24

τ_e et τ_u sont respectivement la limite élastique et la résistance en cisaillement de l'adhésif.

Dans la seconde approche, la rupture de l'assemblage est induite par le développement d'une fissure au sein du joint d'adhésif. Cette fissuration est décrite par le mouvement progressif d'une zone de rupture, de taille et de forme constante, très petite par rapport aux dimensions du joint. Ceci est le cas pour des assemblages de grandes dimensions où seules les extrémités de la zone de recouvrement sont sollicitées. Le taux de restitution d'énergie G_c , énergie nécessaire à la propagation d'une fissure existante à une surface unité supplémentaire, correspond alors à l'énergie de rupture G_f , énergie nécessaire à une surface unité pour passer de l'état non chargé à l'état totalement rompu par fissuration (après un éventuel endommagement). L'énergie libérée lors de l'avancée, d'une surface à une autre, de la zone de rupture est ainsi égale à la diminution d'énergie potentielle W dans l'assemblage (Eq. 25).

$$G_f \cdot b \cdot dx = -dW = \frac{1}{2} \cdot P_u^2 \cdot dC = \frac{1}{2} P_u^2 \left(\frac{dx}{E_g e_g b} - \frac{dx}{E_g e_g b + E_b e_b b} \right)$$

Eq. 25

“dC” est la variation de complaisance subit par l'assemblage, sa charge ultime s'écrit alors :

$$\frac{P_u}{\tau_u bL} = \frac{\sqrt{2(1 + \alpha)}}{\sqrt{e_g E_g G_f}}$$

Eq. 26

α est le rapport entre les rigidités des substrats :

$$\alpha = \frac{E_g e_g b}{E_b e_b b} \text{ tel que } \alpha \leq 1$$

Eq. 27

Pour des joints de grandes dimensions, P_u apparaît indépendant de τ_u et proportionnel à $\sqrt{G_f}$.

P.J. Gustafsson propose alors une approche de prédiction de la résistance au cisaillement d'un joint à double recouvrement basée sur la Mécanique Non Linéaire de la Rupture. Il s'agit d'une méthode unifiée dont les méthodes plus conventionnelles (élastiques, idéale plastique et MLR) constituent des cas particuliers. La loi de comportement en cisaillement de l'adhésif est prise en compte au moyen de trois paramètres : la contrainte de cisaillement admissible : τ_u qui correspond à son maximum, l'énergie de rupture G_f qui correspond à l'aire qu'elle délimite avec l'axe des abscisses et enfin sa forme g (Fig. 40). Le comportement des substrats est quant à lui décrit par leurs caractéristiques mécaniques : E_g et E_b et géométriques L , b , e_g , e_b . P.J. Gustafsson, moyennant les hypothèses de départ, combine ces neuf paramètres pour les résumer en trois grandeurs déterminantes de la résistance de l'assemblage :

- le rapport de rigidité des substrats α définit précédemment,
- la forme de la loi de comportement de l'adhésif : "g",
- l'indice de fragilité de l'assemblage " λ " défini de la façon suivante :

$$\lambda = \frac{L^2 \tau_u^2}{e_g E_g G_f}$$

Eq. 28

Pour des matériaux donnés d'épaisseurs données (α et g constant), la résistance de l'assemblage dépend dès lors uniquement de l'indice de fragilité λ .

$$\frac{P_u}{\tau_u b L} = f(\lambda)$$

Eq. 29

L'indice de fragilité devient ainsi un paramètre prédominant dans la caractérisation d'un joint à simple recouvrement. Il est représentatif du comportement à la rupture de l'assemblage. Une grande valeur de λ ($>10(1+\alpha)$) est annonciatrice d'une rupture fragile alors qu'une petite valeur de λ ($<0.1(1+\alpha)$) présage d'une rupture ductile. Les valeurs de λ intermédiaires figurent dans une zone de transition supposée progressive entre ces deux types de comportement. La fragilité de l'adhésif (τ_u^2/G_f), la géométrie (L et L/e_1) et les propriétés mécaniques (E_g) de l'assemblage sont représentées dans son expression. Autant de paramètres dont l'influence sur le comportement à la rupture avait été relevée expérimentalement (II.3.2 et II.3.4).

D'après H. Wernersson [44], plus que les caractéristiques mécaniques et géométriques, le paramètre déterminant un comportement fragile de l'assemblage est G_f dans le cas où cette énergie est faible (λ grand) et le paramètre déterminant un comportement ductile est τ_f si cette contrainte est faible (λ petit). La connaissance de la loi de comportement de l'adhésif suffirait ainsi à la prédiction de la loi de comportement de l'assemblage dans sa globalité.

P.J. Gustafsson détermine par la suite numériquement la fonction f définie dans l'Eq. 29 (Fig. 41) pour plusieurs formes "g" de la loi de comportement de l'adhésif (Fig. 40). Les tendances pour des valeurs extrêmes de λ ont été obtenues indépendantes de "g" et sont les suivantes (Eq. 30 et Eq. 31).

$$\frac{P_u}{\tau_u bL} \xrightarrow{\lambda \rightarrow 0} 1$$

Eq. 30

$$\frac{P_u}{\tau_u bL} \xrightarrow{\lambda \rightarrow +\infty} \sqrt{\frac{2(1+\alpha)}{\lambda}}$$

Eq. 31

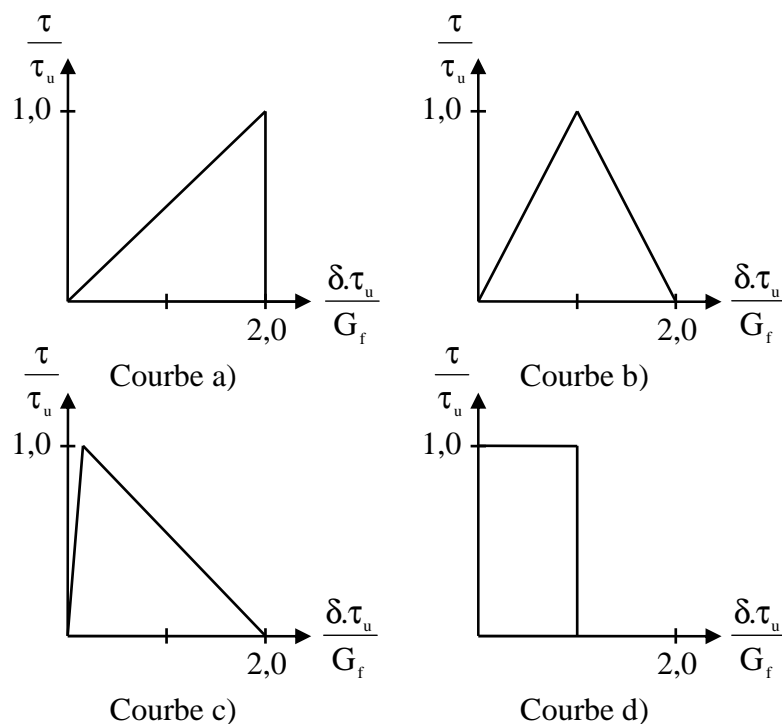


Fig. 40 : Les quatre lois de comportement de l'adhésif

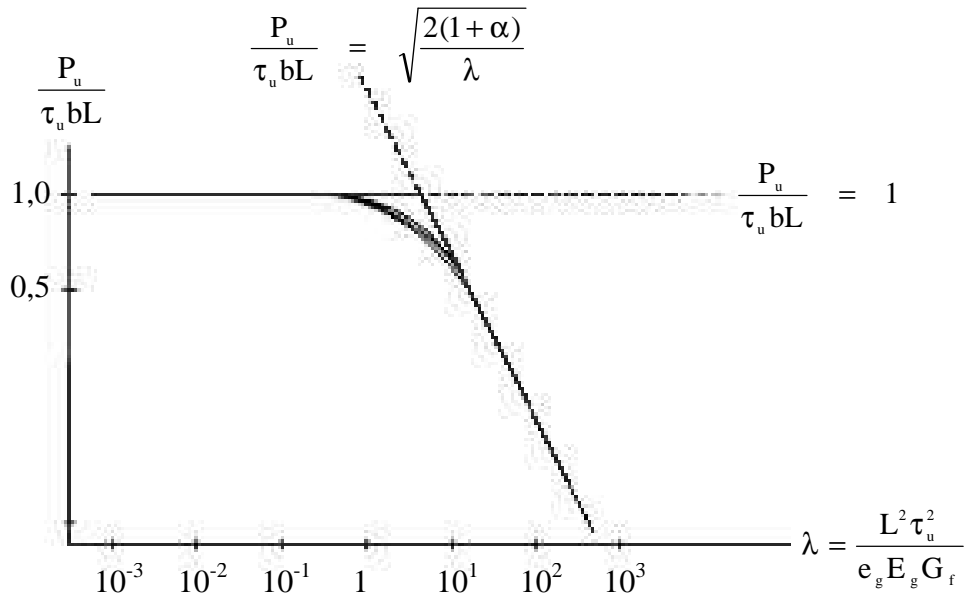


Fig. 41 : Charge ultime de l'assemblage pour les quatre formes "g"

Pour de petites valeurs de λ , ce résultat correspond à celui obtenu par le modèle plastique idéal (Eq. 24) et la charge ultime de l'assemblage P_u dépend principalement de " τ_u ". Pour de grandes valeurs de λ , on retrouve le résultat de la Mécanique Linéaire de la Rupture et P_u dépend principalement de $\sqrt{G_f}$. P_u est en outre totalement indépendant de ℓ ce qui signifie qu'il existe une longueur de recouvrement seuil à partir de laquelle la résistance de l'assemblage plafonne. Dans la zone de transition P_u dépend simultanément de G_f , τ_u et g . Il est néanmoins possible de remarquer que, pour des valeurs de τ_u et G_f identiques, la forme de la loi de comportement de l'adhésif "g" n'a que très peu d'influence sur la résistance de l'assemblage.

Les tendances observées pour des valeurs extrêmes de λ (Eq. 30, Eq. 31) permettent par ailleurs de définir une borne supérieure de la résistance pour des assemblages à double recouvrement réalisés à partir d'adhésifs quelconques:

$$\frac{P_u}{\tau_u bL} \leq \min \left\{ 1, \sqrt{\frac{2(1+\alpha)}{\lambda}} \right\}$$

Eq. 32

Cet optimum de résistance peut être obtenu pour des adhésifs dont la loi de comportement est similaire à celle décrite Fig. 40 courbe "d".

c) *La théorie élastique de O. Volkersen, un cas particulier de l'approche Mécanique Non Linéaire de la Rupture de P.J. Gustafsson*

Une loi de comportement "g" de l'adhésif telle que représentée Fig. 40 courbe "a" correspond à une rupture fragile qui peut être décrite par un critère de cisaillement maximal.

Comme l'adhésif à un comportement parfaitement élastique jusqu'à la rupture et que les hypothèses de calcul sont les mêmes que celles de O. Volkersen, la fonction "f" peut être recherchée à partir de la solution décrite (Eq. 22). Pour $\alpha \leq 1$, la contrainte maximale de cisaillement à l'interface est obtenue en $x = L/2$ (Fig. 37) et la charge maximale admissible peut être exprimée de la manière suivante :

$$\frac{P_u}{\tau_u bL} = \frac{1}{\frac{\omega L}{2} \left(\frac{\cosh(\omega L/2)}{\sinh(\omega L/2)} - \frac{(E_g e_g - E_b e_b)}{E_g e_g + E_b e_b} \frac{\sinh(\omega L/2)}{\cosh(\omega L/2)} \right)}$$

Eq. 33

$$\text{avec } \omega = \sqrt{\frac{G_a}{e_a} \left(\frac{1}{E_g e_g} + \frac{1}{E_b e_b} \right)}$$

Eq. 34

L'énergie de rupture G_f peut être intégrée dans la formulation grâce à la relation :

$$G_f = \int_0^{\delta_u} \tau(\delta) d\delta = \int_0^{\delta_u} \frac{G_a \delta}{e_a} d\delta = \frac{G_a \delta_u^2}{2e_a} = \frac{\tau_u^2 e_a}{2G_a}$$

Eq. 35

En introduisant α et en utilisant les propriétés des fonctions hyperboliques, on obtient la relation suivante pour le joint à double recouvrement :

$$\frac{P_u}{\tau_u bL} = \frac{(1 + \alpha) \sinh \omega}{\omega(\alpha + \cosh \omega)}$$

Eq. 36

$$\text{avec } \omega = \sqrt{\frac{1 + \alpha}{2}} \sqrt{\frac{L^2 \tau_u^2}{e_g E_g G_f}} = \sqrt{\frac{1 + \alpha}{2}} \sqrt{\lambda} = \sqrt{\frac{\frac{bL^2}{2A_g} (1 + \alpha)}{\frac{E_g G_f}{\tau_u^2}}}$$

Eq. 37

Le paramètre " A_g ", introduit dans la dernière équation est représentatif de la section du substrat d'épaisseur " e_g ".

d) *Adaptation de la théorie de P.J. Gustafsson aux goujons collés*

Dans le cadre du projet européen GIROD [18], P.J. Gustafsson [34] a proposé une adaptation directe de sa formule (Eq. 36) pour les goujons collés. La forme "g" de la loi de

comportement de l'adhésif n'ayant guère d'impact sur la résistance de l'assemblage, cette formule, développée pour des adhésifs fragiles, est extensible à tous types d'adhésif dont la contrainte ultime τ_u et l'énergie de rupture G_f sont connues.

En rappelant que le fondement de cette approche repose sur les hypothèses fortes de O. Volkersen (substrats en traction pure et adhésif en cisaillement pur) et qu'elle concerne des conditions d'essai de Pull-Pull, la formule de P.J. Gustafsson adaptée aux goujons collés s'écrit :

$$\frac{P_u}{\tau_u \pi d_g \ell} = \frac{\sinh(\omega_{GIR})(1+k)}{\omega_{GIR} (\cosh(\omega_{GIR}) + k)}$$

Eq. 38

$$k = \frac{A_g E_g}{A_b E_b} \leq 1$$

Eq. 39

$$\omega_{GIR} = \sqrt{\frac{\ell_{geo}}{\ell_m}} = \sqrt{\frac{\pi d_g \ell^2}{2A_g} \frac{(1+k)}{\frac{E_g G_f}{\tau_u^2}}}$$

Eq. 40

Une approche similaire a été menée pour obtenir une formule prédictive pour un goujon collé sollicité sous des conditions de chargement de type PC (Fig. 16). La résolution, conduit à la formulation suivante :

$$\frac{P_u}{\tau_u \pi d_g \ell} = \frac{\tanh(\omega_{GIR})}{\omega_{GIR}}$$

Eq. 41

La borne supérieure obtenue pour le joint à double recouvrement peut aussi être étendue aux goujons collés et devient :

$$\frac{P_u}{\tau_u bL} \leq \min \left\{ 1, \frac{1+k}{\omega_{GIR}} \right\}$$

Eq. 42

Pour un assemblage de faible longueur d'ancrage, le paramètre " ω_{GIR} " tend vers 0 et les équations Eq. 38 et Eq. 41 tendent vers 1 (modèle idéal plastique). C'est ici que réside l'intérêt de réaliser des tests sur des éprouvettes de caractérisation locale. Force ultime " P_u " et résistance en cisaillement " τ_u " sont effectivement liées par une relation algébrique simple (Eq. 43) et la détermination de cette dernière grandeur s'en trouve facilitée.

$$\frac{P_u}{\tau_u \pi d_g \ell} = 1$$

Eq. 43

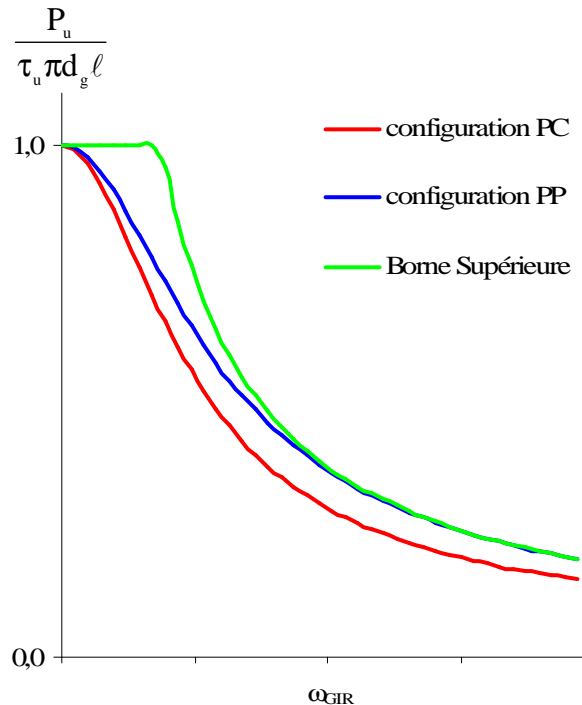


Fig. 42 : Charge ultime de l'assemblage par goujons collés

Si le lieu de rupture était anodin dans le cas de l'assemblage à double recouvrement, il n'en est pas de même pour le cas du goujon collé. Les surfaces cisailées seront en effet différentes pour des ruptures ayant lieu à l'interface goujon/adhésif (R1), à l'interface adhésif/bois (R2) ou au sein du joint de colle (R5). La résistance au cisaillement " τ_u ", obtenue par exemple lors d'un essai de caractérisation locale, sera ainsi intimement liée à une surface de rupture, elle même représentative d'un mode de rupture. Il en est de même pour l'énergie de rupture " G_f ". Les équations Eq. 38, Eq. 41 et Eq. 42 n'intègrent pas cet aspect en rapportant systématiquement la résistance au cisaillement " τ_u " et l'énergie de rupture " G_f " à l'interface goujon adhésif représentée par " d_g ". Il est ainsi compréhensible, et bien légitime, que les membres du projet GIROD aient opté pour un joint d'adhésif de faible épaisseur (0,5 mm) pour valider ces approches (II.3.3).

e) *Les approches empiriques*

A ces approches résolument théoriques, viennent s'ajouter un certain nombre d'approches empiriques. Les plus significatives sont les approches de H. Riberholt [45], S. Aicher [46] et L. Féligioni [36].

H. Riberholt et S. Aicher proposent des approches empiriques basées sur trois paramètres: le diamètre " d " en mm, l'élanement du joint de colle " ℓ/d " et la densité du bois ρ en kg/m^3 . Pour chaque adhésif testé, l'influence de ces trois paramètres est évaluée à partir de

résultats expérimentaux et une formule de dimensionnement de la forme : “ $P_u = K.(d)^i.(l/d)^j.(\rho)^k$ ” est établie.

H. Riberholt pour $l \geq 200$ mm :

$$P_{f,moy} = k_{moy} . d . \rho . \sqrt{l}$$

Eq. 44

avec $k_{moy} = 0,784$ et $0,627 \frac{N}{\sqrt{mm^3}}$ respectivement pour l'époxy et le PU.

S. Aicher :

Pour une Epoxy ou un PU fragile :

$$\frac{P_u}{\pi d l} = \min \left\{ \begin{array}{l} 8 \text{ MPa} \\ 129 . d^{-0.52} . \left(\frac{l}{d} \right)^{-0.62} . \left(\frac{\rho}{480} \right)^{0.45} \text{ MPa} \end{array} \right.$$

Eq. 45

Pour une PRF ductile :

$$\frac{P_u}{\pi d l} = \min \left\{ \begin{array}{l} 6,3 \text{ MPa} \\ 10,3 . d^{-0.17} . \left(\frac{l}{d} \right)^{-0.62} . \left(\frac{\rho}{480} \right)^{-0.08} \text{ MPa} \end{array} \right.$$

Eq. 46

L. Féligioni [36] a démontré expérimentalement que la charge d'arrachement d'un goujon collé est dépendante du volume d'adhésif employé. Il propose l'approche empirique suivante :

$$P_u = \pi l (f_{v,k} . d_{equ} + k(d_g + e).e)$$

Eq. 47

avec $k = 0,086$ et $1,213$ respectivement pour des adhésifs fragiles et ductiles.

La résistance caractéristique en cisaillement du bois $f_{v,k}$ en MPa s'écrit :

$$f_{v,k} = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{equ}}^{-0,2} \cdot \rho_k^{1,5}$$

Eq. 48

Le diamètre équivalent du goujon collé d_{eq} en mm est défini par :

$$d_{\text{eq}} = \min(d_t ; 1,25d_g)$$

Eq. 49

Ces approches ont ainsi permis de mettre en relief des facteurs influents de la résistance à l'arrachement d'un goujon collé. Si ces formulations présentent une structure commune, les coefficients et exposants qui y figurent sont déterminés par l'expérience et sont fortement dépendants de la nature et de la rhéologie de l'adhésif utilisé. Les campagnes expérimentales à partir desquelles ils sont déterminés ne peuvent, de surcroît, être représentatives de l'ensemble des paramètres mis en jeu (II.1). On peut dès lors légitimement émettre quelques réserves quant à la fiabilité de ces formules en tant qu'approches universelles de dimensionnement.

II.4.2. Rupture du goujon

Il s'agit des modes de rupture regroupés sous les appellations R3 et R4 mais également R9. L'assemblage élémentaire cède suite à la plastification ductile du goujon en acier ou suite à la rupture fragile du goujon en composite. L'effort responsable de la rupture pouvant être axial ou latéral, deux méthodes prédictives de ce type de rupture coexistent.

a) Cas d'un effort axial

La rupture intervient lorsque la limite élastique en traction du goujon est atteinte. La relation correspondante s'écrit :

$$P_U = \pi \cdot \frac{d_g^2}{4} \cdot \sigma_e$$

Eq. 50

σ_e est la limite élastique en traction du goujon acier ou composite.

b) Cas d'un effort latéral

La ruine de l'assemblage élémentaire intervient par formation d'une rotule plastique dans le cas d'un goujon en acier et par rupture fragile dans le cas d'un goujon en composite. Ces ruptures s'accompagnent généralement d'un écrasement du bois (R9). Il est, dans ce cas de figure, généralement conseillé de se reporter aux approches prédictives concernant les organes métalliques de type tige (boulons, broches...) en simple ou double cisaillement [12].

Les goujons collés, contrairement aux organes de type tige plus classiques, présentent l'intérêt de pouvoir être mis en œuvre selon la direction du fil du bois. Les grandeurs introduites dans les approches prédictives spécifiques aux organes métalliques de type tige, portance locale du bois en tête, doivent ainsi être ajustées pour intégrer cet aspect. La portance locale du bois, pour un goujon inséré parallèlement au fil, se résume, d'après la proposition de GIROD à l'Eurocode 5, à 10% de la portance locale proposée par le bois pour un goujon inséré perpendiculairement au fil. Les travaux amorcés depuis [47] ont révélé le caractère hautement pénalisant de cette préconisation.

II.4.3. La fissuration du bois due à la traction transverse

Le matériau bois présente des performances limitées selon sa direction transverse (Tab. 2). Une charge appliquée au goujon et qui présente une composante perpendiculaire au fil sollicite par conséquent le matériau bois selon sa direction la plus faible. Il en résulte une fissuration plus ou moins stable de l'élément bois selon sa direction axiale. Les modes de rupture concernés sont: R10a) et R6b).

Il est, dans ce cas de figure, généralement conseillé de se reporter aux travaux concernant les poutres entaillées [9] [48]. Ce mode de rupture est spécifique au bois et ne concerne a priori ni l'adhésif, ni le goujon. La disposition des goujons collés est cependant d'importance dans la mesure où elle détermine le lieu et par conséquent la charge d'initiation de la fissuration.

La correspondance entre poutres assemblées par goujons collés et poutres entaillées s'établit, d'après le projet de guide professionnel français [16] de la manière suivant (Fig. 43 et Fig. 44).

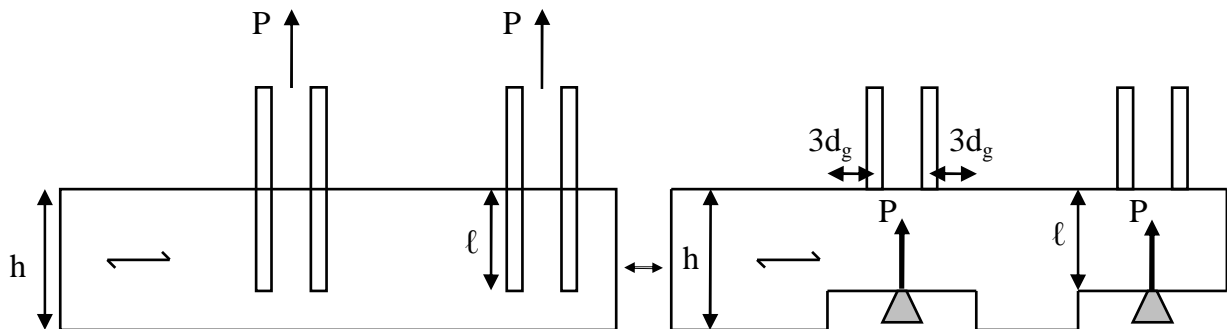


Fig. 43 : Correspondance assemblage collé et poutre entaillée pour des goujons collés insérés perpendiculairement au fil du bois et chargés axialement

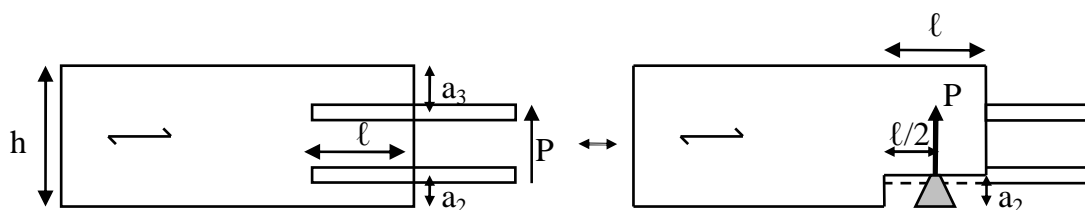


Fig. 44 : Correspondance assemblage collé et poutre entaillée pour des goujons collés insérés parallèlement au fil du bois et chargés latéralement.

II.4.4. Autres types de rupture affectant le bois

Les modes de rupture non évoqués dans les trois parties précédentes (R6,a, R7, R8 et R10b) ne font l'objet d'aucune approche théorique individuelle. Les règles de pinces, c'est-à-dire les préconisations concernant l'entraxe entre goujons et la distance du goujon à l'arête de l'élément la plus proche, ont été élaborées de manière à se prémunir de telles ruptures. Ces règles de pinces sont variables selon les auteurs (Tab. 19) et parfois contestées.

Tab. 19 : Règles de pinces préconisées par GIROD et par le Guide Professionnel (Fig. 15)

| Distance \ Référence | Projet GIROD EC5 | Guide Professionnel Français |
|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|
| a₁ | $5d_g$ | $3d_g$ |
| a₂ | $2,5d_g$ | $2,5d_g$ |
| a₃ | $5d_g$ | $4d_g$ |
| a₄ | $4d_g$ | $2,5d_g$ |
| a₅ | - | $4d_g$ |
| a₆ | - | $4d_g$ |
| a₇ | - | $2,5d_g$ |
| a₈ | $5d_g^*$ | $7d_g$ |
| a₉ | $\max(80 \text{ mm}, 7d_g)^*$ | $7d_g$ |
| a₁₀ | $3d_g^*$ | $3d_g$ |
| a₁₁ | $3d_g^*$ | $3d_g^*$ |
| a₁₂ | $3d_g^*$ | $3d_g^*$ |

**d'après les préconisations concernant les assemblages par boulons*

II.5. APPROCHES DE DIMENSIONNEMENT DISPONIBLES

Ces approches prédictives très théoriques ont donné lieu à des règles simplifiées directement utilisables en dimensionnement. Elles visent généralement à l'établissement de valeurs caractéristiques. Leur emploi reste néanmoins délicat dans la mesure où, en France ou en Europe, aucune d'entre elles n'a encore fait l'objet d'une validation définitive. Cette section a comme finalité de présenter les formulations simplifiées actuellement disponibles en France et à les confronter à la base de données expérimentales présentée en II.4.

II.5.1. Goujons sollicités axialement, rupture au niveau du goujon ou du joint d'adhésif

a) *Simplification de la formule de P.J. Gustafsson*

Par la Mécanique Non Linéaire de la Rupture, P.J. Gustafsson [43] est parvenu à établir une approche prédictive pour chacune des configurations d'essai "Pull-Pull" et "Pull-

Compression” (Fig. 16). Ces dernières conditions limites engendrant des sollicitations plus prononcées dans le joint d’adhésif (Fig. 42), l’approche prédictive correspondante, théoriquement sécuritaire dans tout les cas de figure, a été retenue puis simplifiée afin d’en permettre une utilisation courante. La simplification a été réalisée par calibration de l’approche prédictive initiale au moyen des résultats expérimentaux de GIROD (Tab. 11).

La contrainte maximale de cisaillement au sein du joint d’adhésif pour un goujon collé sollicité dans des conditions de “Pull-Compression” s’écrit :

$$\frac{P_u}{\tau_u \pi d_g \ell} = \frac{\tanh(\omega_{GIR})}{\omega_{GIR}} \quad (\text{Eq. 41})$$

$$\text{avec } \omega_{GIR} = \sqrt{\frac{\ell_{geo}}{\ell_m}} = \sqrt{\frac{2(1+k)\tau_u^2}{E_g G_f}} \times \frac{\ell}{\sqrt{d_g}} \quad (\text{Eq. 40}) \text{ et } k = \frac{A_g E_g}{A_b E_b} \quad (\text{Eq. 39})$$

Les simplifications apportées interviennent à trois niveaux.

Au niveau de la résistance au cisaillement de l’adhésif τ_u qui a été définitivement fixée à 5,5 MPa.

Au niveau du diamètre du goujon “ d_g ” auquel un diamètre équivalent “ d_{equ} ”, admettant la possibilité d’une rupture en dehors de l’interface goujon/adhésif, a été préféré. Ce diamètre équivalent se détermine de la façon suivante :

$$d_{eq} = \min(d_t ; 1,15d_g)$$

Eq. 51

Au niveau de la grandeur ω_{GIR} dans laquelle des paramètres tels que le rapport des rigidités “ k ”, le module d’Young du goujon “ E_g ”, la résistance au cisaillement de l’interface τ_u et l’énergie totale de rupture G_f ont été intégrés au sein d’une même constante évaluée à 0,016. Malgré leur non représentativité, les résultats concernant les échantillons rompus par plastification du goujon ont été indifféremment intégrés lors de la calibration.

En admettant ces trois simplifications, ω_{GIR} a alors l’allure suivante :

$$\omega_{GIR} = \sqrt{\frac{2(1+k)\tau_u^2}{E_g G_f}} \times \frac{\ell}{\sqrt{d_g}} \Rightarrow \omega_{ec5} = 0,016 \times \frac{\ell}{\sqrt{d_{equ}}}$$

Eq. 52

La résistance caractéristique de l’assemblage s’exprime ainsi sous la forme:

$$P_{u,k} = \pi \cdot d_{equ} \cdot \ell \cdot 5,5 \cdot \left(\frac{\tanh \omega_{ec5}}{\omega_{ec5}} \right)$$

Eq. 53

Cette approche, qui a été proposée à l’Eurocode 5, est utilisable pour des goujons collés en acier dont la longueur d’ancrage ℓ respecte la condition suivante :

$$\ell \geq \max(0,5d^2, 10d)$$

Eq. 54

Aucune limitation n’est fournie par rapport au type de bois concerné (massif, lamellé, EWP).

b) Formule empirique du guide professionnel français

L’approche simplifiée proposée par le Guide Professionnel Français est issue de la formulation empirique de H. Riberholt (Eq. 44). Via une relation similaire à Eq. 48 la masse volumique du bois γ est remplacée par sa résistance caractéristique au cisaillement $f_{v,k}$. Elle est applicable pour du lamellé-collé et des goujons en acier. La longueur d’ancrage “ ℓ ” doit être supérieure à $17,5d_g$ et le diamètre du goujon d_g doit être compris entre 10 et 27 mm. Elle s’écrit :

$$P_{u,k} = 85 \cdot f_{v,k} \cdot d_g \cdot \sqrt{\ell_c}$$

Eq. 55

La longueur d’ancrage ℓ_c à prendre en compte dans les calculs est définie de la manière suivante :

$$\ell_c = \ell - 1,5d_g$$

Eq. 56

Cette formulation, jugée pénalisante par certains utilisateurs, a été améliorée par J. Surleau [14] qui, pour une plus grande représentativité du mode de rupture réel, a remplacé le diamètre du goujon par celui du perçage et a effectué les corrections nécessaires pour répondre aux exigences de sécurité.

$$P_{u,k} = 72 \cdot f_{v,k} \cdot d_t \cdot \sqrt{\ell_c}$$

Eq. 57

c) Intégration d’une rupture possible du goujon

A ces deux approches, vient s’ajouter un critère de rupture par traction du goujon :

$$P_{u,k} = \pi \cdot \frac{d_g^2}{4} \cdot \sigma_e \text{ (Eq. 50)}$$

Les limites élastiques des goujons en acier d’utilisation courante sont indiquées Tab. 20.

Tab. 20 : Limite élastique des barres d'acier d'utilisation courante d'après le STEP [2]

| Nuance d'acier | Fe 360 | Fe 430 | Fe 510 |
|------------------|--------|--------|--------|
| σ_e (MPa) | 235 | 275 | 355 |

Les formules de dimensionnement de la proposition Eurocode 5 et du Guide Professionnel s'écrivent alors respectivement:

$$P_{u,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} \pi \cdot \frac{d_g^2}{4} \cdot \sigma_e \\ \pi \cdot d_{\text{equ}} \cdot l \cdot 5,5 \cdot \left(\frac{\tanh \omega_{\text{ec5}}}{\omega_{\text{ec5}}} \right) \end{array} \right.$$

Eq. 58

$$P_{u,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} \pi \cdot \frac{d_g^2}{4} \cdot \sigma_e \\ 72 \cdot f_{v,k} \cdot d_t \cdot \sqrt{l_c} \end{array} \right.$$

Eq. 59

La rupture en traction de l'acier étant mieux maîtrisée que la rupture en cisaillement de l'adhésif ou de l'une de ses interfaces, la limite élastique maximale de 355 MPa sera admise par la suite pour les goujons. En effet, le choix volontaire, en dimensionnement, d'une faible limite élastique de l'acier conduit à faire prévaloir le critère de rupture par traction des goujons (Eq. 50). L'objectif étant ici d'estimer la viabilité de la formule simplifiée de P.J. Gustafsson (Eq. 53), il n'est pas opportun de s'encombrer d'une marge de sécurité démesurée sur ce paramètre. Une simple confrontation entre charges de plastification calculées par diamètre de goujon et formes des courbes "force-déplacement" issues de GIROD [35] permet de vérifier que la valeur de 355 MPa retenue semble représentative.

d) Comparaison aux grandeurs expérimentales concernant l'époxy

Les prédictions obtenues par application des formules de l'Eurocode 5 (Eq. 58) et du Guide Professionnel modifié (Eq. 59) sont confrontées aux résultats expérimentaux de GIROD (Tab. 11), du CTBA (SF4, SF5, SF6), de H.J. Blass (B7) et de J. Surleau (JS1, JS3). Seuls les résultats concernant l'époxy sont considérés. Les éprouvettes qui, de par leur géométrie (l et d_g), se trouvent en dehors du champ d'application de ces formules ont néanmoins été soumises aux prédictions. Elles sont regroupées sous l'appellation : "non prévisibles". La fiabilité des prédictions est évaluée via le rapport " $F_{\text{exp}}/F_{\text{estimée}}$ " entre la charge de rupture expérimentale mesurée et la charge de rupture (caractéristique) calculée (Eq. 58 et Eq. 59).

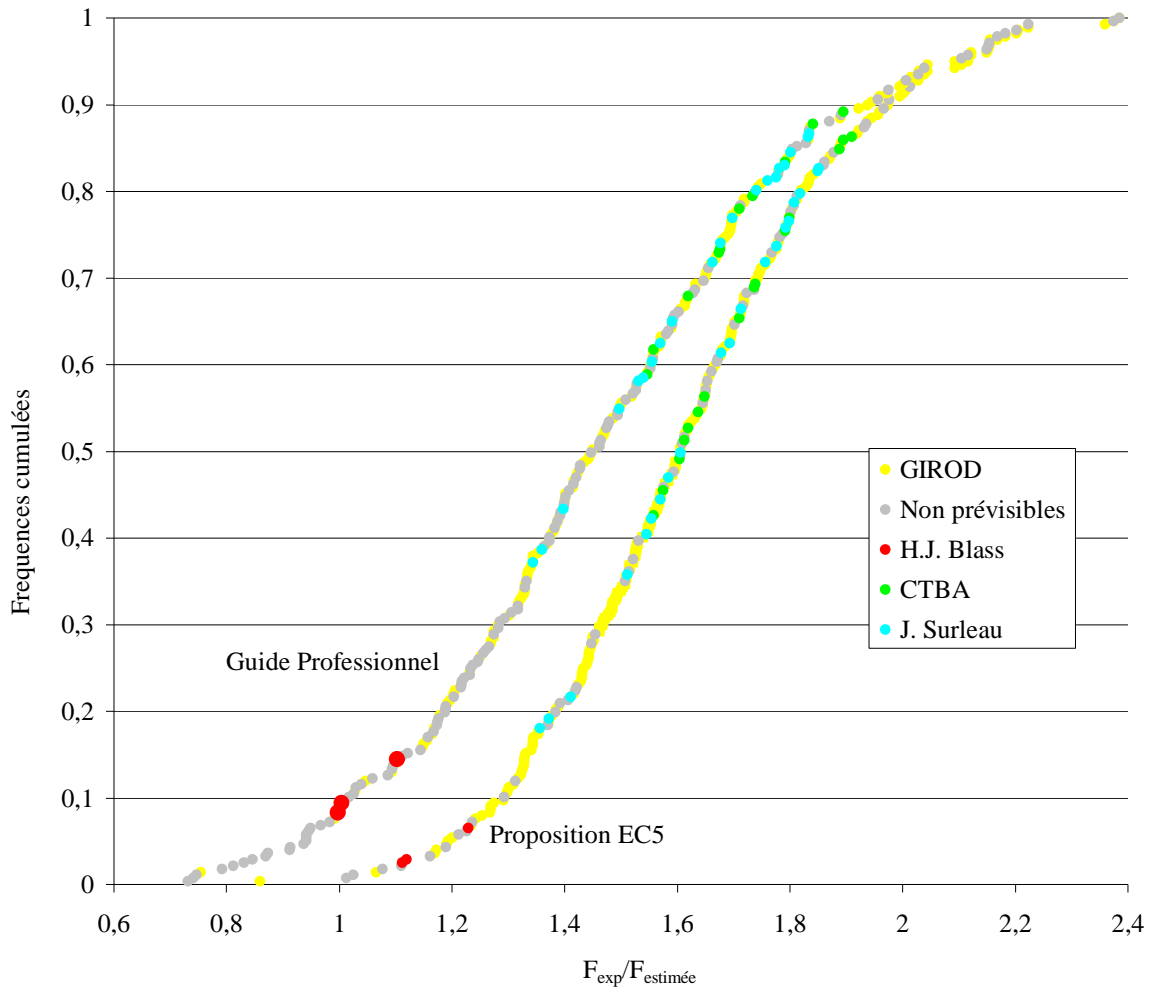


Fig. 45 : Comparaison en termes de probabilité des formulations Eurocode 5 et Guide Professionnel

En ce qui concerne la formule du Guide Professionnel modifiée par J. Surleau [14], la distribution obtenue apparaît, au premier abord, comme non sécuritaire. Ce constat doit être nuancé dans la mesure où les prédictions non fiables concernent essentiellement des assemblages dont la géométrie échappe au champ d'application de la formulation. En effet, seulement 2% des prédictions portant sur des échantillons conformes aux conditions d'utilisation ne sont pas sécuritaires.

En ce qui concerne la formule issue de la proposition de GIROD à l'Eurocode 5, la confrontation aux 277 résultats expérimentaux disponibles atteste qu'une valeur caractéristique de la résistance de l'assemblage est bien obtenue. Et ceci, même lorsque les assemblages en dehors du champ d'application de cette approche sont considérés. Deux remarques peuvent néanmoins être effectuées à ce stade.

- Les résultats auxquels la formulation est confrontée concernent tous du lamellé-collé ou des bois massifs résineux courants.
- La calibration de la formulation a été réalisée au moyen de résultats expérimentaux sur une seule et unique épaisseur d'adhésif de 0,5 mm. Il apparaît sur Fig. 45 que les prédictions sont effectivement plus pénalisantes pour le cas d'épaisseurs d'adhésif plus importantes (J. Surleau, CTBA).

Ces deux remarques constituent deux des raisons importantes ayant conduit au refus de la proposition de GIROD en vue de l'introduction des goujons collés dans l'Eurocode 5.

Sans même se pencher sur ces deux remarques essentielles, il est possible de discerner une autre incohérence au sein de cette approche. Même si celle-ci est directement issue des résultats expérimentaux de GIROD, sa fiabilité varie selon le diamètre de goujon d_g concerné. Cette observation est illustrée Fig. 46 suivante où les prédictions sont confrontées aux résultats expérimentaux de GIROD concernant l'époxy.

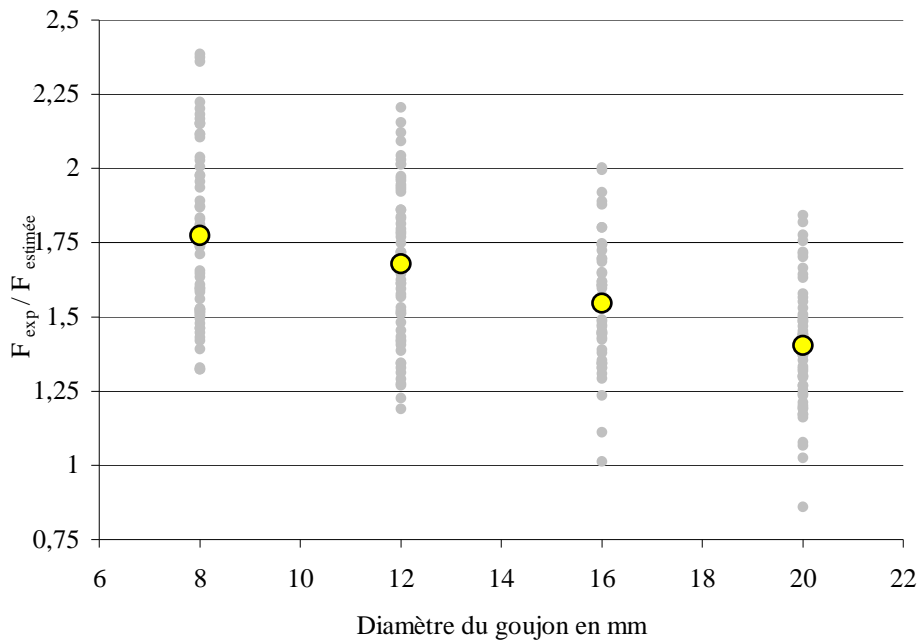


Fig. 46 : Précision des prédictions selon le diamètre de perçage considéré.

Cette approche de dimensionnement est ainsi moins fiable pour des petits diamètres de goujon. Elle ne permet pas l'obtention d'une charge ultime caractéristique pour les assemblages présentant des goujons de diamètre 8 et 12 mm. L'emploi de ce type de goujon s'avère pourtant intéressant pour la conception des assemblages. Ils peuvent être utilisés en groupe tout en respectant les règles de pinces ou permettre de privilégier une rupture ductile de l'assemblage par plastification de l'acier. Une approche de dimensionnement plus équitable doit ainsi être élaborée à partir de ces mêmes essais avant d'envisager toute réponse aux deux remarques précédentes.

II.5.2. Rupture par fissuration du bois (R6b, R10a)

La correspondance entre poutres assemblées par goujons collés et poutres entaillées autorise l'utilisation des formules de dimensionnement dédiées à ces dernières. L'approche prédictive de la charge à laquelle la fissuration s'initie en arrière d'entaille est la suivante :

$$\tau_d = \frac{3.V}{2.b.h_{ef}} \leq k_v f_{v,d}$$

Eq. 60

$f_{v,d}$ est la résistance de calcul du bois en cisaillement.

k_v est un coefficient de correction défini de la manière suivante :

$$k_v = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \frac{k_n \left(1 + \frac{1,1 i^{1,5}}{\sqrt{h}} \right)}{\sqrt{h} \left(\sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0,8 \cdot \frac{x}{h} \cdot \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)} \end{array} \right.$$

Eq. 61

$$\alpha = \frac{h_{ef}}{h}$$

Eq. 62

$$k_n = \begin{cases} 4,5 : \text{LVL} \\ 5 : \text{bois massif} \\ 6,5 : \text{lamellé-collé} \end{cases}$$

Eq. 63

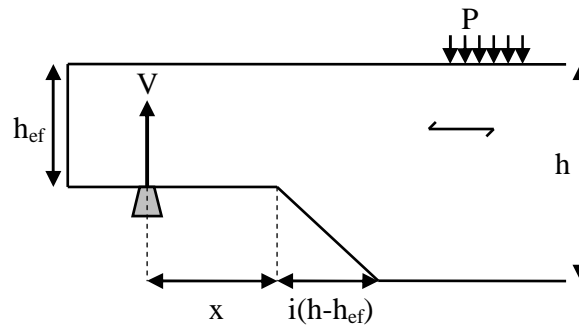


Fig. 47 : Notations retenues pour les poutres entaillées

a) *Goujon inséré parallèlement au fil et sollicité latéralement*

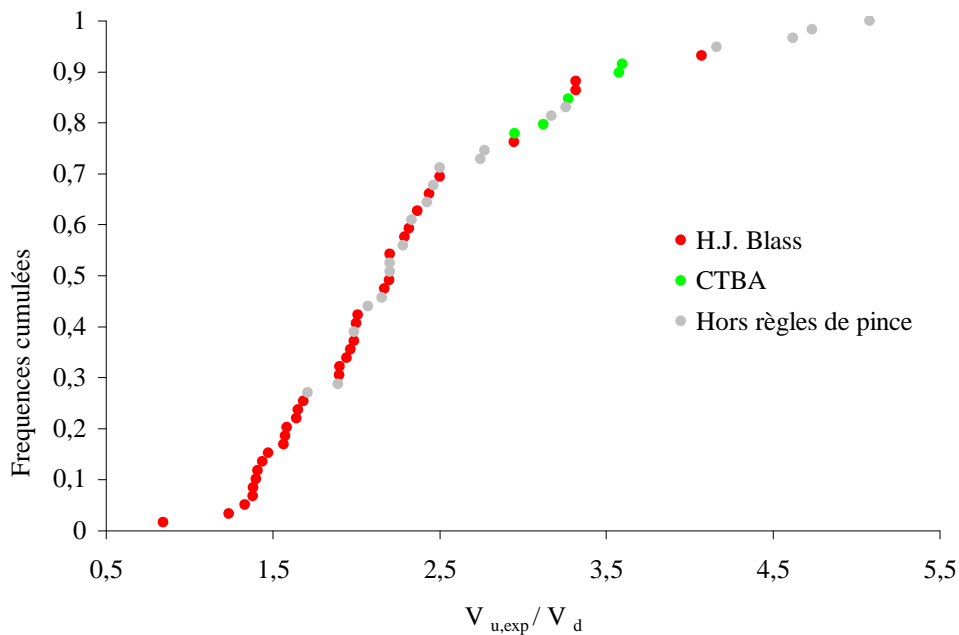


Fig. 48 : Confrontation de l'approche prédictive aux résultats de H.J. Blass et du CTBA

Les essais correspondant figurent parmi ceux de H.J. Blass (B22 à B31) et du CTBA (SF9 et SF10). La formule prédictive précédente est appliquée aux éprouvettes testées suivant les conditions décrites Fig. 30. Les spécimens dont la géométrie échappe aux règles de pinces du Guide Professionnel présentées Tab. 19 sont néanmoins représentés. En ce qui concerne les essais du CTBA, les forces maximales F_u obtenues sont ramenées au support des goujons afin d'approcher l'effort latéral réellement repris ($V_{u,exp}$). Les résultats obtenus figurent Fig. 48.

La distribution obtenue est relativement diffuse. Même si la méthode utilisée débouche sur une valeur de calcul par définition plus sécuritaire qu'une valeur caractéristique, elle reste très pénalisante. Les prédictions sont fidèles mais peu précises en ce qui concerne les échantillons testés au CTBA. Elles sont globalement plus précises mais peu fidèles en ce qui concerne les échantillons testés par H.J. Blass. Une explication peut être l'utilisation de lamellés-collés de classes différentes. Les essais du CTBA sont en effet réalisés sur du GL24h alors que sur les sept lots testés par H.J. Blass, un seul porte du GL24h et les six autres concerne du GL32h. La fiabilité de l'approche selon la classe de lamellé-collé utilisée est représentée Fig. 49.

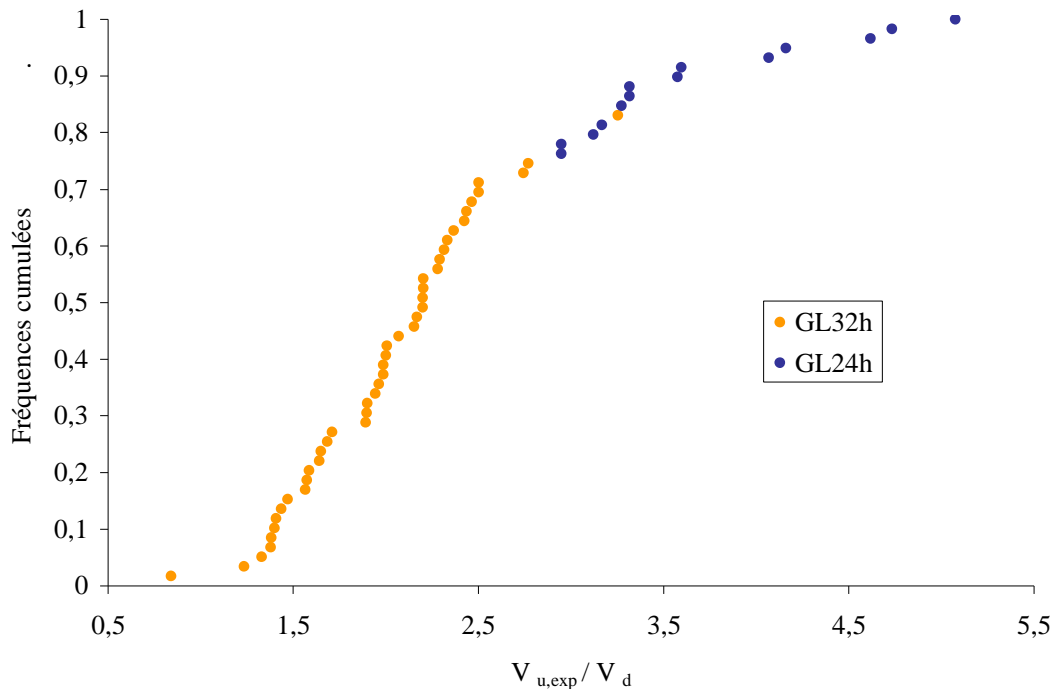


Fig. 49 : Précision de l'approche selon la classe de lamellé-collé concernée

Le bois utilisé et par conséquent les grandeurs qui le caractérisent apparaissent ainsi comme d'une importance majeure quant à la fiabilité de l'approche. D'autres facteurs moins apparents peuvent également avoir un impact non négligeable.

Ces conditions de chargement pour les goujons sont relativement fréquentes en pratique. Elles apparaissent en effet dès lors que la zone d'assemblage est soumise à un effort tranchant. Une reconsidération des grandeurs représentatives du bois introduites dans cette approche ($f_{v,k}$, k_n) apparaît ainsi comme nécessaire avant de risquer tout jugement quant à la viabilité de la correspondance goujons collés - poutres entaillées.

b) Goujon inséré perpendiculairement au fil et sollicité axialement

Les essais représentatifs de cette configuration de chargement sont ceux de H.J. Blass (B15 à B21). La fissuration du bois intervient en effet uniquement dans le cas de goujons non débouchant. Les prédictions sont confrontées aux résultats expérimentaux Fig. 50

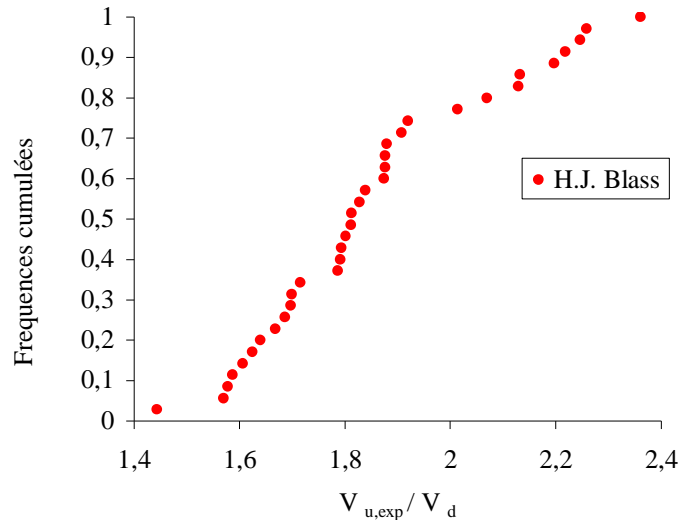


Fig. 50 : Confrontation de l'approche prédictive aux résultats de H.J. Blass.

Contrairement au cas précédent, la distribution obtenue est d'emblée relativement compacte. Les valeurs de calcul obtenues sont fidèles et précises en ce qui concerne les éprouvettes en GL28h testées par H.J. Blass. La même interrogation resurgit néanmoins. Une confrontation à des résultats expérimentaux portant sur du lamellé-collé d'une classe différente apparaît nécessaire avant de se prononcer quant à la fiabilité de cette approche dans le cas général.

II.5.3. Conclusion sur les approches de dimensionnement disponibles

Le nombre de paramètres mis en jeu et le nombre de modes de rupture envisageables rendent peu aisée la proposition de relations simples de dimensionnement. Des approches théoriques, débouchant sur des formulations fondées mais un peu complexes, ont néanmoins été proposées par P.J. Gustafsson. Elles sont aujourd'hui prises comme base de travail et les paramètres qu'elles contiennent (très nombreux faut il le préciser !) sont inclus dans des constantes établies sur la base de résultats expérimentaux. Une base de données expérimentales, aussi exhaustive soit elle, ne peut cependant intégrer l'ensemble des combinaisons de paramètres possibles. La pertinence des formules obtenues sera ainsi très variable. La viabilité des prédictions va ainsi dépendre du degré d'originalité du cas traité par rapport à ceux ayant servi de référence lors de la calibration de la relation employée. Les travaux présentés dans la partie suivante concernent la résistance à l'arrachement d'un goujon collé inséré parallèlement au fil et sollicité axialement. Ils s'appuient sur les approches théoriques fondées de la partie II.4.1 et montrent que, accompagnées d'une base expérimentale allégée, celles-ci permettent de se prononcer simplement quant à la résistance de l'assemblage.

**PARTIE III:
RESISTANCE À COURT TERME D'UN GOUJON COLLE INSERE
PARALLELEMENT AU FIL DU BOIS ET SOLLICITE AXIALEMENT**

Le refus de la proposition GIROD pour l'introduction des goujons collés à l'Eurocode 5 a relancé les recherches concernant la résistance à court terme des goujons collés. Parmi les modes de rupture précités (partie II.2), la rupture en cisaillement de l'adhésif ou de l'une de ses interfaces (R1, R2, R5) nécessite une approche spécifique. Pour les autres modes de rupture, en effet, les prédictions sont établies à partir d'approches dédiées aux assemblages par organes de type tige ou aux poutres entaillées.

L'approche par la Mécanique Non Linéaire de la Rupture a permis à P.J. Gustafsson [43] de démontrer que la résistance d'un goujon collé sollicité axialement peut, quelque soit la rhéologie de l'adhésif, être déterminée à partir d'une approche élastique (Fig. 41). L'approche de O. Volkersen, développée pour les assemblages collés à simple ou double recouvrement (II.4.1), a ainsi été adaptée aux goujons collés et a débouché sur des relations analytiques reliant la plupart des facteurs d'influence (Eq. 38 et Eq. 41).

Parmi ces facteurs d'influence, la résistance au cisaillement τ_u et l'énergie de rupture G_f sont retenues pour décrire l'adhésif. Celles-ci sont très largement variables selon la géométrie et la nature du joint d'adhésif et donc déterminantes quant à la fiabilité des prédictions. Leur absence totale des formules simplifiées disponibles conduit ainsi à s'interroger quant à l'adaptabilité de ces dernières.

III.1. HYPOTHESES ET OUTILS DEVELOPPES POUR L'ETUDE

III.1.1. Hypothèses

a) Un assemblage élémentaire

L'assemblage étudié est constitué d'un seul goujon collé sollicité axialement. L'un des principaux intérêts des goujons collés étant de pouvoir être mis en oeuvre selon la direction d'élançement de l'élément, l'étude concernera plus particulièrement les goujons collés insérés parallèlement au fil du bois.

b) Les modes de rupture concernant le bois

Les modes de rupture abordés sont ceux qui concernent le matériau bois. Il s'agit ainsi de la rupture en cisaillement au niveau de l'interface adhésif/bois (R2), de la rupture par traction du bois en arrière d'assemblage (R6) et de l'éclatement du bois (R7). Une

délamination au niveau de l'interface adhésif/bois (R2) atteste d'un assemblage optimisé. Présument une mise en œuvre et une utilisation adéquates de l'adhésif (respect des conditions de polymérisation et de la gamme d'épaisseurs de joint préconisée), le bois devient en effet le matériau le plus faible mécaniquement et la charge provoquant sa rupture cohésive constitue la charge maximale admissible par l'assemblage. Ce désir bien légitime d'optimisation de l'assemblage comporte néanmoins un risque non négligeable. Privilégier une rupture cohésive du matériau bois signifie en effet s'orienter vers une rupture fragile de l'assemblage. Une attention toute particulière est ainsi de rigueur quant à la fiabilité des approches prédictives concernant ce mode de rupture particulier.

c) Une rupture fragile de l'assemblage

Il est par la suite supposé que l'assemblage étudié présente une rupture de type fragile. Dans le cas d'un adhésif fragile et pour un goujon restant en deçà de sa limite élastique, cette hypothèse apparaît comme remplie. Dans les autres cas, les dimensions de l'assemblage jouent un rôle prépondérant.

d) Les paramètres géométriques

Ces travaux portent plus particulièrement sur l'influence des paramètres géométriques quant à la résistance de l'assemblage. Il a été démontré par C. Faye [19] que les paramètres géométriques de l'assemblage sont prépondérants par rapport aux propriétés élastiques des constituants pour décrire les champs de contrainte dans l'assemblage. Les paramètres descriptifs du joint d'adhésif : τ_u et G_f , dont la variabilité selon les propriétés mécaniques mais aussi géométriques des constituants de l'assemblage peut être observée (voir par ailleurs), sont bien entendu maintenus comme paramètres influents.

e) Support de l'étude

Compte tenu des hypothèses présentées dans les quatre paragraphes précédents, les campagnes expérimentales de GIROD concernant l'Epoxy et de L. Féligioni concernant un adhésif fragile sont retenues. Les influences des paramètres géométriques majeurs : longueur d'ancrage "l", diamètre du goujon "d_g" et diamètre de perçage "d_t", y sont étudiées. Des résultats concernant des éprouvettes de caractérisation locale et en dimensions structurales, toutes rompues au niveau de l'interface adhésif/bois, y sont regroupés. Les ruptures observées sont de surcroît fragiles (ou quasi fragiles). En ce qui concerne les essais de GIROD sur l'époxy, preuve en est faite au moyen des courbes "force – déplacement" rapportées par S. Aicher [35]. En ce qui concerne les essais de L. Féligioni, l'emploi d'un adhésif fragile garantit un comportement fragile de l'assemblage.

III.1.2. Modélisation par éléments finis en élasticité linéaire

Un modèle élastique linéaire a été construit sous le code de calcul par éléments finis Abaqus version 6.3 afin de vérifier tout calcul analytique ou tout pronostic. D'abord en trois dimensions, il a par la suite évolué vers un modèle axisymétrique (Fig. 35) à deux dimensions

permettant l'utilisation de densités de maillage élevées pour un temps de calcul restreint. Les propriétés mécaniques et géométriques de l'assemblage ainsi que les conditions limites de l'essai constituent les entrées du modèle. Les contraintes et les déplacements selon les directions axiale, radiale et tangentielle sont rapportés au chargement appliqué et constituent les résultats du modèle.

Le maillage est réalisé à partir d'éléments axisymétriques de type CAX4R présentant quatre noeuds (Fig. 52) et un unique point d'intégration. Ce dernier aspect, pouvant être considéré comme limitatif, est très largement compensé par la possibilité d'utiliser des maillages de forte densité. La densité de maillage optimale est établie par l'étude, pour une configuration d'assemblage donnée, de l'énergie élastique globale du modèle en fonction du nombre d'éléments dans chacune de ses directions. Le maillage peut en effet être considéré comme optimisé dès lors que cette énergie tend à se stabiliser. Les dimensions optimales pour les éléments finis sont alors relevées et considérées comme opportunes pour toutes configurations d'assemblage. Des contrôles ont été effectués ponctuellement en reprenant quelques simulations avec des densités de maillage volontairement supérieures et en vérifiant la similarité du résultat obtenu.

Un comportement élastique est affecté à chacun des matériaux. Goujon et adhésif sont supposés isotropes. Le bois est considéré comme isotrope transverse. Les propriétés mécaniques adoptées lors de chaque utilisation du modèle, systématiquement issues de la bibliographie, seront précisées en temps voulu.

L'influence des conditions limites en fond de perçage est rapportée dans [49]. De manière à permettre une comparaison entre les résultats numériques et les résultats analytiques, goujon et adhésif sont supposés totalement dissociés du bois en fond de perçage (Fig. 51). Les approches analytiques disponibles sont, en effet, issues de l'analyse des assemblages à simple ou double recouvrement dans lesquelles adhésif et substrats ne sont en contact qu'au niveau de la zone de recouvrement. Il a en outre été vérifié que les contraintes à l'embouchure du perçage sont quasiment indépendantes des conditions limites adoptées en fond de perçage.

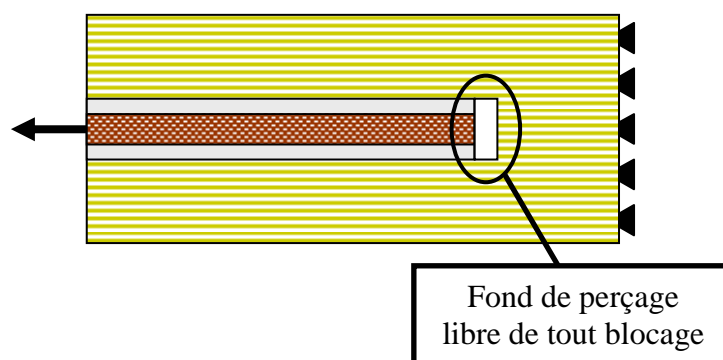


Fig. 51 : Conditions limites retenues en fond de perçage

Les contraintes maximales obtenues numériquement seront systématiquement contrôlées par un calcul analytique de manière à valider mutuellement les deux approches.

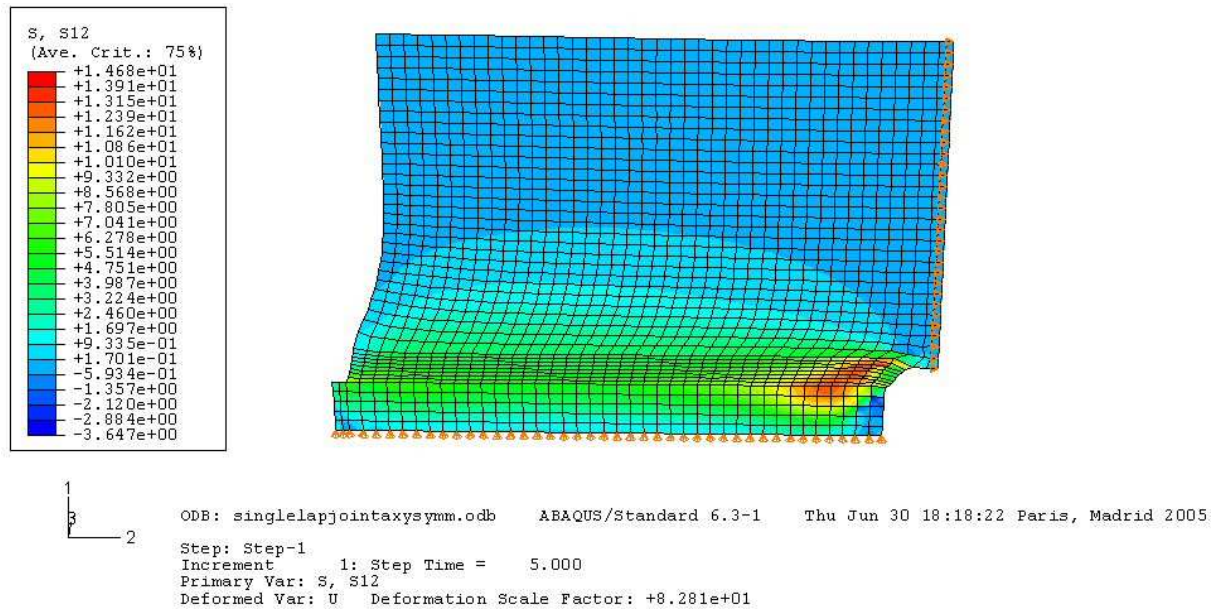


Fig. 52 : Aperçu du modèle éléments finis réalisé

III.2. ENCADREMENT THEORIQUE DE LA RESISTANCE EXPERIMENTALE DE L'ASSEMBLAGE

III.2.1. Encadrement des résultats expérimentaux issus de GIROD

a) *Utilisation des formules théoriques issues de GIROD*

Les travaux de P.J. Gustafsson (II.4) ont débouché sur la proposition d'approches prédictives. Celles-ci fournissent d'une part une estimation de la résistance de l'assemblage (Eq. 38 et Eq. 41), d'autre part une borne supérieure de cette même résistance (Eq. 42). Ces deux calculs nécessitent la connaissance des paramètres fondamentaux que sont τ_u et G_f .

Pour obtenir ces deux paramètres, la méthode préconisée par GIROD est la suivante. Pour un diamètre de goujon et un diamètre de perçage donnés, la résistance au cisaillement de l'adhésif τ_u et l'énergie de rupture G_f sont supposées constantes. Des résultats expérimentaux, obtenus pour deux lots d'éprouvettes représentatifs de deux longueurs d'ancrage ℓ_1 et ℓ_2 , sont nécessaires à la détermination. Par exemple, pour des essais de Pull-Compression, le couplage des résultats expérimentaux obtenus et de l'approche correspondante de P.J. Gustafsson conduit au système d'équation suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{P_{u,\ell_1}}{\pi d_g \ell_1} \right) = \tau_u \frac{\tanh(\omega_{\ell_1})}{\omega_{\ell_1}} \\ \left(\frac{P_{u,\ell_2}}{\pi d_g \ell_2} \right) = \tau_u \frac{\tanh(\omega_{\ell_2})}{\omega_{\ell_2}} \end{array} \right.$$

Eq. 64

La résolution de ce système, éventuellement via un logiciel de calcul mathématique type Maple, permet d'obtenir les valeurs de τ_u et G_f pour la configuration d'assemblage étudiée.

Alors réintroduites dans les équations originelles (Eq. 38, Eq. 41, Eq. 42) ces deux valeurs permettent d'établir une prédiction et de définir une borne supérieure quelque soit la longueur d'ancrage du goujon collé.

b) Validation du modèle élastique éléments finis

Il s'agit de vérifier la validité des contraintes de cisaillement fournies par le modèle au niveau de l'interface adhésif/bois. Les conditions limites adoptées pour la vérification sont celles de la configuration d'essai Pull-Pull. Les contraintes de cisaillement extraites des simulations relèvent d'une moyenne sur les contraintes calculées dans les deux couches d'éléments finis voisines de l'interface (l'une dans l'adhésif, l'autre dans le bois). L'allure des distributions obtenues numériquement est représentée Fig. 53. Tout comme celles issues de calculs analytiques (Fig. 39), elles présentent des pics de contrainte localisés aux extrémités du joint d'adhésif. L'intensité de la contrainte maximale atteinte reste à vérifier.

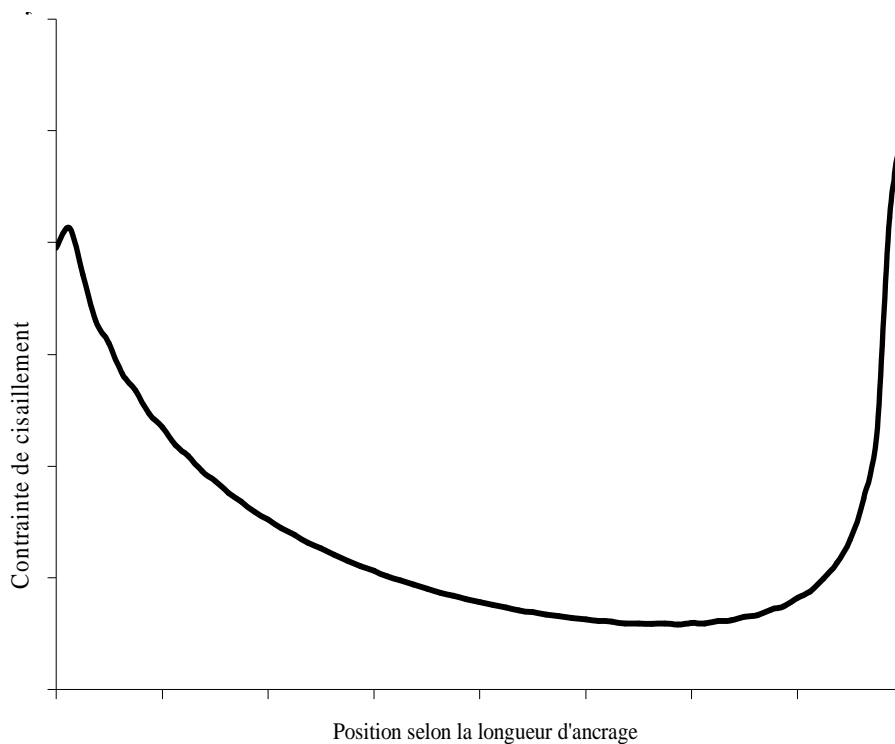


Fig. 53 : Distribution numérique des contraintes de cisaillement à l'interface adhésif/bois

En fond de perçage, les hypothèses et conditions limites de l'analyse élastique de O. Volkersen [39] sont respectées. Les résultats numériques peuvent par conséquent être contrôlés à l'aide des prédictions de l'approche analytique correspondante (Eq. 22). Les contraintes de cisaillement sont extraites, cette fois ci, non pas de l'interface mais au sein même du joint d'adhésif. Elles sont obtenues uniformes selon l'épaisseur de colle dans le cas de joints fins. Les distributions numériques et analytiques obtenues sont confrontées Fig. 54.

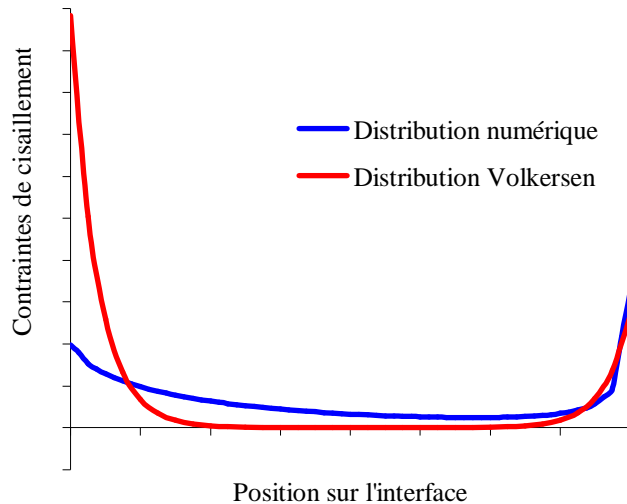


Fig. 54 : Distributions analytiques et numériques des contraintes de cisaillement dans l'adhésif

Validés en fond de perçage, les pics de contrainte peuvent être jugés représentatifs en tout point du maillage. Pour l'établissement d'une prédiction, la contrainte maximale atteinte doit être comparée à un critère de rupture en cisaillement. Ce critère peut, par exemple, être établi à partir d'essais de caractérisation locale.

De par son origine statique et sa non calibration au moyen de résultats expérimentaux, cette méthode fournit une borne inférieure de la résistance de l'assemblage.

c) Utilisation du modèle éléments finis et confrontation des prédictions aux résultats expérimentaux de GIROD pour l'époxy

Les propriétés mécaniques des matériaux retenues dans les simulations figurent Tab. 21. Les conditions limites imposées au modèle correspondent à celles de la campagne expérimentale GIROD (Pull-Pull). La contrainte de cisaillement maximale atteinte à l'interface adhésif/bois est prélevée en embouchure du perçage.

Tab. 21 : Propriétés mécaniques adoptées dans le modèle pour décrire les éprouvettes de GIROD

| Matériau | Acier [2] | | Epoxy [50] | | Bois [2] | | | | | |
|--------------|-----------|---------|------------|---------|----------|-----------|------------|--------------|----------|------------|
| | E_r | ν_r | E_a | ν_a | E_L | $E_{R/T}$ | ν_{RT} | $\nu_{R/TL}$ | G_{RT} | $G_{R/TL}$ |
| Unité | GPa | – | GPa | – | GPa | GPa | – | – | GPa | GPa |
| GIROD | 210 | 0,3 | 4 | 0,4 | 14 | 0,65 | 0,3 | 0,02 | 0,65 | 0,06 |

Les valeurs de τ_u et G_f sont calculées par la méthode GIROD présentée en a). Cette opération a été menée en utilisant l'approche théorique représentative de l'essai de Pull-Pull (Eq. 38) et en choisissant, pour chaque diamètre de perçage, le couple de longueurs d'ancrage (l_1 , l_2) le plus favorable. Pour une meilleure représentativité du mode de rupture obtenu en pratique (R2), le diamètre du goujon d_g est remplacé, pour la détermination des grandeurs

équivalentes $\tau_{u,eq}$ et $G_{f,eq}$ et pour les prédictions, par le diamètre du perçage d_t . Un retour à la démonstration de l'approche de P.J. Gustafsson (II.4.1) permet de constater que cette opération, qui revient à considérer l'interface adhésif/bois comme surface de rupture, n'est pas théoriquement aberrante. Les grandeurs équivalentes obtenues pour chacun des quatre diamètres de goujon testés dans GIROD figurent Tab. 22 suivant.

Tab. 22 : Grandeurs équivalentes obtenues par la méthode GIROD

| Diamètre de perçage | 9 mm | 13 mm | 17 mm | 21 mm |
|------------------------------------|------|-------|-------|-------|
| $\tau_{u,eq}$ (N/mm ²) | 10,5 | 10,0 | 8,2 | - |
| $G_{f,eq}$ (N/mm) | 1,6 | 2,1 | 3,4 | - |

Les prédictions obtenues pour des diamètres de perçage de 9 mm, 13 mm et 17 mm sont indiquées Fig. 55. Pour les échantillons présentant un perçage de diamètre 21 mm, les résultats expérimentaux fluctuent grandement selon la longueur d'ancrage et n'ont pas permis l'établissement de valeurs équivalentes fiables. Les résistances au cisaillement équivalentes $\tau_{u,eq}$ obtenues pour l'interface adhésif/bois sont en outre relativement proches des résistances moyennes observées expérimentalement pour de faibles longueurs d'ancrage (Tab. 11).

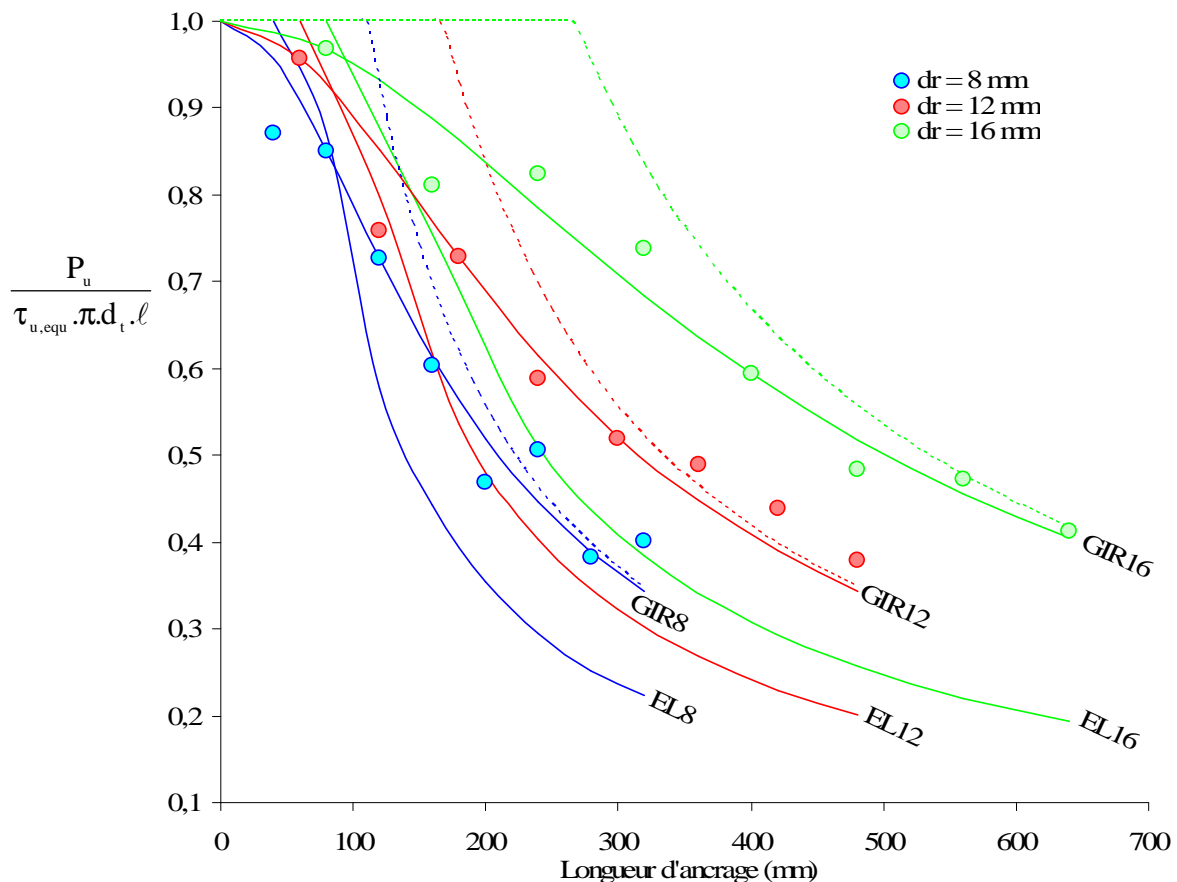


Fig. 55 : Confrontations des prédictions analytiques (GIR), numériques (EL) aux résultats expérimentaux de GIROD pour l'époxy

III.2.2. Encadrement des essais réalisés au CTBA

Parmi les autres travaux expérimentaux synthétisés dans la base de données, seuls ceux réalisés au CTBA s'intéressent à l'influence de la longueur d'ancrage (Tab. 8). Les éprouvettes concernées comportent un goujon de diamètre 16 mm inséré dans un perçage de diamètre 22 mm. Un protocole similaire est appliqué et les résultats obtenus figurent Fig. 56.

Les grandeurs équivalentes obtenues par la méthode GIROD sont $\tau_{u, \text{equ}} = 8,1 \text{ MPa}$ et $G_{f, \text{equ}} = 1,8 \text{ N/mm}$ en utilisant la relation correspondant aux conditions de Pull-Pull.

Les propriétés mécaniques adoptées dans les simulations figurent Tab. 23.

Tab. 23 : Propriétés mécaniques injectées dans le modèle pour décrire les éprouvettes du CTBA

| Matériau | Acier [2] | | Epoxy [16] | | Bois [2] | | | | | |
|----------|-----------|---------|------------|---------|----------|-----------|------------|-------------|----------|-----------|
| | E_r | ν_r | E_a | ν_a | E_L | $E_{R/T}$ | ν_{RT} | $\nu_{R/L}$ | G_{RT} | $G_{R/L}$ |
| Unité | GPa | – | GPa | – | GPa | GPa | – | – | GPa | GPa |
| GIROD | 210 | 0,3 | 2 | 0,4 | 10,9 | 0,57 | 0,5 | 0,03 | 0,5 | 0,026 |

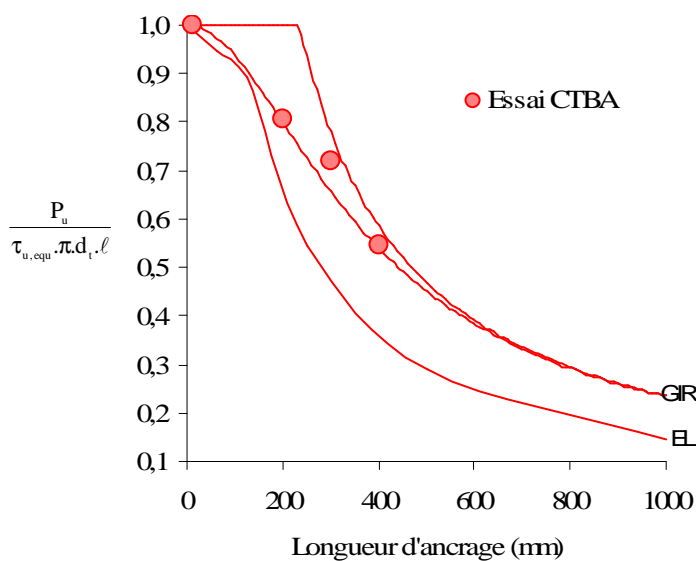


Fig. 56 : Confrontation des prédictions analytiques (GIR), numériques (EL) aux résultats expérimentaux du CTBA

III.2.3. Discussion

Les courbes issues du modèle éléments finis ne dépendent que des propriétés géométriques et mécaniques de l'assemblage modélisé. De par le comportement élastique affecté à chacun des matériaux, l'intensité des contraintes est en effet proportionnelle à l'effort appliqué. Si une valeur de τ_u n'est pas nécessaire à la construction du graphique, elle est cependant indispensable à l'établissement de prédictions. Ces courbes peuvent parfois

paraître bien en deçà des points expérimentaux également représentés. Ce constat doit néanmoins être nuancé par le fait que les charges de rupture expérimentales sont, sur ces graphiques, normées au moyen de contraintes équivalentes dont la représentativité reste à démontrer.

Les courbes issues de la méthode GIROD traversent parfaitement les nuages de points (Fig. 55 et Fig. 56). Ceci est tout à fait logique dans la mesure où celles-ci sont calibrées au moyen des résultats expérimentaux. Sans cette calibration, l'approche de P.J. Gustafsson, directement issue de O. Volkersen et donc également d'origine statique, fournit des prédictions très largement sécuritaires. Cette forte sous-estimation de la résistance de l'assemblage est en partie due aux fortes hypothèses adoptées par O. Volkersen. Le goujon et l'élément bois sont en effet supposés se déformer uniquement en traction alors que l'adhésif est supposé se déformer uniquement en cisaillement. Les contraintes de cisaillement sont par ailleurs considérées comme constantes selon l'épaisseur du joint d'adhésif. La modélisation élastique par éléments finis permet de s'affranchir de toutes ces hypothèses et d'améliorer la fiabilité des prédictions.

La fiabilité de l'approche de P.J. Gustafsson dépend très largement du couple de longueur d'ancrage (l_1 , l_2) choisi pour la calibration. Sur les graphiques précédents, les deux longueurs d'ancrage retenues pour la calibration sont celles pour lesquelles points expérimentaux et courbes de prédiction se superposent parfaitement. Des courbes de prédiction beaucoup moins représentatives auraient pu être obtenues pour l'emploi d'un autre couple de longueurs d'ancrage.

La borne supérieure fournit par l'approche Mécanique Non Linéaire de la Rupture s'avère parfois en deçà de quelques points expérimentaux. Là encore, le couple de longueurs d'ancrage choisi pour l'établissement des grandeurs caractéristiques pourrait avoir sa part d'erreur. Ce fait n'est néanmoins observable que pour les plus grandes longueurs d'ancrage. La plastification partielle du goujon avant rupture, non intégrée dans l'approche théorique, peut ainsi s'avérer une explication des incohérences constatées entre prédictions et résultats expérimentaux.

Ces représentations apparaissent néanmoins comme relativement complètes. Une approche élastique et une approche par la Mécanique Non Linéaire de la Rupture fournissent respectivement une borne inférieure et une borne supérieure de la résistance de l'assemblage. Une calibration correcte de la formulation analytique de P.J. Gustafsson peut par ailleurs permettre l'établissement de prédictions fiables. Ces approches apparaissent ainsi comme suffisantes et adaptées à l'élaboration de méthodologie de dimensionnement. Les travaux à venir doivent maintenant s'orienter vers une détermination la plus souple possible des paramètres mis en jeu dans ces approches.

III.3. DETERMINATION DU VOLUME DE BOIS CONTRAINT AUX ALENTOURS D'UN GOUJON COLLE

Les préconisations concernant la quantité de bois à préserver autour d'un goujon collé (règles de pinces présentées en II.4.4) sont très controversées. Ce paramètre est primordial

dans la mesure où il détermine le nombre de goujons collés utilisable lors de la conception de l'assemblage. Dans le cas d'un goujon collé inséré parallèlement au fil du bois et sollicité axialement, ces règles de pinces sont établies de manière à se prémunir d'une rupture par éclatement du bois (R7). L'impact d'une augmentation de la section de l'élément sur les champs de contrainte est étudié afin de se prononcer quant à la viabilité des règles imposées.

III.3.1. Description des contraintes mécaniques dans l'assemblage

La modélisation élastique par éléments finis, présentée en III.1.2, est à nouveau employée. Les caractéristiques mécaniques introduites dans le modèle correspondent à celles des essais de L. Féligioni et sont présentées Tab. 24. Les conditions limites sont celles de l'essai de Pull-Pull.

Tab. 24 : Propriétés mécaniques injectées dans le modèle pour décrire les éprouvettes de L. Féligioni

| Matériau | Acier | | Epoxy [36] | | Bois [2] | | | | | |
|--------------|-------|---------|------------|---------|----------|-----------|------------|-------------|----------|-----------|
| | E_r | ν_r | E_a | ν_a | E_L | $E_{R/T}$ | ν_{RT} | $\nu_{R/L}$ | G_{RT} | $G_{R/L}$ |
| Unité | GPa | – | GPa | – | GPa | GPa | – | – | GPa | GPa |
| GIROD | 210 | 0,3 | 6,642 | 0,4 | 10,9 | 0,57 | 0,5 | 0,03 | 0,5 | 0,026 |

L'étude visant à la compréhension de la rupture cohésive du matériau bois dans l'assemblage, des cartographies de chaque type de contrainte ont été réalisées (Fig. 57). Celles-ci ont révélé la prédominance de trois contraintes présentant leurs maxima en différents lieux de l'assemblage (Fig. 58).

- les contraintes de cisaillement maximales à l'interface adhésif/bois et critiques au niveau de l'embouchure du perçage,
- les contraintes d'ouverture aussi localisées au niveau de l'interface adhésif/bois et également critiques à l'embouchure du perçage,
- les contraintes de traction dans le bois en arrière de l'assemblage présentant un pic à proximité du goujon collé.

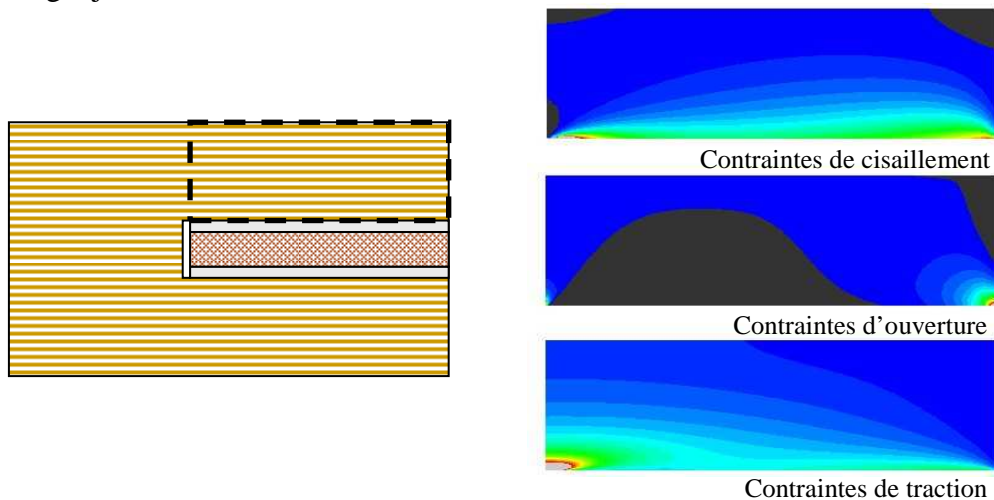


Fig. 57 : Cartographie des contraintes mécaniques dans l'assemblage

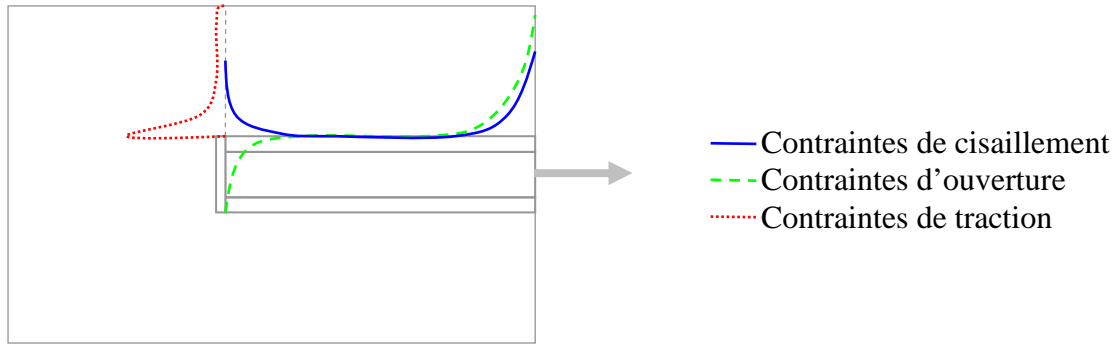


Fig. 58 : Allure des distributions de contraintes dans l'assemblage

III.3.2. Augmentation de la distance à l'arête de l'élément "a₂"

L'influence de la section de l'élément sur chacune de ces contraintes est évaluée par la suite. En plus de l'arête de l'éprouvette "2.a₂", la longueur d'ancrage "l" est la seule variable retenue pour l'étude. Pour plus de commodité, la distance entre l'enveloppe du perçage (périphérie du goujon collé) et l'arête de l'élément la plus proche est dénommée "η" ($a_2 = d_t/2 + \eta$). Les valeurs retenues pour les diamètres du goujon et du perçage sont respectivement 16 mm et 17 mm.

Pour une charge unitaire appliquée, les contraintes maximales de cisaillement, d'ouverture et de traction sont relevées au pic des distributions issues des simulations numériques. Les résultats obtenus, selon l'épaisseur de bois préservée et la longueur d'ancrage, figurent respectivement Fig. 59, Fig. 60 et Fig. 61.

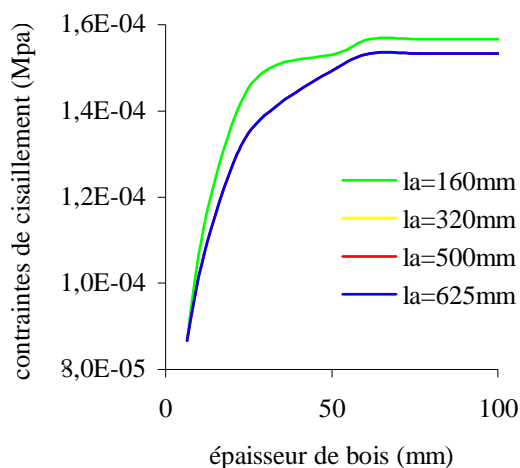


Fig. 59 : Contraintes de cisaillement

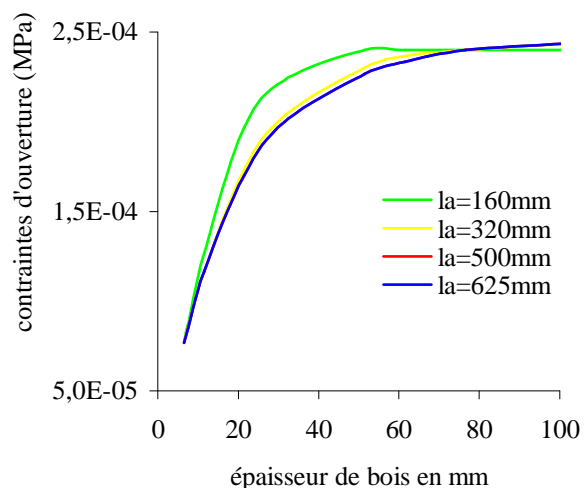


Fig. 60 : Contraintes d'ouverture

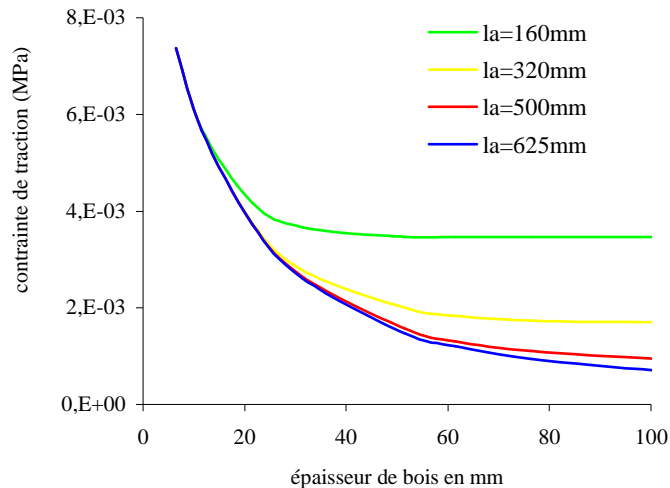


Fig. 61 : Contrainte de traction dans l'assemblage

Parmi les trois types de contraintes abordés, seules les contraintes de traction en arrière d'assemblage évoluent dans le sens de la sécurité suite à une augmentation de section de l'élément bois. Les contraintes d'ouverture et de cisaillement à l'interface adhésif/bois augmentent avec la section de bois avant d'atteindre des valeurs palières. La Fig. 59 confirme par ailleurs l'existence d'une longueur d'ancrage seuil à partir de laquelle les contraintes de cisaillement à l'interface adhésif/bois plafonnent et indique que celle-ci n'est que peu dépendante de la section de l'élément bois.

Une augmentation de section de l'éprouvette permet ainsi uniquement de se prémunir d'une rupture prématurée de l'assemblage en traction dans le bois. Ce constat doit néanmoins être immédiatement modéré par le fait que les singularités susceptibles d'engendrer des contraintes parasites dans l'assemblage ne sont pas intégrées au modèle se voulant idéal. La Fig. 61 révèle en tout cas l'existence d'une section seuil ou "surface efficace" au delà de laquelle toute augmentation de l'épaisseur de bois à la périphérie du goujon collé ne se traduit plus par une augmentation significative de la résistance en traction de l'assemblage. Une estimation de cette section efficace, c'est-à-dire du volume de bois participant activement au transfert de l'effort axial imposé au goujon, s'avère indispensable dans une optique d'amélioration des règles de pinces pour ce type d'assemblage.

III.3.3. Estimation de la section efficace de bois autour d'un goujon collé

a) Observation numérique

La section efficace de bois est, d'après la Fig. 61, fonction de la longueur d'ancrage. Pour de très faibles épaisseurs de bois autour du goujon collé, les contraintes de traction s'uniformisent selon la section de l'élément, deviennent indépendantes de la longueur d'ancrage et tendent vers σ telle que :

$$\sigma = \frac{P}{\left[a^2 - \frac{(d_g + 2.e)^2}{4} \right]}$$

Eq. 65

La tendance générale pour de fortes longueurs d’ancrage et par extension pour une longueur d’ancrage infinie, revêt par ailleurs une certaine importance et constitue une référence. En effet, pour une longueur d’ancrage finie, la tendance observée est partiellement similaire à cette dernière. L’épaisseur de bois à laquelle les tendances divergent, notée “ η_ℓ ” par la suite, peut alors être considérée comme représentative de la section efficace de bois dans l’assemblage. Celle-ci annonce effectivement la très prochaine fin de l’atténuation du pic des contraintes de traction et atteste ainsi, pour la longueur d’ancrage considérée, de l’inutilité de persévérer à augmenter la section de l’élément.

Il est finalement notable que la courbe de référence (longueur d’ancrage infinie) semble elle même s’acheminer vers un palier. La valeur à partir de laquelle ce dernier est considéré comme atteint sera notée “ η_p ”.

L’épaisseur efficace de bois autour du goujon “ η_{eff} ”, caractéristique de la surface efficace au sens du Guide Professionnel [16] peut ainsi être prise égale à :

$$\eta_{\text{eff}} = \min \begin{cases} \eta_\ell \\ \eta_p \end{cases}$$

Eq. 66

b) Travaux analytiques

Une cartographie des contraintes de traction selon la direction axiale, disponible numériquement (Fig. 57), amène à rechercher un volume efficace de bois ogival dont la hauteur correspond à la longueur d’ancrage et dont le rayon de la base reste à déterminer.

Un rapprochement est, à ce stade, effectué avec une formulation issue des règles de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint [51].

$$\tan 2\beta_u = \frac{2 \cdot \tau_u}{\sigma_{x_u} - \sigma_{t_u}}$$

Eq. 67

Cette formulation permet de déterminer, pour une poutre en béton précontraint, la direction (angle β_u) selon laquelle des fissures risquent de se propager depuis une armature sollicitée axialement et ainsi découper des bielles de béton. Son intérêt est d’évaluer la nécessité d’armatures transversales et d’en déterminer la disposition optimale pour ponter ces fissures. Celle-ci met en jeu les contraintes ultimes en traction (σ_{x_u} et σ_{t_u}) et en cisaillement (τ_u) de l’élément de poutre comportant des armatures longitudinales et transversales et de ce fait orthotrope. Le bois étant naturellement orthotrope et en considérant le goujon collé sollicité axialement comme une armature longitudinale de précontrainte, la formule précédente est envisagée pour la configuration étudiée. Les contraintes de rupture retenues

pour le bois sont prélevées dans le STEP [2]. Pour une classe de résistance C24, celles-ci sont résumées Tab. 2.

On obtient ainsi, pour le bois de classe C24, un angle β_u de 10° que l'on retient comme "angle au sommet" de l'ogive de bois sollicitée. En supposant le profil de l'ogive parabolique et avec les hypothèses ci-dessous:

$$y(0) = 0, \quad \frac{dy}{dx}(0) = \tan \beta_u, \quad \frac{dy}{dx}(\ell) = 0$$

Eq. 68

le rayon "r" de la base, caractérisant la zone sollicitée, est obtenu via la relation suivante:

$$r = \frac{\ell}{2} \cdot \tan(\beta_u)$$

Eq. 69

c) *Comparaison des approches numériques et analytiques*

En reportant les prédictions de la méthode analytique précédente sur Fig. 61, représentative des résultats numériques, on obtient Fig. 62 suivante.

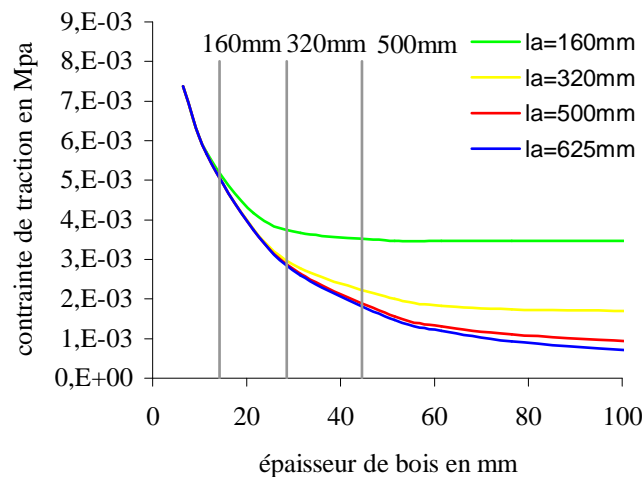


Fig. 62 : Comparaison des surfaces efficaces numériques et analytiques

La méthode analytique permet ainsi, pour une longueur d'ancrage donnée "l", une évaluation très correcte de l'épaisseur "ηℓ" à laquelle la tendance diverge de celle correspondant à un goujon collé d'ancrage infini. Celle-ci est ainsi numériquement validée pour la géométrie d'assemblage étudiée soit pour $d_g = 16$ mm et $d_t = 17$ mm. Sa représentativité doit dès lors être confrontée aux variations de ces deux derniers paramètres.

d) Validité de l'approche analytique dans le cas général

Les courbes représentatives des tendances observées pour les huit géométries d'assemblage décrites Tab. 25 sont représentées Fig. 63.

Tab. 25 : Les huit géométries d'assemblage testées

| géométrie | d_g (mm) | d_t (mm) | l_a (mm) |
|-----------|------------|------------|------------|
| 1 | 11 | 12 | 160 |
| 2 | 11 | 12 | 320 |
| 3 | 11 | 17 | 160 |
| 4 | 11 | 17 | 320 |
| 5 | 16 | 17 | 160 |
| 6 | 16 | 17 | 320 |
| 7 | 16 | 22 | 160 |
| 8 | 16 | 22 | 320 |

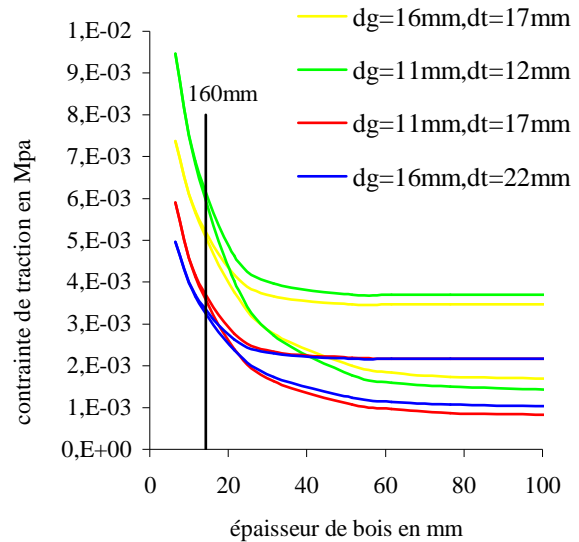


Fig. 63 : Validité de l'approche analytique dans le cas général ($l = 160$ mm et 320 mm)

Les prédictions analytiques apparaissent également tout à fait viables dans le cas général. La Fig. 63 reflète une certaine indépendance de l'épaisseur efficace " η_l " vis-à-vis des diamètres du goujon et du perçage. Les contraintes de traction transmises par l'assemblage n'apparaissent elles aussi que très peu dépendantes du diamètre du goujon. Une épaisseur accrue du joint de colle atténuera quant à elle davantage le pic de contrainte.

III.3.4. Comparaison aux travaux de H.J. Blass et règles de dimensionnement

a) Travaux expérimentaux de H.J. Blass

Suite à la campagne expérimentale présentée en II.3.6, H.J. Blass [38] a fixé la distance minimale à préserver entre l'axe du goujon et l'arête de l'élément bois la plus proche à $2,5.d_g$. Cette affirmation apparaît comme un peu précipitée. D'une part, la longueur d'ancrage " l ", le diamètre du goujon " d_g " et le diamètre du perçage d_t sont maintenus constants tout au long de la campagne expérimentale. L'épaisseur efficace de bois obtenue relève ainsi d'un cas particulier et ne peut être directement étendue à toute géométrie d'assemblage. D'autre part, les ruptures constatées sont accompagnées d'un éclatement du bois. L'examen des cartographies de contrainte (Fig. 57), certes établies à partir d'un modèle idéal, ne permet pas de fournir une explication rationnelle à ce phénomène. Ce type de rupture semble ainsi plutôt lié à un léger désaxage du chargement appliqué qui génère une sollicitation latérale du goujon et conduit à une rupture de type R10a). La formule analytique

proposée (Eq. 69) fournit, pour la géométrie d'éprouvette testée par H.J. Blass, une épaisseur de bois efficace η_{320} de 26 mm soit une distance minimale a_2 de 34 mm ($2,1.d_g$).

b) Projets de règlement

Le projet de Guide Professionnel et la proposition GIROD à l'Eurocode 5 préconisent tous deux une distance à l'extrémité de $2,5 d_g$. En ce qui concerne la proposition GIROD, cette valeur est directement issue des travaux de H.J. Blass commentés précédemment.

L'approche analytique proposée ne peut servir seule d'approche de dimensionnement. En effet, la grandeur η_t n'a d'intérêt que dès lors qu'elle est couplée à la grandeur η_p définie précédemment. Or cette dernière grandeur, correspondant à un assemblage élémentaire de longueur infinie, n'a pas été établie. Dans son état actuel, l'approche reste ainsi très pénalisante pour de grandes longueurs d'ancrage

L'approche analytique proposée peut, à ce stade, être intéressante pour des cas d'application courante. Couplée aux approches de dimensionnement existantes, elle peut en effet permettre d'optimiser la répartition des goujons dans la section de l'élément pour de faibles longueurs d'ancrage. Les préconisations pourraient ainsi être établies sous la forme :

$$a_2 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,5.d_g \\ \frac{d_t + \ell \cdot \tan(\beta_u)}{2} \end{array} \right.$$

Eq. 70

Il faut néanmoins préciser que les méthodes prédictives présentées en II.4.1 ne sont rigoureusement applicables que pour $k \leq 1$ c'est-à-dire $E_g A_g \leq E_b A_b$. Dans le cas d'un assemblage élémentaire réalisé au moyen d'un goujon en acier dans du bois de classe C24, cette condition est vérifiée dès lors que :

$$210000 \cdot \frac{\pi \cdot d_g^2}{4} \leq 11000 \cdot (2 \cdot a_2)^2 \Leftrightarrow a_2 \geq 1,93 \cdot d_g$$

Eq. 71

Dans le cas contraire, la contrainte maximale de cisaillement dans l'adhésif se déplace théoriquement de l'embouchure vers le fond du perçage (Fig. 39). Les approches prédictives doivent être ainsi reprises à la base et être réadaptées en conséquence.

Ces règles de pinces modifiées doivent maintenant être confrontées à des résultats expérimentaux de manière à vérifier leur viabilité en pratique.

III.4. RESISTANCE AU CISAILLEMENT DE L'INTERFACE ADHESIF/BOIS

III.4.1. Problématique

La résistance au cisaillement de l'interface adhésif/bois peut être déterminée au moyen d'essais de caractérisation locale. Ces essais, généralement réalisés selon des conditions de chargement PC, concernent des éprouvettes de faible longueur d'ancrage. P.J. Gustafsson a en effet démontré que pour de faibles valeurs de l'indice de fragilité λ , résistance en cisaillement de l'interface adhésif/bois et charge ultime sont liées par la relation suivante :

$$\tau_u = \frac{P_u}{\pi \cdot d_t \cdot \ell} = \bar{\tau}_u$$

Eq. 72

Pour sa détermination, ne doivent bien sûr être retenus que les résultats expérimentaux concernant des éprouvettes ayant effectivement rompu au niveau de l'interface adhésif/bois.

La campagne expérimentale réalisée par L. Féligioni met en exergue des variations de la résistance au cisaillement de l'interface selon la géométrie d'assemblage considérée (Tab. 15). Ces résultats intègrent néanmoins indifféremment plusieurs modes de rupture (R1, R2, R5). En ce qui concerne l'adhésif fragile, les lots qui présentent majoritairement une rupture au niveau de l'interface adhésif/bois (R2) sont retenus. Les fichiers d'exploitation des essais, mis à disposition par l'auteur, ont permis de ne retenir de ces lots que les résultats concernant les éprouvettes rompues en cette même interface. Les résultats obtenus figurent Tab. 26.

Tab. 26 : Résultats expérimentaux de L. Féligioni pour un adhésif fragile après sélection des éprouvettes rompues à l'interface adhésif/bois

| Lots | nb | L | d _g | e | ℓ | F _u | τ _u | COV |
|------|----|----|----------------|----|----|----------------|----------------|------|
| - | - | mm | mm | mm | mm | N | MPa | % |
| LF1 | 7 | 40 | 10 | 1 | 40 | 11019 | 7,3 | 9,6 |
| LF2 | 9 | 40 | 10 | 3 | 40 | 13104 | 6,5 | 12,8 |
| LF4 | 8 | 40 | 12 | 1 | 40 | 13085 | 7,4 | 9,4 |
| LF5 | 8 | 40 | 12 | 3 | 40 | 13753 | 6,1 | 13,9 |
| LF7 | 10 | 40 | 14 | 1 | 40 | 13896 | 6,9 | 13,5 |
| LF8 | 5 | 40 | 14 | 3 | 40 | 15096 | 6,0 | 12,0 |
| LF9 | 8 | 40 | 14 | 5 | 40 | 15043 | 5,0 | 14,3 |
| LF10 | 6 | 20 | 12 | 3 | 20 | 6274 | 5,6 | 13,9 |
| LF11 | 9 | 60 | 12 | 3 | 60 | 23152 | 6,8 | 7,0 |

Les variations de la résistance au cisaillement de l'interface adhésif/bois sont de nouveau observables. Deux explications antagonistes ont été envisagées à ce stade.

- La résistance au cisaillement τ_u est intrinsèque à l'interface adhésif/bois et les variations observées en terme de résistance moyenne au cisaillement à la rupture $\bar{\tau}_u$ sont liées à une implication plus ou moins prononcée des contraintes d'ouverture à l'interface.
- La résistance au cisaillement τ_u est dépendante de la géométrie de l'assemblage.

III.4.2. Détermination des contraintes d'ouverture

Les conditions limites retenues par L. Féligioni correspondent à des conditions de Pull-Compression. Le blocage des éprouvettes est réalisé au moyen d'une plaque métallique où a été pratiquée une ouverture circulaire dont le diamètre a été estimé à 40 mm (Fig. 33) [37]. Un anneau de bois, plus ou moins large selon le diamètre de perçage, reste ainsi libre de tout blocage à l'embouchure du goujon collé. Ces conditions limites particulières ont conduit à l'utilisation du modèle numérique présenté en III.1.2. Les pics de contraintes donnés par celui-ci ont tout d'abord du être validés. Les conditions limites de Pull-Pull, pour lesquelles de nombreuses approches analytiques existent, sont retenues pour la vérification.

a) Vérification des prédictions du modèle élastique éléments finis

L'approche menée pour la validation concerne les assemblages à double recouvrement et est calquée sur celle conduite par Hart-Smith [52]. Les notations et orientations retenues pour l'étude sont explicitées Fig. 36. Les hypothèses de l'étude sont celles du modèle de Bernoulli unanimement adoptées en Résistance Des Matériaux (RDM). Les équations d'équilibre (Eq. 73 et Eq. 74) et de compatibilité (Eq. 95) sont pour le substrat bois fléchi :

$$\frac{dM}{dx} = -V + \tau \frac{\eta_\ell}{2}$$

Eq. 73

$$\frac{dV}{dx} = -\sigma$$

Eq. 74

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{E_b I}$$

Eq. 75

η_ℓ est l'épaisseur de bois efficace définie en III.3.3.

En négligeant les déformations radiales du goujon supposé rigide et en considérant les déformations transversales dans l'adhésif constantes selon l'épaisseur du joint, la relation suivante est envisageable:

$$\frac{\sigma}{E_a} = -\frac{y}{e_a}$$

Eq. 76

En considérant la contrainte de cisaillement τ uniforme sur l'interface, ce qui est le cas pour de faibles longueurs d'ancrage du goujon, une équation différentielle de degrés quatre est obtenue en combinant ces quatre premières relations :

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{E_a}{E_b I_e a} y = 0$$

Eq. 77

En posant :

$$\chi^4 = \frac{E_a}{4E_b I_e a}$$

Eq. 78

les solutions de l'équation sont de la forme :

$$y = A \sin \chi x \cosh \chi x + B \cos \chi x \sinh \chi x + C \sin \chi x \sinh \chi x + D \cos \chi x \cosh \chi x$$

Eq. 79

Les conditions limites permettant de déterminer A, B, C et D sont les suivantes :

$$\int_{-\frac{\ell}{2}}^{+\frac{\ell}{2}} \sigma dx = 0 = \int_{-\frac{\ell}{2}}^{+\frac{\ell}{2}} y dx$$

Eq. 80

$$M = E_b I \frac{d^2 y}{dx^2} = 0 \text{ en } x = \pm \frac{\ell}{2}$$

Eq. 81

$$V = 0 \text{ soit } \frac{dM}{dx} = \tau \frac{\eta_\ell}{2} = E_b I \frac{d^3 y}{dx^3} \text{ en } x = \frac{\ell}{2}$$

Eq. 82

En développant Eq. 81 on obtient :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = 2\chi^2 [A \cos \chi x \sinh \chi x - B \sin \chi x \cosh \chi x + C \cos \chi x \cosh \chi x - D \sin \chi x \sinh \chi x] = 0$$

Eq. 83

en $x = \pm \frac{\ell}{2}$ ce qui nécessite que $C = D = 0$.

En développant Eq. 80 et Eq. 82 les constantes A et B deviennent solutions du système suivant :

$$\begin{cases} A \cos \frac{\chi \ell}{2} \sinh \frac{\chi \ell}{2} - B \sin \frac{\chi \ell}{2} \cosh \frac{\chi \ell}{2} = 0 \\ 2\chi^3 \left[-(A + B) \sin \frac{\chi \ell}{2} \sinh \frac{\chi \ell}{2} + (A - B) \cos \frac{\chi \ell}{2} \cosh \frac{\chi \ell}{2} \right] = \frac{\tau \eta_\ell}{2E_b I} \end{cases}$$

Eq. 84

et s'écrivent sous la forme :

$$A = \frac{\tau}{K} \tan \frac{\chi^\ell}{2}$$

$$B = \frac{\tau}{K} \tanh \frac{\chi^\ell}{2}$$

Eq. 85

$$K = \frac{4E_b I \chi^3}{\eta_i} \left[-\sin \frac{\chi^\ell}{2} \sinh \frac{\chi^\ell}{2} \left(\tan \frac{\chi^\ell}{2} + \tanh \frac{\chi^\ell}{2} \right) + \cos \frac{\chi^\ell}{2} \cosh \frac{\chi^\ell}{2} \left(\tan \frac{\chi^\ell}{2} - \tanh \frac{\chi^\ell}{2} \right) \right]$$

Eq. 86

La distribution des contraintes d'ouverture selon l'interface admet ainsi l'équation suivante:

$$\sigma = -\frac{E_a \tau}{K e_a} \left[\tan \frac{\chi^\ell}{2} \sin \chi x \cosh \chi x + \tanh \frac{\chi^\ell}{2} \sinh \chi x \cos \chi x \right]$$

Eq. 87

Les résultats de cette approche analytique, valable uniquement pour de faibles longueurs d'ancrage, ont été comparés à ceux des simulations numériques. Les distributions obtenues par ces deux modèles figurent Fig. 64.

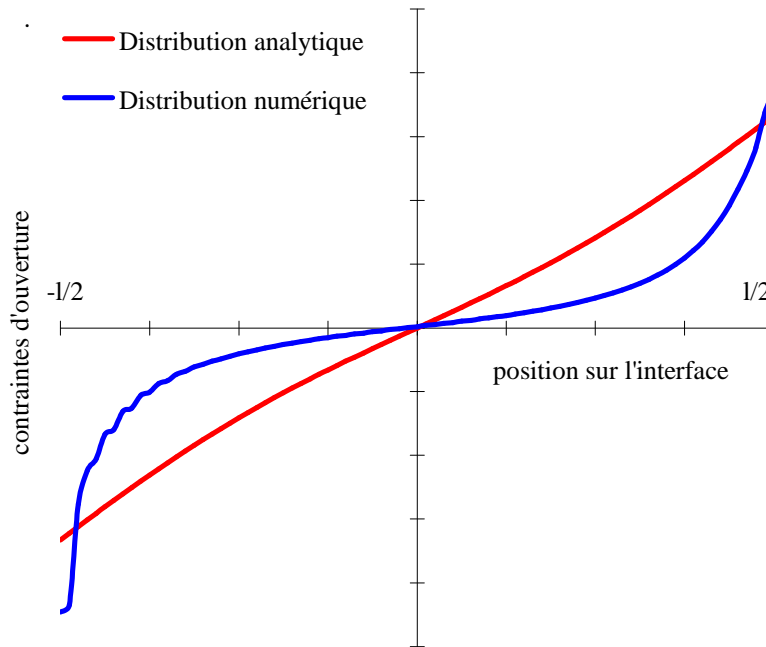


Fig. 64 : Contraintes d'ouverture obtenues numériquement et analytiquement

En définissant Φ le ratio entre les contraintes d'ouverture et de cisaillement à l'interface, les prédictions sont comparées Tab. 27 pour chacune des géométries testées par L.

Féligioni. Les paramètres mécaniques injectés dans les modèles analytique et numérique sont issus de Tab. 24.

$$\Phi = \frac{\sigma_{\max}}{\tau} \text{ avec } \tau = \frac{P}{\pi d_{\ell} \ell}$$

Eq. 88

Tab. 27 : Comparaison des prédictions analytiques et numériques pour les géométries de L. Féligioni

| Géométrie | Φ analytique | Φ numérique |
|-----------|-------------------|------------------|
| 10-1-40 | 1,6 | 1,6 |
| 10-3-40 | 1,2 | 1,3 |
| 12-1-40 | 1,6 | 1,5 |
| 12-3-40 | 1,2 | 1,2 |
| 14-1-40 | 1,6 | 1,4 |
| 14-3-40 | 1,2 | 1,2 |
| 14-5-40 | 1,1 | 1,1 |
| 12-3-20 | 0,9 | 0,9 |
| 12-3-60 | 1,3 | 1,6 |

Les faibles écarts constatés permettent une validation mutuelle des approches, analytique et numérique, de prédiction des contraintes d'ouverture à l'interface adhésif/bois. L'utilisation du paramètre η_{ℓ} (Eq. 73), représentatif de la section efficace de bois autour d'un goujon collé, s'est également avérée opportune.

b) Contraintes d'ouverture dans les conditions d'essai de L. Féligioni

Les contraintes d'ouverture agissant au niveau de l'interface adhésif/bois lors de la rupture des différentes éprouvettes de L. Féligioni figurent Tab. 28.

Tab. 28 : Contraintes de cisaillement et d'ouverture à la rupture pour les essais de L. Féligioni

| Lots | nb | L | d_g | e | ℓ | F_u | τ_u | COV | σ_u |
|-------------|----|----|-------|----|--------|-------|----------|------|------------|
| - | - | mm | mm | mm | mm | N | MPa | % | MPa |
| LF1 | 7 | 40 | 10 | 1 | 40 | 11019 | 7,3 | 9,6 | 27,6 |
| LF2 | 9 | 40 | 10 | 3 | 40 | 13104 | 6,5 | 12,8 | 18,3 |
| LF4 | 8 | 40 | 12 | 1 | 40 | 13085 | 7,4 | 9,4 | 27,9 |
| LF5 | 8 | 40 | 12 | 3 | 40 | 13753 | 6,1 | 13,9 | 17,0 |
| LF7 | 10 | 40 | 14 | 1 | 40 | 13896 | 6,9 | 13,5 | 25,9 |
| LF8 | 5 | 40 | 14 | 3 | 40 | 15096 | 6,0 | 12,0 | 17,1 |
| LF9 | 8 | 40 | 14 | 5 | 40 | 15043 | 5,0 | 14,3 | 13,0 |
| LF10 | 6 | 20 | 12 | 3 | 20 | 6274 | 5,6 | 13,9 | 15,7 |
| LF11 | 9 | 60 | 12 | 3 | 60 | 23152 | 6,8 | 7,0 | 25,0 |

Mis à part pour la configuration 14-3-40 qui ne compte que cinq échantillons, les contraintes ultimes d'ouverture s'échelonnent de la même manière que les contraintes ultimes en cisaillement. Les variations, selon la géométrie, de la résistance expérimentale au cisaillement ne peuvent par conséquent être expliquées par une influence plus ou moins marquée des contraintes d'ouverture. Les résistances ultimes en ouverture et cisaillement sont, pour une longueur d'ancrage donnée, indépendante du diamètre du goujon. L. Féligioni [36] a constaté expérimentalement que la charge ultime de l'éprouvette est une fonction linéaire croissante du volume de colle employé. Cette observation présume de l'existence d'un effet de la géométrie de l'assemblage sur la contrainte ultime en cisaillement de l'interface adhésif bois. La partie suivante vise à quantifier ce dernier.

c) Perspectives d'une résolution de l'équation de II.4.1.a)

L'approche élastique menée ci-dessus rappelle inévitablement celle menée en II.4.1. Celle-ci avait débouché sur l'équation différentielle suivante :

$$0 = \left(\frac{e_b}{2.G_b} + \frac{e_a}{G_a} + \frac{e_g}{2.G_g} \right) \frac{d^3 \tau(x)}{dx^3} - \left(\frac{1}{e_g E_g} + \frac{1}{e_b E_b} \right) \frac{d\tau(x)}{dx} - \frac{e_b}{D} \cdot \frac{d^2 M(x)}{dx^2}$$

Eq. 89

Or, en cumulant Eq. 73, Eq. 74, Eq. 75 et Eq. 76, les relations suivantes sont obtenues :

$$\tau = \frac{2}{e_b} \left(V + \frac{dM}{dx} \right) \Rightarrow \frac{d\tau}{dx} = \frac{2}{e_b} \left(-\sigma + D \frac{d^4 y}{dx^4} \right) = \frac{2}{e_b} \left(-\sigma - \frac{e_a D}{E_a} \frac{d^4 \sigma}{dx^4} \right)$$

Eq. 90

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = -\frac{dV}{dx} + \frac{e_b}{2} \frac{d\tau}{dx} = \sigma + \frac{e_b}{2} \frac{d\tau}{dx} = \sigma + \left(-\sigma - \frac{e_a D}{E_a} \frac{d^4 \sigma}{dx^4} \right) = -\frac{e_a D}{E_a} \frac{d^4 \sigma}{dx^4}$$

Eq. 91

En remplaçant dans Eq. 89, l'équation différentielle suivante, portant sur les contraintes d'ouverture, est obtenue.

$$0 = -\left(\frac{e_b}{2.G_b} + \frac{e_a}{G_a} + \frac{e_g}{2.G_g} \right) \frac{2 e_a D}{e_b E_a} \frac{d^6 \sigma}{dx^6} + \left(\frac{1}{e_g E_g} + \frac{1}{e_b E_b} + \frac{e_b^2}{2D} \right) \frac{2 e_a D}{e_b E_a} \frac{d^4 \sigma}{dx^4} - \left(\frac{e_b}{2.G_b} + \frac{e_a}{G_a} + \frac{e_g}{2.G_g} \right) \frac{2}{e_b} \frac{d^2 \sigma}{dx^2} + \left(\frac{1}{e_g E_g} + \frac{1}{e_b E_b} \right) \frac{2}{e_b} \sigma$$

Eq. 92

Celle ci admet des solutions de la forme:

$$\sigma = C_1 \cdot e^{(-a-ib)x} + C_2 \cdot e^{(a+ib)x} + C_3 \cdot e^{(-a+ib)x} + C_4 \cdot e^{(a-ib)x} + C_5 \cdot e^{cx} + C_6 \cdot e^{dx} \text{ avec } a, b, c, d \in \mathfrak{R}$$

Eq. 93

a, b, c, d répondent à des relations complexes mettant en jeu l'ensemble des paramètres géométriques et mécaniques du problème. Ces relations peuvent être obtenues par une résolution littérale d'Eq. 92 au moyen d'un logiciel de calcul mathématique type Maple. L'emploi direct de valeurs numériques rend la résolution beaucoup plus souple.

Les conditions limites adoptées sont les mêmes que dans l'approche précédente : Eq. 80, Eq. 81, Eq. 82 auxquelles vient s'ajouter la condition suivante:

$$\int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} \tau(x) dx = P$$

Eq. 94

Celles ci conduisent à l'annulation de la partie imaginaire de la solution générale (Eq. 93). Les premières distributions de contraintes d'ouverture et de cisaillement, obtenues à l'interface adhésif/bois pour des cas particuliers d'assemblage, ne sont cependant pas apparues très convaincantes. Un approfondissement du mode de résolution de l'équation différentielle et plus particulièrement un réajustement des conditions limites à utiliser s'avèrent nécessaires avant toutes conclusions quant à la validité de cette approche. L'idée d'un rapprochement entre les deux méthodes analytiques utiles à notre propos n'étant survenue que lors de la rédaction de cet ouvrage, aucune considération supplémentaire quant à cette ébauche d'approche prédictive n'y sera apportée.

III.4.3. Impact de la géométrie de l'assemblage sur la résistance en cisaillement de l'interface adhésif/bois

a) *Influence du diamètre du perçage*

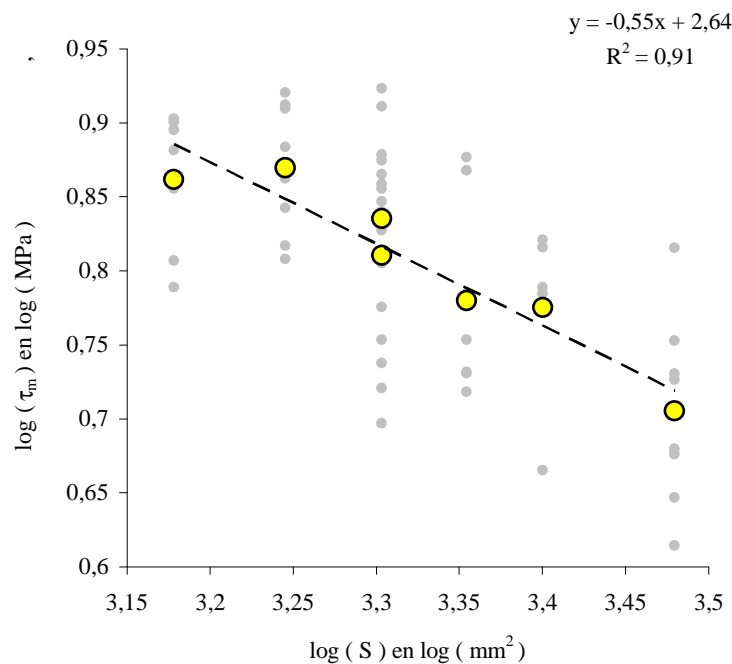


Fig. 65 : Influence de la surface cisailée sur la résistance au cisaillement de l'interface

Il est apparu que la résistance en cisaillement de l'interface adhésif/bois n'est que très peu dépendante du diamètre du goujon. Plutôt que du volume d'adhésif qui dépend grandement de ce paramètre, il est apparu opportun de se soucier de l'influence de la surface cisailée. Pour des échantillons de longueur d'ancrage identique ($\ell = 40$ mm), les contraintes ultimes en cisaillement atteintes par les différents lots d'éprouvettes de L. Féligioni (Tab. 26) figurent Fig. 65.

La résistance en cisaillement et la surface de l'interface adhésif/bois sont ainsi liées par une relation simple de la forme :

$$\tau_u = \frac{k}{\sqrt{S}} = \frac{k}{\sqrt{\pi d_t \ell}}$$

Eq. 95

Pour une longueur d'ancrage donnée ℓ , la contrainte ultime atteinte en cisaillement est ainsi obtenue comme inversement proportionnelle à la racine carrée du diamètre du perçage:

$$\tau_u = \frac{k'}{\sqrt{d_t}}$$

Eq. 96

La structure de cette relation n'est en aucun cas inédite. L'obtention de courbes de tendance présentant localement une pente de $\pm 0,5$ est en effet très fréquente en Mécanique Linéaire de la Rupture. Bernasconi [53] a même d'ores et déjà subodoré cette tendance en proposant, pour des goujons collés de différentes longueurs d'ancrage et insérés perpendiculairement au fil du bois, une approche de dimensionnement de la forme :

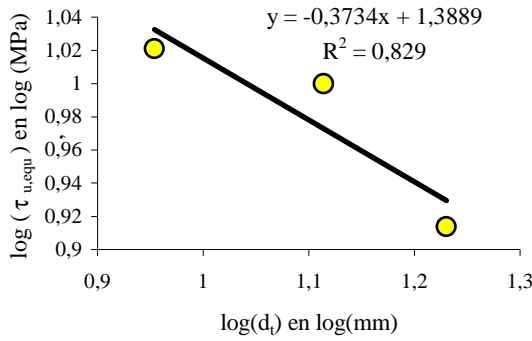
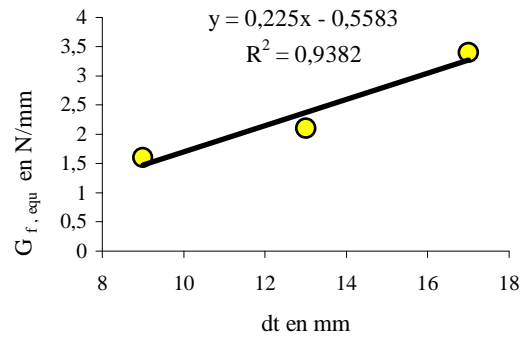
$$\frac{P_u}{\pi \cdot d_t \cdot \ell} = \frac{25}{\sqrt{d_t}}$$

Eq. 97

Dans la mesure où la relation établie (Eq. 96) est basée sur des essais de caractérisation locale, il apparaît prétentieux de la promouvoir à ce stade comme approche de dimensionnement à part entière. Elle peut néanmoins s'avérer utile quant à la détermination des paramètres nécessaires au dimensionnement d'assemblages de dimensions structurales.

b) Vérification au moyen de l'approche GIROD

L'approche GIROD consiste en la détermination, au moyen d'essais réalisés sur des éprouvettes de dimensions structurales, de valeurs équivalentes de la résistance au cisaillement τ_u et de l'énergie totale de rupture G_f . Les valeurs équivalentes obtenues pour des diamètres de perçage de 9 mm, 13 mm et 17 mm figurent Tab. 22. Elles sont représentées Fig. 66 et Fig. 67.


 Fig. 66 : Impact de d_t sur $\tau_{u, \text{equ}}$

 Fig. 67 : Impact de d_t sur $G_{f, \text{equ}}$

Malgré les largesses dues aux approximations de la méthode GIROD, l'effet du diamètre du perçage semble également se répercuter sur les résistances équivalentes. La résistance au cisaillement équivalente $\tau_{u, \text{equ}}$ apparaît à nouveau comme inversement proportionnelle à la racine carrée du diamètre du trou. L'énergie équivalente de rupture $G_{f, \text{equ}}$ apparaît quant à elle comme directement proportionnelle au diamètre du perçage.

III.5. PERSPECTIVES OUVERTES PAR CES RESULTATS

III.5.1. Une base de données expérimentales allégée

Les deux approches de prédiction évoquées nécessitent chacune une base de données expérimentales minimum. Les géométries d'assemblage et types d'adhésif rencontrés sont si variés que la recherche de valeurs représentatives se voulant universelles apparaît comme très optimiste. Les paramètres qu'il convient de déterminer expérimentalement sont ainsi la résistance au cisaillement de l'interface adhésif/bois et l'énergie totale de rupture G_f .

Concernant l'utilisation du modèle élastique paramétrable, la résistance au cisaillement de l'interface est nécessaire quant à l'établissement d'un critère de rupture. Celle-ci peut être facilement obtenue par des essais de caractérisation locale sur un lot d'éprouvettes de diamètre de perçage donné. Elle peut être ensuite étendue aux autres diamètres de perçage au moyen de Eq. 96. Ces approches ont été établies sur la base de ruptures fragiles. Un simple retour aux résultats de L. Féligioni (Tab. 15) permet de constater que ces considérations s'effondrent instantanément pour un adhésif très ductile. Les valeurs obtenues sont en outre caractéristiques de l'interface adhésif/bois. Le joint d'adhésif doit par conséquent appartenir à la gamme d'épaisseurs préconisée par le fournisseur afin d'éviter tout risque de délocalisation de la rupture.

Concernant la méthode GIROD, la détermination de valeurs équivalentes pour τ_u et G_f passe par la réalisation d'essais, préférentiellement en grandeur structurale, sur deux lots distincts d'éprouvettes. Les assemblages de chaque lot ne doivent différer que par leur

longueur d'ancrage. Moyennant les mêmes conditions que pour le modèle élastique, les résultats obtenus peuvent être étendus à d'autres géométries d'assemblage.

L'adaptabilité des approches de dimensionnement nécessite ainsi la réalisation d'un certain nombre d'essais. Les résultats de ces essais servent par la suite de référence pour la conception et doivent par conséquent être représentatif de la méthodologie réelle de mise en œuvre. Les moyens d'essais requis demeurent classiques et restreints. Ils sont généralement disponibles en centres techniques où peuvent être intégrés en interne à un laboratoire minimum.

III.5.2. Prédiction de la charge de rupture des éprouvettes GIROD

a) Correction de la formule simplifiée de GIROD

L'une des formules issue des travaux de P.J. Gustafsson (Eq. 41) a été calibrée par les résultats expérimentaux de GIROD (Tab. 11) pour permettre la proposition, à l'Eurocode 5, d'une relation simplifiée (Eq. 53) dans une optique de dimensionnement des assemblages.

Les simplifications effectuées, décrites en II.5.1, ont rendu la fiabilité de l'approche très dépendante des paramètres géométriques mis en jeu et en particulier du diamètre de perçage employé. La précision des prédictions augmente en effet avec le diamètre du perçage. Il est ainsi plausible que les résultats concernant les éprouvettes de plus grand diamètre (21 mm) aient été déterminants quant aux valeurs globalisatrices établies (5,5 MPa et $0,016 \text{ mm}^{-0,5}$). La résistance au cisaillement τ_u de l'interface et l'énergie totale de rupture G_f sont par ailleurs absorbées dans ces simplifications.

Un réajustement de ces valeurs au moyen des considérations établies en III.4.3 a ainsi été réalisé. Il a été supposé que la résistance au cisaillement de 5,5 MPa et que la valeur de $0,016 \text{ mm}^{-0,5}$ correspondent au perçage de plus grand diamètre soit 21 mm :

$$0,016 = \sqrt{\frac{2(1+k)\tau_{u,21}^2}{E_g G_{f,21}}} \quad \tau_{u,21} = 5,5 \text{ MPa}$$

Eq. 98 **Eq. 99**

Pour un diamètre de perçage d_t quelconque, les considérations de III.4.3 fournissent les relations suivantes :

$$\tau_{u,d_t} = \frac{\tau_{u,21} \cdot \sqrt{21}}{\sqrt{d_t}} \quad G_{f,d_t} = \frac{G_{f,21} \cdot d_t}{21}$$

Eq. 100 **Eq. 101**

La seconde équation (Eq. 101) émane des grandeurs équivalentes de G_f issues de la méthode GIROD. Elle n'a fait l'objet d'aucune vérification expérimentale. Il apparaît dès lors prématuré de l'employer à des fins de fiabilisation des relations existantes. L'énergie de rupture G_f sera ainsi, à ce stade, considérée comme indépendante du diamètre du perçage :

$$G_{f,d_t} = G_{f,21} = G_f$$

Eq. 102

On a dès lors :

$$\tau_{u,d_t} = 5,5 \cdot \sqrt{\frac{21}{d_t}}$$

Eq. 103

$$\sqrt{\frac{2(1+k)\tau_{u,d_t}^2}{E_g G_f}} = \sqrt{\frac{2(1+k) \cdot \frac{\tau_{u,21}^2 \cdot 21}{d_t}}{E_g \cdot G_f}} = \sqrt{\frac{21}{d_t}} \sqrt{\frac{2(1+k) \cdot \tau_{u,21}^2}{E_g G_f}} = \sqrt{\frac{21}{d_t}} \cdot 0,016$$

Eq. 104

La formule simplifiée se transforme alors en :

$$P_{u,k} = \pi \cdot d_t \cdot l \cdot 5,5 \cdot \sqrt{\frac{21}{d_t}} \cdot \left(\frac{\tanh \omega_{ec5}}{\omega_{ec5}} \right) \quad \text{avec} \quad \omega_{ec5} = 0,016 \cdot \sqrt{\frac{21}{d_t}} \cdot \frac{l}{\sqrt{d_t}}$$

Eq. 105

b) Confrontation aux résultats expérimentaux

La Fig. 46, présentée en II.5.1, a été reconstruite en intégrant à l'approche de dimensionnement initiale (Eq. 58) les modifications précédentes. La Fig. 68 est obtenue.

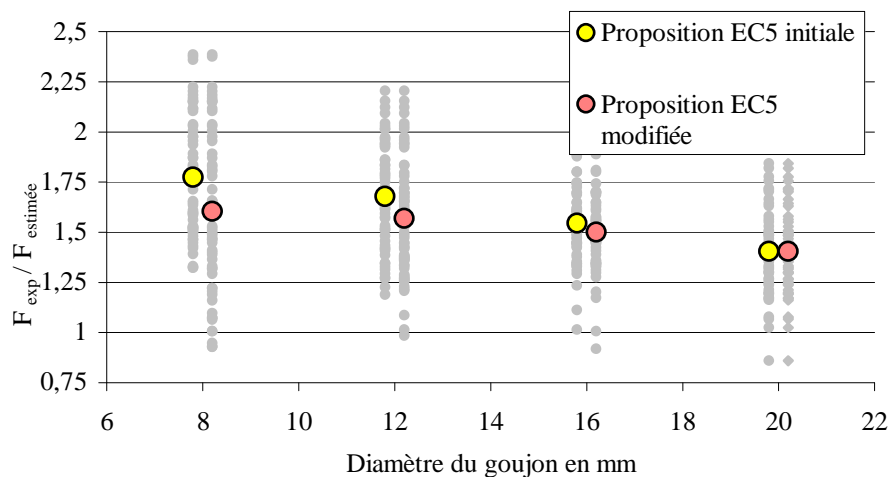


Fig. 68 : Confrontation des approches EC5 initiale et EC5 modifiée selon le diamètre du perçage

La fiabilité des prédictions n'est que légèrement améliorée mais celles-ci sont bien plus équitables. La formule reste plus précise dans le cas d'un diamètre de perçage de 21 mm. Les fluctuations observables au sein des résultats expérimentaux concernés peuvent s'avérer

une explication. Par ailleurs, la formulation modifiée propose cette fois ci une résistance caractéristique pour chacun des diamètres de perçage abordés. La représentativité de la formule est ainsi accrue.

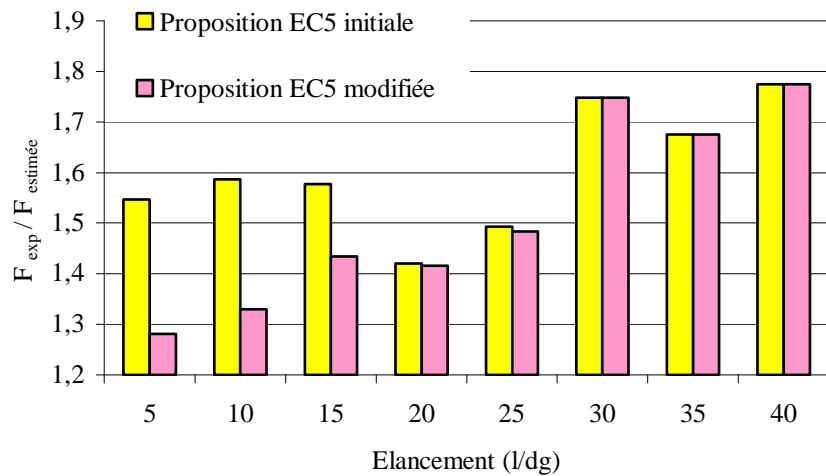


Fig. 69 : Confrontation des approches EC5 initiale et EC5 modifiée selon l'élancement du joint d'adhésif exprimée en valeur moyenne de F_{exp}/F_{dim}

La fiabilité des prédictions selon l'élancement du joint d'adhésif a également été abordée (Fig. 69). Les prédictions de l'approche EC5 modifiée sont plus fiables pour de petits élancements du joint d'adhésif (5 à 15). Cet aspect est particulièrement intéressant dans la mesure où c'est dans ce cas de figure qu'une rupture en cisaillement de l'interface adhésif/bois est la plus susceptible de se produire. En effet, pour de plus grands élancements (30 à 40), la rupture par plastification du goujon devient prépondérante.

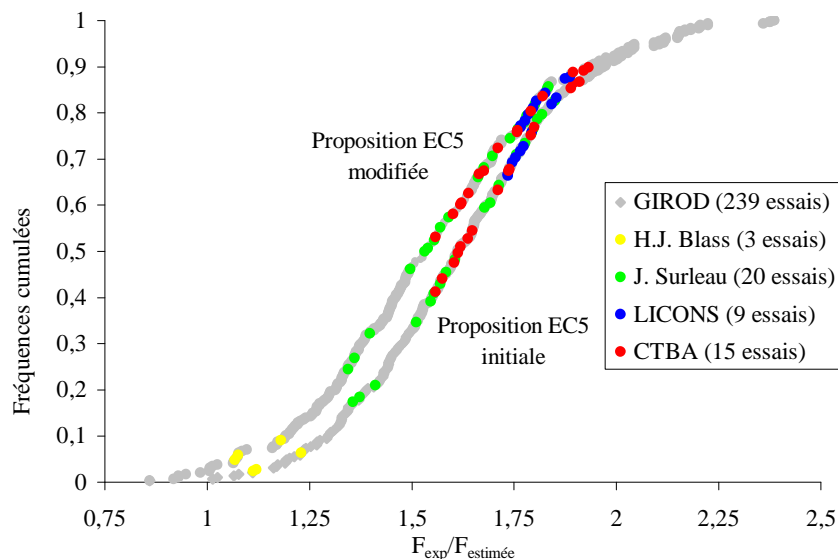


Fig. 70 : Comparaison en taux de probabilité des propositions EC5 et EC5 modifiée

L'intégration de l'effet du diamètre de perçage sur la résistance au cisaillement de l'interface adhésif/bois dans l'approche GIROD contribue ainsi à sa fiabilisation (Fig. 70).

PARTIE IV:
APPROCHE EXPERIMENTALE DES AUTRES CAS D'ASSEMBLAGE

Les travaux existants ou originaux évoqués jusqu'à présent concernent essentiellement les assemblages réalisés au moyen de goujons collés en acier. La majorité des résultats disponibles proviennent du projet européen GIROD qui s'est plus particulièrement penché sur les aspects scientifique et dimensionnement de ce type d'assemblage. Le projet européen LICONS ("Low Intrusive CONservation Systems for timber structures") a débuté quant à lui en 2002 et aborde toutes les étapes d'une intervention requérant l'emploi du collage structural: diagnostic, conception, réalisation, contrôle, suivi. Le "volet" conception se veut complémentaire des travaux d'ores et déjà réalisés dans GIROD. Les améliorations pouvant être apportées aux formules prédictives et de dimensionnement directement importées de GIROD ont été présentées en III.5. Une campagne expérimentale a par ailleurs été décidée afin d'explorer certains des aspects les moins abordés du domaine des assemblages collés.

Cette campagne expérimentale, modelée par les membres de LICONS en charge de l'aspect conception afin de répondre au mieux à la curiosité et aux interrogations de chacun, a été intégralement réalisée au LRBB (Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux). Les objectifs globaux sont les suivants :

- Enrichir la base de données en ce qui concerne les assemblages usant d'éléments de renfort en composite et comparer leurs performances, en terme de résistance mécanique, à ceux usant d'élément de renfort en acier.
- Tester des assemblages par plats collés afin d'établir la viabilité de ce type de composant en tant qu'élément de renfort et d'examiner leur mode de rupture.
- Soumettre les éléments de renfort à des conditions de chargement complètes c'est-à-dire simultanément à des efforts axiaux et latéraux.
- Vérifier l'opportunité de deux systèmes constructifs existants : le joint de continuité à la résine et la taille à 45° des deux éléments bois à assembler.

IV.1. MATERIEL ET METHODE

IV.1.1. Géométrie des assemblages testés

Deux géométries de référence ont été adoptées pour cette campagne expérimentale. Les éléments de renfort sont systématiquement disposés selon la direction parallèle au fil du bois. La première concerne les goujons collés alors que la seconde s'intéresse aux plats collés. Elles sont représentées Fig. 71 et Fig. 72.

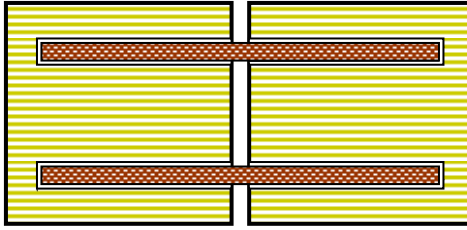


Fig. 71 : Assemblage par goujons collés

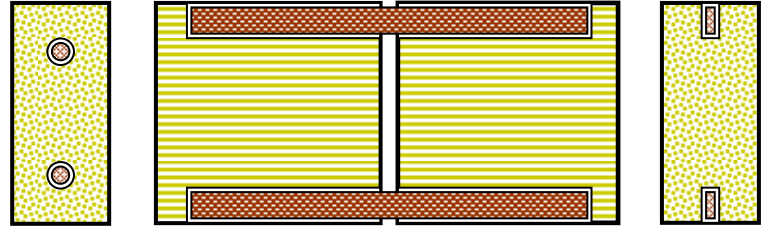


Fig. 72 : Assemblage par plats collés

Les principaux paramètres géométriques de l'assemblage sont maintenus constants durant toute la campagne expérimentale. Ils sont regroupés dans Tab. 29.

Tab. 29 : Caractéristiques géométriques des assemblages testés

| Goujons collés | | | Bois | Plats collés | | |
|--------------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| Longueur d'ancrage | Diamètre goujon | Diamètre perçage | section | Longueur d'ancrage | Section plat | Section saignée |
| mm | mm | mm | mm ² | mm | mm ² | mm ² |
| 180 | 16 | 22 | 90 X 200 | 180 | 4,5 X 28 | 10 X 30 |

Ces assemblages de référence ont été dimensionnés de manière à ce que les goujons et les plats collés présentent des interfaces adhésif/bois de surfaces comparables (12600 mm²)

En ce qui concerne les goujons collés, l'entraxe est de 120 mm soit $7,5d_g$ et la distance à l'arête la plus proche de l'élément est de 40 mm. En se reportant aux règles de pinces du Guide Professionnel (rapportées en II.4.4), il apparaît que les préconisations de celui-ci ne sont pas respectées en ce qui concerne la distance "a₆" (Fig. 15). L'assemblage serait ainsi jugé inapte dans le cas où le chargement appliqué au goujon aurait une composante latérale.

Il est possible d'observer Fig. 71 et Fig. 72 la préservation d'un espace de 5 mm entre les deux éléments bois assemblés. Cet espace ne relève pas d'une quelconque exigence de mise en œuvre mais a été volontairement imposé de manière à éviter tout contact entre les deux éléments bois lors de l'essai. Le chargement imposé à l'élément bois réparé est dès lors intégralement transmis par les éléments de renfort via le joint d'adhésif. La résistance obtenue est ainsi dépourvue d'un certain nombre d'effets parasites et devient propre à l'assemblage.

Les objectifs initiaux ont exigé la réalisation d'assemblages dérivés des deux géométries de référence. La taille à 45°, en dehors de toute considération esthétique, présente un certain intérêt pour une zone d'assemblage soumise à un effort tranchant c'est-à-dire dans le cas de plats et goujons chargés latéralement. Pour que cet apport soit effectif, par comparaison à un assemblage classique à 90°, les deux parties d'élément doivent impérativement être en contact afin de participer activement à la transmission des efforts. Il a ainsi été jugé opportun, dans le cas d'un chargement complet, de rétablir le contact entre les deux parties d'élément bois (Fig. 73 et Fig. 75) afin de permettre une comparaison directe entre assemblage à 45° et à 90°. En ce qui concerne l'étude de la viabilité d'un raccord complémentaire à la résine, certains assemblages de référence (Fig. 71) ont été réalisés de

manière à ce que l'espace initialement réservé entre les deux parties d'élément soit comblé d'adhésif (Fig. 74).

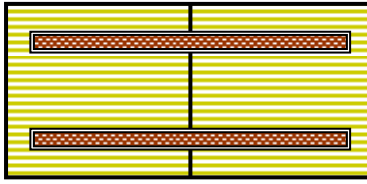


Fig. 73 : 90° et sans espace

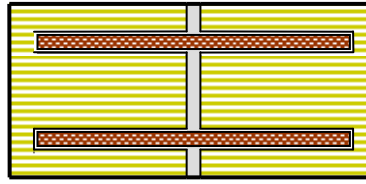


Fig. 74 : espace rempli d'adhésif

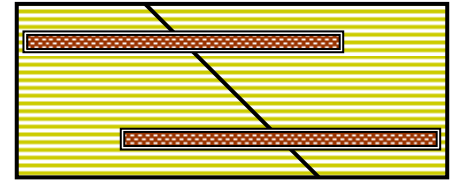


Fig. 75 : 45° et sans espace

L'emploi de plats relativement fins a débouché sur la réalisation de jonctions relativement souples. Les risques de détérioration de l'assemblage durant les étapes de manutention, transport et expérimentation ont conduit au rajout de quelques éprouvettes munies d'assemblages bien plus rigides à quatre plats. La distance entre deux plats juxtaposés a dès lors été fixée à 40 mm.

IV.1.2. Matériaux employés

L'ensemble des éprouvettes testées a été réalisé par l'entreprise galloise Rotafix[®] Ltd, membre actif du projet LICONS, fabricante d'adhésif de son état et conseillère en réparation et renforcement à la résine des structures anciennes en bois.

En ce qui concerne le bois, la totalité des éléments a été réalisée à partir de lamellé-collé GL28c qui constitue le standard en Grande Bretagne ! Pour cette section, les éléments sont composés de six lamelles de 34 mm. Les deux lamelles externes sont en épicéa de classe C32. Les quatre lamelles internes en épicéa de classe C24. Il en résulte, compte tenu des géométries de référence adoptées, que plats et goujons collés ont été insérés dans des lamelles de classes différentes.

En ce qui concerne l'adhésif, la grande majorité des éléments a été réalisée avec une époxy fragile : Rotafix Timberset[®]. Quelques assemblages complémentaires ont été réalisés, sur la demande de l'entreprise Rotafix[®], avec une époxy ductile à bas module d'élasticité : Rotafix CB10Tss[®]. En ce qui concerne les goujons collés, l'adhésif a été introduit dans l'assemblage, après centrage de la tige et maintien des deux demi poutres, par des cheminées d'injection pré percées. En ce qui concerne les plats collés, le remplissage de la saignée a précédé l'introduction de l'élément de renfort.

Les goujons métalliques sont prélevés de tiges d'acier torsadé (nuance 8,8, 800 MPa). Les goujons composites sont issus de tiges de Fulcrum[®], une pultrusion de fibres de verre unidirectionnelles noyées dans une matrice polyuréthane (Tab. 5). Pour les premiers, le centrage est effectué par la pratique, au fond du perçage initial, d'un trou supplémentaire peu profond et de diamètre identique à celui du goujon. Les seconds sont percés diamétralement de manière à accueillir des barrettes synthétiques, de longueurs égales au diamètre du perçage, et qui, émergeant à l'identique de part et d'autre du goujon, servent de guide lors de son introduction.

Dès leur arrivée, ces éprouvettes ont été stockées sous abri ($T \approx 20^\circ\text{C}$, $\text{HR} \approx 65\%$). La teneur en eau atteinte par le bois est ainsi de l'ordre de 12 %.

IV.1.3. Les essais réalisés

Un premier lot de trente trois poutres a été testé en flexion quatre points selon la configuration d'essai décrite Fig. 76 et Fig. 77. L'assemblage est situé à mi-portée de l'éprouvette. Il a été expérimentalement démontré par J. Surleau [14] que, dans le cas de goujons collés, ces conditions d'essai conduisent à un chargement exclusivement axial des tiges. Le goujon supérieur est sollicité en compression alors que le goujon inférieur est sollicité en traction. L'effort axial transmis par chacun peut être estimé en utilisant la relation suivante :

$$F = \frac{M}{a_2} = \frac{900P}{120}$$

Eq. 106

En ce qui concerne les plats collés, aucune comparaison n'a été effectuée entre les résistances expérimentales obtenues en configuration Pull-Pull et en flexion quatre points. La hauteur des plats est cependant bien plus significative que le diamètre des goujons par rapport aux dimensions et plus particulièrement à la hauteur de l'élément bois. Un gradient non négligeable des contraintes de traction est ainsi soupçonné selon la hauteur du plat. La formule précédente (Eq. 106) n'apparaît ainsi directement applicable que dans le cas de plats de faibles hauteurs. Dans les autres cas, le paramètre a_2 doit être réévalué en tenant compte de la position exacte de la résultante des efforts axiaux dans l'élément de renfort.

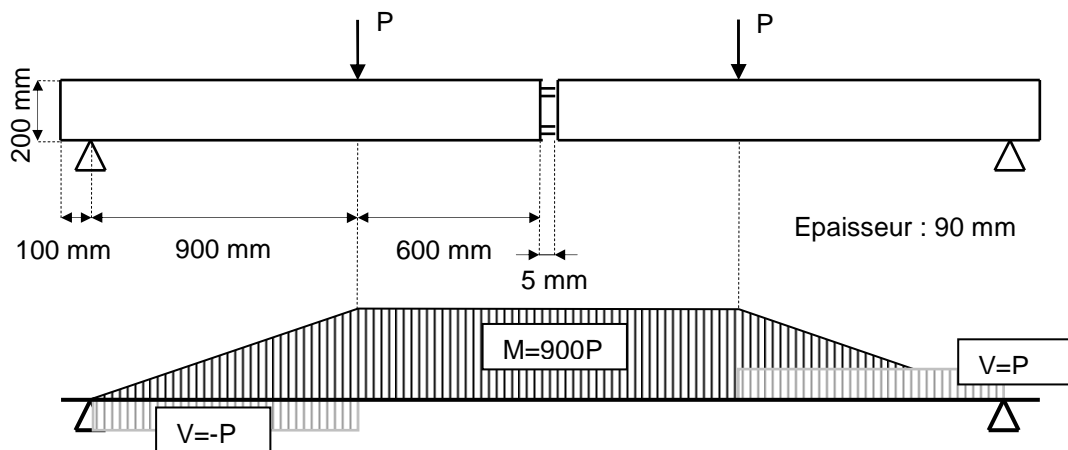


Fig. 76 : Configuration de l'essai de flexion quatre points



Fig. 77 : Essai de flexion quatre points

Un second lot de vingt sept poutres a été testé en flexion trois points selon la configuration d'essai décrite Fig. 78 et Fig. 79. L'assemblage est situé à 300 mm de l'appui. Une incompatibilité entre la géométrie des éprouvettes et celle du bâti d'essai, née d'une incompréhension entre les partenaires LICONS en charge de la conception de cette campagne expérimentale, a induit que le chargement n'a pu être appliqué à mi portée de la poutre. Il a finalement été choisi d'appliquer celui-ci au tiers de l'éprouvette. La zone d'assemblage est simultanément soumise à un moment fléchissant, qui conduit à un chargement axial des éléments de renfort, et à un effort tranchant, qui ajoute un chargement latéral sur ces mêmes éléments. Que l'assemblage soit positionné d'un côté ou de l'autre de l'effort appliqué, il est remarquable que le ratio entre moment de flexion et effort tranchant reste théoriquement constant. Cette remarque est d'importance dans la mesure où les assemblages à 45° et à 90° n'ont pu, pour des raisons qui seront évoquées par la suite, être testés dans la même position.

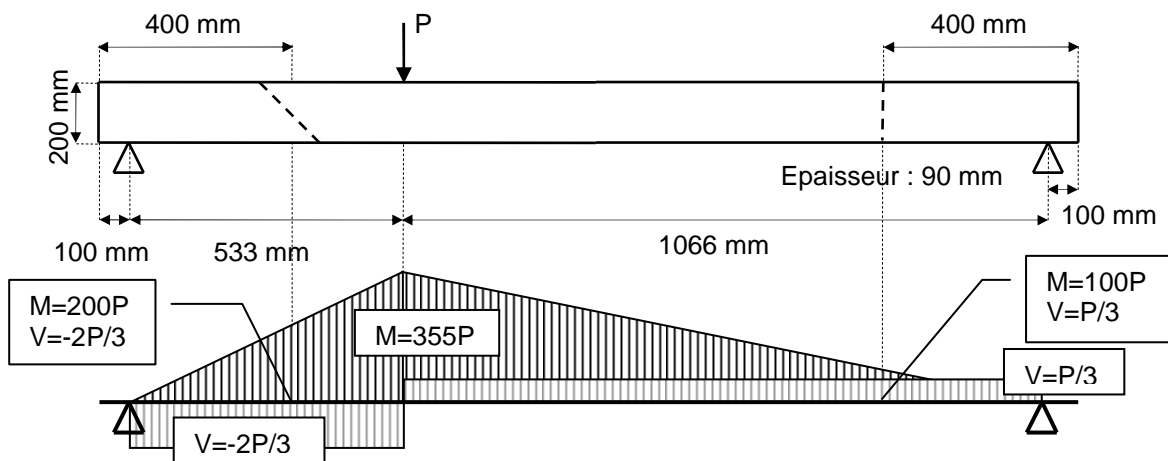


Fig. 78 : Configuration de l'essai de flexion trois points



Fig. 79 : Essai de flexion trois points

IV.1.4. Machine d'essai et dispositifs de mesure

a) *Machine d'essai*

Les essais ont été réalisés au moyen d'une presse hydraulique (Fig. 80) dont la capacité théorique est de 100000 N mais dont la limite d'utilisation a été fixée à 70000 N. Les essais ont été réalisés à une force imposée de 85 N/s. Le chargement est appliqué linéairement jusqu'à la rupture de l'élément.



Fig. 80 : Presse hydraulique utilisée pour la campagne expérimentale

b) Dispositifs de mesure

Le chargement appliqué est contrôlé par un capteur de force d'une capacité de 100000 N. Celui-ci a été étalonné de manière à ce que sa précision soit maximale aux alentours de 30000 N.

Les essais réalisés sur des éprouvettes en bois de dimensions structurales débouchent très souvent sur des ruptures soudaines et violentes. L'emploi de capteurs de déplacement de type L.V.D.T., très précis mais également très coûteux, apparaît ainsi déraisonnable pour ce type d'essai. Il en est de même en ce qui concerne le suivi des structures anciennes en bois. Un tel appareillage ne peut être abandonné sur site de façon durable. En plus d'attirer les convoitises, une exposition prolongée à des conditions environnementales extrêmes ou variables pourrait s'avérer néfaste au bon fonctionnement et par conséquent aux bonnes performances de ce type de capteur. Il est par ailleurs nécessaire de s'interroger quant au degré de précision requis afin de rendre les mesures exploitables. Cette non adaptabilité des instruments de mesure usuels à une utilisation en génie civil bois a suscité le développement, au LRBB, d'une génération de capteurs potentiométriques. Le début de la campagne expérimentale LICONS ayant coïncidé avec la validation des premiers prototypes de mesure, celle-ci a servi comme support de première mise en œuvre et d'évaluation de certains de ces capteurs. Ils ont depuis été employés avec succès et à des fins diverses [54].

c) Les capteurs potentiométriques développés

Les capteurs développés sont de deux types : potentiomètres rotatifs et potentiomètres linéaires. Ils permettent l'évaluation des déplacements selon une direction unique préétablie.

Les premiers sont issus de la gamme Sfernice / Vishay®. La tension qu'ils transmettent est directement dépendante du degré de rotation de leur axe. Le dispositif de mesure est expliqué Fig. 81. Un fil est fixé d'une part à l'éprouvette (point B), susceptible d'admettre un déplacement, d'autre part à l'extrémité d'un ressort dont l'extrémité opposée reste fixe (point A) dans un référentiel absolu. Il est en outre accroché et enroulé autour d'une bobine solidaire de l'axe du potentiomètre. Le potentiomètre reste également immobile dans ce dernier référentiel absolu. Les tresses d'acier usuellement employées pour la pêche des carnassiers, souples et inextensibles, ont été jugées les mieux adaptées pour cette application. Le fil est constamment maintenu tendu par le ressort. Un déplacement du point B entraîne ainsi la rotation de la bobine qui suit le mouvement du fil et qui entraîne à son tour l'axe du potentiomètre. La variation de tension électrique constatée au niveau du potentiomètre permet d'estimer la rotation de son axe et d'en déduire, grâce à un étalonnage antérieur, la longueur de fil (dé)bobinée. Cette longueur correspond au déplacement du point B selon l'axe du fil. La précision de ce dispositif est estimée à $\pm 0,1$ mm.

Ce type de capteur n'est pas inédit au LRBB. Il avait d'ores et déjà été employé par J. Surleau [14] lors de vastes campagnes de durée de vie. Il en existe également des versions plus modernes dans le commerce. Ils sont principalement employés pour des mesures de flèche.

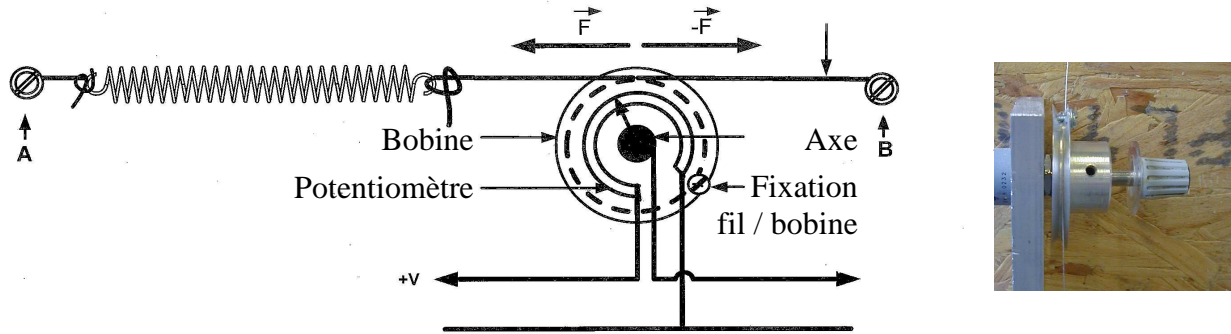


Fig. 81 : Schéma de principe d'un potentiomètre rotatif

Les seconds sont issus de la gamme Mégatron[®]. La tension électrique qu'ils transmettent est directement dépendante du degré de translation de leur axe. Les capteurs utilisés ont une course de 10 mm (type MM10). Ils sont équipés d'un ressort et d'une pastille de manière à ce que leur axe soit toujours sorti au maximum (Fig. 82). Ils sont, en position initiale, utilisés en association avec une butée. Le déplacement mesuré est relatif si capteur et butée sont mobiles. Il est absolu dans le cas où l'un des deux est fixe. Le déplacement de l'axe correspond au déplacement entre le capteur et la butée. Il peut être déterminé par un examen des variations de la tension électrique transmise par le potentiomètre. La précision atteinte a été estimée à $\pm 0,01$ mm.

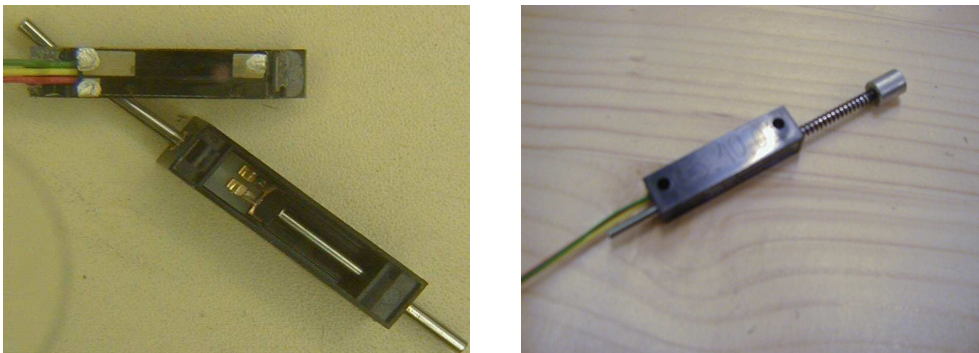


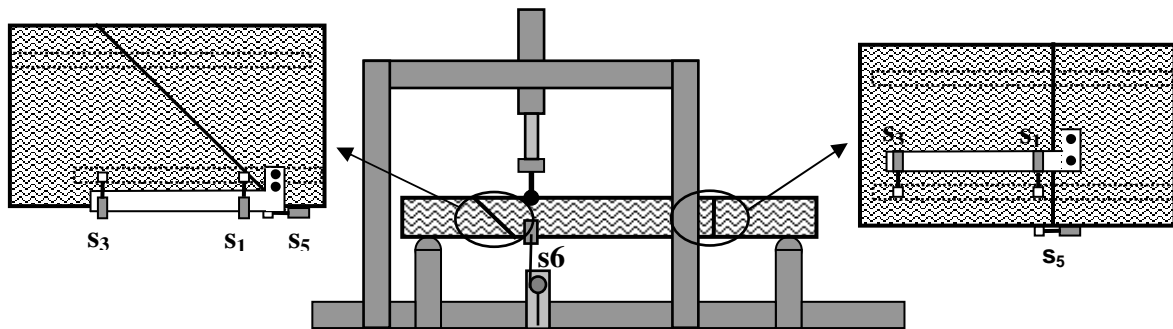
Fig. 82 : Potentiomètre linéaire, état initial (gauche) et équipé (droite)

Outre leur intégration dans un dispositif de mesure, les problèmes inhérents à l'étalonnage et au câblage de ces potentiomètres ont été soulevés durant la préparation de ces essais. L'élaboration, la mise au point et le paramétrage du programme d'acquisition, réalisé sous Labview, fut également de longue haleine. La campagne expérimentale LICONS fut néanmoins un tremplin pour cette nouvelle vision de la mesure en génie civil bois dont l'originalité n'a d'égale que celle de son inspirateur.

d) *Disposition des capteurs potentiométriques*

Chaque éprouvette testée a été équipée du potentiomètre à fil (s_6) en vue de mesurer sa flèche au cours de l'essai et d'en déduire sa rigidité. Pour les essais de flexion quatre points, il est disposé à mi-portée de l'élément bois. Pour les essais de flexion trois points, il est disposé au niveau du point d'application du chargement.

Les potentiomètres linéaires ont été employés afin d'évaluer l'intérêt des assemblages à 45° par rapport à ceux plus classiques à 90°. Les éprouvettes assemblées au moyen de goujons composites collés ont servi de support à cette comparaison. Les dix poutres correspondantes ont été équipées de cinq capteurs potentiométriques. Deux capteurs, disposés de part et d'autre de l'élément, mesurent le déplacement relatif entre les deux sections en contact au niveau de l'assemblage (s_1 et s_2). Deux autres sont placés plus en avant de la jonction et permettent d'estimer la rotation globale de la zone d'assemblage (s_3 et s_4). Le dernier capteur est fixé en dessous de l'élément, à mi-épaisseur, et vise à chiffrer l'ouverture de l'assemblage (s_5).



s_2 et s_4 sont disposés sur la face opposée de la poutre et correspondent respectivement à s_1 et s_3

Fig. 83 : Disposition des capteurs potentiométriques dans le cas d'un essai de flexion trois points

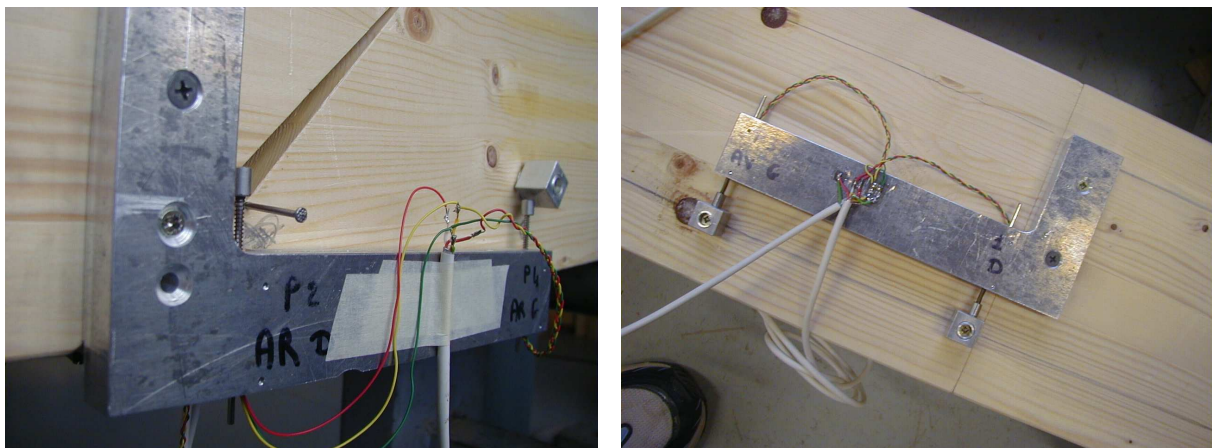


Fig. 84 : Disposition des potentiomètres linéaires

IV.2. CHARGES, DEPLACEMENTS ET MODES DE RUPTURE

IV.2.1. Un positionnement différent selon l'angle de réalisation de l'assemblage

En ce qui concerne l'essai de flexion trois points, il était initialement prévu de positionner l'assemblage à bonne distance de l'effort appliqué. Ce dernier étant excentré, les

premiers assemblages testés, tous à 90° et issus de différents lots, ont tout naturellement été disposés à proximité de l'appui le plus lointain (à droite sur Fig. 78). Un dilemme est survenu lorsque le premier essai mené sur une poutre présentant un assemblage à 45° n'a pu être mené à son terme. La capacité maximale de la presse (70000N) a en effet été atteinte avant même que l'élément ne laisse apparaître le moindre signe de faiblesse.

Un renversement de la poutre, dans le cas d'assemblage à 45° , a été jugé comme étant la solution la moins pénalisante pour plusieurs raisons.

- Il n'a pas été jugé opportun de repousser les limites de la machine d'essai et donc de risquer de porter atteinte à son bon fonctionnement. Il n'était pas certain que le surplus de charge imposé conduise à la rupture de l'éprouvette testée et, le cas échéant, que cette rupture ait bien lieu dans la zone d'assemblage.
- Il a été considéré préférable que les charges de rupture, quelque soit l'angle à la jonction des deux parties de l'élément, appartiennent toutes à la gamme de précision pour laquelle est étalonnée le capteur et ne soient pas déduites d'étalonnages différents.
- Il a été vérifié expérimentalement d'une part (Tab. 32) puis par un calcul RDM d'autre part (Tab. 37) que la position de l'assemblage n'influe pas sur la rigidité de la poutre. Les mesures de flèche sont par conséquent comparables quelque soit la position de l'assemblage lors de l'essai.

La principale interrogation réside ainsi en la proximité de la charge appliquée par rapport à l'assemblage. L'extrémité du goujon inférieur, pour un assemblage à 45° , se retrouve en effet sous le point d'application du chargement. H.J. Blass, par comparaison, s'est efforcé de respecter une distance de $2H$ (II.3.6) pour s'affranchir de cette incertitude. Le CTBA n'y a pas prêté attention et a également appliqué la charge directement en arrière d'assemblage (II.3.1).

Ce changement de position de l'assemblage rend non significative la notion de charge ultime si bien que celle-ci sera systématiquement décomposée en un moment ultime M_u et en un effort tranchant ultime V_u à la rupture.


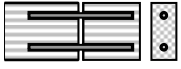





IV.2.2. Charges et flèches à la rupture

Le calcul d'un coefficient de variation n'a été jugé opportun que pour les lots de plus de cinq échantillons. Il est indiqué en pourcent et entre parenthèses directement après la mesure concernée.

a) Résultats des essais de flexion quatre points

La totalité des échantillons a rompu au niveau de l'adhésif ou de l'une de ses interfaces. Dans Tab. 30, les abréviations adh/bois, gouj/adh et plat/adh signifient respectivement adhésif/bois, goujon/adhésif et plat/adhésif. Les ruptures affectant partiellement les deux interfaces sont regroupées sous l'appellation de rupture mixte.

Tab. 30 : Résultats des essais de flexion quatre points

| Configurations d'assemblage | Bois | Espace 5 mm | n | M _u en N.mm | Flèche ultime : y _u en mm | Interface rompue |
|--|---|------------------|---|---------------------------------|--------------------------------------|---|
| | Adhésif | | | | | |
| | Goujon/Plats | | | | | |
|  (Licons1) | GL28c Timberset [®] acier | oui | 9 | 10,7.10 ⁶ (2,3 %) | 18,9 (11,4 %) | adh/bois (7) mixte (2) |
|  (Licons2) | GL28c Timberset [®] Fulcrum [®] | oui | 6 | 7,7.10 ⁶ (5,0 %) | 19,0 (8,5 %) | adh/bois (1) mixte (3) gouj/adh (2) |
|  (Licons3) | GL28c Timberset [®] Fulcrum [®] | Comblé d'adhésif | 3 | 8,0.10 ⁶ | 15,5 | gouj/adh (3)* |
|  (Licons4) | GL28c Timberset [®] Fulcrum [®] | non | 3 | 8,7.10 ⁶ | 18,7 | mixte (1) gouj/adh (2) |
|  (Licons5) | GL28c Timberset [®] Fulcrum [®] | oui | 4 | 4,8.10 ⁶ | 12,0 | plat/adh (4) |
|  (Licons6) | GL28c Timberset [®] Fulcrum [®] | oui | 5 | 9,9.10 ⁶ (3,6 %) | 17,4 (9,1 %) | plat/adh (5) |
|  (Licons7) | GL28c CB10Tss [®] Fulcrum [®] | oui | 3 | 6,2.10 ⁶ | 15,3 | plat/adh (3) |

*Compléments d'information en IV.3.5

Les ruptures constatées sont toutes de type fragile (Fig. 85).

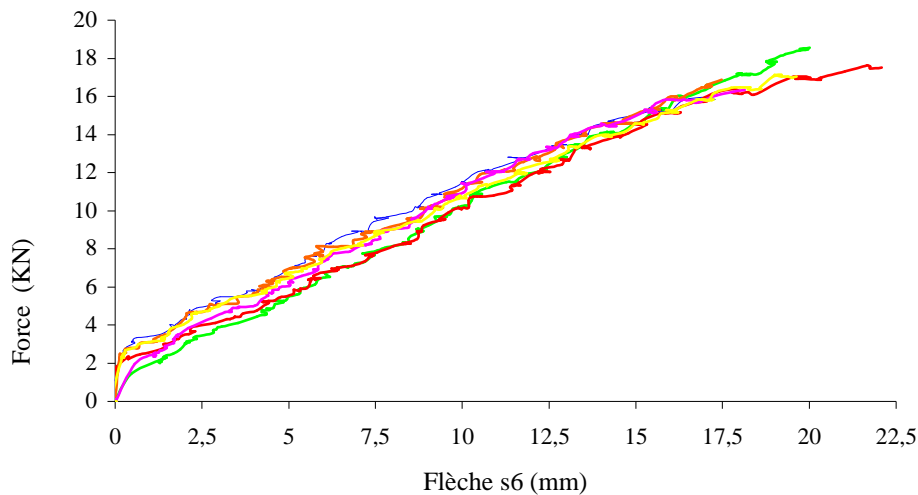









Fig. 85 : Courbes Force/Déplacement pour les éprouvettes du lot "Licons2"

Pour les lots de petite taille (inférieure à cinq éprouvettes), les résultats obtenus ne présentent également qu'une très faible dispersion.

b) Résultats des essais de flexion trois points

Tab. 31 : Résultats des essais de flexion trois points

| Configurations d'assemblage | Bois | Espace 5 mm | n | M_u en N.mm V_u en N | flèche ultime : y_u en mm | Modes de rupture |
|---|---------------------------------|-------------|---|--------------------------------------|-----------------------------|---|
| | Adhésif Goujon/Plats | | | | | |
|  (Licons8) | GL28c Timberset® Fulcrum® | non | 5 | $4,5 \cdot 10^6$ 15080 (5,8 %) | 7,7 (11,2%) | fissuration bois |
|  (Licons9) | GL28c Timberset® Acier | non | 3 | $7,9 \cdot 10^6$ -26430 | 7,0 | adh/bois (2) gouj/adh (1) |
|  (Licons10) | GL28c Timberset® Fulcrum® | non | 6 | $7,3 \cdot 10^6$ -24410 (5,1%) | 8,3 (12,9%) | adh/bois (2) mixte (1) gouj/adh (3) |
|  (Licons11) | GL28c Timberset® Fulcrum® | non | 4 | $5,1 \cdot 10^6$ -16970 | 5,8 | plat/adh |
|  (Licons12) | GL28c Timberset® Fulcrum® | non | 3 | $8,0 \cdot 10^6$ -26570 | 8,0 | Plat/adh |
|  (Licons13) | GL28c Timberset® Fulcrum® | non | 3 | $4,4 \cdot 10^6$ 14790 | 6,9 | fissuration bois |
|  (Licons14) | GL28c CB10tss® Fulcrum® | non | 3 | $4,0 \cdot 10^6$ 13610 | 6,4 | fissuration bois |

Les ruptures constatées sont à nouveau toutes de nature fragile (Fig. 86).

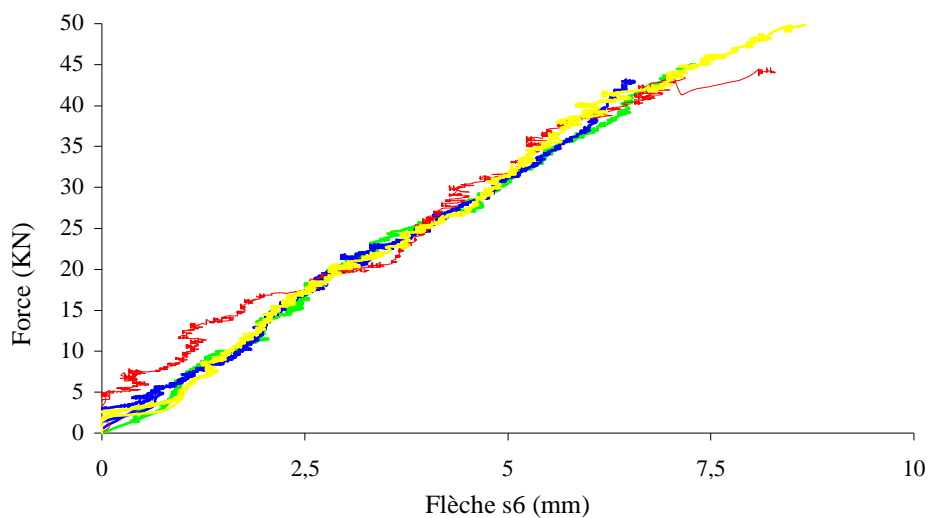


Fig. 86 : Courbes Force/Déplacement pour les éprouvettes du lot "Licons8"

Ici encore, pour les lots de petite taille (inférieure à cinq éprouvettes), les résultats obtenus ne présentent qu'une très faible dispersion.

Les éprouvettes du lot Licons 9, présentant un assemblage très rigide car réalisé au moyen de goujons en acier, ont été choisies afin de vérifier qu'un retournement de la poutre lors de l'essai n'influe que très peu sur sa rigidité. Les spécimens du lot ont ainsi été testés en deux temps. Un premier essai non destructif avec positionnement de l'assemblage près de l'appui le plus éloigné du chargement (à droite Fig. 78). Un deuxième essai destructif avec l'assemblage à proximité immédiate du chargement (à gauche Fig. 78). Les rigidités mesurées sont résumées Tab. 32.

Tab. 32 : Rigidité des spécimens du lot Licons9 selon la position de l'assemblage

| Position de l'assemblage | Rigidité expérimentale |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| À droite de la charge sur Fig. 78 | $y_u/P_u = 17,7.10^{-5}$ mm/N |
| À gauche de la charge sur Fig. 78 | $y_u/P_u = 16,8.10^{-5}$ mm/N |

Il est vérifié expérimentalement que la position de l'assemblage n'a que peu d'influence sur la rigidité de l'élément.

IV.2.3. Modes de rupture

a) Essais de flexion quatre points

La totalité des échantillons a présenté une rupture par cisaillement au niveau de l'adhésif ou de l'une de ses interfaces. Certaines ruptures ont affecté simultanément les deux interfaces.

Les assemblages utilisant les goujons en acier ont essentiellement rompu par cisaillement au niveau de l'interface adhésif/bois (R2). Des amas de fibres ligneuses, d'épaisseur variable, étaient systématiquement présents à la surface du cylindre d'adhésif extrait. Cette rupture, à l'interphase mais plutôt côté bois (Fig. 87a), intervient au niveau du matériau le plus faible en cisaillement de l'assemblage. Le moment ultime observé est ainsi le moment maximal admissible par l'assemblage pour la géométrie testée.

Les assemblages utilisant des matériaux composites ont essentiellement rompu par cisaillement au niveau de l'interface composite/adhésif (Fig. 87b et Fig. 87c). Le bois, le matériau le plus faible en cisaillement de l'assemblage, n'étant pas mis en jeu lors de la rupture, le moment ultime obtenu ne semble pas être la limite haute des performances de cette géométrie d'assemblage. Le grand nombre de ruptures mixtes constatées (Fig. 87d) permet néanmoins de penser que celui-ci n'est pas très éloigné du moment maximal admissible pour ce cas particulier d'assemblage.



Fig. 87 : Modes de rupture observés durant les essais de flexion quatre points

En ce qui concerne le lot “Licons3”, où l’espace entre les deux éléments est comblé d’adhésif, un mode de rupture en deux temps est observé. Un décollement par traction perpendiculaire au plan de collage se produit tout d’abord entre le bloc d’adhésif et l’une des deux demi poutres (Fig. 88). Cette première fissuration ne conduit pas à la ruine de l’élément mais engendre une soudaine perte de rigidité de celui-ci. La rupture intervient finalement à un niveau de charge plus élevé par cisaillement de l’interface composite/adhésif.

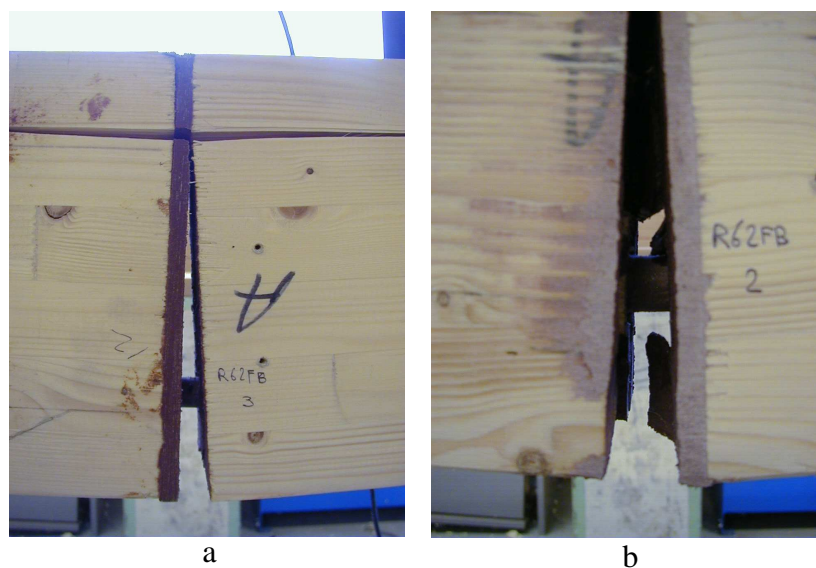


Fig. 88 : Rupture d’un assemblage jointé par un bloc d’adhésif

b) Essais de flexion trois points

Les essais de flexion trois points mettent en jeu deux géométries différentes d'assemblage : les jonctions à 45° et les jonctions à 90°. A ces deux géométries correspondent deux modes de rupture.

Les assemblages classiques à 90° ont tous rompu par fissuration du bois au départ de la zone d'assemblage.

En ce qui concerne les assemblages par goujons collés, la fissuration s'initie de part et d'autre des tiges (Fig. 89). Si le mode de rupture observé rappelle bien celui des poutres entaillées, la correspondance évoquée en II.4.3 s'avère dans ce cas de figure erronée. La fissuration ne s'initie pas en effet depuis le goujon attendu mais depuis son acolyte. Deux explications sont envisageables.

- Cette correspondance n'est pas applicable car les assemblages réalisés ne respectent pas les règles de pinces préconisées en particulier en ce qui concerne la distance "a₆" (II.4.4).
- Le contact bois/bois, à la jonction des deux éléments, est particulièrement intense au niveau de la zone comprimée et interfère avec les modes de fissuration du bois.

Ce mode de fissuration a néanmoins déjà été relevé par J.L. Jensen [55]. Il est ainsi possible que cette ambiguïté provienne d'une erreur au sein de la correspondance préconisée.

En ce qui concerne les assemblages par plats collés, le mode de rupture est similaire à ceci près que la fissuration s'initie en fond de saignée (Fig. 90).

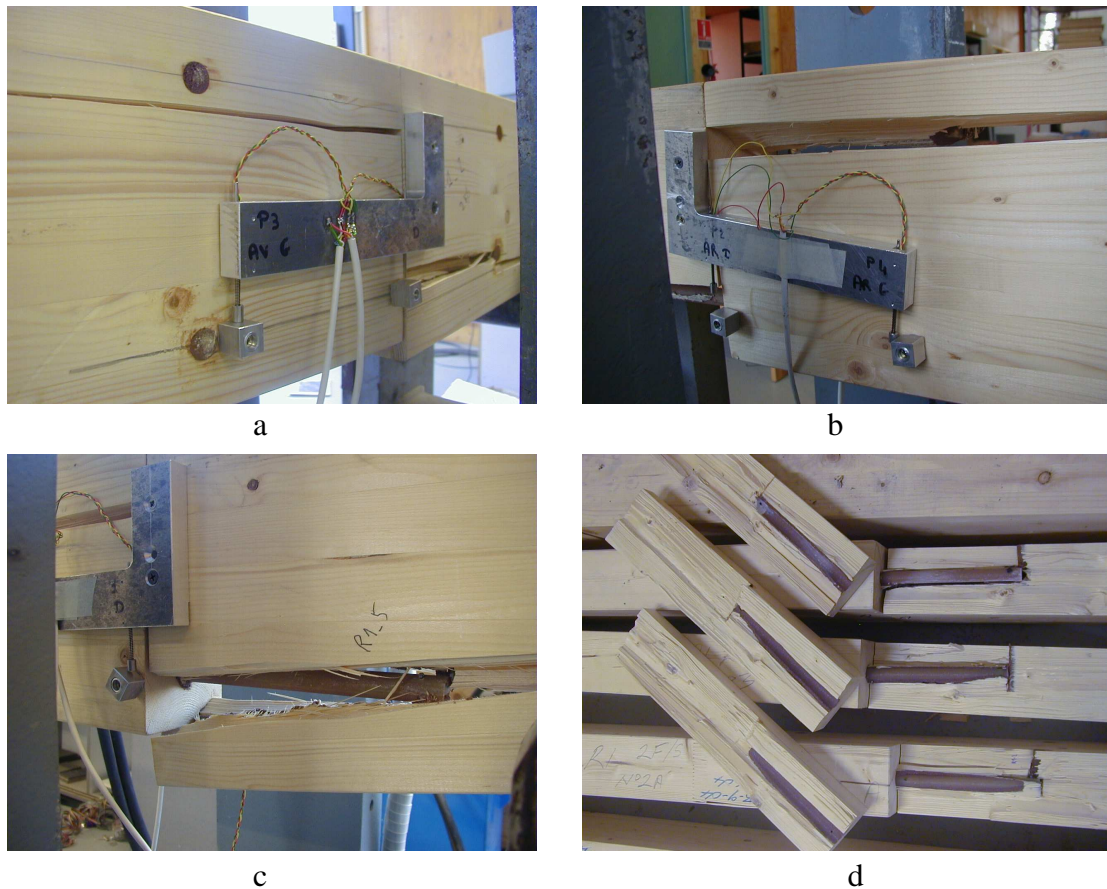


Fig. 89 : Fissuration du bois pour des goujons collés



Fig. 90 : Fissuration du bois pour des plats collés

Les assemblages à 45° testés en flexion trois points ont rompu de la même manière que les assemblages à 90° correspondant testés en flexion quatre points. La rupture intervient à nouveau par cisaillement d'une interface. L'interface composite/adhésif est plus particulièrement concernée dans le cas de connecteurs composites. Le lot "Licons9", regroupant quant à lui des assemblages réalisés au moyen de goujons en acier, présente des ruptures intervenant au niveau de l'interface adhésif/bois. Ces modes de rupture sont illustrés Fig. 91.

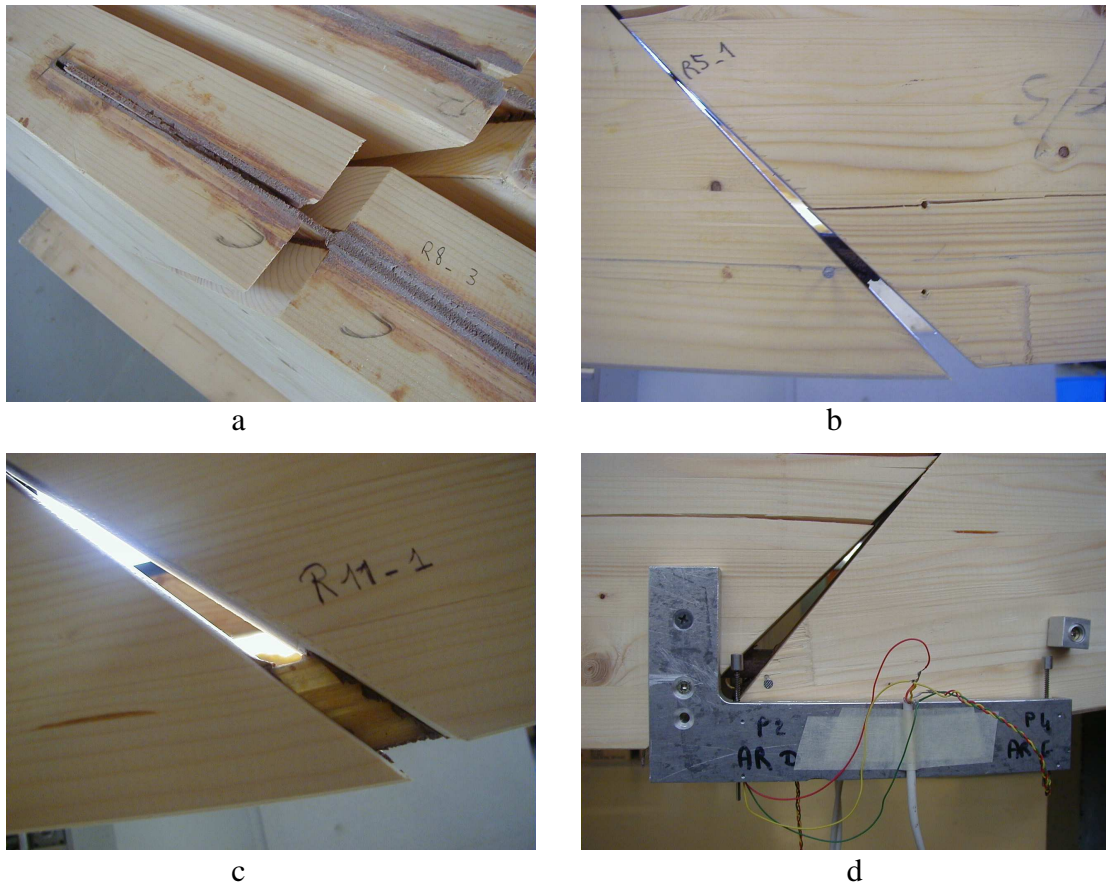


Fig. 91 : Ruptures observées pour les assemblages à 45°

IV.2.4. Déplacements dans la zone d'assemblage

a) Intérêt de capteurs économiques

Les ruptures soudaines observées pour les assemblages à 90° testés en flexion trois points (Fig. 89 et Fig. 90) valident à elles seules l'emploi de capteurs de déplacement à la fois fiables et économiques. Certains de ces capteurs, particulièrement exposés, ont été fortement détériorés au cours de la campagne expérimentale et ont dû être remplacés. Les automatismes acquis durant la phase de prototypage, en ce qui concerne l'étalonnage des capteurs, leur câblage et le paramétrage du programme d'acquisition, ont permis une immobilisation minimale de la machine d'essai durant les réparations. Les principales causes de détérioration des capteurs sont illustrées Fig. 92. Leur mise hors service résulte principalement d'un gauchissement plus ou moins prononcé de leur axe.

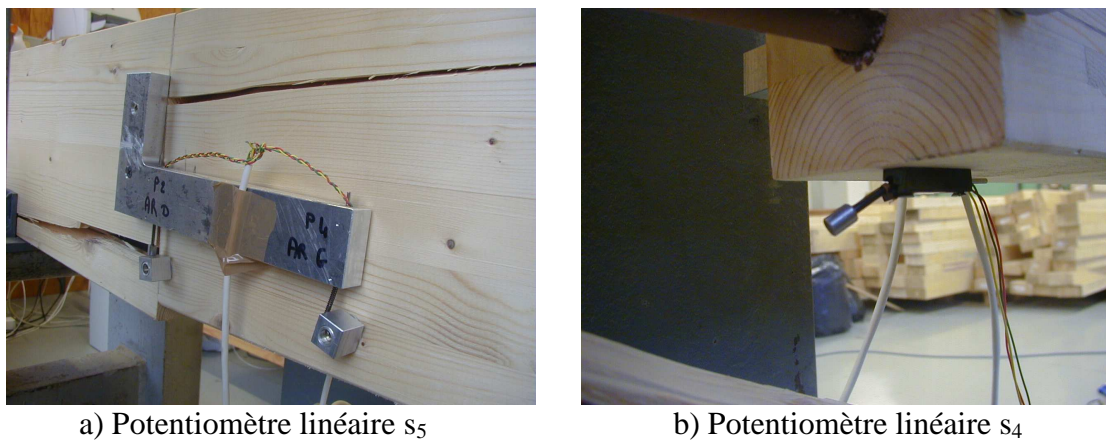




Fig. 92 : Intérêt d'un dispositif de mesure économique

b) Déplacements mesurés

Les déplacements mesurés à la rupture par les potentiomètres figurent Tab. 33. Les mesures s_{12} et s_{34} présentées sont respectivement issues d'une moyenne des acquisitions de s_1 et s_2 et de celles de s_3 et s_4 . Des courbes représentatives des déplacements selon la charge appliquée sont fournies dans [56].

Tab. 33 : Mesures des capteurs potentiométriques

| Configurations d'assemblage | |  |  |
|-----------------------------|----------|---|---|
| Matériaux | | GL28c, Timberset [®] , goujons Fulcrum [®] | |
| Nombre d'échantillons | | 5 | 6 |
| Déplacements mesurés en mm | s_{12} | 1,59 (28,3 %) | 0,99 (25,9%) |
| | s_{34} | 0,82 (43,3 %) | 4,03 (14,9 %) |
| | s_5 | 0,85 (10,2 %) | 2,07 (11,6 %) |
| | s_6 | 7,7 (11,2 %) | 8,3 (12,9 %) |

IV.3. EXPLOITATION DES RESULTATS

IV.3.1. Rigidités des poutres réparées

La rigidité en flexion de la zone d'assemblage peut être calculée en considérant celle-ci comme un matériau composite multicouche (Fig. 93). La relation suivante, issue de D. Gay [57] ou J. Malzbender [58], est destinée à cet effet (Eq. 107).

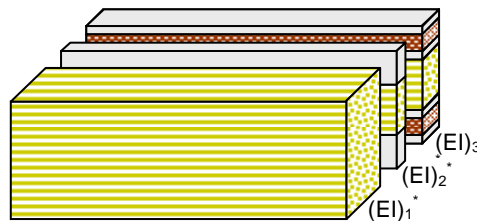


Fig. 93 : Zone d'assemblage prise comme un matériau multicouche

$$(EI)_k^* = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n E_{i,k} w_k \left(\left(\sum_{j=1}^i t_{j,k} - y_{na} \right)^3 + \left(y_{na} - \sum_{j=1}^{i-1} t_{j,k} \right)^3 \right)$$

Eq. 107

$$(EI)^* = \sum_{k=1}^m (EI)_k^*$$

Eq. 108

$(EI)_k^*$ est la rigidité de la couche k.

“ $t_{j,k}$ ” est l'épaisseur de la lamelle j issue de la couche “k”.

“ w_k ” est l'épaisseur de la couche “k”.

“ y_{na} ” est la position de l'axe neutre.

En ce qui concerne les assemblages par goujons collés, une discrétisation est nécessaire à la définition de couches et lamelles (Fig. 94). Plus cette discrétisation est fine, plus la rigidité de flexion obtenue sera représentative.

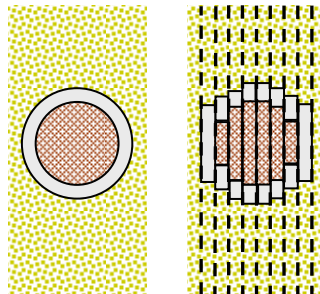








Fig. 94 : Discrétisation d'un assemblage par goujons collés

En supposant que les modules d'Young de l'acier, du Fulcrum® [8], de l'époxy Timberset® [59] et du GL28c sont respectivement de 210000 MPa, 45000 MPa, 7000 MPa et 11000 MPa, les rigidités en flexion des assemblages ou parties d'assemblage étudiés figurent Tab. 34.

Tab. 34 : Rigidité en flexion des assemblages

| Parties d'assemblage | |  |  |  |  |  |  |
|----------------------------|----------------------|---|---|---|--|---|---|
| (EI)* N.mm ² | Acier | | | | | 9,46.10 ¹¹ | 7,25.10 ¹¹ |
| | Fulcrum [®] | 7,65.10 ¹¹ | 7,12.10 ¹¹ | 7,12.10 ¹¹ | 6,86.10 ¹¹ | 7,05.10 ¹¹ | 6,78.10 ¹¹ |

Il est dès lors possible, par une approche RDM simple, d'estimer la rigidité globale de l'élément. Les rigidités obtenues analytiquement et expérimentalement pour les éprouvettes testées sont comparées Tab. 35 et Tab. 36. En ce qui concerne la flexion quatre points, l'espace de 5 mm entre les deux parties de la poutre est pris en compte dans les calculs.

Tab. 35 : Comparaison des rigidités expérimentales et analytiques - flexion quatre points

| y_u/P_u (mm/N) | Licons1 | Licons2 | Licons3 | Licons4 | Licons5 | Licons6 |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Expérimentale | 1,59.10 ⁻³ | 2,22.10 ⁻³ | 1,74.10 ⁻³ | 1,93.10 ⁻³ | 2,25.10 ⁻³ | 1,58.10 ⁻³ |
| Analytique | 1,45.10 ⁻³ | 1,54.10 ⁻³ | 1,54.10 ⁻³ | 1,54.10 ⁻³ | 1,54.10 ⁻³ | 1,51.10 ⁻³ |
| Ecart | 9% | 31 % | 11 % | 20 % | 32 % | 4 % |

Tab. 36: Comparaison des rigidités expérimentales et analytiques - flexion trois points

| y_u/P_u (mm/N) | Licons8 | Licons9 | Licons10 | Licons11 | Licons12 | Licons13 |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Expérimentale | 1,71.10 ⁻⁴ | 1,68.10 ⁻⁴ | 2,27.10 ⁻⁴ | 2,27.10 ⁻⁴ | 2,00.10 ⁻⁴ | 1,57.10 ⁻⁴ |
| Analytique | 1,02.10 ⁻⁴ | 9,67.10 ⁻⁵ | 9,72.10 ⁻⁵ | 1,00.10 ⁻⁴ | 9,84.10 ⁻⁵ | 1,01.10 ⁻⁴ |
| Ecart | 40 % | 42 % | 57 % | 56 % | 51 % | 36 % |

La rigidité analytique de la poutre n'apparaît ainsi que peu affectée par la nature de l'assemblage utilisé. La faiblesse des dimensions de la zone d'assemblage devant celles de l'élément dans sa globalité est une explication plausible. Les résultats expérimentaux attestent quant à eux de légères variations. Les rigidités analytiques obtenues sont en outre plus précises pour les essais de flexion quatre points que pour les essais de flexion trois points. La non continuité des matériaux bois et adhésif au niveau de la jonction n'a pu être intégrée dans l'approche RDM pour cette dernière configuration d'essai. Cette coupure partielle contribue pourtant indéniablement à l'assouplissement de l'élément. Le positionnement de l'assemblage dans une zone soumise à des gradients de flèche et de rotation angulaire ne fait par ailleurs qu'amplifier ce phénomène. La flèche additionnelle liée à l'effort tranchant n'a enfin pas été prise en compte dans les calculs.

Par la même approche RDM, il a été possible de vérifier que le retournement de la poutre n'affecte en rien sa rigidité (Tab. 37)

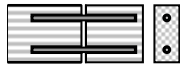
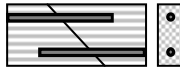
Tab. 37 : Rigidité théorique des spécimens du lot Licons9 selon la position de l'assemblage

| Position de l'assemblage | Rigidité analytique |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| À droite de la charge sur Fig. 78 | $y_u/P_u = 1,02.10^{-4}$ mm/N |
| À gauche de la charge sur Fig. 78 | $y_u/P_u = 9,67.10^{-5}$ mm/N |

IV.3.2. Comparaison acier/composite

Cette comparaison est réalisée au moyen des résultats portant sur les assemblages par goujons collés. Les lots Licons1, Licons2, Licons9 et Licons10 sont concernés (Tab. 38)

Tab. 38 : Comparaison des assemblages par goujons acier et composite

| Configuration d'assemblage |  | |  | |
|----------------------------|---|------------------|---|------------------|
| Essai | Flexion 4 points | | Flexion trois points | |
| Goujons | Acier | Composite | Acier | Composite |
| Lots | Licons1 | Licons2 | Licons9 | Licons10 |
| M_u (N.mm) | $10,7 \cdot 10^6$ | $7,7 \cdot 10^6$ | $7,9 \cdot 10^6$ | $7,3 \cdot 10^6$ |
| V_u (N) | - | - | 26430 | 24410 |


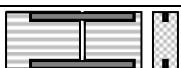
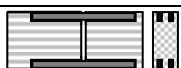
Les assemblages usant des goujons acier ont atteint des niveaux de charges supérieurs à ceux usant des goujons composite. Leurs potentiels ne peuvent néanmoins être objectivement comparés dans la mesure où les modes de rupture observés sont différents. Les assemblages par goujons en acier présentent une rupture en cisaillement de l'interface adhésif/bois et apparaissent dès lors comme optimisés. Les assemblages par goujons en composite, au contraire, rompent au niveau de l'interface entre les deux matériaux les plus robustes en cisaillement. Une meilleure adhésion Timberset[®]/Fulcrum[®] permettrait ainsi de déplacer la rupture au niveau du matériau bois. Des progrès au niveau de la préparation de surface sont ainsi requis afin de fiabiliser l'emploi des matériaux composites à des fins d'assemblage, de renforcement ou de réparation.

L'approche de dimensionnement de GIROD (Eq. 58), associée à Eq. 106, évalue pour cette configuration d'essai, le moment caractéristique ultime de l'assemblage à $6,0 \cdot 10^6$ N.mm. Elle est ainsi sécuritaire.




IV.3.3. Comparaison goujons/plats

Cette comparaison est menée via les assemblages réalisés au moyen de matériaux composites. Les lots Licons2, Licons3, Licons4, Licons8, Licons10, Licons11, Licons12 et Licons13 sont concernés (Tab. 39, Tab. 40 et Tab. 41).



Tab. 39 : Comparaison assemblages par plats et goujons collés – Flexion quatre points

| Configuration d'assemblage |  |  |  |
|----------------------------|---|--|---|
| Lots | Licons2 | Licons3 | Licons4 |
| M_u (N.mm) | $7,7 \cdot 10^6$ | $4,8 \cdot 10^6$ | $9,9 \cdot 10^6$ |

Tab. 40 : Comparaison assemblages à 45° par plats et goujons collés – Flexion trois points

| Configuration d'assemblage |  |  |  |
|----------------------------|---|--|---|
| Lots | Licons10 | Licons11 | Licons12 |
| M_u (N.mm) | $7,3 \cdot 10^6$ | $5,1 \cdot 10^6$ | $8,0 \cdot 10^6$ |
| V_u (N.mm) | 24410 | 16970 | 26570 |

Tab. 41 : Comparaison assemblages à 90° par plats et goujons collés – Flexion trois points

| Configuration d'assemblage |  |  |
|----------------------------|---|---|
| Lots | Licons8 | Licons13 |
| M_u (N.mm) | $4,5 \cdot 10^6$ | $4,4 \cdot 10^6$ |
| V_u (N.mm) | 15080 | 14790 |

Les essais de flexion trois points sur les assemblages à 90° (Tab. 39) ont débouché sur une rupture par fissuration du bois. Le lieu d'initiation de la fissure dépend de la disposition des connecteurs et en aucun cas de leur géométrie. Pour les deux lots concernés (Licons8 et Licons13), elle se propage en des lieux très similaires. Les moments et efforts ultimes obtenus sont par conséquent relativement proches.

Les autres essais (Tab. 40 et Tab. 41) permettent de constater que, malgré des surfaces collées comparables, les assemblages par goujons sont individuellement plus résistants que ceux par plats. Ceci est d'autant plus remarquable que les plats, disposés en surface de l'élément, sont, pour un chargement donné, moins sollicités que les goujons. Des assemblages très compétitifs peuvent néanmoins être réalisés par l'association de plusieurs de ces connecteurs. Pour un mode de rupture identique, la résistance de l'assemblage semble en effet directement proportionnelle au nombre de plats utilisés. Un inventaire des modes de rupture possibles pour l'élément, et plus particulièrement de ceux affectant le matériau bois, est désormais nécessaire à l'établissement des limites de cette dernière affirmation.

Les modes de rupture obtenus pour les assemblages par plats sont très semblables à ceux obtenus pour les assemblages par goujons (Fig. 87, Fig. 89, Fig. 90, Fig. 91). La large base théorique disponible pour ces derniers pourrait ainsi très bien servir de point de départ aux investigations concernant les assemblages par plats collés.

IV.3.4. Assemblages chargés latéralement

a) Rupture par fissuration du bois

Les lots concernés sont Licons8 et Licons13. Les moments et efforts tranchants obtenus à la rupture figurent Tab. 41. Il a été signalé précédemment que la fissuration ne s'est pas initiée au lieu prévu par l'approche du Guide Professionnel [16]. Si la correspondance avec les poutres entaillées apparaît opportune, le scénario de rupture fourni est apparu erronées dans ce cas de figure.

Une application directe de la méthode prédictive présentée en II.4.3 au lot Licons8 établit un effort tranchant ultime caractéristique de 19433 N. Elle ne s'avère ainsi pas sécuritaire.

Connaissant maintenant le lieu exact de la fissuration, l'approche poutres entaillées est ici remise à l'épreuve avec la correspondance suivante (Fig. 95).

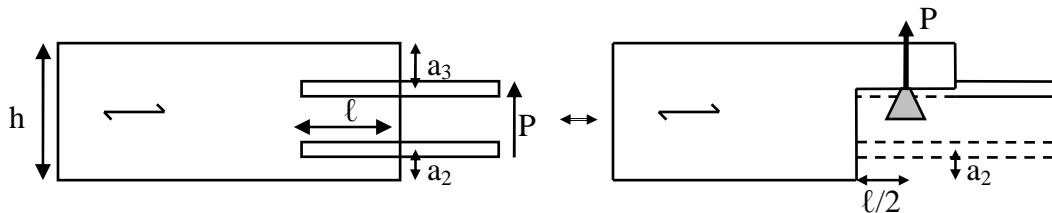


Fig. 95 : Correspondance modifiée entre poutres réparées et poutres entaillées

L'approche prédictive évoquée précédemment fournit alors une prédiction de 2754 N et devient très largement sécuritaire. La fiabilité de la prédiction, portant sur du GL28c, est d'un ordre de grandeur similaire à celles des prédictions effectuées en II.5.2 pour du GL24h.

Le lieu de rupture obtenu, qui diffère des prévisions du Guide Professionnel [16], est par contre conforme aux prévisions de J.L. Jensen [55]. Celui-ci s'est concentré sur la rupture, par fissuration du bois (R10) liée à l'effort tranchant, d'assemblages par goujons collés parallèles au fil et insérés de façon symétrique selon la hauteur de l'élément (Fig. 96).

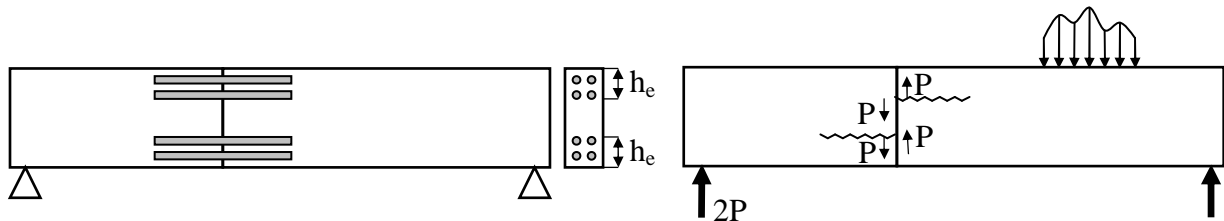


Fig. 96 : Fissuration du bois dans le cas d'un assemblage symétrique par goujons collés

Par une approche en Mécanique "quasi-Non Linéaire" de la Rupture, J.L. Jensen est parvenu à définir des bornes inférieure et supérieure de l'effort tranchant ultime admissible par l'assemblage (Eq. 109, Eq. 110). Elles s'écrivent sous la forme suivante.

$$V_{u,\text{sup}} = \mu \cdot B \cdot \sqrt{\frac{20}{3} \cdot G_b \cdot G_{f,t,b} \cdot h_e}$$

Eq. 109

$$V_{u,\text{inf}} = \gamma \cdot P_{u,\text{sup}}$$

Eq. 110

$$\mu = \frac{\sqrt{2 \cdot \zeta + 1}}{\zeta + 1}$$

Eq. 111

$$\gamma = \frac{\zeta + 1}{2 \cdot \zeta + 1}$$

Eq. 112

$$\zeta = \frac{5}{\sqrt{3}} \cdot \frac{G_b}{E_b} \sqrt{\frac{2 \cdot E_b \cdot G_{f,t,90}}{h_e \cdot f_{t,90}}}$$

Eq. 113

$G_{f,t,90}$ et $f_{t,90}$ sont respectivement l'énergie de rupture et la contrainte de rupture par traction perpendiculaire au fil du bois. Elles ont été établies par l'auteur, pour du lamellé-collé de cèdre du Japon, à 0,28 N / mm et 4,1 MPa.

Directement applicables aux assemblages testés, ces deux formules fournissent, avec $G_{f,t,90} = 0,28$ N/mm, $f_{t,90} = 4,1$ MPa et $G_b = E_b/18$, les prédictions suivantes (Tab. 42).

Tab. 42 : Encadrement de l'effort tranchant ultime par l'approche de J.L. Jensen

| Connecteur | Effort tranchant | | |
|----------------|------------------|--------------|------------------|
| | borne inférieure | expérimental | borne supérieure |
| Goujons | 15920 N | 15080 N | 20710 N |
| Plats | 11430 N | 14790 N | 15530 N |

Les bornes issues de l'approche de J.L. Jensen semblent ainsi très viables pour les géométries d'assemblage testées. L'usage de valeurs plus spécifiques au lamellé-collé GL28c contribuerait à affiner les prédictions. Ces résultats témoignent d'un certain flou concernant la localisation et la prédiction de la rupture par fissuration du bois au niveau des assemblages collés. La correspondance établie par le Guide Professionnel Français, sécuritaire et même fiable pour les lots à deux goujons testés par H.J. Blass (B28 à B31.), est inapte à la description des résultats de LICONs. La disposition (symétrique ou aléatoire) des connecteurs selon la hauteur de l'élément revêtirait ainsi une certaine influence quant à la position du plan de fissuration.

b) Comparaison de la résistance des assemblages à 45 et à 90 degrés

Les assemblages à 45° atteignent un niveau de charge bien supérieur à celui des assemblages à 90° (Tab. 43). La détermination de leur résistance a en effet nécessité le retournement de l'élément sur le bâti de flexion (Fig. 78). Le déplacement de la rupture à l'interface composite/adhésif en est le principal responsable. Les lots concernés sont Licons2, Licons5, Licons6, Licons8, Licons10, Licons11, Licons12 et Licons13.

Tab. 43 : Comparaison des assemblages à 90° et 45° pour des connecteurs composites

| Essai | Flexion quatre points | Flexion trois points | |
|----------------------------|--|--|--|
| | | 90° | 45° |
| Angle à la jonction | 90° | 90° | 45° |
| 2 goujons Fulcrum® | Licons2 $M_u = 7,7 \cdot 10^6$ N.mm | Licons8 $M_u = 4,5 \cdot 10^6$ N.mm $V_u = 15080$ N | Licons10 $M_u = 7,3 \cdot 10^6$ N.mm $V_u = 24410$ N |
| 2 plats Fulcrum® | Licons5 $M_u = 4,8 \cdot 10^6$ N.mm | - | Licons11 $M_u = 5,1 \cdot 10^6$ N.mm $V_u = 16970$ |
| 4 plats Fulcrum® | Licons6 $M_u = 9,9 \cdot 10^6$ N.mm | Licons13 $M_u = 4,4 \cdot 10^6$ N.mm $V_u = 14790$ N | Licons12 $M_u = 8,0 \cdot 10^6$ N.mm $V_u = 26570$ N |

c) *Exploitation des déplacements mesurés par les potentiomètres linéaires*

Les déplacements mesurés par les potentiomètres linéaires s_1 , s_2 , s_3 et s_4 ont dû être corrigés avant d'être exploités. Les capteurs de déplacement étaient effectivement maintenus par une équerre elle-même solidaire d'une section particulière de l'élément (Fig. 84). Les déplacements mesurés intègrent ainsi la rotation de l'équerre et le différentiel de flèche entre le point de fixation de l'équerre et le point de mesure. Ces deux paramètres ont été estimés par une approche simple de R.D.M. et ont été déduits des mesures. Les déplacements corrigés figurent Tab. 44 suivant.

Tab. 44 : Correction des déplacements mesurés par les potentiomètres linéaires

| Lots | Licons8 | | Licons10 | |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 15080 N | | 24410 N | |
| Potentiomètres | s_{12} | s_{34} | s_{12} | s_{34} |
| Mesures brutes | 1,59 mm | 0,82 mm | 0,99 mm | 4,03 mm |
| Différentiel de flèche | -0,32 mm | -2,16 mm | -0,35 mm | -2,97 mm |
| Rotation de l'équerre | +0,32 mm | +2,39 mm | +0,34 mm | +2,52 mm |
| Mesures corrigées | 1,59 mm | 1,05 mm | 0,98 mm | 3,58 mm |

Il a été observé en IV.3.1 que l'approche RDM ne fournissait pas des prédictions précises de la rigidité des spécimens testés en flexion quatre points. Les corrections apportées sont ainsi très critiquables.

Les déplacements bruts mesurés par les capteurs s_1 et s_2 , peu entachés par un différentiel de flèche ou par un pivotement de l'équerre, indiquent néanmoins que les goujons pénètrent moins dans le bois (R9) dans le cas d'une jonction à 45° . Cet aspect est d'autant plus remarquable que l'effort tranchant admis à la rupture est bien plus important pour ce dernier type d'assemblage.

D'après les mesures des capteurs s_3 et s_4 , l'écrasement du bois serait plus prononcé en tête qu'en fond de perçage dans le cas d'une jonction à 90° . Cette observation peut apparaître comme des plus attendues. La tendance inverse interviendrait pourtant dans le cas d'assemblages à 45° . A partir des déplacements mesurés en surface et via certaines hypothèses, tous les pronostics sont dès lors permis (Fig. 97 et Fig. 98) quant à la description des phénomènes internes à l'assemblage.

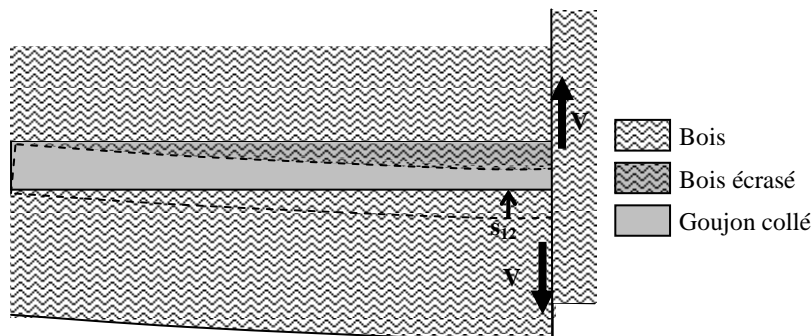


Fig. 97 : Déplacements internes possibles pour une jonction à 90° (hypothèse d'un goujon indéformable)

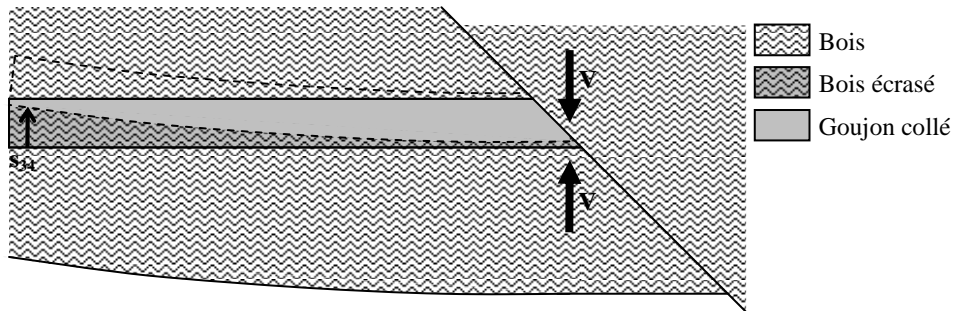


Fig. 98 : Déplacements internes possibles pour une jonction à 45° (hypothèse d'un goujon indéformable)

Ce dernier pronostic concernant la jonction à 45° (Fig. 98), s'il s'avérait représentatif des phénomènes internes réels, laisserait entrevoir une forte influence des efforts de contact bois-bois sur la déformée de l'élément. Le principe fondamental de la statique permet d'estimer la position de la résultante de ces forces de contact.

La rupture, rappelons le, intervient par cisaillement au niveau de l'interface composite/adhésif. Les essais de flexion quatre points (Licons2) ont permis d'établir que celle-ci intervient pour une charge axiale appliquée de 64170 N. L'effort tranchant au niveau de l'appui le plus proche est par ailleurs de 24410 N. L'équilibre à la rupture de la plus petite partie de l'élément est représenté Fig. 99.

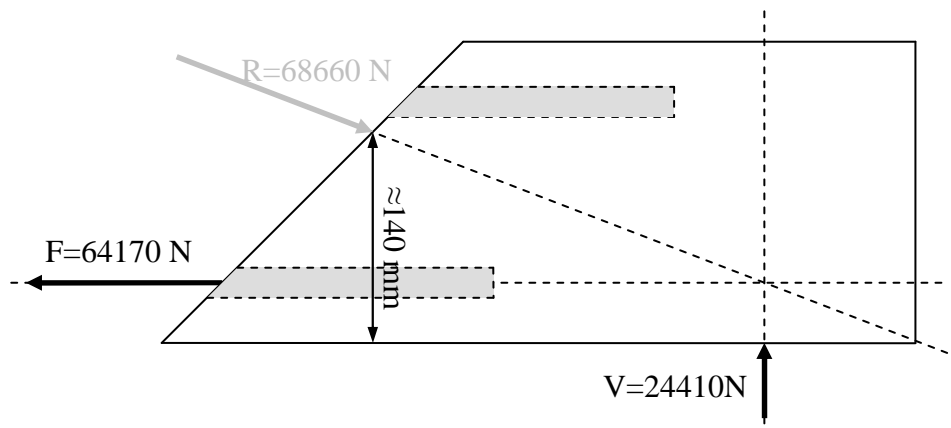


Fig. 99 : Equilibre de la plus petite partie de l'élément

Cet équilibre permet ainsi de situer la résultante du contact bois-bois. Cette résultante inclut les efforts de contact au niveau de la jonction ainsi que l'effort axial appliqué au goujon supérieur. Sa non orthogonalité à la surface de contact laisse entrevoir l'impact d'une telle zone d'assemblage sur la déformée globale de l'élément. Le potentiomètre s_5 (Tab. 44) témoigne en effet d'une ouverture significative de la jonction au cours de l'essai.

d) Apport d'un assemblage à 45 degrés

Les assemblages à 45° sont d'un réel apport en terme de résistance mécanique. Malgré l'existence d'un effort latéral significatif, la réalisation de ce type de jonction permet de s'affranchir d'une fissuration du matériau bois. Ce premier aspect est loin d'être négligeable

compte tenu de la subjectivité des approches de dimensionnement disponibles à ce jour (II.5.2). Les déplacements mesurés démontrent que les goujons ne pénètrent que très peu dans le bois à l'embouchure du perçage. Cela signifie que les goujons sont quasiment déchargés de tout effort latéral. Les résultats expérimentaux présentés Tab. 43 en attestent. Les moments de flexion atteints en présence d'un effort tranchant sont très similaires à ceux obtenus en flexion pure et ceci quelque soit la nature de l'assemblage. Le matériau bois prendrait ainsi intégralement en charge la transmission des efforts latéraux, laissant aux plats et goujons les seuls efforts axiaux. Les principes de dimensionnement des assemblages collés face à ce dernier type d'effort sont bien plus avancés (II.5.1) et en constante amélioration (III.5). Les assemblages à 45° apparaissent ainsi comme très prometteurs. Leur impact sur la rigidité de la poutre doit néanmoins être approfondi et leur comportement face à un renversement de la charge doit être abordé.

IV.3.5. Joint de continuité à la résine

L'influence de la présence, volontaire ou accidentelle, d'adhésif entre les deux parties de la poutre a été étudiée à travers les lots Licons2, Licons3 et Licons4. Les résultats obtenus figurent Tab. 45 suivant.

Tab. 45 : Apport d'un aboutage complémentaire à l'adhésif

| Lots | Licons2 | Licons3 | Licons4 |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Espace | 5 mm | 5 mm remplis d'adhésif | 0 mm |
| M_u | 7,7.10 ⁶ N.mm | 8,0.10 ⁶ N.mm | 8,7.10 ⁶ N.mm |

Un aboutage complémentaire à l'adhésif au niveau de la jonction n'a pas un grand intérêt en terme de résistance mécanique. De surcroît, le premier signe de faiblesse constaté, la désolidarisation du bloc d'adhésif de l'une des parties de la poutre (Fig. 88), engendre une perte soudaine de rigidité qui affecte la stabilité globale de l'élément. Cette pratique doit donc, dans la mesure du possible, être évitée.

**PARTIE V:
APPROCHES ANALYTIQUES ORIGINALES**

Certaines configurations d'assemblage et de renforcement, déjà utilisées en pratique, n'ont pourtant fait l'objet d'aucune approche analytique. Les professionnels du renforcement à la résine ont, par exemple, constaté que la réalisation de perçages lamés (Fig. 100) engendre une hausse significative de la résistance à l'arrachement d'un goujon collé. Leurs interrogations portent désormais sur le profil de lamage à adopter. Le renforcement, global ou local, à la surface et selon la direction longitudinale des éléments bois (Fig. 101), s'avère par ailleurs d'une grande utilité. Cette opération permet en effet de réhabiliter des éléments de structure bois tout en préservant leur apparence. Aucune méthodologie de dimensionnement n'est néanmoins disponible. Cette dernière partie vise en la proposition d'une base théorique utile à la conception de telles interventions.

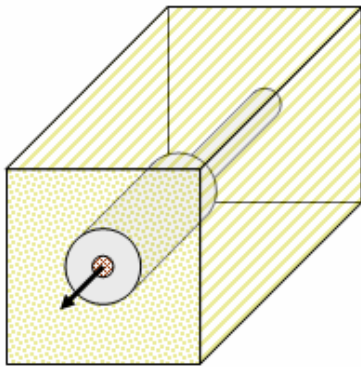


Fig. 100 : Lamage en embouchure du perçage

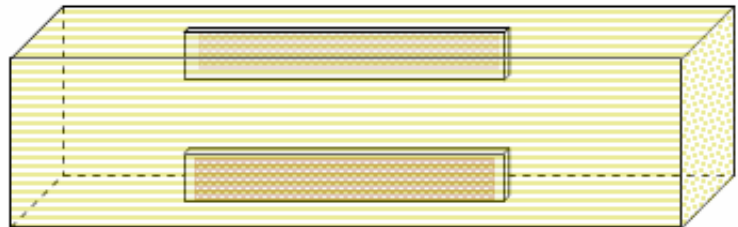


Fig. 101 : Renforcement en surface d'éléments bois

V.1. REALISATION DE PERÇAGES LAMES

V.1.1. Intérêt de perçages lamés

La conception d'un assemblage par goujons collés doit, ou plus justement devra, répondre à des critères établis de manière définitive. A l'instar de tous les organes de type tige, les goujons collés devront être disposés selon des règles de pinces bien déterminées. Pour des goujons insérés parallèlement au fil du bois, une ébauche de réglementation figure dans le Guide Professionnel français (II.4.4). Les efforts latéraux pouvant être repris au moyen d'une jonction à 45°, seuls les efforts axiaux seront considérés par la suite.

Si les sections de bois peuvent être réajustées lors de la conception de structures neuves, il n'en est pas de même lors de réparations de structures anciennes où les sections

sont imposées par les éléments préexistants. Le nombre maximal de goujons employables n'est ainsi pas modulable. Si une augmentation de la longueur d'ancrage permet d'augmenter la résistance axiale des goujons collés, cette solution n'est pas systématiquement salvatrice. D'une part ce gain de résistance est entièrement déterminé par la limite élastique du goujon (Eq. 58). D'autre part la géométrie de la structure peut limiter leur profondeur de pénétration. Une fois ce paramètre optimisé, un surplus de résistance peut encore être obtenu par une augmentation du diamètre de perçage. L'adhésif étant le matériau le plus coûteux de l'assemblage, cette opération n'est néanmoins pas toujours perçue d'un bon œil. De ce souci économique est née l'idée de réaliser des perçages lamés.

La méthode de conception, présentée dans cette partie, est issue d'une collaboration avec J.G. Broughton, Maître de Conférences à Oxford Brookes University (UK) et membre du projet LICONS.

V.1.2. Constat expérimental

Le procédé du lamage étant directement issu du savoir faire et de la créativité de quelques professionnels pratiquant le renforcement à la résine, J.G. Broughton s'est en premier lieu évertué à aborder plus scientifiquement ce concept. Il a mené une campagne expérimentale en ce sens [59]. Elle concerne des éprouvettes de caractérisation locale soumises à un essai de type Pull-Compression. Celles-ci sont constituées d'un goujon en acier Haute Résistance collé au moyen d'une époxy fragile (Rotafix Timberset) dans un bloc de LVL. En dénommant respectivement " D_t " et " μ " le diamètre et la profondeur du lamage, les caractéristiques géométriques des éprouvettes testées figurent Tab. 46.

Tab. 46 : Géométrie des éprouvettes testées par J.G. Broughton

| Grandeur | L x B | l | d_g | d_t | D_t | μ |
|------------|---------|-----|-------|-------|-------|-------|
| unité | mm x mm | mm | mm | mm | mm | mm |
| JB1 | 60 x 60 | 62 | 10 | 14 | 0 | 0 |
| JB2 | 60 x 60 | 62 | 10 | 14 | 22 | 10 |
| JB3 | 60 x 60 | 62 | 10 | 14 | 22 | 20 |
| JB4 | 60 x 60 | 62 | 10 | 14 | 22 | 30 |
| JB5 | 60 x 60 | 62 | 10 | 22 | 0 | 0 |

Les résultats expérimentaux obtenus figurent Fig. 102. L'assemblage élémentaire est d'autant plus résistant que la profondeur de lamage est importante. Il est remarquable qu'il existe une profondeur seuil à partir de laquelle la résistance obtenue plafonne. La résistance palière atteinte correspond à la résistance de l'assemblage élémentaire JB5 caractérisé par un perçage de diamètre D_t et dépourvu de tout lamage.

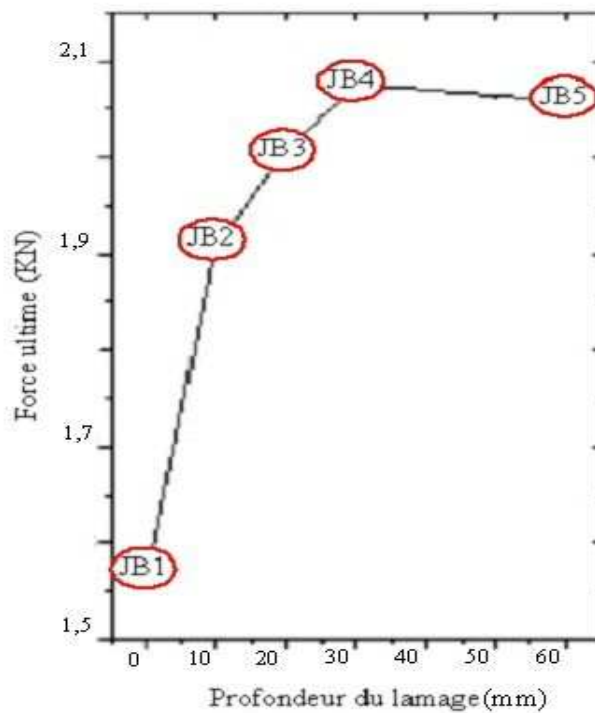


Fig. 102 : Charges de rupture selon la profondeur de lamage (extrait de [59])

V.1.3. Observations numériques

J. G. Broughton s'est ensuite consacré à une modélisation éléments finis de ses éprouvettes afin d'en déterminer l'état de contrainte. Le modèle réalisé est un modèle élastique comparable à celui présenté en III.1.2. Les caractéristiques géométriques et mécaniques retenues pour les simulations figurent Tab. 47. Les contraintes de cisaillement à l'interface adhésif/bois sont, pour chaque géométrie, décrites Fig. 103.

Tab. 47 : Caractéristiques géométriques et mécaniques retenues par J.G. Broughton

| ℓ | d_g | D_t | d_t | a | E_a | ν_a | E_g | E_b |
|--------|-------|-------|-------|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| mm | mm | mm | mm | mm | N/mm ² | N/mm ² | N/mm ² | N/mm ² |
| 62 | 10 | 22 | 14 | 60 | 7000 | 0,38 | 205000 | 11000 |

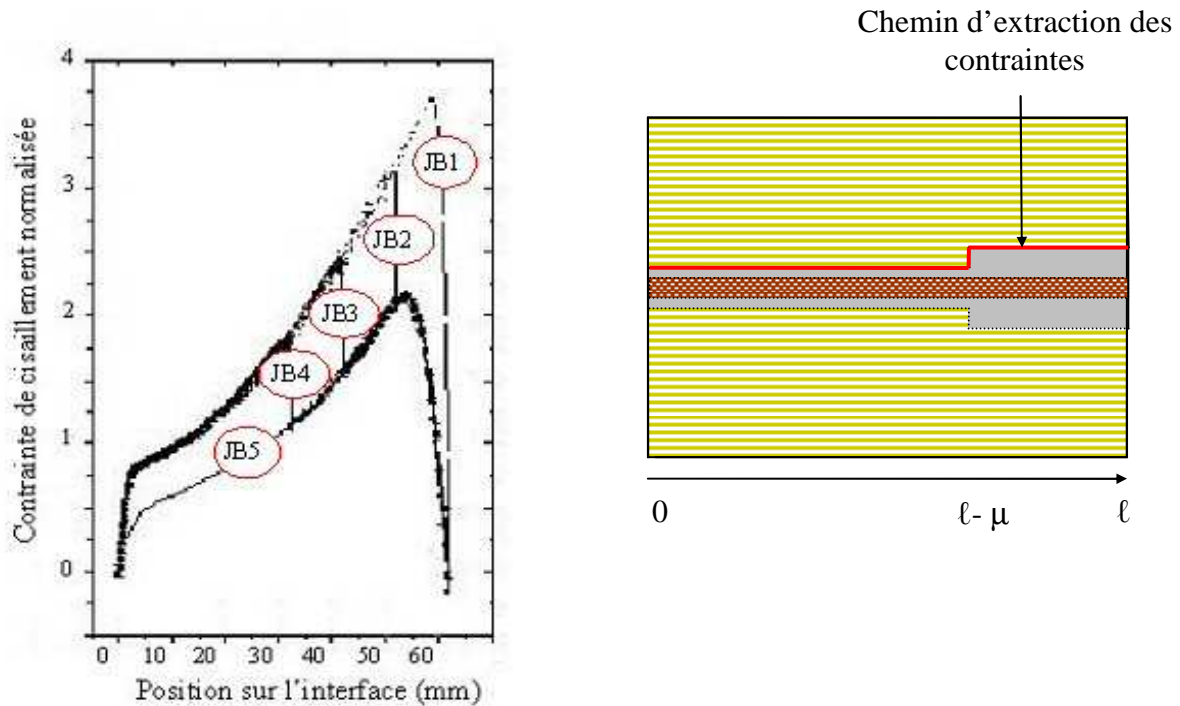


Fig. 103 : Distributions des contraintes de cisaillement à l'interface adhésif/bois

Les contraintes de cisaillement normalisées représentées en ordonnées sont définies de la manière suivante :

$$\frac{\tau(x)}{\bar{\tau}} = \frac{\tau(x)}{\left(\frac{P}{\pi \times 14 \times 62} \right)}$$

Eq. 114

Les deux courbes enveloppes JB1 et JB5 sont représentatives des éprouvettes à perçage non lamé respectivement de diamètres “ d_t ” et “ D_t ”.

Pour une éprouvette présentant un lamage de profondeur “ μ ”, la distribution transite d’une courbe enveloppe à l’autre à l’abscisse “ $l - \mu$ ” telle que:

$$\begin{cases} \text{Pour } 0 \leq x \leq (l - \mu) & \text{la distribution suit la courbe enveloppe correspondant à } d_t \\ \text{Pour } (l - \mu) \leq x \leq l & \text{la distribution suit la courbe enveloppe correspondant à } D_t \end{cases}$$

V.1.4. Approche analytique

Cette observation numérique constitue la principale explication de l’existence d’une profondeur de lamage seuil μ_s à partir de laquelle la résistance de l’assemblage n’est plus augmentée. Soient $\tau_{dt}(x)$, $\tau_{Dt}(x)$ et $\tau_{\mu}(x)$ les contraintes de cisaillement à l’interface adhésif/bois, sous chargement P, pour des éprouvettes à perçage respectivement non lamé de

diamètre d_t , non lamé de diamètre D_t et lamé de profondeur μ . La profondeur seuil de lamage μ_s peut être définie comme la solution de Eq. 115:

$$\tau_{dt}(\ell - \mu_s) = \max(\tau_{Dt}(x))$$

Eq. 115

Avec cette définition, μ_s constitue en effet la valeur charnière telle que :

$$\begin{aligned} \text{Pour } \mu \leq \mu_s \quad & \max(\tau_{Dt}(x)) \leq \max(\tau_{\mu}(x)) \leq \max(\tau_{dt}(x)) \\ \text{Pour } \mu \geq \mu_s \quad & \max(\tau_{\mu}(x)) = \max(\tau_{Dt}(x)) \end{aligned}$$

Eq. 116

Quelque soit le diamètre de perçage initial d_t , la réalisation d'un lamage de diamètre D_t et de profondeur μ_s confère ainsi à l'interface des caractéristiques en cisaillement comparables à celles d'une interface cylindrique de diamètre D_t .

Les approches analytiques utiles à la description des contraintes de cisaillement sont nombreuses [39] [40] [41] [43]. Celle de J.L. Jensen [60], proche de celle de P.J. Gustafsson mais fondamentalement consacrée aux organes de type tige, est la plus représentative des conditions limites adoptées lors des essais et de la modélisation de J.G. Broughton (Fig. 104). Elle s'écrit de la manière suivante :

$$\tau(x) = \frac{-P\omega}{\pi d \ell} \frac{1}{\sinh(\omega)} \cosh\left(\omega\left(1 - \frac{x}{\ell}\right)\right)$$

Eq. 117

$$\omega = \omega_0 \sqrt{\frac{1 + \alpha}{\alpha}}$$

Eq. 118

$$\omega_0 = \sqrt{2\lambda}$$

Eq. 119

$$\lambda = \frac{\ell^2 \tau_u^2}{d E_g G_f}$$

Eq. 120

$$\alpha = \frac{E_b A_b}{E_g A_g}$$

Eq. 121

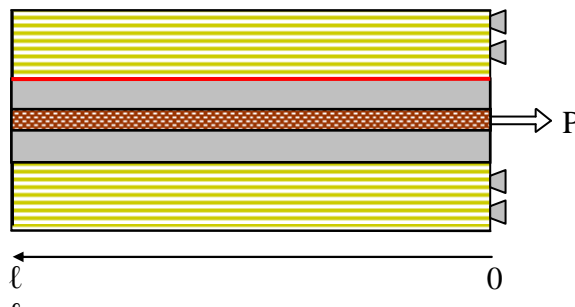


Fig. 104 : Conditions limites de l'approche analytique de J.L. Jensen [60]

L'indice de fragilité et le ratio des rigidités, définis par P.J. Gustafsson [43], réapparaissent dans l'approche de J.L. Jensen. L'adhésif utilisé présentant un comportement fragile, l'équation suivante est utilisable pour simplifier la détermination de λ :

$$G_f = \frac{\tau_u^2 e_a}{2G_a} \text{ (Eq. 35).}$$

L'équation obtenue est:

$$\tau_{dt}(\mu_s) = \max(\tau_{Dt}(x)) = \tau_{Dt}(0)$$

Eq. 122

Sa résolution peut être menée analytiquement à l'aide d'un logiciel de calcul mathématique de type Maple ou bien graphiquement à l'aide d'un tableur de type Microsoft Excel.

V.1.5. Comparaison des approches expérimentales, numériques et analytiques

Pour la géométrie de J.G. Broughton, la profondeur de lamage seuil a été déterminée analytiquement avec les paramètres mécaniques et géométriques définis Tab. 47. Concernant les approches expérimentales et numériques, elle est directement extraite de Fig. 102 et Fig. 103. Les résultats figurent Tab. 48.

Tab. 48 : Comparaison des profondeurs de lamage seuil obtenues par les différentes approches

| Approche | Analytique (Eq. 122) | Expérimentale (Fig. 102) | Numérique (Fig. 103) |
|----------------------------|-------------------------|---|-------------------------|
| Profondeur de lamage seuil | $\mu_s = 23 \text{ mm}$ | $20 \text{ mm} < \mu_s < 30 \text{ mm}$ | $\mu_s = 26 \text{ mm}$ |

Les prédictions des différentes approches sont ainsi relativement proches. Quelques remarques doivent néanmoins être effectuées.

L'approche analytique de Jensen est basée sur des hypothèses identiques à celles de O. Volkersen [39] et P.J. Gustafsson [43]. Le bois et le goujon ne sont supposés se déformer qu'en traction alors que l'adhésif n'est supposé se déformer qu'en cisaillement. Les contraintes de cisaillement sont par ailleurs considérées comme constantes selon l'épaisseur du joint de colle. Ces hypothèses ne sont pas réévaluées dans les simulations numériques. Il en résulte des distributions analytiques et numériques différentes pour les contraintes de cisaillement dans l'adhésif. Pour la géométrie de J.G Broughton, les écarts observés entre les contraintes de cisaillement maximales sont présentés Tab. 49.

Tab. 49 : Comparaison des contraintes de cisaillement maximales obtenues

| Diamètre de perçage | Contraintes de cisaillement normalisées | |
|-----------------------|---|----------------------|
| | Numérique (Fig. 103) | Analytique (Eq. 122) |
| $d_t = 14 \text{ mm}$ | 3,7 | 3,1 |
| $D_t = 22 \text{ mm}$ | 2,2 | 1,0 |

Ces écarts, déjà observables Fig. 54, sont ainsi loin d'être négligeables. L'approche proposée étant exclusivement consacrée à la détermination d'une grandeur géométrique (μ_s), la forme des distributions est néanmoins plus importante que leur amplitude et les écarts constatés au niveau des grandeurs mécaniques apparaissent comme secondaires.

Le dispositif expérimental est resté identique durant la campagne expérimentale. Les goujons sont tirés au travers d'une plaque métallique indéformable percée (diamètre de perçage : 40 mm) qui assure le blocage du cube de LVL. Concernant les échantillons des lots JB2 à JB5, une auréole de bois d'épaisseur 9 mm est libre de tout blocage autour du goujon collé. Concernant les échantillons du lot JB1, cette auréole intervient également mais présente une épaisseur de 13 mm. Ces auréoles de bois libre, qui plus est d'épaisseur variable, ont été prises en compte dans les simulations numériques par J.G. Broughton mais sont ignorées dans l'approche analytique.

Les prédictions sont très dépendantes des paramètres mécaniques introduits dans le modèle. Les valeurs retenues (Tab. 47) pour les modèles analytique et numérique, bien que fondées et tout à fait opportunes, ne peuvent être rigoureusement garanties représentatives des éprouvettes testées.

Ces hypothèses, approximations et incertitudes ne se sont pas avérées d'importance pour la géométrie étudiée. Cette approche analytique doit désormais être confrontée à d'autres résultats expérimentaux. Cette nouvelle confrontation permettra de se prononcer quant à la pertinence des formulations de J.L. Jensen (Eq. 117) pour cette utilisation et quant à la nécessité d'une calibration au moyen de résultats expérimentaux.

V.1.6. Perspectives

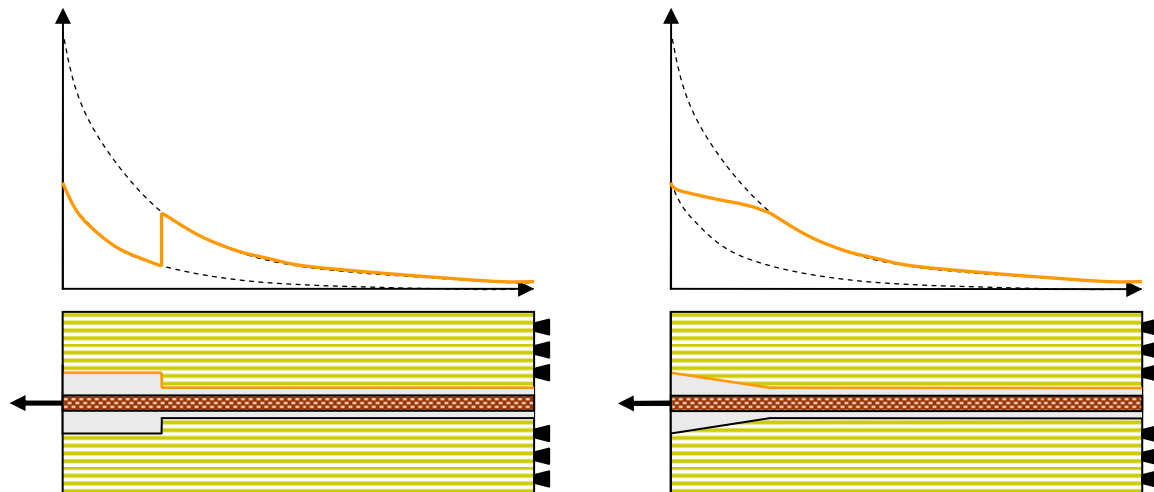


Fig. 105 : Contraintes de cisaillement à l'interface adhésif/bois selon le profil du lamage

La pratique d'un lamage à profil cylindrique conduit à l'introduction, dans le joint d'adhésif, d'une singularité dont les conséquences réelles sont difficiles à appréhender. Les distributions de contrainte obtenues numériquement présentent en effet de fortes discontinuités en fond de lamage. De cette inquiétude est née l'idée de réaliser des lamages coniques évitant un changement abrupt d'épaisseur pour le joint d'adhésif. L'utilisation du

modèle élastique éléments finis a permis de confirmer que ce dernier profil de lamage permet un adoucissement de la distribution des contraintes dans l'adhésif. L'allure de cette dernière est schématisée Fig. 105. La méthode de détermination de la profondeur de lamage seuil présentée dans cette section est bien sûr directement applicable à cet autre profil de lamage.

V.2. RENFORCEMENT D'UN ELEMENT BOIS

Le vieillissement des ouvrages, aggravé par les conditions climatiques et les attaques biologiques, et l'évolution des contraintes d'utilisation ou de réglementation rendent souvent nécessaire le renforcement des éléments de structure bois. Ces interventions de renforcement peuvent être locales, c'est-à-dire ne concerner qu'une zone de dimensions restreintes par rapport à celles de l'élément, ou globales, c'est-à-dire affecter la totalité de la portée de l'élément. Si ces techniques sont très employées par les professionnels pratiquant le renforcement des structures, elles ne sont l'objet d'aucun guide de conception largement reconnu.

V.2.1. Renforcement local

Il s'agit généralement de consolider une partie d'élément altérée (attaque biologique). Seules les interventions consistant en un renforcement du bois selon sa direction longitudinale sont abordées dans cette section. Celles-ci consistent en un collage, en surface ou au sein de l'élément, d'organes longilignes en acier ou composite permettant de rigidifier la zone dégradée. Il s'agit dès lors d'estimer la résistance de tels renforts.

a) *Configuration de référence retenue*

La configuration de référence retenue pour l'étude est la suivante (Fig. 106) :

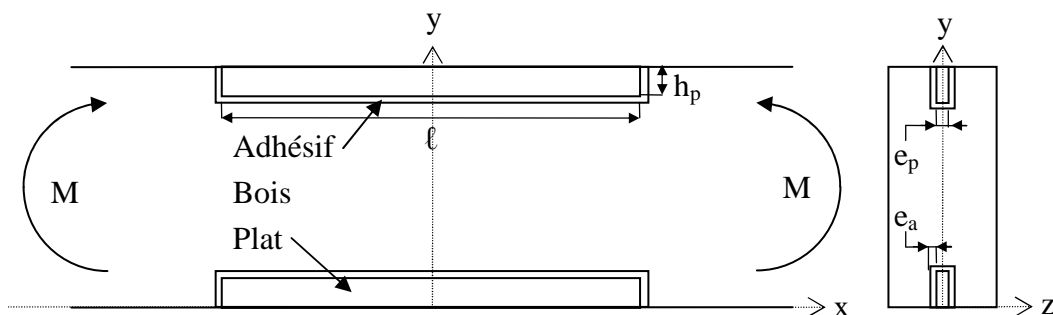


Fig. 106 : Configuration de référence retenue pour l'étude

L'élément, soumis à de la flexion pure, est renforcé au moyen de deux plats composites de longueur " l ", de hauteur " h_p " et d'épaisseur " e_p " insérés dans des saignées de largeur " $e_p + 2e_a$ " et de profondeur $h_p + 1$ mm. Les parties tendues et comprimées de

l'élément sont renforcées à l'identique. L'axe neutre est ainsi maintenu à mi hauteur de l'élément.

b) Rigidité équivalente en flexion de l'élément

La relation de D. Gay [57] et J. Malzbender [58], introduite partie IV, est à nouveau utilisable pour déterminer la rigidité équivalente en flexion de l'élément $(EI)^*$. Elle s'écrit, pour rappel et conformément à Fig. 93:

$$(EI)_k^* = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n E_{i,k} w_k \left(\left(\sum_{j=1}^i t_{j,k} - y_{na} \right)^3 + \left(y_{na} - \sum_{j=1}^{i-1} t_{j,k} \right)^3 \right) \quad (\text{Eq. 107})$$

$$(EI)^* = \sum_{k=1}^m (EI)_k^* \quad (\text{Eq. 108})$$

Les contraintes axiales peuvent, en n'importe quel lieu de la zone renforcée, être déterminées par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{EM}{(EI)^*} y$$

Eq. 123

“y” est la distance entre l'axe neutre et le lieu de calcul des contraintes.

“E” est le module d'Young du matériau dans lequel sont prélevées les contraintes.

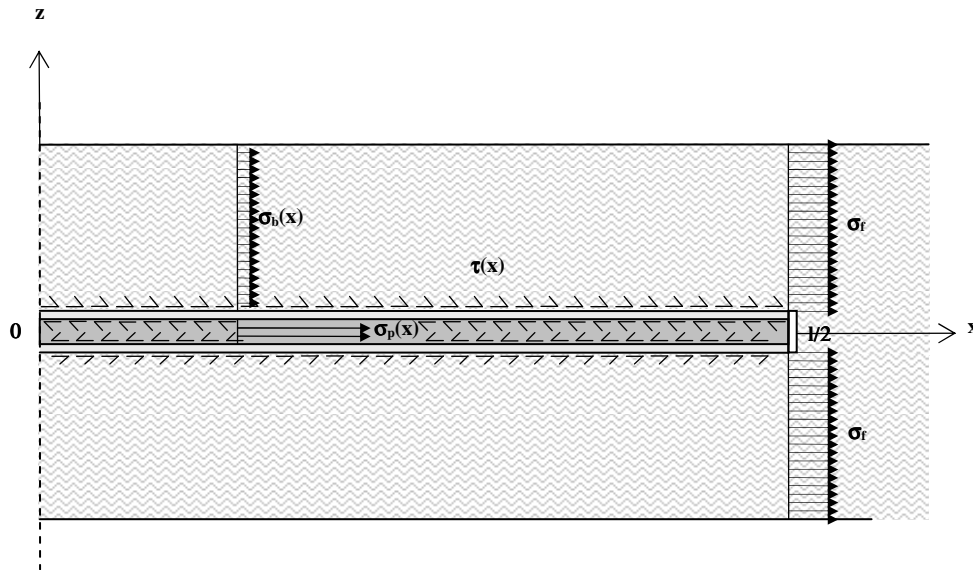
“M” est le moment de flexion à l'abscisse où sont prélevées les contraintes.

Les contraintes maximales de traction/compression calculées dans le bois, l'adhésif et le renfort peuvent d'ores et déjà être confrontées aux contraintes admissibles correspondantes en vue du dimensionnement.

c) Vérification analytique du cisaillement dans le joint d'adhésif

La campagne expérimentale LICONS a démontré que des progrès restent à accomplir en ce qui concerne l'adhésion entre composite et adhésif. Il est donc apparu opportun d'établir une approche de prédiction des contraintes de cisaillement dans le joint d'adhésif. Il est ici considéré que seul l'épaisseur d'adhésif de part et d'autre du plat participe à la transmission des efforts. Le rôle de l'adhésif en fond et en bout de saignée, c'est-à-dire au contact des faces les plus minces du plat, est négligé.

Les faces inférieures et supérieures de l'élément bois sont les plus sollicitées. Une couche externe d'épaisseur unité est ainsi isolée pour l'étude. Les conditions limites et les contraintes correspondantes dans les matériaux sont décrites Fig. 107 suivante.



**Fig. 107 : Conditions limites retenues pour l'étude
(Poutre renforcée vue de dessus/dessous, couche d'épaisseur 1 mm)**

Il est considéré que l'adhésif ne se déforme qu'en cisaillement et que le plat ne se déforme qu'en traction. On appelle $\tau(x)$ la contrainte de cisaillement dans l'adhésif. Celle-ci est considérée comme constante selon l'épaisseur du joint.

La méthodologie employée est similaire à celle présentée en II.4.1. Il s'agit d'effectuer un bilan des déplacements dans l'assemblage. Soient $U_a(x)$, $U_b(x)$ et $U_p(x)$ les déplacements liés respectivement au cisaillement de l'adhésif, à la traction du bois et à la traction du plat. On a dès lors:

$$U_a(x) = U_b(x) - U_p(x)$$

Eq. 124

$$U_a(x) = \frac{\tau(x)e_a}{G_a}$$

Eq. 125

$$U_p(x) = \int_0^x \frac{\sigma_p(x)}{E_p} dx = \int_0^x \left(\int_x^{1/2} \frac{2\tau(x)}{E_p e_p} dx \right) dx = \int_0^x \left(\int_{1/2}^x \frac{-2\tau(x)}{E_p e_p} dx \right) dx$$

Eq. 126

$$U_b(x) = \int_0^x \frac{\sigma_b(x)}{E_b} dx = \int_0^x \left(- \int_x^{1/2} \frac{\tau(x)}{E_b e_b} dx + \frac{\sigma_f}{E_b} \right) dx = \int_0^x \left(\int_{1/2}^x \frac{\tau(x)}{E_b e_b} dx \right) dx + \int_0^x \left(\frac{\sigma_f}{E_b} \right) dx$$

Eq. 127

En dérivant deux fois, on obtient l'équation différentielle suivante :

$$\left(\frac{e_a}{G_a}\right) \frac{d^2 \tau(x)}{dx^2} - \left(\frac{2}{e_p E_p} + \frac{1}{e_b E_b}\right) \tau(x) = 0 \quad \text{avec} \quad \omega^2 = \frac{G_a}{e_a} \left(\frac{2}{e_p E_p} + \frac{1}{e_b E_b}\right)$$

Eq. 128

Cette équation admet une solution de la forme :

$$\tau(x) = A \cosh(\omega x) + B \sinh(\omega x)$$

Eq. 129

On a :

$$\tau(-x) = \tau(x) \Rightarrow B = 0$$

Eq. 130

En $x = 0$, à distance respectable de la cavité présente en bout de saignée assimilable à une singularité, on a :

$$\sigma_p = \frac{E_p M}{(EI)_{\text{equ}}} \frac{(h-1)}{2}$$

Eq. 131

$$\Rightarrow \int_0^{\ell/2} \frac{2\tau(x)}{e_p} dx = \frac{E_p M}{(EI)_{\text{equ}}} \frac{(h-1)}{2} \Rightarrow A = \frac{E_p M}{(EI)_{\text{equ}}} \frac{(h-1)}{2} \frac{e_p}{2} \frac{\omega}{\sinh(\omega \frac{\ell}{2})}$$

Eq. 132

Il vient ainsi :

$$\tau(x) = \frac{E_p M}{(EI)_{\text{equ}}} \frac{(h-1)}{2} \frac{e_p}{2} \frac{\omega \cosh(\omega x)}{\sinh(\omega \frac{\ell}{2})}$$

Eq. 133

On en déduit :

$$\tau_{\text{max}} = \frac{E_p M}{(EI)_{\text{equ}}} \frac{(h-1)}{2} \frac{e_p}{2} \omega \cot \operatorname{anh}\left(\omega \frac{\ell}{2}\right)$$

Eq. 134

Cette contrainte de cisaillement doit être comparée à la contrainte de cisaillement maximale admissible par le joint d'adhésif.

d) Vérification numérique du cisaillement dans le joint d'adhésif

Les propriétés géométriques (Fig. 108) et mécaniques (Tab. 50) adoptées pour la vérification de l'approche analytique sont similaires à celles retenues lors de l'exploitation des résultats expérimentaux de LICONS (Partie IV).

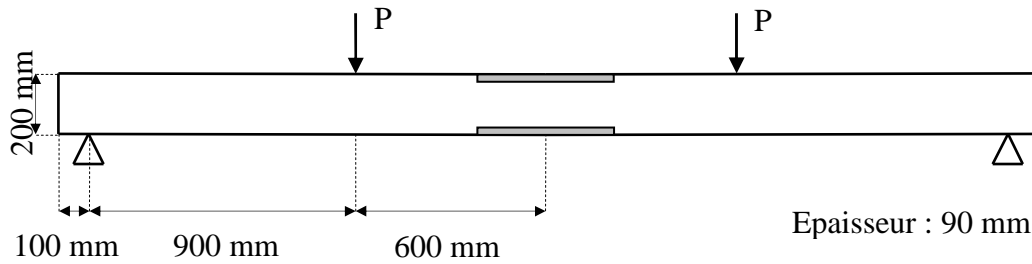


Fig. 108 : Caractéristiques géométriques retenues pour la vérification

Tab. 50 : Caractéristiques mécaniques retenues pour la vérification

| Plat | | Adhésif | | Bois | | | | | |
|-------|---------|---------|---------|-----------|-----------|------------|-----------------------|----------|-------------------|
| E_p | ν_p | E_a | ν_a | $E_b=E_L$ | $E_R=E_T$ | ν_{RT} | $\nu_{LR} = \nu_{LT}$ | G_{RT} | $G_{LR} = G_{LT}$ |
| MPa | | MPa | | MPa | MPa | | | MPa | MPa |
| 45000 | 0,3 | 7000 | 0,38 | 10900 | 570 | 0,5 | 0,03 | 26 | 500 |

Une modélisation par éléments finis a été réalisée, en trois dimensions, sous Abaqus version 6.3 afin de vérifier les prédictions de l'approche analytique précédente. Compte tenu des symétries de la configuration retenue (Fig. 106 et Fig. 108), seul un quart de la poutre a été modélisé. Les caractéristiques mécaniques et géométriques des différents composants constituent les entrées du modèle. Les éléments utilisés sont de type C3D8. Il s'agit d'éléments parallélépipédiques à huit nœuds dont la densité a été volontairement amplifiée dans la zone d'assemblage. La taille des éléments a là encore été optimisée sur une géométrie particulière d'assemblage puis a été maintenue constante au cours de l'étude de sensibilité. Un aperçu du modèle est fourni Fig. 109.

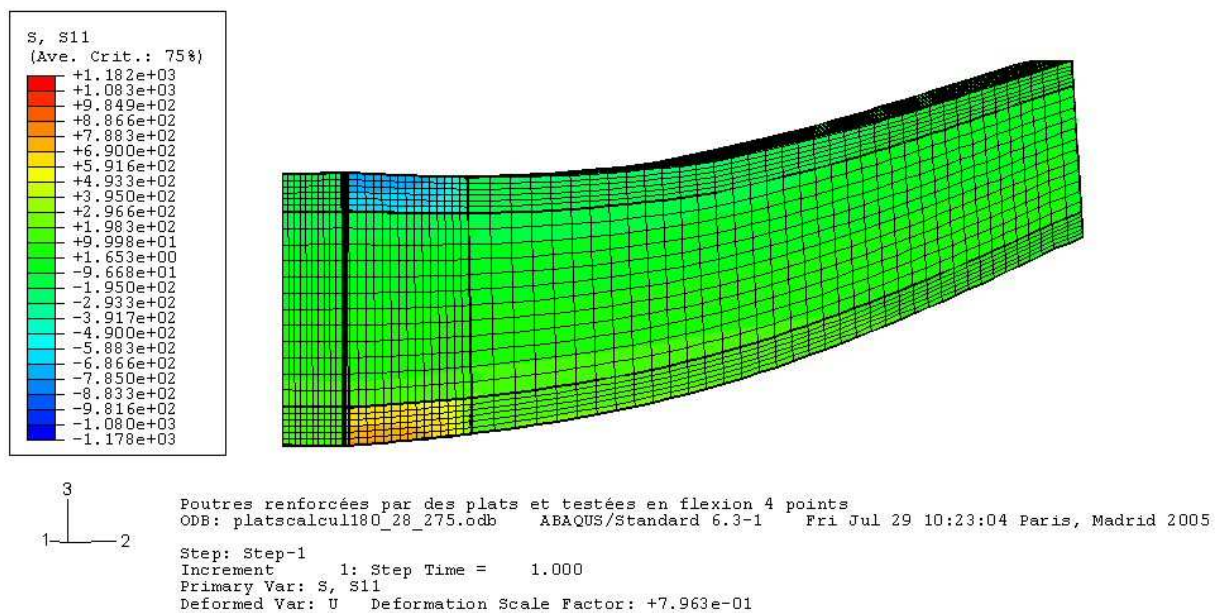


Fig. 109 : Aspect de la modélisation par éléments finis

Quatre paramètres géométriques représentatifs de l'assemblage ont été retenus comme variables : la longueur du plat "ℓ", son épaisseur "e_p", sa hauteur "h_p" et l'épaisseur d'adhésif de part et d'autre "e_a". A chacun ont été affectées trois valeurs, celles-ci figurent Tab. 51. Toutes les autres caractéristiques (Fig. 108, Tab. 50) demeurent constantes durant les simulations.

Tab. 51 : Les trois valeurs possibles pour les quatre paramètres de l'étude

| | Paramètre1 : ℓ | Paramètre2 : h _p | Paramètre3 : e _p | Paramètre 4 : e _a |
|----------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Valeur 1 | 192 | 14 | 4,5 | 0,75 |
| Valeur 2 | 360 | 28 | 6,5 | 1,75 |
| Valeur 3 | 720 | 56 | 8,5 | 2,75 |

e) *Comparaison des prédictions numériques et analytiques*

Est appelée C_{ijkl} la configuration d'assemblage dans laquelle le paramètre 1 ("ℓ") a la valeur "i", le paramètre 2 ("h_p") a la valeur "j", le paramètre 3 ("e_p") a la valeur "k" et le paramètre 4 ("e_a") a la valeur "l", [i, j, k, l] ∈ {1, 2, 3}. Un effort P unité est appliqué en chacun des points du chargement.

La contrainte maximale de cisaillement dans l'adhésif est abordée analytiquement et numériquement. Pour cette dernière approche, les contraintes de cisaillement obtenues ne sont pas uniformes selon l'épaisseur du joint d'adhésif. Pour une meilleure comparaison avec les prédictions analytiques, une moyenne des contraintes de cisaillement a par conséquent été effectuée selon cette direction. Les distributions obtenues sont confrontées Fig. 110.

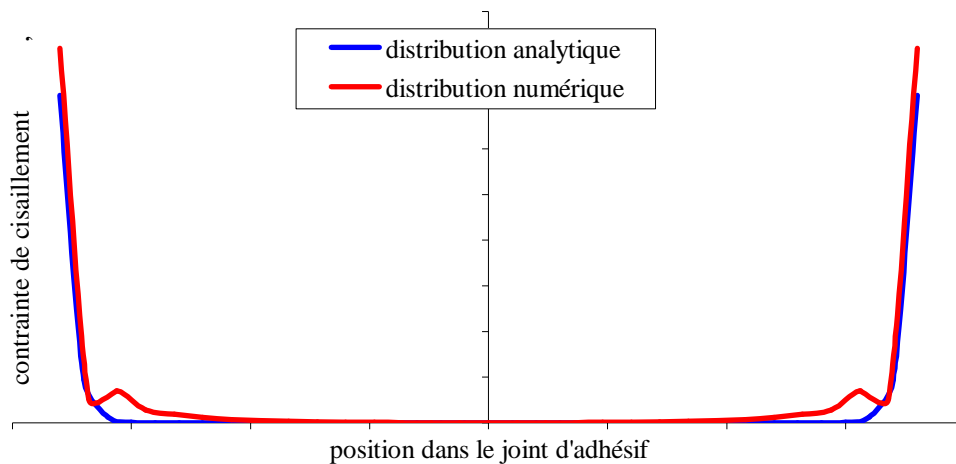


Fig. 110 : Allure des distributions de contrainte obtenues par les modèles analytiques et numériques

Une première confrontation des prédictions a mis en évidence une faible sensibilité des deux modèles au paramètre 1 ("ℓ") et au paramètre 2 ("h_p"). Le graphique radar ci-dessous (Fig. 111) représente les prédictions analytiques (points jaunes) et numériques (points rouges) pour les neuf valeurs possibles du couple (paramètre 3 ("e_p"); paramètre 4 ("e_a")).

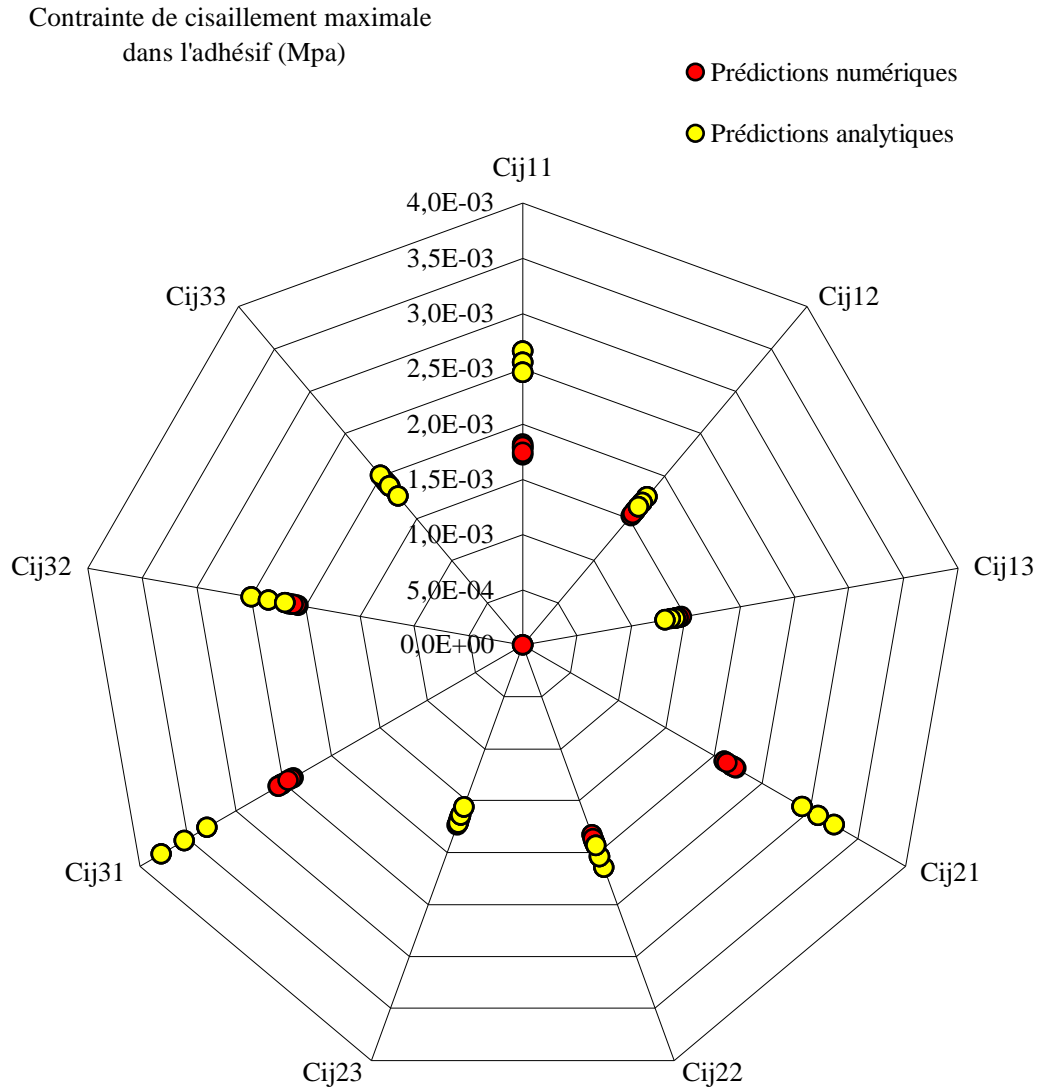


Fig. 111 : Contrainte maximale de cisaillement dans l'adhésif pour les valeurs possibles de (e_p, e_a)

Les prédictions sont relativement groupées pour chaque valeur du couple (e_p, e_a) et ceci quelques soient le mode de prédiction et la valeur du couple (l, h_p) . Ce dernier couple apparaît ainsi comme peu influent quant aux contraintes de cisaillement dans l'adhésif. Le couple (e_p, e_a) semble gérer à lui seul l'état de contrainte dans le joint d'adhésif. Il est notable que l'écart entre prédictions analytiques et numériques est d'autant plus faible que l'épaisseur d'adhésif de part et d'autre du plat est grande. Ceci est également remarquable sur les graphiques suivants (Fig. 112 et Fig. 113) représentatifs de la contrainte atteinte dans l'adhésif selon le couple (e_p, e_a) . Les deux approches s'accordent à montrer que les contraintes de cisaillement dans l'adhésif sont d'autant plus faibles que le joint est épais et que le plat est fin.

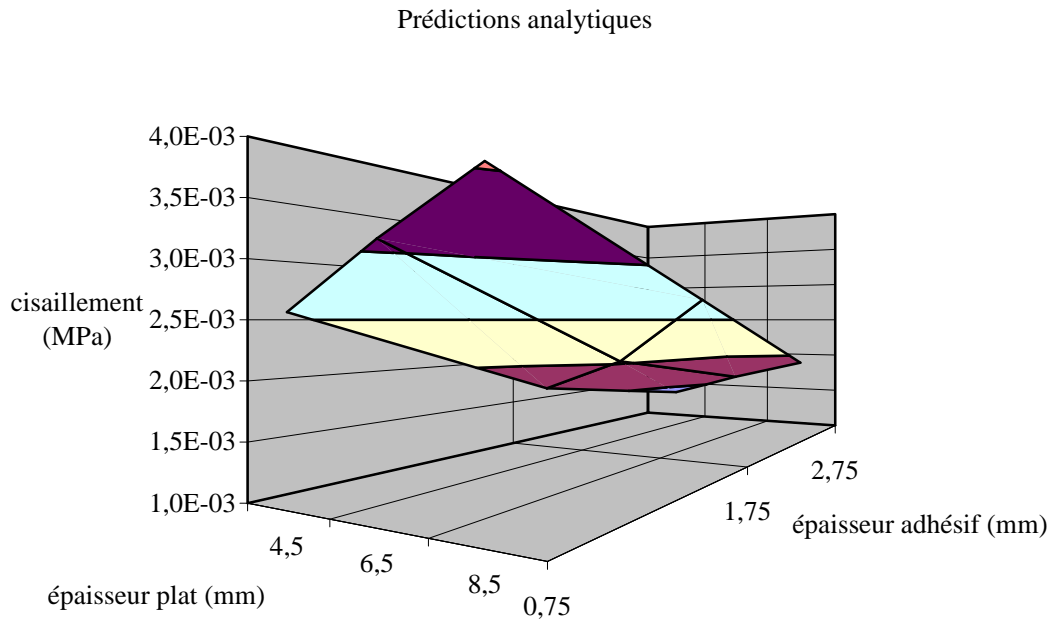


Fig. 112 : Prédictions analytiques selon les paramètres e_p et e_a .

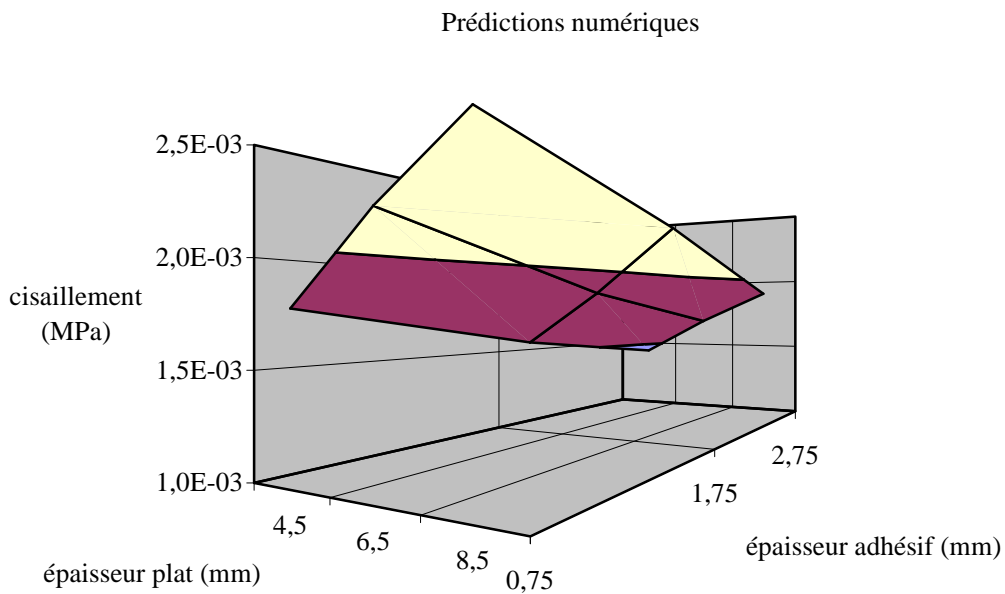


Fig. 113 : Prédictions numériques selon les paramètres e_p et e_a .

Les résultats de la formulation analytique proposée apparaissent ainsi satisfaisants. Si sa fiabilité dépend de l'épaisseur d'adhésif de part et d'autre du plat, les tendances reflétées correspondent à celles issues de la modélisation élastique éléments finis. La mise à l'épreuve et éventuellement la calibration de cette approche originale par une base de données expérimentales constitue la prochaine étape à son développement.

V.2.2. Renforcement global

Il s'agit ici de consolider l'élément selon la totalité de sa portée. Cette nécessité peut par exemple découler d'une évolution des contraintes d'utilisation de la structure. Compte tenu de l'étendue de la zone de renforcement, l'élément peut être traité comme une poutre composite. En ce qui concerne la détermination des contraintes axiales au sein des différents composants, le paragraphe b) de la section précédente (V.2.1) s'applique intégralement. En ce qui concerne les contraintes de cisaillement, l'absence de singularité selon la portée de l'élément rend leur existence tributaire de celle d'un effort tranchant. Le cas échéant, la théorie des poutres composites en permet une estimation précise [57].

CONCLUSION

Les interventions d'assemblage (réparation) et de renforcement à la résine revêtent des formes diverses et variées. Chaque spécialiste opère au moyen de matériaux et selon une méthodologie qui lui sont propres. L'étendue de ce domaine d'activités rend délicat l'établissement de procédures universelles. Cette difficulté est particulièrement patente au niveau des approches de dimensionnement qui, lorsqu'elles ont le mérite d'exister, ne font actuellement pas figure de règlement. Le refus de la proposition de GIROD en vue de l'introduction des goujons collés dans l'Eurocode 5 en est l'illustration. Pourtant basée sur une approche théorique solide et un programme expérimental considérable, la formulation présentée n'a pas été jugée suffisamment représentative pour être validée de façon définitive.

Les assemblages par goujons collés sont pourtant les seuls à avoir bénéficié d'un intérêt prononcé en terme de recherche et développement. Il eut été dommage de rester sur ce constat d'échec. Un retour sur les simplifications effectuées afin de rendre l'approche GIROD la plus commode possible a permis de déceler certaines raisons de ce refus et d'y remédier en partie. Certaines grandeurs, telles la résistance au cisaillement et l'énergie de rupture de l'adhésif, ont en effet été établies sur la base de résultats expérimentaux particuliers puis ont été irrévocablement figées. Cette dernière opération est critiquable. Comment ces deux paramètres, très largement dépendants de la méthodologie employée et des matériaux retenus, peuvent ils être fixés dans une optique de fiabilité ? Il est apparu plus opportun, après validation de la base théorique disponible, de fournir aux professionnels les moyens de caractériser leurs interventions et de personnaliser eux même leur approche de dimensionnement. Les travaux effectués ont ainsi été orientés vers un allègement du programme expérimental à mener dans le cadre d'un laboratoire minimum. L'influence et la prépondérance d'un paramètre géométrique, le diamètre de perçage, a en ce sens été démontré. Deux approches de conception, basées sur des modélisations analytiques et éléments finis, ont finalement été proposées.

Les autres modes d'intervention n'ont fait l'objet que de travaux très sporadiques à l'échelle européenne. Les méthodologies employées pour la caractérisation des assemblages par goujons collés peuvent servir de point de départ aux travaux portant sur les autres modes de réparation. Des similitudes au niveau des modes de rupture ont en effet pu être observées au cours d'une campagne expérimentale menée dans le cadre du projet européen LICONS. Celle-ci a par ailleurs permis de démontrer l'intérêt de jonctions à 45° en la présence d'un effort tranchant. Ce détail constructif confère au bois une participation accrue en terme de transmission des efforts ce qui permet de soulager les profilés et la résine. Il permet en outre de se prémunir d'une rupture soudaine et dramatique du bois en traction transverse. La plateforme LICONS a également servi de support à l'étude d'un autre détail constructif : la réalisation de perçage lamés lors de la mise en œuvre de goujons collés. Une approche analytique a été proposée quant à l'évaluation et à l'optimisation du gain de résistance engendré par cette pratique. Validée au moyen d'un nombre limité de résultats expérimentaux, son développement passe par une mise à l'épreuve plus soutenue. En ce qui concerne le renforcement des éléments de structure, les cas d'interventions globales et locales ont été distingués. Si le premier peut être caractérisé via la théorie des poutres composites, le second a été abordé par une approche analytique originale. Conduite en élasticité linéaire,

celle-ci a d'ores et déjà été vérifiée au moyen d'un modèle éléments finis mais doit maintenant être soumise au révélateur d'un programme expérimental.

Il nous semble que les travaux rassemblés dans cet ouvrage sont le reflet d'une période charnière quant à la caractérisation scientifique et technique des assemblages et renforcements à la résine. En aval de recherches de longue haleine sur les goujons collés, ils ont été réalisés avec la volonté d'évoluer le plus rapidement possible vers une validation définitive de ce type d'assemblage. En amont de l'extension de cette base théorique aux autres catégories d'intervention, les approches originales (ou du moins novatrices) qu'ils renferment se doivent maintenant d'être mises à l'épreuve pour évoluer vers une application en dimensionnement. Inquisiteurs d'une part et initiateurs d'autre part, ils présentent la dualité d'ouvrir de larges horizons ou, au contraire, de couper court aux perspectives inhérentes à cette thématique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **C. LE GOVIC.** “*Les assemblages dans la construction bois*”, Edition CTBA, 1995.
- [2] **STEP.** “*Structures en bois aux états limites : introduction à l’Eurocode 5 : matériaux et bases de calculs*”, Editions Eyrolles, 1996
- [3] **D. LORETTE.** “*Protections Préventives des Bois de Construction*”, Editions Arbora, 1994.
- [4] **IRABOIS.** “*Collage structural*”, Annales GC Bois, French Journal of Timber Engineering, numéro spécial, 1999.
- [5] **J.G BROUGHTON, A.R. HUTCHINSON.** “*Adhesive systems for structural connections in timber*”, International Journal of Adhesion and Adhesives, Elvesier Editions, 2001.
- [6] **ROTAFIX LTD.** “*Schematic designs for upgrading structural timbers*”, Commercial document, Rotafix Ltd, copyright, 1998.
- [7] **E. CUVILIER.** “*COLORETIM - Composite Local REinforcement for TIMber structures*”, Technical Report, LRBB, 2001
- [8] **ROTAFIX LTD.** “Resiwood[®] system, Rotafix Fulcrum rod”, Technical data sheet, Products 3644 and 3744, Rotafix Ltd.
- [9] **J.L. COUREAU.** “*Renforcement local d’éléments de structures bois par des matériaux composites*”, Thèse de l’Université Bordeaux 1, 2002.
- [10] **M. INOUE, K. TANAKA, O. SUMIOKA, Y. GOTO, T. YOSHIOKA.** “*Tension strength of joints composed of adhesive and bamboo with small section*”, Proceedings of the International RILEM Symposium, Stuttgart, Germany, 2001.
- [11] **PREN 124-4.1.** “*Structures en bois – Bois lamellé-collé – Partie 4 : Exigences*”, CEN TC 124, Projet de norme européenne, 2000.
- [12] **EN 1995-1-1.** “*Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois – Partie 1,1 : Généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments*”, Norme européenne, 2004.

- [13] **S. AICHER, G. DILL-LANGER.** “*Influence of moisture, temperature and load duration on performance of glued-in rods*”, Proceedings of the International RILEM Symposium, Stuttgart, Germany, 2001.
- [14] **J. SURLEAU.** “*Durée de vie des assemblages par goujons collés sous sollicitations mécaniques et hygrothermiques*”, Thèse de l’Université Bordeaux 1, 2004.
- [15] **AFNOR DTU P 92-703.** “*Règles bois feu 88*”, Document technique unifié, 1988
- [16] **IRABOIS,** “*Les cahiers d’Iraboïs - Guide professionnel sur les assemblages : tiges ou goujons collés de grandes dimensions*”, 1999.
- [17] **PREN 1995-2.** “*Eurocode 5 , Design of timber structures - Part2: Bridges*”, Projet de norme européenne, 2003.
- [18] **C. BENGTSSON et C.J. JOHANSSON.** “*GIROD – Glued-In ROD for timber structures*”, Technical report, Swedish National Testing and Research Institute, 2002
- [19] **C. FAYE.** “*Durée de vie des assemblages par goujons collés pour du lamellé-collé sous sollicitations mécaniques et hygrothermiques*”, Rapport Technique, SNCCBLC, CTBA, LRBB, 2004.
- [20] **C. BERTOLINI CESTARI, T. MARZI, E. SEIP, P. TOULIATOS.** “*Interaction between Science, Technology and Architecture in Timber Construction*”, Proceedings of CULTURE 2000 Project, Elsevier Editions, Heritage series, 2004.
- [21] **D. SMEDLEY, J. TATMAN.** “*LICONS – Low Intrusion CONservation Systems for timber structures*”, Technical Report, Rotafix Ltd, 2005 (à paraître)
- [22] **J.G. BROUGHTON, A.R. HUTCHINSON.** “*Effect of timber moisture content on bonded-in rods*”, Construction and Building Materials, Elsevier Editions, 2001
- [23] **J.R. GILFILLAN, S.G. GILBERT, G.R.H. PATRICK.** “*The use of FRP Composites in Enhancing the Structural Behaviour of Timber Beams*”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Volume 22, N° 15, 2003.
- [24] **P. ALAM.** “*The reinforcement of timber for structural applications and repair*”, PhD Final Report, University of Bath, 2004.

- [25] **V. GARDELLE.** “*Développement des méthodes prédictives de la résistance à court terme d’éléments de structure renforcés localement*”, Annales de l’Ecole Supérieure du Bois, 2003.
- [26] **D. GUITARD.** “*Mécanique du matériau bois et composites*”, Cépadues Editions, 1987
- [27] **E. GHERI.** “*Ductile behaviour and group effect of glued-in steel rods*”, Proceedings of the International RILEM Symposium, Stuttgart, Germany, 2001.
- [28] **E. SERRANO.** “*Adhesive Joints in Timber Engineering, Modelling and Testing of Fracture Properties*”, Doctoral dissertation, Lund University, 2000.
- [29] **E. SERRANO.** “*GIROD – An Experimental Study of Softening Behaviour*”, Materials and Structures, Volume 34, 2001
- [30] **P. FRANÇOIS.** “*Plasticité du bois en compression multiaxiale, Application à l’absorption d’énergie mécanique*”, Thèse de l’Université Bordeaux 1, 1992.
- [31] **P. GARCIA.** “*Essais de traction d’assemblages par goujons collés*”, Rapport d’essai N°F-R/68/02/225/235/03/015, CTBA, 2003.
- [32] **P. GARCIA.** “*Essais de traction complémentaires d’assemblages par goujons collés*”, Rapport d’essai N°F-R/68/03/037, CTBA, 2003.
- [33] **P. GARCIA.** “*Essais de cisaillement complémentaires d’assemblages par goujons collés*”, Rapport d’essai N°F-R/68/03/037/1, CTBA, 2003.
- [34] **P.J. GUSTAFSSON, E. SERRANO, S. AICHER, C.J. JOHANSSON.** “*A strength design equation for glued-in rods*”, Proceedings of the International RILEM Symposium, Stuttgart, Germany, 2001.
- [35] **S. AICHER.** “*Characteristic axial resistance of threaded rods glued-in spruce dependant on adhesive type – A complementary database for the GIROD project*”, Otto Graf Institute, University of Stuttgart, Germany, 2001.
- [36] **L. FELIGIONI, P. LAVISCI, G. DUCHANOIS, M. DE CIECHI, P. SPINELLI.** “*Influence of glue rheology and joint thickness on the strength of bonded-in rods*”, Holz als Roh- und Werkstoff, 61, 2003.

[37] **P. LAVISCI.** “*Pathologies des structures en bois. Analyse des caractéristiques physiques et mécaniques des collages structuraux pour la restauration des charpentes.*”, Thèse de l’Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2001.

[38] **H.J. BLASS, B. LASKEWITZ.** “*GIROD - Effect of distance between rods and between rods and timber edge on the axial strength*”, Internal report, Universität Fridericiana Karlsruhe, 2001.

[39] **O. VOLKERSEN,** “*Die nietkraftverteilung in zupbeanspruchten nietverbindungen mit konstanten*”, Luftfahrtforschung, volume 15, 1938
Extrait de: **RD. ADAMS, J. COMYN, W.C. WAKE.** “*Structural Adhesive Joints in Engineering*”, Chapman & Hall, 1997.

[40] **O. VOLKERSEN,** “*Recherches sur la théorie des assemblages collés*”, Construction Métallique, volume 4, 1965

[41] **M. GOLAND, E. REISSNER.** “*The stresses in cemented joints*”, Journal of Applied Mechanics, Volume 11, 1944.

[42] **V. RAVET.** “*Application de la méthode de la fissure fictive au cisaillement des assemblages collés*”, Thèse de l’Université Bordeaux 1, 1994.

[43] **P.J. GUSTAFSSON.** “*Analysis of generalized Volkersen-joints in terms of non-linear fracture mechanics*”, Proceedings CIB-W18(A), meeting 20, Dublin, Ireland, 1987.

[44] **H. WERNERSSON.** “*Wood adhesive bond – fracture softening properties in shear and tension*”, TVSM3012, Lund Institute of Technology, 1990.

[45] **H. RIBERHOLT.** “*Glued bolts in glulam proposals for cib code*”, Proceedings CIB-W18, meeting 21, Parksville, Canada, 1988.

[46] **S. AICHER, P.J. GUSTAFSSON, M. WOLF.** “*Load displacement and strength of glued-in rods in timber influenced by adhesive, wood density, rod slenderness and diameter*”, Proceedings of the International RILEM Symposium on Timber Engineering, Stockholm, Sweden, 1999.

[47] **P. LAVISCI, B. PIZZO.** “*Embedding tests according to EN 383*”, LICONs internal report, Legnodoc, 2005.

[48] **H. RIBERHOLT, B. ENQUIST, P.J. GUSTAFSSON, R.B. JENSEN.** “*Timber beams notched at the support*”, TVSM-7071, Lund University, Sweden, 1991.

- [49] **V. GARDELLE, P. MORLIER.** “*Les assemblages par goujons collés. Partie II : Prédiction de la résistance à l’arrachement d’un goujon collé parallèle au fil du bois*”, Annales GC Bois, French Journal of Timber Engineering, Volume 7, 2004.
- [50] **R.STREICHER.** “*Einflüsse wechseiner Temperaturen und Luftfechtigkeiten auf geklebte Brettschichtholz – Stahlplatten – Verbindungen in tragenden Konstruktionen*”, Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen grades, Universität Hamburg, 1994.
- [51] **BPEL 91.** “*Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites*”, Editions Eyrolles, 1993.
- [52] **L.J. HART-SMITH.** “*Adhesive-bonded double-lap joints*”, CR-112235, NASA, Langley Research Center, USA, 1973.
- [53] **A. BERNASCONI.** “*Axially loaded glued-in rods for high capacity joints – Behaviour and resistance*”, Proceedings of the International RILEM Symposium, Stuttgart, Germany, 2001.
- [54] **A. COINTE, P. CASTERA, P. GALIMARD.** “*Reliability assessment of an old timber structure : a case study*”, PRObabilistic MOdels In Timber Engineering, Arcachon, France, 2005
- [55] **J.L. JENSEN, P.J. GUSTAFSSON, H.J. LARSEN.** “*A tensile fracture model for joints with rods or dowels loaded perpendicular-to-grain*”, CIB-W18, meeting 36, Colorado, USA, 2003
- [56] **V. GARDELLE.** “*Experimental database and first considerations on several low intrusion conservation systems for timber structures*”, LICONs internal report, LRBB, 2005.
- [57] **D. GAY.** “*Matériaux composites*”, Traité des Nouvelles Technologies, Série Mécanique, Editions Hermes, 1991
- [58] **J. MALZBENDER, R.W. STEINBRECH.** “*Mechanical properties of coated materials and multi-layered composites determined using bending methods*”, Surface and Coating Technology, 176, 2004.
- [59] **J.G. BROUGHTON, A.R. HUTCHINSON.** “*Pull-out behaviour of steel rods bonded into timber*”, Materials and Structures, Volume 34, 2001
- [60] **J.L. JENSEN, A. KOIZUMI, T. SASAKI, Y. TAMURA, Y. LIJIMA.** “*Axially loaded glued-in hardwood dowels*”, Wood Science and Technology, Volume 35, 2001.