



HAL
open science

Pathologies des structures en bois : analyse des caractéristiques physiques et mécaniques des collages structuraux pour la restauration des charpentes

Paolo Lavisici

► **To cite this version:**

Paolo Lavisici. Pathologies des structures en bois : analyse des caractéristiques physiques et mécaniques des collages structuraux pour la restauration des charpentes. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2001. Français. NNT : 2001NAN10196 . tel-01748673

HAL Id: tel-01748673

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748673v1>

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique
54500 VILLERS-LES-NANCY



UHP (Université Henri Poincaré, NANCY 1)
Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois
Ecole Doctorale RP2E

THESE

Présentée par Paolo LAVISCI

Pour l'obtention du grade de
Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1
en Sciences et Technologies Industrielles – Sciences du Bois

Titre :

" PATHOLOGIES DES STRUCTURES EN BOIS. ANALYSE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES COLLAGES STRUCTURAUX POUR LA RESTAURATION DES CHARPENTES."

Soutenue publiquement le 14 Novembre 2001 devant la commission d'examen :

Messieurs :	Professeur BERTI S. (IRL/CNR, Italie),	Rapporteur et examinateur
	Professeur MARCHAL R. (ENSAM Cluny),	Rapporteur et examinateur
	Professeur PIZZI A. (UHP / UHP / ENSTIB)	Examineur
	Professeur SANDOZ J-L. (EPFL, Suisse)	Examineur
	DUCHANOIS G., MDCF (UHP / ENSTIB)	Examineur
	Professeur TRIBOULOT P. (UHP / ENSTIB)	Directeur de thèse

LERMAB, Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois
UMR INRA / ENGREF / UHP-ENSTIB N°1093
Equipe Génie Civil Bois, 27 rue du Merle Blanc, BP 1041,
54500 VILLERS-LES-NANCY cedex 9. FRANCE
BIBLIOTHEQUE SCIENCES NANCY 1



D

095 152339 3

	Page
SOMMAIRE	II
Remerciements	IV
Plan des publications réalisées et en cours	V
1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	1
1.1. Le contexte de la conservation du patrimoine	1
1.2. Les techniques de restauration	4
1.2.1. Classification des systèmes « tiges collées »	6
1.2.2. Problèmes techniques liés à la restauration utilisant des colles	9
1.3. Pathologies des structures	12
1.3.1. Le diagnostic	12
1.3.2. Pathologies introduites par les systèmes de consolidation	20
1.4. Les normes techniques pour l'évaluation des colles structurales	33
1.5. Conclusions	35
2. OBJECTIF DU TRAVAIL	36
3. EXPERIMENTATION	38
3.1. Formulation des colles	38
3.2. Essais	39
3.2.1. Cisaillement à l'interface bois-colle – Eprouvette à simple entaille	39
3.2.1.1. Bibliographie spécifique	39
3.2.1.2. Eprouvette à simple entaille (méthode indirecte)	40
3.2.1.3. Résultats	46
3.2.2. Cisaillement à l'interface bois-colle – Eprouvette à double entaille	54
3.2.2.1. Introduction et bibliographie spécifique	54
3.2.2.2. Eprouvette à double entaille	57
3.2.2.3. Résultats	61
3.2.3. Délamination à l'interface bois-colle	77
3.2.3.1. Bibliographie spécifique	77
3.2.3.2. Eprouvette de délamination	77
3.2.3.3. Résultats	78
3.2.4. Comportement des assemblages par tiges collées	82
3.2.4.1. Bibliographie spécifique	82
3.2.4.2. Loi de comportement des colles	85
3.2.4.3. Eprouvette d'extraction	86
3.2.4.4. Résultats	88
3.2.5. Stabilité dimensionnelle thermique des colles	94
3.2.5.1. Bibliographie spécifique	94
3.2.5.2. Développement de la méthode	95
3.2.5.3. Résultats	97

3.2.6. Propagation de la fissure à l'interface bois-colle	104
3.2.6.1. Bibliographie spécifique	104
3.2.6.2. Eprouvette de propagation de la fissure à l'interface	107
3.2.6.3. Résultats	107
3.2.7. Fluage des colles	110
3.2.7.1. Bibliographie spécifique	110
3.2.7.2. Eprouvette de fluage	113
3.2.7.3. Résultats	115
4. EXPLOITATION DES RESULTATS	116
4.1. Coefficient de compatibilité à l'interface bois-colle	116
4.2. Calcul des assemblages avec tiges collées	121
5. EXEMPLES D'APPLICATIONS SUR CHANTIERS	126
6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	137
BIBLIOGRAPHIE	139

Mes plus vifs remerciements vont :

aux Membres du Jury, Professeurs Berti, Duchanois, Marchal, Pizzi, Sandoz, Triboulot

aux Organismes qui ont financé cette étude dans le but d'améliorer les conditions de conservation des bâtiments faisant l'objet du patrimoine, en Italie et partout ailleurs en Europe:

- Mapei Spa, Via Cafiero 22 – 20158 MILANO (www.mapei.it)
- Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca
P.le Kennedy - 00144 ROMA (www.miur.it)

aux Institutions de recherche qui ont supporté ce travail avec leurs expertises et leurs équipements:

- Istituto per la Ricerca sul Legno/Consiglio Nazionale delle Ricerche,
Via Barazzuoli 23 – 50136 FIRENZE
- Université Henri Poincaré, ENSTIB, LERMAB

aux Professeurs qui m'ont beaucoup conseillé, suivi et encouragé:

Ceccotti, Deglise, Gambetta, Janin, Masson, Merlin, Mettem, Rizzo, Uzielli, Zanuttini

aux Chercheurs qui ont partagé avec moi cet effort :

Brunetti, De Capua, De Ciechi, Follesa, Franchini, Gagliano, Lauriola, Lazzari, Macchioni, Mannucci, Misani, Moschi, Pizzo, Pozzi, Scarsi, Sozzi

aux Elèves qui ont choisi un sujet lié à cette recherche pour leur travail de Maîtrise :

De Zordi, Feligioni, Fragnelli, Megna, Romano

***Ce travail est dédié à la mémoire de Raffaello Nardi Berti,
mon premier Maître en Sciences du Bois et mon ami.***

PLAN DES PUBLICATIONS

Le plan suivant est prévu, et partiellement réalisé :

CHAPITRE	PUBLICATION
3.2.1 Eprouvette à simple entaille	• Holz als Roh- und Werkstoff 59 (2001) 145-152 • soumis à Holz als Roh- und W. (Nov. 2001)
3.2.2 Eprouvette à double entaille	
3.2.3 Délamination	Holz als Roh- und Werkstoff 59 (2001) 153-154
3.2.4 Tiges collées	soumis à Holz als Roh- und W. (Nov. 2001)
3.2.5 Stabilité dimensionnelle thermique	soumis à Holz als Roh- und W. (Juillet 2001)
3.2.6 Propagation de la fracture	soumis à Holz als Roh- und W. (Nov. 2001)
3.2.7 Fluage des colles	
4.1 Coefficient de compatibilité	soumis à Holz als Roh- und W. (Nov. 2001), en préparation pour Arkos
4.2 Calcul des assemblages	soumis à Holz als Roh- und W. (avec 3.2.4 tiges collées, Nov. 2001) ; en préparation pour Arkos
Exemples d'applications	en préparation pour Arkos

Les publications sur Holz als Roh- und Werkstoff sont en langue anglaise.

Les publications sur Arkos sont en langue italienne.

Ces deux revues sont dotées d'un Comité de lecture pour l'évaluation des publications soumises.

1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Outre la bibliothèque de l'ENSTIB, quatre bibliothèques spécialisées ont été directement consultées au début de ce travail:

- IRL (Istituto per la Ricerca sul Legno, Italie) ;
- CTBA (Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, France);
- BRE (Building Research Establishment, Angleterre) et
- TRADA (Timber Research and Development Association, Angleterre).

Une recherche en ligne avec TREECAB-WEB a permis d'effectuer des recherches bibliographiques trimestrielles sur les nouvelles acquisitions du CAB (Commonwealth Agricultural Bureau), qui prend en compte toutes les revues et actes des congrès du domaine « bois » dans ses « Forest Products Abstracts ».

Une série de contacts directs (commissions normatives auxquelles je participe pour l'Italie, participation aux congrès, séminaires et salons spécialisés...) a permis de donner à cette étude bibliographique une forme la plus exhaustive possible.

L'ensemble des publications prises en compte pour le présent travail (> 500 titres utiles) est organisé en *database* pour une consultation rapide.

Une recherche de brevets, effectuée pour MAPEI SpA, n'est pas décrite dans ce texte faisant l'objet d'une clause d'exclusivité.

1.1 LE CONTEXTE DE LA CONSERVATION DU PATRIMOINE

Les structures en bois sont présentes dans la plupart des bâtiments anciens, elles sont considérées comme une partie fondamentale du patrimoine architectural dans la plupart des pays du monde. Souvent ces structures ont une fonction statique importante dans le bâtiment, mais aussi une valeur artistique élevée (parties décorées, sculptures, bois peints etc ...). Elles ont aussi une importance historique pour le témoignage qu'elles offrent à propos des dates de construction et des techniques utilisées par les charpentiers à travers les siècles et les civilisations. Après une période de forte diffusion des structures en acier et béton armé (1920-1970), le bois lamellé-collé a donné aux constructeurs des nouvelles raisons d'intérêt grâce à ses dimensions et formes, à sa résistance au feu et aux séismes, à son prix.

Les structures en bois sont susceptibles de dégradation dans le temps. La dégradation est due à plusieurs causes et se manifeste par une pathologie parfois complexe, résultant de nombreuses interactions (Almesberger, Lucchini, 1997; Ceccotti, Uzielli 1982). Le bois lamellé-collé, plus récent, peut également présenter différentes formes de pathologies (Calvi, 1998; Della Giustina, 1985 ; Radovic e Goth, 1992).

Récemment, la tendance visant à récupérer des bâtiments anciens dans les centres-ville pour les affecter au logement, à des bureaux et des espaces sociaux est devenue de plus en plus importante: en Italie les marchés dans le domaine du bâtiment sont désormais principalement consacrés à la restauration (53%) plutôt qu'à des constructions nouvelles (47%) (ANCE, 1999; Charlot, Valdieu, 1990). Cela constitue un chiffre d'affaires très important, qui a contribué à créer des compétences, de la main-d'œuvre et des produits spécifiques aux exigences posées par la restauration.

La France, l'Angleterre, les Pays Bas et l'Espagne présentent une approche des structures anciennes en bois similaire et basée sur la restauration (Le Bâtitseur Européen, 1992). Par contre, en Allemagne, Autriche et Japon la substitution est souvent l'option préférée.

Les bâtiments anciens sont soumis à une autorité spécifique, lorsqu'ils sont classés comme appartenant au « patrimoine ». Il s'agit souvent d'une autorité qui est complémentaire ou supérieure à celle du Génie Civil et de la construction, et qui exerce un contrôle sur les projets, les produits, la mise en oeuvre, dans le but d'assurer le plus possible la conservation de l'authenticité du bâtiment sur tous ses aspects (schéma statique, fonctions des lieux, matériaux employés, décorations..). Chaque Pays a ses règles et des organismes différents (Bellini, Bassani, 1998), et au niveau de la CE il n'existe pas, pour le moment, une forme d'harmonisation des approches qui peut devenir obligatoire pour les Etats membres de la Communauté (comme c'est le cas pour les Directives ou les normes techniques qui en dérivent). Cependant, le ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) est devenu une référence importante au niveau des principes techniques. Dans le cas des structures anciennes en bois, le document « Principles for the Preservation of the Historic Timber Structures » (ICOMOS, 1999) donne les recommandations suivantes (une synthèse est présentée ici, à l'exception de la partie relative à la restauration utilisant des colles époxy, traduite intégralement car intéressant directement le sujet de la thèse) :

INSPECTIONS, INVENTAIRE ET DOCUMENTATION

1. Faire un inventaire complet des matériaux constituant la structure.
2. Réaliser un diagnostic complet et soigné des causes de dégradation avant toute intervention, basé sur les relevés, inspections, mesures.

CONTROLE ET MAINTENANCE

3. Mettre en place un contrôle et une maintenance réguliers.

INTERVENTIONS

4. Maintenir l'authenticité et l'intégrité, en respectant les valeurs historiques et l'intégrité physique de la structure.
5. Réaliser des interventions réversibles, si cela est techniquement possible, ou bien préjuger des travaux futurs et ne pas empêcher l'accès aux évidences techniques incorporées dans la structure.
6. Réaliser les interventions au minimum nécessaires, bien que les actions de démontage soient acceptées.
7. Chercher à conserver tous les composants de la structure, même les moins importants, avec la même attention et respecter dans les remplacements les matériaux et techniques originelles.
8. Inventorier et conserver les pièces remplacées.

REPARATIONS ET REMPLACEMENTS

9. Il est possible de remplacer des bois, tout en respectant les valeurs historiques et esthétiques : lorsque cela est possible, utiliser la même essence, qualité, état de surface et ferrures employées à l'origine.
10. Si les parties de substitution sont distinctes des parties originelles, elles sont acceptées, en évitant d'imiter l'aspect dégradé et déformé du bois substitué. Les techniques modernes de coloration sont acceptées.

11. Les parties de substitution doivent être marquées discrètement, pour être reconnaissables dans le futur.

RESERVES FORESTIERES HISTORIQUES

12. L'institution et la protection de réserves forestières où il est possible d'obtenir du bois de substitution avec des caractéristiques appropriées doivent être encouragées.

MATERIAUX ET TECHNOLOGIES CONTEMPORAINES

13. **Les matériaux contemporains, comme les résines époxy et les techniques, comme le renforcement structural en acier, doivent être choisis avec la plus grande attention, et seulement dans les cas où la durabilité et le comportement structural des matériaux et des techniques de construction soit prouvé de façon satisfaisante sur une période suffisamment longue.** Les systèmes de chauffage et de détection d'incendies peuvent être installés.
14. L'emploi de produits de préservation doit être contrôlé avec attention, et devrait être utilisé seulement s'il apporte une sécurité garantie.

EDUCATION ET FORMATION

15. Le renouvellement des valeurs liées à la signification culturelle des anciennes structures en bois à travers des programmes d'éducation est une exigence essentielle d'une politique de préservation et de développement durable.

La restauration des structures anciennes en bois (charpentes, poutres, poteaux...) fait pourtant l'objet d'une activité multidisciplinaire, avec une grande importance en termes culturels, économiques et de sécurité dans l'emploi de la structure (Mor, 1998; Taupin, 1998). Typiquement, la restauration des structures en bois d'un bâtiment important demande la mise en place et la coordination d'une équipe d'experts (architectes, historiens de l'art, ingénieurs, pathologistes...) pour la résolution de problèmes différents pour chaque cas. Par exemple, il s'est souvent avéré que la sécurité statique d'une structure complexe et de grande taille, existante depuis quelques centaines d'années, n'est pas vérifiée avec les techniques modernes de calcul (Mor, 1994; Spinelli, 1984, Tampone, 1986). En ce cas, les décisions à prendre ne sont pas simples, surtout si l'on souhaite sauvegarder autant que possible l'authenticité du bâtiment. Les principes décrits par ICOMOS sont devenus une base de jugement pour les conservateurs, qui doivent les traduire en pratique sans un support de normes techniques précises.

Dans le passé, les structures anciennes en bois ont été trop fréquemment substituées par des structures nouvelles ou intégrées avec des supports en acier ou béton armé, sur la base d'une évaluation technique et/ou économique trop rapide, malheureusement aussi, avec de graves conséquences dans de nombreux cas (comme la toiture de la basilique de S. Francesco d'Assisi, Italie).

Il est désormais avéré, qu'en général, la consolidation des anciennes charpentes en bois est la meilleure option dans un projet de restauration, parce qu'elle permet de répondre en plein aux finalités du projet en réduisant au minimum l'altération de l'authenticité des structures, des matières et des appareillages des monuments et de leurs structures porteuses (Tampone, 1996), sans pour autant faire augmenter les coûts de l'intervention.

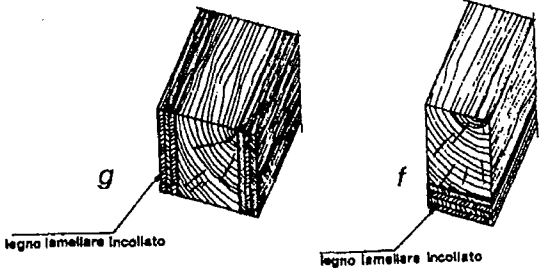
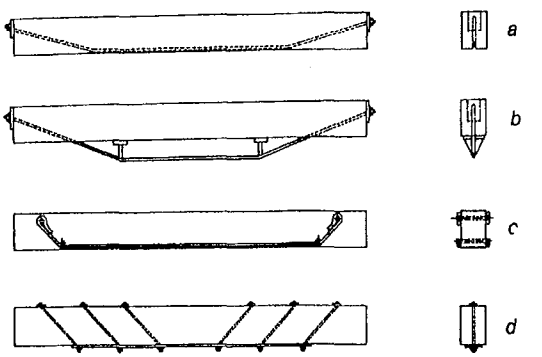
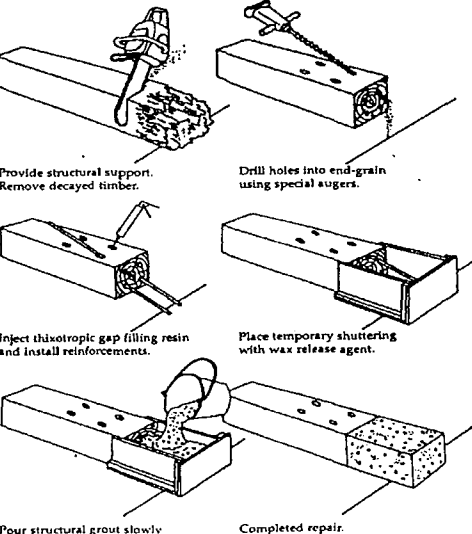
De nombreux exemples d'application correcte des techniques modernes de consolidation témoignent de la possibilité d'intervention rapide, efficace et esthétiquement agréable (Ceccotti, Marradi, 1995 - Ricottini, 1992 - Mettem e Davis, 1996), avec la conservation de la plupart des structures originelles du bâtiment.

1.2 LES TECHNIQUES DE RESTAURATION

Les systèmes de restauration actuellement employés peuvent être résumés en trois techniques principales :

- la **substitution du bois**. Pour permettre de respecter les matières premières et les techniques originelles d'assemblage, cette technique semble préférable du point de vue du conservateur, mais cette possibilité reste souvent théorique parce qu'elle trouve de fortes limitations en pratique dans les disponibilités des bois présentant des caractéristiques similaires. Le manque de main d'œuvre spécialisée et, surtout, la difficulté d'augmenter les charges admissibles sans modifier les sections limite également cette technique. Cette technique est donc souvent mise en place par la réalisation d'un « bois lamellé-collé » in situ. Cela implique l'emploi d'une colle, avec tous les problèmes de compatibilité et de durabilité que l'on discutera par la suite ;
- l'emploi de **soutis métalliques**. Ces soutis restent visibles à l'extérieur ou sont cachés dans la section. Ces systèmes offrent l'avantage d'une facilité de mise en place, mais impliquent une augmentation de poids et une modification du schéma statique original. Cela entraîne la nécessité de consolider ultérieurement les structures d'appuis et de considérer avec attention les problèmes de déformation et de durabilité aux zones de contact bois/métal ;
- la consolidation avec **tiges collées**. Actuellement, les techniques les plus diffusées prévoient l'emploi de colles époxy et de barres en acier, mais des colles acryliques (Berti, 1994) ou polyuréthanes (Kemmsies, 2000) ont été aussi testées. Les barres en acier filetées sont les plus fréquemment employées, les fibres de verre ou de carbone commencent à être préférées par quelques entreprises de restauration. Même si l'expérience avec ces systèmes n'est pas suffisante pour estomper les doutes à propos de leur durabilité, ils sont largement utilisés depuis plus de 20 ans (Phillips e Selwyn, 1978) et ont montré une très bonne attitude à résoudre d'une façon rapide et mécaniquement efficace les problèmes de consolidation. Dans plusieurs cas, la nature « chirurgicale » (assez localisée) de l'intervention permet de sauvegarder les parties saines des structures en bois, qui autrement auraient dû être substituées (Avent, 1992). Certains systèmes sont désormais développés en termes de nouvelles formulations de colles, de choix des barres et de techniques de mise en oeuvre : le Beta-Renofors a été le premier en Europe (Beta-Renofors, 1983), le WER (*Wood Epoxy Reinforcement*) est toujours populaire au Canada depuis son introduction (Stumes, 1982), le système Turrini-Piazza (1983) est diffusé en Italie pour la consolidation des planchers, les nouveaux systèmes de Rotafix sont en train de se diffuser en Angleterre grâce à un remarquable effort de développement.

Tableau 1 - Caractéristiques des principales techniques de consolidation (images d'après Tampone, 1996 et Mettem-Davis, 1996).

Technique	Avantages	Désavantages
<p>Bois lamellé-collé in situ</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Matière première identique • Techniques similaires aux traditionnelles • Partiellement réversible 	<ul style="list-style-type: none"> • Performance limitée • Intervention lente, difficile, chère • Peu visible (difficile de distinguer l'original)
<p>Supports métalliques</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Calculs faciles • Possible augmentation des charges de service • Facile de le distinguer par rapport à l'original • Bonne réversibilité, mais partielle 	<ul style="list-style-type: none"> • Très visible • Augmentation du poids de la structure • Nécessité de consolider les supports et/ou le bois d'ancrage • Le schéma statique change
<p>Tiges collées</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Rapide et économique • Maintient de l'aspect esthétique • Résistance et rigidité élevés (possible augmentation des charges de service) 	<ul style="list-style-type: none"> • Main d'œuvre spécialisée • Non réversible • Durabilité de l'assemblage en question • Calculs difficiles • Toxicité des produits

1.2.1 Classification des systèmes «tiges collées»

La croissance dans ce domaine d'activité comporte un développement continu de nouveaux **systèmes de consolidation**, qui sont la somme de *produits, de techniques d'application et de méthodes de calcul*.

Pourtant, leur classification est particulièrement utile pour la comparaison correcte de leurs performances : la comparaison de systèmes qui ont des finalités ou des domaines d'application différents pourrait être incorrecte. La classification, avec une bonne définition des termes, est une activité de base dans chaque projet de standardisation. Une classification assez complète est celle tracée par Mettem, Page, Zeki (1995), elle sera suivie dans ce travail comme schéma général .

Il est important d'avoir à l'esprit que, dans le cas des charpentes en bois, chaque projet est différent des autres pour des aspects plus ou moins importants, il est cependant possible de classer les systèmes de consolidation du point de vue de leur **finalité principale** :

- **augmentation des charges de service** sur la structure, selon qu'elle soit saine ou dégradée. Exemple typique : poutres de plancher dans une structure où la typologie d'emploi est changée, où les codes de calcul imposent des renforcements. Les conservateurs « purs et durs » s'opposent à ce type de transformations, mais elles sont de plus en plus fréquentes lorsque les propriétaires (mairies, banques, assurances...) doivent se conformer aux nouvelles règles de sécurité des bâtiments lors d'un changement d'affectation du bâtiment ;
- **rétablissement de la fonctionnalité** et de la capacité statique originelle des éléments dégradés. Exemple typique : têtes de poutres ou charpentes avec présence de pourriture. C'est la typologie d'intervention la plus diffusée, où les avantages des systèmes « colles plus barres » sont les plus évidents ;
- **masticage des fentes** sur bois non dégradé. Normalement, les fentes dues au retrait sont une caractéristique typique du bois massif en dimensions structurelles, et ne doivent pas être colmatées. Cependant, il existe des cas dans lesquels elles ont une propagation ou une position qui les rendent dangereuses pour la stabilité de la structure. Exemple typique : le cas où les fentes sont alignées sur le plan horizontal et diminuent la section du bois résistante en cisaillement. Dans ce cas, il est nécessaire de rétablir la résistance et la rigidité en cisaillement du bois, sans empêcher ses variations dimensionnelles.

En relation à la **fonction de la colle** dans les systèmes de consolidation, ces derniers peuvent être classifiés de la manière suivante :

- **systèmes de remplissage**, sous forme de mastic ou béton avec viscosité moyenne-élevée, parfois thixotropique pour éviter qu'ils puissent couler, normalement chargé avec poussières et/ou fibres. Pour cette fonction, le produit doit quand-même transmettre des efforts de cisaillement de l'ordre de grandeur de ceux supportés par le bois (valeurs caractéristiques 2-3 N/mm²);
- système **adhésif**, normalement sous forme de fluide avec une viscosité moyenne-faible apte à l'injection, parfois rendu thixotropique, éventuellement chargé avec des additifs, plastifiants, charges techniques, fibres. Le produit à utiliser pour les systèmes de ce type doit avoir une adhésion optimale soit sur le bois, soit sur la tige : une bonne résistance en cisaillement, en compression et en traction sont les caractéristiques de base indispensables. Pour les résines époxy, très rigides, les charges utilisées ont normalement la fonction d'améliorer la résistance en

compression et à l'impact, de réduire le volume de résine employé (pour des raisons de coût ou pour contrôler l'augmentation de chaleur au moment de la réaction exothermique entre les deux composants) ;

- systèmes **d'imprégnation** du bois dégradé. La colle est dans ce cas très fluide, capable d'être injectée, de mouiller le bois et de pénétrer facilement dans sa macro porosité (taille des lumens cellulaires, jusqu'à 1 μm). Le but de ce système est le rétablissement d'un niveau minimal de cohésion du bois fortement dégradé par la pourriture ou les insectes, spécialement sur les parties ayant une fonction esthétique importante.

La classification est aussi utile au niveau des **conditions d'exposition** de la structure, lesquelles ont une influence directe sur la durabilité des matériaux employés. L'Eurocode 5 définit 3 classes de service et 5 classes de durée de charges (tableau 2).

Tableau 2 - Classes de service et de durée de charge d'après Eurocode 5.

Classe de service	1 - INTERIEUR	2 - EXT. COUVERT	3 - EXTERIEUR
Description	Humidité de l'air supérieure au 65% seulement pour quelques semaines dans l'année.	Humidité de l'air supérieure au 85% seulement pour quelques semaines dans l'année.	Pleine exposition aux intempéries.
Humidité du bois	Environs 12%.	Moins de 18%.	Plus de 18%.

Classe de durée des charges	Permanent	Longue	Moyenne	Bref	Instantané
Description	> 10 ans	6 mois – 10 ans	1 semaine – 6 mois	< 1 semaine	accidentel

Les différentes conditions d'exposition imposent l'emploi de différents facteurs modificatifs des caractéristiques des matériaux dans le calcul. Aujourd'hui, il n'existe pas de facteurs spécifiques pour les résines époxy, pour lesquelles il serait nécessaire de considérer aussi d'autres facteurs de risque, tels que l'exposition aux risques d'incendies ou la proximité avec des sources de chaleur (chauffage, éclairage...).

Lorsque dans un système de consolidation les fonctions des colles sont multiples, les produits utilisés peuvent être différents. Le tableau 3 synthétise les différentes caractéristiques mécaniques nécessaires pour calculer les typologies principales d'assemblage avec colles et tiges, mais aussi avec colles et plaques.

Tableau 3 – Caractéristiques mécaniques nécessaires pour le calcul de différentes typologies d'assemblages en bois et tiges collées (d'après Mettem, Page, Zeki, 1995, modifié).

Typologie d'assemblage	Caractéristique de la colle			Caractéristique du joint colle/bois				
	Module d'élasticité	Résistance en			Avec tiges		Avec plaques	
		Comp.	Trac.	Cis.	Estrac.	Enf.	Cis. #	Cis. //
Base de colonne, tiges		X			X	X		
Colonne à ½ hauteur, plaques	X			X			X	X
Tête poutre, plaques	X	X		X			X	X
Tête poutre, tiges	X	X		X	X	X		
Poutre à ½ longueur, plaques	X	X		X			X	X
Chaîne de chevron, avec plaques	X		X	X			X	X
Joints de chevrons, plaques ou tiges	X	X	X	X	X	X	X	X

Notes:

- **Estrac.** = résistance à l'extraction de la tige collée
- **Enf.** = résistance à l'enfoncement de la tige collée
- **Cis. #** = résistance au cisaillement en direction perpendiculaire au fil du bois
- **Cis. //** = résistance au cisaillement en direction parallèle au fil du bois

Enfin, les différents systèmes de consolidation peuvent être classifiés par rapport au **type d'action** qu'ils doivent supporter :

- parties comprimées (principalement les colonnes)
- parties en flexion (poutres de différentes typologies)
- parties en traction (chaînage de chevrons, entrants)
- parties en flexion-compression (arbalétriers)
- joints en général.

Une description de détail sur les systèmes de consolidation couramment utilisés est présentée par Mettem, Page, Zeki (1995), Bertolini Cestari (1994), Tampone (1996), Mor (1994), Ceccotti e Marradi (1995), Oguey (1989), Cahiers techniques du bâtiment (1996); Newman (1997).

Parmi les **typologies** de colles époxy employées, les polymères suivants sont à la base des produits disponibles sur le marché:

- Les **résines** les plus fréquemment employées sont celles basées sur le bis-phénol "A" ou "F"
 - Les **durcisseurs** sont sélectionnés, en fonction des exigences d'application, entre :
 - polyamides (aliphatiques, cicloaliphatiques ou aromatiques) ;
 - polyamminoammides ;
 - polysulfides ;
 - polyeteramines.

Les **charges** peuvent être de type réactif, renforçant ou plastifiant. Parmi les renforçants et plastifiants, les plus fréquemment utilisés sont:

- micro sphères de type phénolique, en fibre de verre ou en "fillite" ;
- farine ou écaillés de bois, normalement bien séchées (des farines avec une humidité < 2% et une granulométrie bien contrôlée sont disponibles) ;
- sables de silice avec granulométrie fine.

1.2.2 Problèmes techniques liés à la restauration utilisant des colles

Une intervention sur les structures en bois présente de manière générale la difficulté de rendre compatible les exigences de la conservation avec celles permettant de garantir la pleine sécurité structurelle de l'ouvrage.

Les problèmes plus importants sont de type normatif (Spinelli, 1984; Tampone, 1996) : les codes applicables sont incomplets, en contradiction entre eux et manquent souvent de références techniques précises. Le projet devient donc souvent un « art » plutôt qu'une profession. Les Eurocodes sont en train de se substituer aux normes nationales dans tous les Pays, mais l'Eurocode 5 n'est pas applicable à la consolidation des structures anciennes. Il est désormais bien connu par les ingénieurs spécialisés qu'avec les règles de calcul aux états limites, des structures capables de passer des test de chargement direct ne seraient pas vérifiées par les calculs. Paradoxalement, des administrations ont décidé de ne pas effectuer certaines vérifications (par exemple les vérifications sismiques) sur les bâtiments anciens, si elles souhaitent les consolider vue l'urgence imposée par leur état de conservation.

L'autre grande source de difficulté, plus spécifique des systèmes utilisant des colles, est le manque d'informations sur leurs performances mécaniques et leur comportement dans le temps. L'interface colle-bois est très sollicitée par les variations dimensionnelles du bois, lorsque les conditions thermo-hygrométriques varient. Ce phénomène est général, et n'empêche pas les collages structurels d'avoir des performances satisfaisantes en extérieur.

L'hypothèse affirmant que les résines époxy, appliquées sur le bois, soient capables de le faire se déformer au delà de ses dimensions maximales (correspondantes au point de saturation des fibres) et que cette déformation soit donc la cause d'un système de micro-fentes avait été mise en évidence par différents auteurs comme Rowell et Ellis (1984) d'une façon scientifiquement intéressante, mais n'a jamais été reprise dans la littérature scientifique.

Une analyse étendue des problèmes relatifs aux différentes typologies d'intervention utilisant des résines époxy a été développée par Mettem, Page, Zeki (1995), et une analyse du comportement mécanique d'un système d'intervention plus spécifique a été menée par différents auteurs (Avent, 1992 – Buchanan et al., 1990 – Ceccotti et al., 1998 – Law ed Yttrup, 1989 – Muller e Roth, 1991).

Sur la base de notre analyse bibliographique ainsi que de notre propre expérience avec les entreprises de restauration, les problèmes soulevés sont loins d'être compatibles avec les exigences du chantier et des organismes officiels chargés du patrimoine et de la conservation. Il est évident que les différents sujets traités nécessitent un ensemble d'informations harmonisé dans des "lignes d'intervention" qui soient utilisables aussi bien par l'architecte et par l'ingénieur en toute sécurité.

À titre d'illustration des problèmes techniques qu'il est nécessaire de traiter on peut citer les travaux Mettem, Page et Zeki (1995). Ils ont développé une « révision

critique » des techniques actuellement utilisées, sachant que la plupart de celles-ci n'ont jamais été vérifiées selon les codes de calcul en vigueur, mais ont été simplement développées grâce à la pratique du chantier. Ces auteurs ont défini les objectifs suivants dans leurs analyses :

- 1) expliquer les performances structurales de chaque technique, en identifiant les efforts et les moments qui agissent sur les joints collés, expliquant comment les efforts sont transférés et en donnant un jugement sur l'aptitude de l'intervention du point de vue structurel ;
- 2) déterminer les propriétés des matériaux collés ou des colles qu'il est nécessaire de connaître pour mettre en œuvre la technique projetée, avec la mise en évidence de celles qui éventuellement ne sont pas encore disponibles ;
- 3) décrire les aspects qui pourraient limiter la durabilité de l'intervention, à moyen ou long terme.

Les travaux de Mettem, Page, Zeki (1995) présentent beaucoup d'autres exemples d'évaluation, mais le procédé logique d'analyse reste le même.

Le schéma et les photos présentés ici permettent de mettre en évidence la facilité de l'intervention utilisant des tiges collées.

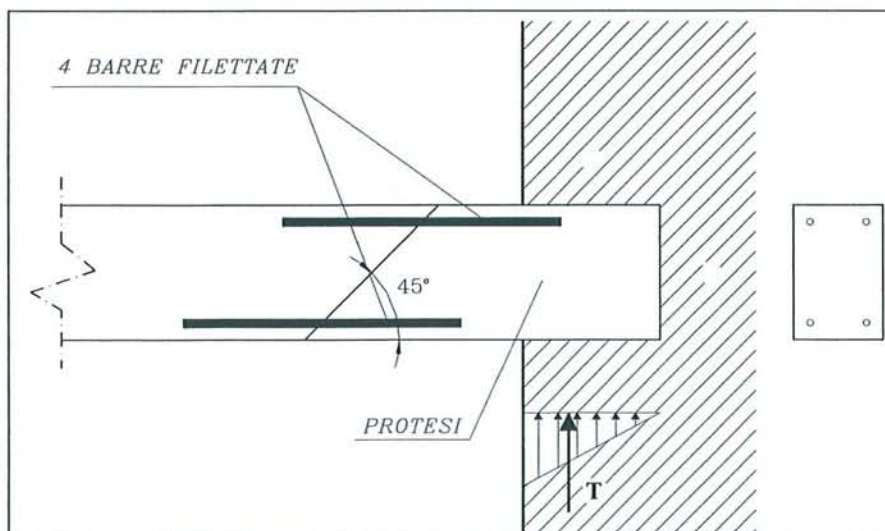
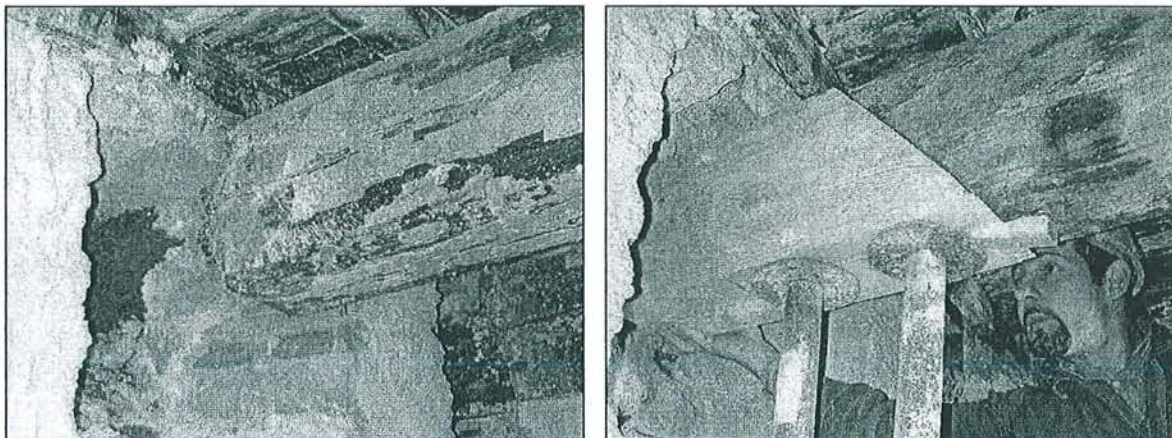


Figure 1 - Réparation de tête de poutre avec un béton époxy et des tiges en acier dans des percements. Barre filettate = tiges filetées; Protesi = prothèse en bois nouveau (Photos: LegnoDOC).

Performance structurelle de la technique

Les efforts les plus importants sur la partie consolidée sont les charges latérales et les effets dus au moment fléchissant (si la partie consolidée a une longueur importante à partir de l'encastrement). Normalement les données relatives à la résistance de l'encollage sur la section transversale du bois ne sont pas à considérer (et elles ne sont pas en général disponibles), on considère donc simplement que le bloc de résine est en simple contact avec le bois. Les tiges en acier transfèrent les charges latérales et le moment fléchissant au bloc de résine. Les résistances en flexion et traction des tiges doivent être suffisantes pour transférer ces charges. Les longueurs d'encollage des tiges dans le bois et dans la résine doivent être suffisantes pour garantir la tenue mécanique par rapport aux charges appliquées. Si l'on suppose qu'un déplacement différent entre le bois et la résine puisse se produire, il faut considérer les deux matériaux comme étant sans contact: dans ce cas la résistance à l'enfoncement des tiges dans le bois et dans la résine doit être suffisante pour résister aux charges latérales et au moment fléchissant appliqué. La résistance en compression, le module d'élasticité en compression et la résistance au cisaillement de la résine doivent être suffisants pour reprendre les efforts appliqués. Si cela est vérifié, la technique peut être considérée comme structurellement correcte.

Caractéristiques des matériaux à connaître (en dehors de celles du bois)

1. résine: résistance au cisaillement et à la compression; module d'élasticité (en compression ou en traction)
2. tiges: résistance en traction et en flexion
3. composite: résistance à l'extraction et à l'enfoncement du système tiges-résine-bois.

Performances à long terme

La durabilité de cette technique de consolidation est susceptible d'être limitée par des délaminations entre résine et bois si de fortes variations des conditions thermo-hygro-mécaniques interviennent sur les structures.

Figure 2 - Exemples d'application de tiges en acier avec colles époxy (Photos: LegnoDOC).



1.3 PATHOLOGIES DES STRUCTURES

Les structures en bois peuvent présenter deux types principaux de pathologie :

- d'origine biologique, due à la dégradation provoquée par insectes et champignons (BRE, 1997; Bonamini, 1995; Gambetta, 1999);
- d'origine mécanique, due à des surcharges, erreurs de projet ou de mise en place, déformations des membrures etc. (Desch, 1970; Duval, 1994; Della Giustina, 1985; Calvi, 1998).

La connaissance des effets de ces pathologies est indispensable pour un projet de restauration. Le but des opérations de diagnostic est donc de donner aux professionnels qui rédigent le projet de restauration des indications qui soient :

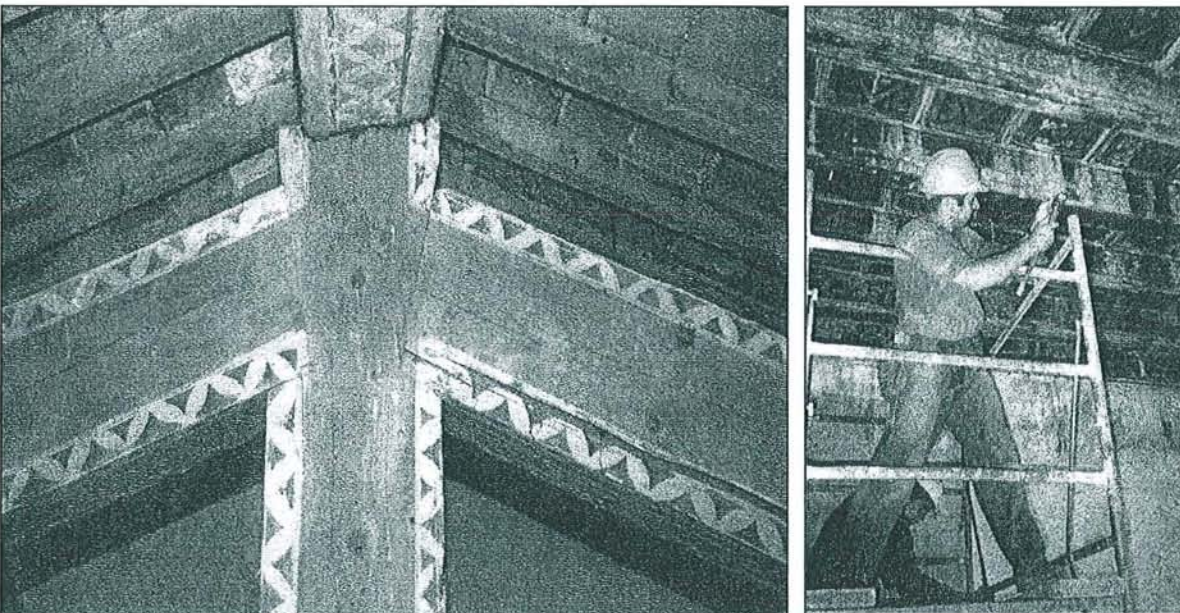
- correctes du point de vue qualitatif;
- suffisantes du point de vue quantitatif.

1.3.1 Le diagnostic

Les opérations de diagnostic ont normalement un caractère non destructif et permettent d'obtenir pour chacun des éléments structuraux un jugement sur l'état de conservation et sur les caractéristiques de résistance mécanique (Uzielli, 1992; Brunetti et al., 1997; Macchioni, 1998).

L'objet de l'analyse est ici un matériau très particulier, caractérisé par une très forte variabilité, due soit aux singularités typiques du bois soit aux altérations provoquées par des dégradations de type biologique et/ou mécanique.

Figure 3 - Planchers et charpentes en bois décoré. Dans ces cas, à la fonction structurale du bois on ajoute des autres importantes fonctions de type décoratif, esthétique et historique, pour lesquelles le caractère non destructif de l'opération de diagnostic est fondamentale (Photo: LegnoDOC).



Il est utile de définir ce que représente une "analyse de type non destructif". Pour Ross et Pellerin (1991) c'est "la science qui identifie les caractéristiques physiques et mécaniques d'un élément de matériel sans modifier ses possibilités d'utilisation finale". Il s'agit d'une définition prenant en compte l'évaluation d'un matériel qui peut être réutilisé. En réalité dans notre travail, cette définition est un peu différente, puisque l'utilisation finale du matériau a été déjà définie, s'agissant dans la plupart des cas d'un emploi de type structurel. Une opération de diagnostic qui n'endommage pas les fonctions structurelles du matériau, peut cependant provoquer des dégâts du point de vue esthétique. Un autre aspect, très important, porte sur la possibilité d'exécuter le diagnostic in situ. Lorsque les structures en bois sont démontées, leur re-montage devient très difficile et souvent irréalisable, le diagnostic dans ce contexte n'est pas que rarement possible.

En absence d'une norme applicable, les résultats donnés par le diagnostic doivent être basés sur une série d'expériences et de données relatives aux bois anciens.

Le protocole d'inspection vise à donner une série d'informations sur chaque élément de la structure analysée:

- l'essence ou famille ;
- l'humidité et l'éventuel gradient dans le sens longitudinal et transversal ;
- la classe de risque d'attaque biologique selon l'EN 335 ;
- la géométrie et la morphologie de l'élément avec l'indication de la position et de l'extension des défauts principaux et des pathologies
- l'indication de la position, conformation et dimensions des *zones critiques* (définies comme parties de l'élément qui par leur position, leurs défauts, l'état de contrainte ou l'état de conservation sont considérées comme importantes du point de vue diagnostic) et des *sections critiques* qui les représentent;
- la classification selon des critères de résistance mécanique de l'élément dans son ensemble et/ou de chaque zone critique.

Le diagnostic est normalement exécuté en deux phases :

1. inspection visuelle ;
2. inspection instrumentée.

L'accessibilité de la surface et les conditions d'éclairage doivent être bonnes, et certaines limitations au diagnostic sont possibles liées à la présence de revêtement de la surface avec peintures ou d'autres types de décorations. Dans ce cas, l'inspection instrumentée devient plus importante. Ces méthodes de diagnostic sont bien entendu applicables également aux nouvelles structures.



Figure 4 - Diagnostic sur poutres lamellé-collées (Aquaboulevard – Paris, Photo: Calvi).



Figure 5 - Equipement pour l'inspection visuelle (Photo: Macchioni).

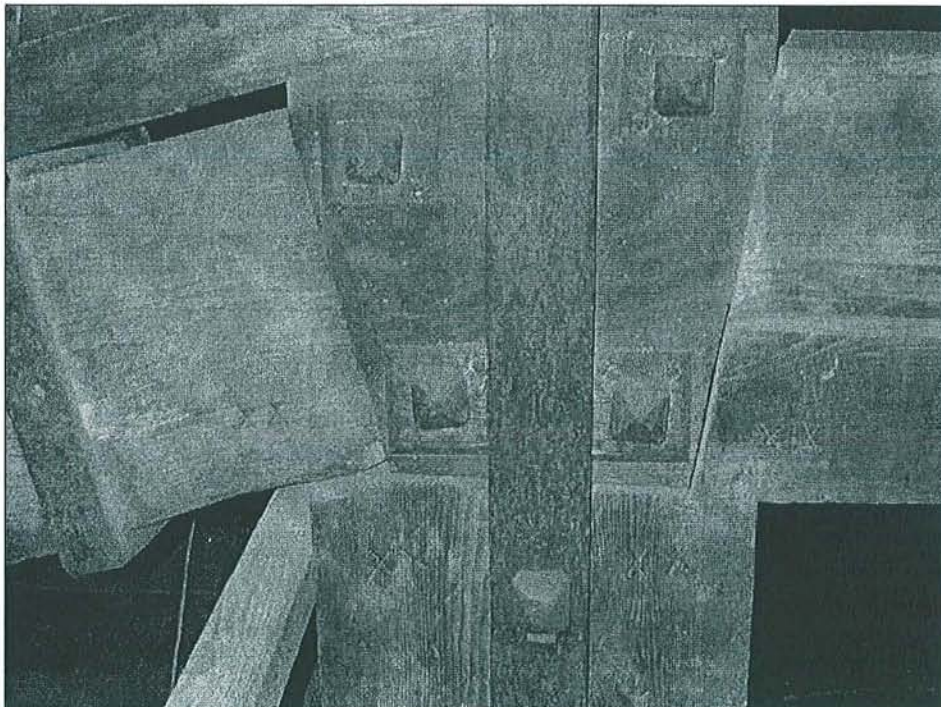


Figure 6 - Salone dei Cinquecento, Palazzo Vecchio (Firenze):
nœud de charpente (Photo: Macchioni).

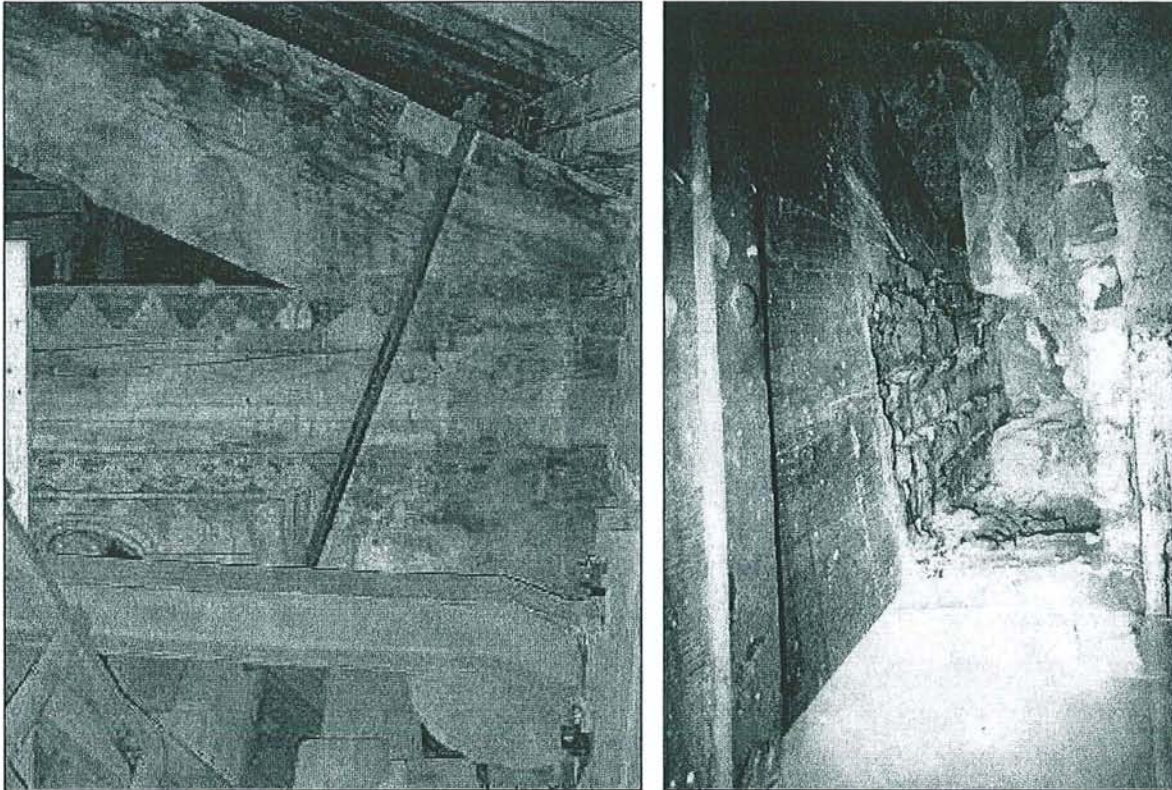


Figure 7 - Pourriture limitée à la partie latérale d'appuis du joint entrain-arbalétrier, qui n'était pas ventilée (droite). La partie haute était saine (Villa Demidoff, Pratolino, Firenze). La pourriture peut en suite provoquer aussi des désordres mécaniques (gauche). En ce cas la rupture du joint entrain-arbalétrier résulte en une pression de l'arbalétrier sur le mur. Eglise S. Marco, Firenze (Photo: Macchioni).

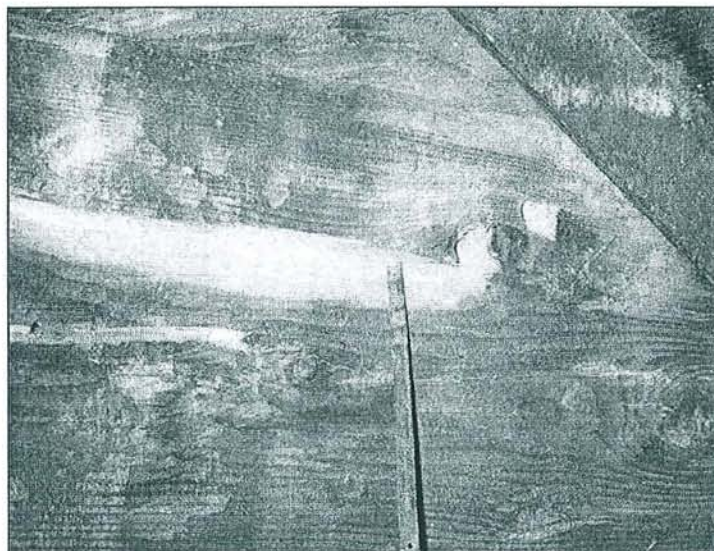


Figure 8 - L'insertion d'une lame en métal montre que cette fente est une roulure « *Abies alba L* » (Photo: Macchioni).

La classification des éléments structuraux selon leur résistance mécanique doit être le plus possible objective, et faisant référence à des grandeurs mesurables. La règle de classification développée en Italie est basée sur les indications des normes EN 518 et EN 1310, avec quelques petites différences pour les rendre applicables aux bois mis en œuvre. Le tableau 4 synthétise cette approche. La définition d'une *section efficace* est nécessaire pour appliquer cette règle. Elle est définie comme: la *section transversale de l'élément (y compris les défauts) qui peut être déterminée par soustraction de toutes les sections de bois éventuellement dégradées et/ou endommagées de la section critique*.

Aux éléments classés sont appliquées les contraintes admissibles décrites dans le tableau 5. Un tableau de valeurs caractéristiques a été récemment proposé, pour être utilisé dans les calculs aux états limites (selon Eurocode 5), mais il est encore en cours de validation.

Souvent l'inspection pour un classement visuel laisse des doutes à propos de l'extension de la dégradation dans des zones critiques, le même problème se pose pour des zones non suffisamment visibles ou inaccessibles. Il est alors nécessaire d'exécuter des analyses instrumentées, localisées ou généralisées (appliquées sur l'élément entier). Parmi les systèmes les plus utilisés et considérés en Italie (Bonamini, 1995) et France (Khebibeche et al, 1994) comme «outils de CND » (Contrôle Non Destructif), on peut citer:

- mesures de dureté locale avec Pilodyn ou avec enfoncement d'une bille en acier (Giuriani et Gubana, 1994)
- mesure de la résistance à l'enfoncement d'une pointe, tels que le Resistograph (Rinn, 1994 – 1996), le DDD2000, le Densitomat... ;
- méthodes ultrasoniques (Bucur, 1992 – 1996 ; Sandoz, 1994) et vibratoires (Sylvatest, Pundit, Stress Wave Timer, BING...), comme celles décrites par Cassan (1997).

La qualité des résultats que l'on peut obtenir avec ces techniques dépend fortement de l'état de conservation du bois, des capacités de l'opérateur et, pour les méthodes ultrasoniques et vibratoires, de la géométrie et des conditions d'appuis des éléments (Ross et Pellerin, 1993). Jusqu'à présent, la méthode qui a montré le meilleur compromis entre précision, fiabilité et souplesse d'emploi est le Resistograph, parce qu'il donne une bonne perception des variations des conditions locales et de leur positionnement dans l'élément analysé (Fagnelli, 1999 - Macchioni, 2000).

Le diagnostic doit être complété par une présentation des résultats sous forme claire et simple pour une utilisation par les professionnels et techniciens de chantiers.

Tableau 4 - Règle de classification du bois mis en oeuvre. Pour le classement, toutes les caractéristiques doivent être comprises dans les limites spécifiées. L'attribution d'une classe intermédiaire n'est pas admissible.

CARACTERISTIQUE		CLASSE		
		1	2	3
Flaches		max. 1/8	max. 1/5	max. 1/3
Fentes		absentes	absentes	admissibles
Fentes dues au gel				
Roulure				
Nœuds		max. 1/5 max. 50 mm	max. 1/3 max. 70 mm	max. 1/2
Groupes de nœuds		max. 2/5	max. 2/3	max. 3/4
Pente du fil	en section radiale	max. 7%	max. 12%	max. 20%
	en section tangentielle	max. 10%	max. 20%	max. 33%
Fentes radiales dues au retrait		Admissible, si non passantes		
Largeur des cernes	conifère	max. 2 mm	max. 3,3 mm	> 3,3 mm
	chêne	min. 7 mm	min. 4 mm	< 4 mm
	châtaigner	min. 8 mm	min. 3,3 mm	< 3,3 mm

Modalités de mesure:

Flaches	Le plus petit des deux rapports entre dimensions des cotés du flache et la dimension du côté correspondant de la section efficace
Nœuds	Le rapport entre le diamètre minimum du nœud et la dimension de la section efficace où il est apparent
Groupes de nœuds	Le rapport entre la somme des diamètres minimum des nœuds compris entre 150 mm de longueur de l'élément et la dimension de la section efficace où ils sont apparents
Pente du fil	La pente des fentes dues au retrait par rapport à l'axe longitudinal de l'élément, mesurée à un endroit qui ne présente pas des déviations localisées du fil (par exemple à proximité des nœuds)
Largeur des cernes	De manière alternative : mesure directe sur les sections transversales (si visibles) ; mesure directe sur carottes prélevées avec la tarière de Pressler ; estimation basée sur un prélèvement radial exécuté avec perceuse instrumentée (Resistograph ou similaire).

Tableau 5 – Contraintes admissibles pour les éléments en bois classés selon la règle du tableau 4 (valeurs pour une humidité du bois = 12%).

ESSENCE	CLASSE	VALEURS (N/mm ²)				
		Compression parallèle au fil	Flexion	Traction parallèle au fil	Cisaillement parallèle au fil	Module d'élasticité parallèle au fil
Sapin	1	11	11,5	11	0,9	13 000
	2	9	10	9	0,8	12 000
	3	7	7,5	6	0,7	11 000
Epicéa	1	10	11	11	1,0	12 500
	2	8	9	9	0,9	11 500
	3	6	7	6	0,8	10 500
Mélèze	1	12	13	12	1,1	15 500
	2	10	11	9,5	1,0	14 500
	3	7,5	8,5	7	0,9	13 500
Pin	1	11	12	11	1,0	13 000
	2	9	10	9	0,9	12 000
	3	7	8	6	0,8	11 000
Châtaigner, Orme	1	11	12	11	0,8	10 000
	2	9	10	9	0,7	9 000
	3	7	8	6	0,6	8 000
Peuplier	1	10	10,5	9	0,6	9 000
	2	8	8,5	7	0,5	8 000
	3	6	6,5	4,5	0,4	7 000
Chêne	1	12	13	12	1,2	13 500
	2	10	11	10	1,0	12 500
	3	7,5	8,5	7	0,9	11 500

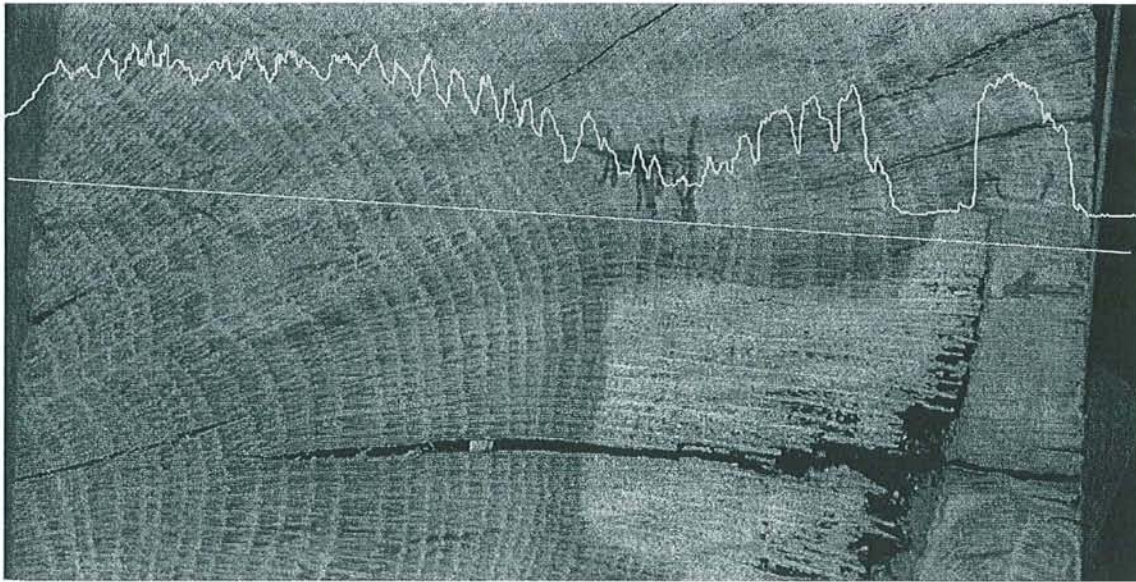


Figure 9 - Superposition d'une analyse au Resistograph sur une section altérée (Photo: Macchioni).

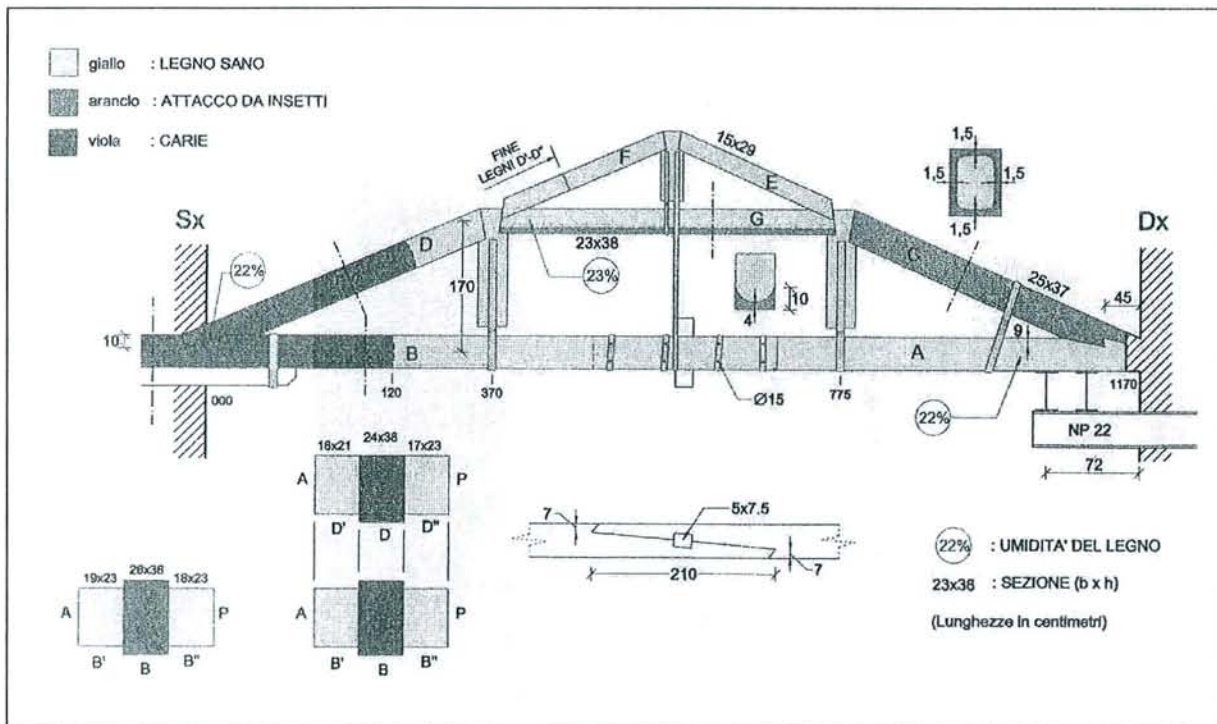


Figure 10 - Exemple de présentation des résultats du diagnostic chez LegnoDOC (www.legnodoc.com). Jaune: bois sain; Orange: attaque d'insectes; Violet: pourriture.

1.3.2 Pathologies introduites par les systèmes de consolidation

Pour bien évaluer la durabilité et l'efficacité mécanique des systèmes de restauration utilisant des résines époxy, spécifiques pour le bois, il est nécessaire d'évaluer l'état de conservation des structures déjà restaurées avec ces techniques, pour en définir la qualité de l'intervention et éventuellement l'origine des pathologies résultantes.

Plusieurs cas de bâtiments dans lesquels les assemblages bois-colle époxy ont été utilisés pour la restauration ont été étudiés.

L'étude de l'interface bois-colle, réalisée plusieurs années après l'intervention, permet de relever beaucoup d'informations sur la durabilité de cette technique.

Cette étude a été réalisée en Angleterre (Mettem, Page, Davis, 1995) et en Italie (Pizzo, 1999), il est intéressant de décrire cette dernière étude, réalisée dans des conditions climatiques connues, dans un cadre réglementaire et avec des produits et des techniques de restauration typiques de l'environnement méditerranéen.

D'autres études ont été réalisées en Italie, mais sur des périodes plus courtes (Cecotti, Marradi, 1993 - Moro, 1998).

Tous les bâtiments analysés par Pizzo sont caractérisés par des interventions de restauration sur les charpentes en bois, réalisées entre les années 1983 et 1989, 1973 et 1974, c'est à dire sur des périodes de vie de 10 ou 25 ans.

Parmi les cinq bâtiments analysés, seule la cathédrale de Cefalù ne présente pas de pathologies. Dans les autres opérations, on observe plusieurs typologies de rupture dans les joints collés. Pour deux des bâtiments évalués, en accord avec les réalisateurs des projets, les deux bâtiments seront seulement référencés comme "bâtiment A" et "bâtiment B" par respect de la confidentialité demandée.

Cathédrale normande de Cefalù

La cathédrale de Cefalù est un très grand bâtiment du XII siècle (surface de 2.700 m², volume de 70.000 m³), qui se trouve aux pieds de la forteresse qui domine la ville; elle a été réalisée par le roi Normand Ruggero II. Dans les années 80 la toiture en bois de l'église a été restaurée; l'intervention de restauration a été réalisée par des systèmes qui utilisaient les colles époxy.

Les fermes sont accessibles par une passerelle qui se trouve sur l'extrados des entrants (Figures 11 et 12).

Les entrants sont en Pin Maritime (*Pinus pinaster* L.), qui vient des montagnes de Castelbuono, ils ont une longueur de 14 mètres et une section de cm 40 x 70.

L'intervention, terminée en 1987, est constituée surtout par le masticage des fentes longitudinales, avec les résines époxy et des éléments de bois.

En tête des entrants, zone attaquée par les termites, les tiges renforcées en fibres de verre ont été utilisées. Plusieurs arbalétriers endommagés ont été remplacés par de nouvelles pièces en douglas (*Pseudotsuga menziesii*), formés par deux éléments collés entre eux.

Dans l'intervention de restauration on a cherché à respecter certains critères qui favorisent la durée de vie de la structure. En particulier, on a assuré la nécessaire ventilation au dessus du plancher en bois qui se trouve sur les arbalétriers, et on a réalisé un interstice lié à l'extérieur avec des tubes qui assurent un "effet cheminée".

Figure 11 - Cathédrale de Cefalù
(Photo : Portera, 1995).

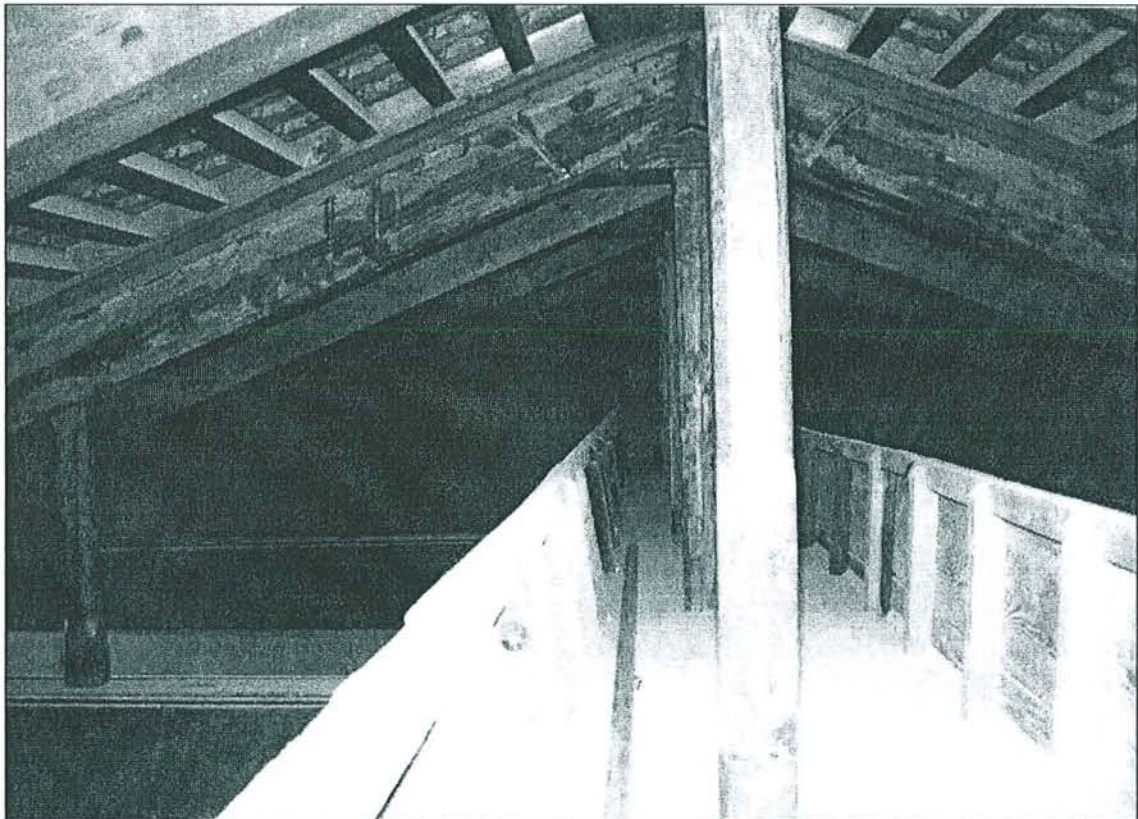
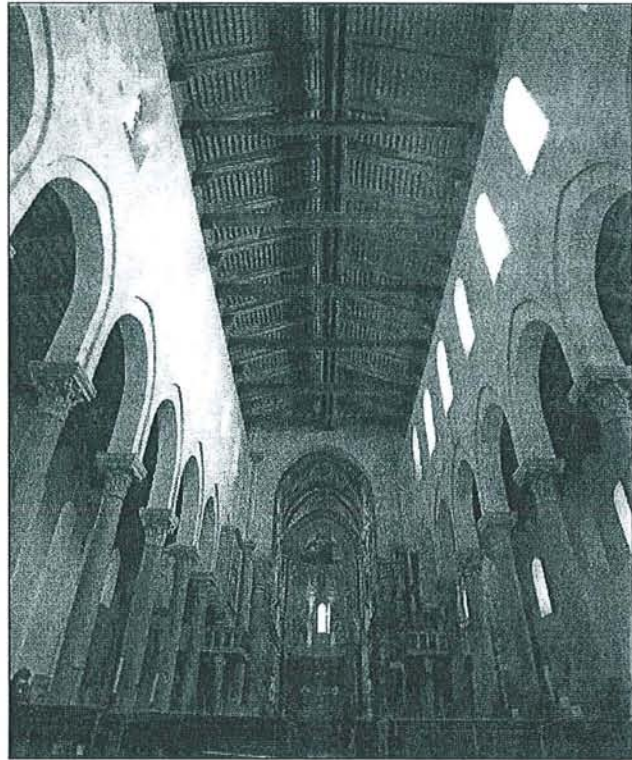


Figure 12 - Cathédrale de Cefalù. La passerelle appuyée sur le chaînage des fermes, à 30 m du sol, permet l'inspection visuelle (Photo: Pizzo).

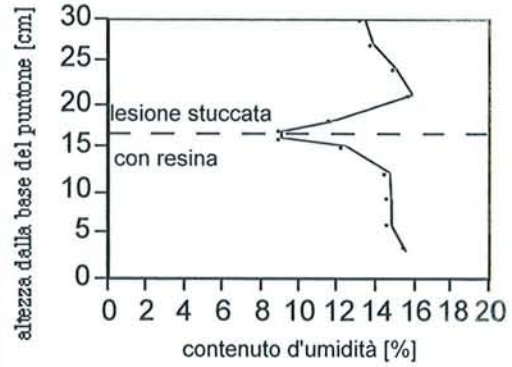
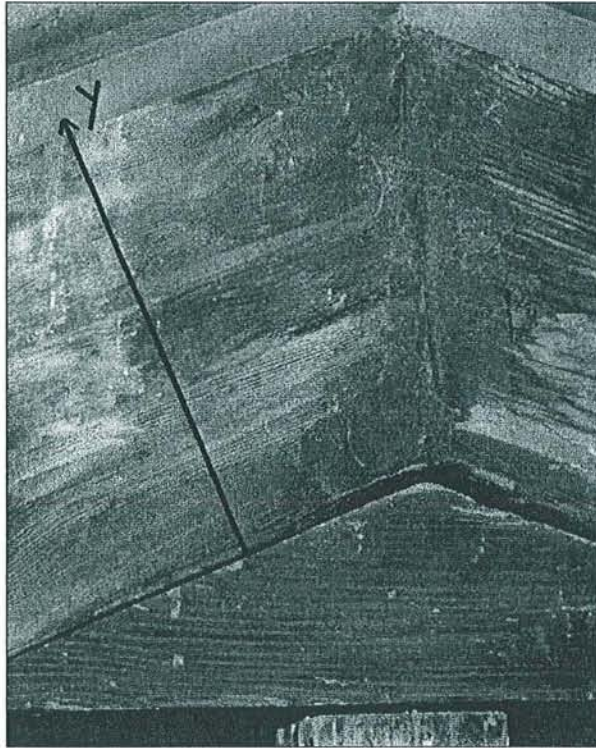


Figure 13 - Cathédrale de Cefalù. Humidité du bois selon la direction Y (hygromètre à résistance). En correspondance de la présence de résine époxy les valeurs sont indicatives (Photo: Pizzo).

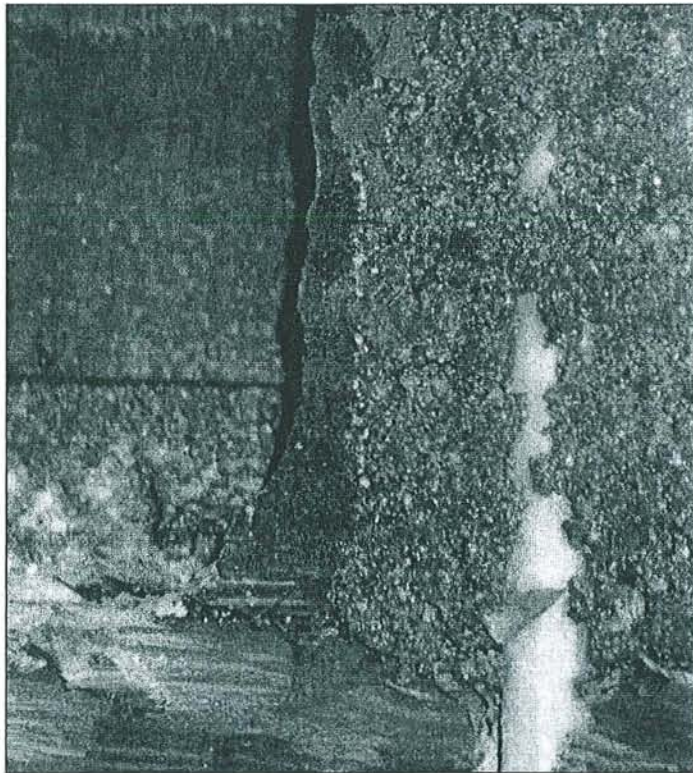


Figure 14 - La granulométrie de la charge est très grossière (Photo: Pizzo).

Les entrants ne sont pas en appuis directs sur les murs mais sont isolés par un papier gomme et en appuis sur des plaques métalliques insérées dans le béton. Autour des encastresments, latéralement, on a assuré un vide pour permettre une circulation de l'air.

Même s'il n'a pas été possible d'examiner attentivement les têtes des fermes et les appuis des arbalétriers, aucune rupture entre bois et résine n'a été notée, dans les pièces substituées.

Des mesures d'humidité sur la surface des arbalétriers ont été réalisées soit à proximité des fissures mastiquées soit dans le bois massif. Les mesures ont été effectuées par un hygromètre électrique portable.

La moyenne des mesures a donné une valeur proche au 15%, qui peut être considérée comme acceptable dans la mesure où la limite, considérée comme critique pour les attaques de champignons est de l'ordre de 18-20%. Dans certaines zones proches de la surface supérieure des arbalétriers des valeurs plus importantes d'humidité (dans plusieurs cas >20%) ont été relevées. Elles sont dues probablement aux infiltrations d'eau et n'ont aucune relation avec la présence des résines époxy. Pour l'un des arbalétriers une carte d'humidité a été effectuée. Les mesures ont été faites sur la surface de l'arbalétrier présentant le masticage, de l'intrados à l'extrados. Les valeurs données dans la figure 3 représentent les points des mesures, réalisées du bas vers le haut.

Bâtiment A

L'intervention, réalisée en Italie du Nord, a été effectuée sur des fermes qui soutiennent un plafond très important. La section des poutres en bois est d'environ 50x40cm et la longueur des fermes est de 22m. L'intervention de restauration comprend:

- le renforcement des nœuds entrants-arbalétriers et poinçons-arbalétriers par tiges en fibres de verre et résine;
- le masticage avec des systèmes époxy des fentes dues au retrait et l'insertion de tiges en fibres de verre transversalement pour raidir les entrants et les arbalétriers;

Dans les interventions de restauration de la période 1983-1989 une formulation époxy chargée probablement avec de la silice d'une granulométrie variable entre 2 et 5 mm (Figure 14) a été utilisée.

Les problèmes les plus importants qui ont été relevés concernent l'adhérence entre résine et bois. Nous avons relevé en particulier des ruptures correspondantes aux colatures de la résine sur les surfaces des poutres, celles-ci sont dues aux déformations en direction transversale du bois. Ces déformations ont provoqué le détachement des masticages (Figure 15). Dans certains cas il existe aussi des ruptures dans ces mêmes masticages: cela veut dire que la résine présente une rupture de type cohésive (Figure 16).

Dans les deux cas le masticage a perdu ses fonctions de protection vis à vis de l'extérieur.

Dans certains cas on a pu relever, correspondant à des masticages anciens, des prolongements de ruptures existantes dans la direction longitudinale (Figure 17).

Dans certains cas le décollement peut atteindre plusieurs centimètres pour les poutres qui présentent une déviation de l'angle de fil très importante (Figure 18), et cela amène à remettre en cause l'efficacité des renforcements transversaux réalisés

avec des tiges en fibres de verre. Il n'a pas été possible de vérifier ce dernier aspect, puisque les tiges n'étaient plus visibles.

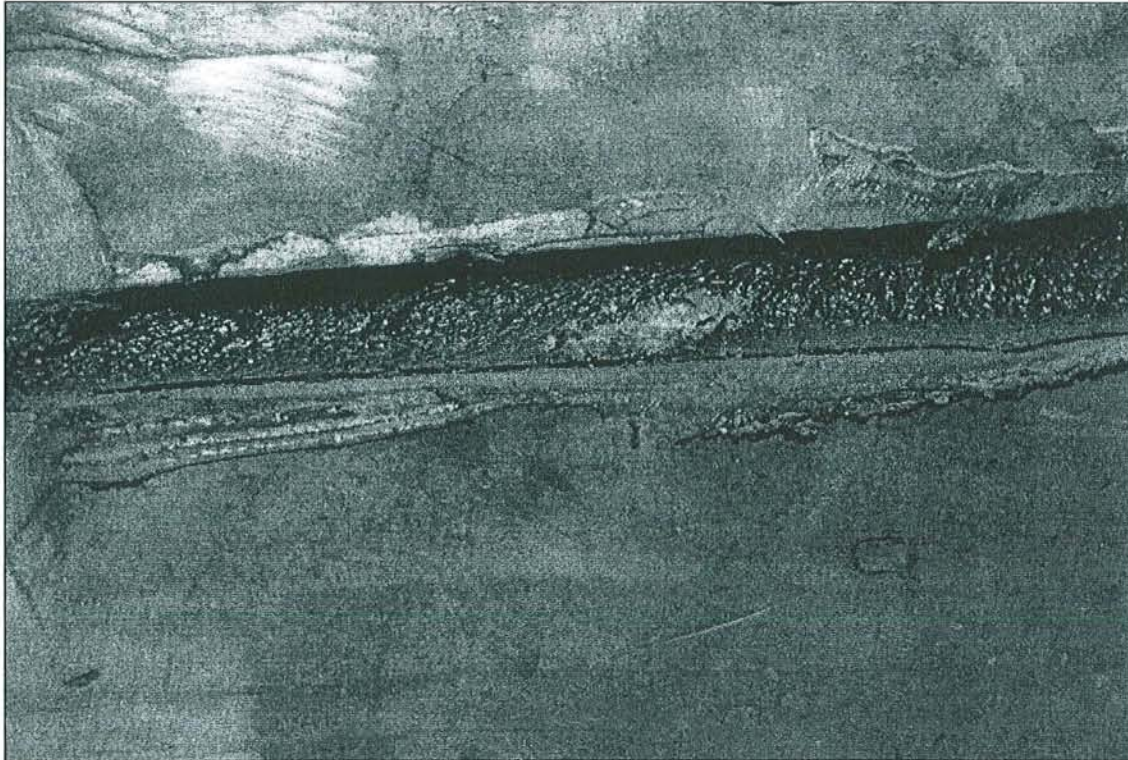


Figure 15 - Bâtiment "A". Délamination à l'interface colle-bois (Photo: Pizzo).



Figure 16 - Bâtiment "A". Rupture cohésive de la colle (Photo: Pizzo).

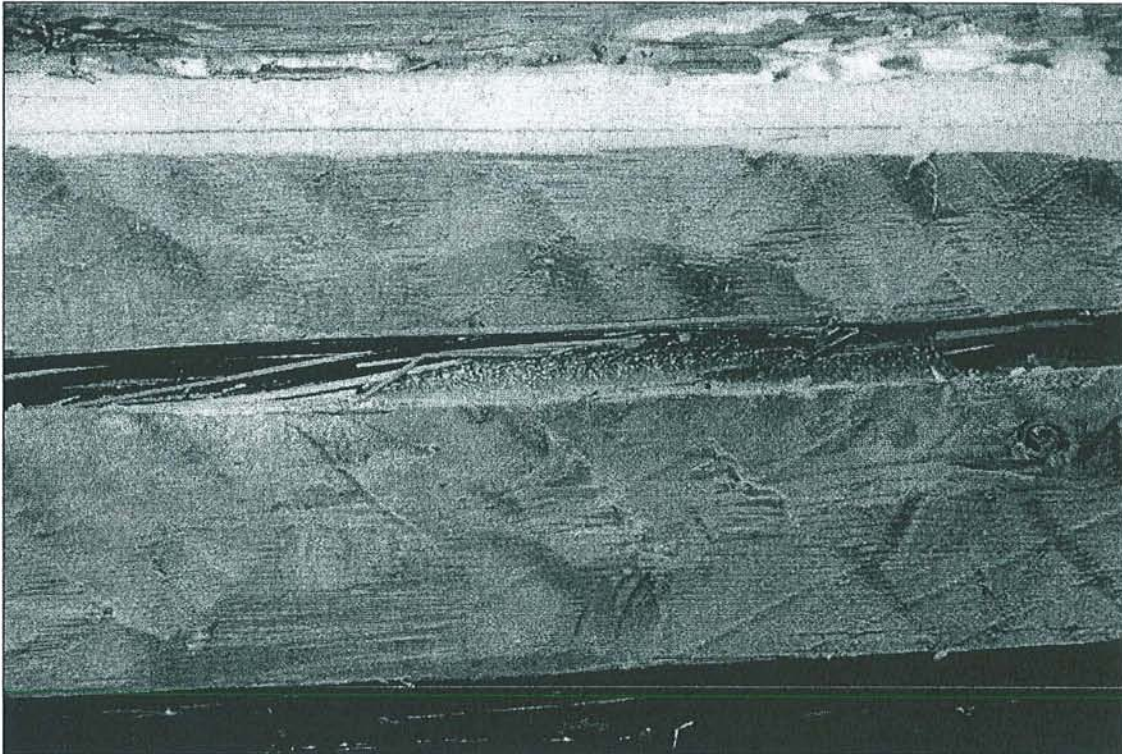


Figure 17 - Bâtiment "A". La fente due au retrait s'élargit sous l'effet du « coin » de colle (Photo: Megna).

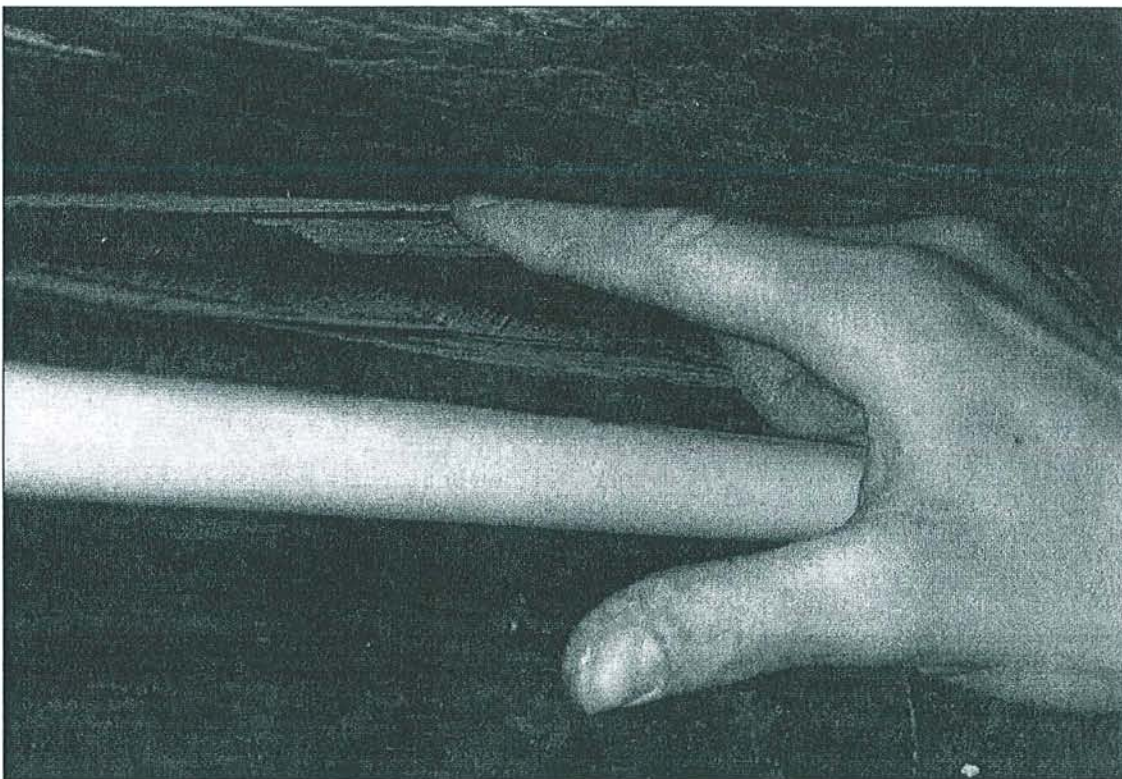


Figure 18 - Bâtiment "A". La délamination entre colle et bois est de l'ordre de 2-3 millimètres (Photo: Megna).

Bâtiment B

Dans ce cas l'intervention de restauration, réalisée là encore au Nord de l'Italie, a été conduite sur les fermes d'une toiture, celles-ci n'étaient pas visibles et le chargement est limité aux effets du vent, de la toiture et du poids propre.

Les dimensions de la section des poutres sont de cm 30x30 environ.

L'intervention, réalisée dans l'année 1988, ne peut pas être considérée comme une restauration ou une opération de consolidation, puisque de nouvelles fermes pour les substituer aux existantes ont été fabriquées. Elles ont été réalisées en bois lamellé collé, avec des tiges en acier insérées selon la direction longitudinale à la profondeur de 40cm et collées avec de la résine époxy.

Dans le bâtiment B de petites ruptures dans la résine à côté des percements qui accueillent les tiges en acier ont été notées. Les ruptures sont générées dans la direction radiale et elles partent de la surface de la tige sur une longueur de quelques centimètres.

Il n'est pas possible d'évaluer la vraie profondeur de ces ruptures et si elles débouchent en partie inférieures.

Palais Chiaramonte, appelé le "Steri", place Marina, Palermo.

Le Palais, actuellement siège du Rectorat de l'Université de Palermo, date de 1300, mais il a subi beaucoup de changements pendant les siècles suivants. L'intervention de restauration examinée a été réalisée dans la période 1973-1974 sur les éléments qui soutiennent la toiture de la « Sala delle Capriate » (Figures 19 et 20).

Les structures, visibles, sont constituées par des fermes de type palladien renforcées avec des éléments qui ont pour principale fonction de raidir tout le système.

Les entrants ont une section de 40x20cm et une longueur de 8m. Les arbalétriers ont des sections plus petites, 20x20cm.

L'intervention réalisée est constituée d'une mise en place, en têtes des entrants (endommagés probablement par les insectes), de plaques métalliques sur les faces latérales, en laissant libres celles supérieures et inférieures.

Entre ces plaques et l'entrant a été posé un isolant pour éviter le contact direct entre le bois et l'acier; la même technique a été utilisée pour la face inférieure entre le bois et le mur. De plus, un interstice de presque 10 cm en périphérie des têtes a été constitué, pour leur aération.

Les résines époxy ont été utilisées pour boucher les fentes entre plaques métalliques et bois et les fentes dues au retrait. Cette opération a été conduite en utilisant des canules en caoutchouc pour l'injection, celles-ci ont été coupées au niveau de la surface du bois après usage.

L'évaluation visuelle a montré que, par rapport à la période d'intervention, le bois a manifestement bougé. En plus on a pu noter des décollements dans les masticages entre la résine et le bois. Les fentes les plus récentes ne sont pas encore très ouvertes, mais la séparation physique entre les deux matériaux est nette (Figure 21). Le comportement de la résine autour des canules (qui ont été laissées à l'intérieur après l'injection) est très intéressant.

Comme on peut voir sur la Figure 22 des ruptures sont présentes entre la canule et la résine époxy.

La canule a probablement constitué un point de discontinuité pour le joint de colle, qui a rompu suite aux efforts liés aux mouvements du bois.

L'observation de la surface de contact entre les plaques métalliques et les masticages à la résine a montré, dans certains cas, des délaminations (Figure 23).

Pour toutes les poutres l'humidité a été mesurée à proximité de la face inférieure, qui était la seule accessible; les valeurs relevées sont comprises entre 10% et 12%. Cela peut paraître étonnant car dans certaines zones de la maçonnerie l'humidité est très importante à cause des infiltrations d'eau de pluie. L'explication de cette humidité basse dans le bois est liée au bon isolement des têtes de poutres.



Figure 19 – Bâtiment « B ». Des fentes sont visibles dans la colle autour de la tige et à travers deux lamelles de bois. Même en ce cas, l'effet « coin » de la colle est évident (Figure: Megna).

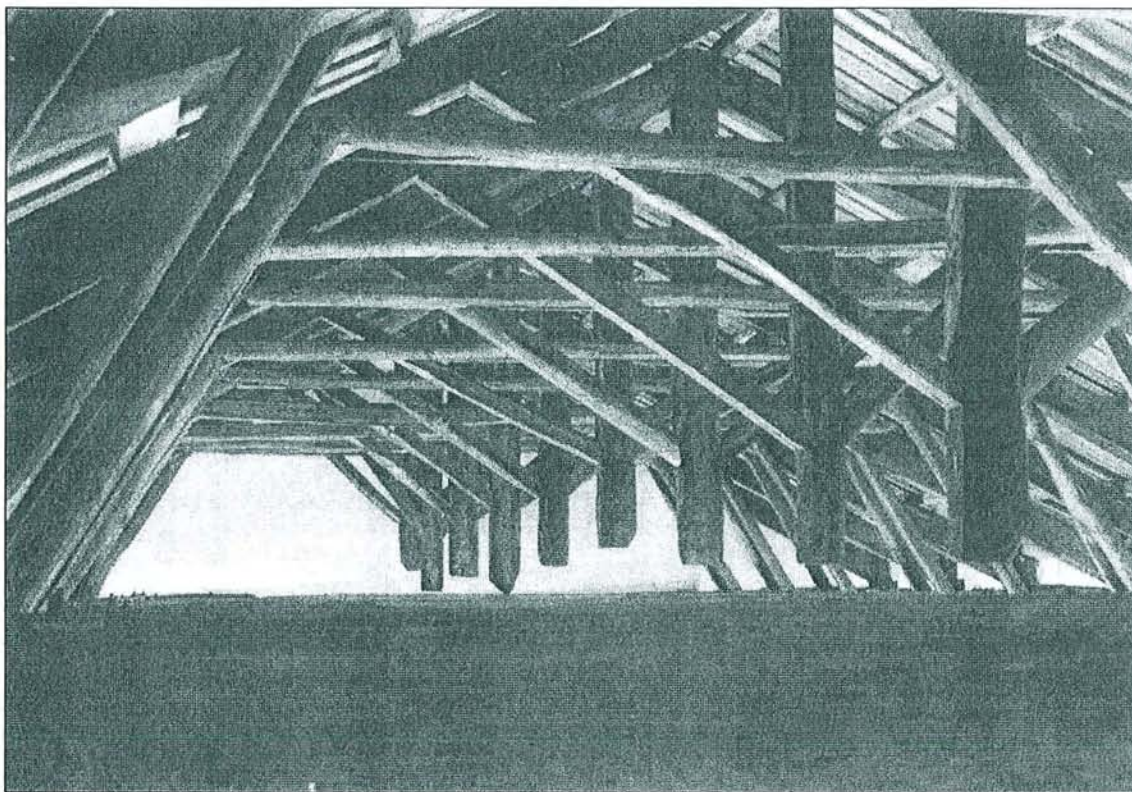


Figure 20 - Palazzo Steri, Palermo. Vue générale des charpentes de la toiture (Photo: Pizzo).



Figure 21 - Palazzo Steri. La rupture dans la résine coulée montre que le bois a varié ses dimensions après la restauration (Photo: Megna).

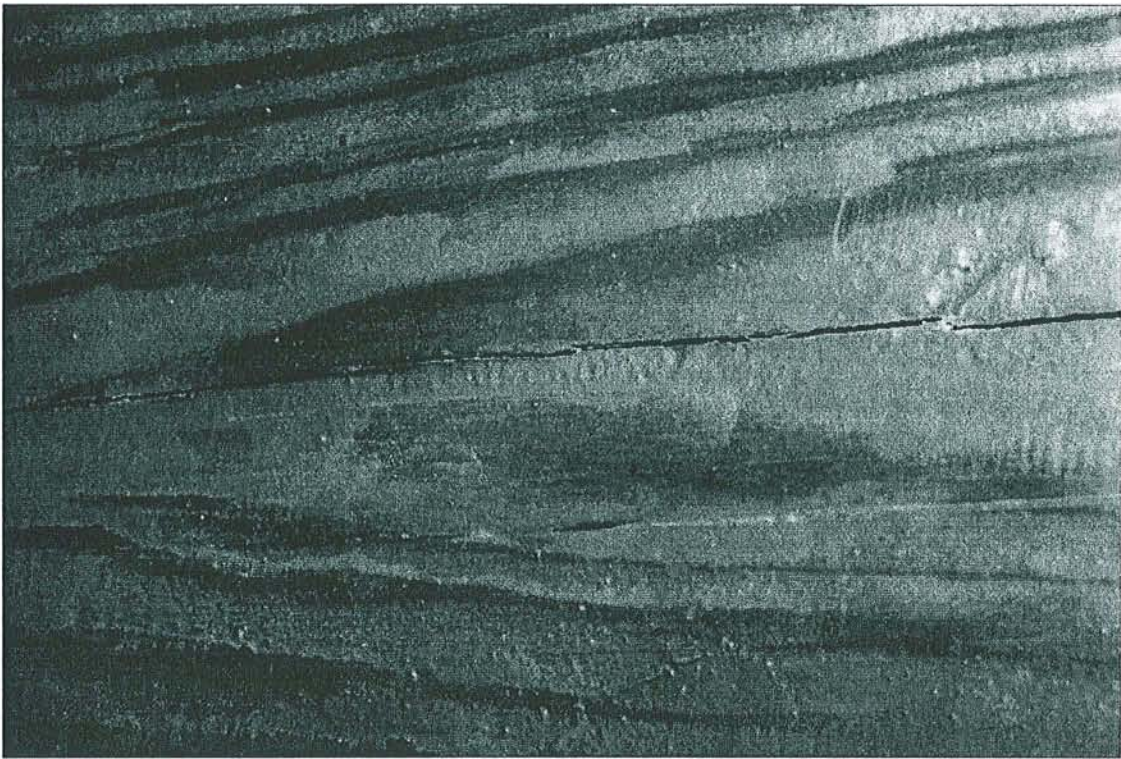


Figure 22 - Palazzo Steri. Une autre délamination entre bois et colle (Photo: Pizzo).

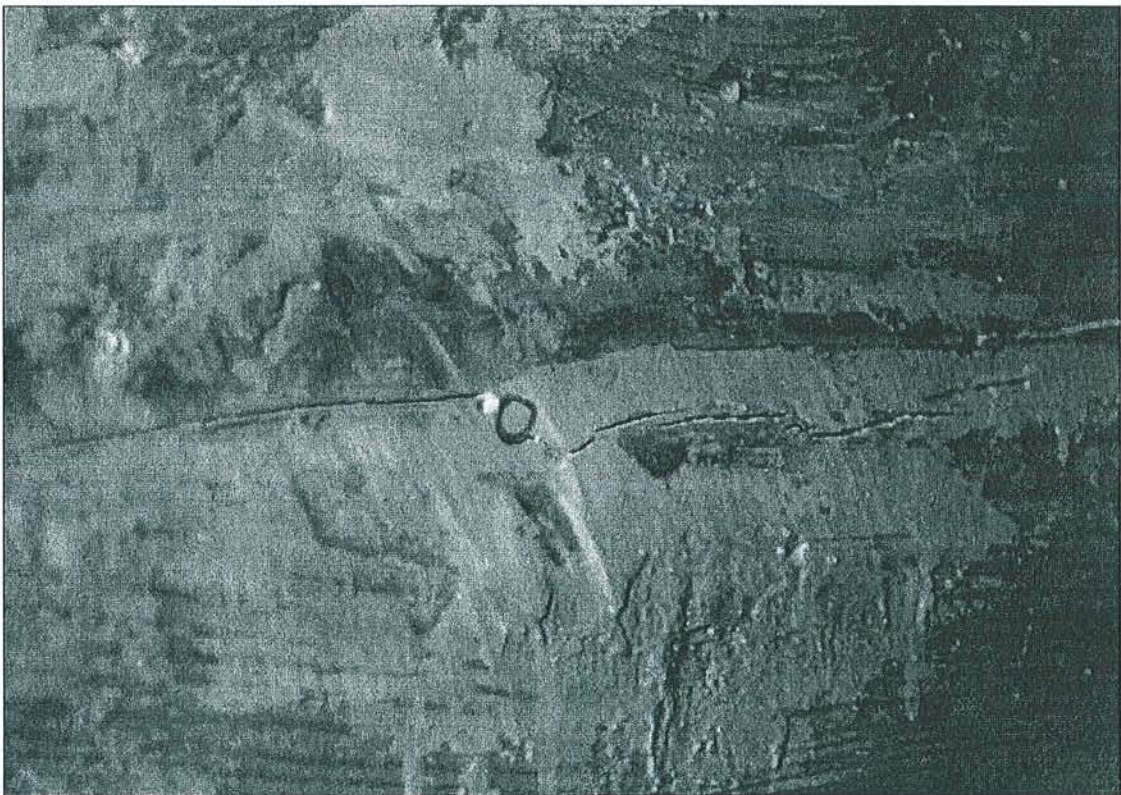


Figure 23 - Palazzo Steri. La présence de la canule en plastique indique le lieu où est injecté la colle. Même ici, une rupture se propage (Photo: Pizzo).

Cathédrale normande de Palermo

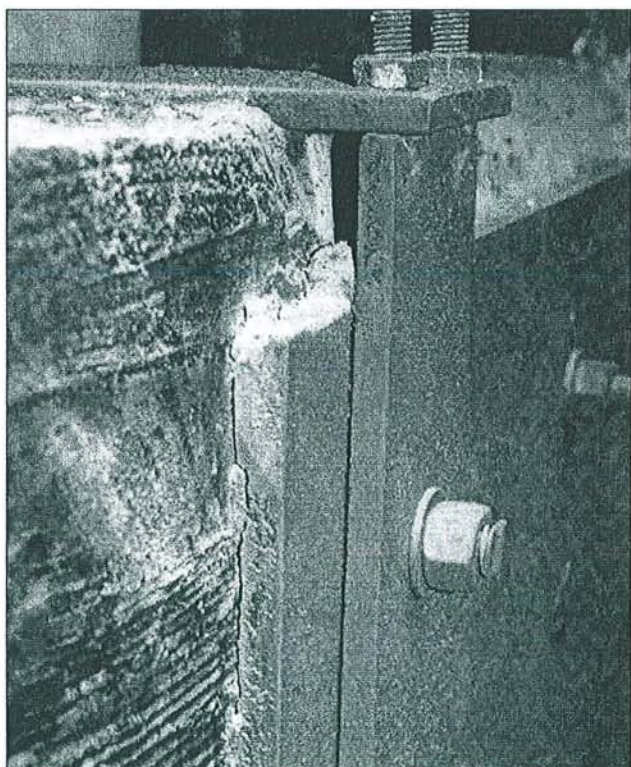
Le contrôle a été fait sur les structures de la toiture de la nef centrale, les éléments ne sont pas visibles du bas par la présence d'un plafond à voûte réalisé en XVIII^e siècle. La toiture est constituée de chevrons palladiens et de contreventements qui lient entre eux les poinçons (Figure 24). Sur plusieurs entrails et sur un poinçon figurent des éléments de décorations (Figure 25) qui montrent qu'auparavant, ces éléments n'étaient pas recouverts par le plafond.

Sur la toiture une intervention a été faite récemment, au début des années 1990. L'utilisation des systèmes époxy a été assez limitée. Les résines ont été utilisées seulement pour la masticage des quelques fentes dues au retrait et pour raidir les nœuds entre les éléments des chevrons.

Dans certains entrails où la pente de fil est particulièrement anormale on a pu relever la présence de tiges transversales verticales, insérées probablement pour chercher à bloquer la formation de fentes.

L'analyse visuelle a montré dans plusieurs cas une séparation à l'interface entre bois et colle, surtout à proximité des masticages des fentes, aucune anomalie n'a été notée dans les masticages entre poinçons et arbalétriers.

Dans les zones où figurent les tiges transversales on a noté également des petites délaminations en correspondance avec les fentes.



*Figure 24.
Palazzo Steri.
Les plaques en acier n'étaient pas collées au bois, mais un masticage est appliqué en surface. Celui-ci se fend facilement (Photo: Pizzo).*

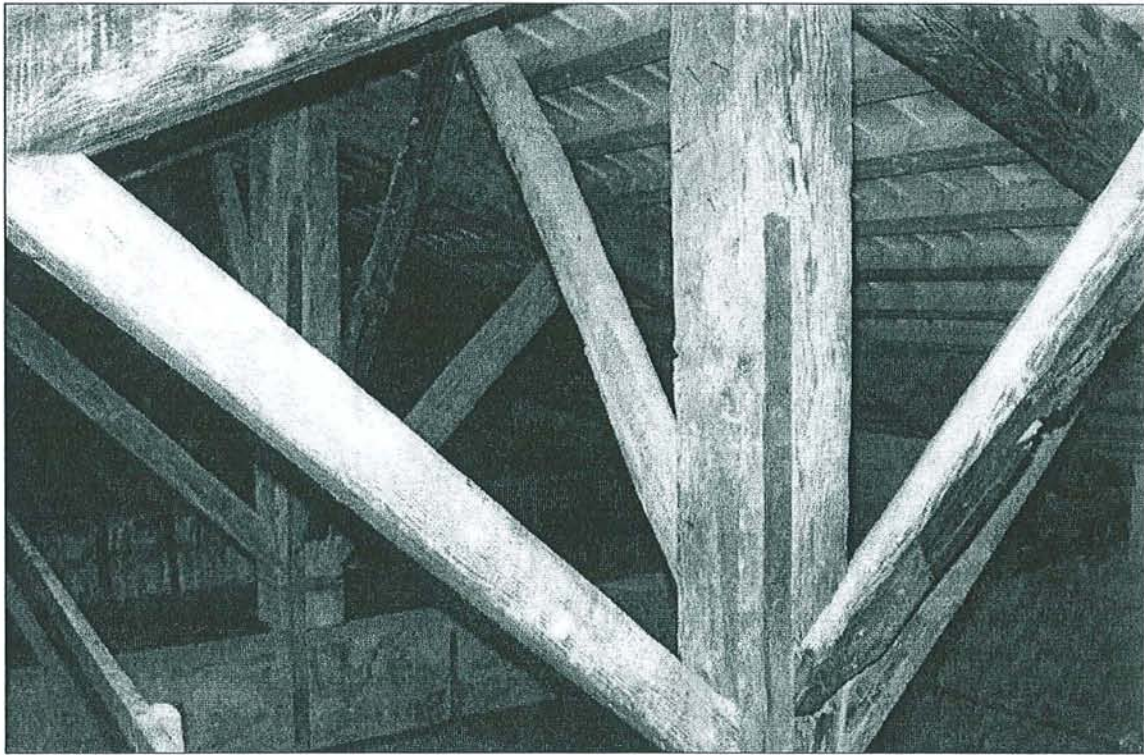


Figure 25 - Cathédrale de Palermo. La couverture centrale (Photo: Pizzo).

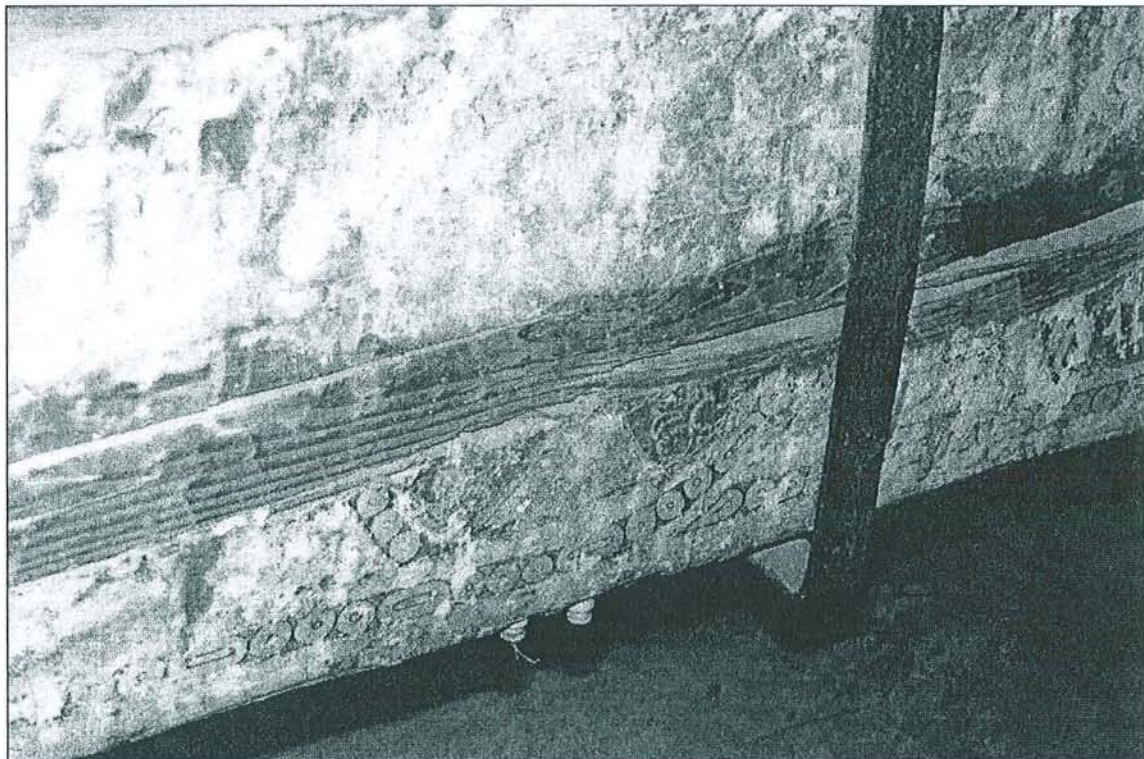


Figure 26 - Cathédrale de Palermo. Le chaînage des charpentes était probablement visible (Photo: Pizzo).

Considérations

Les pathologies relevées dans ces inspections sont toutes probablement dues aux mouvements relatifs entre les deux matériaux: bois et colle époxy.

Le bois varie en fonction de l'humidité surtout en direction transversale, perpendiculaire à la direction des fibres ; l'époxy est beaucoup plus stable n'a pas un caractère hygroscopique marqué, mais elle est considérée comme susceptible d'expansion thermique. Le pourcentage d'humidité dans le bois des structures n'est pas constant, mais varie en fonction des conditions du milieu ambiant, c'est-à-dire en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air.

Dans tous les cas analysés il y a eu manifestement des variations périodiques de la température et de l'humidité du milieu. Ces variations peuvent être dues aussi à l'utilisation qui a été faite de ce milieu, comme par exemple dans le cas du bâtiment A, accueillant fréquemment un public nombreux.

Dans la Cathédrale de Cefalù et dans le Palais Chiaramonte, de grosses variations de température et d'hygrométrie sont probables, la toiture n'est pas couverte et cela favorise le changement de l'air et une inertie thermique très importante.

Les mouvements dus aux variations thermiques et hygrométriques provoquent l'ouverture et la fermeture des fentes.

La rupture cohésive de la colle, trouvée dans le bâtiment A, ou les délaminations trouvées dans tous les autres bâtiments, sauf celui de Cefalù, sont probablement dues aux mouvements de ces mêmes fentes, liées à une perte d'humidité du bois. La colle époxy est un matériel très rigide, ne peut suivre les variations dimensionnelles du bois, elle casse dans la zone la plus faible, qui peut être proche de la surface de contact ou dans l'épaisseur du joint de colle.

La propagation longitudinale et l'élargissement des fentes (bâtiment A) peuvent être la conséquence de l'effet "coin", déjà montré pour le bois (Bertolini Cestari, 1994).

Dans les zones présentant des interfaces bois-colle-acier, les problèmes peuvent être provoqués par la différence de comportement des trois matériaux liés aux évolutions de la température.

Le développement des interventions et les avantages offerts par l'utilisation des colles époxy dans la restauration, montrent la nécessité d'une analyse approfondie des caractéristiques résultantes de ces méthodes et des matériaux mis en oeuvre.

L'analyse des renforcements dans les bâtiments décrits ici montre que les assemblages entre bois et colles époxy présentent de manière quasi systématique un certain nombre de problèmes. L'analyse de ces types d'intervention, réalisées dans les décennies passées, permet de conclure que:

- l'utilisation de formulations de colles non spécifiques au bois peut rendre l'assemblage peu durable;
- les modalités du projet de restauration et la réalisation pratique des interventions ont beaucoup d'influence sur la durabilité de l'interface, surtout quand l'intervention ne prend pas en compte les exigences spécifiques des matériaux;
- les solutions techniques qui favorisent l'échange hygrométrique et thermique, (c'est-à-dire les variations dimensionnelles typiques du bois), compatible avec le choix d'une colle, donnent à l'intervention de restauration la garantie d'une durabilité comparable à celle offerte par les systèmes traditionnels utilisant uniquement des dispositifs métalliques.

1.4 LES NORMES TECHNIQUES POUR L'EVALUATION DES COLLES STRUCTURELLES

Deux normes techniques sont disponibles pour l'évaluation des colles structurelles pour les bois :

- EN 301 :1992 « Adhésifs de nature phénolique et aminoplaste, pour structures portantes en bois. Classification et exigences de performance »
- ASTM D 5574-94 « Standard Test Methods for Establishing Allowable Mechanical Properties of Wood-Bonding Adhesives for Design of Structural Joints »

Ni l'une ni l'autre n'est spécifique pour les colles époxy utilisables en joint épais et en conditions de chantier.

La norme EN 301 est spécifique pour les colles thermodurcissables couramment utilisées pour la fabrication du bois lamellé-collé et fixe des paramètres précis de performance pour deux types d'emplois :

Type I	Exposition complète à conditions climatiques de forte humidité relative (> 85%) et/ou température > 50°C. Dans le cas de la restauration: structures à l'extérieur et têtes de poutres non ventilées, ou incluses dans les maçonneries à l'extérieur.
Type II	Applications en intérieur ou extérieur abrité, avec température < 50°C et humidité relative < 85%. Dans le cas de la restauration: structures en intérieur et têtes de poutres bien ventilées ou incluses dans les maçonneries à l'intérieur.

La norme ASTM D 5574-94 n'est pas spécifique pour une classe de produits, et décrit les principes et les méthodes d'essais pour l'établissement des caractéristiques mécaniques des adhésifs, sans indiquer de niveau de performances. En pratique : la norme EN 301 est largement appliquée par l'industrie, soit pour le choix des adhésifs soit pour le développement de nouveaux produits, alors que la norme ASTM D 5574 est pratiquement inconnue par les techniciens des colles à bois. Ainsi les experts Américains dans le domaine de la restauration des structures en bois avec adhésifs, tels que Avent ou Falck (colloque lors du congrès Wood Adhesives 2000), ne l'utilisent jamais. Cela ne signifie pas que la norme ASTM D 5574 soit inadaptée: elle est cependant trop complète et trop complexe dans la description des méthodologies d'évaluation visant à déterminer une série de facteurs de correction pour les effets du vieillissement et de l'exposition aux intempéries. Elle se base sur des essais normalisés (résistance au cisaillement, traction perpendiculaire au fil du bois, module de cisaillement). Des facteurs correctifs relatifs aux effets du fluage (*Fluage*), du temps de service, de la tendance à la délamination et de la durabilité de la colle sont calculés en fonction des résultats d'essais spécifiques, réalisés sur la base de ces méthodes. Les principes de la norme sont très corrects et ont été très utiles pour l'approche expérimentale que nous allons décrire.

L'autre différence remarquable entre les deux normes est la suivante :

- la norme EN 301, étant limitée aux thermodurcissables phénoliques et aminoplastes, repose sur plus de 70 ans d'expériences, d'applications en service. Elle apporte des solutions aux problèmes liés aux effets des attaques acides

provoquées par certains durcisseurs (Raknes, 1997), critiquable, elle est cependant très appliquée et précise ;

- la ASTM D 5574, implicitement ouverte aux nouveaux produits et aux nouvelles applications, est un peu générique sur les exigences de performance et fortement conservatrice sur les procédés d'évaluation et de calcul. Mais elle anticipe le problème couramment visé par le Comité Technique « Colles pour bois » au sein du CEN, c'est à dire la réglementation d'un secteur en forte et rapide évolution.

Pour ce qui concerne les tests, la norme EN 301 prévoit un essai de cisaillement par traction. La norme ASTM D 3165 considère aussi un essai similaire, au contraire des normes ASTM D 3931 et ISO 6238 qui utilisent des essais de cisaillement par compression.

Ces normes sont relatives aux assemblages avec faible épaisseur de colle et/ou réalisés après l'application d'une pression. Ces conditions ne sont pas possibles dans la restauration des structures en bois, où les épaisseurs de colle font, dans la plupart des cas, plusieurs millimètres avec l'impossibilité d'appliquer une pression sur les plans de collage.

Pour les essais de délamination, on fait en général référence à la norme EN 302/2 ou à la norme ASTM D 2559, qui ne permettent pas d'obtenir l'effet de délamination maximum possible, de par la configuration et la géométrie des éprouvettes.

La plus grande différence, du point de vue des performances, entre les adhésifs de type I et ceux de type II (EN 301), repose sur le fait que pour le Type I est prévu un essai de délamination à chaud, alors que pour le Type II ce même essai est réalisé à température ambiante.

1.5 CONCLUSIONS

Les opérations de consolidation des charpentes en bois demandent une étape de diagnostic préalable, une maîtrise spécifique lors du projet, une main d'œuvre très spécialisée et une série de produits spécifiques. Parmi les différents systèmes de consolidation, les « tiges collées » montrent des avantages en termes de coûts et de possibilités techniques (augmentation des charges, réduction du volume et de l'impact visuel, accessibilité de l'intervention), et sont donc considérés par les professionnels comme le système le plus intéressant du point de vue technologique.

Cependant, le manque d'objectivité dans cette activité est toujours étonnant, surtout si on la compare aux exigences de sécurité et au chiffre d'affaires qu'elle génère.

Les explications possibles reposent sur une série d'évidences:

- plusieurs études donnent un jugement sur la « qualité » du bois en oeuvre, sans utiliser des moyens d'investigation directs et de quantification des pathologies plus pertinents et en se basant uniquement sur l'apparence des surfaces visibles;
- certains auteurs signalent des pathologies induites par la consolidation utilisant des colles après des interventions datant seulement de 8-10 ans;
- plusieurs opérateurs craignent qu'il y ait en général « une mauvaise compatibilité entre le bois et la résine époxy, causant des problèmes de durabilité », sans véritables justifications. D'autres opérateurs continuent à utiliser les colles dans leurs activités de consolidation, à partir d'expériences favorables liées à la relative « légèreté » de ces systèmes par rapport aux autres techniques, même s'ils ne possèdent pas les éléments de base pour sélectionner les colles et effectuer un dimensionnement correct des assemblages.

Il est évident qu'un effort de développement et de standardisation est nécessaire et urgent dans ce domaine, intégrant la maîtrise des entreprises du bâtiment, la capacité technologique des producteurs des matériaux et les exigences de sécurité pour la conservation et l'exploitation du patrimoine bâti.

2. OBJECTIF DU TRAVAIL

L'objectif de ce travail repose principalement sur l'analyse des caractéristiques physiques et mécaniques des collages dans des emplois structuraux. Cet objectif s'inscrit dans le cadre du développement de systèmes de restauration plus "compatibles" avec le bois et plus performants par rapport aux produits et technologies actuellement disponibles, comme il est demandé par les différents professionnels de la filière "restauration" (conservateurs des Beaux Arts, architectes, ingénieurs, entrepreneurs du bâtiment). Le choix des colles, comme composant essentiel du système, est cohérent avec l'évolution que notre étude bibliographique et notre propre expérience ont montré dans ce domaine.

Les travaux développés ici s'inscrivent également dans la démarche de normalisation Européenne sur les colles pour le bois (CEN/TC193/SC1) et en particulier sur les colles structurales, pour lesquelles la révision des EN 301 et EN 302 (relatives aux phenoplastes et aminoplastes thermodurcissables) et le développement de nouvelles normes relatives aux polymères différents (polyuréthanes en particulier) sont en cours depuis 2-3 ans. En tant qu'expert représentant l'Italie au sein du TC193/SC1, je participe à ce travail.

Le programme de recherche établi pour atteindre cet objectif repose sur l'hypothèse qu'il est possible de modifier les caractéristiques rhéologiques des colles époxy pour obtenir un meilleur comportement mécanique et une meilleure compatibilité avec le bois. La performance d'une colle structurale est exprimée couramment en termes de résistance au cisaillement et de durabilité de l'assemblage vis-à-vis de sollicitations thermo-hygomécaniques, avec des méthodes standardisées. Mais dans le cas d'assemblages de fortes épaisseurs obtenues sans pression, les connaissances de base sur le comportement mécanique de ce type de joints restent limitées. De plus, le manque de méthodes d'essais spécifiques limite fortement les possibilités d'approfondissement lors de l'analyse des résultats et, par conséquent, limite les possibilités de formulation de colles plus performantes. En plus, pour faire apprécier un éventuel développement dans le domaine de la restauration, qui reste largement lié à des pratiques traditionnelles et à des préjugés sur les nouveaux matériaux, il est très important d'apporter une contribution scientifiquement et technologiquement significative. Il est utile de montrer qu'une "nouvelle" technologie, si elle est bien conçue et appliquée sur la base de l'évidence expérimentale, peut être plus pertinente qu'une approche dite "traditionnelle".

C'est pour ces raisons que le développement des formulations des colles, réalisé au sein de la société Mapei spa, a été interfacé de façon synergique avec notre travail de développement des méthodes de mesure et des critères d'analyse des caractéristiques physiques d'assemblages collés. En particulier, les typologies d'assemblage plus fréquemment utilisées ont été retenues (voire paragraphes 1.2.1 et 1.2.2), en conséquence les caractéristiques physiques analysées plus en détail ont été les plus critiques du point de vue de l'ingénieur:

- la résistance au cisaillement;
- la résistance à la delamination à l'interface bois-colle;
- la résistance à l'extraction de la tige métallique.

De plus, certaines caractéristiques complémentaires qui nous sont parues intéressantes pour compléter l'analyse du comportement des joints à l'interface en fonction des différentes rhéologies des colles ont été considérées, telles que:

- la stabilité dimensionnelle thermique des colles et du bois;
- la propagation de la fissure en mode I à l'interface bois-colle;
- le comportement des colles au fluage (écoulement visqueux sous charge à long terme).

Une série de 10 colles à base de résine époxy (toutes commercialisées spécifiquement pour la restauration des charpentes en bois) a été sélectionnée pour l'analyse des assemblages et la mise au point des nouvelles méthodes d'essais.

Les modalités d'analyse des caractéristiques physiques des assemblages (objet de ce travail) et les performances obtenues par les produits commerciaux testés ont donc constitué un système de références qui a été la "guide" nécessaire à l'optimisation des formulations pour le développement de nouvelles colles structurelles.

Pour des raisons évidentes de confidentialité vis-à-vis des producteurs de colles commerciales, toutes les références aux colles sont codées dans ce mémoire et dans les publications qui en sont tirées.

Pour des raisons de confidentialité vis-à-vis de Mapei spa, aucune formulation de colle objet du développement n'est décrite dans le mémoire, et aucun chiffre relatif aux essais sur les formulation en développement n'est inclu dans les tableaux et graphiques (avec la seule exception du produit "C" au paragraphe 3.2.5, inclus pour rendre évidente l'utilité du paramètre considéré).

3. EXPERIMENTATION

3.1 FORMULATION DES COLLES

Les colles utilisées dans cette étude ont été formulées chez Mapei spa en fonction des exigences d'application exprimés en termes de :

1. résistance au cisaillement ;
2. perméabilité à la vapeur d'eau ;
3. absorption d'eau.

Différents systèmes résine-durcisseur-charges ont été réalisés et testés, selon le schéma suivant :

1. systèmes époxy à 2 composants formulés avec :
 - a. la combinaison avec des pre-polymères polyuréthanes bloqués (synthétisés à partir de : TDI, polyol polyether, agents de blocage...)
 - b. la combinaison avec des pre-polymères uréthane-métacryliques (synthétisés à partir de TDI, polyol polyether, hydroxyalkyl méthacrylate)
 - c. co-emploi de résines époxy flexibles obtenues par branchage sur la chaîne époxy de caoutchoucs polyether avec un contenu élevé en oxyde d'éthylène
 - d. emploi comme durcisseur de polyamines éthoxylées
 - e. emploi comme durcisseur de siliconepolyamines
 - f. emploi comme charges de caoutchouc siliconiques
2. résines époxy à 2 composants flexibilisées hydrodispersées à contenu solide très élevé
3. résines polyuréthanes bi-composants tels que des polyisocyanates modifiés à terminaison et/ou prepolymères à base MDI terminés -NCO en combinaison avec des polyols polyether avec une haute fonctionnalité, un faible poids moléculaire et une haute teneur en EO, ou bien une siliconeamines ou polythiols.
4. résines polyuréthanes mono-composantes.

Les systèmes ont été préparés en condition de laboratoire (3-5 kg) et, pour les plus intéressants également en conditions d'installation pilote (20-50 kg) pour des tests d'application (voire chapitre 5). Aussi la viscosité du système et/ou son degré de thixotropie ont été réglés en fonction des exigences d'application.

D'autres informations sur la formulation des colles ne sont pas disponibles dans ce document, faisant l'objet d'une clause de confidentialité pour Mapei spa selon les contrats qui ont réglé les rapports entre les partenaires de cette étude.

3.2 ESSAIS

Le développement des méthodes d'essais a visé deux objectifs:

- réaliser des méthodes simples mais avec une bonne répétabilité, le plus possible indépendantes de la qualité du bois utilisé, aptes à l'emploi comme méthodes de laboratoire pour le développement des formulations des colles;
- obtenir des critères de jugement basés sur des paramètres quantitatifs et référables aux grandeurs nécessaires aux calculs des assemblages (si possible, utilisables dans la sélection des colles et/ou le dimensionnement des joints collés).

3.2.1 Cisaillement à l'interface bois-colle – Epreuve à simple entaille (méthode indirecte)

3.2.1.1 Bibliographie spécifique

Les essais de cisaillement constituent une méthode typique pour la détermination des performances des colles pour le bois, mais leur adaptation aux joints épais a reçu une attention très limitée. Même s'il existe des méthodes de test spécifiques pour les colles époxy appliquées sur acier et béton (EN, ASTM), leurs applications au bois semblent être difficiles et fréquemment erronées (Ceccotti, Mannucci, Uzielli, 1990).

Les méthodes qui ont été développées pour les colles structurelles thermodurcissables employées dans le bois lamellé-collé (EN 301 et EN 302, ou ASTM D 2559) ne peuvent pas être utilisées directement pour la caractérisation des colles époxy employées in-situ pour la consolidation des charpentes en bois, car ces dernières sont appliquées en joint épais et sans aucune pression.

La norme ATMS D 3931, par contre, a été spécifiquement développée pour des colles "gap-filling", mais il n'existe pas de littérature spécifique à propos de son application aux colles époxy pour le bois.

Pour le développement d'une colle époxy spécifique pour la consolidation du bois lamellé-collé, Radovic and Goth (1992) ont appliqué toutes les méthodes décrites dans la norme EN 302 (le cisaillement en traction), à des joints avec épaisseurs de 0,1-1 mm et ont montré une bonne correspondance aux exigences de la norme EN 301.

Dans un travail préalable, Bröker and Köhl (1991) avaient testé une colle époxy chargée avec des fibres de cellulose en cisaillement par compression, avec un appareillage qu'ils avaient développé pour tester simultanément deux plans de collage avec une épaisseur comprise entre 1 et 10 mm. Pour l'épaisseur de 1 mm, la comparaison avec des tests traditionnels en compression et traction indiquait des différences négligeables entre les trois méthodes.

Dans une vaste analyse des facteurs influençant la résistance des éprouvettes de cisaillement par compression, Okkonen and River (1988) avaient testé également une configuration avec une épaisseur du joint de 1/8-inch (approximativement 3mm), et en avaient montré l'influence.

Finalement, dans un récent développement d'une méthode prédictive de la résistance des joints plans à partir d'une analyse aux éléments finis Chui and Ni (1998) montraient que, dans une fourchette d'épaisseurs du joint de 0,05-0,2 mm, un joint plus mince conduit à des niveaux de contraintes de cisaillement plus élevés et des contraintes normales plus faibles. Ils montrent également que la contrainte de cisaillement au point critique (l'entaille) est sensible à l'épaisseur du joint.

3.2.1.2 Epreuve à simple entaille (méthode indirecte)

La méthode est basée sur la comparaison des résistances du joint collée (JC) et du bois massif (BM) d'un même lot, avant et après un cycle de vieillissement accéléré. Une série de 10 colles commerciales (toutes basées sur des résines époxy) a été sélectionnée pour la mise au point d'une nouvelle méthode d'essais finalisée au développement de nouvelles colles et à la comparaison des différents produits dans le cadre des normes techniques.

Tableau 6 - Les colles sélectionnées pour les essais de cisaillement.

Code	Description (résumé de la fiche technique du produit)
A1	Non chargée, faible viscosité, utilisée pour le masticage de fentes et le collage de tiges. La charge est choisie et mélangée par l'utilisateur.
B1	Chargée, fluide. Développée spécialement pour les tiges collées. Epaisseur du joint conseillée: 1 mm.
B2	Chargée, visqueuse. Epaisseur du joint conseillée: 3 mm.
C1	Chargée, fluide. Développée spécifiquement pour tiges collées et bétons.
D1	Non chargée, très fluide. La charge est choisie par l'utilisateur.
E1	Chargée, très visqueuse. Utilisée pour la reconstruction des parties (béton).
F1	Chargée, fluide. Spécifique pour fentes et percements. Indiquée pour des épaisseurs du joint jusqu'à 12 mm.
F2	Béton très chargé, pour chaque épaisseur du joint.
G1	Non chargée, faible viscosité.
H1	Chargée, thixotropique. Normalement utilisée pour les tiges collées.

Même si très différentes dans leurs caractéristiques et compositions, les 10 colles sont toutes spécifiquement commercialisées pour la restauration et la consolidation des bois anciens. Pour la plupart de ces produits, une expérience d'application de plus de 10 ans peut être démontrée par le fabricant.

Les colles, mélangées selon les indications du fabricant, ont été appliquées sur le bois d'épicéa (*Picea abies* L.), le chêne (*Quercus* spp.) et le châtaigner (*Castanea sativa* L.), qui sont les essences les plus fréquemment utilisées dans les charpentes anciennes en Italie.

Les éprouvettes de joints collés (JC) ont été préparées à partir de barres collées comme illustré sur la figure suivante (Figure 27):

- des planches, sélectionnées sans déviation de l'angle du fil du bois et avec peu de nœuds, ont été découpées avec des faces perpendiculaires (l'angle formé par les cernes et la dimension majeure de la section transversale est compris entre 30° et 90°);

- les épaisseurs de joint sont obtenues par des placages de 1 +/- 0,1 mm ou du contreplaqué de peuplier de 3 (ou 4) +/- 0,2 mm, préalablement collés à la planche inférieure avec une colle PVAc mono-composante.

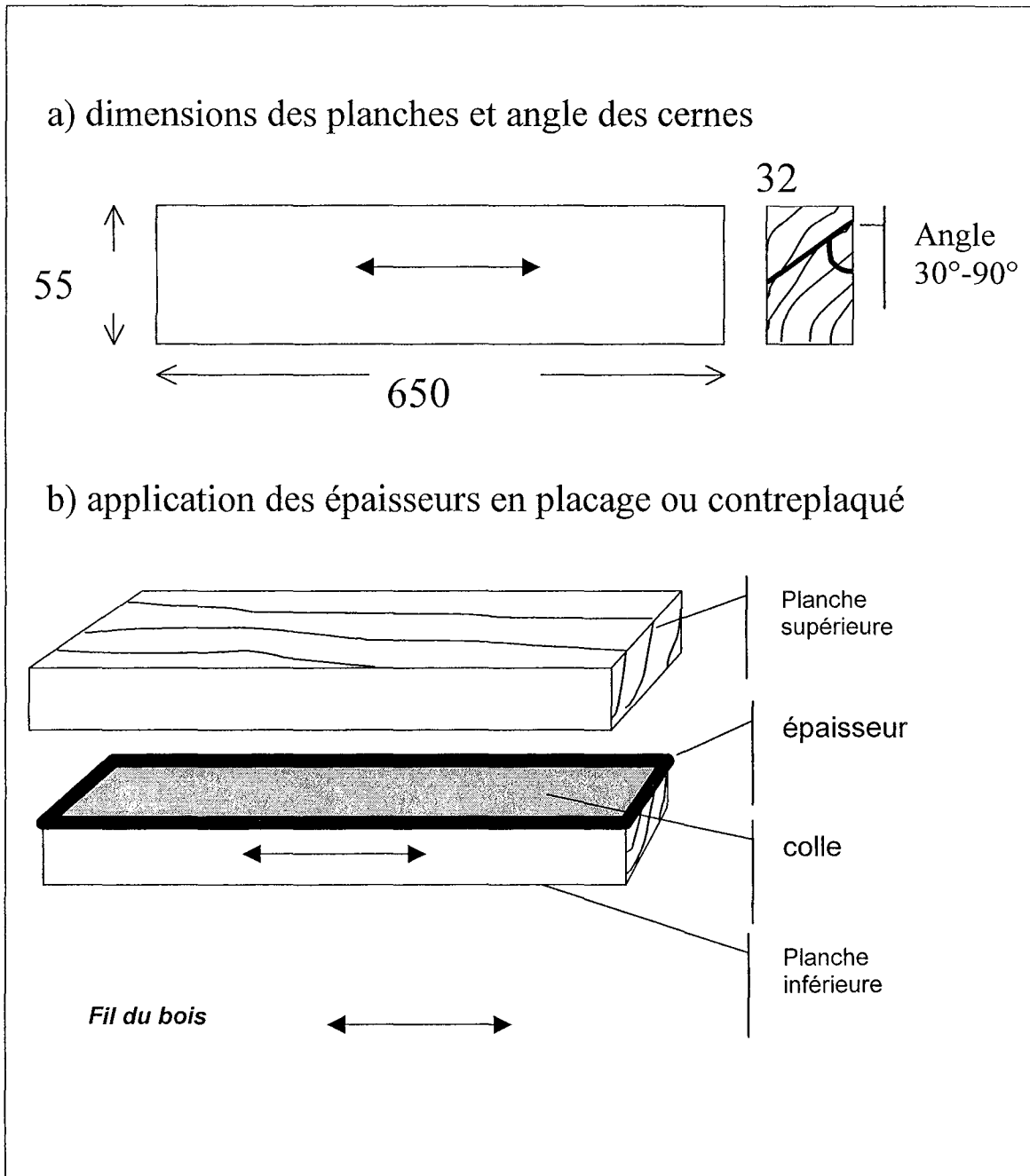
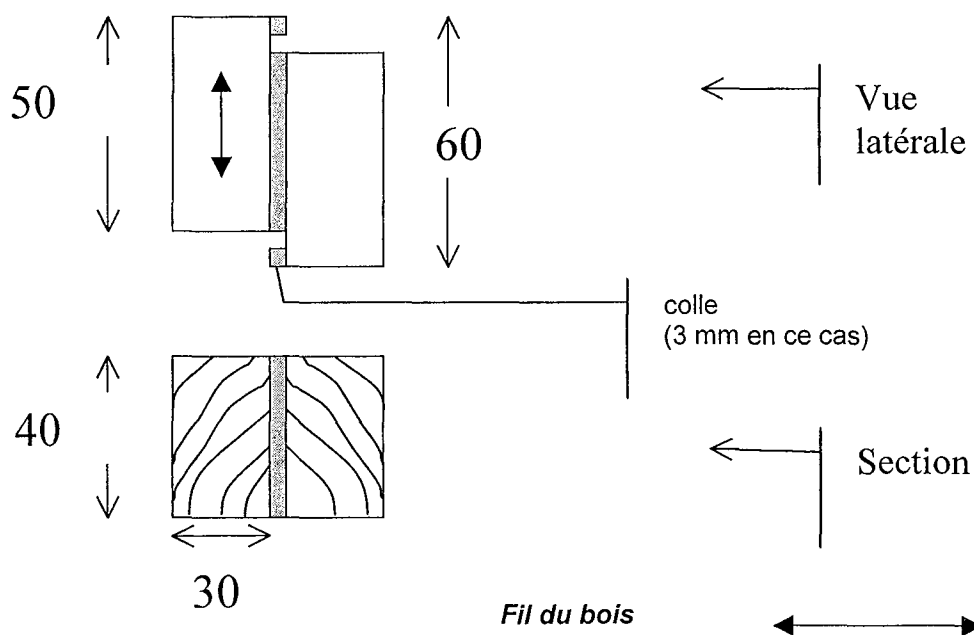


Figure 27 – Préparation des barres collées pour l'essai de cisaillement.

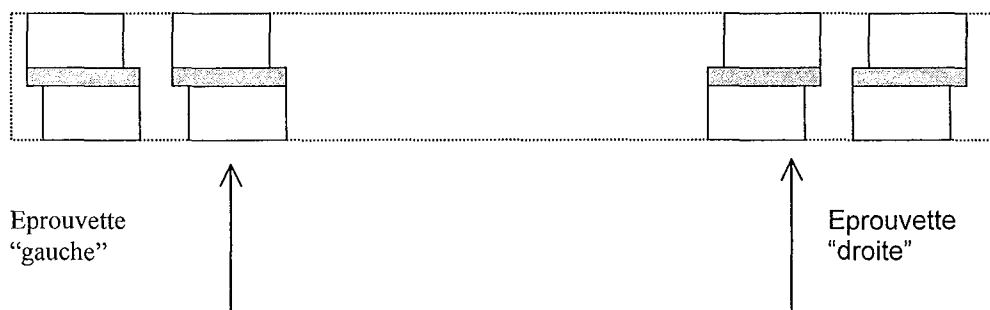
Une pression minimale est appliquée par serre-joints, et les barres sont laissées en chambre climatisée à 20°C et 65% HR pour 1 semaine. A l'issue de cette période, les barres sont découpées en éprouvettes de type "joint collé" (JC) avec une lame circulaire diamantée, une précaution est prise visant à découper une éprouvette "droite" et une éprouvette "gauche" en série, pour compenser l'éventuelle présence de petites déviations du fil du bois (Marra, 1992).

Figure 18 – Découpe des éprouvettes "joint collé" (JC) à partir des barres. Dans cet exemple: type de charge = compression et configuration de l'éprouvette = C.

a) dimension des éprouvettes (type C3C)

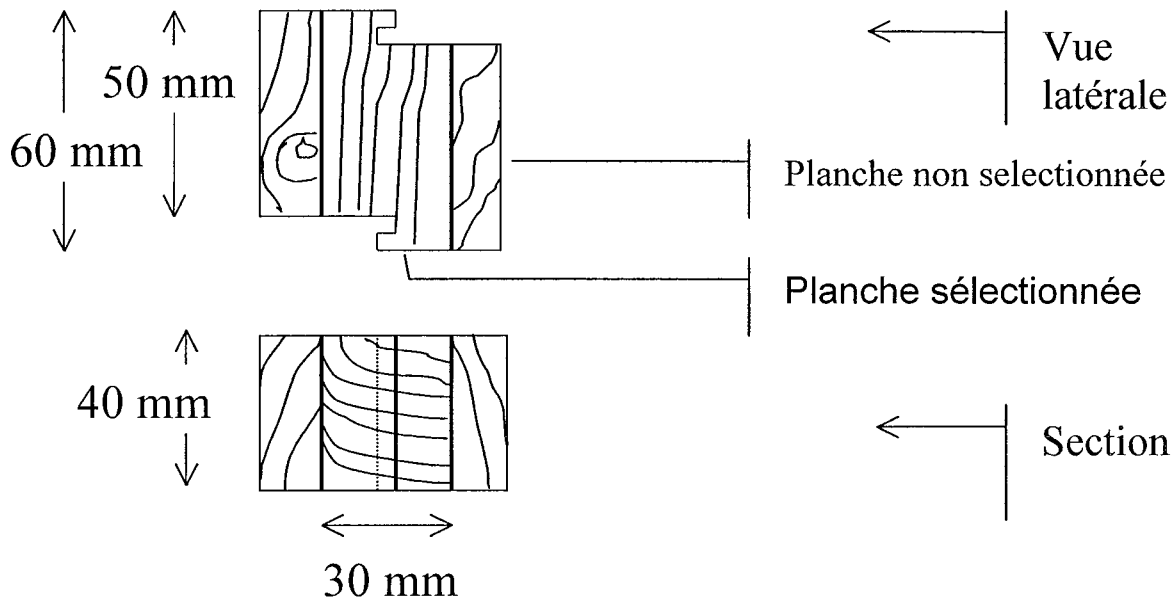


b) méthode de découpe d'éprouvettes "droites" et "gauches" pour minimiser l'influence d'éventuelles pente de fil



Les éprouvettes de bois massif (BM) utilisées comme référence ont été préparées à partir d'une planche sélectionnée (qui pourrait être utilisée pour les échantillons JC) et deux planches latérales non sélectionnées, avec une colle polyuréthane à deux composants appliquée en joint mince.

Figure 29 – Dimensions des éprouvettes en bois massif (BM). L'exemple est référé à une configuration "C" et un chargement en compression.



Le développement de la méthode comprend la prise en compte d'une modalité pour différentes caractéristiques, tels que:

- le *type de chargement* (traction similaire à la norme EN 302-1 ou compression similaire à la norme ASTM D 3931);
- la *configuration de l'éprouvette* (position relative de l'interface bois-colle et du plan théorique de cisaillement);
- l'*épaisseur* du joint collé (1, 3 et 4 mm ont été pris en compte);
- la *modalité d'application des charges*, en terme de vitesse ou du type de contrôle (en vitesse de traverse de la machine ou en vitesse d'augmentation de la charge);
- le *vieillissement accéléré* (effet de différents cycles sur la résistance du joint).

Les figures et tableaux suivants détaillent les options retenues.

Figure 30 – Typologies d'éprouvette: deux modalités de chargement (compression et traction) et trois configurations (A, B, C). La configuration A est asymétrique et applique la charge seulement sur une ligne de colle, la configuration B est symétrique et applique la charge dans le volume de colle, la configuration C est symétrique et applique la charge aux deux lignes de colle. Ces typologies d'éprouvette ont été réalisées pour les différentes épaisseurs du joint.

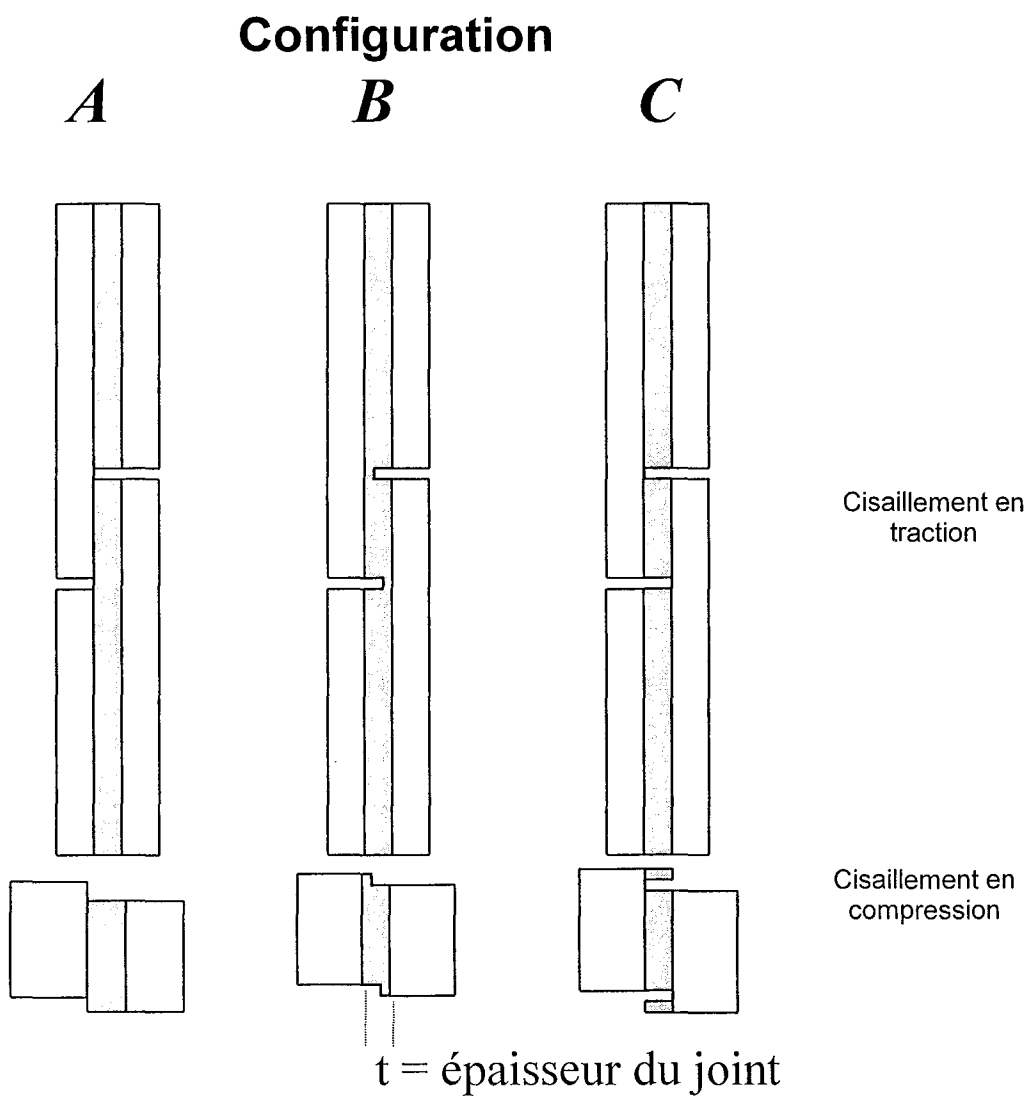


Tableau 7 – Les cycles de vieillissement accéléré. A la fin des cycles X, Y et Z les éprouvettes étaient conditionnées en atmosphère [20/65] pour 10 jours. A la fin du cycle W les éprouvettes étaient testées à l'état humide.

Cycle	Paramètres	Description
X	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 24 h à l'air à 50°C – 100% HR ▪ 24 h à l'air à 10°C – 100%HR ▪ 24 h à l'air à 50°C - <20%HR (durée = 48 h dans les week-end) Répété 6 fois + re-conditionnement.	Fortes variations dimensionnelles des éprouvettes. Similaire à EN 302-3. La température de l'air à 50°C peut continuer à faire durcir la colle.
Y	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 72 h en eau froide ▪ 72 h à l'air (durée = 96 h dans les week-end) Répété 3 fois + re-conditionnement.	Comporte l'immersion dans l'eau. Variations dimensionnelles moyennes (moins de retrait que dans le cycle A). Similaire à EN 302-1 niveau A3, mais répété 3 fois.
Z	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 48 h à l'air à 20°C – 65% HR ▪ 48 h à l'air (non conditionnée) (durée = 72 h dans les week-end) Répété 4 fois + re-conditionnement.	Variations dimensionnelles faibles. Cycle utilisé comme référence.
W	Cycle: 3 imprégnations, avec 2 séchages interposés (testé humide). Imprégnation en autoclave: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 10 min vide à 700 mm Hg ▪ 50 min en eau à 5 kg/cm² Séchage: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 23 h en étuve ventilée à 65°C avec vitesse de l'air 2 m/sec 	Variations dimensionnelles de l'éprouvette maximum. Chargement à l'état humide (colle sous contrainte appliquée par le gonflement du bois). Similaire à ASTM D 2559.

Les modalités d'essais ont été choisies progressivement, avec une subdivision du travail en différentes expérimentations, chacune avec une quantité limitée de variables. L'analyse statistique était basée sur un niveau de probabilité de $p < 0,01$ et conduite selon les nécessités de chaque expérimentation, avec un software Microsoft Excel 97. Elle comportait:

- analyse de variance (ANOVA): à deux et un facteurs;
- test de Tukey (TT) pour la différence significative entre moyennes.

Le nombre minimum d'éprouvettes valides pour chaque échantillon était fixé à 20, après l'élimination des éprouvette défectueuses (présence de bulles d'air, nœuds non visibles, évidence de déviation du fil du bois et caractéristiques similaires capables de modifier le résultat). 30 éprouvettes au départ était un nombre normalement suffisant pour mener l'expérimentation à terme.

3.2.1.3 Résultats

L'effet des modalités de chargement, de la configuration de l'éprouvette et de l'épaisseur du joint ont été analysés avec la colle B1 (l'une des meilleures d'après les test préalables) sur le bois d'épicéa. Les deux tableaux suivants résument ces résultats.

Tableau 8 – Valeurs moyennes de résistance au cisaillement (N/mm^2) pour la modalité de chargement, l'épaisseur du joint et la configuration de l'éprouvette.

MODALITE DE CHARGEMENT		TRACTION			COMPRESSION		
EPAISSEUR DU JOINT (mm)		1	3	4	1	3	4
Code		T1	T3	T4	C1	C3	C4
CONFIGURATION DE L'ÉPROUVETTE:							
A – asymétrique, chargé sur 1 côté	Moyenne	5,867	4,489	3,915	7,654	8,162	6,474
	Variance	0,620	0,377	0,044	1,594	1,253	3,552
B – symétrique, chargée dans la colle	Moyenne	4,087	3,806	4,115	9,393	7,928	8,649
	Variance	0,346	0,082	0,044	4,405	2,685	0,962
C – symétrique, chargée sur 2 côtés	Moyenne	4,561	3,716	4,057	8,570	9,189	9,253
	Variance	0,558	0,024	0,166	2,558	0,365	3,278

Tableau 9 – Résultats de l'analyse de variance à 2 facteurs sur les données du tableau 8. Un niveau de probabilité $p < 0,01$ est considéré comme significatif.

MODALITE DE CHARGEMENT	TRACTION	COMPRESSION
	Probabilité (p)	Probabilité (p)
Configuration de l'éprouvette	9,51E-08	0,000309
Epaisseur du joint	1,08E-09	0,552497
Interaction	4,85E-07	0,030614

Les essais en traction conduisent à des résistances beaucoup plus faibles que les essais en compression, probablement à cause de l'influence majeure des contraintes normales, comme déjà remarqué par Strickler (1968). La résistance des éprouvettes testées en compression montre une variabilité plus élevée, et demande un nombre plus élevé d'éprouvettes pour obtenir le même niveau de confiance lors d'une évaluation statistique des résultats comme celle actuellement imposée par les Eurocodes. Le problème majeur des éprouvettes en traction repose sur la présence d'une interaction entre configuration et épaisseur du joint, ce qui ne permet pas de classifier séparément les deux variables. D'autre part, les éprouvettes de compression ne montrent pas ce type d'interaction et ont un effet bien plus significatif permettant de les classifier indépendamment des épaisseurs du joint et autorisant un libre choix de l'épaisseur. Une analyse ultérieure sur les configurations est pourtant utile (Tableau 10). L'analyse montre que la différence entre configurations est très significative, et le test de Tukey indique qu'une différence $> 0,97 N/mm^2$ est suffisante pour montrer que la configuration A (qui implique la résistance plus faible) est différente des deux autres, elles-mêmes non différenciées.

CONFIGURATION DE L'ÉPROUVETTE:	Moyenne (N/mm ²)	Variance (N/mm ²)
A – asymétrique, chargée 1 côté	7,430	2,503
B – symétrique, chargée dans la colle	8,657	2,869
C – symétrique, chargée sur les 2 côtés	9,004	2,023
ANOVA 1-facteur entre configurations	Probabilité (p)	0,000491
TUKEY TEST: différence significative entre les moyennes des configurations (N/mm ²)	Sd	0,967885

Tableau 10 – Résultats de l'analyse de variance à 1 facteur et du Test de Tukey sur les données du Tableau 8, limitée à la modalité de chargement en compression, sans distinction d'épaisseur du joint.

Les typologies de rupture des éprouvettes ont également été analysées. La configuration C a été jugée la meilleure: dans la configuration A le nombre d'éprouvettes où la rupture traverse la ligne de colle est maximum, alors que dans la configuration B il existe une tendance marquée à la propagation de la rupture sur une des deux interfaces dans la partie inférieure de l'éprouvette. La configuration C produit les ruptures les plus acceptables, qui se développent le long de l'une des deux interfaces.

Le marquage des éprouvettes a été utile pour montrer qu'il n'y avait pas, dans cette configuration, un "coté faible" lié à des différences systématiques dans l'application de la colle ou dans l'appareillage et le chargement des éprouvettes.

Pour ce qui concerne les modalités d'application des charges, la comparaison des courbes charge/déplacement ne montre pas de différences significatives entre le contrôle de la vitesse ou du taux d'application de la charge (figure suivante). Cela a été observé pour toutes les colles, pour la typologie d'éprouvette sélectionnée dans l'étape précédente (type C3C, Figure 28).

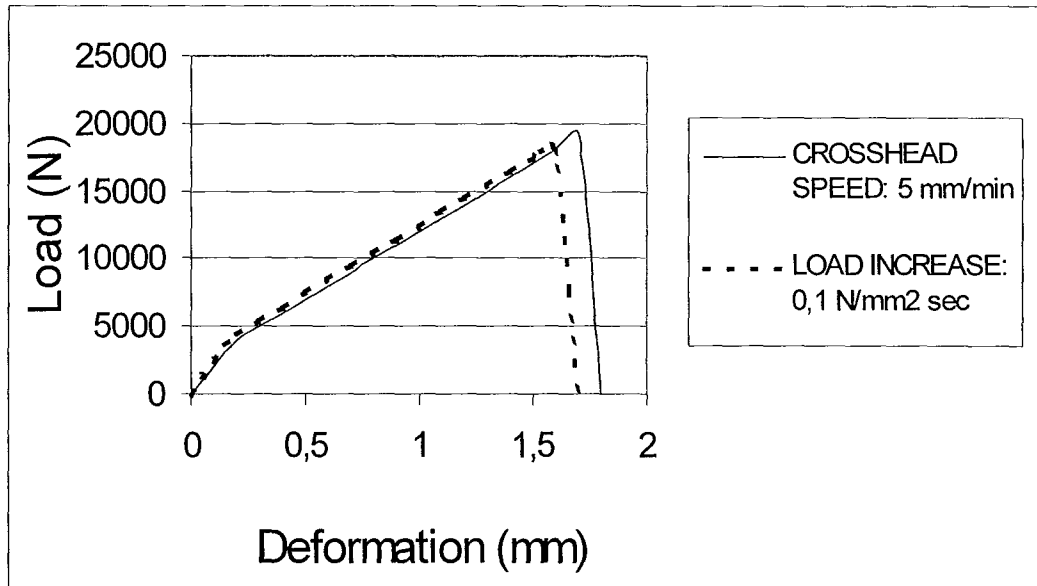


Figure 31 – Comparaison des courbes charge/déplacement pour les deux modalités d'application des charges. Note: Crosshead speed = vitesse de la traverse; Load increase = taux d'augmentation de la charge.

L'effet des vitesses différentes, qui est significatif pour les colles à faibles modules d'élasticité (par exemple les PVAc), a été testé pour la colle B1 seulement. En ce cas, aucun effet significatif n'a été remarqué pour la modalité "contrôle d'augmentation de la charge" avec des temps de rupture plus rapides de 5 et 10 fois (Tableau 11). Cette modalité a donc été préférée grâce à sa meilleure progressivité, et la vitesse de $0,1 \text{ N/mm}^2 \text{ sec}$ a été choisie parce que est très proche des critères fixés par la EN 302-1.

Tableau 11 - Effet des différentes vitesses. Eprouvette type C3C, colle type B1.

TAUX D'APPLICATION DE LA CHARGE ($\text{N/mm}^2 \text{ sec}$)	Temps de rupture (sec)	Résistance (N/mm^2)	Variance (N/mm^2)
0,1	80-130	10,82	3,20
0,5	15-25	11,29	2,81
1	8-14	11,05	5,37
ANOVA 1-facteur entre taux d'application		Probabilité (p)	0,828368

L'effet des cycles de vieillissement a été analysé avec les colles A1, B1 et C1 sur éprouvettes de bois d'épicéa. Les tableaux suivants résument les valeurs moyennes de résistance et les résultats de l'ANOVA.

Tableau 12– Cycles de vieillissement: valeurs moyennes de résistance (N/mm²).

CYCLE:		TYPE DE COLLE		
		A1	B1	C1
X – grandes variations dimensionnelles	Moyenne	10,225	10,559	11,731
	Variance	1,416	1,690	0,994
Y- moyennes variations dimensionnelles	Moyenne	10,979	11,403	11,422
	Variance	1,817	1,393	0,530
Z – petites variations dimensionnelles	Moyenne	11,496	11,488	12,095
	Variance	1,938	2,743	1,090

	Probabilité (p)
Cycle	0,000961
Colle	0,000716
Interaction	0,183705

Tableau 13– Résultats de l'ANOVA à 2-facteurs sur les données du Tableau 11.

Les interactions entre cycles et types de colle ne sont pas significatives et les deux variables ont un effet significatif, elles peuvent être ainsi classifiées indépendamment. L'effet des cycles semble être assez limité, parce que la diminution de résistance en cisaillement par rapport au cycle Z (considéré comme référence) est de seulement 7,3 % dans le cas du cycle X (avec fortes variations dimensionnelles), et il n'y a pas de différence entre les cycles X et Y (Tableau 14).

CYCLE DE VIEILLISSEMENT:	Moyenne (N/mm ²)	Variance (N/mm ²)
X – grandes variations dimensionnelles	10,839	1,745
Y – moyennes variations dimensionnelles	11,268	1,247
Z – petites variations dimensionnelles	11,693	1,941
1-factor ANOVA entre cycles	Probabilité (p)	0,001629
TUKEY TEST: différence significative entre les valeurs moyennes des cycles (N/mm²)	Sd	0,68

Tableau 14 – Résultats de l'ANOVA à 1 facteur et du TT sur les données du Tableau 11, relative aux cycles de vieillissement, sans considérer le type de colle.

Normalement, un cycle de vieillissement accéléré doit comporter des diminutions de la résistance plus importantes pour être considéré comme sélectif (par exemple, la norme EN 301 permet jusqu'à 20% de réduction de la résistance lorsque les éprouvettes sont re-conditionnées comme dans le cas présent). Pour cette raison, un cycle plus fort a été choisi (cycle W, Tableau 7), qui implique de fortes variations dimensionnelles et le chargement de l'éprouvette à l'état humide. Comme référence,

il faut rappeler que la EN 301 accepte, pour le chargement à l'état humide, une baisse de résistance pouvant aller jusqu'à 40%.

Une autre remarque assez importante suggérée par cette expérimentation porte sur l'emploi d'un lot différent de bois d'épicéa (même si la largeur des cernes était quasi identique). Ce lot avait conduit à une augmentation de la résistance moyenne de 2 N/mm² (+ 25%) avec la même colle (B1). A partir de cette constatation, la méthode d'évaluation relative des résultats, c'est à dire la pratique de confrontation des moyennes des éprouvettes "joint collé" (JC) avec celles des éprouvettes "bois massif" (BM), trouve toute sa validité.

Ayant sélectionné le type d'éprouvette "C3C", la vitesse d'application de la charge (0,1 N/mm² sec) et le cycle de vieillissement accéléré, dans un test ultérieur quatre types de colle (A1, B1, C1 et D1) ont été testés avec 3 essences de bois (épicéa, chêne et châtaigner). Les évaluations relatives (éprouvettes JC et BM produites avec le même lot de bois) ont été introduites. Les résultats sont résumés dans la figure suivante pour la colle B1, et montrent une tendance similaire pour les autres colles. Il est intéressant d'observer que les éprouvettes JC d'épicéa testés à sec ont une résistance supérieure aux éprouvettes BM correspondantes. Cela a été également observé pour la colle D1, et pourrait être dû à une surface résistante plus grande (une bonne pénétration de la colle dans le bois, résultant de la formation d'une très bonne interface) et par une plus grande plasticité des adhésifs (ce qui pourrait minimiser les concentrations de contrainte aux points critiques).

Le comportement après les cycles de vieillissement est bon pour le bois d'épicéa: la résistance à l'état humide des éprouvettes JC est égale à celui des éprouvettes BM, avec seulement une variabilité légèrement plus importante. Dans le cas du châtaigner, les quatre colles ont eu un comportement similaire, avec une bonne performance à sec et une baisse marquée à l'état humide. Dans le cas du chêne, comme on pouvait le supposer, la différence entre éprouvettes JC et BM a été importante: le bois de chêne n'est pas facile à coller (il nécessite des adhésifs avec une bonne mouillabilité) et génère des contraintes de gonflement et retrait plus importantes que les deux autres essences.

De manière générale, les colles structurelles thermdurcissables qui montrent des faibles résistances à l'état humide sont considérées avec suspicion (Raknes, 1997), parce qu'elles induisent la formation de fissures dues au retrait de réticulation, ce qui génère une interphase endommagée (River, Ebewele, Myers 1994). Cela est très important dans le cas des colles époxy parce qu'elles sont connues (en tant que classes de produits) pour avoir une faible stabilité dimensionnelle lors de la réticulation, deux considérations justifient cette prudence:

1. les produits ne sont pas tous égaux, et les résines de base sont chargées;
2. le recul lié à l'application des colles époxy sur le bois n'est pas aussi important que celui relatif à l'utilisation des PF, MUF et UF.

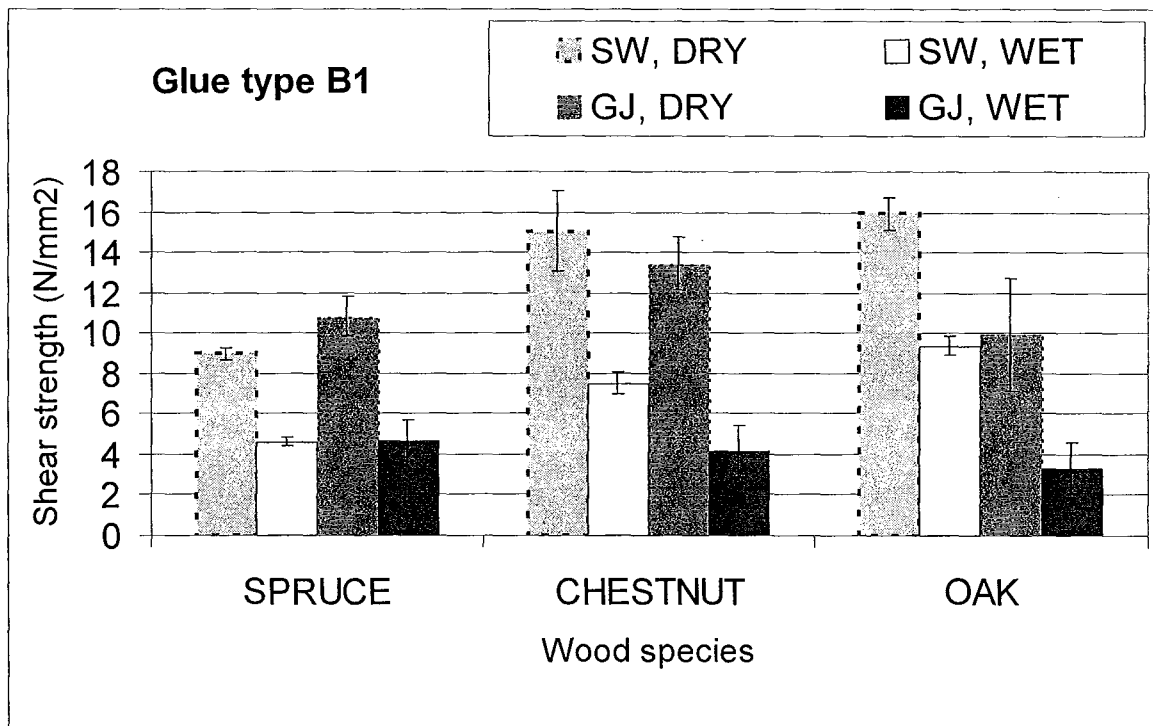


Figure 32 – Résistance de la colle B1 avec différentes essences de bois. Epreuve type "C3C", cycle type "W". Les barres verticales indiquent les deviations standard.

Note: SW = bois massif; GJ = joint collé; spruce = épicéa; Chestnut = châtaigner; Oak = chêne.

Le rapport entre les résistances des JC et des BM peut être utilisé pour établir un index de "compatibilité entre les deux matériaux (bois et colle), mais cela demandera une étude plus approfondie et la rédaction d'un document spécifique.

En ce qui concerne la comparaison des différents produits, un dernier test a été réalisé avec la méthode ainsi définie (Figure 33). Des différences considérables ont été mises en évidence, sans mettre tous les produits au même niveau, ce qui montre que la méthode est un bon instrument pour la caractérisation des performances. Plus que la comparaison des résistances en cisaillement des JC à sec, des indicateurs efficaces peuvent être calculés comme le rapport entre résistance à sec et à l'état humide.

Dans le lot des 10 colles testées, seules les types C1 et F1 ont une résistance à sec du JC supérieure à celle du BM et une résistance à l'état humide qui est > 50% de la résistance à sec. C'est une classe de produits avec des performances supérieures par rapport aux autres colles, elles sont ainsi susceptibles de passer les tests EN 301 pour les colles structurales.

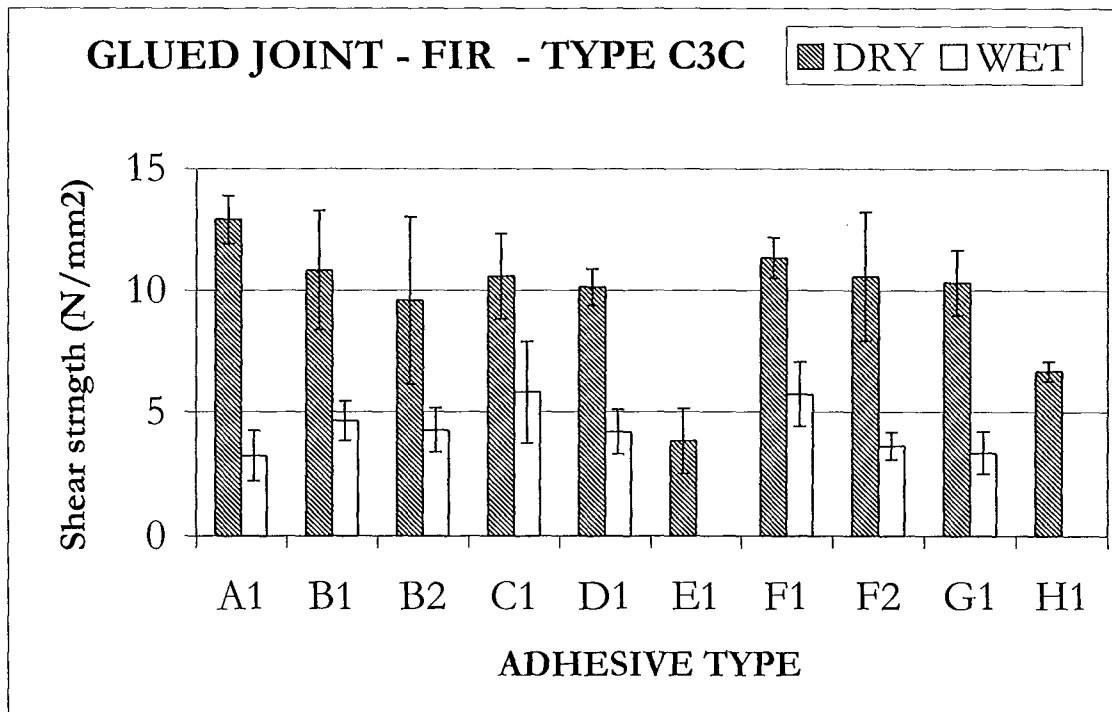


Figure 33 – Résistance des différents types de colle. Epreuve type C3C, bois d'épicéa, cycle type "W". Les barres verticales indiquent les déviations standard.
 Note: DRY = à sec; WET = à l'état humide.

Trois colles (B1, B2 et D1) ont une résistance à l'état humide qui est supérieure de 40% aux performances à sec, ce qui les rend acceptables pour le collage du bois (comparables aux colles EN 204 type D4, pour menuiseries extérieures).

Trois autres colles (A1, G1 et F2) ont des performances significativement plus faibles à l'état humide, principalement à cause de fortes délaminations.

Enfin, les colles E2 et H1 ne peuvent certainement pas être considérées comme acceptables pour un emploi structurel sur le bois.

En conclusion, la méthode développée ici a montré qu'elle permettait de mettre en évidence les différences de performances entre 10 colles spécifiquement commercialisées pour la consolidation du bois. La méthode est simple, elle peut être mise en oeuvre avec un appareillage d'essais largement disponible et nécessite peu de temps pour la préparation des éprouvettes, leur conditionnement et leur mise en oeuvre. L'évaluation des résultats peut être basée sur le rapport entre résistance à sec et à l'état humide, ou sur la comparaison entre éprouvettes JC et BM préparées à partir du même lot de bois (pour minimiser l'influence de la variabilité dans les caractéristiques mécaniques du bois). Grâce à la qualité de la méthode d'essais, les différences mises en évidence entre les 10 colles sont considérées comme significatives et indiquent clairement que les performances ne sont pas nécessairement similaires au sein d'un groupe de mêmes produits (comme cela a été simplifié dans l' Eurocode 5). Les caractéristiques doivent être démontrées pour chaque produit et pour chaque type d'application (comme cela est bien connu par les applicateurs).

Le CEN TC 193 SC1 a pris en considération la méthode présentée dans ce paragraphe au sein de son WG11 (colles pour les interventions sur chantier) à partir de nos travaux et de nos propositions.

Bibliographie citée

- Avent RR., 1992. Structural design for epoxy repair of timber. Wood design Focus 3/1992
- Bertolini Cestari C., 1994. Tecniche di consolidamento e loro durabilità: problemi di intervento ed aspetti progettuali. RILEM 48th Gen. Council Workshop, Trento
- Broker F W, Kuhl J., 1991. Untersuchungen an zellulosefasergefüllten Epoxidharzen zur Sanierung breiter Risse in Bauholz. Bauen mit Holz, vol.93, N°9
- Ceccotti A, Mannucci M, Uzielli L (1990) Effetti del riassorbimento di umidità sul comportamento ad estrazione di barre di acciaio ancorate nel legno mediante resina epossidica. Proc. 2nd Congresso Nazionale sul Restauro del Legno, Firenze, 8 novembre 1989. Nardini Ed., Firenze 1990
- Chui YH, Ni C, (1998) Stress distributions in glued wood lap joint subjected to an axial force. Proceedings 5th World Conference on Timber Engineering - Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne
- Marra AA (1992) Technology of wood bonding: principles in practice. Van Nostrand Reinhold, New York
- Mettem CJ, Page, Davis (1995) Long-term performance of resin bonded systems for structural timbers - Case studies of repairs in service. Report PIF 108/4 TRADA Technology Ltd
- Mettem CJ, Page, Zeki (1995) Long-term performance of resin bonded systems for structural timbers - Classification and upgrading systems using epoxy resins. Report PIF 108/1 TRADA Technology Ltd
- Okkonen EA, River BH (1988) Factors affecting the strength of block-shear specimens. For. Prod. J. 39(1):43-50
- Phillips MW, Selwin JE (1978) Epoxies for wood repairs in historic buildings. Publication, Heritage Conservation and Recreation Service, US Dept. of the Interior, n.1
- Pizzo B (1999) Compatibilità, durabilità e reversibilità nel restauro delle strutture lignee. Diagnosi del degrado, tecniche e materiali per il consolidamento. PhD: Tecnologie chimiche e dei nuovi materiali - Un. di Palermo, Dip. di Ing. Chimica dei Processi e dei Materiali.
- Radovic B, Goth H (1992) Entwicklung und Stand eines Verfahrens zur Sanierung von Fugen im Brettschichtholz. Bauen mit Holz 9/92
- Raknes E (1997) Durability of structural wood adhesives after 30 years ageing. Holz als Roh- und W. 55:83-90
- River BH, Ebewele RO, Myers GE (1994) Failure mechanisms in wood joints bonded with urea-formaldehyde adhesives. Holz als Roh- u. W. 52:179-184
- Strickler MD (1968) Adhesive durability: specimen designs for accelerated tests. For. Prod. J. 14(1):84-90
- Tampone G (1996) Il restauro delle strutture di legno. Hoepli Ed., Milano

3.2.2 Cisaillement à l'interface bois-colle - Eprouvette à double entaille (méthode directe)

3.2.2.1 Introduction et bibliographie spécifique

Pour une évaluation correcte des adhésifs structuraux pour les applications sur bois il est utile de comparer les performances du joint collé avec celles du bois massif. La caractéristique mécanique de référence est certainement la résistance en cisaillement.

Avec la méthode d'essais « à simple entaille » illustrée au paragraphe précédent, les valeurs de référence pour la résistance au cisaillement du bois (τ_{LM}) sont mesurables avec des éprouvettes de géométries identiques aux éprouvettes collées, testées dans les mêmes conditions (cycles de vieillissement accéléré, vitesse de réalisation de l'essai). La valeur obtenue dans nos essais sur plus de 100 éprouvettes provenant de 10 lots différents de bois peut être considérée représentative du bois d'Epicéa (*Picea abies* L.) et montre une valeur moyenne $\tau_{LM} = 8,3$ MPa et un coefficient de variabilité d'environ 13%, avec des valeurs comprises entre 4 MPa et 11 MPa (94% des valeurs comprises entre 6,5 MPa et 10,5 MPa).

Une telle variabilité nous semble trop élevée, conduisant à une approximation grossière pour un emploi des résultats finalisés à la définition d'une qualité normative ou d'un facteur correctif pour les calculs structuraux. Cette approche oblige à travailler toujours avec un nombre élevé d'éprouvettes pour avoir des données significatives.

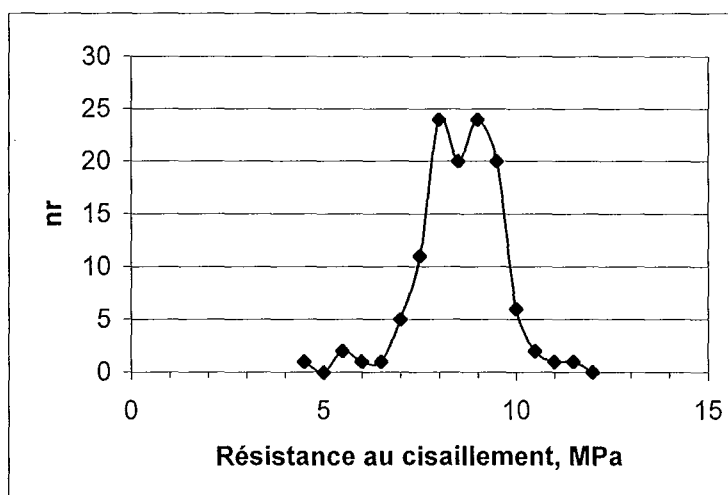


Figure 34 – Distribution des résistances au cisaillement dans la population d'Epicéa considérée.

Une première possibilité d'estimer τ_{LM} d'une façon plus fiable est de considérer les lots spécifiques d'où les éprouvettes proviennent, en les identifiant et en rendant reproductible chaque éprouvette à son lot d'origine. Avec cette approche les éprouvettes sont tirées du même lot de bois et plus spécifiquement de la même planche dans laquelle sont tirées les barres de bois pour les éprouvettes collées. Cette approche garantit certainement la plus grande homogénéité des résultats, mais présente des difficultés et un travail supplémentaire pour la gestion des lots. Une

autre limitation de cette approche repose sur la difficulté d'obtenir les éprouvettes avec une inclinaison comparable des cernes par rapport au plan de collage.

La meilleure méthode pour dépasser ces deux problèmes est certainement d'effectuer la mesure pour la comparaison bois-joint collé directement sur chaque éprouvette collée, en effectuant d'abord l'essai de résistance au cisaillement du joint collé et ensuite celle de résistance au cisaillement du bois massif, dans les mêmes conditions d'application de la charge.

Pour permettre cette évaluation directe, une nouvelle géométrie des éprouvettes a été développée, dite « à double entaille ». Sur la même géométrie générale des éprouvettes déjà décrites (Lavisci et al., 2001) a été ajouté un couple d'entailles qui permet la réalisation d'un essai de cisaillement sur chacun des adhérents en bois (Figure 35).

Figure 35 – Géométrie des éprouvettes de joint collé avec entaille simple (A) ou double (B). Leur section est égale (C).

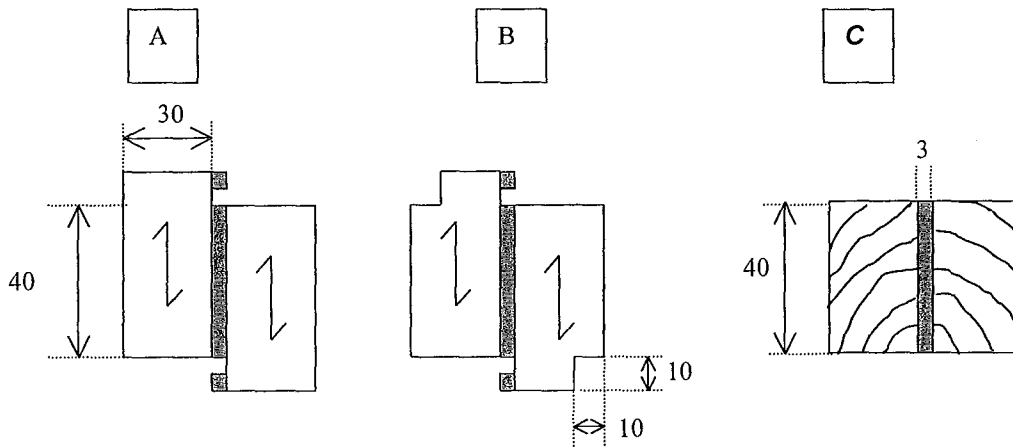
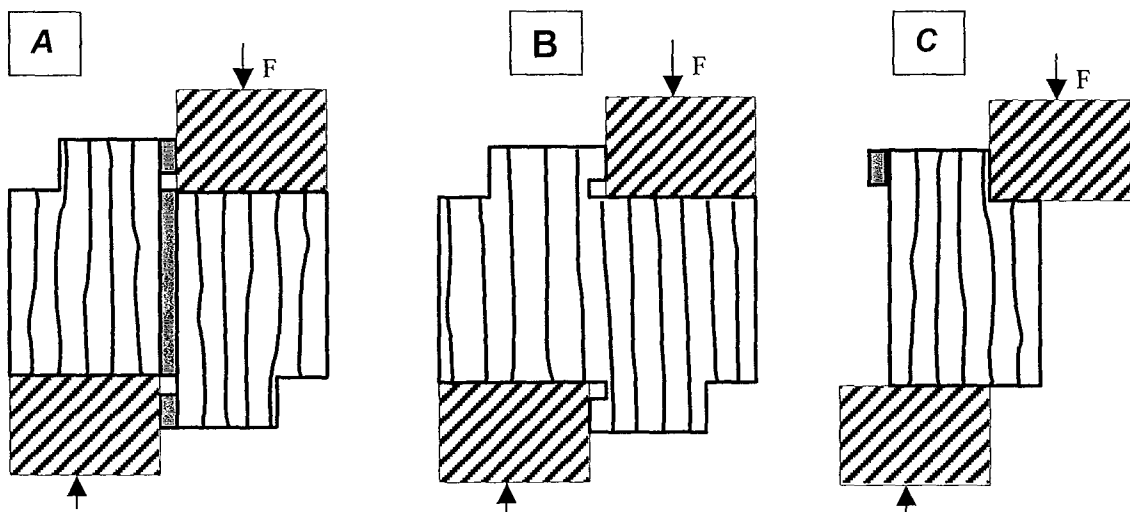


Figure 36 – Modalité d'essais des éprouvettes à double entaille : les joints collés (A) et bois massif (B) sont chargés avec offset de 3mm, le bois massif constituant l'un des adhérents (C) est chargé sans décalage.



De cette manière les éprouvettes sont testées deux fois:

- le premier test sert à évaluer la résistance au cisaillement du joint et est effectué à l'interface entre bois et adhésif, avec un décalage entre les deux supports d'application de la charge égale à l'épaisseur de l'adhésif, dans notre cas 3 mm (Figure 36a);
- le deuxième test est effectué sur l'un des deux adhérents, en choisissant préférentiellement le côté où s'est propagé la rupture (Figure 36c) car de ce côté la résistance au cisaillement du bois en proximité de l'interface s'est avérée plus faible par rapport à l'autre adhérent.

Dans ce cas la géométrie d'essais sur le bois est semblable à celle prévue par la norme ISO 8905, mais la charge est appliquée sur un même plan de résistance (absence de décalage, figure 36c). La norme ISO 8905 prévoit un décalage de 3 mm, pour compenser l'éventuelle présence d'une légère pente du fil. Cependant Okkonen et River (1988) ont observé que la présence de cet décalage fait diminuer la résistance au cisaillement des éprouvettes, et quelques essais préliminaires sur notre bois d'Epicéa ont confirmé effectivement cette remarque. Pour cette raison il a été décidé d'effectuer le deuxième test avec application de la charge sur le même plan de résistance (sans décalage).

Les variations de la méthodologie d'essai par rapport à l'éprouvette « à simple entaille » peuvent être décomposées en deux facteurs:

1. les adhérents sont soumis à une sollicitation mécanique en deux temps, et il est possible que les contraintes appliquées dans le premier essai influent sur le résultat du deuxième (par exemple, si les contraintes sont d'intensité supérieure à la limite élastique du bois ou provoquent des micro-fentes);
2. l'exécution du deuxième test en absence de décalage implique une différence de distribution des contraintes dans le volume de bois sollicité, par rapport à l'essai « à simple entaille ».

Pour vérifier si la détermination de la valeur de référence du bois massif (τ_{LM}), est influencée par les effets des deux facteurs décrits, l'analyse d'un modèle développé sur ANSYS rel. 5.3 a été associée à l'évaluation expérimentale des éprouvettes. Le modèle développé a permis l'analyse de la distribution des contraintes dans les deux types d'éprouvettes, afin d'évaluer leur nature et entité le long de l'interface bois-colle.

Notre attention s'est concentrée également sur les caractéristiques des ruptures des différents lots de bois utilisés, car sur les éprouvettes avec décalage sont certainement générés des efforts horizontaux de traction perpendiculaire à la direction du fil du bois, qui compensent le moment engendré par la valeur de décalage. Ce paramètre a été évalué en analysant l'énergie de rupture en mode I, avec des mesures directes. Dans une première approche visant à appliquer la mécanique de la rupture aux matériaux hétérogènes et anisotropes, le bois a été considéré comme matériau élastique et par conséquent l'étude de la propagation des ruptures était de type linéaire (LEFM, *linear elastic fracture mechanics*). Cette approche a donné de bons résultats dans l'étude du bois massif (Triboulot et al, 1983 - Triboulot et al, 1984) et a aussi été appliquée aux joints collés avec succès (Duchanois, 1984). Cependant le comportement à la rupture présente une partie non linéaire qui peut être importante dans notre cas. Boström (1994) suggère que l'analyse linéaire élastique trouve ses limites d'application quand il n'y a pas de

fissure initiale ou quand la surface de propagation de la rupture est importante par rapport à l'épaisseur de l'éprouvette ou par rapport à la longueur de la fissure. Pour cette raison, il propose un type d'analyse différent. Cette analyse élasto-plastique a été choisie par d'autres auteurs. Deaudeville (1999) a comparé les deux méthodes pour une éprouvette suggérée comme standard par le RILEM et le CIB-W18 : il a pu remarquer que la partie plastique des courbes est importante et que l'analyse linéaire élastique n'est plus adaptée à ce type d'éprouvettes. Ainsi Stanzi-Tschegg et al. (1994 -1995), Tan et al. (1995) et Reiterer (2000) ont choisi l'analyse élasto-plastique pour leurs essais.

3.2.2.2 Eprouvette à double entaille

Essais de résistance au cisaillement

Pour comparer la valeur de résistance au cisaillement obtenue avec la méthode d'évaluation directe (éprouvette « à double entaille ») avec celle des éprouvettes traditionnelles, des éprouvettes en bois massif ont été préparées avec une géométrie identique à celle des éprouvettes collées, avec les entailles supplémentaires de 10x10 mm (Figure 36b). Les éprouvettes ont été préparées à partir de 6 lots différents de bois, pour obtenir au moins 10 résultats utiles pour chaque série d'éprouvettes.

Les angles d'inclinaison des cernes par rapport au plan de cisaillement sont reportés dans le tableau suivant:

lot	A1		A2	A3	A4	A5	A6	
angle	20°	90°	30°	20°	90°	90°	45°	90°

Les essais ont été exécutés sur la même machine universelle d'essais, en utilisant le même dispositif et la même vitesse d'application de la charge des essais décrits par Lavisci et al. (2001).

Chaque éprouvette a été chargée deux fois : d'abord au milieu, avec décalage (Figure 36b) et ensuite sur l'une des deux parties, sans *décalage* (Figure 36c).

Pour évaluer l'effet de l'absence de décalage, à partir du lot A2 ont été préparés deux groupes d'éprouvettes couplées en série à partir d'une même planche de bois :

- la moitié avec la géométrie « à double entaille », et donc avec décalage de 3 mm ;
- l'autre moitié avec géométrie analogue à celle de la norme ISO 8905 et testés sans décalage.

De cette manière les éprouvettes « jumelles » des deux groupes avaient la même inclinaison des cernes vis-à-vis du plan de cisaillement.

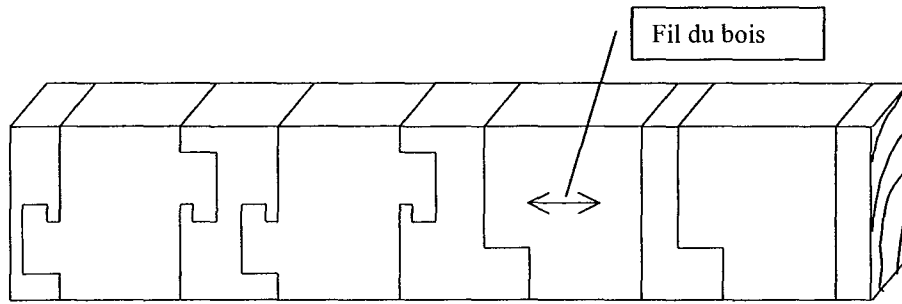


Figure 37 – Représentation schématique de la découpe des éprouvettes « jumelles » du lot A2.

Énergie de rupture

Sur 4 des 6 lots disponibles a été mesurée l'énergie de rupture en mode I pour deux angles différents d'inclinaison des cernes par rapport au plan d'application de la charge. Les deux angles différents ont simplement été obtenus en coupant les éprouvettes de deux barres parallèles, provenant de la même planche. L'évaluation de l'énergie de rupture a été effectuée avec l'éprouvette dite de « compact type tension (CT) », comme proposé par Boström (1994), avec ces valeurs de dimensions caractéristiques (fig. 38):

$$a + W = 5 \text{ cm}$$

$$a/W = 0,61$$

$$H = 6 \text{ cm}$$

$$L = 6,5 \text{ cm}$$

$$B = 3 \text{ cm}$$

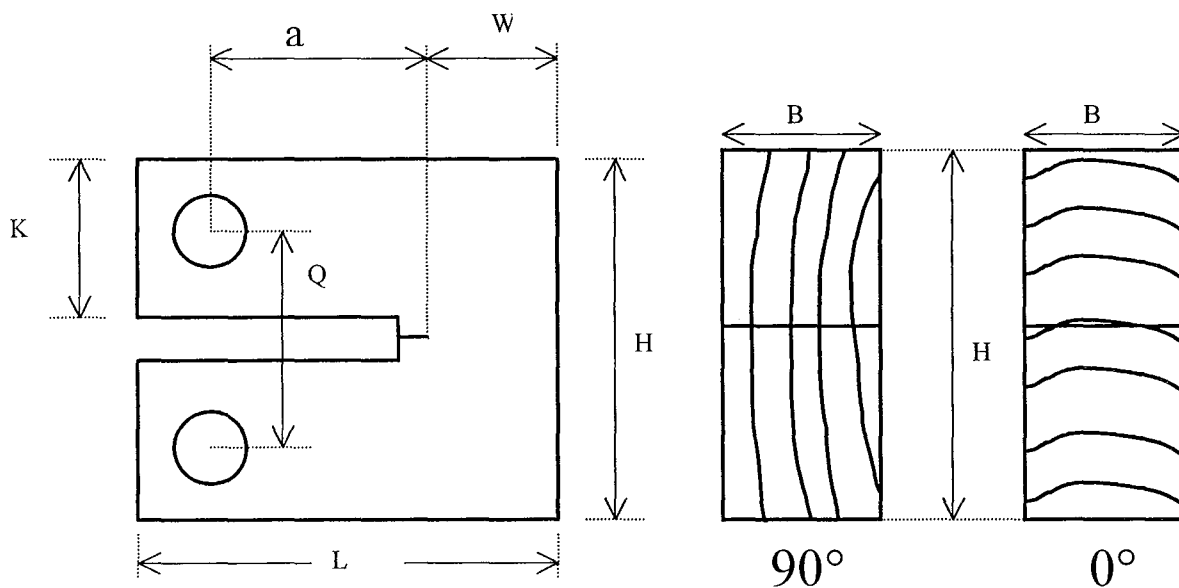


Figure 38 – Géométrie de l'éprouvette pour la mesure de l'énergie de fracture en mode I. L'angle des cernes par rapport au plan de fracture peut varier de 0° (essai en direction radiale) à 90° (essai tangentielle).

La longueur totale de l'entaille, a , est obtenue avec une première coupe à la scie circulaire et un prolongement réalisé avec une lame de rasoir, de façon à obtenir une surface de rupture nette, pour arriver à une ligne de référence précédemment tracée sur les deux cotés de l'éprouvette. Les perçages sont obtenus avec une perceuse à banc de grande inertie, de façon à minimiser les vibrations et obtenir un très bon parallélisme des axes des percements.

Les angles d'inclinaison des cernes par rapport au plan d'application de la contrainte de cisaillement sont les suivantes:

lot	A1		A2		A5		A6	
angle	25°	75°	20°	55°	45°	80°	45°	85°

La valeur de l'énergie spécifique de rupture G_f a été calculée en divisant par la section résistante la surface définie par la courbe charge-déplacement, qui correspond à l'énergie critique emmagasinée dans l'éprouvette:

$$G_f = \frac{1}{B W} \int F(u) du$$

où:

u est le déplacement de la traverse pendant l'essai (mm);

F est la force appliquée (N)

B et W sont, respectivement, la largeur et la longueur de la surface de propagation de la rupture, en mm (Figure 38).

Les essais ont été exécutés sur une machine universelle avec cellule de charge de 1000 N, précision 0,5%. Tous les essais ont été menés à la vitesse de 1 mm/min.

Modèle

Le modèle des deux géométries d'éprouvettes (Figure 39) a été réalisé avec le logiciel ANSYS version 5.3. Les deux géométries ont été représentées avec un maillage tridimensionnel de cellules cubiques (*brick 8 nodes*) de côté 2,5 mm. Le décalage des mors a été modélisé avec quatre lignes de cellules avec une base de 0,75 mm: pour les éprouvettes collées, à ces quatre lignes étaient attribués les paramètres de la colle, alors que pour l'éprouvette en bois massif à ces quatre lignes étaient attribués les paramètres du bois. Les caractéristiques élastiques d'un adhésif commercial (considéré élastique et isotrope) ont été utilisées. Pour le bois d'épicéa les valeurs suivants ont été tirées du modèle (Guitard, 1987) à densité = 0,43 g/cm³:

EL = EY = 13800Mpa	$\nu_{LR} = \nu_{yx} = 0,454$
ER = EX = 910 Mpa	$\nu_{TL} = \nu_{zy} = 0,019$
ET = EZ = 490 Mpa	$\nu_{RT} = \nu_{xz} = 0,558$

Les modules de cisaillement G_{LR} , G_{RT} et G_{LT} son calculés automatiquement par le logiciel, sur la base des paramètres élastiques déjà indiqués.

Dans ce cas l'éprouvette a été modélisée en cohérence avec les trois directions géométriques spatiales coïncidentes avec les trois directions anatomiques de référence, l'effet de l'angle d'inclinaison des cernes n'a donc pas été pris en compte. Les résultats sont uniquement valables pour la comparaison entre les deux géométries d'éprouvettes.

Pour la comparaison entre les distributions de contraintes liées à la différence de géométrie des éprouvettes collées, la couche de colle a été modélisée comme le décalage de l'éprouvette en bois massif (quatre lignes de cellules avec base 0,75 mm) avec les paramètres élastiques suivants:

$E = E_x = E_y = E_z = 6000 \text{ MPa}$	$\nu = 0,3$
--	-------------

Dans le modèle la charge est considérée comme appliquée de manière distribuée sur les plaques en acier, plaques auxquelles l'éprouvette est considérée comme étant simplement en appui.

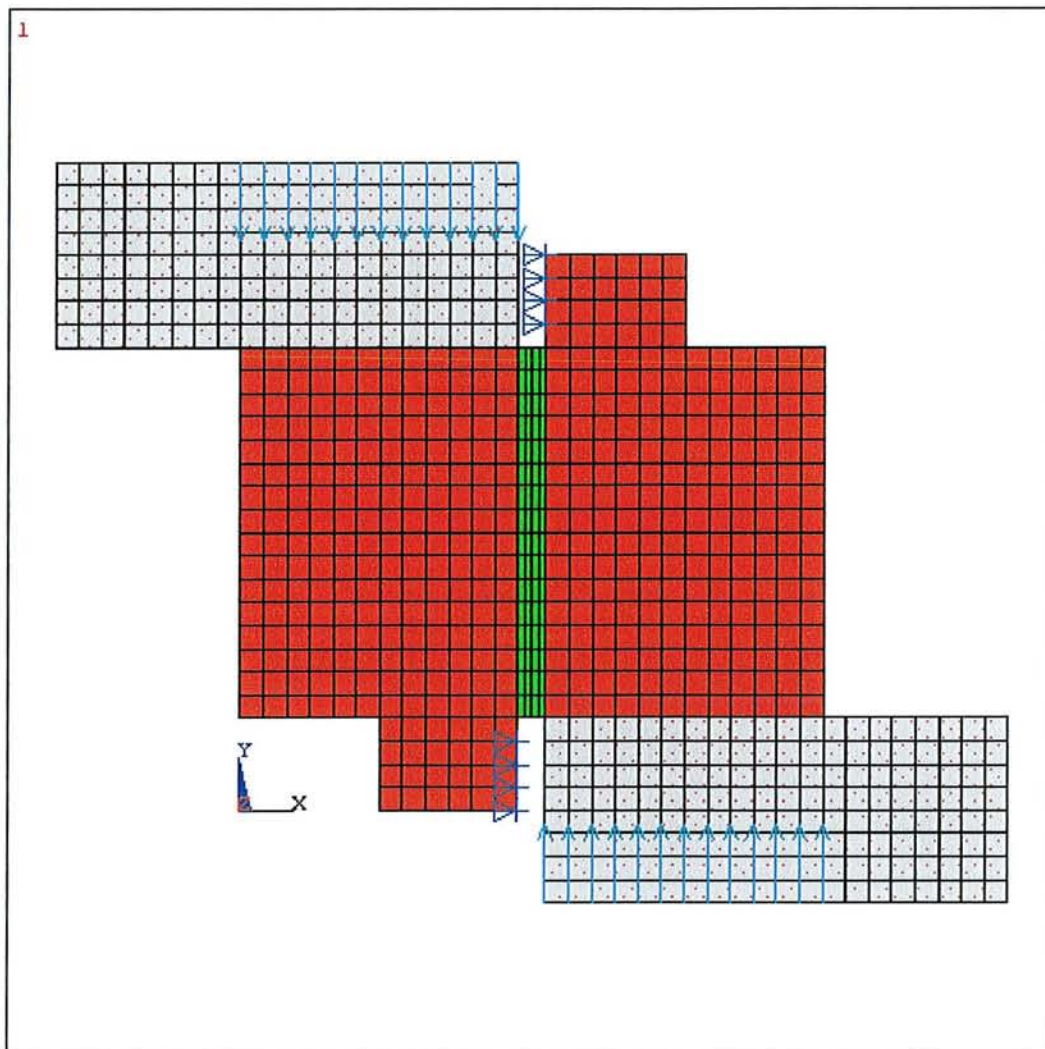


Figure 39 – Schéma du modèle développé pour l'analyse des contraintes dans l'éprouvette. Le même modèle a été utilisé soit pour les éprouvettes collées que pour celles en bois massif. Les blocs de cellules sont distribués de la façon suivante:

- couleur gris = blocs en acier pour l'application de la charge;
- couleur rouge = bois;
- couleur vert = colle dans les éprouvettes collées / bois dans les éprouvettes en bois massif.

Les languettes de colle (ou de bois massif), qui constituent les appuis de l'éprouvette à la guillotine, sont modélisées avec des chariots qui permettent le mouvement le long de la direction d'application de la charge.

3.2.2.3 Résultats

Une évaluation correcte des effets de la pré-contrainte sur les résultats du deuxième essai nécessite la comparaison des résistances au cisaillement des éprouvettes en bois massif avec la même géométrie des éprouvettes collées. L'analyse de ces résultats (Figure 40) montre que :

- les **différents lots** ont une résistance différente au cisaillement et présente une variabilité différente pour ce paramètre. Cela était connu, et encore une fois nous rappelle l'importance d'une mesure directe de τ_{LM} sur chaque éprouvette alors qu'une comparaison est envisagée ;
- les **différences entre 1^{er} et 2^{ème} essai** ne sont pas égales pour tous les lots, et surtout elles ne sont pas statistiquement négligeables pour les lots A2, A3 et A6-90° (au niveau de confiance de 99%). La relation entre les valeurs obtenues dans le premier essai (avec décalage de 3 mm) et celles obtenues dans le deuxième essai (sans décalage, pré-contrainte) montre une tendance générale à la diminution de la résistance. Même si elle n'est pas univoque pour tous les lots (voire A6), cela ne semble pas significatif en termes absolus.

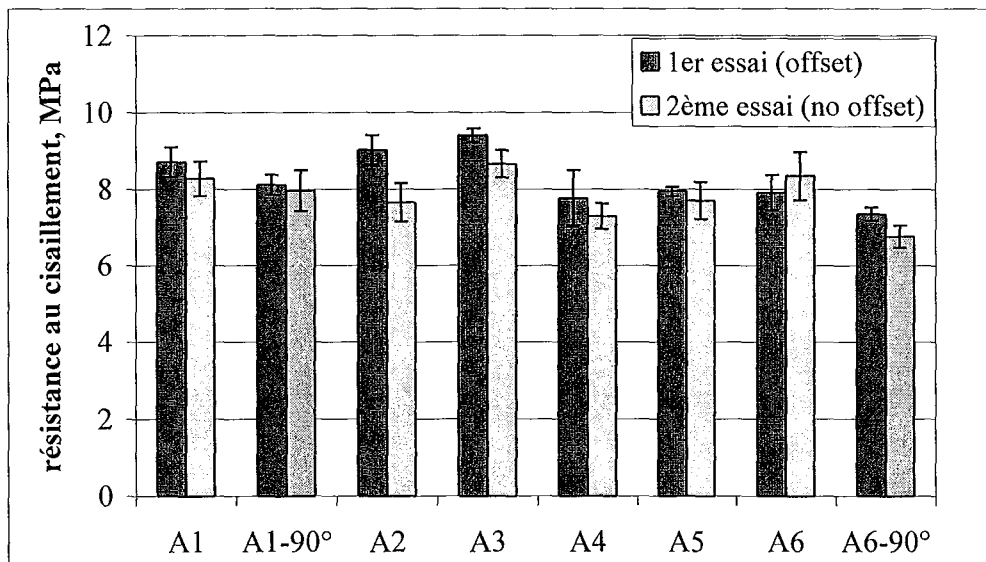


Figure 40 – Résultats des essais de cisaillement sur éprouvettes en bois massif.

Dans le cas du lot A1 les résultats ne changent sensiblement pas pour une disposition de l'angle des cernes de 20° ou 90°, alors que pour le lot A6 la tendance est plus marquée entre un angle de 45° et un angle de 90°, et de plus la différence entre les valeurs de la 1^{ère} et de la 2^{ème} série d'essai devient significativement appréciable.

Ces observations laissent penser que la valeur de résistance au cisaillement obtenue pendant le 1^{er} essai doit être inférieure ou égale à celle obtenue pendant le 2^{ème} essai, en désaccord avec les résultats obtenus (avec validité statistique pour les lots A2 et A3).

Pour vérifier si cette différence relevée est imputable à la méthode d'essai nous avons effectué des essais de cisaillement en comparaison sur éprouvettes « jumelles » tirés du lot A2 (où la différence est statistiquement significative), avec la

même inclinaison des cernes (30°). Dans ce cas, les valeurs relatives à la résistance en absence de décalage ont été mesurées sur éprouvettes non pré-contraintes. Les résultats, reportés en figure 41, soulignent que dans ce cas les deux valeurs de résistance au cisaillement sont parfaitement égales. Les différences relevées lors du 2^{ème} essai sont donc très probablement dues aux micro-fentes qui se vérifient sur les adhérents en bois lorsqu'ils sont soumis au 1^{er} essai.

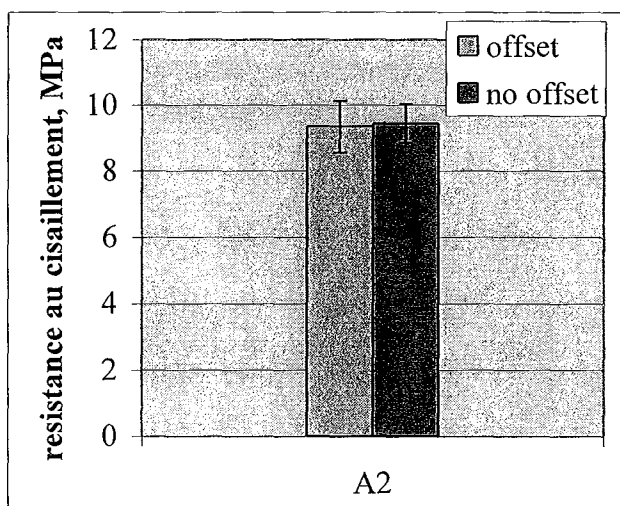


Figure 41 – Résistance au cisaillement des éprouvettes « jumelles » du lot A2

Les différences relevées peuvent très probablement être attribuées à la différente capacité des lots de bois à résister à la propagation des ruptures amorcées pendant le 1^{er} essai. Pour vérifier cette hypothèse il a donc été décidé de procéder à l'évaluation de quelques paramètres caractéristiques de la mécanique de la rupture. Les contraintes en jeu, relatives à la géométrie d'essai sont, la traction perpendiculaire aux fibres et la compression parallèle aux fibres.

La plus critique est certainement la traction perpendiculaire, surtout en considérant que dans le deuxième essai effectué sur le bois massif sans décalage se forment des efforts appréciables en direction orthogonale au sens du fil.

Pour ces raisons nous avons donc procédé à la mesure de l'énergie de rupture en mode I, qui fournit une estimation quantitative de la tendance à la propagation de fissures déjà présentes. Elle a une valeur plus générale par rapport à la ténacité, K_{IC} , surtout pour des matériaux avec un comportement élasto-plastique, comme le bois.

La caractérisation en mode I a été effectuée sur 4 des 6 lots considérés, et pour chaque lot sur deux angles différents d'inclinaison des cernes.

Les courbes relatives aux différents lots et aux différents angles sont très reproductibles (Figure 42), elles montrent un comportement typiquement élasto-plastique et de plus la rupture se propage toujours de manière stable, en soulignant ainsi que la géométrie de l'éprouvette est bien calibrée.

Les résultats des essais, reportés en figure 43, montrent qu'une certaine différence existe entre les lots et, au sein d'un même lot, entre les inclinaisons des cernes, surtout pour des angles proches de 90°.

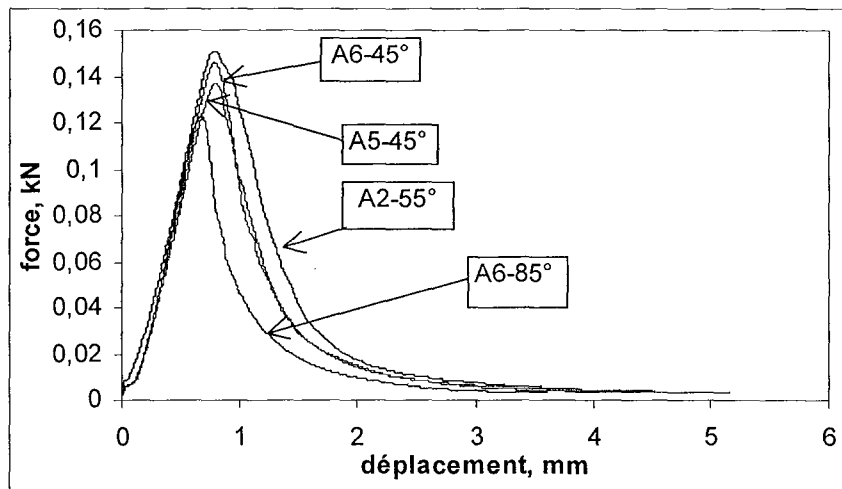


Figure 42 – La forme des courbes charge-déplacement est assez reproductible entre lots, surtout dans la première partie de la courbe. La deuxième partie de la courbe (comportement plastique) est celle où les différences entre lots deviennent remarquables.

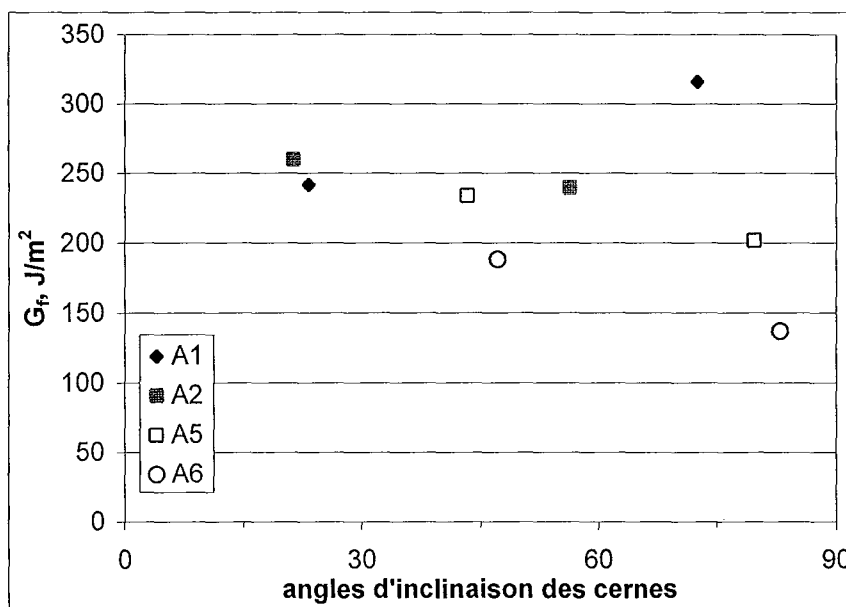


Figure 43 – Energie de rupture des lots en fonction de l'angle d'inclinaison des cernes.

Les valeurs G_f obtenues sont comprises entre 188 et 260 J/m², avec une tendance à la diminution entre 0° et 90°. Une exception est représentée par les éprouvettes des lots A1 et A6 à la proximité de 90°, avec des valeurs de 316 et de 137 J/m² respectivement. Stanzi-Tschegg et au. (1994 et 1995) ont obtenu des valeurs comprises entre 170 et 315 J/m² pour le bois d'épicéa soumis à différentes procédures de séchage, Reiterer et au. (2000) donnent, toujours pour l'épicéa, une valeur de 260 J/m² mesurée dans la configuration RL, correspondante à un angle d'inclinaison des cernes de 0°. Boström (1994) trouve par contre des valeurs plus hautes, compris entre 445 et 595 J/m², pendant que Daudeville obtient des valeurs

comprises entre 157 et 251 J/m². En outre Stanzi-Tschegg et al. (1995) trouvent des valeurs d'énergie de rupture qui diminuent en passant de la configuration d'essai RL (0° dans notre cas) à la configuration d'essai TL (angles d'inclinaison de 90°), en accord avec nos résultats, pendant que Boström (1994) observe que cette tendance dépend de l'humidité des éprouvettes au moment de l'essai.

La contrainte de rupture orthogonale au fil du bois σ_{int} a été en outre calculée pour les différents lots, qui dans ce cas spécifique représente la contrainte à laquelle la rupture se propage dans le bois en mode I.

Les valeurs ont été obtenues sur la base de l'expression suivante, comme suggéré par Reiterer et al. (2000):

$$\sigma_{int} = \frac{F}{W B} + \frac{M}{R} = Y F$$

où :

F est la charge maximale enregistrée pendant l'essai (N) ;

W et **B** sont les dimensions de la surface résistante (Figure 38) ;

M est le moment fléchissant à la charge maximale et

R est le moment résistant (dépendant de la géométrie du système).

Dans notre cas la constante géométrique **Y** a la valeur de $2,83 \cdot 10^{-2} \text{ mm}^{-2}$.

Comme le montre la figure 44, la contrainte de rupture orthogonale aux fibres diminue en fonction de l'augmentation de l'angle d'inclinaison des cernes de 0° (résistance dans la direction radiale) à 90° (résistance dans la direction tangentielle), mais il est bien connu que ceci dépend de la présence des rayons ligneux dont l'effet est appréciable dans la direction tangentielle alors qu'il est négligeable dans la direction radiale. Des valeurs très proches à nos mesures ont été obtenues par Boström (1994) avec une typologie d'éprouvette très semblable, alors que les valeurs obtenues par Reiterer et al. (2000) avec une typologie d'éprouvette différente sont sensiblement plus faibles.

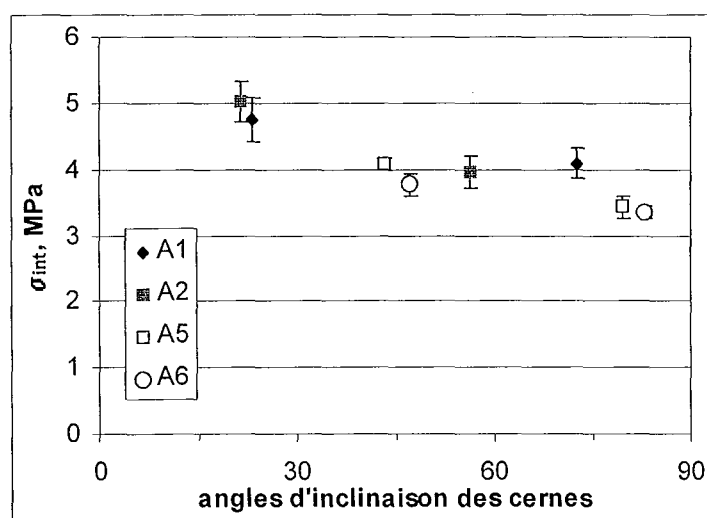


Figure 44 – Contrainte de propagation de la fissure en fonction de l'angle d'inclinaison des cernes.

Vu que les différentes courbes charge-déplacement obtenues sont superposables, les deux paramètres G_f et σ_{int} peuvent être utilisés pour calculer une *énergie de fracture normalisée*, que nous avons définie comme :

$$G_{f, Norm} = \frac{G_f}{\sigma_{int}}$$

Ce paramètre a les dimensions d'une longueur, qui bien entendu n'est pas mesurable physiquement, et il représente une énergie de rupture pour un effort unitaire de propagation de la fissure. Une haute valeur de $G_{f, Norm}$ indique un matériau dans lequel la fissure s'amorce aisément et se propage en utilisant beaucoup d'énergie, alors qu'une faible valeur de $G_{f, Norm}$ est associable aux matériaux avec un comportement moins tenace.

Un autre modèle souvent utilisé dans la mécanique de la rupture est la *longueur caractéristique* L_{ch} qui tient compte, au-delà de l'énergie de rupture de l'effort de propagation de la fissure, ainsi que du module efficace E_{eff} selon l'expression:

$$L_{ch} = \frac{G_f E_{eff}}{\sigma_{int}^2}$$

Ce paramètre a aussi les dimensions d'une longueur (m), mais il n'est cependant là encore pas physiquement mesurable. Il est représentatif du comportement des matériaux vis-à-vis de la propagation de la fissure. Aussi dans ce cas un matériau avec des faibles valeurs de L_{ch} aura donc un comportement plus fragile qu'un autre possédant une valeur plus élevée de ce paramètre.

Dans le calcul du L_{ch} il est nécessaire de connaître le module E_{eff} . La valeur de ce paramètre est donnée par la combinaison d'autres paramètres élastiques du bois, en fonction de l'angle d'inclinaison des cernes par rapport à la direction de la sollicitation. Il peut être calculé comme proposé par Sih et al. (1965). Par exemple, pour la configuration TL (90°) à partir de l'expression:

$$\frac{1}{E_{eff}} = \sqrt{\frac{1}{2 E_T E_L} \left[\sqrt{\frac{E_L}{E_T} + \frac{E_L}{2 G_{LT}} - \nu_{TL}} \right]^{1/2}}$$

E_{eff} peut être calculé avec des valeurs tirées de la littérature. Dans notre cas par contre, pour mettre en évidence d'éventuelles différences et aussi en considérant le fait qu'il n'est pas facile d'estimer la variation des différents paramètres élastiques impliqués en fonction de l'angle d'inclinaison des cernes, il a été préférable d'obtenir une mesure expérimentale directe de la valeur de E_{eff} d'après les courbes charge-déplacement.

Ce paramètre a été défini selon l'expression suivante:

$$E_{eff} = \frac{\sigma_{int}}{\varepsilon_{eff}}$$

c'est-à-dire comme le rapport entre la contrainte de traction calculée comme déjà indiqué et une déformation efficace définie comme:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\Delta u}{Q}$$

où :

Δu est la valeur de déplacement mesurée et Q la distance initiale entre les centres des perçages dans l'éprouvette, qui est donc considérée dans ce cas comme longueur de référence.

On peut considérer que σ_{int} peut être exprimé sous la forme:

$$\sigma_{\text{int}} = F Y$$

on peut donc exprimer E_{eff} selon l'équation :

$$E_{\text{eff}} = \frac{F Y Q}{\Delta u} = \frac{F}{\Delta u} Y Q$$

Dans ce cas le rapport $\frac{F}{\Delta u}$ représente la pente de la courbe charge-déplacement, mesurée expérimentalement. Dans notre cas la pente a été calculée à partir de la droite de régression linéaire des points de la courbe charge-déplacement compris entre 30% et le 80% de la valeur maximale atteinte par la charge pendant l'essai.

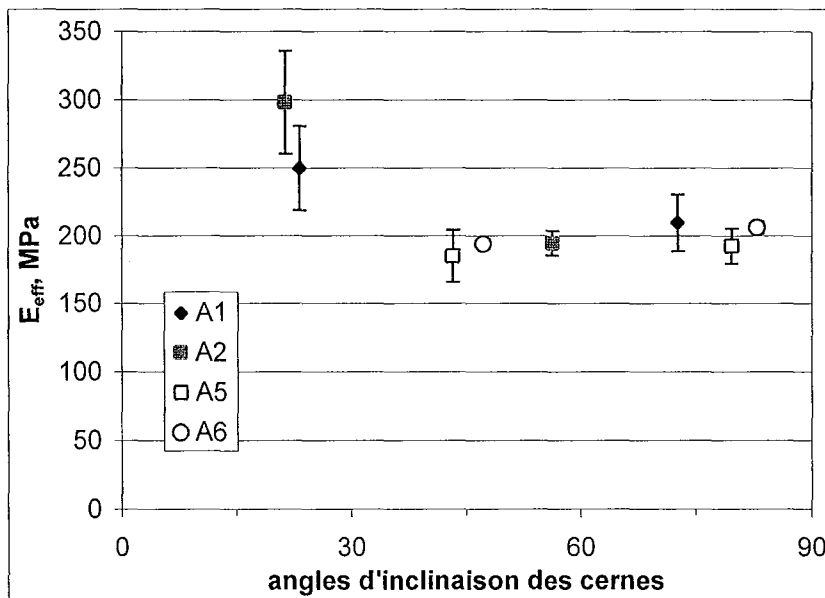


Figure 45 – Module efficace du bois par rapport à l'angle d'inclinaison des cernes.

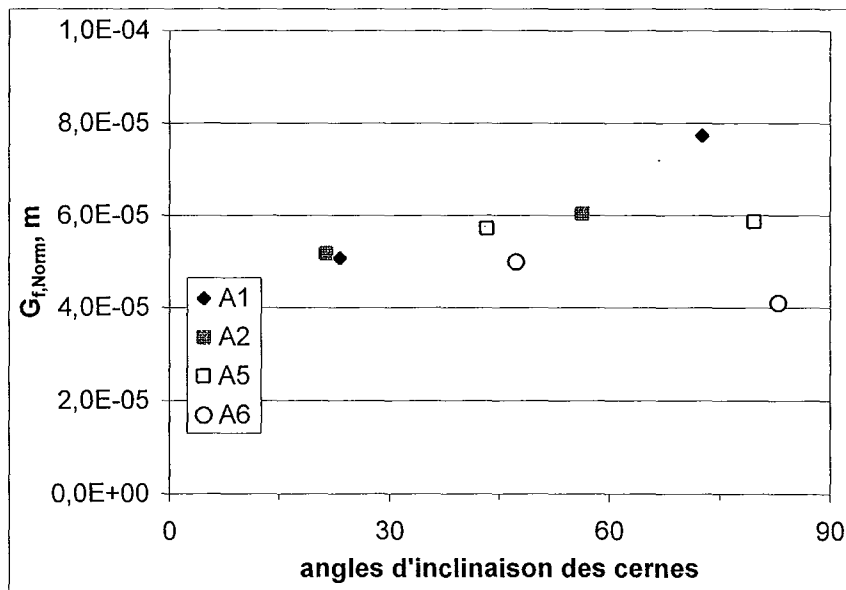


Figure 46 – Energie de rupture normalisée par rapport à l'angle d'inclinaison des cernes.

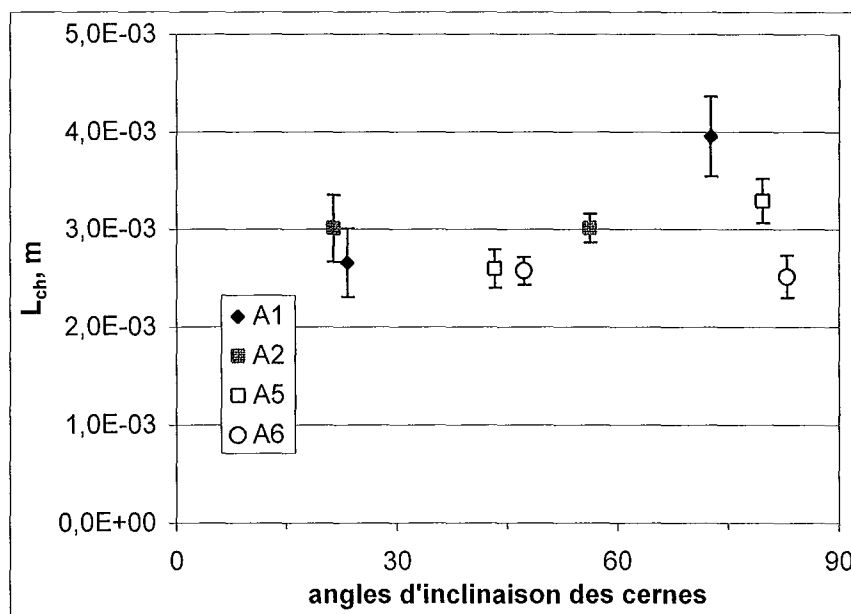


Figure 47 – Longueur caractéristique par rapport à l'angle d'inclinaison des cernes.

A partir de l'analyse des figures 45-47 l'on déduit que:

- le module efficace est constant pour les différents lots aux angles > 30°, pendant qu'il augmente pour les angles inférieurs à 30°;
- l'énergie spécifique normalisée $G_{f, Norm}$ du bois d'épicéa montre une croissance en fonction de l'angle des cernes pour A1 et A2, sans effet pour A5, et baisse en fonction de l'angle pour A6. C'est le paramètre le plus sensible aux différences entre lots;
- la longueur caractéristique L_{ch} augmente, à l'intérieur des lots A1 et A5, avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison des cernes par rapport au plan de la

sollicitation, et semble atteindre un minimum en correspondance de 45°. Elle est constante pour A2 et en très légère baisse pour A6. $G_{f, Norm}$ et L_{ch} donnent des indications différentes pour les lots A2 et A5 ;

- en général, parmi les différents lots examinés, l'énergie spécifique normalisée $G_{f, Norm}$ varie linéairement avec l'angle d'inclinaison des cernes jusqu'à 60°, et se différencie au delà de cet angle.

En particulier pour le lot A6 l'énergie spécifique normalisée diminue avec l'augmentation de l'angle et une telle valeur est assez nettement écartée de la tendance générale au voisinage de 90°, quand le bois est soumis à une sollicitation dans la direction tangentielle. Dans ce cas le lot A6 montre des valeurs de l'énergie spécifique normalisée particulièrement faibles, de l'ordre de la moitié par rapport à celles des autres lots.

La raison de cette différence a été cherchée dans les caractéristiques anatomiques des différents lots: avec une série d'observations des surfaces de rupture nous avons remarqué que la propagation de la fissure tend à se maintenir dans la portion initiale du cerne (bois de printemps) pour une première partie en direction tangentielle, puis se dirige en direction radiale quand elle doit traverser la zone de bois final en passant d'un cerne à l'autre. Un tel phénomène, déjà observé par exemple par Tan et au. (1995), est lié très probablement à la dimension des trachéides du bois final, à l'épaisseur de la parois des trachéides et à la largeur du cerne même. La propagation en direction tangentielle de la surface de rupture est très probablement liée à la possibilité de rupture intracellulaire, en direction longitudinale, des minces parois de vaisseaux de la partie initiale du cerne, alors que dans les vaisseaux finaux, avec parois épaisses et robustes, la rupture se propage de manière intercellulaire (fissuration qui demande une plus grande consommation d'énergie et présente une propagation radiale de la fissure pour les rayons parenchymateux).

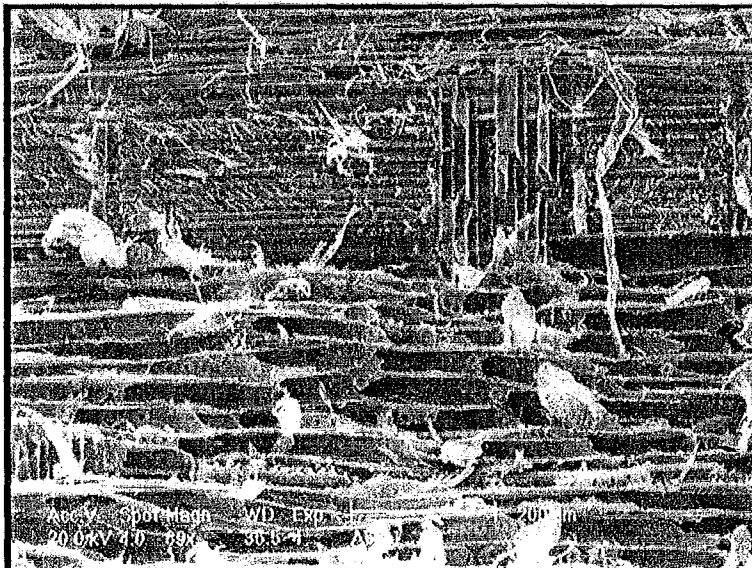


Figure 48 – Passage de la rupture intracellulaire dans le bois initial à celle intercellulaire dans le bois final dans le cas du lot A6-90°. On voit que la rupture dans la partie finale du cerne est en correspondance des rayons parenchymateux.

En cohérence avec cette explication, l'observation de la différence entre les lots devient beaucoup plus évidente en fonction de l'angle d'inclinaison des cernes à 90°, c'est-à-dire pour une sollicitation en direction tangentielle du bois, qui doit alors se déformer et se fendre. Dans ce cas c'est probablement la différence d'épaisseur des parois cellulaires et/ou d'épaisseur de la couche finale entre les différents lots qui détermine leur résistance à la propagation de la fissure. En effet presque toutes les éprouvettes présentent une surface de rupture assez rugueuse liée à des traversées continues des parois du bois final de la fissure. Seules les éprouvettes du lot A6 font exception : leurs surfaces sont uniformes (fig. 49). Le lot A6 est celui qui présente les plus faibles valeurs de $G_{f, Norm}$ et d'énergie de rupture G_f aux angles élevés d'inclinaison des cernes. Dans ces conditions le lot A6 est celui dans lequel les fissures présentes dans le matériau se propagent plus aisément sous l'effet de la nouvelle contrainte.

Cependant, si les angles d'application de la charge sont différents, la situation peut changer (voire par exemple les valeurs de $G_{f, Norm}$ correspondantes aux angles d'inclinaison des cernes de 20° pour les lots A1 ou A2 en comparaison avec l'angle d'inclinaison de 45° pour le lot A6).

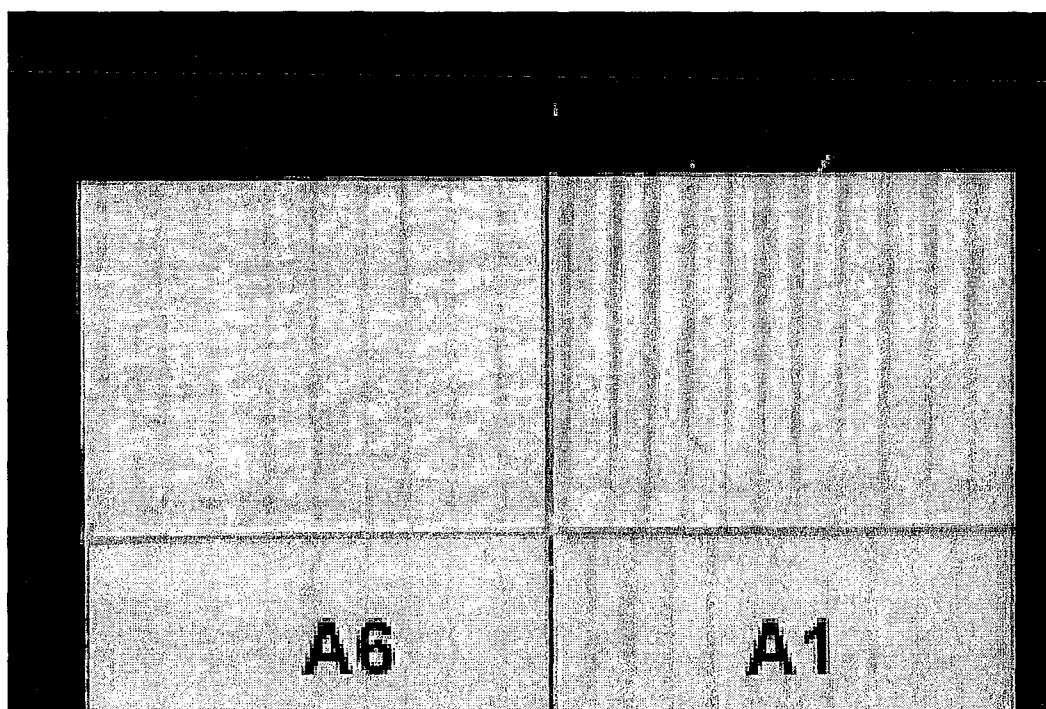


Figure 49 – Comparaison entre les surfaces de fracture du lot A6 (gauche) et du lot A1 (droite): la surface du lot A1 est beaucoup plus rugueuse que celle du lot A6.

Ce comportement peut être mis aussi directement en relation avec les résultats des essais de résistance au cisaillement (Figure 40), où nous avons observé que pour le lot A6 avec un angle d'inclinaison des cernes de 45° valeurs semblables à ceux des lots A1 et A2, avec un angle d'inclinaison respectivement de 20° 30°. Très probablement dans ces conditions les éprouvettes des lots A2 et A1 résultent sensiblement comme pour le lot A6 de la présence des micro-fentes qui se forment dans les adhérents pendant le premier essai de cisaillement. Par contre, les éprouvettes des lots A1 et A6 soumises à l'essai de cisaillement avec un angle d'inclinaison des cernes de 90° montrent un comportement inverse, et l'on peut

observer également que les éprouvettes du lot A6 présentent une valeur de résistance au cisaillement dans le premier essai supérieure à celle du deuxième essai.

La détermination des paramètres relatifs aux caractéristiques de propagation de la fissure apparaît donc comme un outil utile pour la prédiction de la mise en oeuvre de la méthode d'évaluation des colles à travers la comparaison directe des valeurs de résistance au cisaillement des joints collés et du bois. En effet, il est nécessaire que les valeurs de l'énergie de fracture G_f ou de l'énergie spécifique normalisée $G_{f, Norm}$ relatifs à l'angle d'inclinaison des cernes par rapport au plan de collage ne soient pas trop faibles pour éviter que les micro-fentes qui se forment pendant la réalisation du premier essai n'influent négativement sur la valeur de résistance au cisaillement du bois massif correspondant.

Sur la base de nos résultats, une condition de sécurité pour l'exécution des essais avec éprouvettes « à double entaille » semble donc être le choix d'un angle des cernes $> 60^\circ$ par rapport au plan de collage et l'emploi de lots de bois avec une valeur $G_{f, Norm} > 6.10^{-5} \text{ m}$ (mesurée entre 60° et 90° , de préférence proche de 90°).

Modèle

Pour vérifier si la détermination de la valeur de référence du bois massif (τ_{LM}), est influencée par les effets des deux facteurs décrits, l'analyse d'un modèle développé en milieu ANSYS rel. 5.3 a été associée à l'évaluation expérimentale des éprouvettes. Le modèle développé a permis l'analyse de la distribution des contraintes dans les deux types d'éprouvettes, afin d'évaluer leur nature et entité au long de l'interface bois-colle.

La comparaison entre les deux typologies d'éprouvettes, réalisée grâce à la modélisation en éléments finis, est reportée dans les figures 50 et 51. Les résultats obtenus indiquent que la distribution des contraintes σ_{yy} (cisaillement à l'interface bois-colle) sont pratiquement coïncidentes dans les deux typologies d'éprouvettes, et cela nous fait supposer que la présence de l'entaille n'a pas d'influence sur les valeurs de résistance au cisaillement. Par contre, un effort de compression intéresse une grande partie du volume des adhérents (et pas seulement dans les zones dans les environs immédiats de l'interface et des appuis).

Dans les éprouvettes « à simple entaille », seule la zone dans laquelle serait éventuellement produit l'entaille est mécaniquement déchargée. Pour les éprouvettes « à double entaille » on peut remarquer que, lors du premier essai, toute la zone où va être exécuté le deuxième essai est en compression.

En particulier, dans les figures 52 et 53 on montre qu'avec une charge appliquée de 15 kN, les contraintes σ_{xx} et σ_{yy} dans les adhérents peuvent atteindre des valeurs très élevées, concentrées en proximité des arêtes, alors que dans la plupart des autres zones de la section les valeurs restent comprises entre les limites de rupture et d'élasticité du bois d'Epicéa (domaine plastique). De telles contraintes, relativement localisées, peuvent amener au développement de micro-fentes dans le bois, qui n'ont pas d'influence sur le résultat du premier essai mais qui peuvent, par contre, faire baisser les valeurs atteintes lors du deuxième essai.

L'analyse du modèle, relatif soit aux éprouvettes collées soit à celles en bois massif, montre donc que l'application de la charge de cisaillement pendant le 1er essai

provoque, à cause du moment créé par le décalage, la présence de contraintes de traction perpendiculaires à la direction du fil du bois (Figures 54 et 55). Cela implique l'accumulation de contraintes σ_{xx} , pendant le 1er essai, en proximité des petites entailles (celles dans l'épaisseur de l'adhésif). Cette zone est la plus sollicitée et il est possible que la limite de résistance en traction perpendiculaire au fil soit atteinte dans le bois. En effet en observant les surfaces de rupture l'on peut remarquer, en correspondance de la zone des petites entailles, des typologies de rupture typiques de la traction (Figure 56).

De toute manière, la contrainte de cisaillement est prédominante dans cette section, comme le montre la présence élevée de fibres « frisées », typiques de la rupture en cisaillement, dans les éprouvettes de ce type (figure 57).

Tan et al. (1995) avaient remarqué le même comportement lors de leurs expériences, et avaient avancé l'hypothèse que cet effort pouvait conduire à la formation de micro-fentes.

Dans notre cas spécifique, cette condition se vérifie tout au long de la zone la plus sollicitée pendant le 2ème essai.

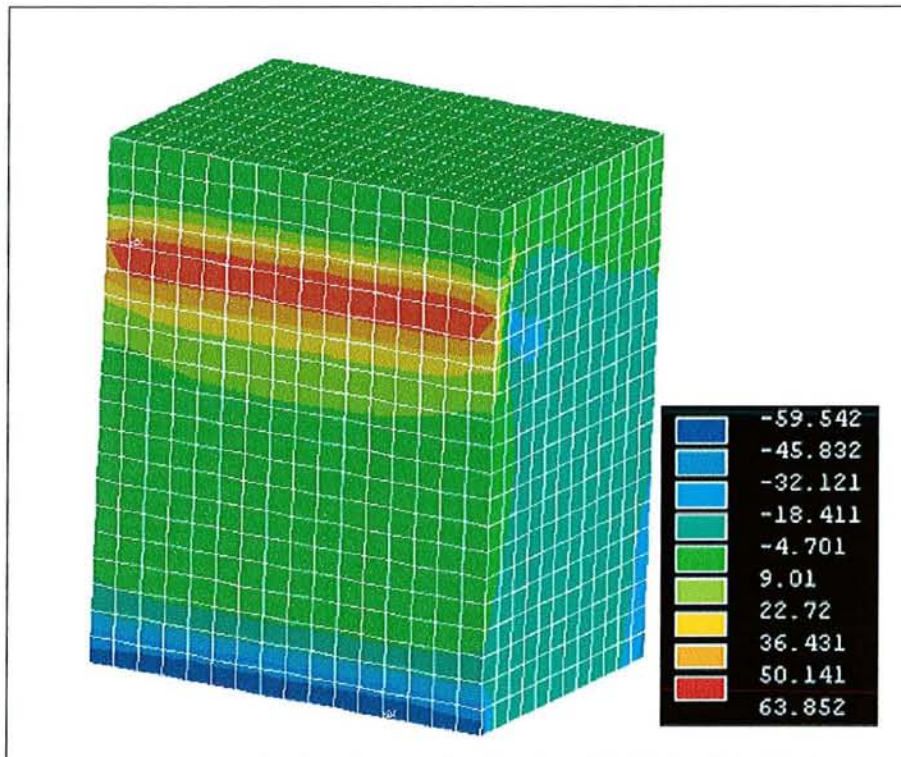


Figure 50 – Distribution des contraintes σ_{yy} à l'interface entre l'adhésif et le bois pour l'éprouvette à « entaille simple »

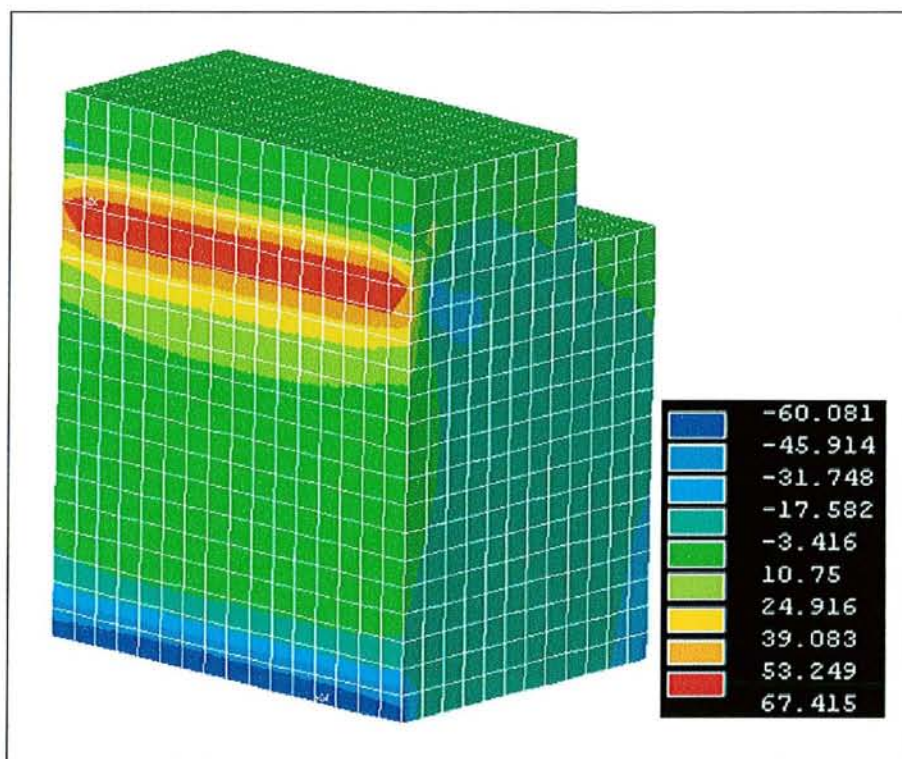


Figure 51 – Distribution des contraintes σ_{yy} à l'interface entre l'adhésif et le bois pour l'éprouvette à « double entaille ».

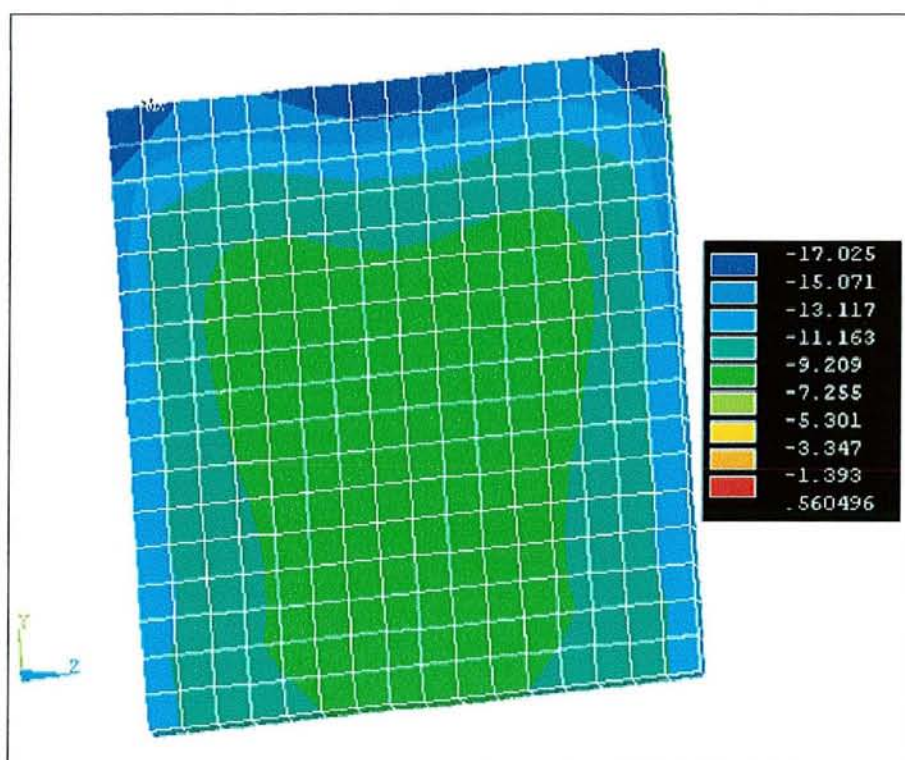


Figure 52 – Epreuve à « double entaille ». Distribution des contraintes σ_{yy} dans les adhérents en bois dans la zone immédiatement sous-jacente l'entaille pendant la réalisation du premier essai.

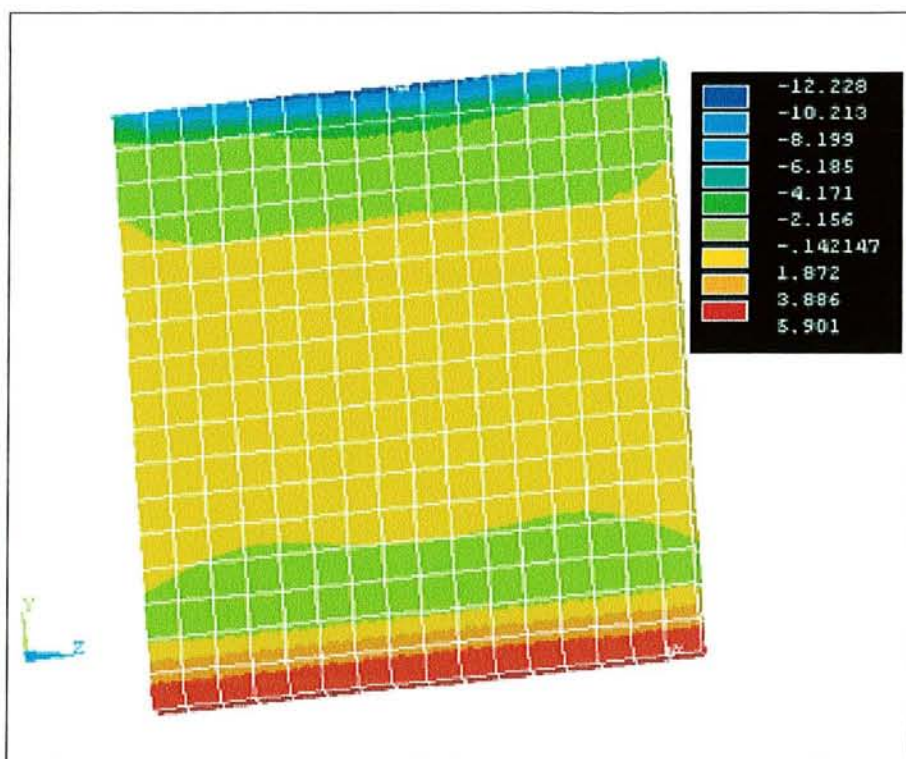


Figure 53 – Epreuve à « double entaille ». Distribution des contraintes σ_{xx} dans les adhérents en bois dans la zone immédiatement sous-jacente l'entaille pendant la réalisation du premier essai.

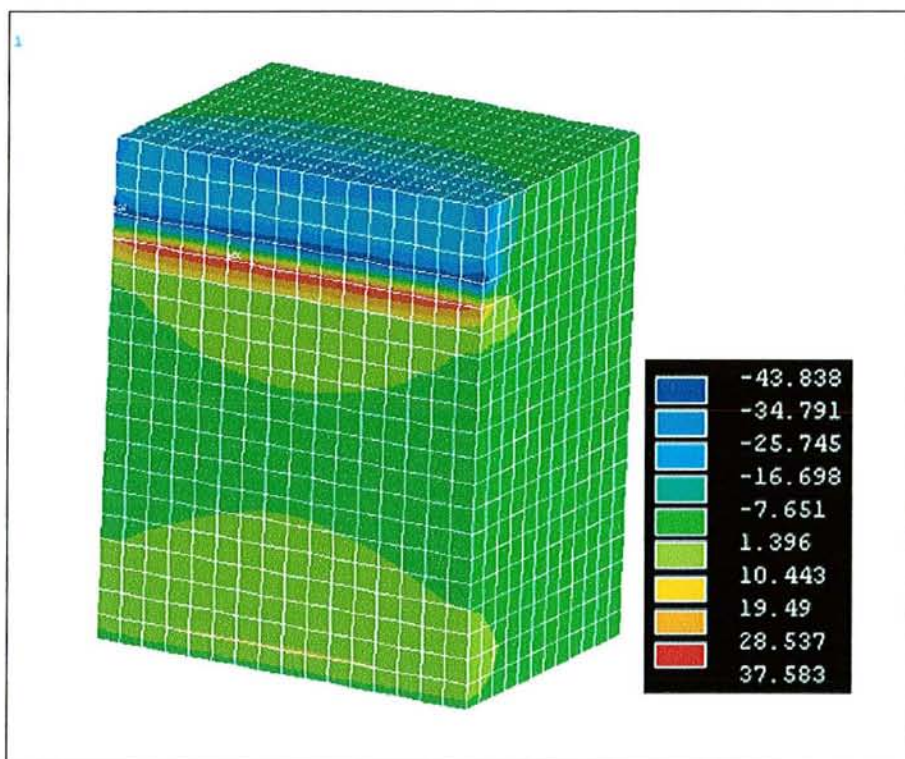


Figure 54 – Distribution des contraintes σ_{xx} à l'interface entre l'adhésif et le bois pour l'éprouvette à « entaille simple ».

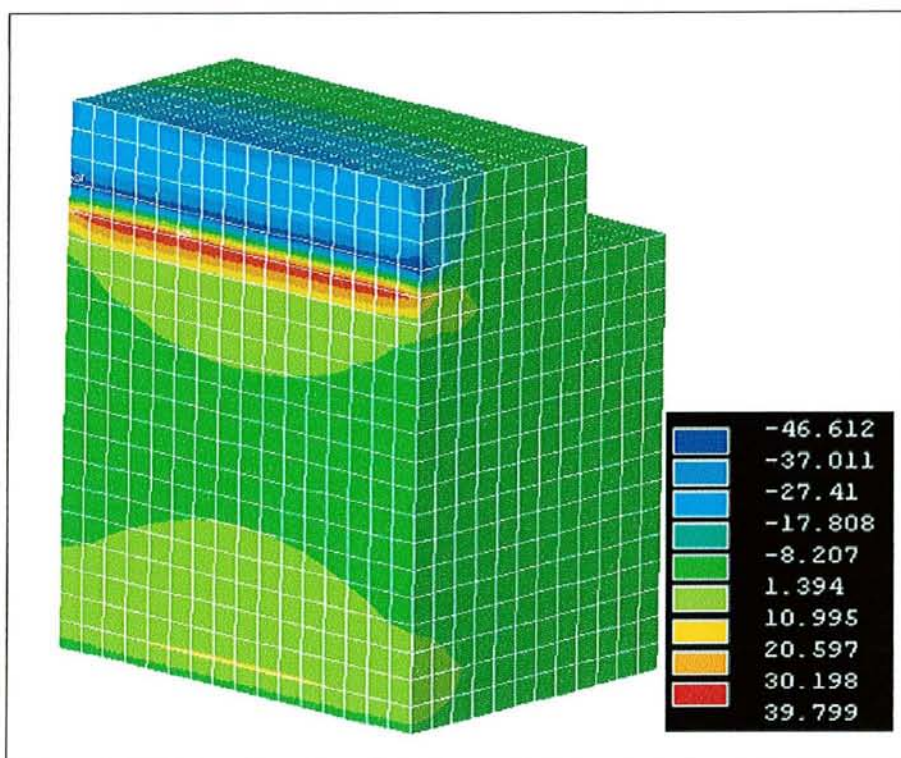


Figure 55 – Distribution des contraintes σ_{xx} à l'interface entre l'adhésif et le bois pour l'éprouvette à « double entaille ».

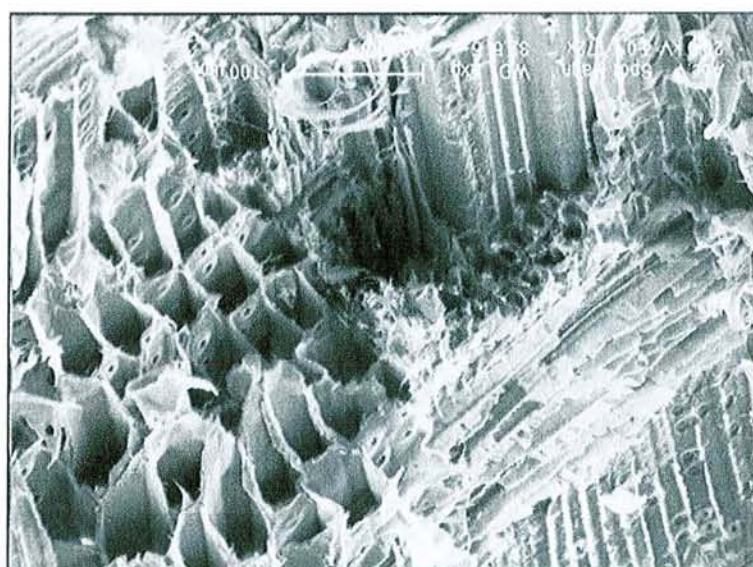


Figure 56 – Exemple de surface de rupture pour le lot A2, premier essai. On peut remarquer que les fibres sont tranchées transversalement, avec une rupture par traction orthogonale aux fibres.

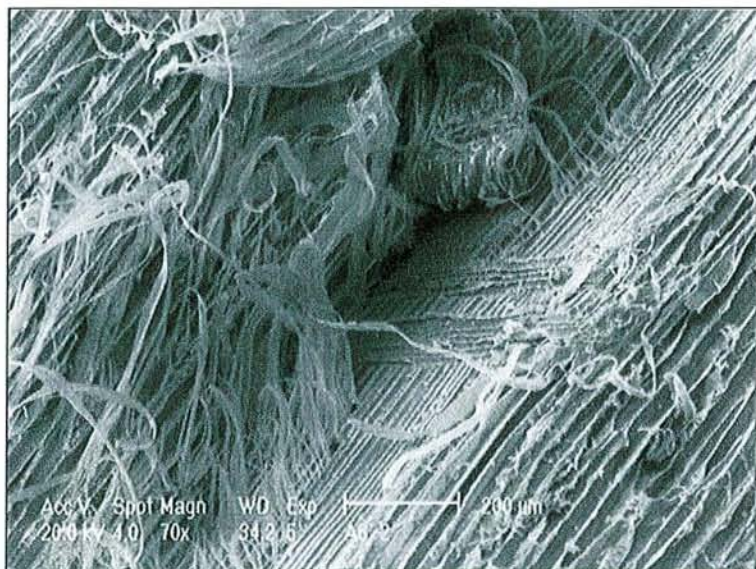


Figure 57 – L'aspect « pelucheux » typique de la rupture en cisaillement.

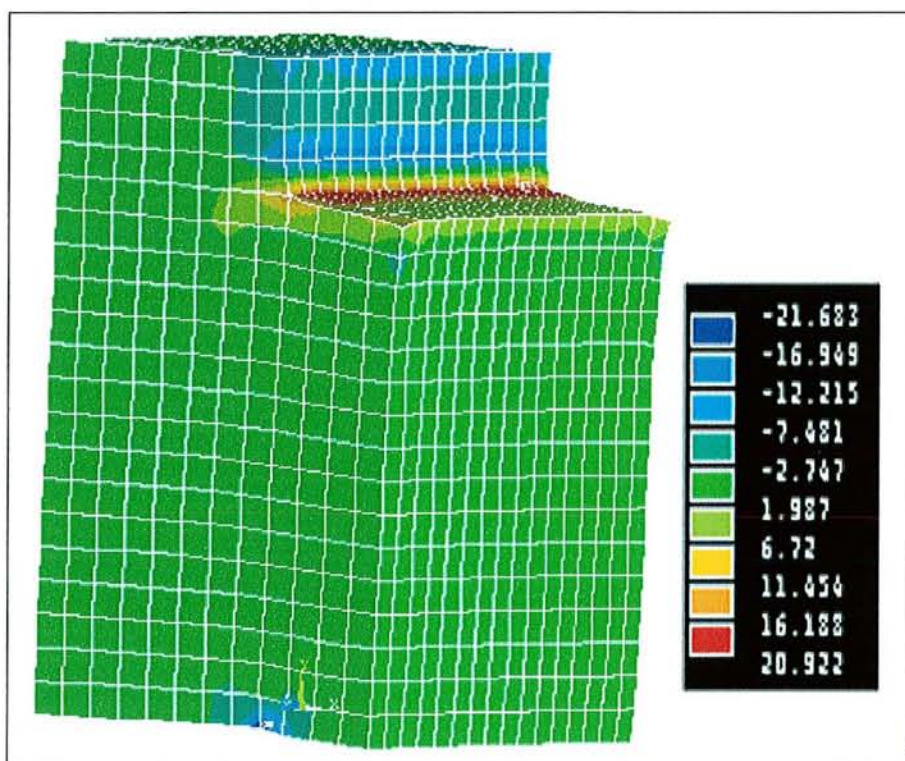


Figure 58 – Distribution des contraintes orthogonales à la direction du fil dans le bout d'essai au moment de la réalisation du deuxième essai (sans décalage).

Bibliographie citée

- Boström L., 1994. The stress-displacement relation of wood perpendicular to the grain. Part 1: Experimental determination of the stress-displacement relation. *Wood Science and Technology*, 28 (4), 309-317
- Boström L., 1994. The stress-displacement relation of wood perpendicular to the grain. Part 1: Application of the Fictitious Crack Model to the Compact Tension Specimen. *Wood Science and Technology*, 28 (5), 319-327
- Daudeville L. 1999. Fracture in spruce: experiment and numerical analysis by linear and non linear fracture mechanics. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57, 425-432
- Duchanois G, 1984 – « Mesure de la tenacité et étude du comportement mécanique des joints bois-colle » Thèse de Docteur-Ingénieur INPL - Nancy
- Guitard D. 1987. Mécanique du matériau bois et composites. Cepadues ed.,
- ISO 8905, 1988. Legname. Metodi Di prova. Determinazione della resistenza a taglio parallelamente alla fibratura.
- Lavisci P., Berti S., Pizzo B., Triboulot P., Zanuttini R., 2001. A shear test for structural adhesives used in the consolidation of old timber. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 59 (1/2), 145-152
- Okkonen, River. 1988. Factors affecting the strength of block-shear specimens. *Forest Products Journal*, 39 (1), 43-50
- Reiterer A., Stanzl-Tschegg S.E., Tschegg E.K., 2000. Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood. *Wood Science and Technology*, 34, 417-430
- Sih G.C., Paris P., Irwin G.R. 1965. On cracks in rectilinear anisotropic bodies using singular isoparametric elements. *International Journal of Fracture Mechanics*, 1, 189-203
- Stanzl-Tschegg S.E., Tschegg E.K., Teischinger A. 1994. Fracture energy of spruce wood after different drying procedures. *Wood and Fiber Science*, 26 (4), 467-478
- Stanzl-Tschegg S.E., Tan D.M., Tschegg E.K. 1995. New splitting method for wood fracture characterization, *Wood Science and Technology*, 29 (1), 31-50
- Tan D.M., Stanzl-Tschegg S.E., Tschegg E.K., 1995. Models of wood fracture in Mode I and Mode II. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 53, 159-164
- Triboulot P., Jodin P., Pluinage G. 1982. Mesure des facteurs d'intensité de contraintes critiques et des taux de restitution d'énergie dans le bois sur éprouvettes entaillées. *Annals of Forest Sciences*, 39 (1) 63-76
- Triboulot, P. Otha M., Asano I. 1983. Application of fracture mechanics on the cutting process of wood. *Mokuzai-Gakkaishi* 29 (2) 111-117
- Triboulot P., Jodin P., Pluinage G. 1984. Validity of fracture mechanics concepts applied to wood by finite element calculation. *Wood Sci. Technol.* Vol.18, 51-58

3.2.3 Délamination à l'interface bois-colle

3.2.3.1 Bibliographie spécifique

Les problèmes sont plus simples pour l'essai de délamination par rapport à ceux posés par l'essai de cisaillement. Dans le cas de la délamination doivent être définis:

- les conditions et les paramètres de vieillissement accéléré qui représentent au mieux le comportement de l'interface dans le temps ; et surtout la capacité de déformation relative des deux matériaux liée à des sollicitations thermiques et hygrométriques;
- la géométrie de l'éprouvette qui puisse permettre d'obtenir des résultats pouvant être vérifiés et suivis dans le temps;

Parmi les normes relatives à la délamination, on utilise maintenant soit la norme EN 302/2 soit la ASTM D 2559, mais ces deux normes utilisent des éprouvettes qui ne permettent pas d'obtenir un effet de délamination maximal.

Les normes pour les adhésifs structuraux donnent une classification pour des essais à la fois de délamination et mécaniques, dont les essais de cisaillement.

La norme EN 301 considère deux classes d'adhésifs, l'un pour l'utilisation en extérieur et l'autre pour l'utilisation en intérieur:

Type I	exposition complète aux conditions climatiques d'humidité relative > 85% ou de température > 50°C. Dans le cas de la restauration: structures à l'extérieur et têtes des poutres non ventilées ou intégrées dans les maçonneries en extérieur.
Type II	Applications dans en intérieur ou en extérieur protégé, avec une température < 50°C. Dans le cas de la restauration: structures en intérieur et têtes des poutres bien ventilées ou intégrées dans les maçonneries en extérieur.

La plus grande différence, du point de vue des performances, entre les adhésifs de type I et ceux de type II, est liée au fait que pour les premières est prévue un essais de délamination à chaud, alors que pour les secondes ce même essais est conduit à température ambiante.

L'Eurocode 5 donne 3 classes de service pour les structures en bois (voir paragraphe 1.2.1), et conseille également l'utilisation des adhésifs de Type I selon EN 301 pour toutes les classes, et ceux de Type II uniquement pour les classes 1 et 2, dans tous les cas de figures les durées d'exposition à condition que les températures >50°C ne soient pas prolongées. L'emploi en classe 3 n'est pas prévu.

3.2.3.2 Eprouvettes de délamination

La préparation des éprouvettes est similaire à celle des éprouvettes de cisaillement, avec une différence portant sur la composition des barres en trois lamelles (Figure 59) et l'élimination des nœuds (purge d'au moins 20 mm avant et après les nœuds). Le nombre (3 au lieu de 6 comme dans la EN 302/2 et ASTM D 2559) et l'orientation des lamelles étaient choisi afin de maximiser les variations dimensionnelles et donc

les contraintes appliquées sur le joint de colle. Le cycle de vieillissement adopté était le même que pour le cisaillement, avec une étape ultérieure de séchage final.

La longueur des délaminations est mesurée comme illustré sur la figure 60 sur toute la longueur du périmètre du joint de colle mais, la mesure se fait sur la longueur de délamination la plus longue. Les délaminations adhésives et cohésives dans la colle sont prises en compte et exprimées en % du périmètre (300 mm).

3.2.3.3 Résultats

L'éprouvette est très efficace pour développer des contraintes de délamination à l'interface. La composante principale de ces contraintes est la traction en direction perpendiculaire au plan de collage, il s'agit donc d'un essai similaire à un pelage (*peeling*) que l'on utilise souvent pour les adhésifs plastiques.

La figure 61 montre que :

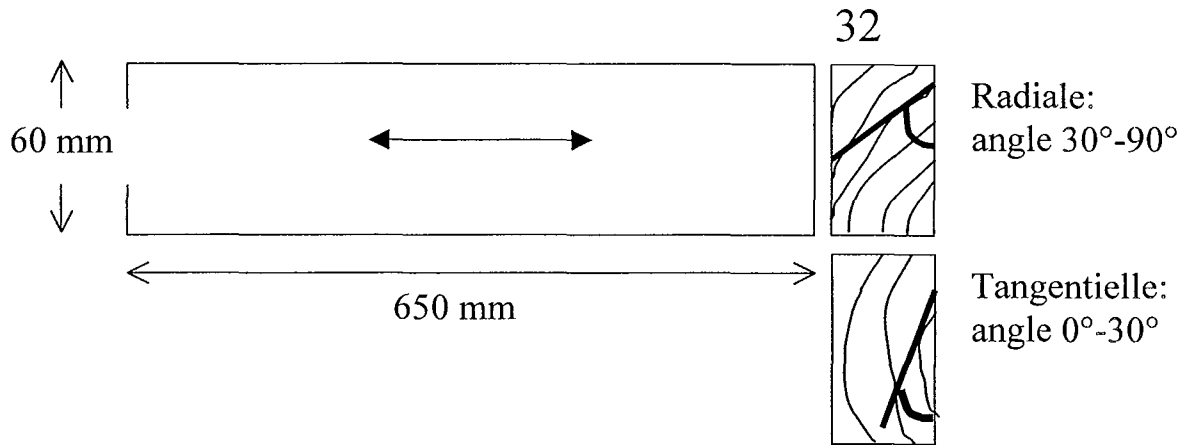
- déjà après le premier cycle, de fortes différences entre produits sont mises en évidence, et la méthode est sensible aux variations des formulations (résines, durcisseurs, charges) ;
- après 3 cycles, les différences entre produits sont très importantes. Même les meilleurs produits présentent de la délamination (5-10%) mais cela n'est pas susceptible d'évolution après les autres cycles parce que le bois est beaucoup plus fissuré que l'interface, et ne génère donc plus de contraintes dans la colle.

La figure 62 montre les résultats sur d'autres produits, uniquement après le troisième cycle de vieillissement accéléré. La qualité du bois (lot, densité, angle des cernes, pentes du fil...) a une forte influence sur le comportement de chaque éprouvette, mais l'on peut remarquer que sur un groupe de 10 éprouvettes les différences ont tendance à se compenser. Eventuellement, la limitation de l'angle des cernes à 60°-90° pour les planches tangentielles peut être utile.

La méthode d'essais n'est pas très fine et ne donne pas un résultat exprimé en une grandeur mécanique exploitable, mais elle est très utile pour montrer d'une façon simple et efficace une aptitude importante du joint épais : sa tendance à la délamination en conditions de variations dimensionnelles extrêmes, par rapport au bois massif. C'est donc une information importante dans notre type d'application. Dans plusieurs cas, la délamination passe d'une interface à l'autre, pour le même joint de colle, à partir du mécanisme dit *slanted shear crack* et mis en évidence par River et al. (1994).

En conclusion, cette éprouvette semble plus intéressante et utile que celle de la norme ASTM D 2559 ou de la norme EN 302-2.

Figure 59 – Réalisation des barres collées pour l'essai de délamination.



1b) assemblage des barres avec épaisseurs

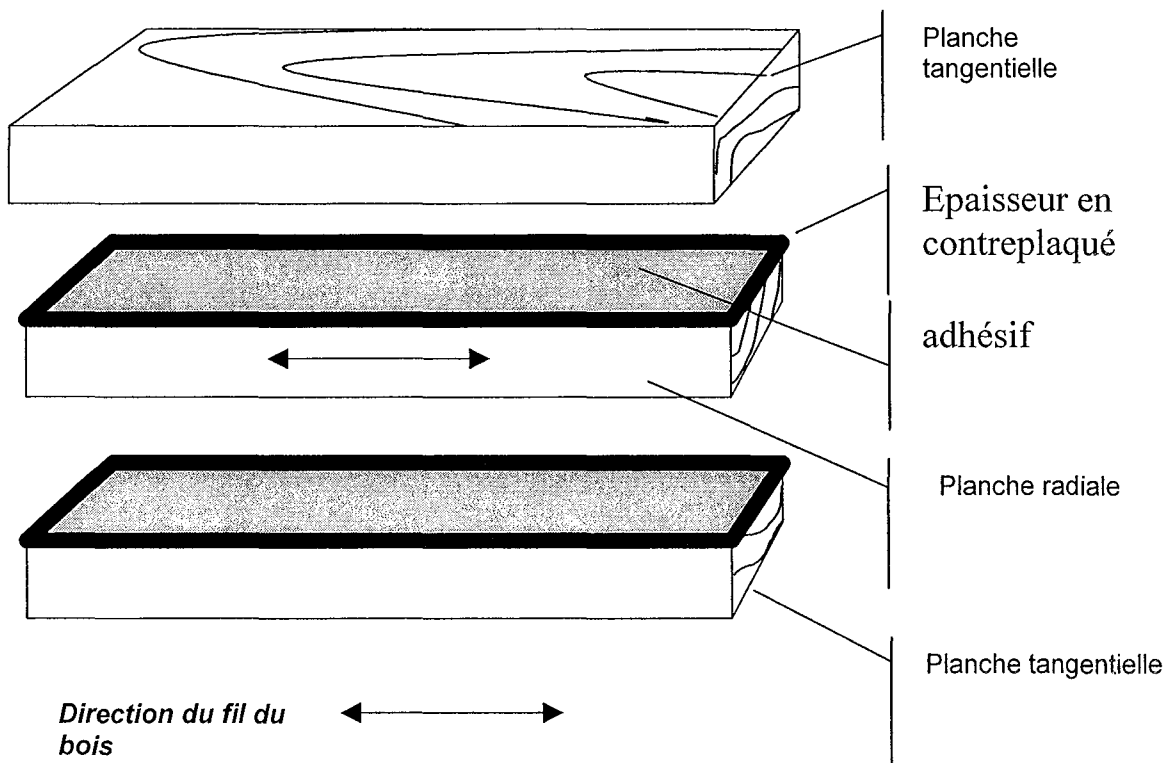


Figure 60 – Géométrie des éprouvettes utilisées pour l'essai de délamination et méthodologie pour la lecture des résultats. La disposition des cernes permet de maximiser les effets de délamination à l'interface entre bois et colle.

Total delamination on this side: $A+B = 16+20 = 36 \text{ mm}$

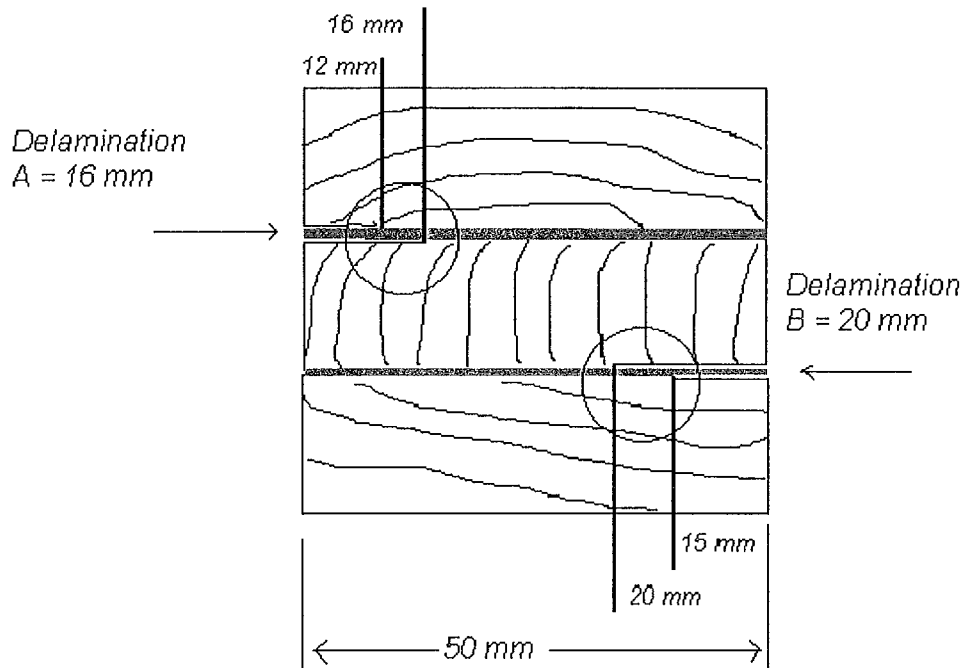


Figure 61 – Résultats de l'essai de délamination par cycle de vieillissement.

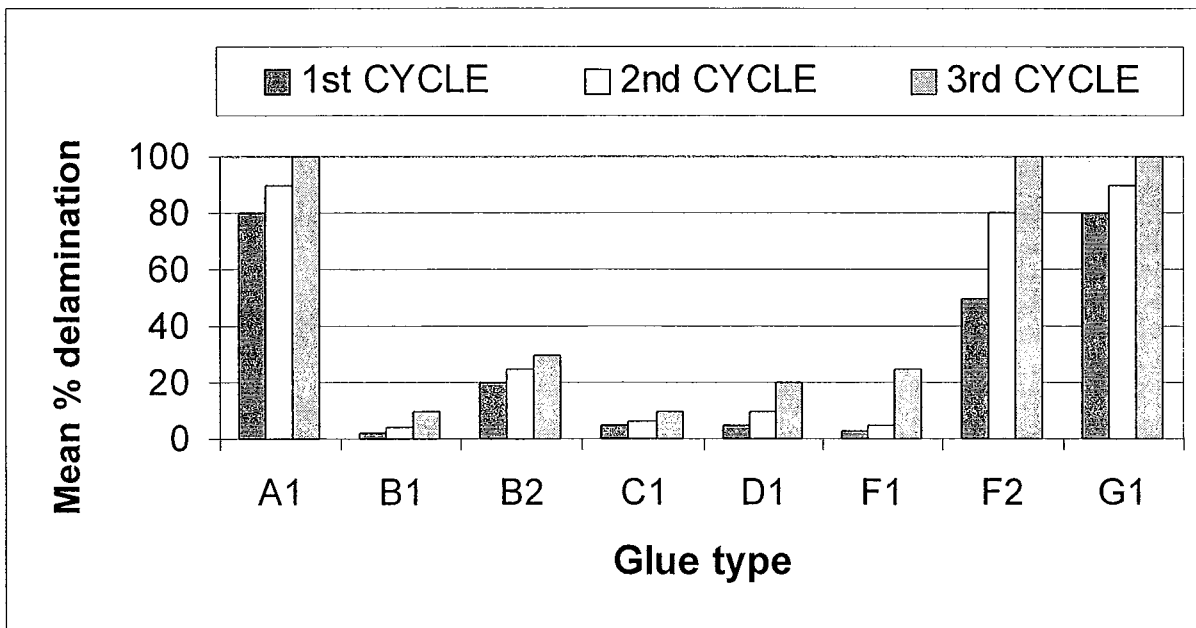
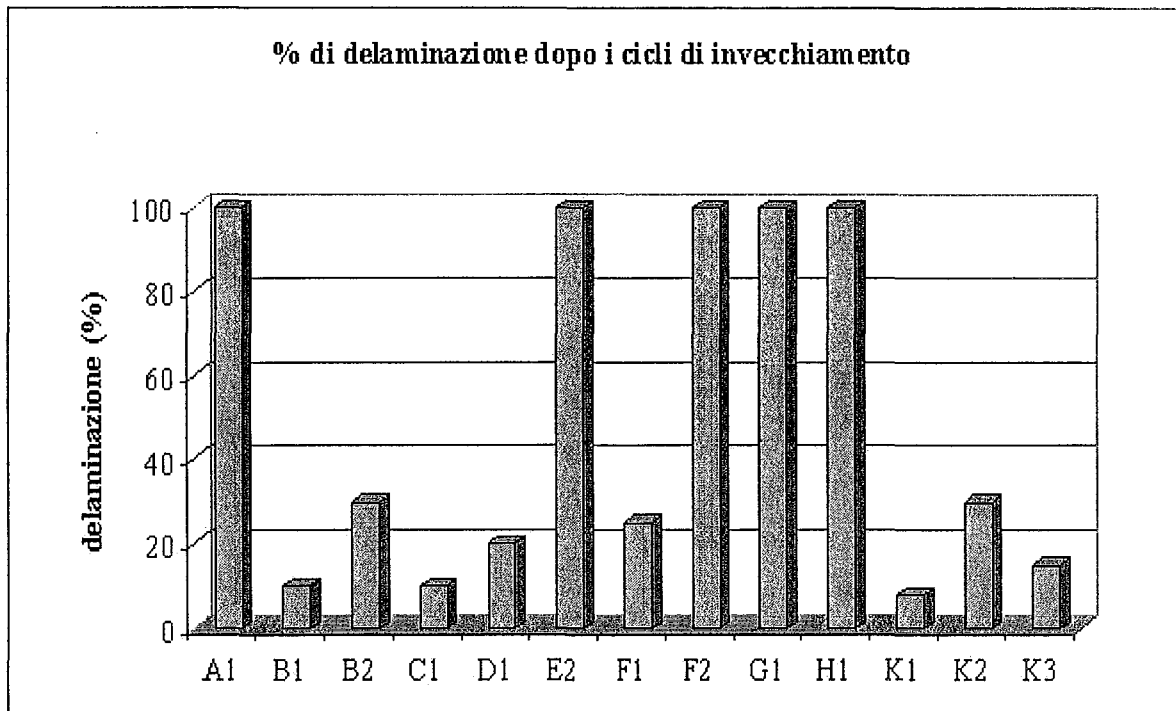


Figure 62 - Résultats de l'essai de délamination après le troisième cycle de vieillissement.



Bibliographie citée

River BH, Ebewele RO, Myers GE (1994) Failure mechanisms in wood joints bonded with urea-formaldehyde adhesives. Holz als Roh- u. W. 52:179-184

3.2.4 Comportement des assemblages par tiges collées

Pour obtenir des informations directes sur le comportement de l'assemblage, nous avons réalisé des expérimentations visant à déterminer la résistance à la traction d'assemblages "bois-colle-tige", utilisant des tiges de faible longueur (20mm, 40mm, 60mm), des différents diamètres de tiges (10mm, 12mm, 14mm), et des différentes épaisseurs du joint de colle (1mm, 3mm, 5mm).

Les éprouvettes sont réalisées avec du bois d'Epicéa, les tiges filetées sont en acier et les colles sont basées sur des résines époxy (type "fragile" et type "ductile").

3.2.4.1 Bibliographie spécifique

Les assemblages par tiges collées sont utilisés dans les pays scandinaves, Allemagne, Angleterre, USA, Canada et Italie depuis 20 ans. Dans la plupart des cas ils ont été utilisés pour des structures lamellées collées (Johansson 1995, Ranta-Maunus e Kangas 1994), mais en Angleterre et en Italie, ces typologies d'assemblage sont plus fréquemment utilisées pour la restauration dans les bâtiments anciens (Mettem e Davis 1996, Ceccotti 1998).

Les tiges ont pour objet de prévenir les ruptures dans les zones où la courbure des poutres est maximale et de reprendre les efforts aux appuis, là où le cisaillement est important. Elles sont utilisées également pour transférer des efforts dans une structure ou dans une partie de celle-ci, comme par exemple dans les liaisons poteau-fondation (Johansson 1995).

Les avantages avancés par l'utilisation des assemblages avec tiges collées peuvent être résumés comme suit:

- transfert de forces localement très importantes;
- bonne protection au feu, la tige est protégée par le bois et l'adhésif;
- coût modeste des matériaux et de la mise en oeuvre;
- facilité de transport des pièces de dimensions réduites;
- amélioration du point de vue esthétique, l'assemblage est complètement caché;
- facilité et vitesse d'exécution sur chantier.

Jusqu'à ce jour l'utilisation de cette technique a été limitée aux structures exposées à des chargements de courte durée, comme les effets du vent. Cette limitation peut être expliquée, partiellement, par l'absence de connaissances relatives au calcul de la résistance de ce type d'assemblage et à l'influence de l'humidité et de la température sur le système tige-colle-bois. D'autres limitations importantes sont liées à l'absence de connaissances sur la durabilité, les caractéristiques du glissement et la résistance dans le temps, quand la tige chargée est exposée aux changements climatiques.

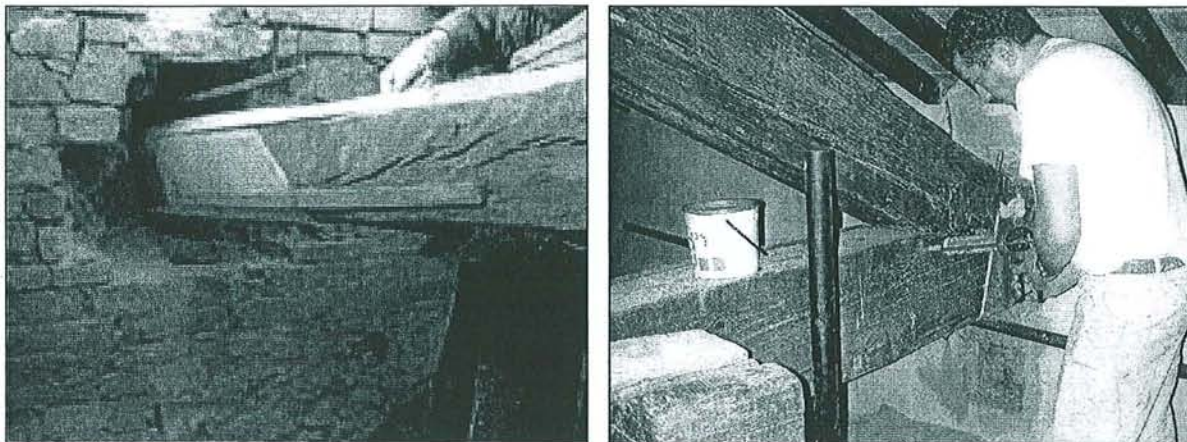
Une grande diffusion de cette technique a été limitée par des différences normatives importantes entre les pays utilisateurs.

En 1992, et pour la première fois les assemblages par tiges collées ont été introduits dans le programme de travail du CEN/TC124 et il a été créé un groupe de travail spécifique : WG6 dont je suis membre.

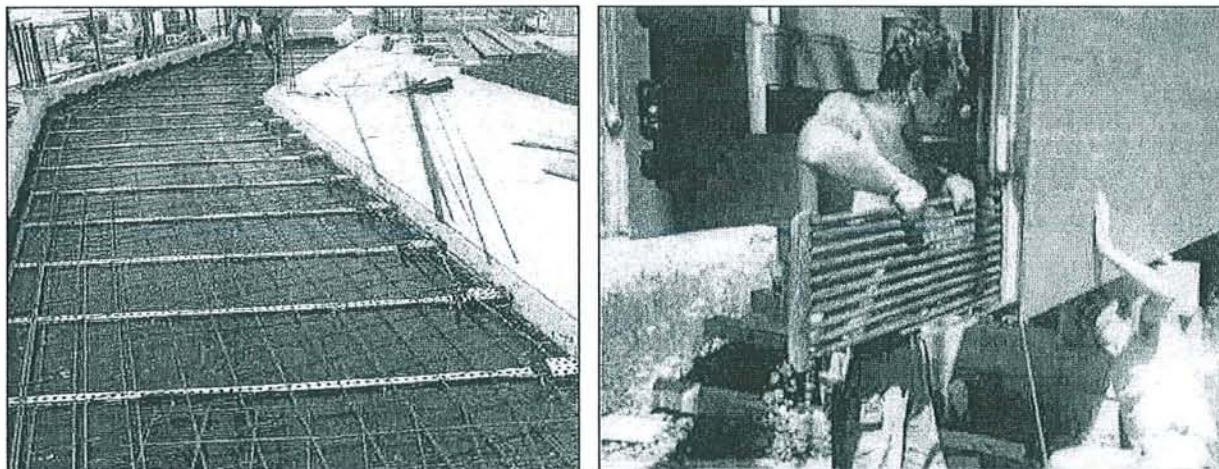
Ce groupe a confirmé le besoin normatif important dans ce secteur.

Pour cette raison, plusieurs programmes ont été lancés sur ce type d'assemblage pour favoriser la recherche et l'expérimentation (Johansson, 1995).

Une standardisation dans les projets utilisant le bois a été définie par le CEN/TC 250/SC5 (ENV 1995, ou "Eurocode 5") qui contient une annexe sur les assemblages par tiges collées dans sa partie 2 - Ponts. Pour le moment l'utilisation de ce type d'assemblage est limitée aux Classes 1 et 2, même s'ils existent déjà des exemples de structures exposées aux conditions atmosphériques extérieures.



Figures 63 et 64 - Deux exemples de restauration d'appuis par assemblage avec tiges collées. Milieu sec (classe 1) ou humide (classe 2). Photos : LegnoDOC.



Figures 65 et 66 - Deux exemples d'assemblage avec tiges collées construction nouvelle. A gauche : balcon de maison, milieu humide (classe 2). A droite : passerelle, milieu extérieur (classe 3). Photos : Geom. Cenci.

Un projet sur trois ans nommé GIROD (*Glued-In Rods*), financé par l'Union Européenne dans le programme SMT (*Standards, Measurements and Testing*) et réalisé par des partenaires d'Angleterre, Allemagne et Suède, a pour objectif de développer les informations nécessaires pour réaliser une standardisation pouvant permettre une diffusion rapide et une sécurité optimum dans l'utilisation des tiges collées.

La réalisation de cet objectif exige de:

- réaliser un travail théorique et expérimental permettant de construire un modèle pour le calcul de l'assemblage par tige collée, qui prenne en compte les propriétés mécaniques de la colle, du bois et de la tige. Le travail du GIROD donnera les informations demandées par CEN/TC250/SC5 pour la préparation de l'EUROCODE 5;
- développer des méthodes pour l'évaluation de l'adhésif par rapport à sa résistance, sa durabilité et son glissement, dans différentes conditions climatiques. Ce travail aidera le CEN/TC193/SC1 (Colles pour le bois);
- obtenir des méthodes pour le contrôle de production des assemblages par tiges collées et les standardiser.

Pour traduire ces informations en normes, deux WG (groupes de travail) qui analysent les tiges collées ont été créés au sein du CEN/TC193/SC1 (colles pour le bois):

- WG4 - à partir des résultats du GIROD, ce groupe s'occupe principalement des aspects relatifs aux applications en situation contrôlée (préfabrication de nouvelles structures);
- WG11, qui considère les aspects relatifs aux applications en chantier, comme par exemple ceux concernant la restauration.

L'analyse bibliographique réalisée, montre que le comportement de ce type d'assemblage a été étudié par plusieurs auteurs qui en ont analysé les différents aspects. Entre les typologies des éprouvettes utilisées dans les essais il n'existe pas de grandes différences géométriques, on peut distinguer principalement les éprouvettes avec une seule tête (Harvey et al, 2000; Bengtsson et al, 2000), et celles avec deux têtes (Townsend, 1990; Riberholt, 1988; Serrano, 2000).

Les tiges utilisées sont presque toujours en acier, filetées ou en acier à béton armé (Johansson, 1995; Riberholt, 1986; Deng, 1997). D'autres auteurs ont analysé également les tiges en fibre de verre, et ils ont pu remarquer, pour celles-ci, une meilleure compatibilité avec le bois (Guan, 1998).

Le diamètre des tiges est presque toujours inférieur à celui du perçage et le jeu est compensé par la colle; il existe également des configurations où le diamètre du perçage est inférieur à celui de la tige qui est cependant collée et vissée à l'intérieur. Pour ce qui concerne le choix des adhésifs, les résines phénol-résorcines ont une très longue tradition dans les applications structurelles, mais elles posent beaucoup de problèmes dans le cas des assemblages épais, problèmes liés à la réduction de résistance, très importante, due au retrait qui se vérifie au début de la réticulation (Riberholt, 1988).

3.2.4.2 Loi de comportement des colles

Nous avons déterminé expérimentalement la loi de comportement des colles. Deux exemples de colles époxy, l'une plus fragile (colle A), l'autre plus ductile (colle B) sont reportés ci-après. La caractérisation a été faite selon la norme ASTM D 638-99 « Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics ».

Les caractéristiques mécaniques des deux colles sont résumées dans le tableau suivant ; pour chaque colle la caractérisation a été faite après 7 jours de réticulation, pour respecter les mêmes temps adoptés dans les essais sur les assemblages. Les valeurs reportées ensuite représentent la moyenne calculée sur une série de 5 éprouvettes de colle.

7 jours de réticulation				
	E [N/mm ²]	σ_{ela} [N/mm ²]	σ_{cri} [N/mm ²]	$\Delta l\%$
Colle A	6642	-	13,56	0,007
Colle B	1354	11,94	18.33	10,61

Tableau 15 – Caractéristiques mécaniques des colles. Pour la colle A il n'est pas possible de déterminer le σ_{ela} .

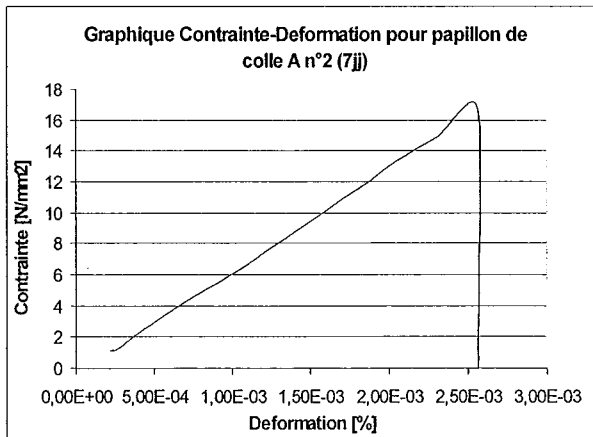


Figure 67 - Relation contrainte-déformation de la colle fragile (colle A).

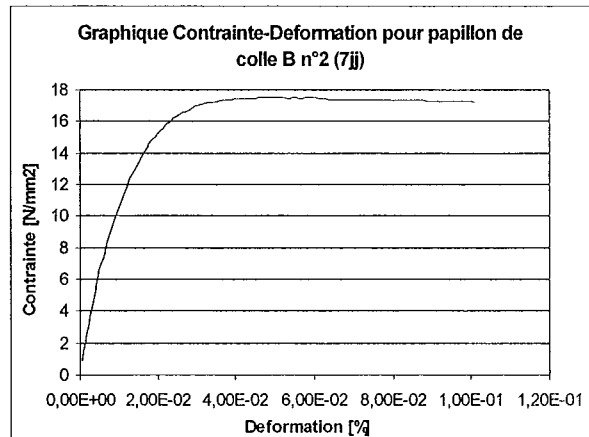


Figure 68 - Relation contrainte-déformation de la colle ductile (colle B).

3.2.4.3 Eprouvette d'extraction

L'étude a été limitée, du point de vue géométrique, à trois diamètres différents de tiges ($\varnothing_b = 10 \text{ mm}$, 12 mm , 14 mm), pour trois épaisseurs différentes du joint de colle ($e_j = 1 \text{ mm}$, 3 mm , 5 mm) et trois longueurs de collage ($L_c = 20 \text{ mm}$, 40 mm , 60 mm). Le plan des essais qui en résulte est le suivant :

PLAN DES ESSAIS			
	Epaisseur = 1,0mm	Epaisseur = 3,0mm	Epaisseur = 5,0mm
\varnothing broche = 10mm	\varnothing trou = 12mm	\varnothing trou = 16mm	\varnothing trou = 20mm
\varnothing broche = 12mm	\varnothing trou = 14mm	\varnothing trou = 18mm	\varnothing trou = 22mm
\varnothing broche = 14mm	\varnothing trou = 16mm	\varnothing trou = 20mm	\varnothing trou = 25mm

Tableau 16 – Plan des essais.

La figure 69 décrit la géométrie de l'éprouvette et montre son montage dans l'appareillage de traction de la tige. Le schéma statique utilisé est le suivant :

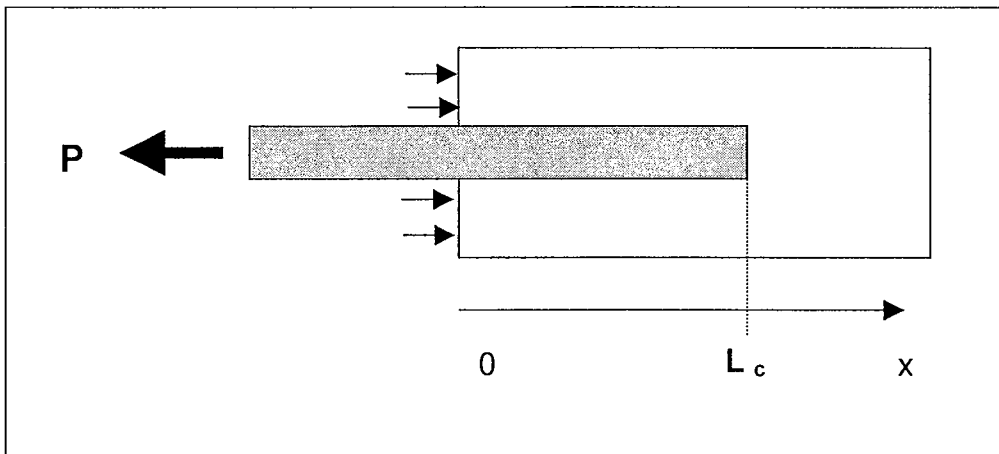


Figure 69 – Géométrie de l'éprouvette.

Les essais ont pour but de vérifier l'influence sur la résistance à l'extraction d'une tige filetée en acier en fonction des paramètres suivant :

- le type de colle
- la longueur de collage
- le temps de réticulation de l'adhésif.

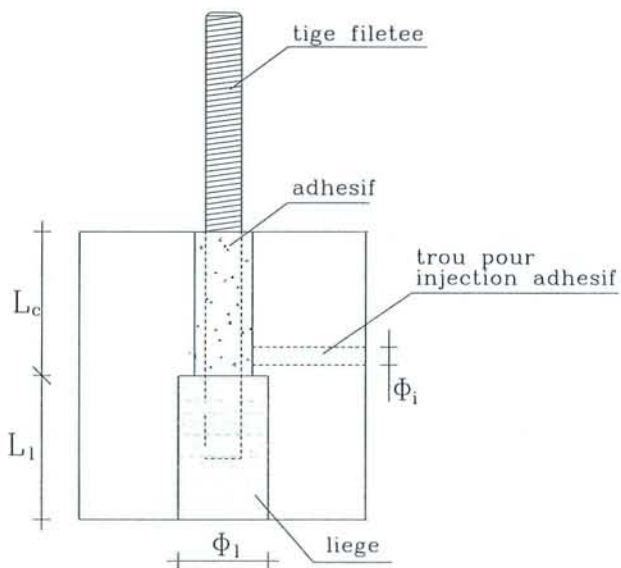
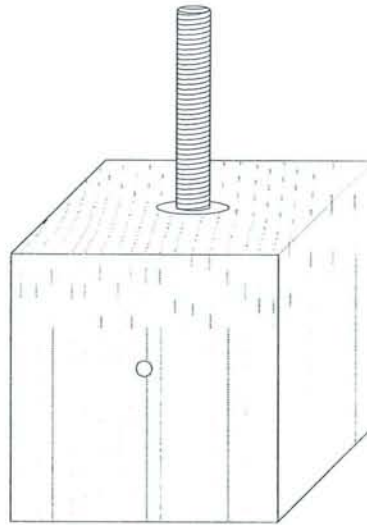
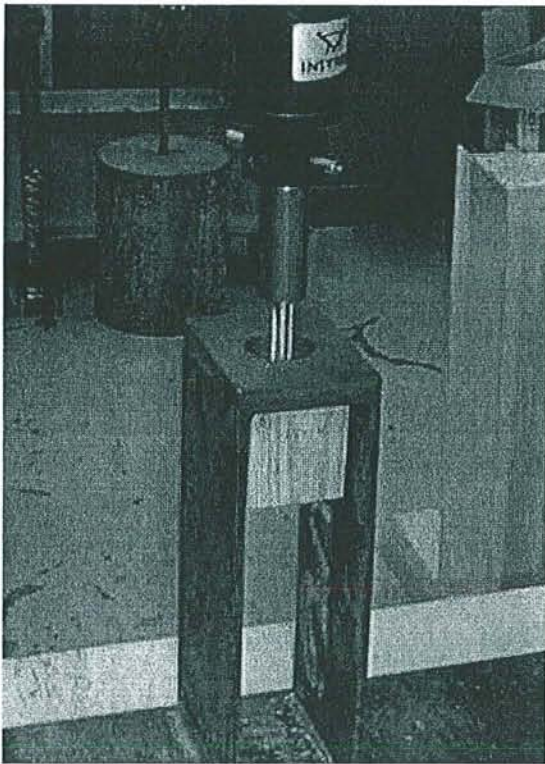


Figure 70 – Géométrie de l'éprouvette et montage dans l'appareillage d'extraction de la tige.

3.2.4.4 Résultats

A) Effet du type de colle

Les résultats expérimentaux sont récapitulés dans le tableau 17 pour la colle A fragile, et dans le tableau 18 pour la colle B ductile. Les valeurs moyennes sont chacune relatives, à une série de 10 éprouvettes. Chaque série est identifiée par une lettre (la colle) et deux numéros (le \varnothing de la tige et le \varnothing du perçage, dans cet ordre).

Série	Fmax moyenne [N]	Ecart type Fmax	Masse Volumique moyenne du bois [Kg/m ³]	Humidité moyenne du bois	Pourcentage de rupture Type 1-2
A 10-12	11104	10,60%	468,25	11,48%	70%
A 10-16	13289	9,73%	474,21	11,33%	90%
A 10-20	12914	13,78%	503,16	10,72%	0%
A 12-14	12331	9,52%	428,88	10,80%	70%
A 12-18	13850	13,12%	477,08	11,01%	80%
A 12-22	13641	10,11%	491,13	11,71%	0%
A 14-16	13896	14,24%	529,73	11,01%	100%
A 14-20	14908	13,19%	493,02	11,17%	50%
A 14-25	15768	14,94%	431,28	11,25%	80%

Tableau 17 – Résultats des essais pour la colle A fragile.

Série	Fmax moyenne [N]	Ecart type Fmax	Masse Volumique moyenne du bois [Kg/m ³]	Humidité moyenne du bois	Pourcentage de rupture Type 1-2
B 10-12	13773	15,58%	494,71	11,04%	100%
B 10-16	18132	18,95%	478,84	12,08%	100%
B 10-20	23252	6,57%	497,17	12,08%	30%
B 12-14	14811	19,98%	487,61	10,95%	100%
B 12-18	23607	10,77%	490,19	12,39%	10%
B 12-22	25779	10,29%	485,64	12,11%	90%
B 14-16	23744	15,95%	496,14	12,36%	100%
B 14-20	24491	8,06%	494,72	11,08%	70%
B 14-25	26968	4,10%	489,99	11,08%	30%

Tableau 18 – Résultats des essais pour la colle B ductile.

Pour ce qui concerne les **typologies de rupture** relevées après les essais, on peut en distinguer 4 :

- type 1, rupture matérialisée par un décollement d'une portion de bois restée adhérente au cylindre de colle ;
- type 2, rupture à l'interface entre colle et bois ;
- type 3, rupture du cylindre de colle ;
- type 4, rupture à l'interface entre colle et tige métallique .

Pour en faciliter la lecture elles ont été réunies en deux groupes (1-2 et 3-4) et elles sont exprimées comme un pourcentage des typologies 1-2. Nous n'avons pas pu mettre en évidence une relation bien définie entre les différentes typologies de rupture et les résistances à l'extraction des tiges. Il existe sans doute une relation entre les types de rupture et l'épaisseur du joint de colle. En effet, avec des épaisseurs de joints de colle faibles on a quasi systématiquement des ruptures dans le bois à proximité du cylindre de colle ou à l'interface bois-colle. C'est le contraire pour les épaisseurs de colle importantes, la rupture s'initie dans l'adhésif (pour la colle fragile) ou à l'interface colle-tige métallique (pour la colle ductile). Les figures 71 et 72 montrent l'évolution de la force de rupture en fonction du diamètre des tiges ; on constate que la force de rupture augmente de façon proportionnelle pour la colle fragile, en accord avec les modèles de la littérature. Pour la colle ductile la résistance est quasi double, mais l'évolution est plus complexe et semble être beaucoup plus sensible à l'épaisseur du joint de colle.

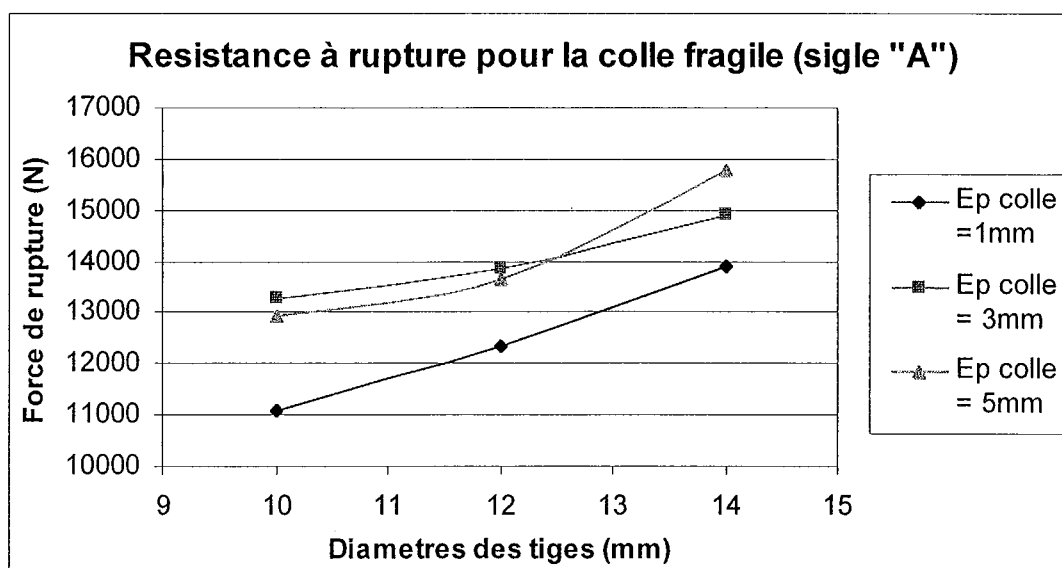


Figure 71

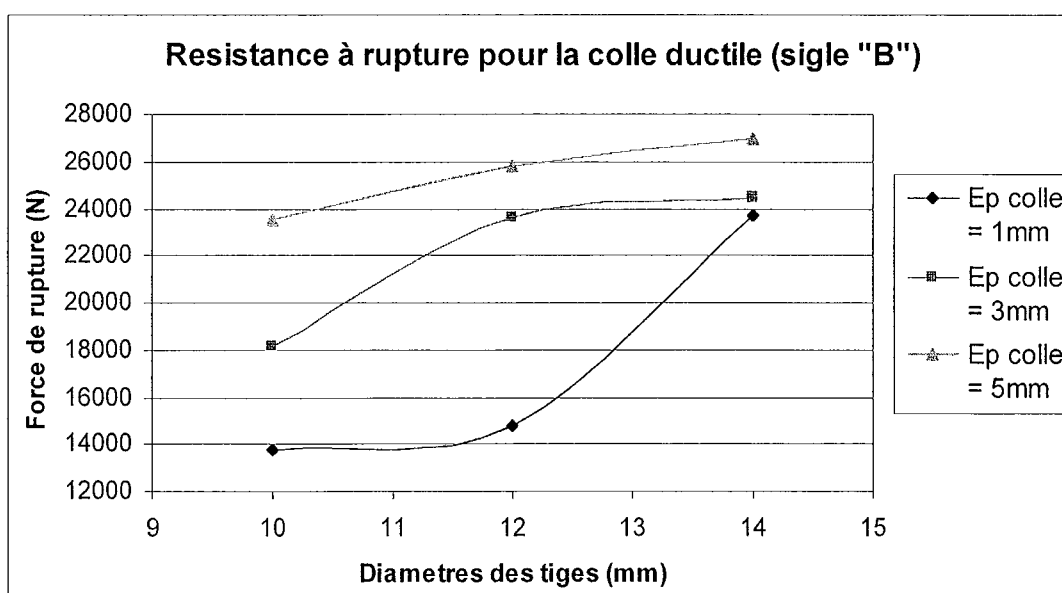


Figure 72

Les figures 73 et 74 montrent l'évolution de la force de rupture en fonction de l'épaisseur de colle ; on constate pour les deux colles que la résistance de l'assemblage augmente de façon significative avec l'épaisseur du joint, mais également en fonction du diamètre de la tige.

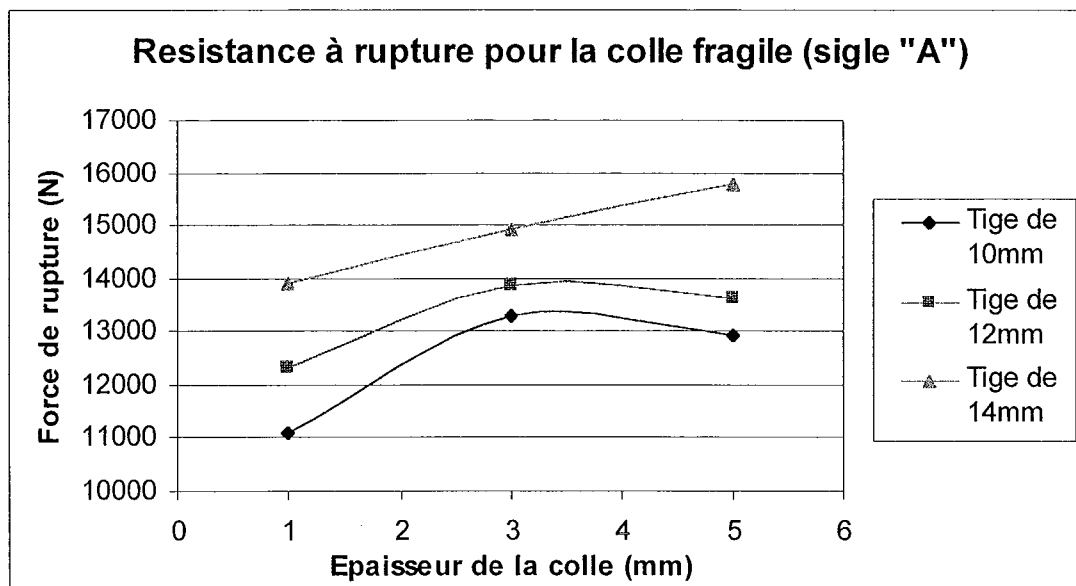


Figure 73

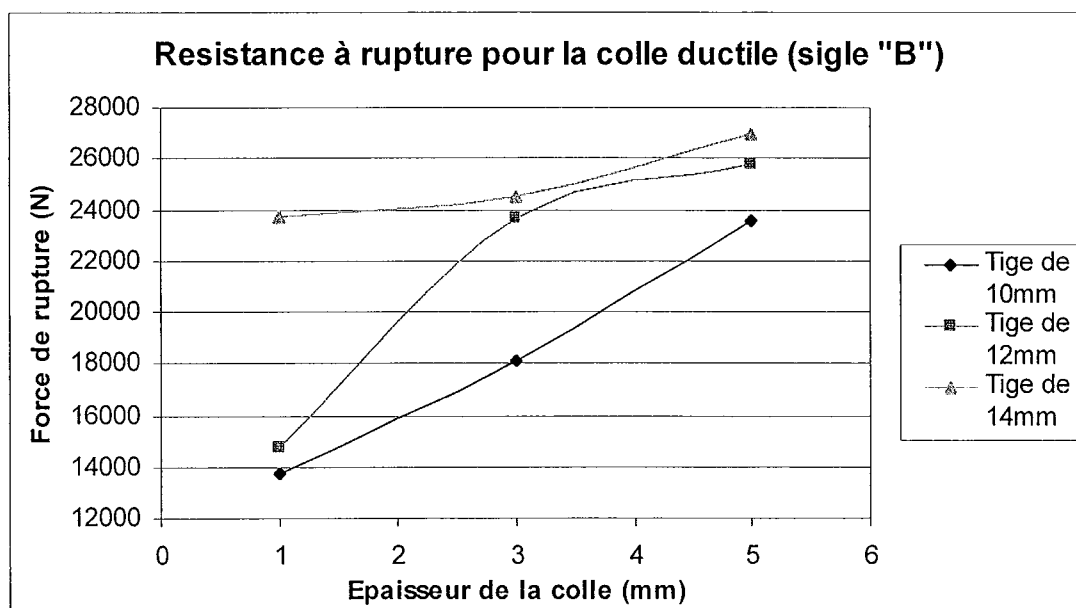


Figure 74

Les figures 75 et 76 montrent une comparaison entre les deux colles, en fonction respectivement du diamètre des tiges et de l'épaisseur de colle. Le gain de résistance entre la colle ductile et la colle fragile varie entre 20% et 90% et serait plus sensible à l'épaisseur de colle.

Nous obtenons un meilleur gain pour les gros diamètres et les fortes épaisseurs.

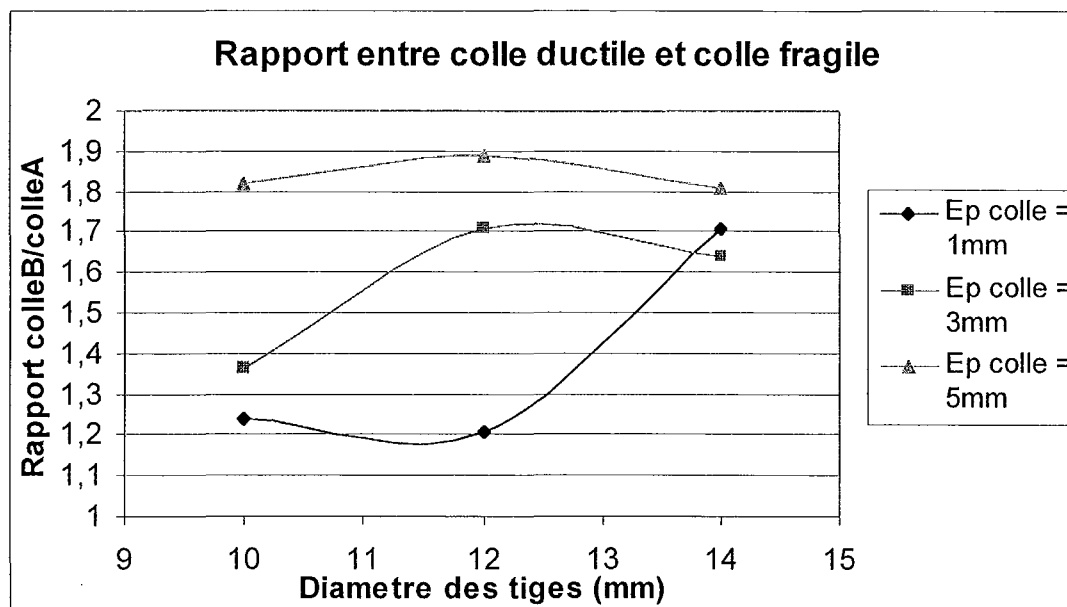


Figure 75 – Rapport entre colle ductile et colle fragile pour une longueur de collage de 40mm.

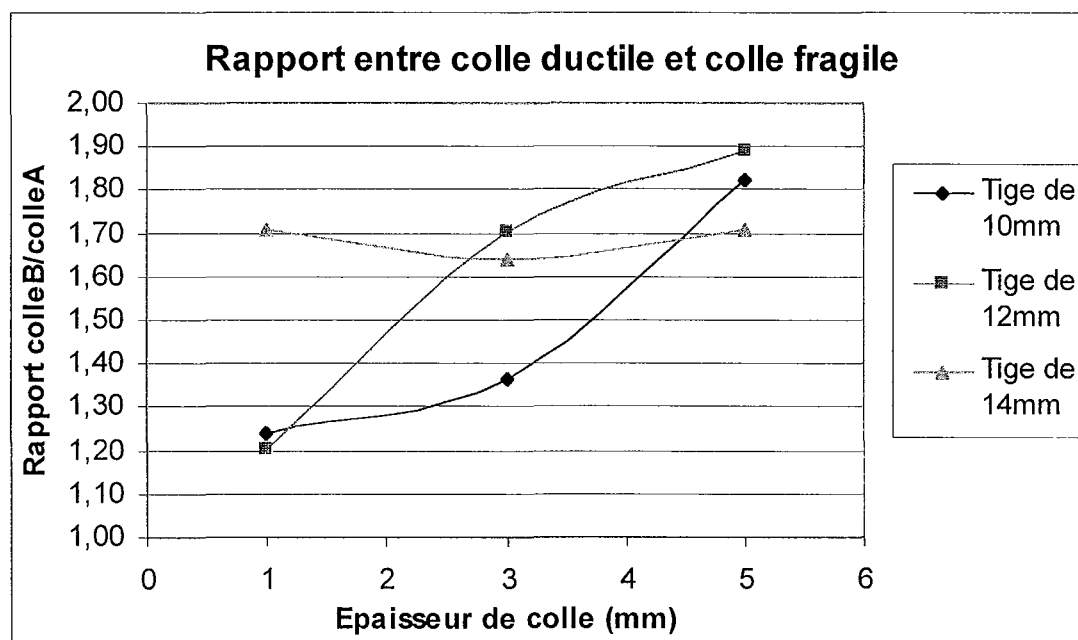


Figure 76 – Rapport entre colle ductile et colle fragile pour une longueur de collage de 40mm.

B) Effet de la longueur du collage

La figure 77 montre l'évolution de la force de rupture en fonction de la longueur de collage pour les deux adhésifs. Cette analyse a été limitée à des éprouvettes réalisées avec des tiges de 12mm de diamètre et pour une épaisseur du joint de colle de 3mm.

On constate que, pour les deux colles, la résistance augmente avec la longueur du collage. L'allure des courbes semble prendre une forme linéaire dans le domaine des longueurs utiles.

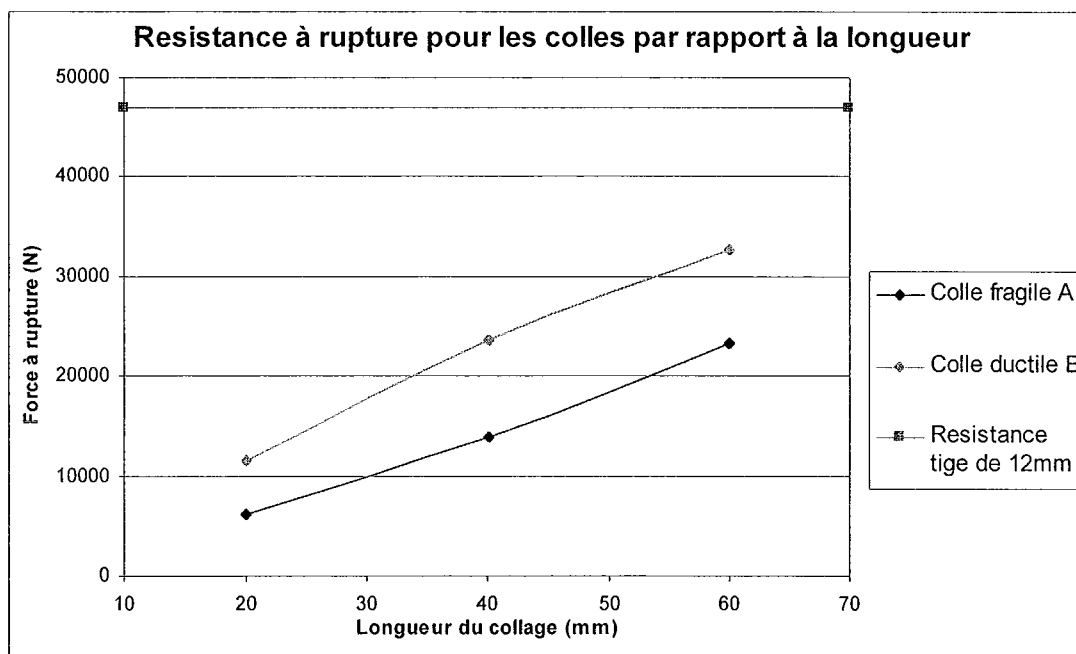


Figure 77 – Evolution de la force de rupture en fonction de la longueur de collage pour les deux colles.

C) Effet du temps de réticulation de l'adhésif

Les différentes caractéristiques mécaniques des deux colles nous ont conduit à vérifier le comportement du joint de colle, par rapport à un temps de réticulation plus long que les 7 jours considérés de manière normative dans les essais.

On a réalisé, à cette fin, 10 éprouvettes pour chaque colle, avec un diamètre de tige de 12 mm, un diamètre de perçage de 18 mm et une longueur de collage de 40mm. Elles ont été testées après 7 et 60 jours de réticulation.

Les résultats de cette comparaison, montrés dans le tableau 19, confirment les doutes que l'on avait pu émettre sur les différents comportements des deux colles dans le temps.

En effet, on peut noter que le comportement de la colle fragile est le même à 7 jours et à 60 jours, et que le temps de réticulation plus long de la colle ne provoque pas de diminutions dans la résistance de l'assemblage.

Par contre, pour la colle ductile on observe, pour les éprouvettes testées à 60 jours, une diminution dans la résistance moyenne de l'assemblage de quasi 25%.

On peut supposer alors que la diminution de résistance présentée par la colle ductile après 60 jours est due à la perte d'une partie de son caractère de ductilité qui avait favorisé ses performances à travers une meilleure dissipation d'énergie.

Colle	Temps de réticulation	Fmax moyenne [N]	Δ Fmax	Ecart type Fmax	Masse Volumique moyenne [Kg/m ³]	Humidité moyenne
FRAGILE	7jours	13850	0 %	13,12%	477,08	11,01%
	60 jours	13860		11,84%	479,56	12,01%
DUCTILE	7jours	23607	-25 %	10,77%	490,19	12,39%
	60 jours	17856		16,77%	478,22	11,98%

Tableau 19

En conclusion, les essais sur les assemblages par tige filetée collée avec de faibles longueurs d'enfoncement nous a permis de montrer que les résistances obtenues dépendent fortement des caractéristiques géométriques du joint (épaisseur) et des propriétés mécaniques des adhésifs (comportement fragile ou ductile), confirmant les travaux récents de Jansen et al (2001) pour des tiges collées sur des bois feuillus durs (*Acer mono*) et dans du bois de conifère (*Cryptomeria japonica*) avec des collages utilisant un adhésif polyuréthane d'épaisseur 1 mm. Mais notre étude a aussi mis en évidence l'importance du volume de colle, (proportionnel à son épaisseur et à la longueur d'encollage).

Bibliographie citée

- Bengtsson, C., Kemmsies, M., Johansson, C.J, 2000 - « Production control methods for glued-in rods for timber structures », Proceedings World Conference on Timber Engineering - 31/07-03/08 2000 Whistler, Canada.
- EUROCODE 5, 1997 – « Part 2 – Ponts, annex A (informative) », ENV 1995-2:1997.
- Guan Z.W., 1998 - « Structural behaviour of glued bolt joints using », Proceedings 5th World Conference on Timber Engineering - Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- Harvey, Kim, Ansell, Martin, 2000 - « Improved timber connections using bonded-in GFRP rods », Proceedings World Conference on Timber Engineering - 31/07-03/08 2000 Whistler, Canada.
- Jensen JI et al, 2001 – “Axially loaded glued-in hardwood dowels”. Wood Sci. and Technol. (35) 73-83
- Johansson C.J., 1995 - « Axial strength of glued-in bolts. Calculation model based on non-linear fracture mechanics. A preliminary study », division of Structural Mechanics, Lund Institute of Technology, P.O. Box 118, S-22100 Lund, Sweden.
- Mettem C.J., Davis G., 1996 - « Resin bonded repair system for structural timber », Construction Repair, March/April.
- Ranta-Maunus A., Kangas J., 1994 - « Glued-in Steel Rods in V-shape », Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast Australia, July 11-July 15.
- Riberholt H., 1988 - « Glued bolts in glulam. Part 2 », Serie R, N° 228, Department of Structural Engineering Technical University of Denmark, ISBN 87-87336-94-4.
- Serrano E., 2001 - « Glued-in rods for timber structures; a 3D model and finite element parameter studies », International Journal of Adhesion & Adhesives, n° 21, 115-127.
- Townsend P.K., 1990. Steel Dowels Adhesive Bonded in Glue Laminated Timber, Research Report 90/11, Department of Civil Engineering University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

3.2.5 Stabilité dimensionnelle thermique des colles

3.2.5.1 Bibliographie spécifique

Lors de l'application par collage de matériaux différents, le facteur de "stabilité dimensionnelle thermique" joue un rôle important vis-à-vis de la compatibilité des matériaux en présence.

La comparaison des valeurs du Coefficient d'Expansion Thermique (CET) est donc une pratique courante pour évaluer la possibilité d'effectuer un collage structural.

Stumes (1975) a utilisé cette approche pour des résines époxy et des barres en acier employées pour la restauration des charpentes en bois.

La mesure des coefficients d'expansion thermique sur les matériaux polymériques est pratique courante, mais l'application de ces techniques au matériau bois n'est pas aussi simple de par son hygroscopicité. Pour considérer les changements d'humidité, Hendershot (1924) propose un facteur de correction des mesures, mais cela ne constitue pas une méthode directe et fiable. Différentes méthodes ont été proposées pour empêcher les variations d'humidité des échantillons lors de la mesure des CET du bois: Villari (1868) trempait les échantillons dans l'huile; Kubler (1959) et Schirp et Kubler (1968) les avaient revêtus en feuille d'aluminium et encore Kubler et al. (1973) les enfermaient en tubes de cuivre étanches. Mais toutes ces configurations ne reproduisent correctement les conditions réelles du bois in-situ dans une charpente. Une approche différente peut être menée sur échantillons saturés d'eau (Salmén, 1990) ou complètement secs (Stevens, 1960), on peut également choisir une température à laquelle le bois ne contient pas d'eau (Fusako, 1973; Popper et Eberle, 1992), mais cela limite beaucoup le domaine d'application des résultats.

Les CET du bois ont, en direction perpendiculaire au fil, le même ordre de grandeur des CET des métaux ($10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), même si, dans la plupart des applications, le retrait du au séchage est plus fort que le gonflement du à l'augmentation de température. Mais il est bien connu qu'à l'intérieur d'une poutre mise en oeuvre, l'humidité du bois ne se stabilise et ne s'homogénéise pas rapidement. Le temps nécessaire pour atteindre l'humidité d'équilibre est long et les contraintes développées pendant l'état transitoire deviennent importantes. Une série de tests préliminaires sur échantillons présentant des fentes de séchage remplies de mastic époxy, dans une condition spécifiquement créée pour maximiser les échanges thermiques à l'interface (fig. 1), a montré qu'après une série de 30 cycles thermiques aux mêmes conditions d'humidité se formait une fente à l'interface. La fente s'élargit après 20 cycles supplémentaires, nous amenant à la conclusion que les contraintes dues à un gradient d'expansion thermique peuvent être suffisantes pour causer la délamination du joint.

Les aspects thermiques de la compatibilité à l'interface du bois avec l'adhésif époxy ont donc été analysés à travers la comparaison du CET de quatre colles époxy différentes et deux espèces de bois. La comparaison est basée sur une méthode de test modifiée pour mesurer le CET de bois dans les mêmes conditions d'humidité, de manière identique aux phénomènes développés dans des poutres de grandes tailles où le bois trouve très lentement ses conditions d'équilibre.

3.2.5.2 Développement de la méthode

Les tests ont été réalisés avec trois adhésifs époxy commercialisés spécifiquement pour la restauration du bois, et un adhésif époxy expérimental. Tous sont des bi-composants habituellement appliqués à la température ambiante. Les adhésifs ont été mélangés comme préconisé par les fabricants et les éprouvettes ont été conservées pendant 30 jours dans une atmosphère standard (20°C et 65% humidité relative) avant d'être mis en oeuvre. Ce temps ayant été déterminé suite à quelques essais cinétiques préliminaires. Deux essences de bois différentes (sapin, *Picea abies*, et iroko, *Clorophora excelsa*) ont été utilisées. Le CET a été mesuré selon la norme Italienne (UNI, 1967) pour les matières plastiques avec un dilatomètre constitué par deux tubes de quartz avec des diamètres différents et un transducteur micrométrique qui mesure les allongements, l'éprouvette étant placée entre les deux tubes. D'après la procédure proposée, les mesures sont répétées pour les différentes températures, et les éprouvettes remises au bain froid de référence pour vérifier la position initiale. La norme a été suivie strictement pour les colles époxy, mais pour les éprouvettes de bois l'appareil et la procédure ont été modifiés jusqu'à ce qu'ils soient rendus plus exacts et plus fiables (Pizzo, 1999).

Dans l'appareil modifié (fig. 70) le tube dilatométrique est mis en oeuvre avec l'éprouvette à l'intérieur et un échangeur de chaleur est fixé extérieurement. L'échangeur a un volume interne de 18 litres qui garantit une bonne inertie thermique. Dans l'échangeur l'eau refroidit la parois externe d'un tube de cuivre vertical, localisé à l'intérieur mais sans communication. Ce tube intérieur est rempli avec de l'eau et il est ouvert sur la partie supérieure pour pouvoir faire pénétrer le tube en quartz du dilatomètre à l'intérieur. Ainsi, l'eau transmet la chaleur alors que l'éprouvette est protégée des vibrations ou mouvements. L'exactitude du contrôle de la température a été vérifiée avec une série de mesures entre 30°C et 60°C, avec un pas de 5°C, à l'aide d'un thermomètre à mercure (précision de 0,1°C) pour vérifier la température dans le bain, et un thermocouple (précision de 0,1°C) localisé dans l'eau. Une erreur maximale de 0,5°C a été observée.

Les éprouvettes de colle époxy pour les mesures du CET étaient des cylindres avec un diamètre de 9 mm, et une longueur comprise entre 37 et 40 mm, ces cylindres ont été obtenus par tournage. Les mesures ont été répétées sur deux éprouvettes deux fois pour chaque température, et à chaque fois le dilatomètre était ramené à la température de référence de 0°C pour vérifier que les lectures du transducteur revenaient bien à la valeur initiale de 0 µm. Les mesures ne respectant pas cette condition ont été rejetées.

Les éprouvettes en bois sont orientées dans la direction parallèle ou transversale au fil. Aucune distinction n'a été faite entre directions radiale et tangentielle. Les éprouvettes ont une forme de parallélépipède et ont été découpées avec une section de mm 8x8 et les longueurs suivantes: mm 120 pour le sapin longitudinal, mm 80 pour le sapin transversal, mm 100 pour l'iroko longitudinal, mm 51 pour l'iroko transversal. Pour connaître la perte de poids du bois pendant l'essai, les éprouvettes en bois furent chauffées dans une thermo-balance (précision 1 mg) dans la même configuration que celle décrite dans les mesures du CET. Trois types de caractérisation ont été réalisées, comme décrit dans la figure 78.

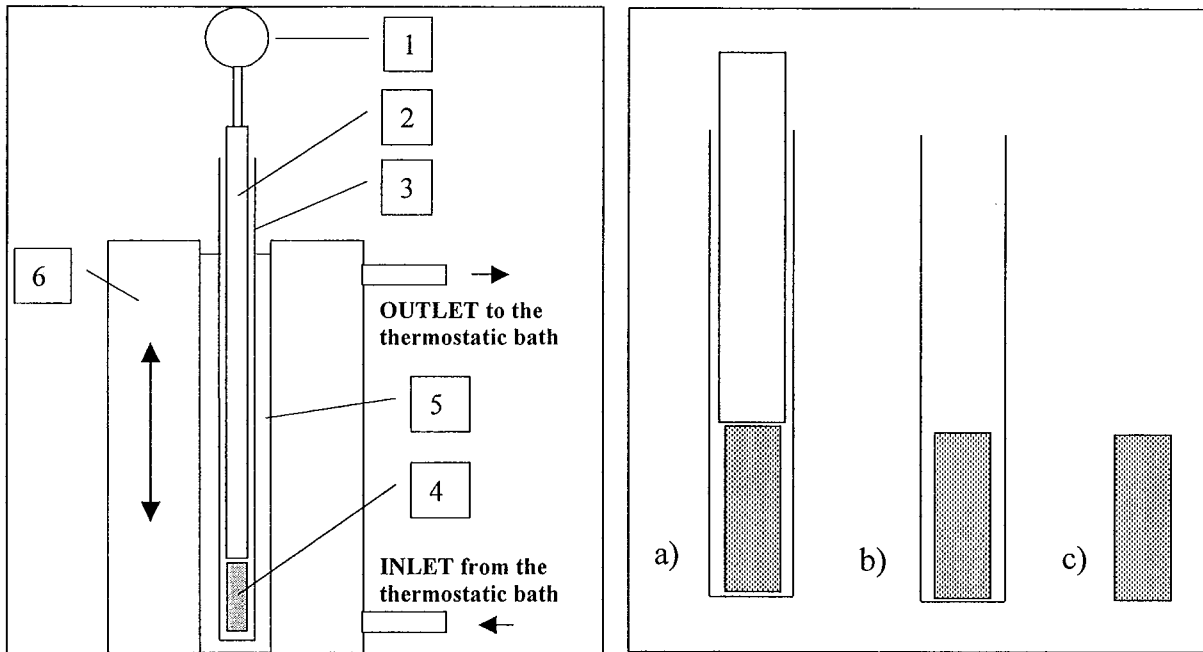


Figure 78 (gauche) –Schéma du dilatomètre modifié: 1) transducteur, précision 1 μm ; 2) tube interne en quartz, \varnothing extérieur: 1,28 cm; 3) tube extérieur en quartz, \varnothing intérieur: 1,43 cm - épaisseur: 0,15 cm; 4) éprouvette; 5) eau chaude immobile; 6) revêtement extérieur.

Figure 78 (droite) - Représentation du test de perte de poids sur les éprouvettes d'épicéa (rectangles avec traits noirs) :

- Eprouvette au fond d'un cylindre de verre avec un tube de verre sur sa surface supérieure. Cette configuration représente bien ce qui se passe dans le dilatomètre. Le poids de l'éprouvette est mesuré immédiatement avant et après l'exposition à la température de 50°C pendant 10' et 15';
- Eprouvette placé au fond du cylindre de verre sans aucun autre obstacle au dessus. Mesure de la perte de poids en continu pendant le chauffage à 50°C ;
- Eprouvette libre dans l'air à 50°C avec mesure en continu de la masse pendant 10'.

Toutes les éprouvettes avaient une humidité initiale de 14,8% ($\pm 0,2\%$).

Les mesures du CET ont été effectuées comme suit:

- une mesure seulement a été réalisée sur chaque éprouvette et chaque température sélectionnée, dans le but d'éviter les effets liés à l'hystérésis hygrométrique du bois;
- la température de référence pour toutes les éprouvettes en bois a été fixée à 10°C, en évitant la formation de glace à l'intérieur du bois (Kubler et al., 1973). La stabilisation à la température de référence a été évaluée en pesant régulièrement quelques éprouvettes maintenues dans le même environnement. Ces pesées ont également été utilisées pour la détermination de l'humidité initiale;
- les valeurs de l'allongement maximum (au lieu de l'allongement final) atteint pendant les essais ont été utilisés pour l'évaluation du CET (coefficient d'expansion thermique), cela est lié à quelques petits raccourcissements

observés après de longs séjours à haute température de l'éprouvette et cette mesure a été prise également pour minimiser les échanges d'humidité des éprouvettes avec l'environnement, (basé sur les résultats des essais préliminaires).

Des tests de vieillissement accéléré et de cisaillement pour vérifier la durabilité de l'encollage ont été menés selon les procédures décrites aux paragraphes précédents (Lavischi et al., 2001a) : deux cycles d'eau sous pression atmosphérique de 5 bars et séchage subséquent à 60°C dans un four ventilé. Les éprouvettes sont testées en cisaillement par compression à l'état humide.

3.2.5.3 Résultats

A) Perte de poids des éprouvettes

Dans les contrôles préliminaires, après 10 minutes dans la thermo-balance les éprouvettes de bois perdent du poids d'une façon appréciable (Figure 78.c) avec une petite différence entre les éprouvettes longitudinales et transversales (Figure 79). Cette différence est en rapport avec la surface efficace d'échange d'humidité, qui est plus grande pour les éprouvettes transversales, cela est lié à la plus grande perméabilité à la vapeur dans la direction transversale par rapport à la direction longitudinale. Quand les éprouvettes sont insérées dans le fond du cylindre de verre (Figure 78.b), les pertes de poids sont sensiblement réduites, dans les deux directions (transversale et longitudinale). Cela est certainement en rapport avec l'augmentation rapide de l'humidité relative de l'air, comme déjà observé par Hedlin (1969) dans un cas similaire, et avec la diminution de la force qui réduit le taux d'évaporation de l'humidité du bois. Ce phénomène est amplifié évidemment quand le tube de verre intérieur est inséré dans le cylindre (Figure 78.a). Dans ce dernier cas, la variation de l'humidité du bois dans les éprouvettes est comprise entre 0,14% et 0,15%. En supposant une variation linéaire des dimensions à partir de 0% jusqu'au point de saturation des fibres (30%), les valeurs observées donneraient pour le bois de Sapin une réduction d'approximativement 1,3 μm pour les éprouvettes longitudinales (faisant référence à une longueur initiale de 120 mm) et approximativement de 17 μm pour les transversales (faisant référence à une longueur initiale de 80 mm) quand la température est maintenue à 50°C pendant 10 minutes. Corriger le CET mesuré pour le raccourcissement du au séchage serait donc possible, bien que ce ne soit pas indispensable dans ce travail. Sur la basé de ces résultats, il peut être affirmé que les tests conduits avec l'appareil modifié reproduisent très correctement les conditions typiques du bois dans une charpente ou une structure, où le taux d'échange d'humidité et de température avec l'air environnant est très lent.

B) Coefficients d'expansion thermique (CET)

Les valeurs de CET des adhésifs époxy et du bois sont reportées dans la figure 80. Dans tous les cas un CET positif est observé, indiquant que les éprouvettes se dilatent sous l'effet de la température. Les dimensions dans les éprouvettes de bois transversales étaient très reproductibles. Les essais ont été menés sur des durées approximatives de 30 minutes, mais après 10 minutes les éprouvettes ne s'allongeaient plus et restaient stables, indiquant donc que l'équilibre dimensionnel était atteint. Dans les éprouvettes longitudinales l'allongement maximal a été atteint toujours en moins de 5 minutes, alors qu'un très faible raccourcissement était observé après 15 minutes.

Les éprouvettes transversales montrent des valeurs CET de l'ordre de $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (comme pour l'acier), alors que les valeurs avec les éprouvettes longitudinales sont approximativement de $(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$.

Les valeurs transversales sont très semblables à celles obtenues par Popper et al. pour le Sapin (1992) et par Kubler et al. (1973) avec d'autres essences possédant une masse volumique semblable. Par contre, quelques effets de réduction de l'allongement en fonction du séchage ont été observés sur les éprouvettes longitudinales.

Il est bien connu que le CET longitudinal pour le bois sec n'est pas dépendant de sa masse volumique ou de l'essence (Catalogue du Bois, 1999), les différences entre Sapin et Iroko observées dans notre cas sont probablement dues à la manière différente dont l'eau interagit avec les deux essences.

Les valeurs rapportées pour le Sapin par Popper et al. (1992) dans la gamme de 100°C - 120°C ($\text{CET} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) sont plus élevées que les nôtres, même en prenant en compte la correction liée au séchage, mais dans ce cas le CET a été calculé de manière dynamique et les valeurs ne sont probablement pas directement comparables.

Les CET sont influencés par l'anisotropie des propriétés du bois. Les différences observées peuvent être attribuées à la plus haute capacité de vibration des liaisons hydrogène (relativement faibles) entre eau et chaînes moléculaires de cellulose par rapport aux liaisons entre deux molécules de cellulose mêmes, (qui sont préférentiellement orientées selon la direction longitudinale).

Une très petite augmentation des CET a été observée avec une température croissante, comme déjà montré dans le domaine hygroscopique par Kubler et al. (1973), même si dans notre cas la différence est de l'ordre de grandeur de la variabilité expérimentale.

Les valeurs des CET mesurées pour les éprouvettes d'adhésifs époxy sont très différentes. Dans tous les cas les mesures étaient faciles et reproductibles. La valeur moyenne obtenue pour l'adhésif A ($9,3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ de 0°C à 60°C) est très en accord avec celle rapportée dans la littérature pour un produit très semblable (Stumes, 1975).

Aussi l'adhésif B a une valeur de CET semblable, mais une plus forte inclinaison de la courbe CET/Température, indiquant un allongement plus fort en fonction de l'augmentation de la température. Par contre, l'adhésif C a un profil de CET qui est remarquablement proche de celui des éprouvettes de bois dans la direction transversale au fil, tout du moins aux températures inférieures.

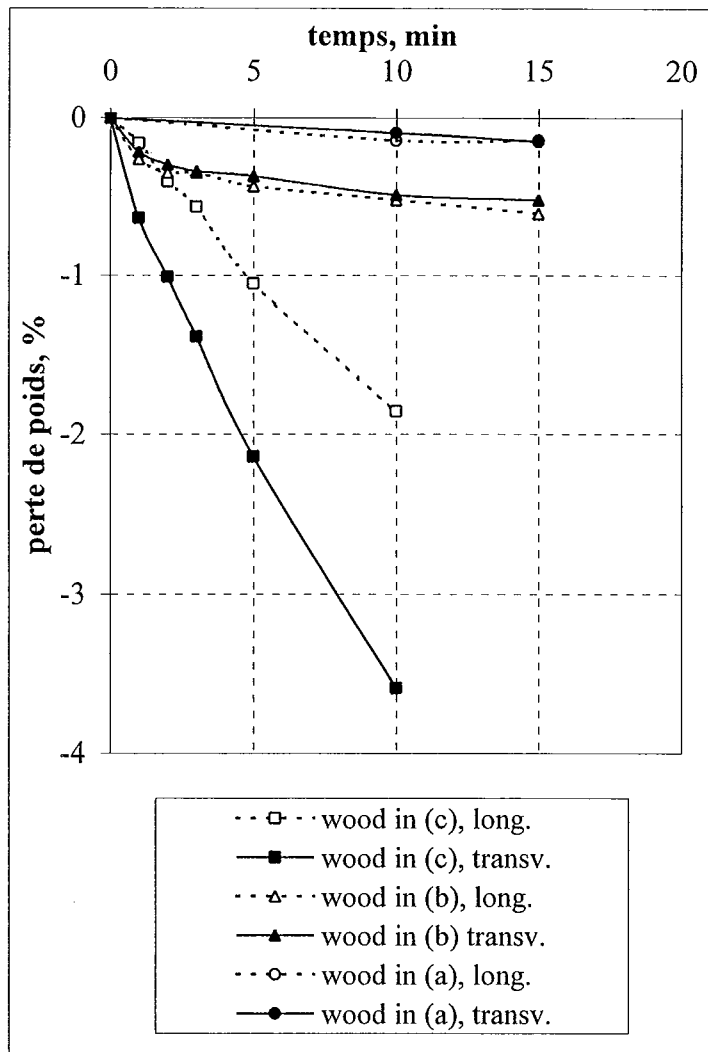


Figure 79 - Pertes de poids des éprouvettes d'épicéa (WL), calculées comme suit

$$WL = 100 \frac{(P_o - P_f)}{P_o}$$

où: P_o et P_f sont les poids initial et final, en mg.

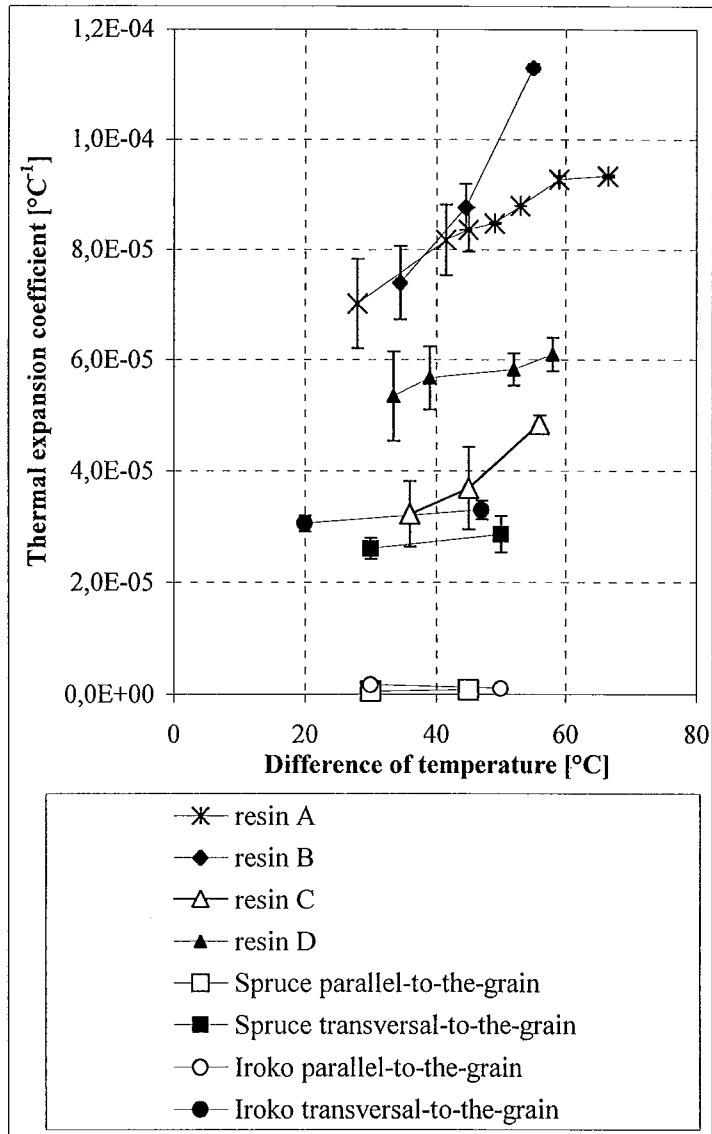


Figure 80 - Coefficients d'expansion thermique (CET) en fonction de la différence de température. Moyennes et déviations standard.

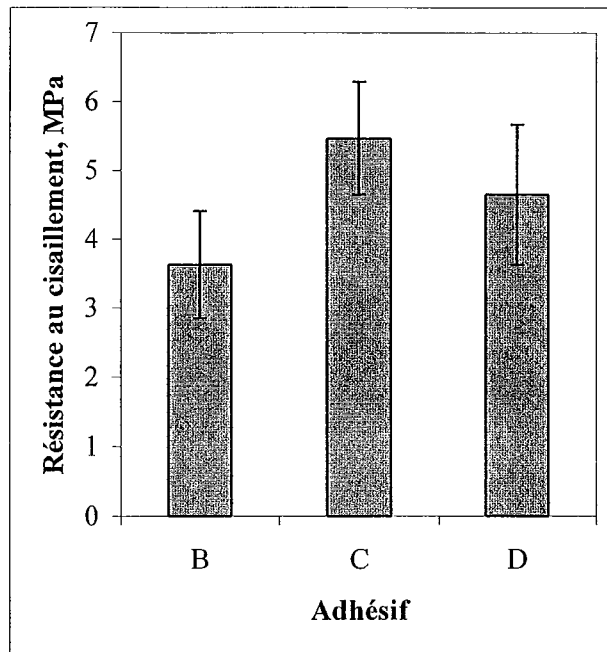


Figure 81 – Résistance au cisaillement en compression sur éprouvettes humides.

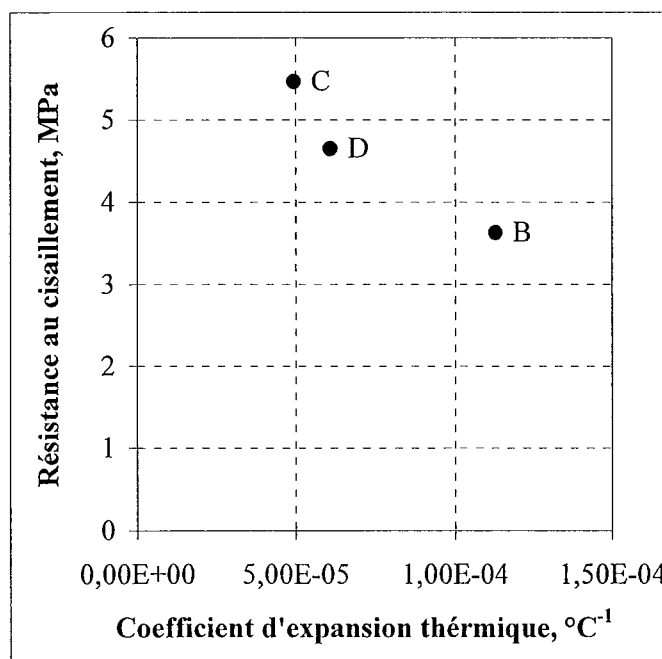


Figure 82 – Rapport entre les CET et la résistance au cisaillement à l'état humide (adhésifs B, C, D). Le CET est mesuré entre 0°C et 55°C, ce qui est très proche de la température de séchage pendant le vieillissement accéléré (60°C).

L'adhésif D a un CET considérablement inférieur à ceux des adhésifs A et B, mais encore très différent de ceux du bois. La différence majeure entre les résines époxy et le bois repose sur le comportement de l'expansion thermique par rapport à la température: toutes les résines examinées montrent l'augmentation de leur CET

avec des températures croissantes, alors que l'influence de la température sur le CET du bois est assez faible pour les deux essences et les deux directions. Comme des adhésifs type A et B augmentent leurs dimensions plus facilement que le bois dans chacune des directions, lorsque la température s'élève dans un joint (par exemple dans les fentes remplies d'époxy déjà dans l'état transitoire), des contraintes sont développées à l'interface et peuvent même augmenter quand le bois commence à se rétracter. Les variations continues de telles contraintes peuvent mener à une durabilité réduite de l'interface entre bois et adhésif.

Par conséquent, les variations de température peuvent avoir un effet sur la durabilité de l'interface entre bois et produits type A et B, mais avoir un effet modéré sur la durabilité du produit D et un effet quasi négligeable sur des produits type C.

C) Durabilité des joints

Pour vérifier ces hypothèses, un vieillissement accéléré suivi de l'essai de cisaillement a été mené sur des joints collés avec les produits B, C et D. Les joints ont été testés en compression à l'état humide, comme déjà vu aux paragraphes précédents. Les résultats, illustrés dans la figure 81, confirment l'hypothèse que le produit C a une plus haute durabilité (haute valeur de résistance au cisaillement), alors que les résultats du produit B sont les plus faibles. En fait, le produit C est un adhésif expérimental, spécifiquement formulé au cours de cette recherche pour optimiser la compatibilité mécanique avec le bois. En outre, un rapport intéressant semble exister entre le CET et la résistance au cisaillement (Figure 82), mais des données supplémentaires sont nécessaires pour vérifier cette observation.

Conclusions

Les aspects thermiques de la compatibilité à l'interface entre bois et adhésifs époxy ont été analysés à travers la comparaison du CET de quatre produits époxy et deux espèces de bois. La méthode proposée pour mesurer le CET de bois dans des conditions iso-hygriques, très proches de celles du bois in-situ dans les structures, est facile et rapide à mener et fournit des résultats fiables et reproductibles si quelques précautions sont prises:

- a) éviter tout mouvement accidentel de l'éprouvette, principalement pendant la phase de mise à zéro;
- b) prendre les mesures au maximum de la courbe et pas à l'état stationnaire, pour minimiser la perte d'humidité des éprouvettes.

En comparant les valeurs du bois et des résines époxy, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- 1) les CET dans la direction parallèle-au-fil des deux essences considérées (Sapin et Iroko) et celui des adhésifs sont très différents, alors que les valeurs pour la direction transversale restent du même ordre de grandeur;
- 2) les quatre adhésifs époxy examinés sont significativement différents quant aux valeurs absolues de CET;
- 3) un adhésif époxy expérimental, avec des CET très semblables à ceux du bois dans la direction transversal au fil, paraît être plus durable, alors que les autres produits avec de plus grandes différences quant au CET ont une compatibilité mécanique proportionnellement décroissante (durabilité inférieure du joint);
- 4) le CET est un paramètre utile pour mieux comprendre et évaluer la compatibilité de l'interface entre bois et résines époxy. Dans cette perspective, la modélisation d'un joint collé bois-époxy pour prédire sa durabilité peut bénéficier de la prise en considération des effets thermiques comme variable.

Les résultats indiquent aussi qu'un rapport existe entre le CET et la résistance au cisaillement après le vieillissement accéléré, bien que cet aspect exige une étude complémentaire.

Bibliographie citée

- Avent R. R. 1992. Structural design for epoxy repair of timber. *Wood design Focus* 3, 16-19
- Bengtsson C., M. Kemmsies and C.J. Johansson. 2000. Production control methods for glued-in rods for timber structures. World Conference on Timber Engineering. Whistler Resort, British Columbia, Canada
- Fusako A. 1973. Studies on the Thermal Properties of Wood and Woody Materials. IV. Thermal Expansion for Wood. *Jap. Holzforschung*, 19 (2), 60-74
- Hendershot O.P. 1924. Thermal expansion of wood. *Science*, 60 (1559), 456-457
- Hedlin C.P. 1969. Relative humidities for Douglas-fir wood between 10-70°F. *Wood Science*, 2 (2), 125-128
- Kubler H. 1959. Längenänderungen bei der Wärmebehandlung frischen Holzes. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 17 (3), 77-86
- Kubler H., L. Liang and L.S. Chang. 1973. Thermal expansion of moist wood. *Wood and Fiber*, vol. 5, 257-267
- Lavisci P., S. Berti, B. Pizzo, P. Triboulot and R. Zanuttini. 2001a. A shear test for structural adhesives used in the consolidation of old timber. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 59 (1/2), 145-152
- Lavisci P., S. Berti, B. Pizzo, P. Triboulot and R. Zanuttini. 2001b. A delamination test for structural wood adhesives used in thick joints. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 59 (1/2), 153-154
- Mettem C.J., A.V. Page and G. Davis. 1995. Long-term performance of resin bonded systems for structural timbers. Case studies of repairs in service. Report PIF 108/4 TRADA CETHnology Ltd
- Pizzo B. 1999. Compatibilità, durabilità e reversibilità nel restauro delle strutture lignee: diagnosi del degrado, CETniche e materiali per il consolidamento. PhD thesis, University of Palermo, pp. 96-104
- Popper R. and G. Eberle. 1992. The influence of the heating rate on the thermal expansion of wood in the temperature range between 100°C and 120°C, *Drevarsky Vyskum*, 134, 27-37
- Radovic B. and H. Goth. 1992. Entwicklung und stand eines verfahren zur Sanierung von Fugen im Brettschichtholz. *Bauen mit holz*, 9/92, 732-742
- Salmén L. 1990. Thermal Expansion of Water-saturated Wood. *Holzforschung*, 44 (1), 17-19
- Schirp M. and H. Kubler. 1968. Untersuchungen über die kältebedingten Längenänderungen kleiner Holzproben. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 26 (9), 335-341
- Stevens W.C. 1960. The thermal expansion of wood. *Wood*, 25 (8), 328-329
- Stumes P. 1975. Testing the efficiency of wood epoxy reinforcement systems. *APT Bulletin*, Vol. VII, n. 3, 2-35
- UNI, 1967. UNI 6061 - Prove sulle materie plastiche. Determinazione del coefficiente di dilatazione termica lineare. UNI, Milano
- Villari E. 1868. Experimental-Untersuchungen über einige Eigenschaften des mit seinen Fasern parallel oder transversal durchschnittenen Holzes. *Ann. Phys. Chem.*, 133 (3), 400-429

3.2.6 Propagation de la fissure à l'interface bois-colle

L'étude de la résistance au cisaillement, à la délamination et à l'extraction des tiges nous a donné une bonne vision du comportement mécanique des colles à base de résine époxy employées en joint épais. Il est évident qu'une colle plus plastique, donc capable de mieux dissiper l'énergie, doit être capable de rendre le joint deux fois plus résistant pour ce qui concerne l'extraction de la tige collée, c'est sans doute remarquable et cela demande un approfondissement. Comme dans le cas de l'éprouvette à double entaille, l'étude de la propagation de la fissure peut être très utile pour analyser le comportement de l'interface bois-colle avec plus de pertinence par rapport à l'essais de cisaillement en conditions quasi-statiques.

3.2.6.1 Bibliographie spécifique

Le test de propagation de la fissure en mode I (ouverture) est une approche très sensible aux propriétés du joint collé (Duchanois, 1984). Il a été employé pour l'analyse de différentes études relatives à l'interface bois-colle: les effets de la pente du fil ont été analysés en détail (Ebewele et al., 1979 ; Mijovic et Koutsky, 1979), ainsi que les problèmes introduits par la rugosité des surfaces collées et le vieillissement de ces surfaces (Ebewele et al, 1980), les différences dans la formulation des résines et dans leur temps de réticulation (Ebewele et al, 1979 ; 1982 ; 1986a) et enfin la modalité de préparation de la surface du bois (Ebewele et al, 1986b). L'éprouvette utilisé dans ces études était toujours à profil variable (*contoured double cantilever beam*), ce qui comportait des difficultés de préparation et de calibrage des éprouvettes. Grâce à l'utilisation de l'éprouvette mixte, avec une partie en bois à section rectangulaire constante collée entre deux profils à section variable en aluminium (River et al., 1989 ; Scott et al., 1992) ou en matériaux composites à base de bois (River et Okkonen, 1993 ; Davalos et al, 1997), la préparation des éprouvettes devint plus simple, mais elle demande toujours le calibrage du rapport dC/da (le changement de la complaisance, C , avec le changement de la longueur de la fente, a) pour chaque couple de profils de support, et un contrôle très strict de la masse volumique des éprouvettes en bois collées.

Récemment, une importante simplification de la méthode d'essais et d'évaluation des résultats (Gagliano et Frazier, 2001) a permis de réaliser ce test plus rapidement, sur une éprouvette à section constante (Figure 83) mais surtout avec une mesure directe de la complaisance sur plusieurs points de chaque éprouvette. La méthode développée est basée sur la norme ASTM D 3433-93 et sur l'introduction d'un facteur de correction du faible module de cisaillement comme proposé par Hashemi et al. (1990) et Blackman et al. (1991) :

$$G_I = \frac{P_c^2 (a + x)^2}{B(EI)_{eff}}$$

Où G_I est l'énergie de rupture en mode I, P_c est la charge critique d'initiation ou d'arrêt de la fissure, B est la largeur de l'éprouvette, a est la longueur de la fissure, EI_{eff} est la rigidité en flexion effective de l'éprouvette et x est le facteur de correction

pour le cisaillement (ou *décalage* dans la longueur de la fente). Ces deux derniers paramètres sont calculés directement à partir des résultats expérimentaux, comme suit :

$$(EI)_{eff} = \frac{2}{3m^3} ; \quad x = \frac{b}{m}$$

où m et b sont, respectivement, la pente et l'intersection sur y de la droite de régression linéaire du cube de la complaisance par rapport à la longueur de la fissure (exemple dans la figure 84).

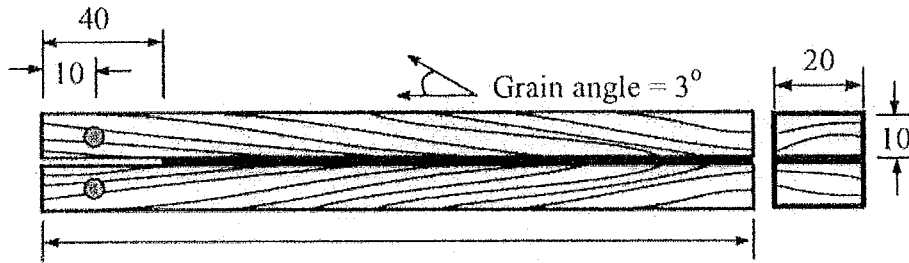


Figure 83 – Epreuve à section constante (Gagliano et Frazier, 2001).

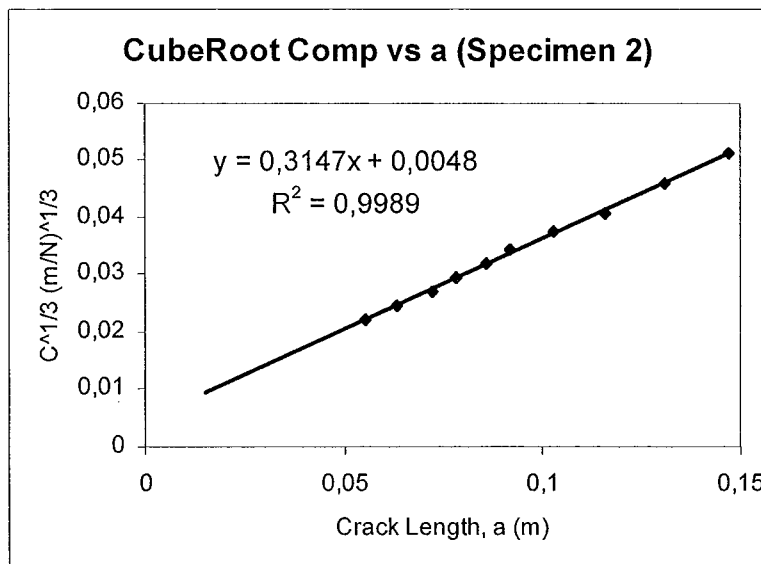


Figure 84 – Exemple de calcul direct des paramètres.

Cette méthode d'analyse a été utilisée aussi pour un système collé époxy-acier (Rakestraw et al, 1995) et appliquée par Gagliano et Frazier (2001) à plusieurs problèmes de caractérisation de l'interfaces bois-colle. Les auteurs précisent que cette méthode présente toujours des inconvénients :

- la mesure de la longueur de fissure qui doit être effectuée pendant l'essai (mais cela peut être résolu grâce à un système automatique vidéo) ;
- la probabilité qu'avec une symétrie non parfaite par rapport au joint de colle (variation d'épaisseur des deux pièces de bois) un mode mixte de rupture I et

Il soit introduit dans l'essais. Les effets sont cependant considérés comme négligeables sur les valeurs mesurées;

- l'hypothèse d'une élasticité linéaire parfaite du système n'est jamais vérifiée dans l'absolu. Dans leurs expériences, Gagliano et Frazier (2001) montraient un peu d'hystérésis dans les courbes de charge/décharge et un léger décalage de la position de la traverse (un total de 0,5 mm sur chaque échantillons = 10 cycles). Les auteurs concluent que ces inconvénients sont négligeables et l'application d'un modèle non-élastique pour l'analyse des données ne donnerait donc pas de résultats plus significatifs.

Après avoir proposé un autre système d'analyse des résultats, basé sur la lecture directe de la complaisance, Gagliano et Frazier (2001) montrent que la méthode de correction de la complaisance en cisaillement donne un calcul plus fiable de l'énergie de rupture (Figure 85).

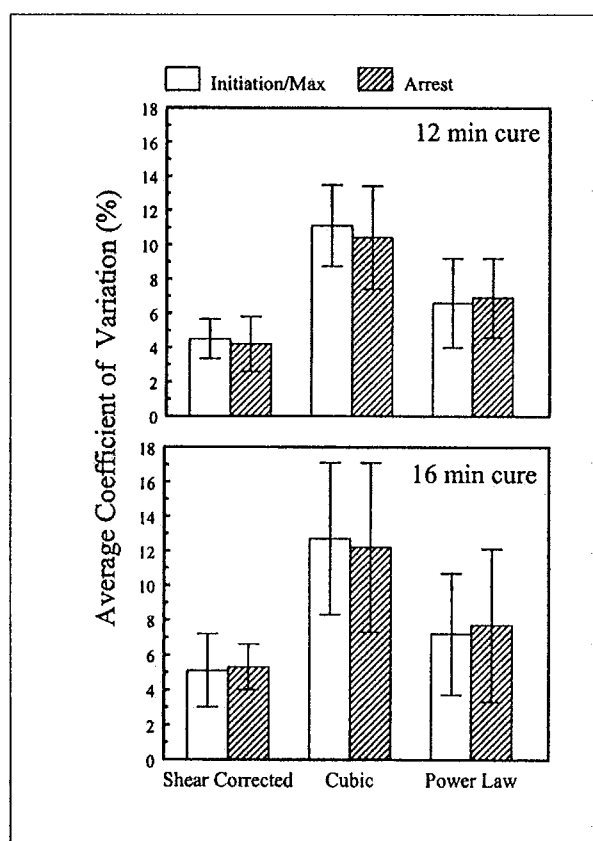


Figure 85 – Comparaison des méthodes de correction de la complaisance.

3.2.6.2 Eprouvette de propagation de la fissure à l'interface

Pour l'application à notre cas d'étude de la méthode de Gagliano et Frazier (2001), le problème principal porte sur le contrôle de l'épaisseur de la colle et sa symétrie par rapport au plan central de l'échantillon. Une discussion avec les auteurs lors du Congrès "Wood Adhesives 2000" nous a permis de vérifier que notre méthodologie de préparation des barres collés (voir essais de cisaillement ou de délamination) était suffisante pour garantir la précision nécessaire.

Des éprouvettes ont donc été réalisées avec du bois d'Epicéa (*Picea abies* L.) et 4 colles avec une plasticités très différentes et une bonne résistance au cisaillement. Ces éprouvettes ont été transmises pour essais à Gagliano (Wood-Based Composites Center, Virginia Polytechnic Institute and State University).

Le tableau suivant résume les caractéristiques des colles testées :

Colle	A	B	C	D
Résistance au cisaillement à sec (Mpa)	9,0	10,8	10,1	10,0
Résistance au cisaillement à l'état humide (Mpa)	5,6	5,5	4,6	3,6
Module d'élasticité en traction (Mpa)	3000	5000	1800	1600

Tableau 20.

3.2.6.3 Résultats

La figure suivante résume les valeurs de l'énergie maximale (G_{max}) et d'arrêt (G_{arr}) de la rupture du joint collé, pour les 4 colles. Les barres verticales indiquent l'écart-type.

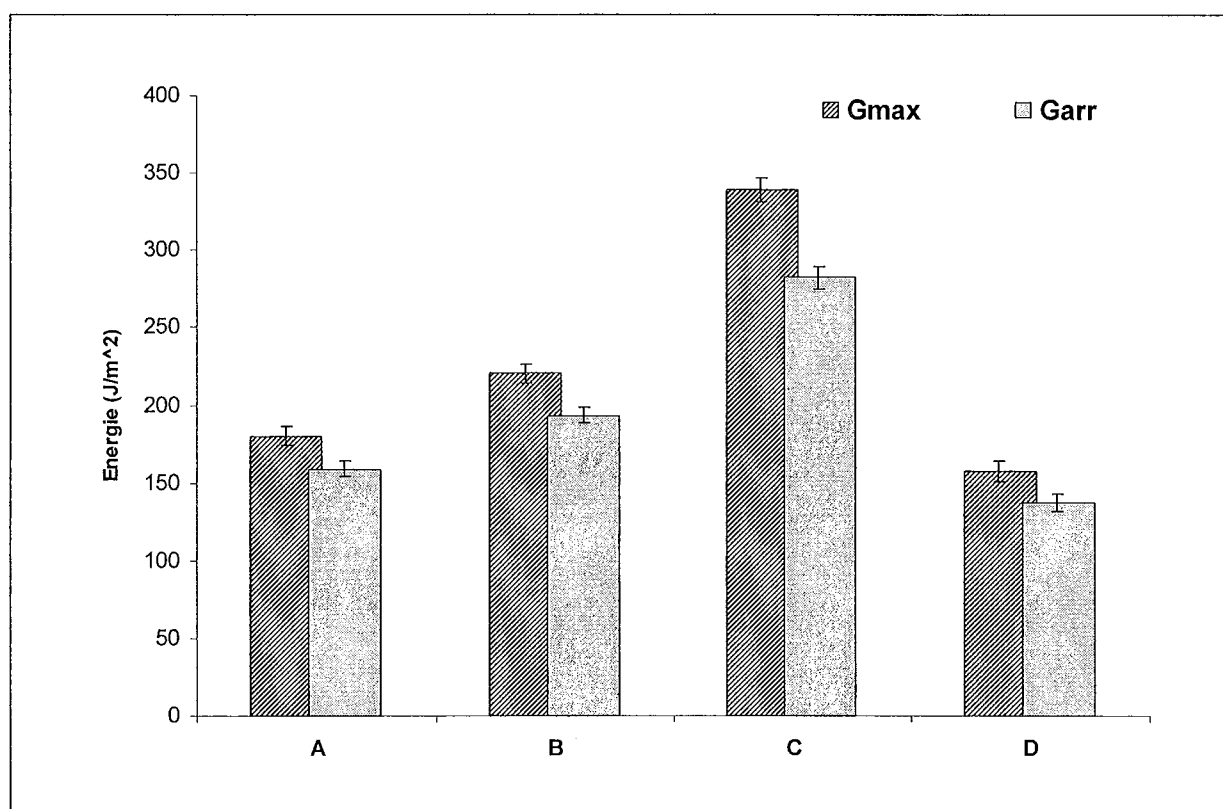


Figure 86 – Valeurs de l'énergie maximale (G_{max}) et d'arrêt (G_{arr}) de la fracture des joints collés, pour 4 colles (5 éprouvettes pour échantillon). Les barres indiquent l'écart-type.

Une différence très importante est remarquable pour le produit C, qui s'explique principalement par la différence de mode de propagation de la fissure :

- à l'interface pour les colles A, B et D (c'est la modalité typique pour ces tests) ;
- cohésive dans la colle pour la colle C.

- Ebewele R et al, 1986a – Relationship between phenolic adhesive chemistry and joint performance; effect of filler type on fraction energy. J. Appl. Polym. Sci.
- Ebewele R et al, 1986b – Wood processing variables and adhesive joint performance. J. Appl. Polym. Sci. 32 :2979-2988
- Hashemi S et al, 1990 – The analysis of interlaminar fracture in uniaxial fibre-polymer composites. Proc. R. Soc. Lond. A(427) :173-199
- Mijovic JS et JA Koutsky, 1979 – Effect of wood grain angle on fracture properties and fracture morphology of wood-epoxy joints. Wood Science 11(3):164-168
- Rakestraw MD et al, 1995 – Time dependent crack growth and loading rate effects on interfacial and cohesive fracture of adhesive joints. J. Adhesion (55):123-149
- River BH et al, 1989 – Adhesive joint fracture behaviour during setting and ageing. For. Prod. J. 39(11/12):23-28
- River BH et EA Okkonen, 1993 – Contoured wood double cantilever beam specimen for adhesive joint fracture tests. J. Testing and Evaluation (21):1, 21-28
- Scott CT et al, 1992. Fracture testing wood adhesives with composite cantilever beams. J. Testing and Evaluation (20):4, 259-264

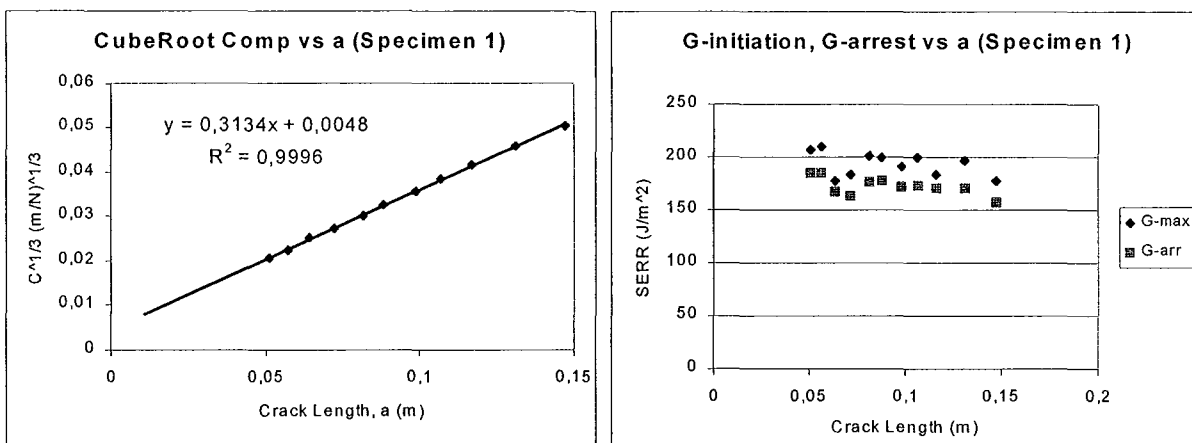


Figure 87 et 88 – Résultats d'essai pour l'éprouvette 1, colle B (fragile).

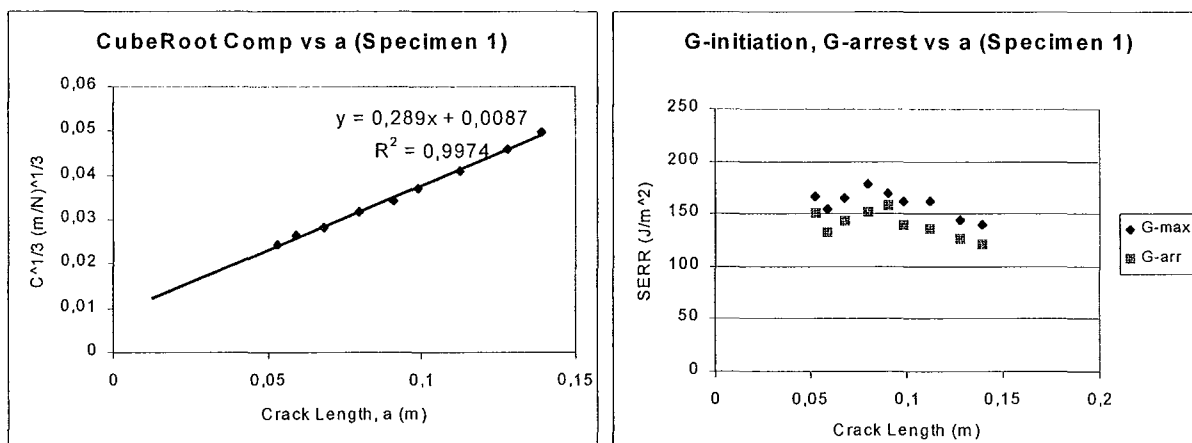


Figure 89 et 90 – Résultats d'essai pour l'éprouvette 1, colle D (ductile).

3.2.7 Fluage des colles

3.2.7.1 Bibliographie spécifique

Le CEN/TC193/SC1/WG4 travaille sur l'établissement de méthodes de test et sur les exigences de performance pour les "nouvelles colles structurales", sachant qu'il s'agit clairement des colles polyuréthanes monocomposant pour structures lamellés-collés à réaliser en conditions d'usine (température contrôlée).

Ce groupe a comparé les différentes méthodes d'évaluation du fluage, c'est à dire le comportement des joints collés soumis à des charges de longue durée. L'analyse a été réduite aux 4 cas suivants, sur lesquels il existait déjà quelques expériences:

Essai	Norme	Description
"Greenhouse" test	méthode FMPA	Résistance résiduelle en traction perpendiculaire au fil du bois, après vieillissement avec charge fixe de 1 N/mm ² en climat très humide ("greenhouse")
Fluage jusqu'à la rupture	ASTM D 3535 modifiée	Test oui/non (<i>pass/fail</i>) avec charge fixe de 3 N/mm ² et variations de température et d'humidité
Temps à la rupture (Fluage)	ASTM D 4680 modifiée	détermination quantitative du facteur de Fluage, avec variation des charges à température et humidité constante
Poutre chargée à long terme	méthode FMPA	Fluage avec charge fixe de 1,2 N/mm ² , exposition extérieur abrité

Tableau 22.

Les typologies de test les plus intéressantes pour notre activité reposent sur les deux tests ASTM, parce qu'elles correspondent à des méthodes de laboratoire, aptes à la comparaison des produits et parce qu'elles ne devraient pas être trop influencées par les caractéristiques du bois utilisé pour préparer les éprouvettes.

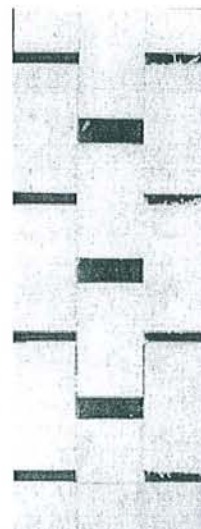
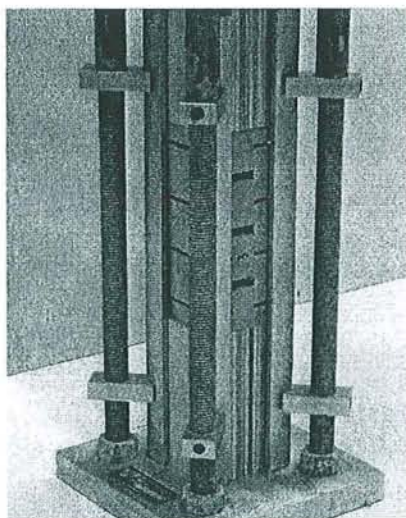
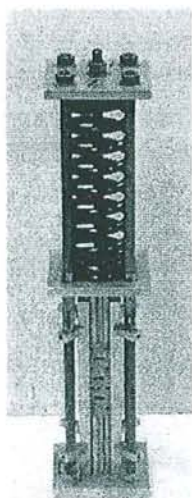


Figure 91 - ASTM D 3535: appareillage et éprouvette.

Figure 92 - ASTM D 4680-92: éprouvette.

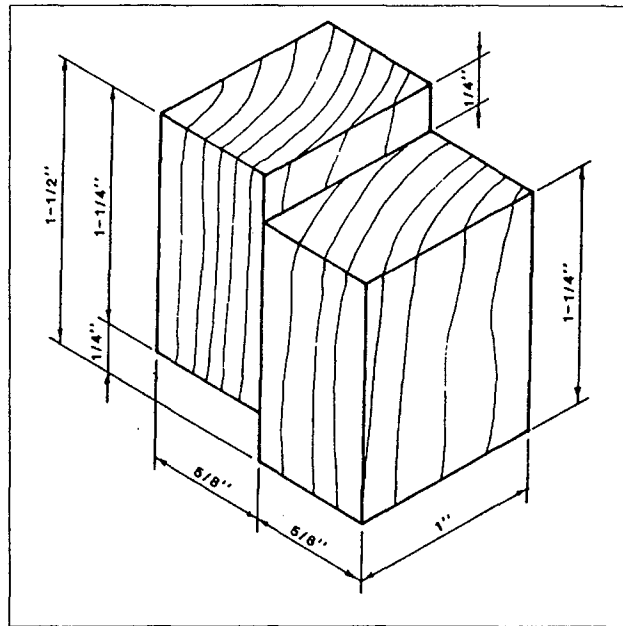
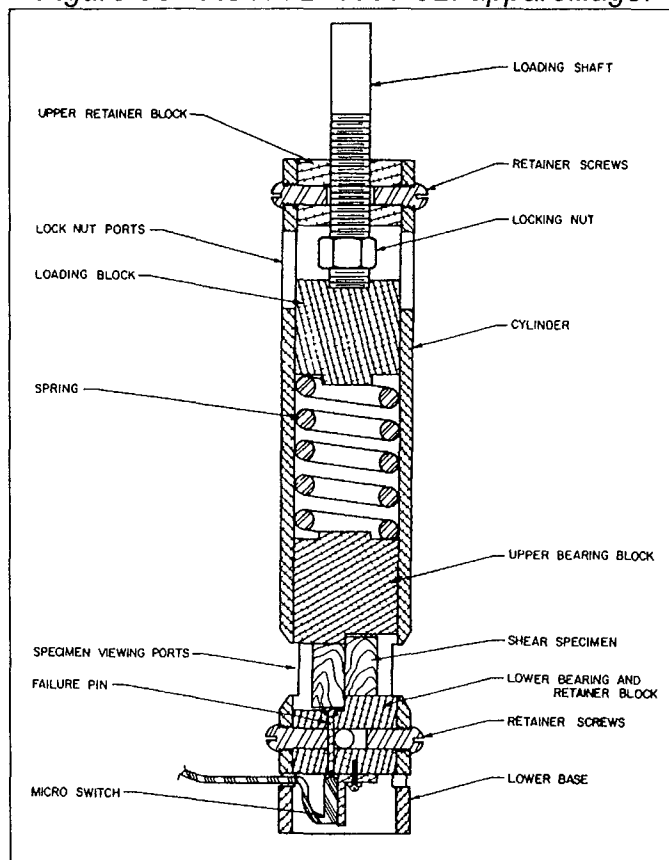


Figure 93 - ASTM D 4680-92: appareillage.



Les résultats comparant ces méthodes sont les suivants:

ASTM D 3535: l'essai est simple et donne un résultat clair et net (oui/non) mais pas (ou très peu) de nuances pour une comparaison fine. Il faut 2 mois pour compléter un test. Le cycle de vieillissement est bien établi.

ASTM D 4680: la relaxation du ressort pose probablement un problème. Le coût initial de l'appareillage est élevé. Le test demande 2-4 mois, avec au moins 20 essais pour chaque colle et chaque condition climatique. L'information donnée est complète et fiable (Figure 94).

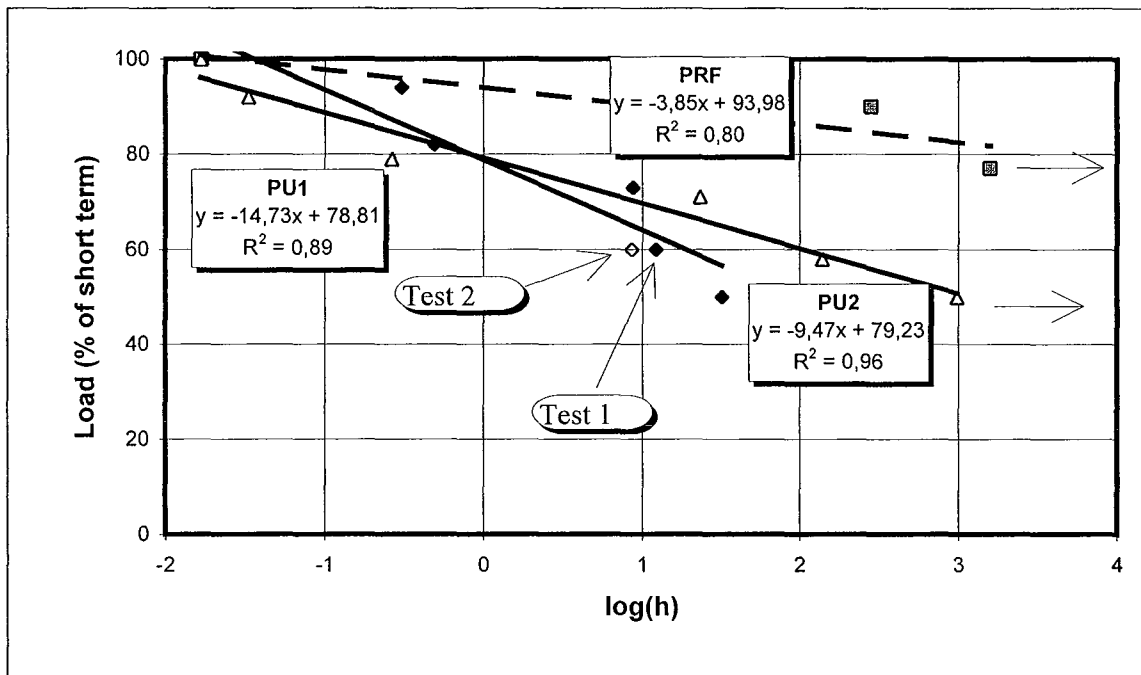


Figure 94 - ASTM D 4680: temps pour la rupture en fonction du taux de chargement (% de la résistance à court terme) pour un adhésif traditionnel (PRF) et deux adhésifs de nouveau type (PU 1 et PU2).

“Greenhouse test method”: la méthode est simple et l'équipement peu cher. Cependant, les conditions de vieillissement accéléré doivent être standardisées et l'emploi des résultats doit être finalisé, à travers une éventuelle corrélation avec des paramètres utilisables dans les codes de calculs.

Loaded-beam test method: méthode simple et efficace, mais très chère, longue et peu reproductible. Forte influence des caractéristiques du bois.

En conclusion, une série de test croisés entre laboratoires (*round robin test*) a été proposé. Le problème de l'influence de l'épaisseur du joint de colle a été considéré comme secondaire dans ce cas où le joint est réalisé avec une pression de serrage et une épaisseur maximum de l'ordre de 0,5 mm. Comme la figure 94 le montre, certains adhésifs polyuréthanes (développés pour une performance optimale en terme de vitesse de prise à température ambiante, capacité de *gap-filling* et résistance à la propagation de la fissure) sont beaucoup plus sensibles au fluage par rapport aux PRF traditionnelles. Dans ce cas, la caractérisation complète de leurs performances à long terme est indispensable. Mais d'autres produits, par leur nature chimique, sont normalement connus pour être moins sensibles au fluage que le bois massif. Les colles à base de résines époxy ont généralement un tel comportement.

L'emploi d'un test « oui/non » comme celui de la norme ASTM D 3535 avec un seuil de performance peut être utile pour une première sélection des adhésifs qui nécessitent alors un approfondissement. De la même manière, le test très simple appliqué depuis longtemps en Europe sur les colles vinyliques peut probablement permettre une évaluation rapide.

3.2.7.2 Epreuve de fluage

Nous avons testé l'emploi du test de fluage en cisaillement par flexion avec charge constante (Figure 91) sur les différentes colles du programme d'essai.

Les éprouvettes étaient préparées à partir de barres de la même manière que celles des essais de cisaillement par compression (par. 3.2.2).

Les dimensions des éprouvettes sont: 150 mm x 20 mm x 15 mm, avec une distance entre les entailles de 20 mm.

A partir des essais préalables nous avons déterminé que la charge de 30 kg, normalement appliquée pour les colles vinyliques de type D4 selon EN 204 (pour collage d'éléments tels que les parquet composites, portes et fenêtres), était également correcte pour une épaisseur du joint de colle de 3 mm. Cela se traduit par une contrainte de cisaillement de 1,125 MPa sur le joint de colle dans la direction orthogonale au fil du bois, et une contrainte maximale d'environ 5 MPa dans la direction parallèle à celle du fil du bois.

La méthode prévoit une exposition de 21 jours en chambre climatisée à 23°C et 50% HR. Nous avons également exposé quelques produits pour des périodes plus longues (4-5 semaines).

Figure 95 - Géométrie de l'éprouvette de Fluage des colles.

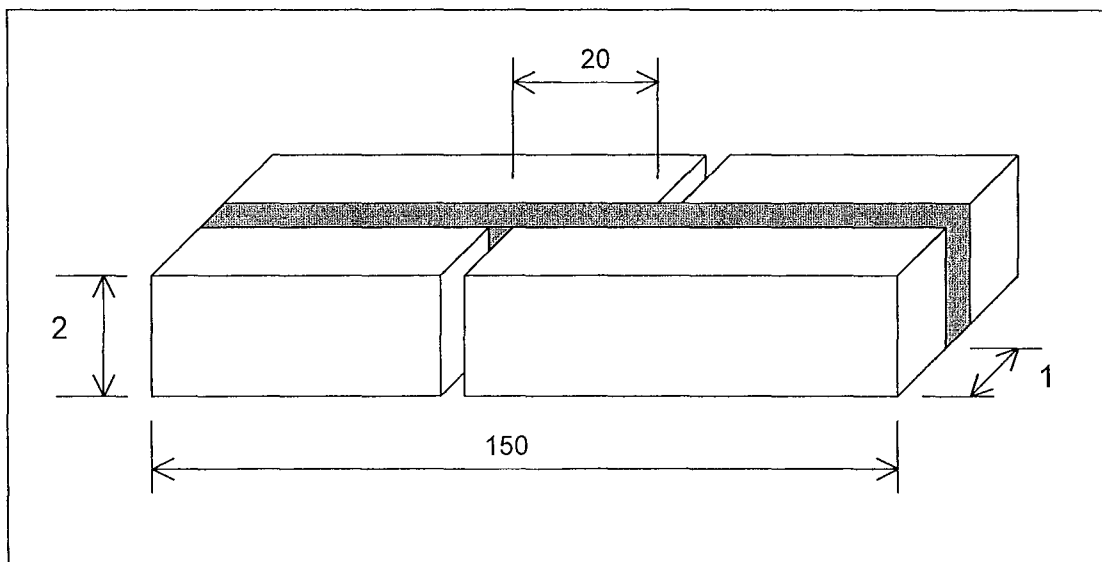
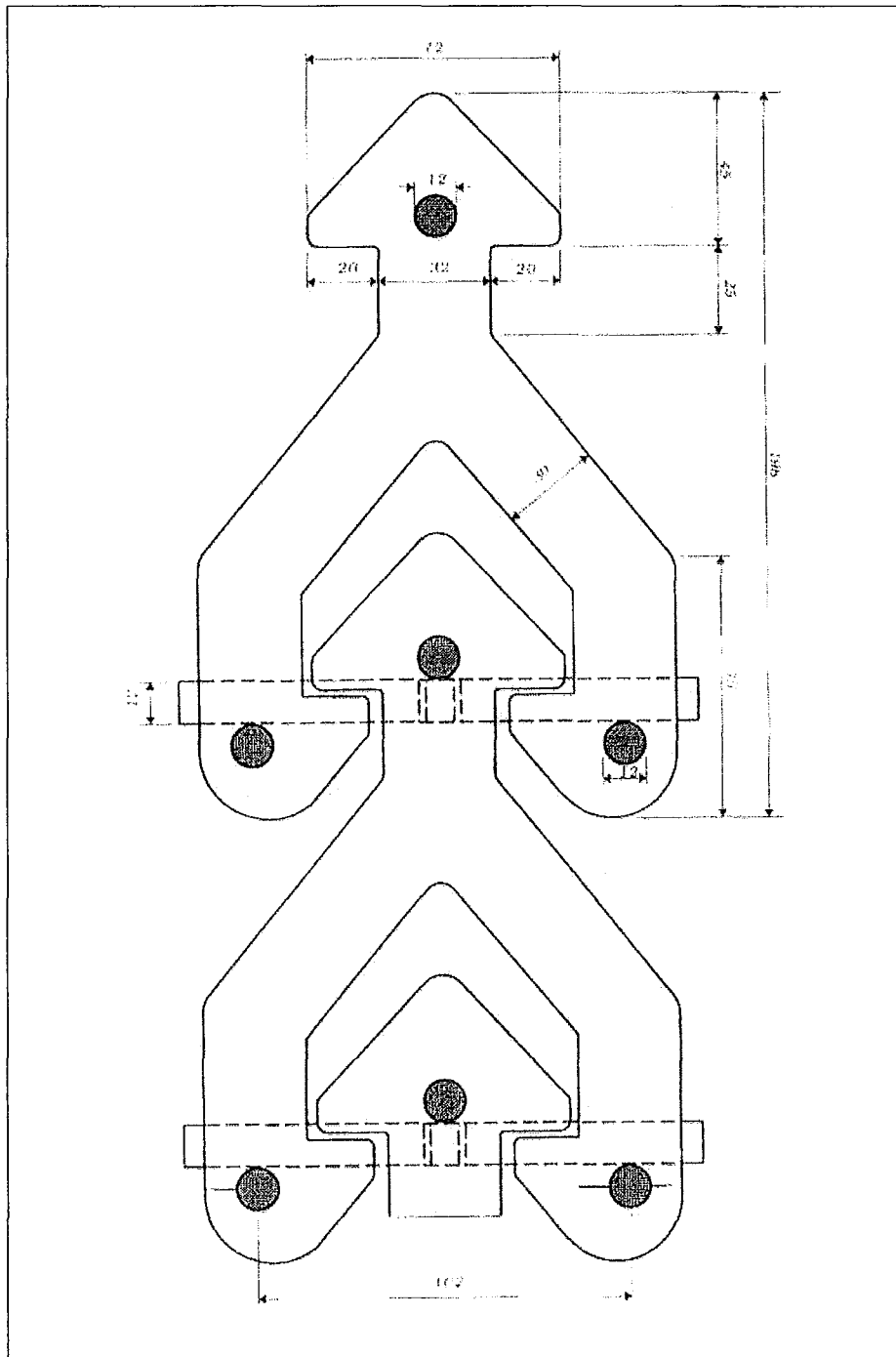


Figure 96 - L'éprouvette de fluage et sa mise en charge.



3.2.7.3 Résultats

La méthode permet de différencier de façon simple et rapide les différentes colles qui ont un écoulement important (fluage > 3 mm après 21 jours, mais déjà à plus de 3 mm après 1 semaine) et les produits qui ne sont pas sensibles au fluage.

Les essais ont été menés sur deux produits très différents en termes de viscosité et de composition. En effet le produit A est un produit à viscosité élevée, thixotropique, de composition entièrement époxydique, alors que le produit B est un époxy-uréthane formulé en rapport 1 à 1 (50% époxydique, 50% polyuréthane).

Dans les deux cas les produits ont réticulé pendant 15 jours à température ambiante. Sur des éprouvettes du même lot les valeurs des charges de rupture ont été mesurées par flexion (3 points), avec une vitesse d'application de la charge de 1 mm/min. Les valeurs de rupture obtenues sont les suivantes:

	Contrainte de cisaillement parallèle au fil, MPa	Contrainte de cisaillement perpendiculaire au fil, MPa
produit A	12,2	2,32
produit B	13,3	2,66

Tableau 23 – Performances des colles en flexion 3 points.

La charge appliquée pendant l'essai de fluage est donc proche de 50% de la charge de rupture. Les résultats des déplacements moyens pour 5 éprouvettes sont reportés dans le tableau suivant:

jours	produit A, mm	produit B, mm
7	0	5
14	0	6
21	1	6
28	1	7
60	1	7

Tableau 24 – Fluage des colles.

Comme on peut le remarquer le produit A, époxydique à 100%, montre une valeur de fluage négligeable après les 3 semaines d'essai, et après un temps triplé cette valeur reste inchangée. Par contre, le produit B, constitué par un produit époxy-polyuréthane en rapport 50/50, montre une valeur de fluage appréciable dès 7 jours, et la valeur tend à augmenter avec le temps.

Radovic et Goth (1992) avaient utilisé une méthode similaire sur une colle époxy spécifiquement développée pour la restauration des poutres lamellés-collés courbes, et l'avaient trouvé insensible au fluage.

Bibliographie citée

Radovic et Goth. 1992. Entwicklung und Stand eines Verfahrens zur Sanierung von Fugen im Brettschichtholz. Bauen mit Holz, 9/92.

4. EXPLOITATION DES RESULTATS

Nous avons pu voir que pour les assemblages de bois de charpente par tiges filetées collées, considérés dans ce travail comme représentatifs de la technique de restauration utilisant des colles structurales, les modèles de prédiction de la résistance à la traction disponibles en littérature ne prennent en compte que très partiellement les caractéristiques des adhésifs.

De plus, la normalisation courante interdit l'emploi des colles structurales de nouveau type en extérieur, pour des joints bois-colle-acier.

Les progrès montrés par les nouvelles formulations de colles en termes de résistance au cisaillement, à la délamination, de perméabilité à la vapeur, de stabilité dimensionnelle thermique et de dissipation de l'énergie de rupture ne peuvent être utilisés dans les applications sans une évolution des normes et des règles de calcul. Cette évolution se met heureusement en place, par exemple au sein du CEN/TC193/SC1.

Nous avons proposé deux options pour prendre en compte ce type de comportement et d'avancée technique dans les normes et les règles de calcul actuellement utilisées.

4.1 COEFFICIENTS DE COMPATIBILITÉ A L'INTERFACE BOIS-COLLE

Rappelons que l'Eurocode 5 recommande l'emploi des adhésifs de Type I selon EN 301 (donc des produits phénoliques et aminoplastes traditionnels) pour toutes les classes de service, et l'emploi des adhésifs de Type II uniquement pour les classes 1 et 2. Pour ce qui concerne les adhésifs de nature différente (polyuréthanes, époxy...) pour l'assemblage sur chantier, l'Eurocode 5 Partie 2 autorise seulement l'emploi en classe de service 1 et 2.

La comparaison entre les adhésifs structuraux doit être faite sur une propriété mécanique spécifique de la colle utilisée, qui soit facile à mesurer et très représentative des contraintes effectivement appliquées en service. Le paramètre idéal est ainsi représenté par la résistance au cisaillement, évalué d'une façon relative (rapport joint collé / bois massif) soit sur en conditions d'équilibre en atmosphère normale (20°C-65%HR) soit sur le bois saturé. Il est important qu'un adhésif structural puisse donner des garanties minimales, du point de vue mécanique également dans des conditions qui dépassent celles prévues par le projet, un cycle de vieillissement comportant des conditions limites (comme le séchage à 60°C) est donc nécessaire.

L'essai de délamination est aussi intéressant, parce qu'il permet d'évaluer l'adhésion dans des conditions extrêmes pour la colle, donc de renforcer la sécurité pour l'auteur d'un projet.

Les résultats des deux essais, de cisaillement et de délamination, ont été résumés dans un "**coefficient de compatibilité**", qui décrit le comportement à l'interface bois-adhésif, quand elle est soumise à des contraintes très importantes. Le coefficient est défini par rapport au bois massif et il est donc un moyen d'évaluer la durabilité de la colle et du collage dans le temps, en termes directs.

La plupart des essais ont été réalisées avec du bois d'Epicéa (*Picea abies L.*), mais on a également utilisé du Pin, du Châtaigner et du Chêne, qui ont montré un

comportement similaire (avec une seule exception liée au fait que certaines colles ont besoin d'un *primer* pour bien adhérer sur des bois plus denses et moins mouillables).

Pour évaluer les effets des cycles de vieillissement accéléré sur la résistance de l'adhésion des colles au bois (donc de la durabilité de l'interface entre les deux matériaux) nous avons calculé tout simplement le coefficient à partir des résultats des essais de cisaillement et de délamination, de la façon suivante:

$$k_{a,w} = \eta_{dry} \cdot \eta_{wet} \cdot k_d$$

ou:

$k_{a,w}$ est le coefficient de compatibilité mécanique structurale entre colle et bois;

η_{dry} est le *coefficient de comparaison en milieu standard*. Il fait la comparaison des performances mécaniques en cisaillement de la colle et du bois, toutes les deux référées à des éprouvettes conditionnées en milieu sec (dry) dans une salle climatisée (20°C et 65% h.r.);

η_{wet} est le *coefficient de vieillissement*. Il fait la comparaison des performances mécaniques en cisaillement de la colle et du bois, toutes les deux référées à des éprouvettes conditionnées en milieu humide (wet) et soumises aux cycles de vieillissement accéléré;

k_d est le coefficient de délamination de l'adhésif:

$$k_d = 1 - \frac{D_F}{100}$$

ou D_F est la délamination mesurée après la phase F du cycle de vieillissement.

Du point de vue numérique les coefficients η_{dry} et η_{wet} peuvent être définis comme:

$$\eta_{dry} = \frac{\tau_{G,std}}{\tau_{L,std}}$$

$$\eta_{wet} = \frac{\tau_{G,inv}}{\tau_{L,inv}}$$

où:

$\tau_{L,std}$ et $\tau_{G,std}$ représentent les résistances au cisaillement respectivement du bois massif et des éprouvettes collées et conditionnées à 20°C et 65% HR ;

$\tau_{L,inv}$ et $\tau_{G,inv}$ représentent les résistances au cisaillement respectivement du bois massif et des éprouvettes collées après avoir été soumises aux cycles de vieillissement

Le coefficient de délamination est en quelque sorte un « coefficient de sûreté » par rapport à la valeur de performance qui dérive des essais de cisaillement. En effet, la seule valeur mécanique, même considérée après les cycles de vieillissement, ne permet pas d'évaluer la capacité d'un joint collé de résister dans le temps aux

sollicitations de *peeling* et aux sollicitations en direction perpendiculaire au plan de collage, (comme celles dues aux mouvements du bois liés à sa forte anisotropie).

Les figures 97 et 98 rappellent les valeurs obtenues pour une dizaine de colles et le tableau 25 montre les coefficients de compatibilité $k_{a,w}$ qui en dérivent.

Pour certains adhésifs (en particulier A1, F2 et G1) on peut remarquer que la valeur de résistance au cisaillement est très bonne même après les cycles de vieillissement, mais qu'ils se démarquent quand ils sont soumis aux cycles de délamination.

On peut comprendre comment le coefficient de délamination devient complémentaire et il peut bien être considéré comme un coefficient de sûreté, nécessaire pour prévoir un emploi dans les classes de service 2 et 3.

Dans le tableau 25 figurent les valeurs trouvées pour les 13 adhésifs et l'évaluation qu'on peut en faire (aptitude à l'utilisation dans les différentes classes).

Avec le coefficient de compatibilité structurale $k_{a,w}$ il est possible d'effectuer simplement et directement une évaluation du niveau de compatibilité entre adhésif et bois.

Un exemple de classification peut être le suivant:

- pour l'emploi en **classe 3 (extérieur)** la colle doit avoir un comportement similaire à celui du bois massif. Une valeur $k_{a,w} > 0,8$ signifie une compatibilité structurale optimale entre les deux matériaux, dans toutes les conditions d'application;
- pour l'emploi en **classe 2 (extérieur couvert)** la colle doit avoir une bonne résistance mécanique et une résistance suffisante à la délamination. Par exemple, une valeur de $k_{a,w}$ comprise entre 0,6 et 0,8 signifie que l'adhésif, même après le vieillissement, garde un bon pourcentage de la résistance du bois massif et une surface non délaminée suffisante;
- pour l'emploi en **classe 1 (intérieur)** il n'est pas nécessaire d'obtenir une résistance particulière à la délamination à température élevée, au contraire il est préférable de réaliser un essai de délamination à température ambiante. De toutes manières, le bon comportement de l'adhésif par rapport au cycle de vieillissement accéléré et son adhésion au bois humide (coefficient $\eta_{wet} > 0,5$), sont la garantie de sûreté, en cas de problèmes. Il existe des adhésifs qui ont un très bon comportement mécanique en condition sèche (coefficient η_{dry} élevé), grâce à leur grande plasticité qui aide à diffuser les contraintes, mais qui ont une faible résistance même en conditions d'humidité moyenne. Une utilisation limitée aux conditions optimales est donc possible, si le projet et l'application sont bien menés;
- **une valeur inférieure à 0,4** caractérise les adhésifs qui n'ont pas une résistance suffisante au cisaillement ou qui ne donnent pas de garanties sur le bois humide. Ces adhésifs ne sont pas adaptés pour un emploi de type structurel, mais ils peuvent être utilisés de préférence pour les opérations de masticage;

Cette classification est plus sévère que celle proposée par la EN 301 (et par l'Eurocode 5), puisque, même si les concepts fondamentaux sont identiques, elle utilise un essai de délamination plus pénalisant pour l'adhésif et surtout un essai de cisaillement en compression qui, en mettant en oeuvre des surfaces de bois plus grandes, donne des valeurs moyennes plus faibles par rapport à l'essai de traction prévue par la EN 302-1. Elle fonctionne donc dans le sens de la sécurité.

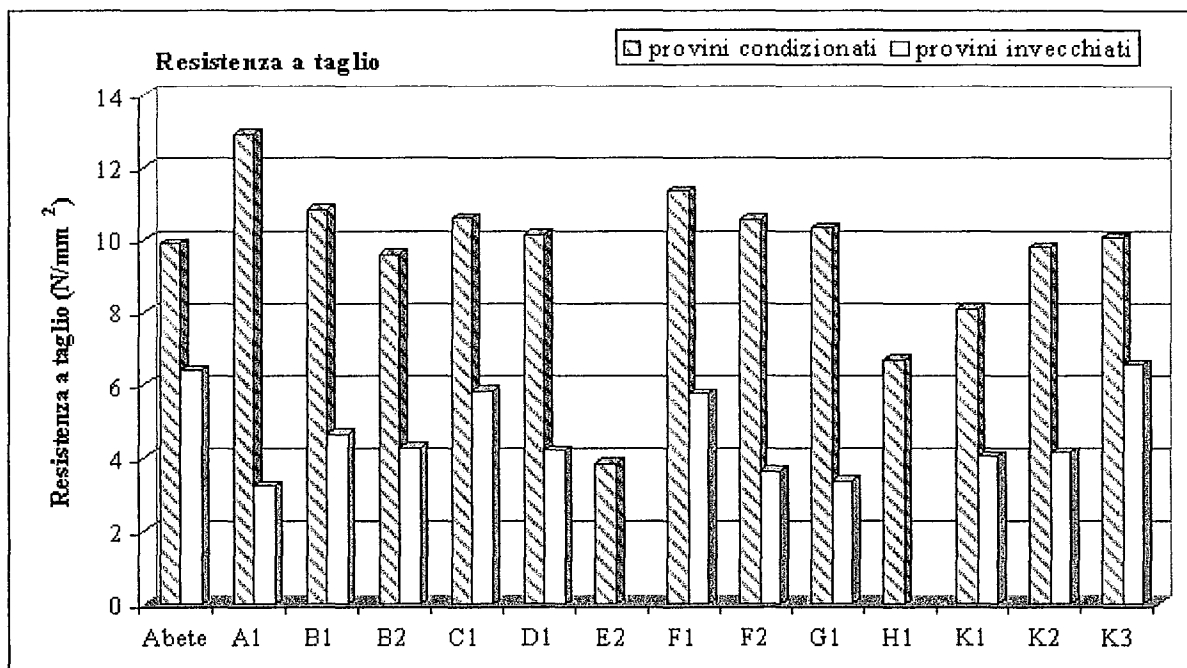


Figure 97 - Résumé des résultats de l'essai de résistance au cisaillement réalisé sur différents produits époxy. Les valeurs obtenues sont comparables avec celles relatives au bois massif d'épicéa. Toutes les éprouvettes collées avec les adhésifs E2 et H1 ont montré une délaminazione après les cycles de vieillissement.

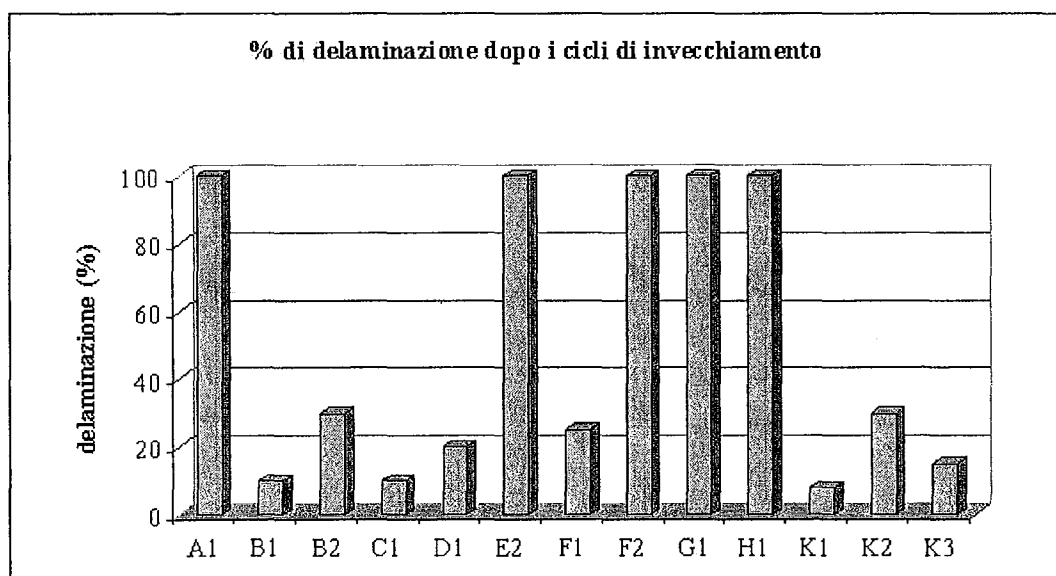


Figure 98 - Risultati de l'essais de délaminazione sur les adhésifs de la figure 97. Les essais n'ont pas été réalisés sur les adhésifs qui avaient déjà montré une délaminazione après les essais de cisaillement sur les éprouvettes humides.

Adhésif	η_{dry}	η_{wet}	k_d	$k_{a,w}$	Possible emploi en Classe de Service (EC5)		
					1	2	3
A1	1,31	0,51	0,00	0,00	NON		
B1	1,10	0,73	0,90	0,72	OUI		NON
B2	0,97	0,67	0,70	0,45	OUI	NON	
C1	1,07	0,91	0,90	0,88	OUI		
D1	1,03	0,66	0,80	0,54	OUI		NON
E2	0,39	0,00	1,00	0,00	NON		
F1	1,15	0,90	0,75	0,77	OUI		NON
F2	1,07	0,57	0,00	0,00	NO		
G1	1,04	0,52	0,00	0,00	NON		
H1	0,68	0,00	1,00	0,00	NON		
K1	0,82	0,63	0,92	0,47	OUI	NON	
K2	0,99	0,65	0,70	0,45	OUI	NON	
K3	1,02	1,03	0,85	0,88	OUI		

Tableau 25 - Valeurs du coefficient de compatibilité pour tous les adhésifs des figures 97 et 98. Proposition d'emploi dans les classes de service prévues par l'Eurocode 5, selon notre jugement.

4.2. CALCUL DES ASSEMBLAGES PAR TIGES COLLEES

Les résultats expérimentaux nous ont montré l'importance des paramètres analysés, principalement de la rhéologie de la colle (fragile ou ductile) et de l'épaisseur du joint, la longueur du joint étant bien évidemment proportionnelle à sa résistance.

Nous allons confronter les valeurs expérimentales obtenues avec les prédictions des différents modèles trouvés dans la littérature, à savoir :

- RIBERHOLT [Riberholt, 1988],

$$R_{ax,k} = f_{wl} \cdot \rho_k \cdot d \cdot l_g \quad \text{pour } l_g \leq 200mm$$

où :

$R_{ax,k}$ = résistance axiale de l'assemblage;

f_{wl} = paramètre de résistance de l'adhésif. Pour les résines époxy la valeur est 0,037;

ρ_k = masse volumique caractéristique, dans ce cas on a utilisé la masse volumique moyenne des nos échantillons;

l_g = longueur du collage;

d = diamètre minimum entre celui de la tige et du perçage;

- EUROCODE 5 [Eurocode 5, 1997],

$$R_{ax,rupture} = \pi \cdot f_{v,k} \cdot d_{equ} \cdot l_c$$

où:

$R_{ax,rupture}$ = résistance axiale de l'assemblage;

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

ρ_k = masse volumique caractéristique du bois, dans ce cas on a utilisé la masse volumique moyenne des nos échantillons;

l_g = longueur du collage;

d_{equ} = valeur minimale du diamètre du perçage et de 1,25 fois le diamètre de la tige;

- TOWNSEND [Townsend, 1990],

$$F = 9,2 \cdot d \cdot l_c \cdot (r_d)^2 \cdot (r_e)^{0,5}$$

où:

F = résistance axiale de l'assemblage;

l_c = longueur du collage;

d = diamètre de la tige;

r_d = ratio entre le diamètre du perçage et le diamètre de la tige ;

r_e = ratio entre la distance au bord et le diamètre de la tige ;

- JOHANSSON [Johansson, 1995],

$$F_u = f_{v,k} \cdot d \cdot \pi \cdot l_c \cdot \frac{(1 + \lambda) \cdot \sinh(\omega)}{\omega \cdot (\lambda + \cosh(\omega))} \quad \text{pour } \lambda \leq 1$$

$$F_u = f_{v,k} \cdot d \cdot \pi \cdot l_c \cdot \frac{(1 + \lambda) \cdot \sinh(\omega)}{\omega \cdot ((\lambda + \cosh(\omega)) \cdot \cosh(\omega) - \sinh^2(\omega))} \quad \text{pour } \lambda > 1$$

$$\text{avec } \lambda = \frac{S_{bois} \cdot E_{bois}}{S_{acier} \cdot E_{acier}} \quad \text{et} \quad \omega = \sqrt{\frac{1 + \lambda}{2}} \cdot \sqrt{\frac{l_c^2 \cdot f_{v,k}^2 \cdot d \cdot \pi}{S_{bois} \cdot E_{bois} \cdot G_f}}$$

où :

$f_{v,k}$ = contrainte de cisaillement du bois

G_f = énergie de rupture du bois

Les figures 99 et 100 montrent, pour l'ensemble des éprouvettes testées et pour les deux types de colle, la comparaison entre les valeurs expérimentales obtenues et les valeurs prédites par les différents modèles.

Comme cette approche n'intègre ni les caractéristiques de la colle ni la géométrie du joint, nous n'avons pas vu d'intérêt à valider les prédictions du modèle de Johansson.

Les modèles retenus montrent une grande dispersion des résultats avec toutefois une meilleure estimation pour la colle fragile.

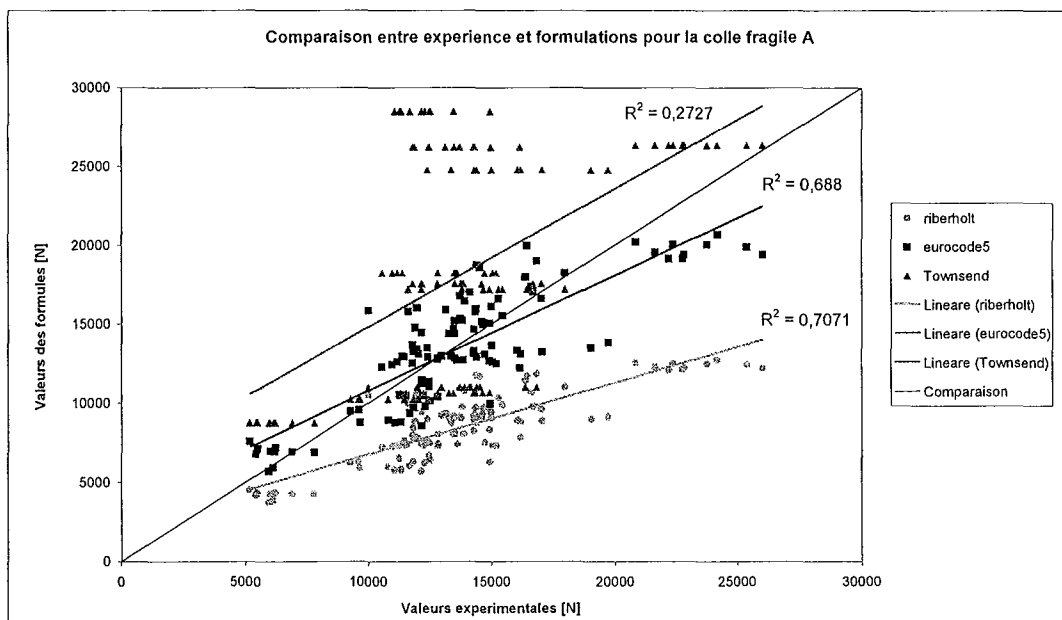


Figure 99.

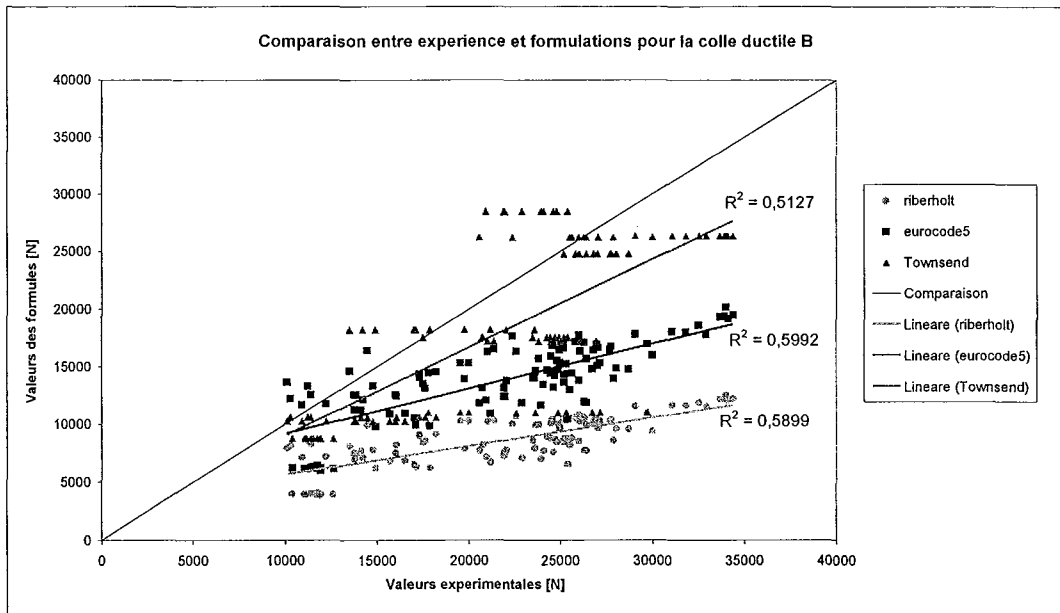


Figure 100.

La formulation de Townsend est intéressante parce-qu'elle présente une relation complète entre tous les paramètres géométriques de ce type d'assemblage ; par contre elle ne considère pas les propriétés mécaniques du bois ni celles de l'adhésif. Le modèle de Riberholt présente dans sa formulation un paramètre caractérisant la colle, mais qui ne différencie pas le caractère fragile du caractère ductile. La valeur qu'il donne pour les colles époxy en général ($f_{wl} = 0,037$) est évidemment beaucoup trop faible par rapport à nos résultats.

La figure 101 montre l'évolution de la force de rupture en fonction du volume de colle pour l'ensemble des essais. On constate que la résistance du joint dépend de la quantité d'adhésif avec une évolution linéaire positive. Si cette influence est faible pour la colle fragile, elle est très significative pour la colle ductile.

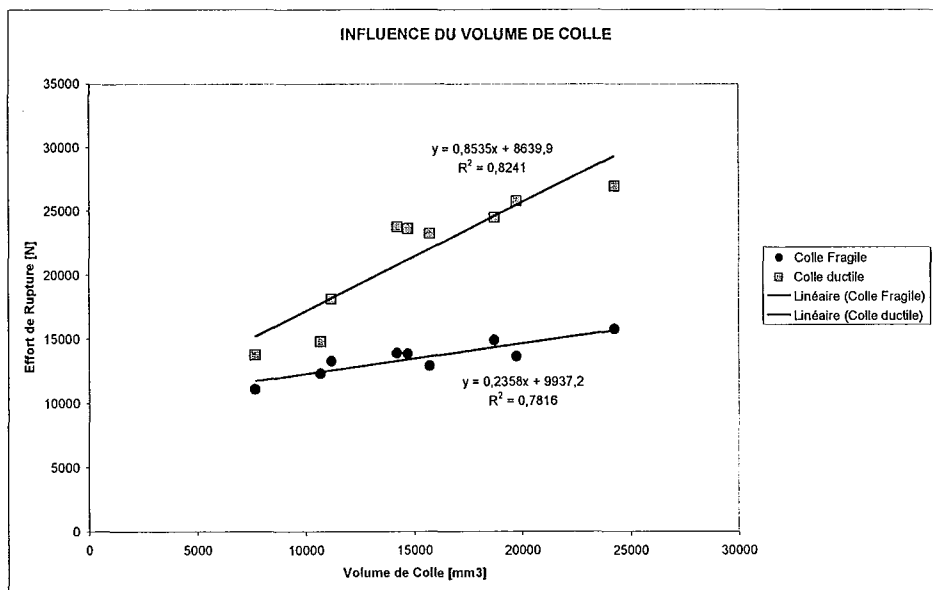


Figure 101- Evolution de la force de rupture en fonction du volume de colle.

Nous pouvons donc considérer l'hypothèse que l'énergie plastique stockée dans le volume de colle, de façon irréversible, se traduit directement par une augmentation de l'effort de rupture. D'où la proposition d'amélioration suivante :

$$R_{ax,rupture} = \pi \cdot l_c \cdot (f_{v,k} \cdot d_{equ} + k \cdot (d+e) \cdot e)$$

où:

$R_{ax,rupture}$ = résistance axiale de l'assemblage [N];

$f_{v,k} = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot (d_{equ})^{-0,2} \cdot (\rho_k)^{1,5}$ = résistance au cisaillement caract. du bois [N/mm²];

ρ_k = masse volumique caractéristique du bois, dans ce cas on a utilisé la masse volumique moyenne de nos échantillons [Kg/m³];

l_g = longueur du collage [mm];

k = paramètre caractérisant la colle;

e = épaisseur de la colle [mm];

d = diamètre de la tige [mm];

d_{equ} = valeur minimale du diamètre du perçage et de 1,25 fois le diamètre de la tige [mm];

Le premier terme de l'expression représente le modèle original dépendant des caractéristiques géométriques de l'assemblage et des caractéristiques mécaniques du bois.

Le deuxième terme décrit la proportionnalité de l'effort de rupture avec le volume de colle. Le coefficient de proportionnalité k a été estimé par itération à partir des nos résultats expérimentaux. Nous obtenons comme valeurs de k : 0,086 pour la colle fragile et 1,213 pour la colle ductile. La figure 102 montre les prédictions très satisfaisantes de ce modèle.

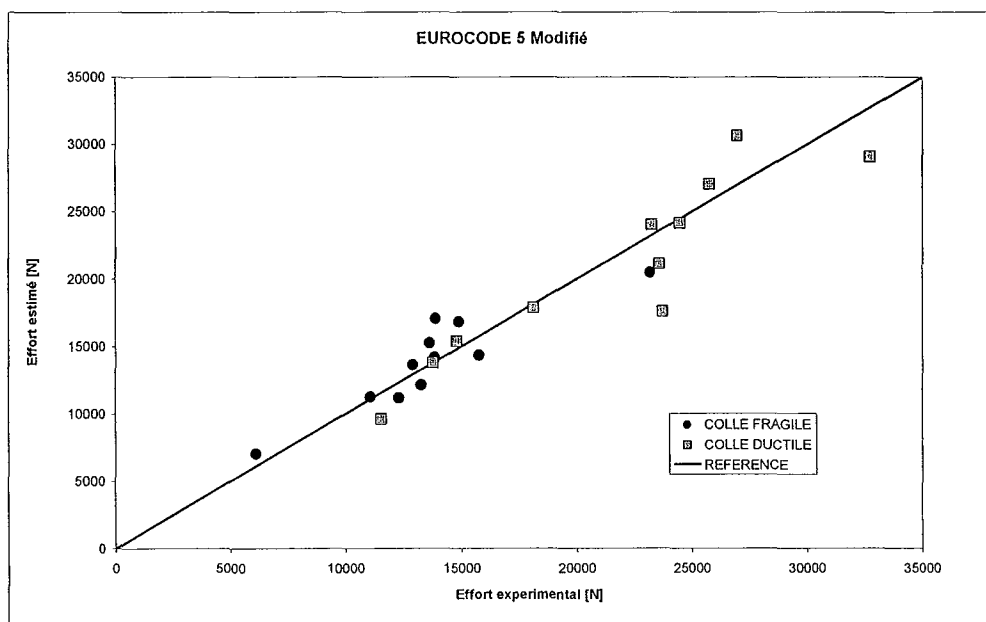


Figure 102 - Valeurs de résistance de l'assemblage prédites par la formule de l'EC-5 modifiée.

Une modification de la formule de calcul indiquée par l'Eurocode 5, intégrant la prise en compte de la quantité d'énergie plastique par unité de volume de colle, peut permettre une meilleure prédiction de la résistance des assemblages collés.

Bibliographie citée

- ASTM D 2559, Standard specification for adhesives for structural laminated wood products for use under exterior (wet use) exposure conditions. 1982
- ASTM D 3165. Standard test method for strength properties of adhesives in shear by tension loading of single-lap-joint laminated assemblies. 1991
- ASTM D 3931. Standard Practice for determining strength of gap-filling adhesive bonds in shear by compression loading. 1980
- ASTM D 5574. Standard Test for Establishing Allowable Mechanical Properties of Wood-Bonding Adhesives for Design of Structural Joints. 1999
- EUROCODE 5, 1997 – « Part 2 – Ponts, annex A (informative) », ENV 1995-2:1997.
- ICOMOS International Wood Committee, Principles for the Preservation of Historic Timber Buildings, octobre 1999
- ISO 6238. Adhesives. Wood-to-wood adhesive bond. Determination of shear strength by compression loading. 1987
- Johansson C. J., Glued-in bolts, Timber engineering step 2, Centrum Hout, 1995
- Johansson C.J., 1995 - « Axial strength of glued-in bolts. Calculation model based on non-linear fracture mechanics. A preliminary study », division of Structural Mechanics, Lunds Institute of Technology, Box 118, S-22100 Lund, Sweden.
- Lavisci P., Berti S., Pizzo B., Triboulot P., Zanuttini R., "A delamination test for structural wood adhesives used in thick joints", Holz als Roh- und Werkstoff, in stampa
- Lavisci P., Berti S., Pizzo B., Triboulot P., Zanuttini R., "A shear test for structural adhesives used in the consolidation of old timber", Holz als Roh- und Werkstoff, in stampa
- Pizzo B., Compatibilità, durabilità e reversibilità nel restauro delle strutture lignee: diagnosi del degrado, tecniche e materiali per il consolidamento, Tesi di Dottorato, Palermo, 1999
- Radovic B., Goth H., Entwicklung und Stand eines Verfahrens zur Sanierung von Fugen im Brettschichtholz, bauen mit holz n. 9 e 10, 1992
- Riberholt H., 1988 - « Glued bolts in glulam. Part 2 », Serie R, N° 228, Department of Structural Engineering Technical University of Denmark, ISBN 87-87336-94-4.
- Townsend P.K., 1990 - « Steel Dowels Adhesive Bonded in Glue Laminated Timber », Research Report 90/11, Department of Civil Engineering University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- EN 301, Adesivi fenolici e amminoplastici per strutture portanti in legno. Classificazione e requisiti prestazionali. 1993
- EN 302/1, Adesivi per strutture portanti in legno. Determinazione della resistenza del giunto al taglio a trazione longitudinale. 1993
- EN 302/2, Adesivi per strutture portanti in legno. Determinazione della resistenza alla delaminazione (Metodo di laboratorio). 1993

5. EXEMPLES D'APPLICATION SUR CHANTIER

Avec les prototypes de colles développées nous avons réalisé une série d'interventions pilotes, principalement pour vérifier les modalités d'application sur chantier. S'agissant d'un contexte de travaux réels (et non d'essais de laboratoire) le dimensionnement des interventions a suivi les règles couramment indiquées par l'Eurocode 5 (partie 2 "Ponts"), et la norme italienne applicable (D.M. LL.PP. 09/01/1996). Nous avons vu dans le chapitre précédent qu'une optimisation de l'emploi des nouvelles colles est envisageable, en termes de réduction de la longueur des barres, après les nécessaires adaptations des normes techniques. Par la suite, les modalités de calcul sont explicitées (gauche) avec un exemple numérique (droite).

Restauration d'extrémités de poutres

Généralement cette intervention de restauration se déroule selon les phases suivantes:

- ouverture d'une brèche dans la maçonnerie pour favoriser le travail sur l'extrémité détériorée;
- découpage à 45° de la poutre pour enlever la partie de bois détériorée;
- préparation des prothèses en bois sec de la même essence (ou meilleure, en durabilité par rapport à l'essence initiale). Le point le plus important porte sur l'humidité du bois qui doit être la même que celle prévue en service;
- réalisation des découpes dans la poutre et dans la prothèse, ancrage des tiges avec l'adhésif;
- après une semaine de réticulation de la colle, démontage des étais, scellement de la brèche et finition de la surface du bois.

On prévoit ici la restauration de l'extrémité de la poutre détériorée, qui sera remplacée avec une prothèse en bois massif fixée à la poutre par quatre tiges filetées en acier, collées dans des défoncements et couchées avec des listels en bois.

Analyse des charges:

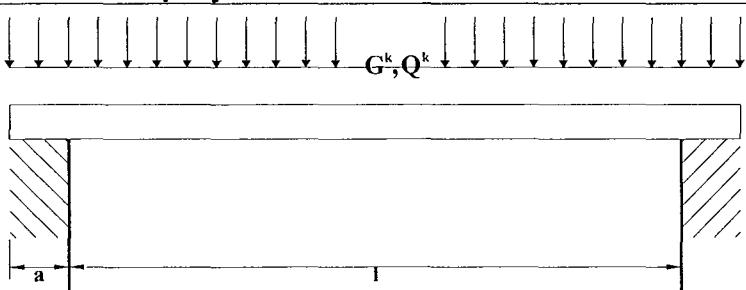
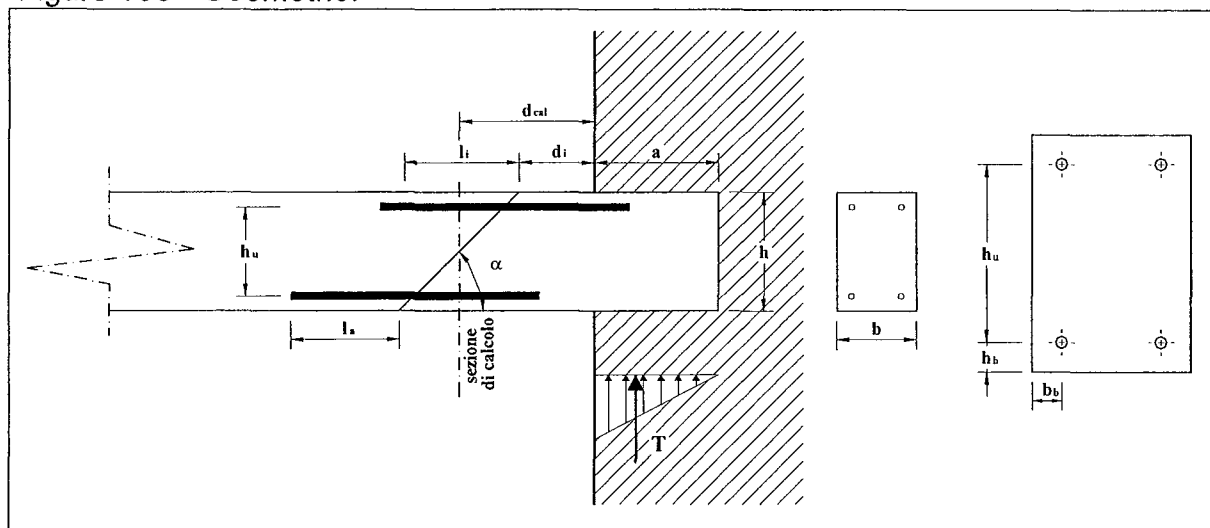
Modalité du projet/calcul	Exemple	
 <p>G_k, Q_k</p> <p>a</p> <p>G_k = charge permanente (poids propre + autres charges permanentes) par unité de surface. Q_k = charge variable (surcharge variable) par unité de surface. $\gamma_G = 1,35$ coefficient partiel de sûreté pour les charges permanentes. $\gamma_Q = 1,5$ coefficient partiel de sûreté pour les charges variables.</p>	1. charges permanentes	kN/m²
	sol	0,40
	mortier de fixation (2 cm)	0,38
	dalle légère (7cm)	0,70
	panneau contreplaqué(24 mm)	0,11
	plancher	0,12
	soliveaux	0,07
	poutres	0,34
	Charges permanentes totales G_k	2,12
	2. charges variables	
	locaux prévus pour accueillir du public	3,00
	Charges variables totales Q_k	3,00

Figure 103 - Géométrie.



Modalité de projet/calcul	Exemple
i = entraxe poutres.	0,75 m
l = portée.	6,3 m
a = longueur appuis sur le maçonnerie.	0,25 m
b = largeur de la section.	0,16 m
h = hauteur section.	0,24 m
d_i = longueur zone dégradée mesurée à partir du mur.	0,10m
α = angle de coupage, conseillé 45°, en tout cas compris entre 30° et 60°.	45°
d_{nom} = diamètre nominal de la tige.	12 mm
d = diamètre extérieur de la tige. Pour tiges lisses et filetées représente le d_{nom} , , pour tiges pour béton on peut prendre $d=1,10xd_{nom}$.	12 mm
A_{res} = surface de résistance de la tige (Tableau 26).	84 mm ²
l_a = longueur d'ancrage de la tige. La longueur minimale prévue par l'EC5 est max entre $0,4xd^2$ et $8xd$.	200 mm
b_b = distance entre le centre de la tige et le bord latéral de la section, minimum $2,5xd$.	35 mm
h_b = distance entre le centre de la tige et le bord inférieur/supérieur de la section, minimum $2,5xd$.	35 mm

diamètre nominal (mm)	surface de résistance (mm ²)	
	tiges lisses et tiges pour béton	tiges filetées
8	50	-
10	79	-
12	113	84
14	154	115
16	201	157
18	254	192
20	314	245
22	380	303
24	452	353
26	531	-
27	-	459
28	616	-
30	707	561

Tableau 26 - Valeurs de la surface de résistance pour les différentes typologies de tiges en acier.

Matériaux:

Modalité de projet/calcul	Exemple
Bois (Tableau 27) :	C16
$f_{t,0,k}$ = résistance caractéristique de traction du bois parallèlement aux fibres	10 N/mm ²
ρ_k = masse volumique caractéristique du bois	310 kg/m ³
$\gamma_{m,l}$ = coefficient partiel de sûreté pour le bois = 1,3 (EC5)	1,3
k_{mod} = coefficient de modification, à choisir selon la dureté de la charge variable (Tableau 28)	0,80
Acier (Tableau 29) :	tiges filetées classe 6.6
f_y = limite d'élasticité de l'acier (Tableau 29)	360 N/mm ²
$\gamma_{m,s}$ = coefficient partiel de sûreté pour l'acier, selon les règlements nationales du D.M. LL.PP. 9/1/96 (Tableau 30)	1,15

	résineux et peuplier			feuillus
classes de résistance UNI EN 338	C16	C24	C30	D30
classes de résistance DIN 4074	S7	S10	S13	-
$f_{t,0,k}$ (N/mm ²)	10	14	18	18
ρ_k (kg/m ³)	310	350	380	530

Tableau 27 - Valeurs caractéristiques de résistance et masse volumique du bois.

classe de dureté de la charge	exemples de charge	k_{mod}
dureté longue	charge dans dépôts	0,70
dureté moyenne	charge de service	0,80
dureté brève	neige	0,90

Tableau 28 - Coefficient de modification par rapport à la dureté de la charge variable.

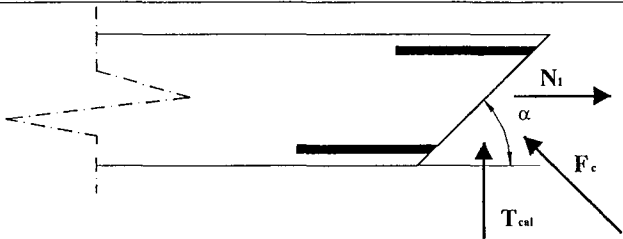
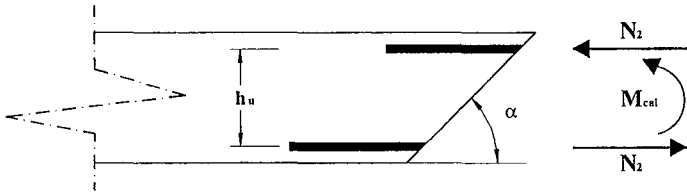
	classe acier	f_y (N/mm ²)
tiges filetées	4.6	240
	5.6	300
	6.6	360
	8.8	640
	10.9	900
acier pour charpente (tiges lisses)	Fe 360	235
	Fe 430	275
	Fe 510	355
tiges pour béton	Fe B 38 k	375
	Fe B 44 k	430

Tableau 29 - Limite d'élasticité de l'acier.

tiges filetées	$\gamma_{M,b}$	1,35
acier pour charpente	$\gamma_{M,1}$	1,05
tiges pour béton	γ_s	1,15

Tableau 30 - Coefficient partiel de sûreté de l'acier.

Définition des Charges / Forces :

Charges/Forces	Exemple de projet/calcul
charge sur la poutre (combinaison des charges à l'état limite)	$q = i \times (\gamma_G \times G_k + \gamma_Q \times Q_k) =$ $= 0,75 \times (1,35 \times 2,12 + 1,5 \times 3,00) = 5,52 \text{ kN/m}$
hauteur utile	$h_u = h - 2h_b = 240 - 2 \times 35 = 170 \text{ mm}$
longueur zone de couplage	$l_i = \frac{h}{\tan \alpha} = \frac{240}{\tan 45^\circ} = 240 \text{ mm}$
effort de traction totale dans les tiges du au cisaillement	 $N_1 = \frac{T_{cal}}{\tan \alpha} = \frac{16,18}{\tan 45^\circ} = 16,2 \text{ kN}$
effort de traction total dans les tiges inférieures du au moment de flexion	 $N_2 = \frac{M_{cal}}{h_u} = \frac{5,14}{0,17} = 30,3 \text{ kN}$
effort de traction dans chacune des tiges inférieures	$N_d = \frac{N_1}{4} + \frac{N_2}{2} = \frac{16,18}{4} + \frac{30,25}{2} = 19,2 \text{ kN}$

Calcul de la résistance à l'arrachement :

Charges/Forces	Exemple de projet/calcul
diamètre équivalent	$d_{equ} = \min \begin{cases} d_{foro} = 15 \text{ mm} \\ 1,25 \times d \end{cases}$
résistance au cisaillement du bois dans la zone de collage	$f_{v,k} = \frac{1,2 \times \rho_k^{1,5}}{1.000 \times d_{equ}^{0,2}} = \frac{1,2 \times 310^{1,5}}{1.000 \times 15^{0,2}} = 3,81 \text{ N/mm}^2$
surface d'influence de chaque tige	$A_{ef} = (3d + b_b) \times (3d + h_b) = (3 \times 12 + 35) \times (3 \times 12 + 35) = 5.041 \text{ mm}^2$ Si $b_b \geq 3d$ et $h_b \geq 3d$ utiliser: $A_{ef} = 6d \times 6d$
résistance à l'arrachement calculée pour rupture du bois par traction	$F_{ax,Rd2} = \frac{k_{mod} \times f_{t,0,k} \times A_{ef}}{\gamma_{mf}} = \frac{0,8 \times 10 \times 5.041}{1,3} = 31.022 \text{ N} = 310 \text{ kN}$
vérification de la tige	$N_d = 19,2 \text{ kN} < F_{ax,Rd} = 20,2 \text{ kN}$
vérification du bois aux contraintes de compression inclinées par rapport aux fibres	Prévue par l'EC5, mais pas obligatoire

Restauration des fermes

Dans le cas des fermes le problème de la dégradation peut se présenter sous formes différentes, par exemple:

- dégradation des extrémités de l'arbalétrier;
- dégradation des extrémités de l'entrait;
- dégradation des deux (arbalétrier et entrait);
- dégradation seule de l'assemblage entrait-arbalétrier

Le calcul n'est pas identique à celui des extrémités de poutres, puisque les éléments d'une ferme sont sollicités principalement par un effort de type normal, pourtant le projet d'assemblage entre la prothèse et le bois existant est réalisé seulement par une vérification à l'arrachement de la tige la plus chargée.

Quand la dégradation se situe à proximité d'un assemblage et qu'elle est relative à plusieurs éléments, il est important de restaurer les extrémités dégradées sans modifier la typologie de l'assemblage.

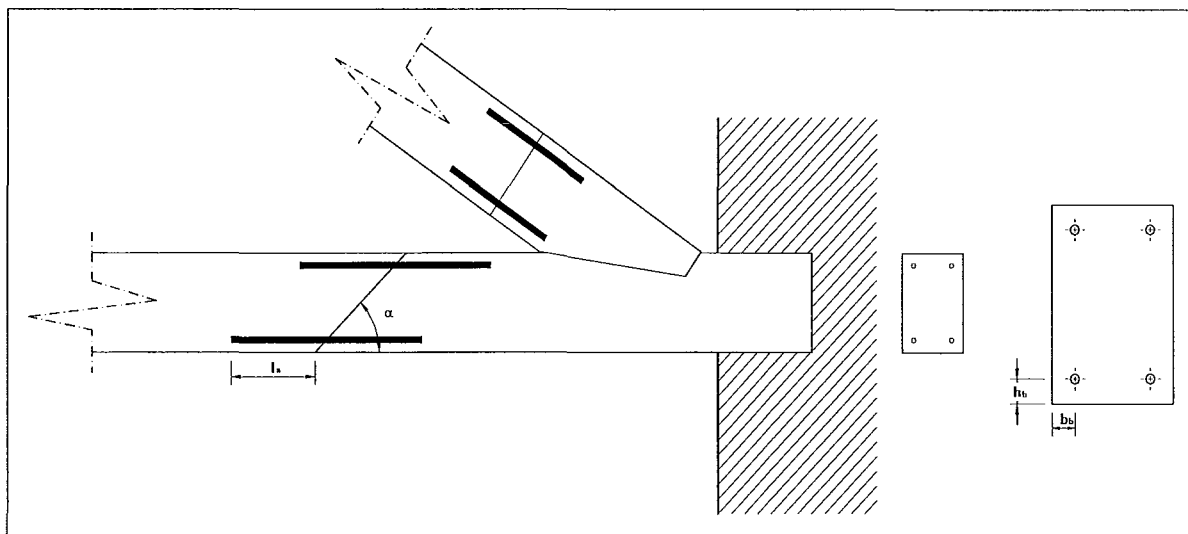


Figure 104 – Exemple : restauration d'une extrémité de l'entrait et de l'arbalétrier d'une ferme.

L'entrait est sollicité surtout par un effort en traction, la découpe inclinée (à presque 60°) permet de mieux transférer l'effort de cisaillement.

L'analyse des charges est faite aux états limites comme dans l'exemple précédent et l'on détermine ainsi l'effort de traction sur l'entrait; enfin on divise cet effort par le nombre de tiges (conseillées 2+2 tiges) et on vérifie l'ancrage.

Si on doit restaurer l'extrémité d'une poutre principalement comprimée (par exemple l'arbalétrier) il faut couper à 90°; l'effort est transféré grâce au contact bois-bois, les tiges ont seulement ici la fonction de transférer les faibles effort de flexion, dans ce cas il est suffisant de fixer les tiges pour la longueur minimale prévue (celle indiquée par l'EC5 est la plus grande entre $0,4xd^2$ et $8xd$), sans faire les autres vérifications.

Réalisation d'une intervention de restauration

Une intervention de restauration doit respecter le plus possible les contraintes suivantes:

- bonne efficacité;
- conservation du schéma structural existant;
- bon résultat du point de vue esthétique;
- rapidité de réalisation;

Le respect des bonnes méthodes opérationnelles dans la préparation et l'application des matériaux est indispensable pour la réussite de chaque intervention de restauration.

Dans le cas particulier des structures en bois, la qualité et la durabilité de l'intervention sont liées à la qualité des interfaces bois-adhésif et adhésif-élément de renfort (tiges, plaques, etc...).

Pour la préparation de l'intervention il faut éliminer complètement chaque partie de bois dégradée par les champignons ou les insectes, dans les zones où on doit effectuer les réparations.

Il est indispensable également de contrôler l'humidité du bois dans la zone à restaurer, mais surtout de vérifier l'humidité du bois des prothèses qui vont être ajoutées, celle-ci doit être proche ($\pm 3\%$) de l'humidité d'équilibre dans les conditions prévues de service, pour minimiser les variations dimensionnelles et donc les contraintes entre les éléments collés.

Il est très important de choisir un bois de la même essence et de la même qualité que celles à restaurer; il est parfois préférable de réaliser des prothèses avec du bois de durabilité naturelle plus élevée (châtaigner ou chêne), quand on prévoit que la tête de la poutre pourra, par exemple, se trouver en conditions d'humidité élevées (classe de service 3).

Il faut noter que la préparation des surfaces du bois est très importante pour ce qui concerne la qualité de l'adhésion; il est important de respecter certaines précautions, pour éviter la formation des échardes, brûlures superficielles ou zones avec les fibres écrasées.

Pour ce qui concerne l'adhésion, il faut réaliser la préparation des surfaces de bois au maximum 24-48 heures avant l'application de la colle, pour éviter des phénomènes d'oxydation superficielle ou de dépôts de substances polluantes. Les surfaces des éléments adjoints doivent également être nettoyées; pour l'acier, par exemple, il est indiqué de sabler, nettoyer avec des solvants ou appliquer un primaire.

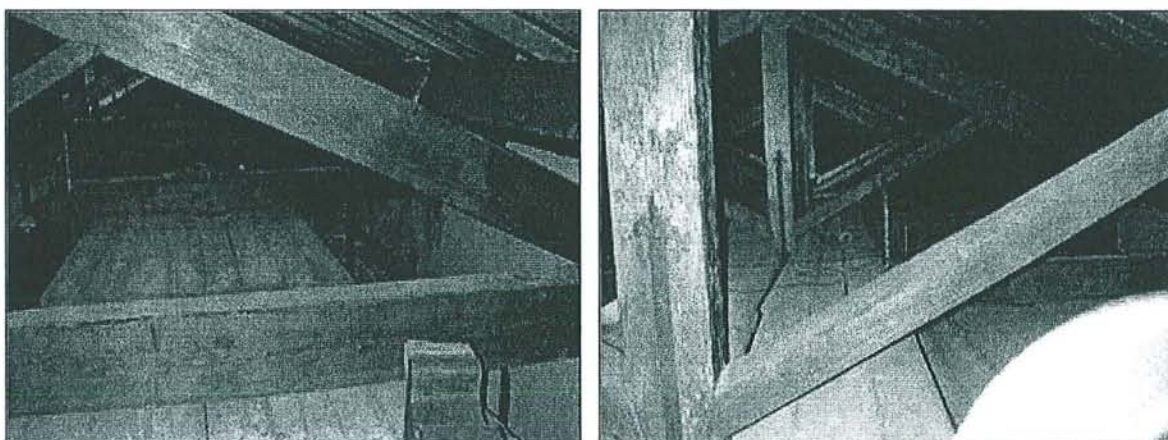
La préparation de la colle doit suivre les indications des fiches techniques et son application doit prendre en compte plusieurs aspects, par exemple, évacuer l'air dans les zones de remplissage par la colle et réaliser des percements qui permettent de contrôler ce remplissage.

On montre ici, à partir d'une série photographique, un exemple de réalisation d'une intervention de restauration que nous avons mise en oeuvre. Cet exemple permet de comprendre en quoi une intervention de restauration est polyvalente.

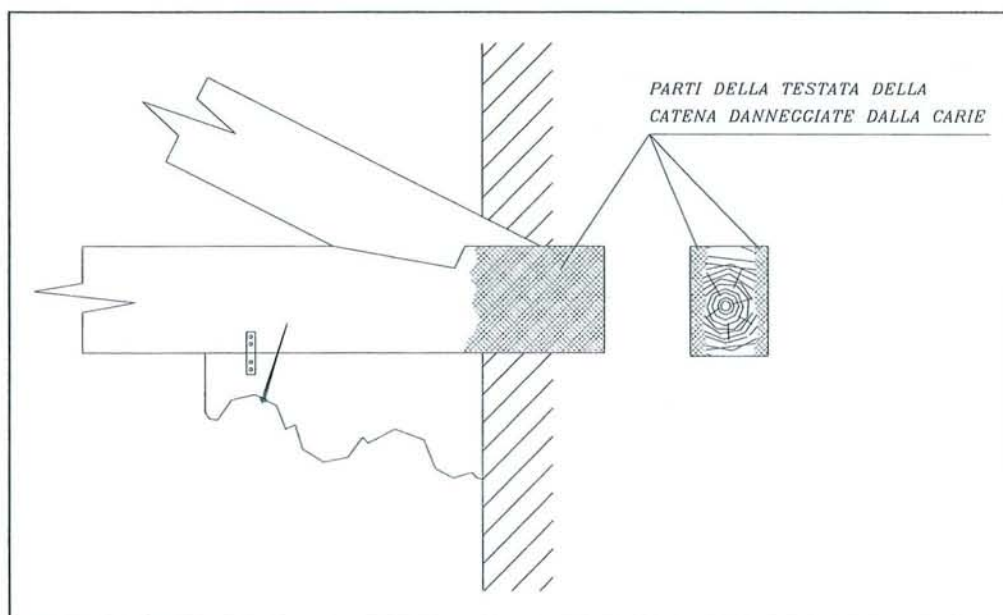
Il s'agit d'une intervention de restauration sur des fermes partiellement endommagées par la pourriture, dans l'Eglise Romane de Borgo S. Lorenzo (Firenze).

L'intervention se déroule selon les phases décrites précédemment, de plus sont réalisées les étapes suivantes:

- préparation et nettoyage des surfaces de l'entrait pour accueillir les prothèses à joue;
- réalisation des percements dans l'entrait pour la disposition des tiges en acier;
- disposition des prothèses de la même essence de bois et avec les mêmes caractéristiques mécaniques;
- ancrage des prothèses avec les tiges en acier et la colle époxy, injectée par des petites percements latéraux;
- après 7 jours de réticulation de la colle, démontage des étais, fermeture de la brèche et finition de la surface du bois;



Figures 105 et 106 - Fermes de la toiture, partiellement dégradées par pourriture et insectes.



Figures 107 - Description de la dégradation partielle due à la pourriture, en extrémité de l'entrait.

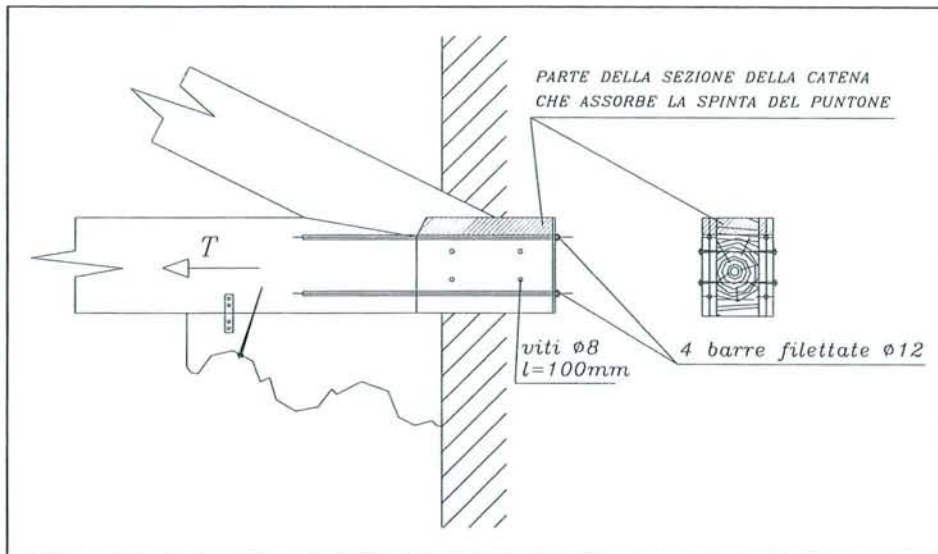


Figure 108 - Description de l'intervention de restauration.



Figure 109 – Elimination des parties de bois dégradées, préparation et nettoyage des surfaces de l'entrait pour accueillir les prothèses à joue.



Figure 110 – Réalisation des trous dans l'entrait pour la disposition des tiges en acier.



Figure 111 – Préparation des prothèses à joue.

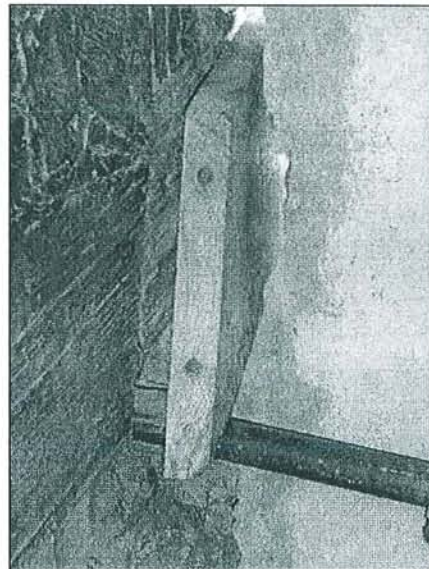


Figure 112 – Introduction des prothèses.



Figure 113 – Introduction des prothèses à joue.

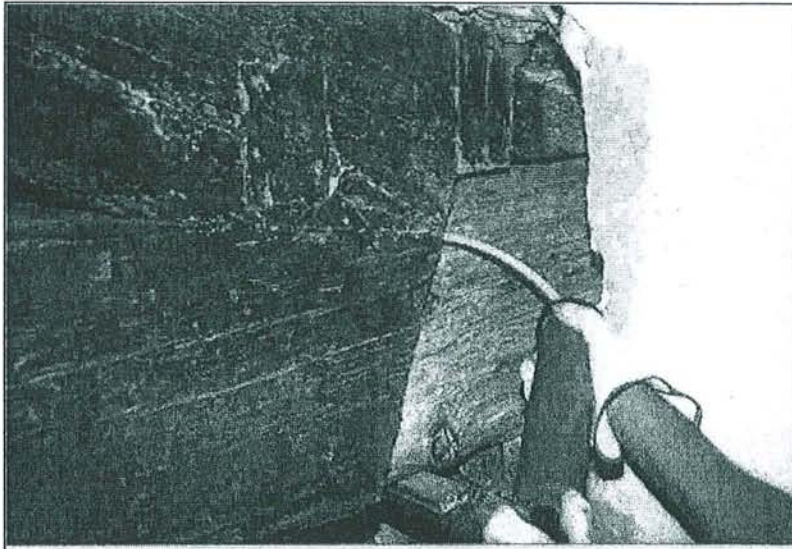


Figure 114 – Ancrage des prothèses avec les tiges en acier et la colle époxy.

Figure 115 – Injection de la colle par des petits trous latéraux.

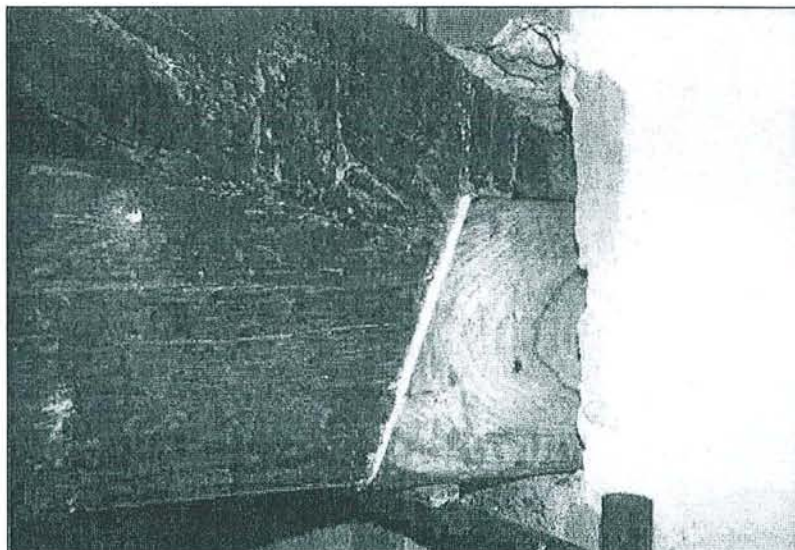
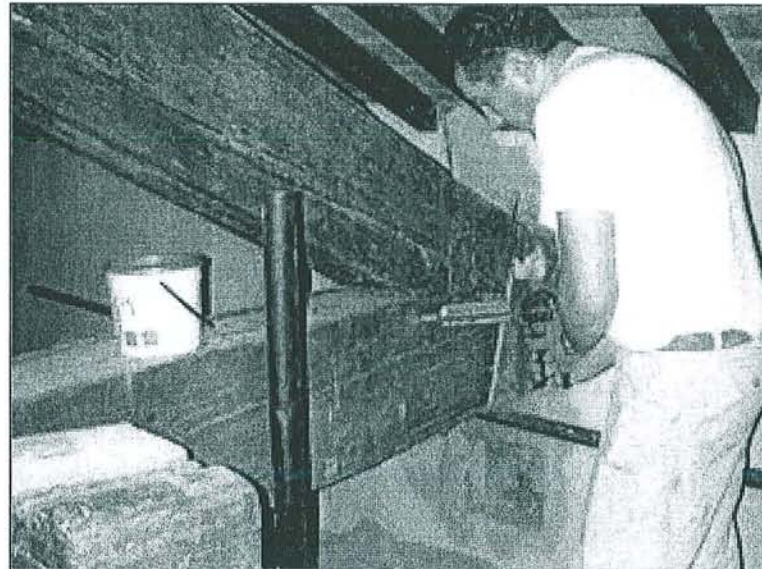


Figure 116 – Après 7 jours de réticulation de la colle, montage des étais, fermeture de la brèche et finition de la surface du bois ; intervention de restauration terminée.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif du présent travail a été atteint. L'analyse des caractéristiques physiques et mécaniques des collages structuraux a été conduite avec des nouvelles méthodologies, spécifiquement développées ou adaptés aux conditions imposés par des colles qui doivent être appliquées en joint épais, sans pression. Le développement de ces nouvelles méthodes a permis une analyse détaillée de la performance de différentes typologies de joints, sélectionnées en fonction des différents aspects qui caractérisent la performance d'un assemblage en oeuvre. Le collage a été décomposé en facteurs qui ont été analysés séparément, et sur chaque facteur nous avons décrit l'effet des variables les plus susceptibles d'influencer la performance (la géométrie du joint, les effets thermo-hygromécaniques de vieillissement, l'orientation des cernes d'accroissement du bois...).

L'ensemble du travail contribue à donner une perspective nouvelle et détaillée sur la performance des collages structuraux, car plusieurs aspects fondamentaux de l'adhésion avec le matériau bois ont été pris en compte (mécaniques, thermiques, anatomiques...), avec une analyse des causes et des effets jugés significatifs. Deux premiers articles tirés de ce travail dans la revue « Holz als Roh- und Werkstoff » confirment cette contribution. Les résultats obtenus seront utiles de manière générale pour l'étude des phénomènes d'adhésion, mais aussi pour des typologies de colles différentes de celles utilisées dans la présente étude.

Les méthodologies proposées seront utiles comme support pour le développement de nouvelles colles plus compatibles avec le bois et plus performantes : en utilisant les méthodes d'essais et les critères d'analyse que nous avons développés, Mapei spa a déjà sélectionné plusieurs formulations parmi celle que nous avons testées (voire chapitre 3.1) pour mettre au point des produits qui seront bientôt présents sur le marché de la restauration structurelle.

Le programme de recherche réalisé partait de l'hypothèse qu'il est possible de modifier les caractéristiques rhéologiques des colles époxy pour obtenir un meilleur comportement mécanique et une meilleure compatibilité avec le bois, exprimé en termes de durabilité de l'assemblage vis-à-vis de sollicitations thermo-hygromécaniques. Nos expériences montrent que cette hypothèse a été validée, et ce résultat est certainement utile pour le développement de systèmes de restauration qui soient moins intrusif dans les bois anciens et qui puissent offrir un meilleur degré de sécurité par rapport à ceux actuellement disponibles pour la restauration des charpentes.

Une contribution scientifiquement et technologiquement significative a été apportée dans le domaine de la restauration, ce domaine est couramment lié à des pratiques traditionnelles et à des préjugés sur les nouveaux matériaux. Il a été ainsi montré qu'une "nouvelle" technologie, si elle est bien conçue et appliquée sur la base de l'évidence expérimentale, peut être plus performante qu'une approche dite "traditionnelle" appliquée sans considérer de manière objective les caractéristiques des matériaux. Les "maîtres" de la construction et de la restauration ont souvent été des grands innovateurs et, à travers leurs expériences, ils ont fait progresser la technologie tout en améliorant la durabilité de leurs ouvrages. Nous pensons que notre contribution, certes bien plus modeste, peut être utile aussi bien sur le plan scientifique que pratique.

Enfin, le travail accompli sur les méthodes d'essais pour la mesure objective des performances des colles structurelles appliquées sur chantier est en cours d'intégration dans le développement d'une série de nouvelles normes, au sein du CEN/TC193/SC1. Un groupe de travail spécifique (WG11) a été mis en place, et j'en suis le coordinateur. Le travail progresse assez rapidement, grâce à la collaboration des experts de 7 Pays (Allemagne, Belgique, France, Italie, Royaume-Uni, Suisse, Suède) et en coordination avec le groupe de travail qui a réalisé le projet « GIROD ». Les méthodes d'essais de cisaillement, délamination et extraction des tiges sont déjà en discussion au sein de ce groupe. Les méthodes de stabilité dimensionnelle thermique, fluage et propagation de la rupture à l'interface bois-colle ont été jugées intéressantes dans la perspective d'éventuelles normalisations. Nous souhaitons que les publications prévues sur ces derniers points puissent contribuer à sensibiliser les différents experts de collage, pour une discussion ouverte et efficace.

De plus, des perspectives intéressantes ont été ouvertes.

Les pathologies introduites par les systèmes de restauration, décrites au paragraphe 1.3.2, pourront très probablement être éliminées grâce à l'emploi de colles plus compatibles, à une mise en oeuvre plus soignée et à l'adoption de critères plus spécifiques lors du projet d'assemblages structuraux utilisant des colles. Nous avons montré que :

- la compatibilité entre bois et colle peut être mesurée comme proposé dans le paragraphe 4.1 (et les produits mis au point par Mapei spa sur la base de ce critère offrent un très bon niveau de compatibilité);
- une meilleure performance de l'assemblage peut être proposée à travers une adaptation des formules de calcul comme il l'a été montré dans le paragraphe 4.2 pour des systèmes classiques « tiges collées ».

Meilleure compatibilité et meilleures performances constituent la base de systèmes d'intervention moins intrusifs et moins destructifs, pour une meilleure conservation de la structure et de l'intégrité matérielle des charpentes vis-à-vis des pathologies typiques du matériau bois. Aussi, la productivité de la main d'œuvre sur le chantier peut être améliorée avec des joints plus simples en conception et réalisation, ou avec une main d'œuvre moins qualifiée qui serait alors capable d'appliquer les produits en sécurité.

Les exemples de calcul et d'application des colles illustrés dans le chapitre 5 ont été intégrés dans une proposition de recherche de type « CRAFT » qui va bientôt être publiée par la Communauté Européenne (LICONS, Low Intrusion Conservation Systems for Timber Structures), dont LegnoDOC est un partenaire avec d'autres PME. L'éventuel déroulement de ce projet pourra contribuer au développement de nouvelles plus performantes et à leur diffusion parmi les entreprises de la restauration du patrimoine bâti.

BIBLIOGRAPHIE

La bibliographie rassemblée et analysée est organisée en banque de données Excel. Les pages suivantes reportent la liste complète des titres.

Les colonnes informent sur la langue du texte (LAN.), le groupe d'intérêt (GR.), les auteurs (AUTEUR) ; l'année de publication (DATE), le titre (TITRE) et les références bibliographiques (REF. BIBLIO).

En ce qui concerne les groupes d'intérêt, les codes suivants sont utilisés :

Liste des index utilisés dans la colonne "GROUPE"

		n°
c	calculs, méthodes d'essai, modélisation	55
d	diagnostic	120
h	histoire et contexte	10
m	marchés	16
n	normes, lois	18
p	produits	37
s	systèmes de restauration	84
*	non utile et/ou à éliminer	0
wet	mouillabilité	15
buf	capacité tampon	18
mic	microscopie	4
mf	mécanique de la rupture	22
cm	méthodes pour essais chimiques	14

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
it	n	Accurti	1998	Riflessione sulle problematiche di impiego del progetto di conservazione nella gestione istituzionale della tutela e sull'alternativa dell'appalto concorso	Scienza e beni culturali, XIV
fr	d	Agence Nat. pour l'Amelioration de l'Habitat	1985	Guide du diagnostic acoustique. Habitat ancien.	Agence national pour l'Amelioration de l'habitat, 1985, pag.47, fig., tabl., P 1331
en	buf	Albert; Németh; Halász	1999	Radial variation of ph and buffer capacity in the red-heartwooded beech (<i>Fagus sylvatica</i> L.) wood	Holz als Roh- und Werkstoff 57 pp.75-76
it	p	Albini L, Leoni R	1985	Induritori a funzionalità amminica	Pitture e Vernici 7/85, 23-37
en	buf	Albritton; Short	1979	Effects of Extractives from pressure-refined hardwood fiber on the gel time of urea formaldehyde resin	Forest Product Journal 29(2) pp.40-41
it	n	Alessandrini	1993	Manualistica come supporto al processo progettuale nel recupero: il caso della Vallagarina	Il recupero degli edifici antichi (manualistica e nuove tecnologie). Atti del Convegno Internazionale, Napoli 29-30 Ottobre 1993
it	d	Almesberger, Lucchini	1997	Metodi di diagnosi del legno in opera	Atti del Convegno "Materiali e tecniche per il restauro", Cassino ott. 1997
en	c	Ando K, Onda H	1999	Mechanism for deformation of wood as a honeycomb structure I: Effect of anatomy on the initial deformation process during radial compression	The Japan Wood Research Society, 45, 1999
	c	Ando K, Onda H	1999	Mechanism for deformation of wood as a honeycomb structure II: First buckling mechanism of cell walls under radial compression using the generalized cell model	The Japan Wood Research Society, 45, 1999
en	c	Ando K, Otha M	1999	Variability of fracture toughness by the crack tip position in an annual ring of coniferous wood	Journal of Wood Science, 45, 275-283
fr	s	Andreoli	1983	Le renforcement des structures porteuses.	Centre d'assistance technique et de documentation, 1983, pagg.1-64
fr	s	anonime	1976	Restauration de bois de charpente au moyen de matieres plastiques	Paris, Batiment International, 1976, v. 4, n. 3, pag.169-173,fig., AN : 8840
de	s	anonime	1997	Sanierungsverfahren für bauhölzer und bs-holz.	bauen mit holz 12/97
fr	s	Anquetil	1992	Les etriers en charpente.	L'entrepeneur menuiserie du 24/08/92 au 25/10/92

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
it	d	Antonucci, Giacchetti, Munafò	1997	Determinazione delle caratteristiche meccaniche di elementi strutturali di legno nuovo ed antico tramite l'uso degli Ultrasuoni	Il Giornale delle prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, 1/97, pp.54-60
en	d	Aplin EN, Eng P, Allen DE	1989	Investigation of glulam following the Prelate collapse	Canadian society for civil engineering annual conference, 8/10/1989 St. John's Newfoundland
fr	p	Archambault Gui	1990	Des resines pour sauver les batiments	Cahiers Techniques du Batiment, n°119, sept. 1990, pp. 95-97, fig., Ref : QE-90-9-119
fr	p	Archambault Gui	1992	Les resines au secours du bati ancien	Le Moniteur, n°4618, 1992, pp. 69- 70, fig., Ref : OU-92-5-461B
en	p	Architects Journal	1982	The age of resin	Architects journal, 10 feb. 1982, (82- 02-092)
en	p	Ashurst J, Ashurst N	1988	Wood, glass, and resins	Aldershot, Gower Technical Press, 1988, vol.5, pag.114, fig., AN : 9487
it	n	Astrua	1993	Tecniche diagnostiche per il controllo delle situazioni di sicurezza dei rivestimenti in lastre sottili di materiali lapidei naturali. Procedure e istruzioni per un codice di pratica.	Atti del convegno internazionale di Napoli, Ott. 1993
en	s	Avent	1996	State-of-the art of epoxy repair of heavy timber	Proceedings International Wood Engineering Conference, New Orleans
en	c	Avent	1992	Structural design for epoxy repair of timber.	Wood design Focus 3/1992
en	s	Avent	1985	Decay, weathering and epoxy repair of timber	Structural engineering v. 111 n°2 NY
en	s	Avent	1977	Epoxy repair of wood trusses. Part 2. Behavior of epoxy repaired full scale timber trusses	Dept. of Civil Eng. - Mississippi State Un.
en	s	Avent RR, Sanders PH, Emkin LZ	1979	Structural repair of heavy timber with epoxy	Forest product journal, 1979, 29 (3), pag.15-18, Dep. Civil engineer., Mississippi state univ., miss., USA
en	s	Avent, Emkin, Sanders	1978	Behaviour of epoxy repaired full-scale timber trusses	Journ. of the Structural division
it	d	Avoletti	1998	Diagnostica non distruttiva da cantiere	R. e C., n.26,1998
en	p	Banks	1990	Protection of wood products. Some thoughts on the way ahead	Journal of the institute of wood science, vol. 12 No.2
en	s	Bardell KH, Lau PWC	1981	Structural reinforcement of wood	Forintek Canada corp., eastern Laboratory (K1G 3Z5), April 1981
it	c	Bartolini Cestari	1994	Tecniche di consoidamento e loro durabilità: problemi di intervento ed aspetti progettuali	RILEM 48th Gen. Council Workshop, Trento

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
it	n	Bellini, Bassani	1998	Riflessioni per una possibile normativa sui beni culturali	Scienza e beni culturali, XIV
it	c	Beltrame	1998	Progettare il restauro tra rumore ed informazione	Scienza e beni culturali, XIV 1998
de	c	Benninghove n H	1985	Tragerrostberechnung als beitrag zur fackwerkhausstatik.	Bauen mit Holz, vol.87, n°12, 1985, pag.842-846, fig., AK-85-12
it	d	Beria d'Argentina	1998	Il rumore e le vibrazioni	rivista: ACER, 1/1998
it	n	Berti, Castro	1996	Normativa europea sul legno tondo e sui segati	Rivista: "Sherwood - Foreste e Alberi Oggi, n. 9 febbraio 1996
it	c	Bertolini Cestari	1994	Tecniche di consolidamento e loro durabilità: problemi di intervento e aspetti progettuali	Workshop Rilem 1994
it	d	Bertolini Cestari, Brunetti, Macchioni	1997	Le lacune nel legno	Scienza e beni culturali XIII
it	c	Bertolini Cestari, Macchioni, Pignatelli	1998	Indagini e progetto di restauro	Scienza e beni culturali XIV
en	cm	Bettye et al	1999	Molecular mechanistic origin of the toughness of natural adhesives fibres and composites	Nature 399 pp.761-763
it	c	Biscontin, E Zendri	1998	Aspetti interdisciplinari e formativi nel progetto di restauro	Scienza e beni culturali, XIV 1998
en	d	Blanchet	1996	Anew approach developed for in situ evaluation of historic timber structures, in Canada	Opuscolo informativo - The forest product society 1996 annual meeting
en	d	Blanchet	1996	New approach develop for in-situ measurements and historic timber structures evaluation, in Canada	Abstract di articolo
de	s	Blas HJ, Ehlbeck J, Kurth J	1992	Wiederherstellung der Tagfähigkeit von gerissenen Brettschichholzträgern	Bauen mit Holz, vol.94, n°2, 1992, pp.118-120, fig., Ref :AK-92-2
it	d	Blasi, Ceccotti	1989	Controlli statici e dinamici su solai legno-calcestruzzo in interventi di consolidamento	Atti del 2° Congresso Nazionale sul restauro del legno
fr	s	Bleron L	2000	Contribution à l'optimisation des performances d'assemblages bois en structures. Analyse de la portance dans les assemblages de type tige	These de "Docteur de l'Universite H. Poincare, Nancy I, en Sciences et Technologies Industrielles". ENSTIB
it	h	Boato	1998	Archeologia dell'architettura, tra conoscenza, formazione e progetto	Scienza e beni culturali, XIV 1998
en	d	Bodig	1994	NDE of wood in north America, concepts and applications	Sopron, Hungary

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
en	p	Boehme	1995	Load tests of adhesive assembly bonding under defined climatic conditions with beech and meranti	Holzforsch. 49(2):158-162
en	p	Bohlen JC, Fox SP, CKA Stieda MEIC	1972	Flaw development in hot-press glued laminated beams and methods of reinforcement	Department of the environment Canadian forestry service western forest product laboratory Vancouver, British Columbia, Information report october 2-7, 1972
en	d	Bonamini	1995	Restoring timber structures - Inspection and evaluation	Timber Engineering STEP 2 - First Edition, Centrum Hout, NL
it	d	Bonamini	1992	Diagnosi in opera e controllo del degrado	Materiel du courd "Restauro delle strutture in legno", Università di Firenze
it	d	Bonamini	1995	Ispezione delle strutture lignee esistenti	STEP, lecture D3 - Università degli Studi di Firenze
it	d	Bonamini, Togni, Pascucci	1998	Regole di classificazione per le travi di castagno	ED. CLUT
en	d	Bonamini, Togni, Uzielli	1996	The strength and stiffness of large ancient timber beams: experimental assessment of the effectiveness of combined visual grading and non-destructive testing	Opuscolo del Congresso "Scienza e tecnologia per la salvaguardia dell'eredità culturale nel bacino del Mediterraneo
en	d	Bonamini, Uzielli	1995	Restoring timber structures : Inspection and evaluation; Repair and strengthening	STEP, lecture D4 - Università degli Studi di Firenze
it	d	Bonamini, Uzielli, Ceccotti	1990	Sulla valutazione della resistenza meccanica del legno antico	Atti del Congresso CTE su: "Tecnologia edilizia in evoluzione", Bologna 1990
fr	s	Bonfils	1990	Rehabilitation des charpentes et des structures en bois.	Cated, Compte rendu du colloque des 12 et 13 juin 1990, 1991, pagg. 34-39
it	c	Borasi	1998	L'analisi del rischio come nuova scienza e nuova cultura a base delle future norme per le procedure amministrative italiane anche nei cantieri edilizi di restauro o recupero	Scienza e beni culturali, XIV
it	h	Borasi	1993	Precisazioni sull'utilità dei manuali antichi, sulla irripetibilità delle tecnologie costruttive originarie e sulla accettabilità delle nuove tecnologie nei cantieri edili attuali e nei progetti di recupero di edifici antichi tuttora trasformabili a usi più moderni	Il recupero degli edifici antichi (manualistica e nuove tecnologie). Atti del Convegno Internazionale, Napoli 29-30 Ottobre 1993
it	n	Bosia	1998	Strumenti capitolari per interventi sul costruito	Scienza e beni culturali, XIV
en	mf	Bostrom L	1994	The stress-displacement relation of wood perpendicular to the grain. Part 1: Experimental determination of the stress-displacement relation	Wood Science and Technology, 28 (4), 309-317

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
en	mf	Bostrom L	1994	The stress-displacement relation of wood perpendicular to the grain. Part 1: Application of the Fictitious Crack Model to the Compact Tension Specimen	Wood Science and Technology, 28 (5), 319-327
en	s	Bowden	1984	Resin bonded restoration for old timbers	Construction, summer 1984, (47) FD12 (84-07/441)
en	s	Bowden	1993	restoration and repair of old timber	Construction Repair Nov/Dec 1993
en	s	Bowden C	1989	Structural repair of old timbers	Northhampton, Architect and Surveyor, 1989, vol.64, n.4, pag.20-21, AN : 9037
de	p	Broker FW, Kuhl J	1991	Untersuchungen an zellulosefasergefüllten Epoxidharzen zur Sanierung breiter Risse in Bauholz	Bauen mit Holz, vol.93, N°9, 1991, fig., Ref : AK-91-9
it	c	Brovelli, S Brun, L Carassale, S Lagomarsino , A Lemme, I Patrignani, S Podestà, G Stagno	1998	Imparare dal terremoto per progettare il restauro delle chiese	Scienza e beni culturali, XIV 1998
it	d	Brunetti, Cavallero, Macchioni, Zangrando	1997	Diagnostica su strutture lignee	Convegno: "Conservazione delle opere lignee", Meda (MI), Villa Antonia Traversi
it	d	Brunetti, Gatti	1994	Prove ultrasoniche su travi in legno. Primi risultati di una ricerca sperimentale	Workshop rilem, Trento 28/08/94
en	s	Buchanan AH, Moss PJ, Townsend PK	1990	Reinforcing bars epoxy bonded in glued laminated timber	international timber engineering conference Tokyo, october 1990, pag. 601-610
en	d	Bucur	1992	Ultrasonic sensing and probing wood material	Opuscolo informativo della IUFRO-DIVISION 5, Nancy France
fr	s	Bulletin d'information s techniques	1980	Restauration a le resine epoxyde de planchers et charpentes au Monastere de la Grande-Chartreuse	Publication trimestrielle du centre technique du bois, n.92, mai 1980 (2° trimestre)
fr	s	Bureau Beta	1977	Restauration et reparation d'ovrages en bois au moyen de matieres plastiques	Bullettin d'informations techniques, centre technique du bois, 1977, n°82, pag.40-42, Postbus 151, 3230 Ad Brielle, Maarland ZZ23, Netherlands
fr	s	Cahiers techniques	1997	Les differentes techniques de renforcement des planchers a ossature bois, beton et metallique.	Cahiers techniques du batiment, n°178, mars 1997, pag. 58-60
fr	s	Cahiers techniques	1997	Reconversion d'un entrepot militaire a ossature bois.	Cahiers techniques du batiment, n°178, mars 1997, pag. 20-24
fr	m	Cahiers techniques	1996	Le plancher bois-beton connecte: un systeme competitif pour l'habitat ancien.	Cahiers techniques du batiment, n°169, mars 1996, pag. 72-74

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
fr	d	Cahiers techniques	1997	La thermographie pour detecter les pans de bois.	Les Cahiers techniques du batiment, n°181, juin-juillet 1997, pagg. 28-29
fr	s	Cahiers techniques	1983	Une nouvelle technique pour restaurer les maisons a colombages.	Cahiers Technique du Batiment, n°55, 1983, pag.43-45, fig., tabl., QE-83-6/7-55.
it	s	Calori	1993	Un tetto genovese	rivista: Recuperare 6/1993, pag.488
fr	d	Calvi	1998	Pathologie des structures recentes en bois	Calvi etudes bois, Les Angles
it	c	Capretti, Ceccotti	1990	Sul comportamento reologico del legno e conseguenti variazioni dello stato di sollecitazione nelle strutture	Università di Firenze, Dip. di Ingegneria Civile, n.4/1990
it	h	Carbonara, Malerba	1998	L'edilizia è a un punto di svolta. Recupero, risanamento, restauro.	Recuperare l'edilizia, N.1/1998
it	s	Cardinale Giovanni	1989	Le strutture lignee di copertura e di impalcato nel Palazzo d'Arnolfo (sec.XIV-XV) in San Giovanni Valdarno: restauro e consolidamento	Atti del 2° Congresso Nazionale sul Restauro del Legno, Firenze, 08-11-1989
fr	d	Cassan, Bailleres	1997	Caracterisation mecanique par analyse des vibrations transverses: perspectives pour le classement	CIRAD-FORET, Montpellier
it	p	Cattich	1998	Comportamento in campo elastico e a rottura di giunti incollati legno-acciaio	Tesi di laurea, facoltà di Ingegneria di Trento
it	c	Cecati, Lucchesi, Padovani, Pagni, Zani	1998	Consolidamento e adeguamento antisismico: un modello di calcolo per orientare il progetto	Scienza e beni culturali , XIV 1998
en	s	Ceccotti	1995	Timber-concrete composite structures	Step/Eurofortech, lecture E13
it	c	Ceccotti	1994	Il significato dell'Eurocodice 5 per le strutture in legno	48th General Council, Trento 1994
it	p	Ceccotti A, Mannucci M, Uzielli L	1990	Effetti del riassorbimento di umidità sul comportamento ad estrazione di barre di acciaio ancorate nel legno mediante resina epossidica	Atti del 2° Congresso Nazionale sul Restauro del Legno, Firenze, 8 novembre 1989, Nardini Ed., Firenze 1990
it	c	Ceccotti, Larsen	1992	L'Eurocodice 5 "Strutture di legno"	L'Edilizia, 12/1992
it	s	Ceccotti, Marradi	1995	Nuove tecnologie negli interventi di recupero delle antiche capriate di legno: materiali e metodi	in: Il recupero degli edifici antichi. Manualistica e nuove tecnologie - CLEAN Ed.
it	s	Ceccotti, Marradi	1993	Nuove tecnologie negli interventi di recupero delle antiche capriate di legno: materiali e metodi	Il recupero degli edifici antichi (manualistica e nuove tecnologie). Atti del Convegno Internazionale, Napoli 29-30 Ottobre 1993
it	s	Ceccotti, Ruffino, Bonamini, Uzielli	1998	Restauro conservativo di capriate lignee: la pieve di s. Marino	CLUT, Torino

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
it	d	Ceccotti, Uzielli	1989	Sul grado di affidabilità delle strutture lignee antiche	Atti del 2° Congresso Nazionale "Il restauro del legno". Nardim Ed. 1990
fr	s	Centre technique du bois et de l'ameublement	1989	Ossature bois et rehabilitation	Paris, CTBA info, n°22, 1989, pag.12-13, fig., RR-89-1-22
fr	m	Charlot, Valdieu C	1990	Les travaux de rehabilitation en Italie.	CSTB magazine, n°34, mai 1990, pagg. 30-33
it	m	Checchi	1998	Restauro e conservazione: verso una corretta analisi dei costi	Scienza e beni culturali, XIV
en	h	Chilton	1995	History of timber structures	Timber Engineering STEP 2 - First Edition, Centrum Hout, NL
en	buf	Choon; E Roffael	1990	The acidity of five hardwood species	Hozforschung 44(1) pp.53-58
en	c	Chui, Ni	1998	Stress distributions in glued wood lap joints subjected to an axial force	Proceedings 5th World Conference on Timber Engineering - Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne
en	c	CKamoun; APizzi; RGarcia	1998	The effect of humidity on crosslinked and entanglement networking of formaldehyde – based wood adhesives	Holz als Roh- und Werkstoff 56 pp.235-243
en	p	Cocker W	1982	The resin revolution	The Wykamol Preserver, spring/summer 1982, pag.2 (83-11/676)
en	d	Combe, Giudici, Sandoz	1996	Detection of ring shake in chestnut by ultrasonic measurement	Abstract di articolo
it	h	Conti, Berti	1997	Tradizione e restauro delle strutture lignee in area padana	Atti del convegno "Materiali e tecniche per il restauro", 3-4 ottobre 1997
en	c	Crisan, Popa, I Curtu, Rosca, Tomoioga, LCurtu	1996	Aspects about stress distribution on roof structure of wooden churches from "Maramuresh" area (north of Romania) built in the 18th century	Abstract
it	d	Crispo, Olivito	1997	Applicazione di tecniche non distruttive per la stima del danneggiamento in strutture monumentali	Atti del convegno "Materiali e tecniche per il restauro", 3-4 ottobre 1997
fr	m	CTBA	1990	Rehabilitation des structures en bois : un marchè porteur	CTBA Info, n°30, Mai 1990, pp. 21-24, fig., Ref :RR-90-5-30
en	d	Darie, Cracea, Vacareanu	1996	The determination of stress states in existing wood buildings of Bucharest by using non-destructive testing	Abstract
en	mf	Daudeville	1999	Fracture in spruce: experiment and numerical analysis by linear and non linear fracture mechanics	Holz als Roh-und Werkstoff 57 (1999)

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
it	p	De Cristofaro, Fois	?	sulla resistenze caratteristiche di conglomerati epossidici e barre di vetroresina per impieghi nel restauro e consolidamento statico di strutture in legno	atti rassegna tecnica della società ingegneri ed architetti di torino Anno 37 n°1
it	s	De Sivo B, Cito G, Giordno G, Iovino R	1992	Il recupero delle coperture	Dario Flaccovio editore
it	d	De Tommasi, G Vincenti	1993	Il recupero del Teatro Petruzzelli di Bari: valutazione dei requisiti residuali degli elementi di fabbrica e di completamento	Il recupero degli edifici antichi (manualistica e nuove tecnologie). Atti del Convegno Internazionale, Napoli 29-30 Ottobre 1993
it	d	Del Favero, E Abramo, A Zanella	1997	La stima della qualità negli alberi in piedi	L'Italia forestale e montana, N.6/1996
it	d	Della Gatta, M Meola, D Pingitore	1993	Utilità del monitoraggio strutturale per la programmazione degli interventi	Atti del convegno internazionale di Napoli, Ott. 1993
fr	d	Della Giustina	1985	La pathologie des charpentes en bois	Editions du Moniteur, Paris
it	d	Deluca, Macchioni, Paganini, Pollini	1994	Esame di una nuova metodologia di indagine non distruttiva come supporto per la valutazione delle caratteristiche del legno in opera	ITL/CNR, San Michele a/A
en	d	Demaus, Eng	1993	An evaluation of the drill's suitability for the assessment of structural timber in old buildings	The DDD200 Decay Detecting Drill.fiche technique
en	c	Deng, Moss, Buchanan	1998	Glued bolts in glulam - an analysis of stress distribution	Proceedings 5th World Conference on Timber Engineering - Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne
en	d	Desch	1970	Structural Surveying	IRL/CNR, Firenze
en	d	Dimanche, Capretti, Del Senno, Facaoaru	1994	Validation of a theoretical approach for the detection of delamination in glued laminated beams	Opuscolo del 1° simposio europeo sulla valutazione non distruttiva del legno
it	d	Dionisi Vici	1995	Valutazione della qualità e dello stato di conservazione di grandi travi lignee in opera; esame della struttura portante di un solaio del XIX secolo	Tesi di laurea
en	d	Divos, Nemeth, Zombori	1996	Evaluation of historical wooden structures	Abstract
it	p	Donato, Melati, Agozzino, Trapani	1997	Conservazione di reperti lignei da ritrovamenti subacquei. Studio e caratterizzazione di miscele polimeriche idonee ad un trattamento consolidante	Atti del convegno "Materiali e tecniche per il restauro", 3-4 ottobre 1997

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
it	n	Dringoli	1993	La manualistica nel campo del recupero edilizio: validità di un'operazione a rischio	Il recupero degli edifici antichi (manualistica e nuove tecnologie). Atti del Convegno Internazionale, Napoli 29-30 Ottobre 1993
en	mic	Du; Y Hua; W Zhen	2000	Wood surface treatment with microwave plasma	Wood Adhesives 2000; 22-23 June 2000; South lake Tahoe – Nevada – USA; pp.78-80
fr	d	Duval	1994	La pathologie du batiment : generalites sur le gros-oeuvre.	Batirama, Le batisseur europeen, n° 268, 1994, pagg. 32-35
fr	s	Duval G, Keisser D	1980	La restauration et la consolidation des charpentes en bois	Pouen, Chaiers techniques du batiment, 1980, n.27, pag. 22-26, fig., AN : 8907
de	d	Eckstein, SaB	1994	Bohrwiderstandsmessungen an Laubbaumen und ihre holzanatomische Interpretation	Holz als Roh-und Werkstoff 52
en	mf	Ehart, Stanzl- Tschegg, Tschegg	1999	Mode III fracture energy of wood composites in comparison to solid wood	Wood Science and Technology 33 (1999), 391-405
en	buf	Elias; Alrle	1996	The acidity of stored Sitka spruce chips	Holz als Roh- und Werkstoff 54 pp.65-68
de	d	Erlor	1989	Zur Beurteilung der Tragfähigkeit historischer Holzkonstruktionen	Holztechnologie
de	d	Erlor K	1989	Zur Beurteilung der Tragfähigkeit historischer Holzkonstruktionen.	Holztechnologie, 1989, vol.30 (n.2), pag. 79-82, Technische Hochschule Wismar DDR
it	s	Ermolli, V Mormone	1999	Intrventi di recupero delle coperture lignee. Palazzo Reale di Napoli	R. & C. , No.27/1999
it	d	Fabbri, Magni	1998	La XVI cella della Certosa di Ferrara: ampliamento delle indagini per il minimo intervento	Scienza e beni culturali XIV 1998
en	d	Falk, Patton- Mallory, McDonald	1988	Nondestructive testing of wood products and structures: state-of-the-art and research needs	doe Reis, Henrique, Nondestructive testing and evaluation for manufacturing and construction: Proceedings of conference; Champaign, New York. Biblioteca IRL
fr	s	Fanjat de Saint Font A	1990	Renforcement de poutres en bois lamelle colle par armatures transversales	Dourdan, Nouveau Journal de Charpente- menuiserie-Parquets, n°3, mars 1990, pp. 37-40, fig., Rif : PI-90-3
fr	m	Fanjat de Saint Font A	1986	Moulins du nord	Dourdan, Le nouveau Journal de Charpente-Menuiserie-Parquets, n°12, 1986, pag.63-67, fig., PI-86-12
it	s	Fascia	1993	Fabbrica settecentesca in Ercolano (Napoli)	Il recupero degli edifici antichi (manualistica e nuove tecnologie). Atti del Convegno Internazionale, Napoli 29-30 Ottobre 1993
en	n	FHBRO	1996	FHBRO Code of Practice	Federal Heritage Buildings Review Office

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
it	n	Fiandaca	1993	Tipologia e costruzione: due valori da riscoprire nella riconversione dei manufatti industriali dismessi	Il recupero degli edifici antichi (manualistica e nuove tecnologie). Atti del Convegno Internazionale, Napoli 29-30 Ottobre 1993
it	d	Fioravanti, Macchioni, Negri	1991	Caratteristiche che influiscono sulla resistenza del legno in opera	Recuperare n° 9
it	d	Fioravanti, Macchioni, Negri	1991	Caratteristiche che influiscono sulla resistenza del legno in opera	Rivista "Recuperare", pag. 797
it	d	Fischer, Rinn	1995	Verbesserte Untersuchung des Zustands holzerner Konstruktionen	BDBNachrichten Nordhessen/Thuringen
de	d	Fischer, Rinn	1992	Domchorerweiterung im historischen Kreuzgang des Mainzer Domes	Heidelberg und Mainz
de	d	Fischer, Rinn	1997	Messblatt zur dendro-resistographie: bohrwiderstandsmessungen zur schadenserkennung und restquerschnitt-ermittlung	Opuscoli e disegni informativi
fr	m	Florentin	1994	Le bati pan de bois et sa renovation.	CTBA info, n°51, 1994, pagg. 8-11
fr	m	Florentin	1995	Le plancher bois-beton : quels marches, quel positionnement ?	CTBA info, n°54, 1995, pagg. 8-10
en	s	Fox SP	1972	Shear reinforcements for glued-laminated beams	Department of the environment Canadian forestry service western forest product laboratory Vancouver, British Columbia, Information report VP-X-102, august 1972
en	buf	Frackoviak	1995	Effect of wood buffer capacity on the properties of chipboards. Part1: Buffer capacity of pine wood from different natural regions and sites stored for various periods of time	Prace-Institutu-Technologii-Drewna 39:1/2 pp.29-50
de	d	Fraunhofer-Institut für Holzforschung	1985	Untersuchungen zum tragverhalten von holzpfahlgrundungen in abhangigkeit von der holzzerstorung im untergrund-Abschlussbericht	Braunschweig, Fraunhofer.Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditzinstitut, 1985, pag.27 + annexes, fig., tabl., P 1579
it	p	Frigione, Naddeo, Acierno	1997	Prodotti epossidici utilizzati nel recupero di sistemi strutturali: interazioni con l'ambiente	Atti del convegno "Materiali e tecniche per il restauro", 3-4 ottobre 1997
en	mf	Gagliano J, Frazier CE	2000	Mode I Fracture toughness testing of adhesively bonded wood	Wood Adhesives 2000, South Lake Tahoe, Nevada, june 22-23, 81-83
en	mf	Gagliano J, Frazier CE	2001	An improved method for the fracture cleavage testing of adhesively bonded wood	Wood and Fiber Science, 33 (3), 377-385
it	c	Galliani	1998	Progetto di restauro e identità strutturale degli edifici	Scienza e beni culturali XIV 1998

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
it	d	Gallo	1997	Lacune nell'edilizia medievale: gli apparati lignei	Scienza e beni culturali, XIII 1997
en	d	Galvan-Llopis, Palaia-Perez, Cervera-Moreno, Monzo-Hurtado	1994	Strength estimation of decayed timber in old buildings by means of ultrasonic devices	Sopron '94
en	d	Gambetta	1995	Insect damage to wood and paper in the cultural heritage in Italy	Science and technology for cultural heritage, rivista del CNR
en	d	Gambetta, Macchioni, Martena, Brunetti	1999	Biodegradation in wooden cultural heritages: diagnosis and new control methodologies	Atti della conferenza internazionale sulla Microbiologia e la Conservazione (ICMC'99)
en	wet	Gardner	1996	Application of the Lifshitz-van der Waals acid-base approach to determine wood surface tension components	Wood and Fiber Science 28(4) pp.422-428
en	p	Gardner DJ	1996	Application of the lifshitz-Van Der Waals acid-base approach to determine wood surface tension components	Wood and Fiber Science, 28(4), 1996, pp. 422-428
en	p	Gardner GP	1989	A reinforced glued laminated timber system.	In Proceedings of the second Pacific Timber Engineering Conference, University of Auckland, New Zealand, 28-31 August 1989. Volume 2 [edited by Walford, G.B.]. Auckland, New Zealand: Centre for Continuing Education, University of Auckland (1989) pag.295-3
en	wet	Gardner; WT Tze; SQ Shi	2000	Adhesive wettability of Hydroxymethyl Resorcinol (HMR) treated wood	Wood Adhesives 2000; 22-23 June 2000; South lake Tahoe; Nevada; USA; pp.65-67
it	s	Garofolo	1993	Il recupero costruttivo della "Masseria delle Cesine"	Il recupero degli edifici antichi (manualistica e nuove tecnologie). Atti del Convegno Internazionale, Napoli 29-30 Ottobre 1993
en	p	Geimer, V L Herian, D Xu	1997	Influence of juvenile wood on dimensional stability and tensile properties of flakeboard	Wood and Fiber Science, 29(2), pp. 103-120
it	h	Giangreco	1994	L'evoluzione delle strutture in legno	RILEM 48th Gen. Council Workshop, Trento
it	p	Giordano	1994	Il legno lamellare economico. la ricerca ed i risultati	CLUT, Torino
it	s	Giordano	1964	La moderna tecnica delle costruzioni in legno	Hoepli
en	d	Giuriani, Gubana	1994	A penetration test to evaluate wood decay	First european symposium on non destructive evaluation of wood, Sopron

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
en	d	Glancy, J W Palfreyman, D Button, A Bruce, B King	1990	Use of an immunological method for the detection of lentinus lepideus in distribution poles	Journal of the institute of wood science, vol. 12 No.1
en	p	Goodmann	1996	Forest products as building materials	www.webuild.net/forest.htm
en	mf	Green DW, Kretschmann DE	1994	Moisture content and the properties of clear southern pine	USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Research Paper FPL-RP-531
en	cm	Groestad; POKristiansen	2000	Quantitative determination of melamine in MUF resins using IR-Analysis	Wood Adhesives 2000; 22-23 June 2000; South lake Tahoe – Nevada – USA; pp.84-85
en	p	Guan ZW	1998	Structural behaviour of glued bolt joints using FRP	Proceedings 5th World Conference on Timber Engineering - Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne
it	h	Guardigli	1993	Manualistica e tecniche costruttive tradizionali nell'area bolognese	Il recupero degli edifici antichi (manualistica e nuove tecnologie). Atti del Convegno Internazionale, Napoli 29-30 Ottobre 1993
de	s	Guskow IM	1984	Einsatz und Reparaturen von tragenden Holzkonstruktionen	Weimar, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule fuer Architektur und Bauwesen, 1984, v.16, n.6, pag.537-539, AN : 8930
sv	d	Hansson T	1987	Fuktkvot i inbyggd virke.	Stockholm, Sweden, Rapport- Träteknik Centrum, 1987, n°1 8706038,pag.95
it	c	Hartl	1992	Comportamento al fuoco di costruzioni in legno	Documentazione relativa ai seminari di Firenze e Padova
it	c	Hartl	1989	Comportamento al fuoco delle strutture in legno	Opuscolo edito da Bundesholzwirtschaftsrat Vienna
fr	m	Heusler, M Berger	1994	Gigantisme dans la restauration.	L'industriel sur bois, septembre 1994
de	c	Hollinsky K	1992	In Bretteschichtholz eingeklebte Stabelemente: verhalten bei wechselnden klimatischen Bedingungen. Teil 1: Auszugsversuche	Holzforschung und Holzverftung, 1992, vol.44 (1), pag.3-6, Münchreiterstrasse 22, 1130 Vienna, Austria
en	d	Hoyle, Pellerin	1978	Stress wave inspection of wood structure	Fourth nondestructive testing of wood symposium
it	s	Iannizzaro	1993	Restauro e consolidamento del Teatro Municipale G. Verdi	Il recupero degli edifici antichi (manualistica e nuove tecnologie). Atti del Convegno Internazionale, Napoli 29-30 Ottobre 1993
en	n	ICOMOS International Wood Committee	1999	Principles for the Preservation of Historic Timber Buildings	www.icomos.org/iiwc/charter.html.en
fr	s	Industriel du bois	1994	Reparer avec un mortier de resine armee des arcs en lamelle-colle.	L'industriel sur bois, septembre 1994

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
en	p	Jaic M, Zivanovic- Janezic R,Dekanski A	1996	Comparison of surface properties of Beach- and Oakwood as determined by ESCA method	Holz als Roh-und Werkstoff 54 (1996) 37-41, Springer-Verlag 1996
en	cm	Jaic; RZivanovic; TStevanovic- Janezic; ADekanski	1996	Comparison of the surface properties of beech- and oakwood as determined by ESCA method	Holz als Roh- und Werkstoff 54 (1996) pp.37-41
en	c	Johansson	1995	Glued-in bolts	Timber Engineering STEP 2 - First Edition, Centrum Hout, NL
en	buf	Johns; Niazi	1980	Effect of pH and buffer capacity of wood on the gelation time of urea formaldehyde resin	Wood and Fiber 12(4) pp.255-263
en	s	Jones	1997	Upgrading of timber members in historic buildings	Journal of the institute of wood science , vol. 14 No. 4, Winter 1997
en	d	Kasal	1996	Use of cylindrical specimens to evaluate the strength of in-situ wood structures	Abstract di articolo
en	wet	Kazayawoko; AWNeumann ; JJBalatinecz	1997	Estimating the wettability of wood by the axisymmetric drop shape analysis-contact diameter method	Wood Science and Technology 31 pp.87-95
en	c	Kazayawoko; Balatinecz	1997	Adhesion Mechanisms in woodfiber-polypropylene composites	The fourth International Conference on Woodfiber – Plastic Composites; 12-14 May 1997; Madison – Wisconsin – USA ; pp.81-93
de	s	Kessel	1994	Zur ausführung und sanierung von sichtbaren holzbauteilen.	bauen mit holz 4/94
fr	d	Khebibeche M, Horgues F, Cenac N, Ivanovic P	1997	Des capteurs pour controler sur site les structures en bois.	Le bois national, ed. Monuiserie, n°3, pagg.13 e 15
en	c	Kifetew, Thuvander, Berglund, Lindberg	1998	The effect of drying on wood fracture surfaces from specimens loaded in wet condition	Wood Science and Technology 32 (1998), 83-94
de	s	Klapwijk D, Schroeder M	1982	Ausbesserung und Sanierung schadhafter Hölzer mit Reaktionskunststoff bei Fachwerk-, Steildach- und Holzbalkenkonstruktionen	Köln, Bautenschutz und Bausanierung, 1982, v.5, n.4, pag.118-122, fig., AN : 8956
jap	mf	Kobayashi T, Hatano Y, Mizumachi H	1991	Rheological study on adhesive strength II. Relationship between fracture toughness and adhesive strength of adhesion systems bonded with polyvinyl acetate or epoxy resin	Mokuzai Gakkaishi, 37 (4), 331-338
de	c	Kopia, seltman	1983	Betrachtungen zum thermoplastischen anformen. teil 3: verbundfestigkeit	Holztechnologie, 24 N°2

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
en	d	Korzeniowski , Dzbenski	1994	Predicting mechanical properties of coniferous structural timbers from impact hardness	Sopron '94
en	wet	Kosonen; GT Caneba; DG Gardner; TG Rials	1999	Influence of copolymer composition and chain architecture on the woodfiber – polymer interface	Fifth International Conference on Woodfiber – Plastic Composites; 26-27 May 1999; Madison; Wisconsin; USA; p.303
en	buf	Krilov; WHLasander	1988	Acidity of Heartwood and Sapwood in some eucalypt species	Hozforschung 42(4) pp.253-258
en	cm	Laboire; CE Frazier	2000	Morphology of the wood – PF interphase detected by solid state nuclear magnetic resonance	Wood Adhesives 2000; 22-23 June 2000; South lake Tahoe – Nevada - USA pp.94-95
fr	s	Lacroix	1989	Essais de comportement et de rupture d'une poutre fleche en "bois renforce" par des armatures en acier et du beton de resine epoxyde	Essais pour Renoantic
en	cm	Laigle; Kamoun; Pizzi	1998	Particleboard I.B. forcast by TMA bending in UF adhesives curing	Holz als Roh- und Werkstoff 56 p.154
it	h	Laner	1997	Considerazioni su alcune coperture in legno attorno al piavon	Adrastea, 9/1997 pp. 28-32
fr	cm	Laurent; Y Trenard	1981	Etude et observations d'un bois de Hetre stratifié densifié	Holzfoschung 35 (1981) pp.27-32
en	c	Lavisci P, Berti S, Pizzo B, Triboulot P, Zanuttini R	2001	A shear test for structural adhesives used in the consolidation of old timber	Holz als Roh- und Werkstoff, 59 (1/2), 145-152
en	c	Lavisci P, Berti S, Pizzo B, Triboulot P, Zanuttini R	2001	A delamination test for structural wood adhesives used in thick joints	Holz als Roh- und Werkstoff, 59 (1/2), 153-154
en	c	Law PW, Yttrup PJ	1989	Epoxy injected bolts in shear.	In Proceedings of the second Pacific Timber Engineering Conference, University of Auckland, New Zealand, 28-31 August 1989. Volume 3 [edited by Walford, G.B.]. Auckland, New Zealand: Centre for Continuing Education, University of Auckland (1989) pag.85-91
fr	m	Le Batisseur Européen	1992	Les travaux de rehabilitation en Europe.	Le batisseur europeen, N°38, 1992,pagg. 12-14
fr	s	Le Moniteur	1994	Le bois-beton pour renforcer des planchers anciens.	Le moniteur, n°4744, oct. 1994, pag.103
en	c	Lefebvre et al	2000	The critical humidity effect in the adhesion of epoxy to glass: role of hydrogen bonding	J.Adhesion Sci. Technology 14 (7) pp.925-937
fr	m	L'entreprene ur	1995	Plancher bois-beton.	L'entrepreneur, n°126, 1995, pagg.50-51

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
it	d	Liotta	1989	Cattedrale di Agrigento	Quaderni di lavoro del Centro regionale per la progettazione e il restauro. Serie I, n.2
it	d	Liotta	1989	Duomo di Enna	Quaderni di lavoro del Centro regionale per la progettazione e il restauro. Serie I, n.5
en	c	Liptakova E, Kudela J	1994	Analysis of the Wood-Wetting Process	Holzforschung / Vol. 48 / 1994 / No.2
en	wet	Liptáková; Kúdela	1994	Analysis of the wood-wetting process	Hozforschung 48 pp.139-144
en	c	Liu; Rials; MP Wolcott; DJ Gardner	1995	Interactions between wood fibers and amorphous polymers	Woodfiber – Plastic Composites; 1-3 May 1995; Madison – Wisconsin – USA; pp.74-81
t	mf	Logemann M, Schelling W	1992	Die Bruchzahigkeit von Fichte und ihre wesentlichen Einflussparameter. Untersuchungen im Mode-2	Holz als Roh- und Werkstoff, 50, 117-121
en	p	Lu, Wu, McNabb	2000	Chemical coupling in wood fiber and polymer composites: a review of coupling agents and treatments	Wood and Fiber Science 32, 2000
en	d	Macchioni	1998	Inspection techniques for ancient wooden structures	Structural analysis of historical constructions II
en	d	Madsen	1994	New equipment for inspection of building constructions in relation to fungus attacks	Sopron '94
en	wet	Maldas; DPKamdem	1999	Wettability of extracted southern pine	Forest Product Journal; 49 (11/12); pp.91-93
en	wet	Maldas; DPKamdem	1998	Surface tension and wettability of CCA-treated red maple	Wood and Fiber Science 30 (4); pp.368-373
de	s	Malinowsky und JJeruzal	1994	Sanierung eines Gekrümmten Brettschichtholzbinders.	bauen mit holz 7/94
en	mf	Malmberg M, Frazier CE	2000	Wood species dependence of pMDI adhesion using mode I fracture	Wood Adhesives 2000, South Lake Tahoe, Nevada, june 22-23, 98-99
it	d	Mannoni, C Montagni	1998	Le indagini preliminari (storiche, diagnostiche, materiche) al progetto di restauro: utilità, necessità, superficialità esecutive, funzioni essenziali, costi in rapporto ai risultati da ottenere e/o ottenuti	Scienza e beni culturali, XIV 1998
en	mf	Mansfield- Williams H, Nicholls T	1996	Analysis of the parabolic tapered end-notched flexural specimen for the determination of fracture energy in forward shear	LES wood, 48 (9), 249-256
en	c	Mantanis, Young, Rowell	1995	Swelling of wood. part 3. effect of temperature and extractives on rate and maximum swelling	Holzforsch. 40(1995)239-248
en	wet	Mantanis; RA Young	1997	Wetting of wood	Wood Science and Technology 31 pp.339-353

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
it	s	Marradi AM, Paolini L, Toti D	1989	La copertura del Salone de' Dugento in Palazzo Vecchio: il restauro funzionale della struttura	Atti del 2° Congresso Nazionale sul Restauro del Legno, Firenze, 08-11- 1989
it	m	Marsero	1993	Considerazioni di carattere economico sulla manutenzione e messa in sicurezza dei rivestimenti lapidei sottili in facciata	Il recupero degli edifici antichi (manualistica e nuove tecnologie). Atti del Convegno Internazionale, Napoli 29-30 Ottobre 1993
it	d	Martinelli, Pignatelli	1991	L'indagine dendrocronologica	Recuperare, n. 9/1991
it	d	Maselli, Costanza	1999	Il collaudo statico degli edifici costruiti negli anni sessanta a Roma e nel resto d'Italia: indagini diagnostiche e verifiche statiche di collaudo	Incontro Tecnico organizzato da Tecno Futur Service. Restauro , FerraraFiere, marzo 1999
it	d	Matthaes	1999	Ladatazione scientifica di oggetti d'arte in legno	rivista: Le scienze, N.359, luglio 1998
en	d	Matthaes	1999	The scientific dating of wooden art objects	Le scienze, N.359, luglio 1998
it	d	Mattone	1997	Indagini non distruttive per la valutazione dello stato di conservazione delle strutture lignee	"Adrastea", n. 9/97 pp.20-27
en	d	Mattone	1999	Use of non-destructive tests in the evaluation of the state of repair consolidation intervention on wooden structures	6th International Conference on "Non-Destructive Testing and Microanalysis for the Diagnostic and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage"
en	mic	Mattoso et al	1999	Atomic force microscopy as a tool for the evaluation of natural fibers and polymer surface	Fifth International Conference on Woodfiber – Plastic Composites; 26- 27 May 1999; Madison – Wisconsin - USA pp.43-56
fr	d	Maucler	1997	Desordres a la suit d'aménagement de combles.	Le batiment artisanal, N°455, juillet- aout 1997, pagg. 20-21
fr	d	Maucler G	1997	L'aménagement de combles (cause de desordres).	CSTB magazine, n°106 Juillet-aout 1997
en	c	McIntyre	1972	Estimation of the distortion of wood-based panels. Particularly doors subject to a climatic differential	Journal of the institute of wood science
de	s	Meierhofer UA	1985	Kunststoffsanierte Holzbauteile unter schwingender Beanspruchung	Zürich, Schweizer Ingenieur und Architekt, 1985, vol.103, n.51/52, pag.1260-1263, fig., AN : 8985
en	s	Mettem, Bainbridge, Harvey, Ansell, Broughton, Hutchinson	1999	Evaluation of material combinations,for bonded in rods to achieve improved timber connections	Meeting thirty-two, Graz, Austria
en	s	Mettem, Davis	1996	resin bonded repair systems for structural timber	Construction repair March/April 1996
en	s	Mettem, Davis	1996	resin bonded repair systems for structural timber - part 2	Construction repair May/June 1996

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
EN	d	Mettem, Page, Davis	1995	Long-term performance of resin bonded systems for structural timbers - Case studies of repairs in service	report PIF 108/4 TRADA Technology Ltd
en	s	Mettem, Page, Robinson	1992	Repairs of structural timbers - Tests on experimental beam repairs	report PIF 63/1 TRADA
EN	s	Mettem, Page, Zeki	1995	Long-term performance of resin bonded systems for structural timbers - Classification and upgrading systems using epoxy resins	report PIF 108/1 TRADA Technology Ltd
de	wet	MHameed; ERoffael	1999	On the wettability of sapwood and heartwood of various woodspecies (Pine; Douglas fir and Larch)	Holz als Roh- und Werkstoff, 57 (1999); pp.287-293
de	d	Mohler Karlsruhe	1986	Zur Sicherung unten ausgeklinkter Träger mittels Schraubenbolzen	Bauen mit Holz, vol.87, n°3, 1986, pp. 148-149, fig., Ref : AK-86-3
de	d	Monck W	1985	Bauzustandsuntersuchungen von Holzbalkendecken mit Empfehlungen zur Darstellung und Dokumentation der Baushäden.	Holztechnologie, 1985, vol.26 (n.6), pag. 293-299,
de	d	Mönck, Hähnel	1992	Instandsetzung eines spätmittelalterlichen Speichers, Teil 2.	Bautenschutz + bausanierung 3/1992
it	n	Montagni	1998	Il cantiere pilota per il recupero del centro storico di Genova: dalle problematiche procedurali a quelle realizzate	Scienza e beni culturali XIV 1998
it	n	Mor	1994	Problematiche progettuali ed esecutive nel recupero di coperture e di strutture orizzontali in legno	Tesi di Dottorato, Pol. di MI - DISET
it	n	Mor	1998	Il progetto di restauro delle forme di manutenzione e come forma di manutenzione	Scienza e beni culturali XIV 1998
en	c	Morris, Hunt, Adams	1999	The effects of experimental parameters on the fracture energy of wood-based panels	Journal of the institute of wood science, vol 15, n. 1, 1995
de	p	Müller J, Roth W	1991	Untersuchungen zum Tragverhalten von parallel zur Faser in Nadelholz eingeleimten Stäben aus unterschiedlichen Materialien	Holz Roh-Werkstoff, vol.49, N°3, pp.85-90, fig., Ref : AC-91-3
de	p	Müller J, Roth W	1991	Technologische Eigenschaften von armierten Polymerbetonen und Untersuchungen zu deren Eignung als Holzersatzelemente	Holz Roh-Werkstoff, vol.49, N°5, pp.185-190, fig., Ref : AC-91-5
it	s	Munafò Placido	1991	Recupero dei solai in legno	Dario Flaccovio editore
en	buf	Myers	1978	How adjusting fiber acidity improved strength of dry-formed hardboards	Forest Product Journal 28(3) pp.48-50
en	p	Mynott	1973	Adhesives for radio frequency heating	Journal of the institute of wood science

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
en	d	Nappi	1998	Non-destructive techniques and system identification applied to historical constructions	Structural analysis of historical constructions II
es	d	Navarrete	1995	Factores de degradación abiótica e iótica	Manuales de Diagnosi
en	mf	Navi P, Rastogi PK, Pflug L, Huet C	1991	Study of wood fracture by holographic interferometry	International timber engineering conference, London
en	buf	Nelson	1973	Effects of wood and pulp properties on medium density dry-formed hardboard	Forest Product Journal 23(9) pp.72-80
en	s	Newman	1997	resin-bonded repair systems for structural timber	The Building Conservation Directory, 1997
it	n	Nicolella	1993	La pianificazione operativa nel recupero edilizio	Il recupero degli edifici antichi (manualistica e nuove tecnologie). Atti del Convegno Internazionale, Napoli 29-30 Ottobre 1993
en	c	Norlin, Lam	1999	Shear behaviour of laminated Douglas fir veneer	Wood Science and Technology 33 (1999)
en	wet	Nussbaum	1999	Natural surface inactivation of Scots pine and Norway spruce evaluated by contact angle measurements	Holz als Roh- und Werkstoff , 57 (1999); pp.419-424
fr	s	Oguey	1989	Essais de comportement et de rupture d'une poutre flechie en "bois renforcé" par des armatures en acier et du beton de resine epoxide	EINEV - società RENOANTIC
en	c	Okkonen, River	1988	Factors affecting the strength of block-shear specimens	For. Prod. J. 39(1):43-50
en	buf	Packman	1960	The acidity of wood	Holzforschung 14(6) pp.178-183
en	cm	Pandey, Theagarajan	1997	Analysis of wood surfaces and ground wood by diffuse reflectance (DRIFT) and photoacoustic (PAC) Fourier transform infrared spectroscopic techniques	Holz als Roh- und Werkstoff 55 (1997) pp.383-390
en	n	Park	1995	The ramifications of the european standards for wood and wood products	Journal of the institute of wood science, vol. 13 No.5
it	s	Pasanisi	1996	Strutture di legno	XYLON, Nov-Dic, 1996
de	s	Paul O	1989	Das Beta-Verfahren Bewährung und Neuentwicklung	Köln, Bautenschutz und Bausanierung, 1989, v.12, n.1, pag.17-18, 21-22, fig., AN : 9042
en	c	Pellicane P, Schmidt D	1989	Effect of thermal exposure on the load-slip behaviour of elastomeric construction adhesives in wood joints	J. Inst. Wood Sci., 11 (5), pp. 202-203
en	p	Phillips MW, Selwin JE	1978	Epoxies for wood repairs in historic buildings	Publication, Heritage Conservation and Recreation service, US, Department of the Interior, n.1, 1978, pag.67, ref.31, pl.23 PR In English, (Ja :7906)

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
en	s	Piazza	1994	Restoration of timber floors via a composite timber-timber solution	Workshop Rilem 1994
it	p	Piazza, Zanuttini	1996	Il legno lamellare incollato	Dip. di meccanica strutturale e progettazione automatica, rapporto n.6
en	d	Pinto, De Medici, Caterina	1998	Preliminary project contents in interventions on the existing buildings	Scienza e beni culturali, XIV
it	d	Pizzo B	1999	Compatibilità, durabilità e reversibilità nel restauro delle strutture lignee. Diagnosi del degrado, tecniche e materiali per il consolidamento.	Dottorato di ricerca in Tecnologie Chimiche e dei nuovi materiali- Un. Di Palermo, Dip. Di Ing. Chimica dei Processi e dei Materiali
it	d	Pizzo B	1999	Compatibilità, durabilità e reversibilità nel restauro delle strutture lignee. Diagnosi del degrado, tecniche e materiali per il consolidamento	Dottorato di ricerca in Tecnologie Chimiche e dei Nuovi Materiali, XI Ciclo
de	buf	Plobete; E Roffael	1985	On chemical changes in wood particles during pressing with urea formaldehyde resins as binder	Holz als Roh- und Werkstoff 43 p.57-62
it	d	Priviero	1985	Comportamento strutturale del legno lamellare. Indagini sull'efficienza dei piani di incollaggio fra le lamelle	tesi di laurea, Un. di PD
en	cm	Probst; MPLaborie; APizzi; AMerlin; XDeglise	1997	Molecular Mechanics/Experimental methods applied to varnish/primer/wood interactions	Holzforschung 51 pp.459-466
it	s	Rachello E, Del Marco O	1991	Manutenzione dei manufatti in legno per l'edilizia.	ITL servizio documentazione; bibliografia anotata- Supplemento n°2- vol.XII- 1991 del bollettino nuove acquisizioni della biblioteca
DE	s	Radovic B, Hans Goth	1992	Entwicklung und Stand eines Verfahrens zur Sanierung von Fugen im Brettschichtholz.	bauen mit holz 9/92
de	s	Radovic B, Hans Goth	1992	Entwicklung und stand eines Verfahrens zur Sanierung von Fugen im Brettschichtholz.	bauen mit holz 10/92
en	m	Raj D	1993	The "resin d'etre" of wood repair	Timber trade journal, 1993, n°6075, pag.8-10
en	c	Raj; Kokta	1995	Effect of aging cycle on mechanical properties of HDPE-pretreated wood fiber composites	Woodfiber – Plastic Composites; 1-3 May 1995; Madison – Wisconsin – USA; pp.235-239
en	p	Raknes	1997	Durability of structural wood adhesives after 30 years ageing	Holz als Roh- und W. 55(1997):83-90
it	d	Rancan	1995	La conoscenza dell'esistente prima di tutto	rivista: Recupero e conservazione, 6/1995

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
it	p	Redigolo	1996	L'impiego dei collanti epossidici nei collegamenti delle strutture lignee: analisi funzionale mediante prove di penetrazione nel legno di Picea abies	tesi di laurea Un. di PD
en	s	Reinprecht L, Joscak p	1996	Reinforcement of model-damage wooden elements. Part 2: Restoration of wooden elements by the extension method using natural wood or wood-epoxy composite	Drevarsky Vyskum, vol.41, n°2, 1996, pag. 41-55
en	s	Reinprecht L, Joscak p	1994	Reinforcement of model-damage wooden elements. Part 1: Local perforation of wooden elements and their gap-filling treatment	Drevarsky Vyskum, 1996, pag. 1-21
en	mf	Reiterer A, Stanzl-Tschegg SE, Tschegg EK	2000	Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood	Wood Science and Technology, 34, 417-430
en	c	Rials; Wolcott	1997	Viewing wood-plastic composites as interpenetrating networks	The fourth International Conference on Woodfiber – Plastic Composites; 12-14 May 1997; Madison – Wisconsin – USA; pp.104-110
en	c	Riberholt H	1988	Glued bolts in glulam - Proposals for CIB code	International council for building research studies and documentation working commission, CIB-W18A/21-7-2, september 1988
en	c	Riberholt H	1986	Glued bolts in glulam	Department of structural engineering, technical university of Denmark, serie R, n°210, march 1986
it	s	Ricottini	1996	Uso di adesivi per legno per fini strutturali ed in particolare per il consolidamento di manufatti antichi	I.R.L. Servizio Documentazione
de	d	Rinn	1994	Baum-und Bauholz-Inspektionen mit Resistograph	Sopron
en	d	Rinn	1993	Catalog of relative density profiles of trees, poles, and timber derived from Resistograph micro-drillings	Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood
en	d	Rinn	1995	Tools for growth rate assessment on standing trees, cores and stem sisks	The European Forest Resource-Silviculture and Wood Quality
en	d	Rinn	1994	Resistographic inspection of construction timber, poles and trees	Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast Australia
en	d	Rinn	1993	Catalog of relative density profiles of trees, poles and timber derived from Resistograph micro-drillings	9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood
en	d	Rinn	1996	Resistographic visualization of tree-ring density variations	Tree Rings, Environment and Humanity, pp.871-878
de	d	Rinn	1993	Gucken, klopfen, bohren	Rivista: "Bausubstanz"

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
en	d	Rinn	1996	Nondestructive inspection of building timber with resistograph micro drillings	Abstract di articolo
de	d	Rinn, Becker, Kromer	1990	Ein neues verfahren zur direkten messung der holzdichte bei laub-und nadelholzern	Dendrochronologia 7(1990), 159-168
en	d	Rinn, Schweingrub er, Schar	1995	Resistograph and X-ray density charts of wood	Gottingen
en	d	Rinn, Schweingrub er, Schar	1996	Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of differents wood species	Holzforschung, International journal of the biology, chemistry, physics and technology of wood
en	mf	River BH, Scott CT, Koutsky JA	1989	Adhesive joint fracture behaviour during setting and ageing	Forest Products Journal, 39 (11/12), 23-28
en	p	River, Ebewele, Myers	1994	Failure mechanisms in wood joints bonded with urea-formaldehyde adhesives	Holz als Roh- u. W. 52(1994)179-184
it	d	Rizzo, B Pizzo	1998	Compatibilità, durabilità e reversibilità negli interventi di strutture lignee	Scienza e beni culturali, XIV 1998
it	s	Rizzo, Pizzo	1997	L'uso di resine epossidiche nel recupero di manufatti lignei	Atti del convegno "Materiali e tecniche per il restauro", 3-4 ottobre 1997
en	s	Rodd PD, Hison BO, Spriggs RA	1989	Resin injected mechanically fastened timber joints.	In Proceeding of the Second Pacific Timber Engineering Conference. University of Auckland, New Zealand, 28-31 August 1989. Volume 2 [edited by Walford, G.B.]. Auckland, New Zealand: Centre for Continuing Education, University of Auckland (1989) pag.131-1
de	buf	Roffael	1987	Change in pH-value buffering capacity and volatile acid content in green pine chips due to air drying	Holz als Roh- und Werkstoff 45 p.470
de	buf	Roffael; N Parameswaran	1986	Influence of latent acidity in beech wood chips on their gluability with urea formaldehyde resins	Holz als Roh- und Werkstoff 44 pp.389-393
de	buf	Roffael; Rauch	1974	Extractives of oak and their influence on the gluing with alkaline phenolic – formaldehyde resins	Holz als Roh- und Werkstoff 32 pp.182-187
en	p	Roper P	1984	Epoxy resins used to restore fine medieval timbers	Building Trades Journal, 29 march 1984, 187 (5548) pag.14-15 (84-04/210)
en	mic	Rosenqvist	1999	Localization of wood improvement compounds by microautoradiography and SEM	Holzforschung 53 pp.648-654
en	d	Ross, Degroot, Nelson	1996	Nondestructive assessment of the strength of biologically degraded wood	Abstract di articolo

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
en	d	Ross, DeGroot, Soltis, McDonald	1996	Application of stress wave nondestructive evaluation to historic structures	Abstract di articolo
en	d	Ross, Pellerin	1993	Nondestructive testing for assessing wood members in structures	General technical report FPL-GPR-70
en	p	Rowell, Ellis	1984	Reaction of epoxides with wood	Advance in Chem. ser. 207 Amer. Chem Soc., Washington
it	m	Rubeo	1996	Legno: nessuna preclusione nell'edilizia	Mondo legno 5/1996
it	c	Ruffino	1992	Comportamento al fuoco delle strutture in legno	L'Edilizia 12/1992
de	m	Rug W	1987	Stand und entwicklungstendenzen im Holzbau.	Holztechnologie, 1987, vol.28 (n.4) pag.198-201, inst. Industriebau, Bauakademie der DDR, Berlin.
de	c	Rug W, Seeman A	1989	Ermittlung von Festigkeitskennwerten an alten Holzkonstruktionen.	Holztechnologie, 1989, vol.30 (n.2), pag. 69-73, Bauakademie der DDR
de	d	Rug W, Seeman A	1988	Festigkeit von Altholz.	Holztechnologie, 1988, vol.29 (n.4), pag. 186-190, 223, Bauakademie der DDR
en	s	Sadakata Kei	1990	Applying glulam anchor technique to wooden structure joints	international timber engineering conference Tokyo, october 1990, pag. 611-618
en	s	Sanders, Emkin, Avent	1978	Epoxy repair of timber roof trusses	Journ. of the Construction division
fr	d	Sandoz	1991	Bois suisse dans les constructions: le triage ultrason	Journal de la construction. No.5, Mars 1991
en	d	Sandoz	1994	Reliability assurance of structural timber using ultrasound	Sopron '94
it	d	Sansonetti, A Pasetti, L Trivella	1997	Una proposta per una metodologia di monitoraggio degli interventi di integrazione delle lacune	Scienza e beni culturali, XIII 1997
en	d	Saporiti Machado	1996	Reasons supporting the decision of LNEC in purchasing the Resistograph equipment	Fotocopie provenienti da : Laboratorio Nacional de Engenharia Civil
t	mf	Schatz T	1995	Zur Bestimmung der Bruchenergie rate Gf bei Holz	Holz als Roh- und Werkstoff, 53, 171-176
de	s	Scherberger M, Wiedmann L	1984	Sanierung von ausklinkungen. Durch von unten engeleimte Gewindestangen konnten ausgeklinkte, schadhafte Brettschichträger wieder neue Stabilität erhalten	Karlsruhe, Bauen mit Holz, 1984, v.86, n.11, pag.784-786, fig., AN : 8849
en	cm	Schmidt	1998	Aspects of wood adhesion: applications of 13C CP/MAS NMR and fracture testing	PhD thesis 1998; Virginia Polytechnic Institute and State University
en	cm	Schmidt; Frazier	2000	Application of C-13 CP/MAS NMR to the study of the wood-phenol formaldehyde bondline	Wood Adhesives 2000; 22-23 June 2000; South lake Tahoe – Nevada - USA pp.71-73
de	d	Seemann, Rug	1988	Festigkeit von Altholz	Holztechnologie

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
de	d	Seemann, Rug	1989	Ermittlung von Festigkeitskennwerten an alten Holzkonstruktionen	Holztechnologie
it	h	Serafini	1998	Unità stratigrafiche fittizie e funzioni strutturali in una copertura lignea	Scienza e beni culturali XIV
en	cm	SGiraud et al	1997	Kinetics of wood adhesives gelling by low resolution pulsed 1H - NMR	Holzforschung und Holzverwertung 49 No.3; pp.50-56
en	wet	Shen; J Nylund; JB Rosenholm	1998	Estimation of the surface energy and acid-base properties of wood by means of wetting method	Holzforschung 52 (1998); p.521-529
en	wet	Shupe; Hse; Choong; Groom	1998	Effect of wood grain and veneer side on loblolly pine veneer wettability	Forest Product Journal 48(6) pp.95-97
en	mic	Singh; BDawson; RFranich; FCowan; JWarnes	1999	The relationship between pit membrane ultrastructure and chemical impregnability of wood	Holzforschung 53 pp.341-346
en	buf	Slay; PH Short; DC Wright	1980	Catalytic effects of extractives from pressure-refined fiber on the gelation time of urea formaldehyde resin	Forest Product Journal 30(3) pp.22-23
en	mf	Smith I, Chui YH	1994	Factors affecting mode I fracture energy of plantation-grown red pine	Wood Science and Technology, 28, 147-157
it	p	Sorbetti-Guerri	1978	Studio di un provino unificato e dei relativi congegni per prove a trazione ed a taglio di strutture in legno lamellari incollate	Italia For. e Mont.
it	n	Spinelli	1984	Recupero e verifica delle strutture di legno: problemi strutturali e normativi	INARCOS, Bologna n°451 Set 1984
en	buf	Stamm	1961	Three methods for determining the pH of wood and paper	Forest Product Journal pp.310-312
en	c	Stanger, Blomquist	1965	block shear, cross-lap tension and glueline cleavage methods of testing glued joints	FPJ 1965 pp 468-474
en	mf	Stanzl-Tschegg SE, Tan DM, Tschegg EK	1995	New splitting method for wood fracture characterization	Wood Science and Technology, 29(1), 31-50
en	mf	Stanzl-Tschegg SE, Tan DM, Tschegg EK	1996	Mode II fracture tests on spruce wood	Mokuzai Gakkaishi, 42 (7), 642-650
en	mf	Stanzl-Tschegg SE, Tschegg EK, Teischinger A	1994	Fracture energy of spruce wood after different drying procedures	Wood and Fiber Science, 26 (4), 467-478

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
en	cm	Steward; HM Wilson; PJ Hendra; IM Morrison	1995	Fourier-Transform Infrared and Raman spettroscopic study of biochemical treatments of Oak wood (quercus rubra) and Barley (Hordeum vulgare) Straw	J.Agric.Chem 43 pp.2219-2225
en	d	Stewart, Anthony	1990	Reliability assessment of existing wood structures	International Timber Engineering Conference, Tokyo
it	m	Stoveri	1998	Le resine e il recupero delle strutture lignee	Il nuovo cantiere, n. 2 (febbraio 1998), 31-33
en	c	Strickler	1968	Adhesive durability: specimen designs for accelerated tests	For. Prod. J. 14(1):84-90
en	s	Stumes P, Eng P	1982	Structural rehabilitation of deteriorated timber	The W .E.R.- System Manual, TA, 424.4, S79, 1979 (11022)
en	s	Stumes Paul, Eng P	1975	Testing the efficiency of wood epoxy reinforcement system	Bulletin, association for preservation technology, 1975,vol.VII, n°(3) pag.2-35 (80-07/447)
en	buf	Subramanian ; KN Somasekhar an; WE Johns	1983	Acidity of wood	Holzforschung 37 pp.117-120
en	c	Suddarth SK	1990	Test performance of 1-½ inch bolts in glulam - row effect and effect of subsequent drying	Wood Design Focus, 1990, vol.1 (1), pag.4-7
en	c	Suleiman, Larfeldt, Leckner, Gustavsson	1999	Thermal conductivity and diffusivity of wood	Wood Science and Technology 33 (1999)
en	s	Szabo T	1975	Reinforcement of structural wood members	Eastern forest products laboratory, Report opx-149 E
en	s	Szabo T	1977	Plywood reinforcement for structural wood members with internal defects	Bulletin, the association for preservation technology, vol.IX, n°1, 1977
en	d	Szymani, McDonald	1981	Defect detection in lumber: state of the art	Forest Products Journal. Vol. 31, No. 11
it	s	Tampone	1996	Il restauro delle strutture di legno	Hoepli, MI
it	s	Tampone Gennaro	1989	Restauro strutturale con lamine metalliche dei solai lignei della sede del Genio Civile di Firenze	Atti del 2° Congresso Nazionale sul Restauro del Legno, Firenze, 08-11-1989
it	s	Tampone Gennaro	1989	Sostruzione e lamine metalliche per il consolidamento di una capriata lignea nella Sala di scherma della Fortezza da Basso a Firenze	Atti del 2° Congresso Nazionale sul Restauro del Legno, Firenze, 08-11-1989
en	mf	Tan DM, Stanzl- Tschegg, Tschegg EK	1995	Models of wood fracture in Mode I and Mode II	Holz als Roh-und Werkstoff 53 (1995) 159-164, Springer-Verlag 1995
fr	n	Taupin	1998	Inquietudes, strategies de la securite, identites dans le soin des edificies historiques	Structural analysis of historical constructions II

LAN.	GR.	AUTEUR	DATE	TITRE	REF. BIBLIO
en	p	Taylor	1996	Surface coatings defects on timber. Their cause and cure	Journal of the institute of wood science, vol. 14 No.2
en	d	Taylor, West	1990	Use of stainless steel pins for in-situ measurement of moisture contents in the structural members of a glulam framed church	J.Inst. Wood Sci
it	d	Tessarini, Del Senno	1998	La diagnosi non distruttiva-strumento preliminare alla progettazione nel restauro-studio di un caso	Scienza e beni culturali XIV 1998
en	d	Thelandersson	1997	Diagnosis and repair of Historic loadbearing Timber	Rilem, opuscolo della conferenza tenuta a Firenze nell'ottobre 1997
en	wet	Thygesen; Barsberg	1997	Plant Fiber Surface Characterization by Wetting Analysis	The fourth International Conference on Woodfiber – Plastic Composites; 12-14 May 1997; Madison; Wisconsin; USA; pp.69-75
en	d	Tiitta, Beall, Biernacki	1998	Acousto-ultrasonic assessment of internal decay in glulam beams	Wood and Fiber Science, pp. 259-272
it	d	Togni	1994	Anomalie e difetti del legno, definizioni e metodi per il riconoscimento	Corso di aggiornamento: Classificazione del legno per uso strutturale, Un. di Firenze
en	c	Tribulot, Jodin, Pluvinage	1984	Validity of fracture mechanics concepts applied to wood by finite element calculation	Wood Science and Technology 18 (1984), 51-58
de	m	Trubswetter T	1988	Holzkonstruktionen in altbauten sind oft sanierbar	Stuttgart, Holz-zentralblatt, n°31, 1988, pag.453-454, 6 fig., AA-88-3-31, trad 2999.
en	d	Tsoumis	1990	Wood identification in the detection of crimes	Journal of the institute of wood science
it	h	Tubaro	1993	Aspetti storici compositivi e tecnologici del patrimonio edilizio della Val Lagarina e delle Valli del Natisone	Il recupero degli edifici antichi (manualistica e nuove tecnologie). Atti del Convegno Internazionale, Napoli 29-30 Ottobre 1993
en	s	Uzielli	1995	Restoring timber structures - repair and strengthening	Timber Engineering STEP 2 - First Edition, Centrum Hout, NL
it	s	Uzielli	1992	Corso sul restauro delle strutture di legno	Materiale didattico ad uso dei partecipanti al corso
it	d	Uzielli	1992	Valutazione della capacità portante degli elementi strutturali lignei	"L'Edilizia", n.12/92, pp.753761
cat	d	Uzielli	1995	Sistemes de diagnosi	Manual de diagnosi, patologia i intervenció en estructures de fusta
en	mf	Valentin G, Caumes P	1989	Crack propagation in mixed mode in wood: a new specimen	Wood Science and Technology, 23, 43-53
en	s	Van gemert, Beeldens	1997	strengthening of timber structures using polymer concrete	2nd EASPIC symposium Proceedings - Ed. Y. OHAMA 471-480

Monsieur LAVISCI Paolo

DOCTORAT de l'UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ, NANCY-1
en SCIENCES et TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES

VU, APPROUVE ET PERMIS D'IMPRIMER

Nancy, le 28 DEC. 2001 n° 601

Le Président de l'Université

