

N°d'ordre : 2925

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DE SCIENCES PHYSIQUES ET DE
L'INGÉNIEUR

par

Juliette SURLEAU

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : MÉCANIQUE

**DURÉE DE VIE DES ASSEMBLAGES PAR GOUJONS
COLLÉS SOUS SOLLICITATIONS MÉCANIQUES ET
HYGROTHERMIQUES**

Soutenue le : 13 décembre 2004

Après avis de :

MM. Yves DELMAS, Professeur, Université de Reims
Jean-François JULLIEN, Professeur, INSA de Lyon

Rapporteurs

Devant la commission d'examen formée de :

MM. Gérard VALENTIN, Professeur, Université de Bordeaux I
Yves DELMAS, Professeur, Université de Reims
Jean-François JULLIEN, Professeur, INSA de Lyon
Emmanuel MAURIN, Docteur, L.R.M.H.
Dominique MILLEREUX, Secrétaire Général F.I.B.C.
Pierre MORLIER, Professeur, Université de Bordeaux I

Président

Examineurs

Remerciements

En premier lieu, je souhaite remercier les Professeurs Yves Delmas et Jean-François Jullien pour avoir bien voulu rapporter sur ma thèse et me faire partager leur expérience et leurs connaissances.

Pour sa grande disponibilité, sa confiance et sa bonne humeur, je souhaite remercier vivement le Professeur Pierre Morlier et lui prouver ma reconnaissance de m'avoir accueilli dans son laboratoire et de m'avoir encouragée et soutenue au quotidien dans mon travail. Cette collaboration m'a été et m'est toujours précieuse.

Ces trois années de doctorat ont été aussi l'occasion de rencontrer une équipe chaleureuse et compétente qui m'a permis de mener à bien mes expériences, je pense particulièrement à Philippe Taris et Jean-Louis Daban-Haurou. Un grand merci donc à tous ceux qui ont contribué à la réussite de ces travaux.

Enfin, parce que sans eux non plus je n'aurais peut être pas pu accomplir ce travail, j'ai une pensée toute particulière pour ma famille et ceux qui m'entourent et me sont chers.

Table des matières

Introduction	7
1 Constat bibliographique et réglementaire	11
1.1 Constat bibliographique	12
1.1.1 Les goujons collés	12
1.1.2 La durée de vie	17
1.2 Résistance à l'arrachement d'un goujon collé, aspect réglementaire	18
1.2.1 Les goujons collés : une vision élargie sur la recherche mondiale	19
1.2.2 Aspect réglementaire	20
1.2.2.1 Les formulations disponibles dans la littérature	22
1.2.2.2 Exploitation de la base de données	27
2 Campagne expérimentale de court terme	35
2.1 Les essais en grandeur structurale	36
2.1.1 Essais sur du lamellé collé	36
2.1.1.1 Conditionnement des éprouvettes	37
2.1.1.2 Géométrie et fonctionnement mécanique	41
2.1.1.3 Matériel et méthode	44
2.1.1.4 Résultats	45
2.1.1.4.1 Goujons collés à l'époxy	45
2.1.1.4.2 Goujons collés au polyuréthane	47
2.1.1.4.3 Récapitulatif des essais de court terme	50
2.1.2 Essais sur du chêne	50
2.1.2.1 Géométrie des éprouvettes	50
2.1.2.2 Résultats	52
2.2 Les essais de petites dimensions	54
2.2.1 A température ambiante	54

2.2.1.1	Fabrication et géométrie de l'éprouvette	55
2.2.1.1.1	Le procédé de fabrication	57
2.2.1.1.2	Géométries des éprouvettes	59
2.2.1.2	Matériel et méthode	59
2.2.1.3	Résultats	62
2.2.1.3.1	Goujons collés à l'époxy	62
2.2.1.3.2	Goujons collés au polyuréthane	64
2.2.2	Influence de la température	66
2.2.2.1	Fabrication de l'éprouvette	66
2.2.2.2	Matériel et méthode	66
2.2.2.3	Résultats pour les deux adhésifs	67
2.3	Récapitulatif des essais à court terme	70

3 Prédiction de la résistance résiduelle par accumulation d'endommagement **73**

3.1	Analyse du temps de rupture par les modèles d'endommagement	75
3.1.1	La courbe de Madison : les travaux de Wood	75
3.1.2	Les modèles d'endommagement d'après l'école canadienne	76
3.1.3	Les modèles d'endommagement d'après l'école américaine	77
3.1.4	Equivalence de temps de rupture pour des chargements rampe ou constants, problème de la rupture court terme	79
3.2	Quantification de l'endommagement par la résistance résiduelle selon la représentation de Madsen	80

4 Campagne expérimentale de long terme **83**

4.1	Retour à la réglementation	84
4.2	Essais en grandeur structurale	85
4.2.1	Méthode et dispositif expérimental	85
4.2.2	Essais sur du lamellé collé	87
4.2.2.1	Préparation des éprouvettes	88
4.2.2.2	Résultats	89
4.2.2.2.1	A humidité constante	90
4.2.2.2.2	Pour deux dimensions de section	96
4.2.2.3	Le vieillissement en atmosphère variable	101
4.2.3	Essais sur du chêne	103

4.2.3.1	Les conditions d'essais	103
4.2.3.2	Les résultats	104
4.2.4	Conclusion sur les essais en grandeur structurale	106
4.3	Essais de petites dimensions	107
4.3.1	Conception des bâtis de l'essai	107
4.3.2	Résultats	108
4.3.2.1	Collage à l'époxy	108
4.3.2.2	Collage au polyuréthane	110
4.4	Conclusion sur le long terme	111
Conclusion		115
A Conditions climatiques		117
A.1	Essai de durée de vie sur les poutres renforcées à l'époxy avec MC=constante	117
A.2	Essai de durée de vie sur les poutres renforcées au polyuréthane avec MC=constante	118
A.3	Essai de durée de vie sur les poutres renforcées à l'époxy avec deux tailles de section	119
A.4	Essai de durée de vie sur les poutres chêne renforcées à l'époxy	120
B Configuration d'éprouvette		121
Bibliographie		126
Table des figures		126
Table des tableaux		130
Résumé		132

Introduction

Germer, pousser, tomber, pourrir... Tel est le destin promis par Dame nature pour la plupart des éléments terrestres vivants. L'arbre ne fait pas exception à cette règle et le bois mort fini souvent par pourrir. Dans le domaine de la construction, on appelle cela une pathologie ; pathologie à laquelle il faut réagir de manière adaptée pour préserver l'intégrité d'une structure. C'est là toute la problématique de la réparation et du renforcement. Quel degré d'intervention ? Quelle technique mettre en oeuvre ? Et pour combien de temps ?

L'étude proposée a un fort caractère appliqué. Elle devrait contribuer avec d'autres programmes européens à l'évolution et l'harmonisation de la réglementation européenne dont l'impact industriel et économique est de grande ampleur.

D'aussi loin qu'il existe des structures bois, elles se sont dégradées au fil des ans et les interventions palliant aux désordres ont évolué avec elles. Le temps des assemblages métalliques apparents (voir photo 1), par exemple, passe progressivement pour donner place à des solutions techniques et technologiques améliorées à mesure par la recherche scientifique.



FIG. 1 – *Renforcement d'un entrain de ferme*

C'est dans ce cadre qu'a été mené le doctorat présenté dans ce rapport. La technique visée ici est celle des goujons collés. Il s'agit de tiges métalliques ou composites insérées et collées à l'intérieure d'une pièce de bois. On peut les disposer dans le sens du fil ou non, selon l'effet recherché (voir photo 2).

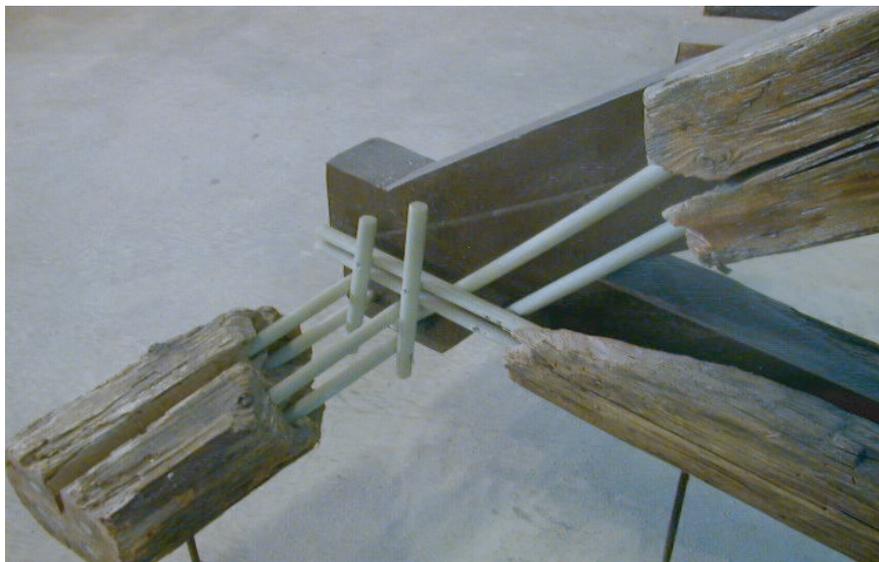


FIG. 2 – *Maquette d'un renforcement de pied de ferme*

Dans le sens transverse, elles servent à ponter des fissures ou à compenser la faible résistance du bois dans son axe le plus vulnérable. En général, dans le sens longitudinal, elles sont utilisées simplement pour transmettre des efforts : la pièce de bois *A* transmet une force à la tige via le joint de colle et le goujon "transporte" l'effort à la pièce *B* par le mécanisme inverse. On retrouve ce mécanisme et l'influence des profils de barre dans Bernasconi [BER01]. C'est dans cette configuration parallèle aux fibres que nous aborderons les goujons collés.

Nous nous attacherons dans un premier temps à décrire le cadre bibliographique et réglementaire dans lequel s'inscrit la technique des goujons collés. Il sera en particulier proposé une confrontation des différentes formulations de calcul disponible à ce jour en s'attachant à déterminer une résistance à l'arrachement caractéristique au sens de l'Eurocode 5.

Puis nous consacrerons le chapitre 2 à présenter, décrire et analyser la première phase de la campagne expérimentale :

- les essais de court terme sur les poutres de structures
- les essais de court terme sur les éprouvettes de petites dimensions

L'objectif de ces derniers essais est de qualifier le joint de colle dans une expérience où

celui-ci est sollicité en cisaillement pur parce que de petites dimensions, en particulier la tenue à la température est explorée complètement. Nous décrirons de manière théorique quelques approches prédictives de durée de vie appliquées à notre étude (chapitre 3) avant de passer à la deuxième phase des essais dans le chapitre 4 :

- les essais long terme sur les poutres de structure
- les essais long terme sur les éprouvettes de petites dimensions

Enfin, nous concluons sur l'influence que peuvent avoir les différents paramètres mis en jeu sur le comportement en durée de vie d'un assemblage par goujons collés.

On notera que deux types de matériel sont présentés dans cette thèse :

- du lamellé-collé, avec des goujons collés à l'époxy et au polyuréthane dans le cadre du projet *Durée de vie des assemblages par goujons collés pour du lamellé collé sous sollicitations mécaniques et hygrothermiques*, financé par le Ministère du Logement, Label RGCU.
- des poutres anciennes en chêne, avec des goujons collés à l'époxy dans le cadre du projet *Renforcement des charpentes à la résine*, financé par le Ministère de la culture et de la communication et les entreprises partenaires.

Je tiens donc à remercier, dans cette introduction, les entreprises CMBP et FARGEOT, les entreprises AMTC, BEPOX, CHARPENET, LIMOUZIN, RENOFORS et TAC, le Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (C.T.B.A.), la Fédération de l'Industrie Bois-Construction (F.I.B.C.) et le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (L.R.M.H.) qui ont été associés à cette étude.

Chapitre 1

Constat bibliographique et réglementaire

1.1 Constat bibliographique

Le XXIème siècle est probablement le siècle de la restauration en matière de construction et tout particulièrement de construction bois. Effectivement, la France, l'Europe et de nombreux pays dans le monde possèdent un patrimoine aussi précieux qu'abondant où la problématique du renforcement et de la réparation est un dénominateur commun. Il existe à ce jour de nombreuses méthodes plus ou moins intrusives. C'est justement vers la tendance du "minimum d'intervention" qu'évoluent les techniques, grâce notamment à un souci constant des architectes de conserver au maximum la structure dans son apparence initiale. Les traditions en matière de conservation de structure bois sont différentes d'un pays à un autre et WHEELER [WH98] met le doigt sur des philosophies fondamentalement différentes au Japon et en Angleterre par exemple. Dans le premier pays, le climat humide étant fortement propice aux développements de pourritures champignons et autres insectes, les japonais procèdent à un démantèlement régulier de leurs structures et parviennent à conserver des temples qui remontent jusqu'à 700. En Angleterre, en revanche, cette tradition de démantèlement n'existe pas bien que le climat soit aussi particulièrement défavorable aux structures bois. L'utilisation de feuillus durables comme le chêne et le savoir faire des charpentiers constituent une base solide pour franchir les siècles. On trouve des bâtiment datant de 1200.

De façon plus récente, la construction neuve en bois laisse émerger de nouvelles techniques d'assemblage que le concepteur veut de moins en moins visible par les utilisateurs d'un bâtiment ou d'un ouvrage d'art. Ainsi les performances mécaniques ou même esthétiques sont à ce jour des préoccupations importantes qui nécessitent des études approfondies.

C'est avec ces deux perspectives que les spécialistes du bois développent la technique des goujons collés depuis environ 25 ans en France et partout dans le monde.

Ces années ont vu évoluer les matériaux, la mise en oeuvre et émerger un paramètre jusque là négligé : l'estimation de la durée de vie.

1.1.1 Les goujons collés

Un goujon collé est une tige introduite et collée dans un élément de bois et destinée à transmettre des efforts d'une pièce à une autre. Elle peut être faite avec plusieurs matériaux et états de surface comme la fibre de verre ou la tige filetée en acier. Etablir un constat bibliographique sur ce thème va nous permettre de faire un point sur les

expériences déjà menées et les aspects délicats abordés. Ceci nous permettra d'isoler les questions qui restent en suspend et celles que nous allons traiter dans ce document.

Un assemblage par goujons collés présente de multiples modes de rupture possibles, généralement dépendants de ses caractéristiques géométriques et des propriétés mécaniques des trois matériaux constitutifs. Bernasconi [BER01] en distingue six différents, illustrés sur la figure 1.1 :

1. **rupture de la tige** elle même. Elle se produit par plastification de l'acier lorsque la longueur d'ancrage est grande.
2. **rupture entre la colle et la tige**. Elle se produit lorsque la résistance en compression de la colle est atteinte localement le long des filets du filetage si filetage il y a.
3. **rupture cohésive de colle**. Elle se produit par cisaillement à l'intérieur du joint de colle.
4. **rupture adhésive entre le bois et la colle**. Elle se produit quand la longueur d'ancrage est trop faible et que l'adhésion est insuffisante, ou simplement par défaut de collage.
5. **rupture par cisaillement du bois adjacent au joint de colle**. Elle est due à la faible résistance en cisaillement du bois dans le sens longitudinal.
6. **rupture du bois par bloc**. Dans ce cas, ce n'est plus le collage qui est mis en jeu mais les propriétés du bois autour de la liaison. Ce mode de rupture ne doit pas être négligé dans le calcul même s'il ne met pas directement en cause la liaison car il implique de raisonner de manière globale à l'échelle de la poutre.

Bernasconi précise que lorsque la mise en oeuvre est bonne, que les matériaux sont de bonne qualité, la rupture se produit dans la zone de bois toute proche du joint de colle (rupture n°5). C'est donc dans ce cas la résistance du bois en cisaillement qui détermine la résistance en pull-out et non celle de la colle. Broughton [BH01] s'accorde lui aussi à dire que la mise en oeuvre est cruciale : la préparation de surface est notamment un maillon clé et le fait d'extraire la partie pourrie d'une poutre par sciage ou autre permet d'ouvrir les pores pour que la résine y pénètre plus aisément et d'augmenter la qualité du collage.

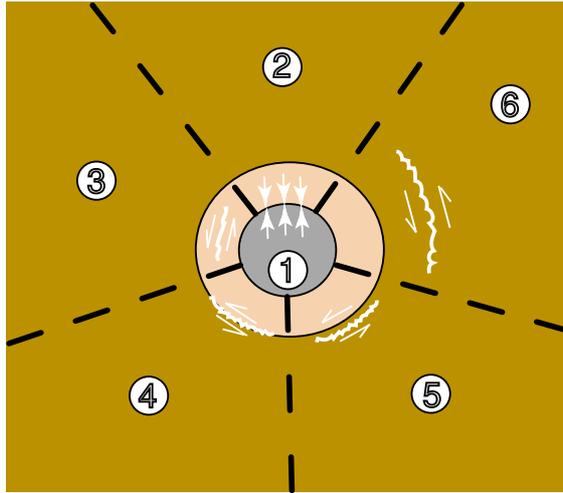


FIG. 1.1 – Visualisation des modes de rupture par le schéma de la section d'un goujon collé

Traditionnellement, c'est l'époxy (EP) qui est le plus couramment utilisé pour les goujons collés mais d'autres adhésifs s'approprient à entrer sur ce marché, aussi trouve-t-on des campagnes expérimentales avec des polyuréthanes (PU) ou des phénol resorcinol formaldéhydes (PRF). Serrano [SER01] a pratiqué des tests sur de petites éprouvettes à faible longueur d'ancrage et les classe en deux groupes fonction de leur rigidité. EP et PU ont un comportement fragile semblable alors que la PRF est plus ductile. La ductilité est aussi, d'après lui, influencée par l'angle de la tige par rapport au fil du bois; elle augmente quand l'angle passe de 0° à 90° .

L'époxy et le polyuréthane sont donc les plus utilisés et ceci notamment grâce à leur souplesse de mise en oeuvre. Davis [DAV97] fait remarquer que l'application sur site nécessite une certaine épaisseur de joint et que ces deux adhésifs sont choisis pour leur capacité de remplissage jusqu'à 2 mm. Il faut également qu'ils soient capables de coller deux substrats différents ayant des propriétés et des caractéristiques variées. Broughton [BH01] converge aussi vers les mêmes conclusions concernant l'époxy mais a remarqué que, pour la même épaisseur de joint, le PU présentait des ruptures adhésives ou dans le joint. L'importance de la mise en oeuvre adaptée n'est donc plus à prouver pour cette liaison. Nous nous attacherons donc dans notre étude à suivre scrupuleusement les prescriptions des fournisseurs d'adhésif.

La conception d'un assemblage par goujons collés est tout d'abord, avant d'être une question de technique, une question de matériaux et parfois de compatibilité de matériaux. Effectivement, Pizzo [PLMM02] s'est essentiellement concentré sur l'époxy et en a testé treize formulations différentes pour une campagne d'essais et arrive à la conclusion que l'on peut obtenir un large éventail de résistances. Il faut cependant remarquer que certains adhésifs sont utilisés à des fins particuliers : l'une pour le renforcement de béton, l'autre est extrêmement léger et les résultats disparates concernent des échantillons présentant toutes sortes de modes de rupture. Pizzo a ainsi mis au point une méthode d'évaluation de la compatibilité structurelle d'une colle par un coefficient prenant en compte les conditions standards d'utilisation et le vieillissement mais ces résultats ne peuvent être considérés comme des généralités sur les époxies en tant qu'adhésif de scellement. .

Le vieillissement fait notamment intervenir la notion d'humidité du bois (MC pour Moisture Content) qui est essentielle. Les observations expérimentales de GIROD [BJ02], programme de recherche européen -1999 à 2002- à cinq partenaires, sur ce phénomène font ressortir un point : un assemblage collé au PU présente une diminution de résistance après que les poutres aient été stockées dans une atmosphère variable. Dans le cas d'essais à forte humidité (85% de HR), c'est la PRF qui est le plus affectée. Aicher [ADL01], lui, constate aussi une diminution de résistance pour la PRF et le PU. Ces conclusions concordent avec celles de Feligioni [FLD⁺03] et Broughton [BH01] qui ne remarquent pas de diminution significative de résistance à l'arrachement avec l'augmentation de l'humidité du bois pour une époxy. On s'accorde donc à dire que l'époxy n'est pas affectée par l'humidité alors que le PRF l'est fortement et que le PU a un comportement intermédiaire.

Les remarques précédentes concernent donc des résultats d'essais pour lesquels l'humidité du bois était forte mais des données sont également disponibles dans Wheeler [WH98] sur l'influence de MC lors du collage. Pour l'époxy, il a constaté que pour un assemblage en chêne, $MC \geq 22\%$ n'affecte pas le collage alors qu'avec du douglas, on observe bien une diminution de résistance. Dans le cas du PU, peu importe l'essence, une $MC \geq 22\%$ entraîne de toute manière une importante diminution de résistance à l'arrachement.

Un autre paramètre à étudier est l'influence de la masse volumique du bois sur la résistance. Serrano [SER01] ne statue pas sur ce point en remarquant qu'elle est complexe à cerner car dépendante de trois phénomènes :

- la densité et la résistance sont souvent liées,
- un changement de densité peut vouloir dire un changement du pouvoir adhésif au bois,
- un changement de densité peut entraîner un changement de module d'élasticité.

Feligioni [FLD⁺03], quant à lui, se référant à sa campagne expérimentale, assure qu'il n'a pas observé de changement de résistance lorsque la masse volumique du bois variait jusqu'à $100\text{kg}/\text{m}_3$ d'une éprouvette à l'autre.

L'humidité du bois est donc un paramètre central. On lui associe souvent la température. Son effet est mal connu sur les assemblages par goujons collés mais quelques éléments de la littérature donnent des pistes. Broughton [BH01] fait remarquer tout d'abord que l'époxy est le type de colle qui a le plus large intervalle de températures d'utilisation : de -30°C à 60°C environ ce qui donne l'application sur site presque possible par tous les temps. Expérimentalement, Aicher [ADL01] a constaté un effet similaire de la température pour l'EP et la PRF : aux alentours de 50°C , la résistance chute considérablement. C'est le même phénomène pour le PU à une température un peu moindre de l'ordre de 40°C .

C'est surtout dans l'esprit d'observer la résistance au feu que des études de températures sont menées. Ainsi Buchanan [BB94] a produit une étude sur la résistance au feu des goujons collés et peut formuler quelques remarques et conclusions : les assemblages conçus avec de petites distances au bord semblent sensibles au feu. Il suffirait d'augmenter cette distance pour que la résistance progresse par là même ou bien de protéger directement la poutre bois. Son étude était plus précisément dirigée vers les performances de deux époxies. Au vu des résultats, une température critique de 50°C apparaît (température de transition vitreuse) ; au delà, la résistance chute rapidement et elle se stabilise ensuite en une résistance résiduelle faible vers 70°C . Il apparaîtrait que le temps de rupture est principalement lié à la température de l'époxy sans réel effet de la charge appliquée ou de la longueur d'ancrage. Quelques années plus tard, de nouveaux essais effectués en Suisse révèlent une température critique beaucoup plus haute, de l'ordre de 90°C et Mischler

[MF01] conclut que les différents adhésifs époxydiques ont un comportement bien spécifiques lié à leur propre température de transition vitreuse qui est la notion clé de tout phénomène lié à la chaleur ou à l'incendie.

1.1.2 La durée de vie

La littérature relate peu de résultats concernant la durée de vie des goujons collés car peu d'essais ont été réalisés jusqu'à ce jour. En Nouvelle Zélande, Buchanan [BD96] a mené une des premières campagnes expérimentales de long terme et avance que le comportement différé d'une liaison par goujons collés à l'époxy est bon dans la mesure où l'humidité des pièces de bois reste inférieure à 22% environ. On peut ainsi éviter une importante chute de résistance entre les essais instantanés et ceux de plus long terme.

Dans le cadre du projet européen GIROD [BJ02] qui représente la source d'informations la plus récente, Aicher a formulé plusieurs observations extraites des riches campagnes expérimentales :

- C'est le type ou la classe d'adhésif qui a la plus grande influence sur la durée de vie.
- Les dimensions de la tige (diamètre et longueur) ainsi que l'angle qu'elle fait avec le fil du bois dans une liaison n'a pas d'influence significative quelque soit le type de colle.
- Les essais de durée de vie pratiqués sur trois adhésifs différents (EP, PUR et PRF) révèlent des temps de vie différents sous charge. On leur associe une sensibilité propre à l'humidité du bois (facteur modificatif k_{mc}) et à la température (facteur modificatif k_T). Ainsi, le coefficient de durée de vie est en climat constant :

$$k_{DOL} = k_{time} \cdot k_{mc} \cdot k_T$$

- La PRF et le PU montrent des comportements similaires à la durée de vie concernant l'humidité du bois et $k_{mc} = 0.85$.
- L'EP testée montre en revanche, comme probablement la majorité des époxies, aucune sensibilité à l'humidité aussi bien à court terme qu'à long terme.
- A long terme, l'époxy montre un comportement dans une liaison qui suit l'évolution de la courbe de Madison et montre des ruptures dans la zone de bois toute proche du joint de colle (appelée interface bois colle) ou un petit peu plus loin dans le bois. Le PU et la PRF sont plus affectés et montrent des résultats inférieurs de 10% à 20% comparés à la courbe de Madison. Il est important de noter que les coefficients

de durée de vie k_{DOL} évalués d'après ces essais sont plus faibles que les valeurs préconisées par l'Eurocode 5 pour le bois massif en classe de service 1 et 2 (voir tableau 1.1).

type d'adhésif	climat	facteur modificateur $k_{DOL} = k_{mod}$	
		1 semaine	6 mois
PRF et PUR	extérieur couvert	0.7	0.6
	HR constant 85%	0.6	0.54
EP	extérieur couvert et HR constant 85%	0.77	0.68
bois massif (courbe de Madison)	~ classe 1	0.76	0.67
bois massif ou BLC (EC5)	classe 1 et 2	0.9	0.8

TAB. 1.1 – Résumé des facteurs de durée de vie selon GIROD

La problématique de durée de vie reste donc à explorer plus avant pour multiplier les résultats et les conditions d'essais et parvenir à une uniformisation des tendances pour des colles génériques.

1.2 Résistance à l'arrachement d'un goujon collé, aspect réglementaire

L'introduction et l'assimilation de la technique des goujons collés dans le domaine de la construction, tant en génie civil qu'en bâtiment, passe par la reconnaissance au niveau européen d'une méthode de calcul général. Dans notre cas, la résistance à l'arrachement d'un goujon collé parallèlement au fil du bois est le paramètre central à déterminer.

Il existe déjà en France des règles professionnelles pour la conception de ce type de liaisons mais l'unification européenne des réglementations laisse apparaître un vide qui devra bientôt être comblé. Les Eurocodes introduisent effectivement de nouvelles notions dans le calcul des ouvrages : les conditions de service et la durée d'application des charges. C'est essentiellement à cause de ce dernier paramètre que les goujons collés n'ont pas

trouvé leur place dans l'Eurocode 5 consacré aux structures bois. La problématique de durée de vie des assemblages par goujons collés reste donc encore à ce jour entachée de zones d'ombre.

1.2.1 Les goujons collés : une vision élargie sur la recherche mondiale

De nombreuses études visent à faire connaître et à populariser cette technique depuis quelques années. Qu'elles soient expérimentales ou numériques, ces investigations deviennent de plus en plus fréquentes et la communauté internationale dispose déjà de références vis-à-vis de son comportement à court terme. Ainsi au Danemark, Riberholt [RIB88] a étudié les goujons collés dans le sens du fil pour des assemblages ayant à transmettre un moment, en particulier en pied de poteau.

En Russie, Turkowskij [TUR91] a développé un système de fers à béton collés à 30° par rapport au fil du bois de manière à pallier aux ruptures en cisaillement et à créer un joint de continuité une fois couplés avec une plaque métallique en partie basse et haute de la pièce. Des modifications de ce concept ont été proposées au Canada et avant cela des recherches parallèles ont été menées en Finlande par Kangas [KAN94] jusqu'à un développement complet de la technologie.

En Nouvelle-Zélande, c'est Buchanan [BD95] qui a mis au point des techniques utilisant des goujons collés dans le sens du fil, en particulier pour l'assemblage aux reins des portiques; son attention s'est portée en particulier sur la résistance au feu et sur les renforcements secondaires, perpendiculaires au fil, chargés d'éviter la fissuration du bois dans la zone d'assemblage. Madsen [MAD00] a aussi lancé au Canada des campagnes expérimentales sur des assemblages et des structures entières dans le but de populariser et de rendre accessible la technologie.

Parallèlement à la diffusion de la technique dans le monde du lamellé collé, diffusion lente en raison de la confiance relative qu'ont les acteurs de la construction vis-à-vis du collage du bois, on a vu une expansion beaucoup plus rapide dans le domaine de la restauration et de la consolidation de charpentes anciennes; on assiste également à une poussée des composites dans le domaine du renforcement qui s'accompagne des validations expérimentales de qualité, comme dans le projet européen COLORETIM [rf00].

Assembler, renforcer, consolider, restaurer sont les fonctions des goujons collés dans la structure bois; des documents de base existent, le STEP [Unfd96] par exemple ou les cahiers d'IRABOIS qui a, dès 1999, élaboré un guide professionnel *Assemblage bois : tiges ou goujons collés de grandes dimensions* [IRA99] après avoir initié des recherches expérimentales dans différents laboratoires. Par contre, les textes normatifs (EC5) tardent dans l'attente en particulier de l'analyse des résultats de grands projets de recherche comme GIROD [BJ02] au plan européen. L'actualisation des règles professionnelles qui a débuté en 2003, ainsi que quelques projets récents, montrent que la France a l'ambition de pousser cette technique dont les avantages essentiels sont l'efficacité, l'esthétisme, la bonne protection contre le feu, la corrosion, le vieillissement, et la facilité de mise en oeuvre en atelier ou même sur place, ne nécessitant pas d'appareillage de haute technologie.

Les goujons collés jouissent donc d'un engouement scientifique dans le monde entier qui justifie l'initiation de projets nationaux dont des résultats seront exposés dans le présent travail mais établissons tout d'abord un état de l'art des différentes solutions calculatoires disponibles à ce jour et les résultats récents à retenir.

1.2.2 Aspect réglementaire

On appelle communément P_f la force ultime à appliquer en traction sur une tige lors d'un essai de pull-out, consistant à extraire un goujon d'une pièce de bois par traction et τ_f la contrainte moyenne au sens mécanique le long de la tige. Cette force à rupture dépend de nombreux paramètres liés aussi bien aux matériaux qu'à la géométrie de l'éprouvette ou encore à l'essai mécanique de caractérisation. Il existe notamment deux sortes de test en pull-out : le *pull-pull* et le *pull-compression*. Dans le premier cas, on retient en traction le "fond" de l'éprouvette (figure 1.2) et dans le second cas, on comprime la face du côté du goujon. L'influence de ces deux configurations est détaillée dans Gardelle [GM04] sur la base des travaux de Gustafsson.

Dans les différentes formulations qui suivent, on appellera l_a la longueur d'ancrage en mm, d un diamètre en mm (il sera précisé s'il s'agit de celui du trou ou du diamètre nominal de la tige) et ρ la masse volumique spécifique du bois en kg/m^3 . L'élanement ($\lambda = \frac{l_a}{d}$) a un grand impact sur la résistance à l'arrachement que l'on peut visualiser sur la figure 1.3 où l'on voit deux parties distinctes pour les courbes $P_f = f(l_a/d)$:

- Si $l_a/d = 15 - 20$ alors P_f est proportionnel à l_a et d

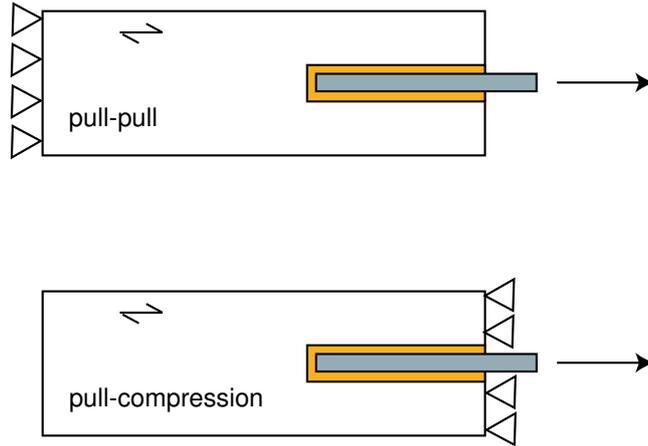


FIG. 1.2 – Configuration des essais de pull-pull et pull-compression

– Si $l_a/d > 15 - 20$ alors P_f varie comme $\sqrt{l_a}$
 et ce pour les trois diamètres d de tige proposés.

L'évolution de la force de rupture en fonction de l_a ou $\sqrt{l_a}$ se retrouve dans les différentes

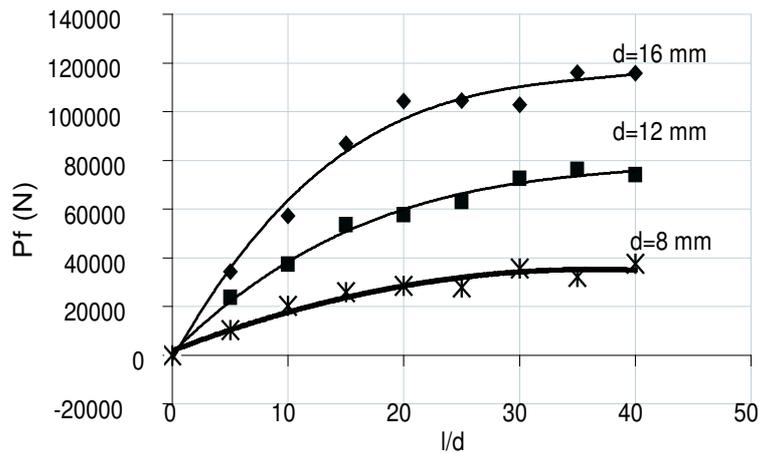


FIG. 1.3 – Evaluation de la force à rupture en fonction de l/d

formulations, permettant d'estimer cette force, issues des travaux de Riberholt [RIB88]. Le détail en est fait dans Gardelle [GM04], [SMFG04].

Il est à noter que pour une époxy, qui est un adhésif rigide et fragile, ou tout autre adhésif ayant des propriétés mécaniques sensiblement identiques, le diamètre du trou impose la résistance puisque lors de la rupture on emporte un cylindre de colle et d'acier de diamètre $(d+2e)$ lorsque le collage est bon, voir figure 1.4.

La question de la prise en compte du diamètre du trou ou du diamètre de la tige

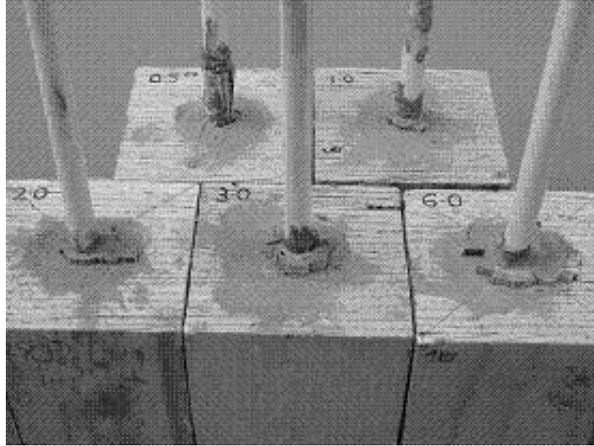


FIG. 1.4 – Rupture d'un goujon collé à l'interface entre le bois et la colle d'après le programme COLORETIM [rf00]

dans le calcul d'un assemblage par goujons collés reste encore en suspend. De récentes investigations ont été faites dans Feligioni [FLD⁺03], les tests de pull-out ont justement été utilisés pour mettre en évidence l'influence des propriétés rhéologiques de l'adhésif sur la résistance et par la même observer les modes de rupture en fonction du diamètre de perçage mis en oeuvre. On se rend ainsi compte que l'épaisseur du joint de colle a une très grande importance car elle permet d'optimiser le transfert des efforts entre le bois et la tige et ainsi de limiter les concentrations de contrainte et les déformations plastiques. D'autres constatations ont été faites, notamment la faible influence de l'humidité des bois et de leur densité sur la résistance ultime de l'assemblage. Ainsi, l'équation de calcul de l'Eurocode (prENV 1995) a été modifiée et sera détaillée dans le paragraphe suivant consacré aux différentes relations permettant l'estimation de la force nécessaire pour l'extraction du cylindre de colle.

1.2.2.1 Les formulations disponibles dans la littérature

La rupture par arrachement de l'ensemble tige-colle se produit lorsque ce n'est ni le goujon lui-même qui cède ni une rupture interne au joint de colle. Il est cependant aisé de localiser la rupture dans la tige si on connaît bien ses propriétés mécaniques. On peut donc facilement se placer du côté de la sécurité (avec une rupture ductile par plastification : mécanisme maîtrisé) mais tel n'est pas l'objet de notre étude. On doit pouvoir déterminer cette force ultime dans le cas d'une rupture dans la zone toute proche du joint de colle appelée interface bois/colle. Différents auteurs se sont attachés à établir

des formulations globales sur la résistance à l'arrachement et l'expriment grâce à trois paramètres précédemment cités : ρ , l_a et d (ou $\lambda = l_a/d$ l'élanement).

Formulation du STEP :

La première formulation a servi à l'élaboration d'un chapitre du STEP [Unfdc96] relatif aux calculs réglementaires des goujons collés. Riberholt [RIB88] propose les relations suivantes pour $l_a \geq 200mm$:

$$\boxed{\begin{aligned} P_{f,moy} &= k_{moy} \cdot d \cdot \rho \cdot \sqrt{l_a} \\ P_{f,k} &= k_k \cdot d \cdot \rho_k \cdot \sqrt{l_a} \end{aligned}} \quad (1.1)$$

où

$$k_{moy} = 0.784 \text{ et } 0.627 \cdot \frac{N}{\sqrt{mm^3}}$$

$$k_k = 0.650 \text{ et } 0.520 \cdot \frac{N}{\sqrt{mm^3}}$$

respectivement pour le PU et l'époxy.

où d est la plus grande valeur entre le diamètre de la tige et celui du trou en mm.

Les indices *moy* et *k* différencient respectivement les valeurs moyennes des valeurs caractéristiques, grandeurs clés dans les nouveaux règlement. Une valeur caractéristique correspond à une propriété physique ou mécanique donnée aux fractiles à 5% d'exclusion. Pour $l_a < 200mm$ la contrainte ultime est directement proportionnelle à l_a .

Formulation du guide professionnel français :

Le guide professionnel [IRA99] sur le calcul des goujons fournit une formule venant des propositions de Riberholt pour $l_a \geq 17.5d$:

$$\boxed{P_{f,k} = 85f_{v,k} \cdot d \cdot \sqrt{l_c}} \quad (1.2)$$

où :

- d est le diamètre de la tige en mm
- $f_{v,k}$ est la résistance caractéristique du bois en cisaillement en MPa
- $l_c = l_a - 1.5d$ en mm

Formulation d'AICHER :

Les campagnes menées au cours du projet GIROD, permettent à Aicher [AGW99] de proposer à son tour des ajustements à la formule de dimensionnement proposée par la

prENV 1995-2 :

$$\frac{P_{f,moy}}{\pi \cdot d \cdot l_a} = \min\left\{ \begin{array}{l} 8MPa \\ 129d^{-0.52} \cdot \lambda^{-0.62} \cdot \left(\frac{\rho}{480}\right)^{0.45} MPa \end{array} \right. \quad (1.3)$$

pour une époxy ou une PU fragile. l_a et d sont en mm.

$$\frac{P_{f,moy}}{\pi \cdot d \cdot l_a} = \min\left\{ \begin{array}{l} 6.3MPa \\ 10.3d^{-0.17} \cdot \lambda^{-0.08} \cdot \left(\frac{\rho}{480}\right)^{0.45} MPa \end{array} \right. \quad (1.4)$$

pour la résorcine avec un comportement adoucissant. l_a et d sont en mm.
où d est le diamètre du trou et $\lambda = l_a/d$.

Ces différents résultats sont donc en accord avec les récentes conclusions de Feligioni [FLD+03] concernant l'influence de la nature de la colle. Chaque auteur inclut un paramètre pour la prendre en compte.

Formulation de BUCHANAN :

Buchanan [BM99] a établi une équation empirique de dimensionnement à partir d'essais réalisés par Deng sur des collages à l'époxy en kN :

$$P_f = 9.41 \cdot k_b \cdot k_e \cdot k_m \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^{0.86} \cdot \left(\frac{d}{20}\right)^{1.62} \cdot \left(\frac{d_h}{d}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{e}{d}\right)^{0.5} \quad (1.5)$$

avec :

- d , le diamètre de la tige en mm
- d_h , le diamètre du trou en mm
- e , distance entre le bord de l'éprouvette et le centre du goujon en mm
- k_b , 1 pour l'acier fileté, 0.8 pour l'acier tor
- k_e , facteur pour la prise en compte du type d'époxy
- k_m , coefficient d'humidité (1 si $MC < 15\%$ et 0.8 si $15\% < MC < 22\%$)

Là aussi, la nature de l'adhésif est prise en compte mais cette fois à l'intérieur d'une même famille. La campagne ciblait une Araldite et 2 autres types d'époxy dont les rigidités peuvent varier de manière significative.

Formulation EC5 :

Enfin, le draft de la prEN 1995 part 2 Bridges [503] donne une autre relation issue des travaux de Gustafsson [GSAJ01], détaillés dans la partie II Gardelle [GM04] :

$$P_{f,k} = \pi \cdot d_{equ} \cdot l_a \cdot f_{ax,k} \cdot \frac{\tanh \varpi}{\varpi} \quad (1.6)$$

avec :

- d_{equ} , minimum entre le diamètre du trou et $1.15d$ en mm (d est le diamètre de la tige)
- $f_{ax,k} = 5.5MPa$
- $\varpi = \frac{0.016l_a}{\sqrt{d_{equ}}}$

Pour une petite longueur d'ancrage, on voit sur le graphique 1.5 que la force à l'arrachement se rapproche de l'expression : $P_{f,k} = \pi \cdot d_{trou} \cdot l_a \cdot f_{ax,k}$.

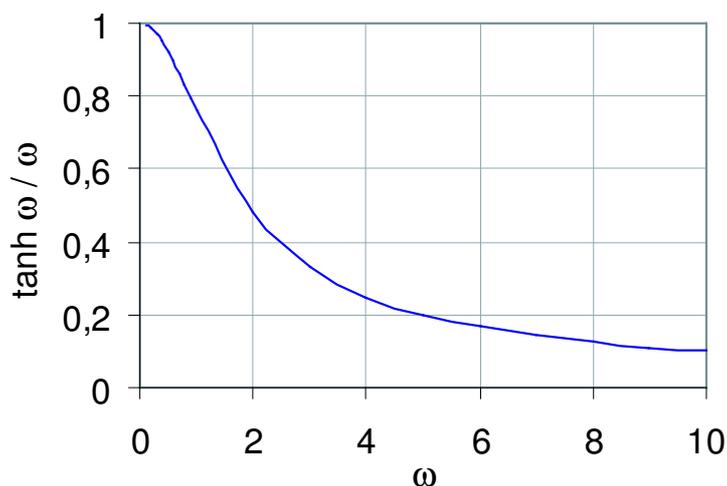


FIG. 1.5 – Evolution du rapport $\frac{\tanh \varpi}{\varpi}$ en fonction de ϖ

Cette relation n'a, pour l'instant, pas été retenue par les comités européens.

Formulation de FELIGIONI :

Une des équations empiriques les plus récentes est donnée par Feligioni [FLD⁺03] en ajustement à ces données expérimentales concernant de petites éprouvettes collées à l'époxy. La force d'arrachement est directement proportionnelle à la longueur d'ancrage car les essais sont pratiqués sur des éprouvettes de petites dimensions pour lesquelles on peut

considérer la répartition des contraintes uniforme le long de la tige.

$$P_f = \pi \cdot l_a (f_{v,k} \cdot d_{equ} + k(d + e) \cdot e) \quad (1.7)$$

avec :

- $f_{v,k} = 1.2 \cdot 10^{-3} d_{equ}^{-0.2} \cdot \rho_k^{1.5}$, la résistance caractéristique en cisaillement du bois en MPa
- e , l'épaisseur du joint de colle en mm
- l_a , la longueur d'ancrage en mm
- d , le diamètre de la tige en mm
- d_{equ} , minimum entre le diamètre du trou et $1.25d$ en mm
- k , paramètre propre à la colle : $k = 0.086$ pour les colles fragiles et $k = 1.213$ pour les colles ductiles. Ce paramètre est ajusté avec des valeurs expérimentales.

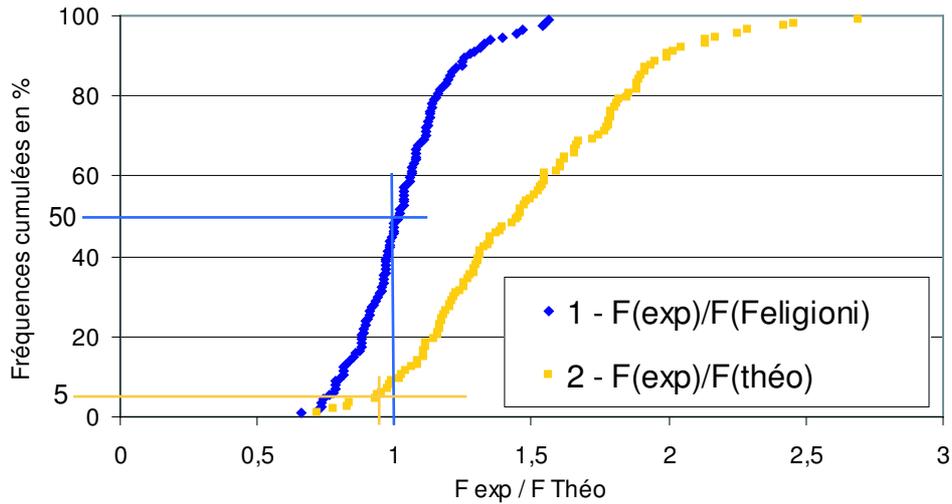


FIG. 1.6 – Analyse et intégration de la formule empirique de Feligioni dans le cadre réglementaire

Le graphique 1.6 est tiré des valeurs expérimentales rapportées à deux formules de calcul de la résistance à l'arrachement. La courbe 1 est calée de manière à obtenir un $\frac{F_{exp}}{F_{theo}}$ de 1 pour la valeur moyenne, et $T_{theo} = \pi \cdot l_a (f_{v,k} \cdot d_{equ} + k(d + e) \cdot e)$. Le fait de prendre en compte le volume de colle permet donc de redresser la distribution et rend les valeurs fiables.

La courbe 2 est tracée avec $F_{theo} = 5.5\pi \cdot d_{trou} \cdot l_a$, formulation classique de calcul de la contrainte à l'interface. Le 5.5 retenu correspond à la valeur caractéristique de

résistance de l'interface fixée par Gustafsson, valeur qui se retrouve dans cette campagne expérimentale. En terme de valeur caractéristique, l'influence du volume de colle est donc relative.

En conclusion, nous retiendrons les trois formulations qui permettent d'obtenir une valeur de $P_{f,k}$, ce sont les relations 1.1, 1.2 et 1.6.

1.2.2.2 Exploitation de la base de données

On dispose maintenant de multiples outils pour estimer la force d'arrachement d'un goujon collé mais comment nous situons nous en terme de sécurité? Quelle latitude laisse chaque formulation vis-à-vis de la réelle force de rupture? Le graphique de la figure 1.7 trace le niveau de sécurité des équations de la littérature (relations 1.1, 1.2 et 1.6) par le rapport de : la force expérimentale à rupture et de la force caractéristique correspondant à chaque approche (adhésif : époxy). On trace par exemple les fréquences cumulées des $\frac{P_f(\text{experimentale})}{P_{f,k}}$.

Les forces ultimes, $P_f(\text{experimental})$, proviennent de campagnes d'essais effectuées au Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux (L.R.B.B.) et au Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (C.T.B.A.) sur l'époxy MASTIFIX à la demande des sociétés FARGEOT et SIMONIN.

Les résultats de GIROD ont également été intégrés dans les distributions qui vont suivre par une reconstitution de données à partir des coefficients de variation et des moyennes publiées (méthode proposée par Leicester [LEI00]). Seuls les essais relatifs à l'époxy sont retenus.

La base de données en grandeur structurale : (tableau 1.2)

Tous les essais disponibles sont traités même s'ils ne satisfont pas tout à fait les exigences relatives à l'élancement pour les trois formulations réglementaires retenues (formules encadrées dans le paragraphe énumérant les différentes formulations). Bien qu'inférieures à 17,5d, les longueurs d'ancrage supérieures ou égales à 10d seront prises en compte. Ainsi, le guide professionnel français, le Step et l'EC5 donnent la valeur d'arrachement caractéristique $P_{f,k}$. On a introduit deux manières de calculer $P_{f,k}$ pour les formules du Step et du guide professionnel français : avec d_{trou} et l'autre avec d_{tige} .

	nombre d'essais	COV en %
LRBB	10	8.7
	10	10.0
	10	6.7
CTBA	5	6.6
	5	5.6
	5	7
GIROD	7	18.8
	7	11.3
	7	10.1
	7	10.2

TAB. 1.2 – Répartition des essais intégrés dans la base de données

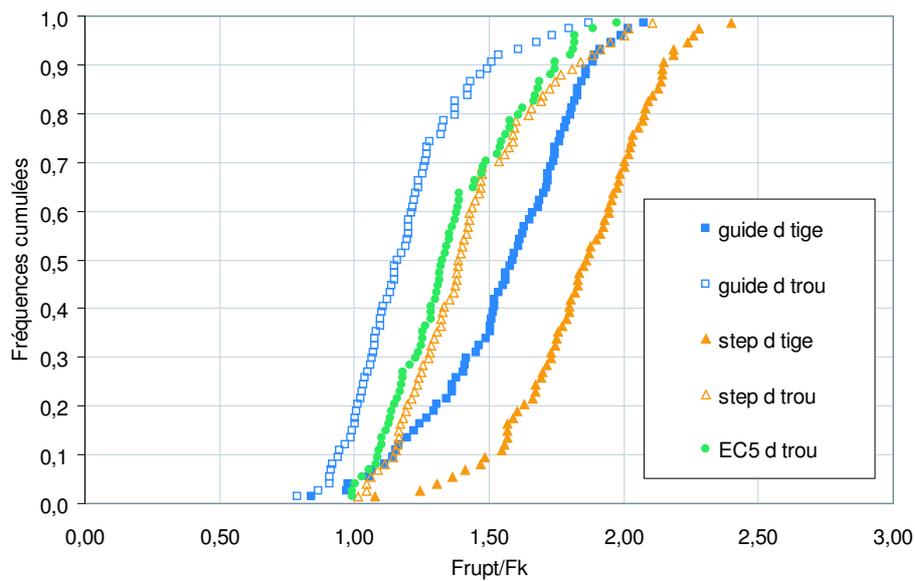


FIG. 1.7 – Niveau de sécurité des résultats expérimentaux vis-à-vis des valeurs caractéristiques

Sur la figure 1.7, la seule distribution qui ne semble pas satisfaire les conditions sécuritaires est celle du guide professionnel appliqué avec le diamètre du trou. Or, dans le guide professionnel de calcul des goujons collés, la formulation a été choisie de manière à ce que le diamètre de la tige soit pris en compte.

Il est cependant important de noter que la distribution " idéale " étant une distribution la plus verticale possible, on s'aperçoit aussi bien pour le Step que pour le guide que si le

diamètre du trou est pris en donnée d'entrée en lieu et place de celui de la tige, la distribution se redresse et devient plus intéressante en terme de dispersion. Il en est de même pour la représentation de l'EC5 fonction du diamètre du trou qui tend vers la verticale. La formule du guide professionnel devrait donc être réhabilitée avec le diamètre du trou en modifiant la constante " 85 " pour que le fractile d'exclusion à 5% donne une valeur $\frac{P_f}{P_{f,k}} \geq 1$. Après ajustement, la formule proposée devient :

$$P_{f,k} = 72f_{v,k} \cdot d \cdot \sqrt{l_c} \quad (1.8)$$

On vérifie aussi que les deux époxies donnent des valeurs d'arrachement qui se partagent toute la plage de données balayée (voir tableau 1.3)

Les conditions climatiques variées, les provenances multiples des matériaux ainsi que les

type d'adhésif	Formulation	$\frac{P_f}{P_{f,k}}$ mini	$\frac{P_f}{P_{f,k}}$ maxi	$\frac{P_f}{P_{f,k}}$ moyen
MASTIFIX	guide professionnel	0.91	1.51	1.15
	step	1.05	1.74	1.33
	EC5	0.99	1.54	1.23
EPOXY GIROD	guide professionnel	0.79	1.87	1.27
	step	1.01	2.10	1.59
	EC5	1.09	1.98	1.60

TAB. 1.3 – Intervalles de valeurs $\frac{P_f}{P_{f,k}}$ pour les deux adhésifs utilisés

propres savoir-faire des fabricants permettent de mener un raisonnement global sur la liaison par goujon collé avec une époxy générique. Cette démarche n'est valable que si le mode de rupture ne devient ni cohésif dans le joint ni adhésif entre la tige et la colle ; auquel cas les estimations seraient biaisées.

Enfin, il est vrai qu'il reste un peu de variabilité, elle est explicable par les formulations empiriques précédemment citées de Buchanan et Feligioni relatives par exemple à l'épaisseur du joint de colle ou au profil du goujon. Sur ce point précis, les essais du C.T.B.A. sont en accord avec les résultats d'essais de Deng, précédemment cités, selon lesquels un assemblage par acier tor serait moins résistant que son homologue en acier fileté. La résistance chute en fait avec un changement de mode de rupture.

L'aspect réglementaire abordé dans cette partie alimente les résultats déjà formulés, en Europe notamment, sur le comportement à court terme des goujons collés à l'époxy. Les données expérimentales sont nombreuses et de provenances très diverses, on devrait maintenant parvenir à déterminer correctement les résistances caractéristiques à l'arrachement de goujons insérés dans le sens du fil du bois.

Modélisation d'un goujon isolé :

De nombreux paramètres influent sur la résistance à l'arrachement d'un goujon collé et nous avons voulu nous affranchir notamment de celui de la taille de la section de bois. Pour ce faire, des calculs par éléments finis ont été effectués au Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux par Gardelle [GM04]. On peut ainsi faire varier des dimensions ou des propriétés mécaniques et en étudier les répercussions par calcul numérique. Les différentes courbes tracées ici doivent être considérées avec précaution. Effectivement, on se doit de n'observer que les valeurs de contraintes situées à l'embouchure du goujon car celles que l'on lit en fond de trou sont très dépendantes des conditions limites de cette zone (voir schéma 1.8). Le goujon est modélisé débouchant en fond de trou pour des raisons de nombre d'éléments finis alors qu'il est collé en réalité, les contraintes pour $l = l_a$ sont donc totalement différentes de notre expérimentation. Cependant, il a été vérifié que ces conditions limites ne modifiaient pas les pics de contrainte à l'embouchure. Nous considérerons donc seulement les valeurs lues en $l_a = 0$.

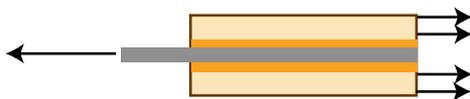


FIG. 1.8 – *Allure du modèle éléments finis*

Les données de la modélisation sont les mêmes que les données expérimentales : GL24 et tige de 12mm. Les contraintes calculées correspondent à la force réelle appliquée ($P_f = 65800N$) lors des essais de traction en grandeur structurale qui seront présentés plus loin. Le modèle est développé en élasticité linéaire s'appuyant sur l'approche de Volkerson et les détails sont donnés dans Gardelle [GM04].

Le graphique 1.9 nous oriente vers la non influence de la taille de la section de bois du moment que les prescriptions minimales de Blass [BL99] sont respectées. Ainsi on voit que la contrainte la plus dangereuse obtenue à l'interface entre le bois et la colle (pour

$l \sim 0$) varie peu suivant que la section mesure $60 \times 60\text{mm}^2$ ou $80 \times 80\text{mm}^2$ ou encore $100 \times 100\text{mm}^2$.

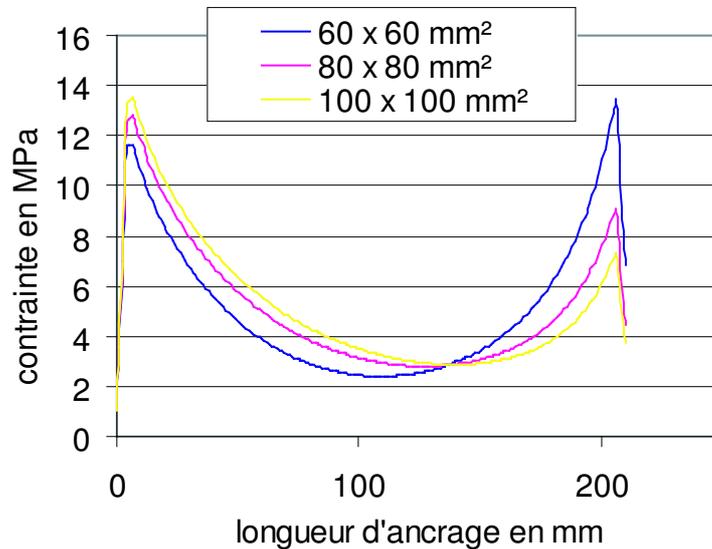


FIG. 1.9 – Contrainte de cisaillement à l'interface bois-colle pour trois sections de bois

Nous avons aussi fait varier le module d'élasticité de $E_L = 10000\text{MPa}$ à $E_L = 5000\text{MPa}$ en conservant la même force appliquée que précédemment. Les répercussions sur la contrainte ultime à l'interface bois-colle sont visibles sur le graphique 1.10). Cette propriété paraît entraîner une variation de contraintes qui reste cependant limitée pour des valeurs de E allant du simple à la moitié c'est à dire l'ordre de grandeur de ce qui se passe entre les valeurs instantanées et les valeurs à long terme de E : avec le fluage du bois, l'interface bois-colle est moins sollicitée à force P_f constante idée qui se retrouvera à la fin de ce mémoire.

La figure 1.11 montre l'évolution des profils de contrainte de cisaillement sur l'interface bois-colle en fonction de la longueur d'ancrage :

- l_a faible : cisaillement constant,
- l_a moyen : la distribution se creuse,
- l_a structurale : pic de cisaillement à l'embouchure avec apparition d'un plateau bas et la distribution finale est dépendante des conditions limites.

Les valeurs des forces appliquées pour le tracés de ces deux distributions sont celles

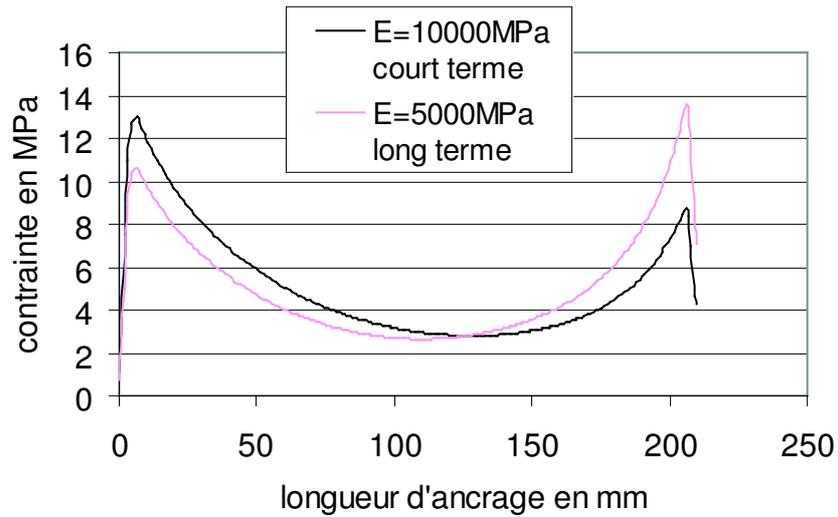


FIG. 1.10 – Contrainte de cisaillement à l'interface bois-colle pour deux modules d'élasticité

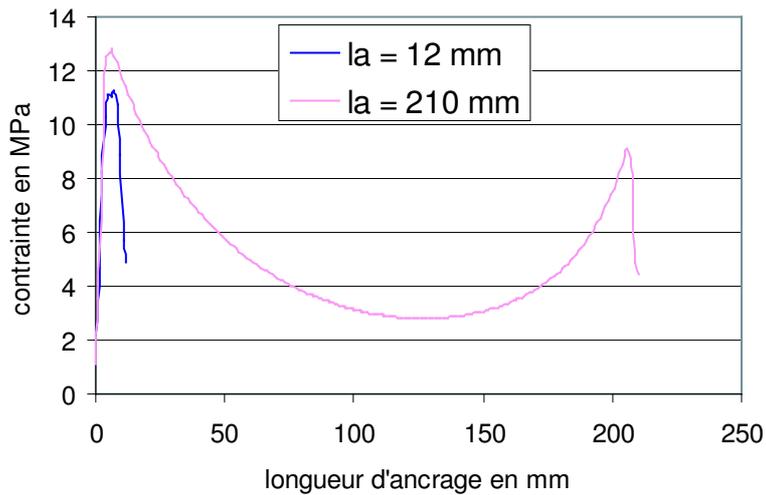


FIG. 1.11 – Contrainte ultime à l'interface bois-colle pour trois longueurs d'ancrage

des données expérimentales qui seront explicitées dans le chapitre suivant.

L'évolution du profil de contraintes se retrouve dans l'approche de Gustafsson (formulation 1.6) : rupture ductile pour un élancement faible et rupture fragile (Mécanique Linéaire de la Rupture) pour un élancement important. L'approche Mécanique Non-Linéaire de la Rupture proposée par Gustafsson dans la zone intermédiaire est confortée par une approche (élastique) Elements Finis de Gardelle avec un critère de τ_{max} à l'interface bois-colle : le terme $\frac{\tanh \varpi}{\varpi}$ de la formule 1.6 est analogue à l'inverse du

coefficient de surcontrainte (texte de F. Simon [SIM99]).

Conclusion

On retiendra de ce chapitre que les formulations 1.1 (Step), 1.8 (guide français avec le coefficient 72) et 1.6 (Gustafsson) sont équivalentes, en particulier dans la partie basse de la distribution de la figure 1.12 obtenue par des goujons élancés ($\frac{l_a}{d} \geq 10d$). Elles deviennent toutes les trois également sécuritaires.

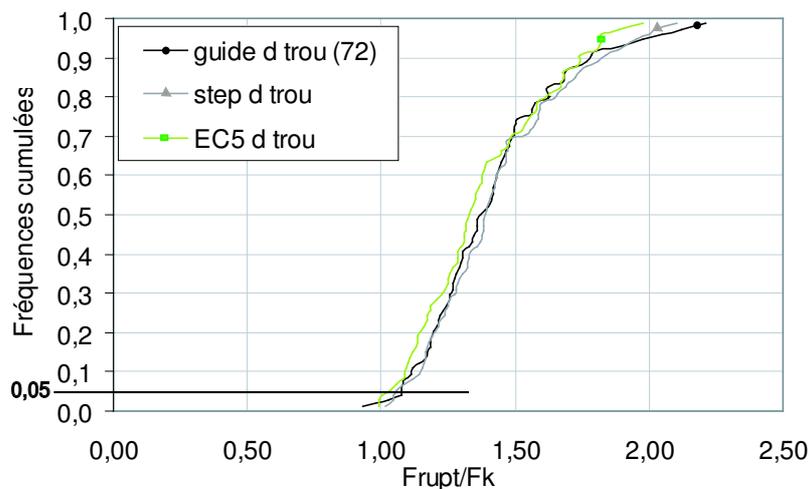


FIG. 1.12 – Niveau de sécurité des résultats expérimentaux vis-à-vis des valeurs caractéristiques (formulation du guide français modifiée)

La prise en compte du diamètre du trou comme paramètre de calcul de la résistance est donc justifiée.

La formulation 1.6 a l'avantage d'autoriser le passage des goujons élancés aux goujons courts. Pour ces derniers, dans la partie basse de la distribution de la figure 1.6, l'adoption de la valeur caractéristique d'un cisaillement maximum de 5.5 MPa (pour du GL24h) est justifiée par la campagne expérimentale de Feligioni (graphique 1.6) et nous intégrerons les résultats expérimentaux sur de petites éprouvettes à la fin du chapitre suivant. On s'accorde donc à dire que l'équation 1.6 est utilisable quelle que soit la longueur d'ancrage pour ses valeurs caractéristiques mais peut donner une forte dispersion des résultats, dispersion pouvant être réduite par l'intégration d'un paramètre relatif au volume de colle.

Chapitre 2

Campagne expérimentale de court terme

2.1 Les essais en grandeur structurale

Une campagne expérimentale sur des poutres en dimension d'emploi demande un grand investissement tant matériel que pour la mise en place mais s'avère cependant indispensable puisque nous savons que, dans certains cas, les phénomènes observés changent avec l'échelle considérée. On sait notamment que la répartition des contraintes de cisaillement le long de la tige a des profils bien différents selon la longueur d'ancrage mise en oeuvre.

2.1.1 Essais sur du lamellé collé

Les données expérimentales de court terme sont un passage obligé quelle que soit l'approche de durée de vie considérée. Elles fournissent une résistance de référence indispensable pour l'élaboration des essais de long terme.

La campagne expérimentale menée sur les poutres de structure est orientée pour observer le comportement vis-à-vis de la durée d'application des charges, l'influence de l'humidité du bois, l'influence du type de colle, et enfin celle de la taille de la section de bois. On procède donc dans un premier temps aux essais sur des lots de 10 poutres.

Les conditions d'essais :

- époxy, humidité du bois à 12% environ
- époxy, humidité du bois à 20% environ
- polyuréthane, humidité du bois à 12% environ
- polyuréthane, humidité du bois à 20% environ

Les matériaux utilisés :

- bois lamellé collé de classe GL24h
- époxy MASTIFIX (EP), fabricant RENOANTIC (Suisse)
- polyuréthane PURBOND (PU), fabricant COLLANO (Suisse)
- tiges filetées en acier, haute limite élastique pour les poutres (pour éviter la plastification) et acier ordinaire pour les essais locaux.

Précaution vis-à-vis du bois :

Comme nous venons de le signaler, les poutres sont faites en GL24h et sont renforcées à l'EP ou au PU. Deux entreprises différentes ayant fabriqué les lots de poutre, nous avons vérifié que le classement en GL24h était équivalent pour les deux provenances. On voit

dans le tableau 2.1 que les valeurs moyennes de deux lots d'éprouvettes sont très proches.

	Nb de pièces	ρ_{moyen} en kg/m^3	COV en %
FARGEOT	8	468	3.2
CMBP	8	453	3.2

TAB. 2.1 – Masse volumique des deux GL24h de provenances différentes

Aucun correctif lié à la masse volumique ne sera donc appliqué.

2.1.1.1 Conditionnement des éprouvettes

Une des grandeurs physiques les plus importantes dans la caractérisation d'une pièce de bois est son humidité ou teneur en eau. On l'appelle communément MC de l'anglais Moisture Content. C'est une grandeur sans dimension souvent exprimée en pourcentage et qui représente le poids de l'eau contenue ramené au poids anhydre :

$$X = \frac{P_{total} - P_{anhydre}}{P_{anhydre}} \times 100 \quad (2.1)$$

Ainsi, les bois légers et très poreux peuvent avoir une teneur en eau supérieure à 100%. Dans le domaine hygroscopique, il y a équilibre entre la teneur en eau du bois et l'humidité de l'air ambiant. Pour une température donnée, cet équilibre se traduit par une relation entre MC et l'humidité relative de l'air (HR). Les courbes obtenues, dépendantes de la température, s'appellent des isothermes de sorption, voir figure 2.1. Elles sont identiques

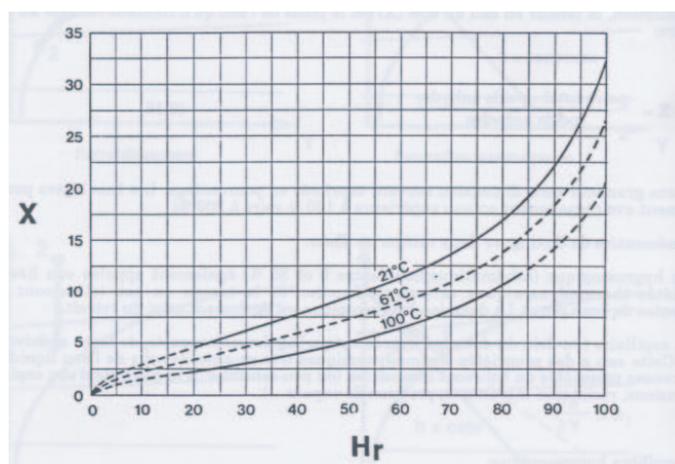


FIG. 2.1 – Isothermes de sorption du bois

pour toutes les essences des zones tempérées. L'effet de la température est également visible en traçant les isothermes sur un graphique température - humidité relative de l'air.

Cette représentation a été imaginée par Keylwerth et apparaît sur la figure 2.2.

Le conditionnement des bois s'effectue dans des enceintes de régulation de HR de l'air

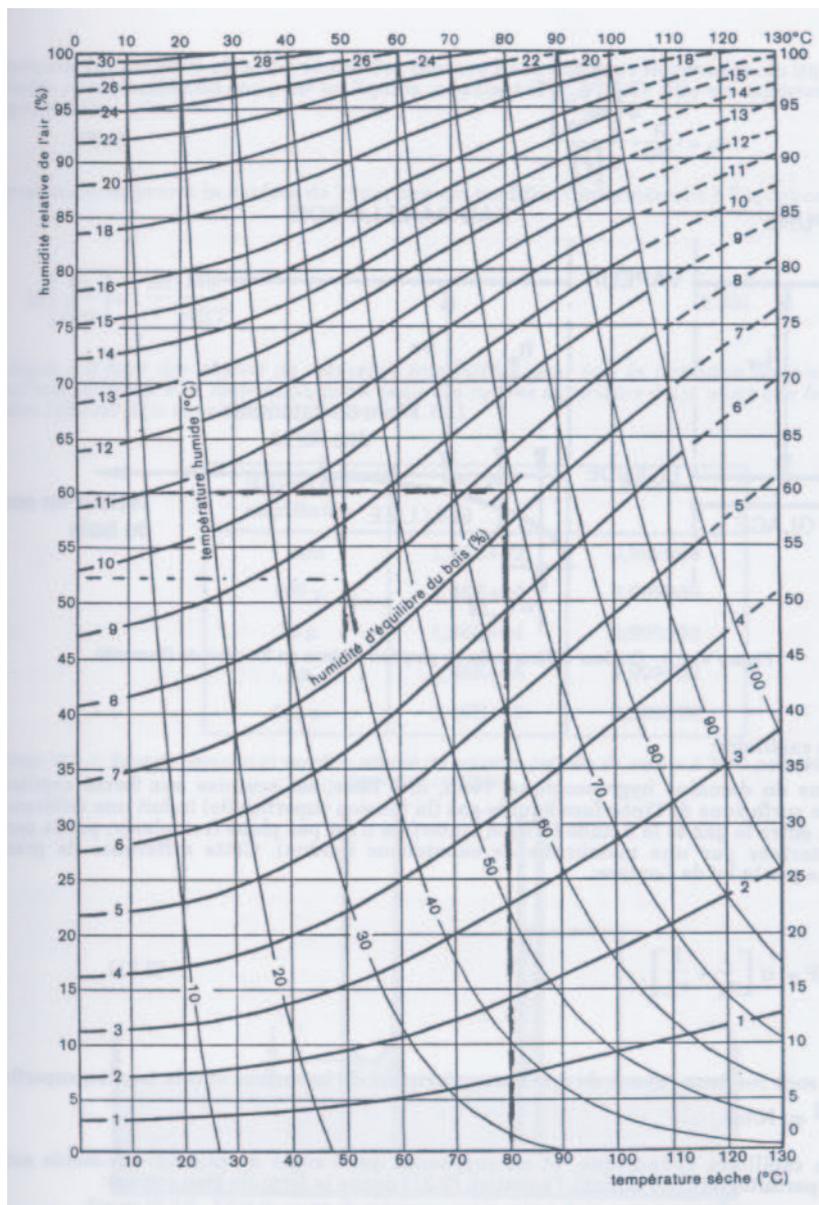


FIG. 2.2 – Isothermes de sorption du bois dans le plan (température, HR de l'air)

(voir photos des figures 2.3 et 2.4) afin d'amener les poutres aux conditions d'humidité requises pour les essais et ce après plusieurs semaines de conditionnement. Une pesée régulière permet de déterminer la période où l'équilibre hygrométrique est atteint dans le bois et où les variations de MC deviennent très faibles. La représentation du graphique 2.2 permet de lire avec plus de précision l'ambiance dans laquelle il faut immerger les poutres pour atteindre l'humidité d'équilibre désirée. Dans notre premier cas, une humidité d'environ 20% sera atteinte en fixant l'enceinte à 90% d'humidité relative même si



FIG. 2.3 – *Enceinte de stabilisation des bois*



FIG. 2.4 – *Système de ventilation*

nous n'avons pas de contrôle sur la température ambiante. Pour le second cas, celles qui doivent rester à une teneur en eau de 12% (teneur souvent exigée dans les normes d'essais) sont mise dans une enceinte régulée en humidité et en température à 20°C et 65% de HR (pièce climatisée). Les photos des figures 2.3 et 2.4 montrent l'enceinte démontable menant les bois à 20% de MC. Cette enveloppe en plastique close est équipée d'un système qui diffuse de la vapeur d'eau par deux ventilateurs.

On parvient ainsi au bout de quelques semaines aux deux humidités souhaitées et les poutres sont prêtes à être testées. Pour connaître les conditions exactes d'équilibre, on peut se référer à la norme NF B51-004 concernant : *"bois, détermination de l'humidité"* [AFN85].

2.1.1.2 Géométrie et fonctionnement mécanique

L'éprouvette est constituée de deux pièces de bois lamellé collé assemblées par deux tiges collées dans la direction du fil du bois (voir figures 2.5 et 2.6). On obtient ainsi une poutre avec un assemblage à mi-portée. Sur la figure 2.6, il est précisé que le diamètre du

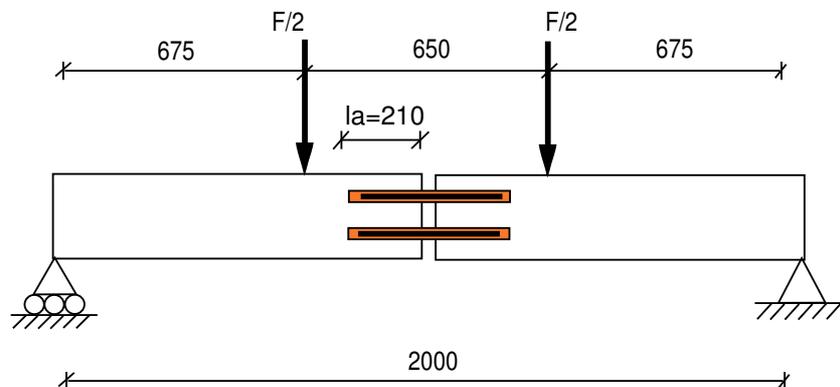


FIG. 2.5 – Géométrie de l'éprouvette de flexion

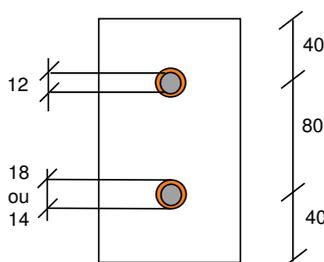


FIG. 2.6 – Géométrie de l'éprouvette de flexion, cotation en mm

trou peut prendre deux valeurs. Il s'agit de la conséquence des mises en oeuvre différentes entre l'époxy et la polyuréthane. La première est utilisée en joint épais et le diamètre de perçage sera de 18 mm pour une tige de 12 mm (soit 3 mm d'épaisseur de joint) alors que la seconde, plus fluide, s'utilise plutôt en joint mince de 1 mm soit un perçage de 14 mm de diamètre.

On procède à un essai de flexion quatre points pour que toute la liaison soit soumise à un moment de flexion constant (entre les deux forces en travée). On s'affranchit ainsi par la même de l'influence que pourrait avoir une variation de position de l'assemblage à l'intérieur d'un même lot puisqu'il ne s'agit pas d'une production industrielle, des variations dimensionnelles restent possibles. On peut noter sur la figure 2.5 que les deux parties constitutives de la poutre sont séparées de quelques millimètres. Ce détail constructif permet une transmission simple des efforts : le goujon situé en partie supérieure de la

poutre est comprimé alors que l'autre est tendu et le bois ne participe pas directement à la résistance puisque les deux morceaux ne sont pas en contact jusqu'à la rupture. La figure 2.6 permet aussi de constater que les recommandations faites par Blass [BL99] ont été prises en compte dans la conception de l'éprouvette afin d'anticiper tout désordre dû à des dispositions constructives inadaptées; on respecte les distances aux bords et les règles de pince.

L'hypothèse précédente sur le fonctionnement mécanique simple de l'éprouvette se doit cependant d'être vérifiée; une série d'essais préliminaires a permis de valider la géométrie de l'éprouvette et la configuration de l'essai. Il s'agit de tests de traction simple sur une double liaison collée (voir figure 2.7 et photo de la figure 2.8). Les éprouvettes ont été préalablement stockées dans l'enceinte menant les bois à 12% d'humidité pour pouvoir mener une comparaison rigoureuse entre les efforts de l'essai de traction et ceux de l'essai de flexion.

Les conditions limites d'application des efforts sont cependant différentes puisque les mors exerçant la traction sur les deux tiges collées ne sont pas articulés. Pour tenter de minimiser l'influence de ces conditions, nous avons employé des tiges dont la longueur libre était importante de manière à ce que sa courbure compense les éventuels défauts d'alignement lors du collage. Ces derniers restent cependant faibles. On a constaté (voir

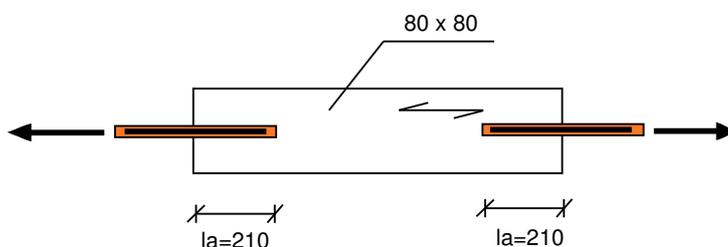


FIG. 2.7 – Géométrie de l'éprouvette de traction, cotation en mm

tableau 2.2) par un calcul RdM simple que l'effort maximal passant dans les barres des poutres de flexion était identique à celui appliqué à l'éprouvette de traction lors de la rupture. Effectivement, si les deux forces en travées ont une intensité de $F/2$ et que l'espacement entre les tiges est noté e , alors le moment maximum pour la configuration d'essai de la figure 2.5 s'exprime :

$$M_{max} = \frac{675F}{2}$$

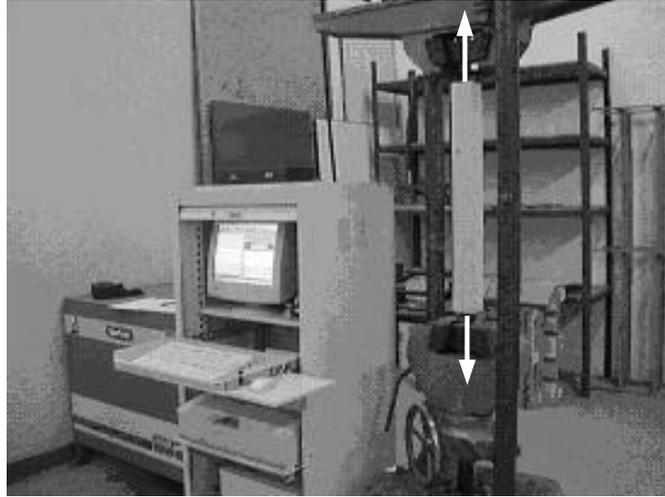


FIG. 2.8 – *Essai dans le bâti de traction*

et les efforts P_f qui passent dans les barres reprennent le moment tel que :

$$P_f = \frac{M}{e}$$

On peut donc écrire simplement :

$$P_f = \frac{675P}{2e} \quad (2.2)$$

La variation lue entre les moyennes est inférieure à 5% pour les deux adhésifs; notre hypothèse est donc vérifiée. Notons que les contraintes de cisaillement calculées dans la

Nature de l'essai et conditions climatiques de conditionnement des éprouvettes	Adhésif	$P_{f,moy}$ (N)	COV(%)	$\tau_{f,moy}$ (MPa)
Traction 20°C-65%HR	époxy	65794	8.7	5.54
	polyuréthane	61408	8.4	6.65
Flexion 20°C-65%HR	époxy	65644	10	5.50
	polyuréthane	60020	10.9	6.50

TAB. 2.2 – *Comparaison du fonctionnement mécanique dans une éprouvette de traction et de flexion*

dernière colonne du tableau 2.2 ne sont que des moyennes bien que leur répartition ne soit pas uniforme le long de la tige. Comme Gardelle [GM04] l'explique, cette contrainte

est inférieure à la contrainte ultime que peut se voir appliqué l'interface entre la colle et le bois.

2.1.1.3 Matériel et méthode

Les essais de court terme sont pratiqués sur un banc de flexion muni d'un système hydraulique qui permet d'appliquer des forces jusqu'à 100 kN (photo de la figure 2.9). Ce bâti est équipé d'un capteur de force, de capacité identique, relié à un conditionneur



FIG. 2.9 – *Essai sur le bâti de flexion*

permettant la lecture continue de l'effort appliqué sur la poutre. Les données sont enregistrées dans un tableur au moyen d'un ordinateur en liaison avec l'automate de pilotage de l'essai de rupture. On relève donc la force et le temps écoulé lui correspondant jusqu'à la rupture de la poutre. Une mesure de déplacement complète ce dispositif : c'est un capteur à fil potentiométrique qui permet d'obtenir pour chaque essai le tracé de la charge en fonction du déplacement.

La rupture étant localisée à l'interface bois/colle par extraction du cylindre de colle, il s'agit là d'une rupture fragile et le relevé force déplacement permet de visualiser la brusque chute de résistance produite lors de la ruine soudaine de la poutre. On exclut donc, par ce biais, les ruptures par plastification de la tige (voir graphique 2.10). Un contrôle visuel est cependant indispensable pour s'assurer que ce n'est pas l'interface entre la tige et la colle qui a rompu, cette rupture étant elle aussi de type fragile.

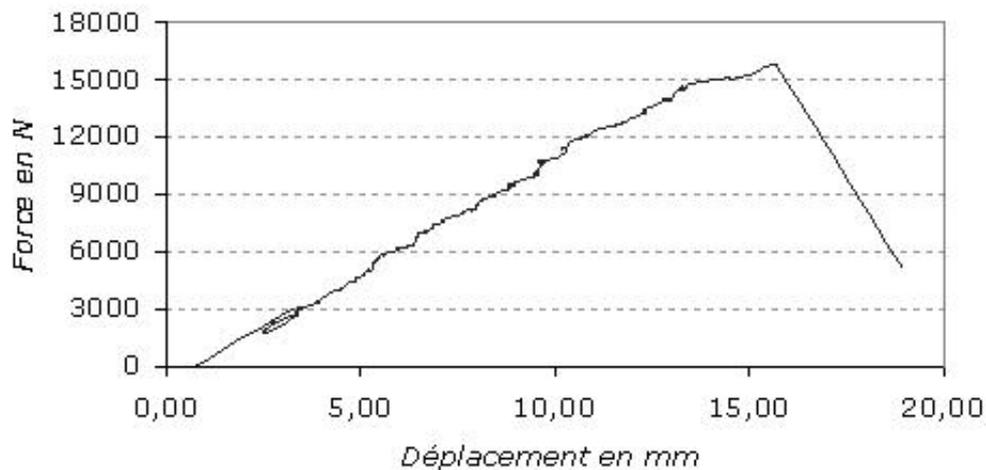


FIG. 2.10 – Rupture fragile de l'interface bois colle

2.1.1.4 Résultats

2.1.1.4.1 Goujons collés à l'époxy L'ensemble des éprouvettes testées en traction comme en flexion ont présenté un mode de rupture identique : extraction d'un cylindre de colle contenant la tige (voir photo figure 2.11). Les résultats des essais instantanés pour

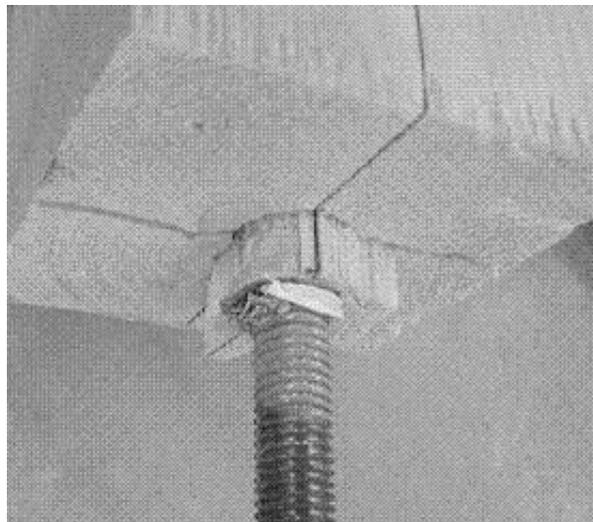


FIG. 2.11 – Faciès de rupture d'un goujon collé à l'époxy

les deux humidités de bois testées sont présentés dans le tableau 2.3 et le graphique 2.12. La résistance moyenne à l'arrachement des essais dits humides est inférieure de 7% à celle du lot de référence (MC=12%). Étant donné le nombre d'éprouvettes et la dispersion de chaque lot, on peut regrouper les deux séries lors du traitement des résultats en majorant

les efforts de rupture des poutres à 20% d'humidité par un facteur de 1,07. Cette faible influence de l'humidité du bois avait déjà été notée dans Feligioni [FLD+03].

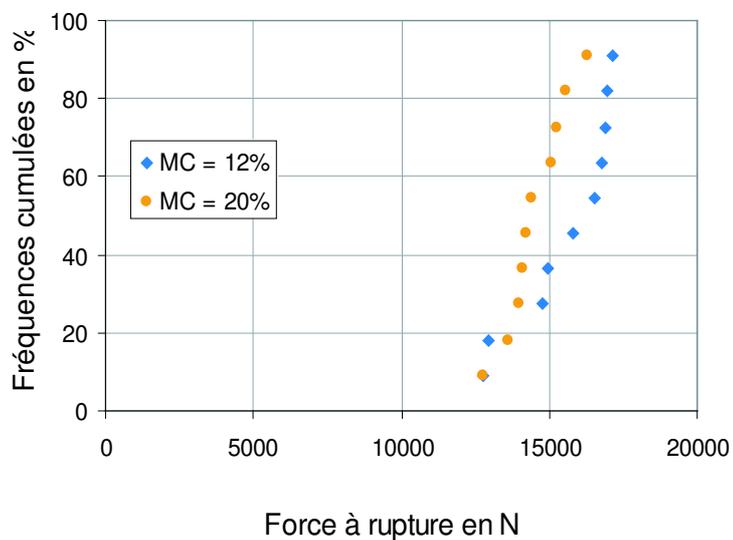


FIG. 2.12 – Essais de court terme sur les goujons collés à l'époxy

	Humidité du bois	
	12%	20%
P_f en N	15820	12790
	16560	14410
	12790	14110
	16900	14210
	16750	15240
	14940	15090
	17140	13960
	14800	13620
	16950	13310
	12940	15570
P_f moyen en N	15560	14530
COV en %	10	6.7

TAB. 2.3 – Récapitulatif des résultats instantanés pour la flexion d'un poutre collée à l'époxy

Assemblées, les deux distributions disponibles figurent en une seule sur le graphique 2.13 et une loi statistique de Weibull à deux paramètres permet de donner une équation représentative de la probabilité de rupture de l'échantillonnage.

$$f(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (2.3)$$

avec

- α le facteur de forme de la loi de Weibull
- β le facteur d'échelle de la loi de Weibull

Après résolution, nous avons le couple :

$$\left| \begin{array}{l} \alpha = 14.7 \\ \beta = 16136 \end{array} \right.$$

Le comportement à court terme des liaisons collées à l'époxy peut donc être modélisé par

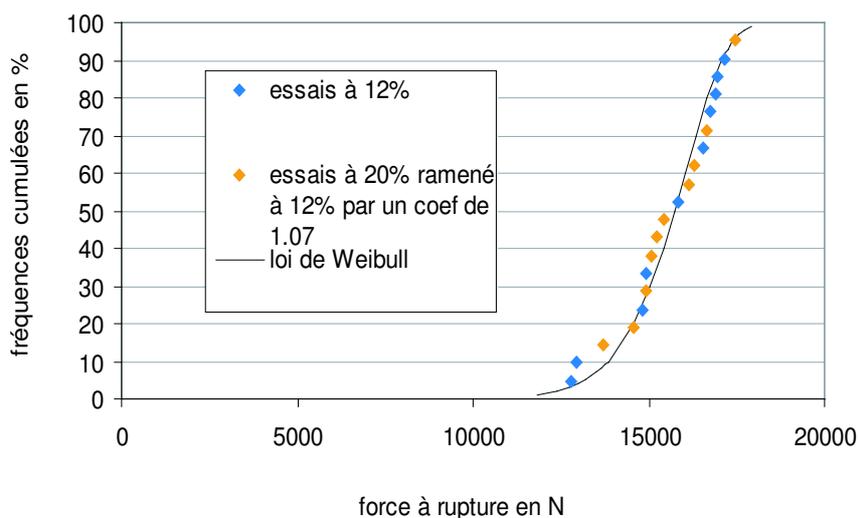


FIG. 2.13 – Représentation généralisée des essais de flexion avec l'époxy

la loi suivante :

$$f(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{16136}\right)^{14,7}} \quad (2.4)$$

2.1.1.4.2 Goujons collés au polyuréthane Parallèlement à l'époxy, les liaisons collées au polyuréthane présentent une rupture à l'interface entre le bois et l'adhésif. On voit sur la photo de la figure 2.14 que des fibres de bois restent à certains endroits attachées au cylindre de colle. Les résultats des essais de court terme sont détaillés dans le tableau 2.4



FIG. 2.14 – Faciès de rupture d'un goujon collé au polyuréthane

	Humidité du bois	
	12%	20%
P_f en N	13190	14110
	13630	14450
	13280	13380
	17620	9620
	14410	12160
	13190	16750
	12060	14650
	14510	13570
	14120	13620
	16260	13430
		111860
P_f moyen en N	14227	13419
COV en %	10.9	12.8

TAB. 2.4 – Récapitulatif des résultats instantanés pour la flexion d'un poutre collée au polyuréthane

Les forces à rupture des éprouvettes humides et sèches diffèrent de 6%. On en donne la représentation brute sur le graphique 2.15 et on établie la courbe de fréquences cumulées généralisée sur la figure 2.16 après avoir appliqué le coefficient 1.06 aux valeurs d'essai.

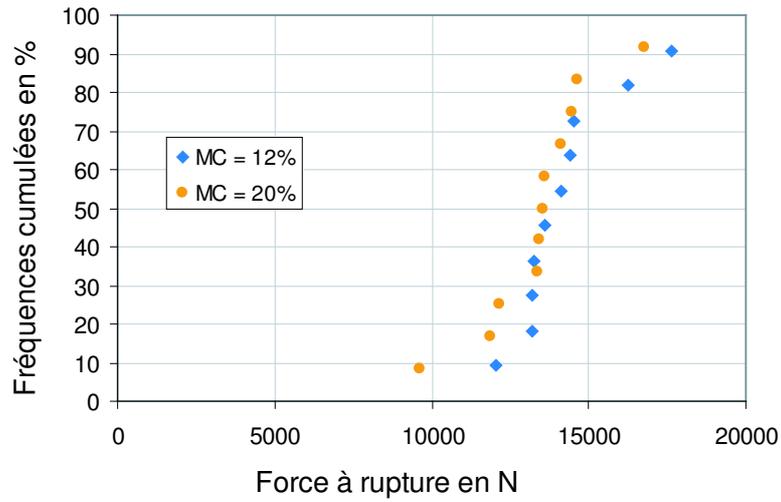


FIG. 2.15 – Essais de court terme sur les goujons collés au polyuréthane

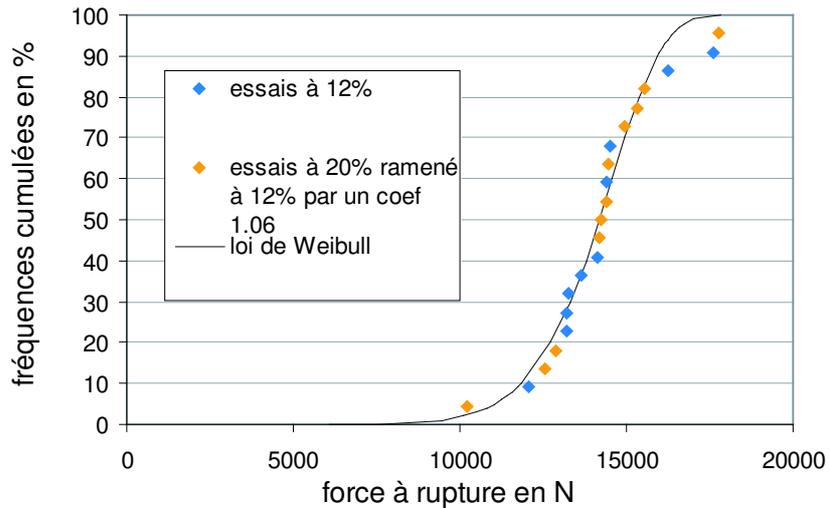


FIG. 2.16 – Représentation généralisée des essais de flexion avec le polyuréthane

Le comportement à court terme des liaisons collées au polyuréthane peut être modélisé par la loi de Weibull à deux paramètres suivante :

$$f(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{15798}\right)^{10,4}} \quad (2.5)$$

Grâce à ces différentes séries d'essais, nous avons collecté les informations nécessaires pour le lancement des essais de long terme.

2.1.1.4.3 Récapitulatif des essais de court terme Toutes les données sont répertoriées dans le tableau 2.5. Notons qu’aucune comparaison n’est possible entre les deux adhésifs si nous considérons les forces à rupture. Les diamètres de perçage des trous étant différents pour l’époxy et pour la polyuréthane, la surface de collage l’est aussi. Il faut donc travailler en contrainte pour formuler des observations quantitatives et non plus seulement qualitatives.

	Adhésif	$\tau_{f,moy}$ (MPa)	COV (%)	MC (%)
Traction 20°C-65%HR	époxy	5.54	8.7	12
	polyuréthane	6.65	8.4	12
Flexion 20°C-65%HR	époxy	5.53	10	12
	polyuréthane	6.50	10.9	12
Flexion amb°C-90%HR	époxy	5.16	6.7	20
	polyuréthane	6.13	12.8	20

TAB. 2.5 – *Récapitulatif des essais instantanés avec du lamellé collé*

2.1.2 Essais sur du chêne

Dans de nombreux cas de rénovation et de renforcement de structures anciennes comme les monuments historiques, les bois mis en jeu sont vieux et donc fissurés pour la plupart. Il est possible que cette donnée et que la qualité des poutres aient une influence sur la durée de vie d’un renfort collé ([SMG02]).

Une campagne expérimentale a donc été montée afin d’observer le comportement à long terme de la liaison collée dans du chêne ancien et de la comparer à celle menée pour du lamellé collé.

2.1.2.1 Géométrie des éprouvettes

L’éprouvette employée pour cette étude est très semblable à celle décrite précédemment. Un aspect les différencie cependant : on a disposé quatre goujons collés dans les poutres chêne car les sections disponibles étaient, le plus souvent, carrées et donc plus à même de recevoir quatre tiges (voir figures 2.17 et 2.18). Ces poutres ont été fabriquées par différents renforceurs professionnels français de manière à tester la qualité de la technique même des goujons collés dans du chêne et non celle de l’association de deux

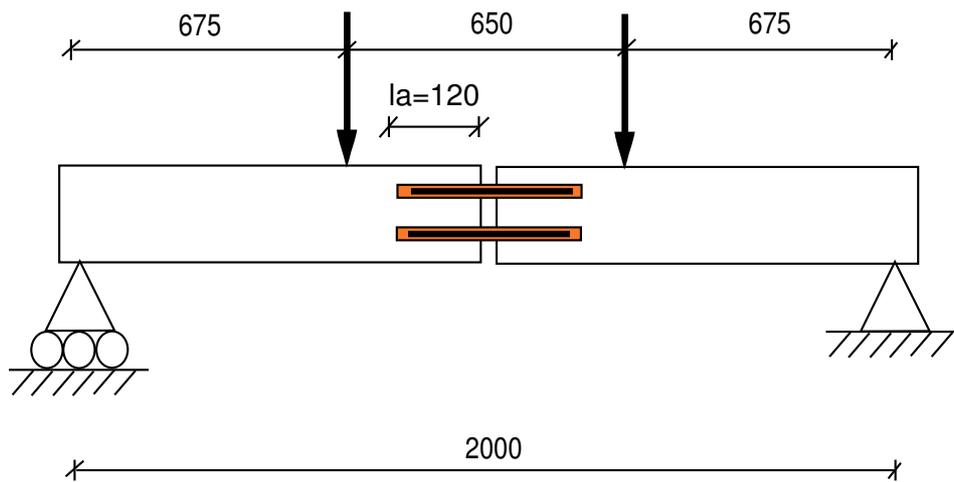


FIG. 2.17 – Géométrie de l'éprouvette de flexion en chêne neuf ou ancien

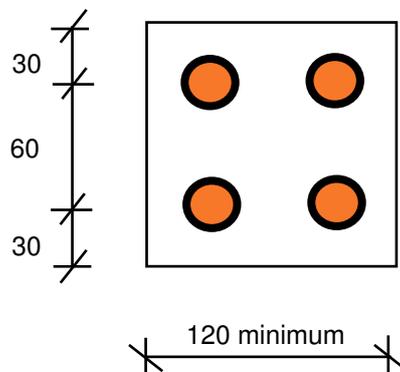


FIG. 2.18 – Géométrie de la section de l'éprouvette en chêne

produits. Chaque entreprise a donc utilisé son propre adhésif dans la classe des epoxyes. Plusieurs remarques sont à retenir de ce fait :

- On indique une valeur minimale pour les distances aux bords dans la figure 2.18, seul l'espacement intermédiaire des tiges est fixé à 60mm et doit être scrupuleusement respecté pour pouvoir déterminer les efforts dans les barres.
- Les tiges sont du $\phi 10$ mais les épaisseurs de joint de colle sont propres à chaque fabricant. On devra donc travailler, comme précédemment, en contrainte afin de normer les données de rupture avec la surface d'interface rompue selon le diamètre de perçage.
- Le positionnement des goujons lors de l'essai est d'une grande importance : il faut que les lignes de tiges soient parallèles aux surfaces d'appui. Un usinage a donc été entrepris pour chaque extrémité de poutre de manière à ce que la sollicitation ne varie pas d'une éprouvette à l'autre, même avec les états de surfaces irréguliers

caractéristiques de vieille poutres.

L'usinage a nécessité la conception d'un montage adaptable à toutes les sortes de sections (tailles, formes). Il est présenté sur la photo de la figure 2.19 lors du passage de la poutre à la scie à ruban. Ce système est basé sur le parallélisme entre un plat calé sur les tiges (au niveau de l'espacement du milieu de poutre) et le plan de la scie à ruban par un simple serrage de la poutre dans un bâti rigide.

Les essais sont effectués dans le même banc de flexion décrit auparavant et on collecte



FIG. 2.19 – Usinage des appuis des poutres anciennes

les valeurs des forces à rupture pour déterminer la contrainte moyenne de cisaillement au niveau de l'interface entre l'époxy et le bois.

2.1.2.2 Résultats

Pour ramener la force appliquée dans le vérin du bâti à la contrainte moyenne de rupture de l'interface entre l'époxy et le bois, on applique, une nouvelle fois, une relation simple de RdM, semblable à l'équation 2.2 citée dans la partie consacrée au lamellé collé à un facteur 2 près à cause du nombre de tiges.

Les résultats de ce lot de poutres sont synthétisés dans le tableau 2.6 et la figure 2.20. Ces essais de court terme peuvent être décrits comme précédemment par une loi de Weibull à deux paramètres :

$$f(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{7.43}\right)^{7.3}} \quad (2.6)$$

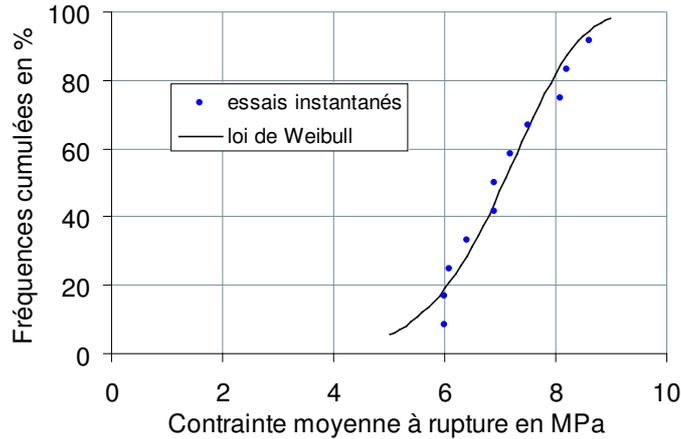


FIG. 2.20 – Fréquences cumulées des contraintes à rupture pour les essais de court terme sur les poutres en chêne

Provenances	Nbr d'essais	ϕ de perçage (mm)	τ_{moy} (MPa)	COV(%)
3	11	14 et 18	7,1	12,5

TAB. 2.6 – Tableau récapitulatif des essais de flexion de court terme sur les poutres en chêne

Notons que l'inclinaison de la distribution est différente de celle trouvée pour du lamellé collé. Ceci est dû au fait que le chêne n'a pas été classé avant essai et donc que les propriétés des bois sont plus dispersées que pour le GL24h.

La valeur moyenne de résistance à rupture de l'interface bois-colle (τ_{moy}) se révèle supérieure à celle du lamellé-collé de l'ordre de 20%. La nature du bois influe sur les propriétés mécaniques et améliore dans notre cas la résistance. La résistance caractéristique de l'interface peut être estimée pour ce matériaux, on passe de 5.5 MPa à 9.0 MPa.

La loi de Weibull est pour nous un outil permettant de déterminer un paramètre de l'expérience délicat à établir : le taux de charge réel de chaque poutre lors de l'essai long terme. Cette notion est utilisée dans la méthode des lots ordonnés, appelée aussi méthode de l'ordonnement, de Madsen [MAD92] et sera détaillée dans le chapitre 4.

Lors de cette partie d'étude, nous avons fait fabriquer une lot de poutres supplémentaires pour fixer notre attention sur les modes de rupture. Quinze poutres comportent des tiges avec une plus grande longueur d'ancrage, calculée selon les règles professionnelles [IRA99] soit $17.5d$, d étant le diamètre de la tige. Neuf d'entre elles ont été rompues à court terme et les six restantes à long terme. Cette étude avant tout qualitative devrait

révéler ou non un changement de mode de rupture entre les deux types d'essais.

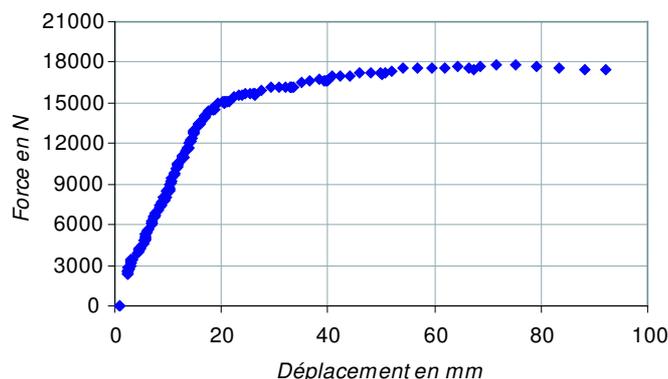


FIG. 2.21 – Ruine ductile par plastification de la tige

Lors de la campagne de court terme, l'ensemble des éprouvettes a présenté une rupture par plastification des tiges comme le prévoit le guide de calcul qui prescrit un calcul de scellement suffisant pour éviter la rupture adhésive. Ce type de rupture est détecté sur le graphique force-déplacement 2.21 par un plateau où la déformation ne cesse d'augmenter alors que l'intensité de la force stagne.

2.2 Les essais de petites dimensions

2.2.1 A température ambiante

Nous avons vu dans la section consacrée aux essais en grandeur structurale que nous ne pouvons obtenir qu'une valeur moyenne de la contrainte ultime de l'interface bois adhésif avec de grandes longueurs d'ancrage de l'ordre du diamètre de la tige. Si l'on veut définir cette valeur qui est intrinsèque aux matériaux mis en jeu, on doit pratiquer des essais sur de faibles longueurs d'ancrage. On peut ainsi considérer que la distribution de contrainte le long de la tige est uniforme et obtenir la valeur de τ_f , maintenant indépendante de la longueur d'ancrage. On peut voir sur la figure 2.22 une représentation de la différence de distribution d'une faible longueur d'ancrage à une grande longueur. On voit schématiquement l'intérêt de faire des essais locaux.

On procède ensuite de la même manière que pour les essais en grandeur structurale en

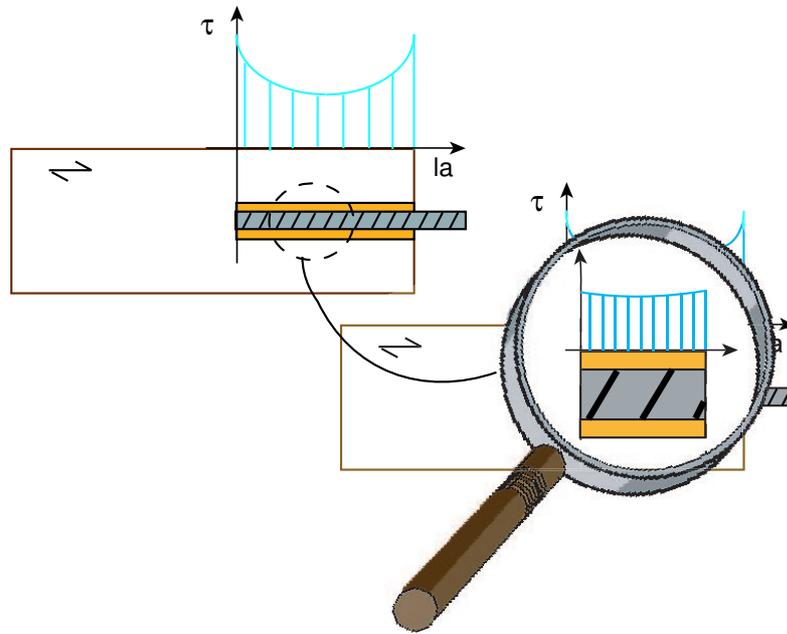


FIG. 2.22 – *Profils de contrainte en petites et grandes dimensions*

testant des lots d'éprouvettes qui diffèrent par la colle utilisée et l'humidité du bois.

Les conditions d'essais :

- époxy, humidité du bois à 12% environ
- époxy, humidité du bois à 20% environ
- polyuréthane, humidité du bois à 12% environ
- polyuréthane, humidité du bois à 20% environ

Le conditionnement se passe dans les mêmes enceintes qui ont été décrite précédemment mais la durée de stabilisation de l'humidité du bois est bien sûr très inférieure à celle qui était nécessaire pour les poutres de structure.

2.2.1.1 Fabrication et géométrie de l'éprouvette

Les éprouvettes de petites dimensions ont été conçues pour être comparables aux poutres de structure; elles sont donc constituées des mêmes matériaux mais ont été fabriquées au Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux (contrairement aux poutres sorties d'atelier professionnels). Notre première intention était de fabriquer une pièce avec une forte longueur d'ancrage, puis de couper des "tranches" afin d'isoler de petites éprouvettes. En faisant cette opération, nous altérons la colle par chauffage au moment

du passage de la scie. Il faut donc procéder à la fabrication individuelle des assemblages réduits.

Les précautions sur les matériaux :

Les fabricants de poutres nous ont fourni des carrelots de lamellé collé pour que nous puissions fabriquer nous mêmes les petites éprouvettes. Par précaution, nous avons caractérisé ces pièces en vibration avant de les scier en plaquettes fines pour les liaisons locales, afin de nous assurer que nous disposions bien du même matériau que pour les essais en grandeur structurale. Cette démarche nous laisse également la possibilité de rapprocher des faibles valeurs éventuelles de rupture expérimentales à la qualité de la pièce de bois si ce phénomène venait à se répéter au court des essais pour un même carrelot.

Les essais vibratoires :

Ce sont des essais d'évaluation non destructive, basés sur l'analyse spectrale des vibrations naturelles. Chaque mode de vibration est caractérisé par sa fréquence propre, celle là même que nous déterminons afin d'évaluer le module longitudinal en flexion de chaque pièce de bois. Nous nous intéressons la formulation de Bernoulli, classiquement utilisée pour l'étude des vibrations de flexion des poutres longues : $\frac{L}{h} \gg 1$. Le principe de l'essai est présenté sur le schéma 2.23 et la relation donnant le module est la suivante :

$$E = 4\pi^2 \rho l^2 \frac{Sl^2}{I} \frac{f_k^2}{X_k} \quad (2.7)$$

avec :

- ρ la masse volumique de la pièce de bois,
- l sa longueur,
- S sa section,
- I l'inertie de la section,
- f_k la fréquence du mode propre de rang k ,
- $X_k = [(2k + 1)\frac{\pi}{2}]^4$

Cette méthode est détaillée dans Casagrande [CAS98]. Le graphique 2.24 représente la distribution en fréquences cumulées du module d'élasticité longitudinal en flexion et les informations à retenir sont dans le tableau 2.7.

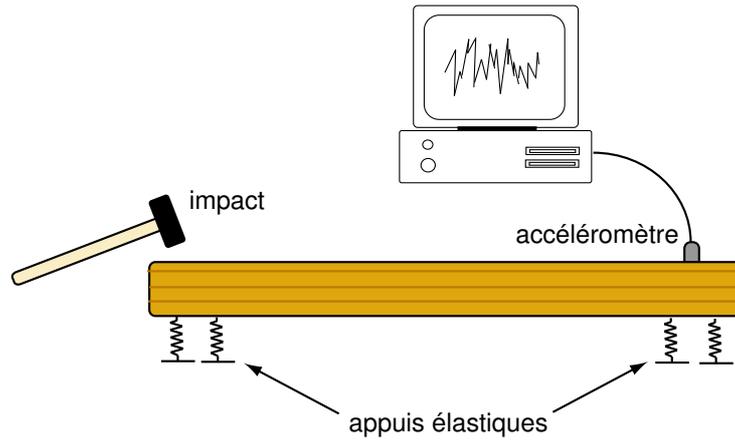


FIG. 2.23 – Méthodologie de l’essai non destructif de caractérisation du module d’élasticité en flexion sur une pièce de bois

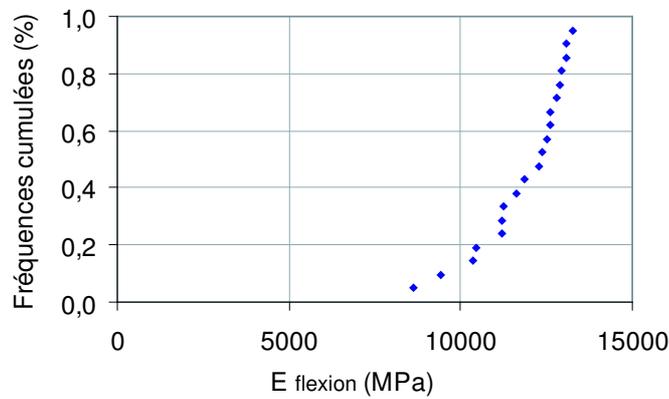


FIG. 2.24 – Répartition des modules d’élasticité longitudinaux en flexion des carrelets de lamellé collé

	Nb de pièces	E_{moyen} en MPa	COV en %
Carrelets	20	11820	10.6
EC5		11000	

TAB. 2.7 – Module d’élasticité par essais vibratoires

2.2.1.1.1 Le procédé de fabrication Lorsque l’on met en oeuvre des goujons collés, un paramètre essentiel est le centrage de la tige. Effectivement, les colles sont faites pour travailler en joint épais ou en joint mince mais il ne faut pas qu’un défaut de positionnement de la tige les fasse travailler au contraire de ce pour quoi elles sont prévues. Un erreur de la sorte pourrait, par exemple, entraîner des ruptures cohésives.

Tout comme les poutres de structure, on doit mettre en oeuvre deux épaisseurs de joint de colle : 3 mm pour l'époxy et 1 mm pour la polyuréthane. Le système de fabrication qui a été conçu permet non seulement de faire varier l'épaisseur du joint mais aussi d'assurer le parfait centrage du goujons.

On dispose d'une plaque de polypropylène que l'on a percé autant de fois que le nombre d'échantillons que l'on veut fabriquer en une série de collage. Ces trous sont taraudés et on peut venir y visser la tige filetée qui sera ainsi fixe. On vient placer les plaquettes percées autour des tiges et on détermine leur position grâce à des douilles de 1 ou 3 mm d'épaisseur. Une fois la position ajustée, on bloque le système avec des petites plaques métalliques et on peut retirer les douilles avec la certitude que l'épaisseur du joint de colle sera bien respectée. On peut ainsi venir verser la colle dans l'espace réservé.

Le fait que le goujon soit vissé permet de fermer le filetage et de préserver la propreté de la tige puisque la colle ne pourra pas s'y glisser. On prend par contre le soin de placer un carré de papier sulfurisé entre la plaquette de bois et la plaque de polypropylène de manière à éviter que l'échantillon ne colle au support. Le montage apparaît sur la photo de la figure 2.25 avec les douilles et le système de serrage ; les plaquettes collées et séchées apparaissent figure 2.26. Le positionnement est très important dans la mise en oeuvre

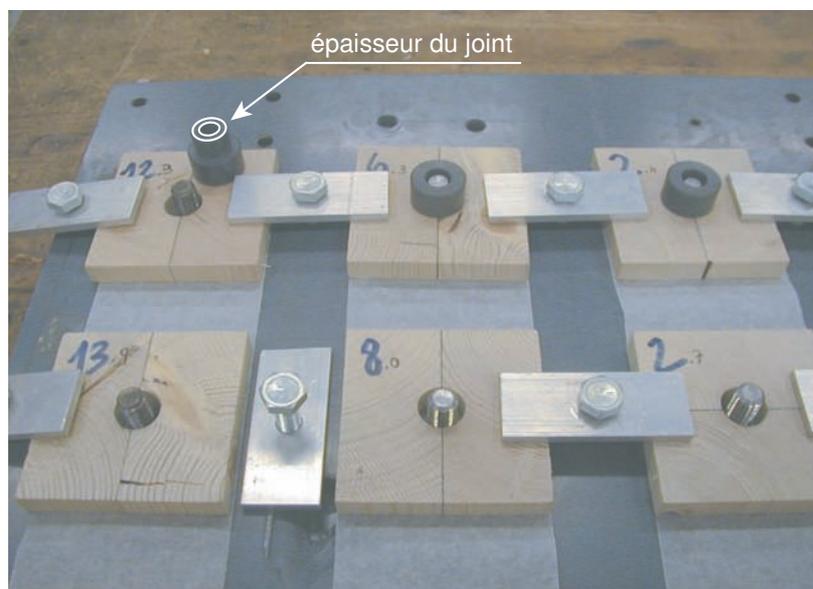


FIG. 2.25 – *Fabrication des éprouvettes de petites dimensions*

mais il ne faut pas négliger la préparation des matériaux et substrats. Le bois a été conditionné dans l'enceinte à 20°C et 65% HR pour des conditions de collage optimum. Après le perçage des plaquettes, on ponce la surface de collage de manière à retirer les fibres



FIG. 2.26 – Série d'éprouvettes collées

détachées du bois et à ce que la surface soit propre. On dégraisse enfin la tige acier à l'acétone.

Toutes ces précautions sont indispensables pour obtenir le mode de rupture souhaité entre le bois et l'adhésif. On a également veillé à ce que les échantillons soient stockés dans l'enceinte pendant toute la durée de polymérisation de l'adhésif.

2.2.1.1.2 Géométries des éprouvettes La géométrie des éprouvettes est détaillée sur le schéma 2.27. Les dimensions respectent une nouvelle fois les préconisations de distances aux bords précisées dans Blass [BL99]. Cette géométrie est aussi valable pour des diamètres de tige plus petits à condition d'y rajouter 2 mm pour la PU et 6 mm pour l'époxy lors du perçage. La longueur de la tige a été évaluée pour permettre une bonne accroche lors de l'essai de traction auquel sera soumise l'éprouvette.

2.2.1.2 Matériel et méthode

La longueur d'ancrage étant très petite, les propriétés locales du bois jouent un rôle très important dans la résistance. Il nous a donc semblé important de prêter attention au choix des pièces de bois. Les plaquettes ont été débitées dans des carrelets de lamellé collé, nous avons préalablement testé ces pièces par une méthode non destructive afin d'éliminer tout élément mal classé. Puis nous avons scié et repéré un grand nombre de plaquettes provenant de tous les carrelets disponibles. C'est enfin par un tirage aléatoire du numéro de plaquette que nous nous sommes assurés de ne pas influencer les résultats par une mauvaise sélection.

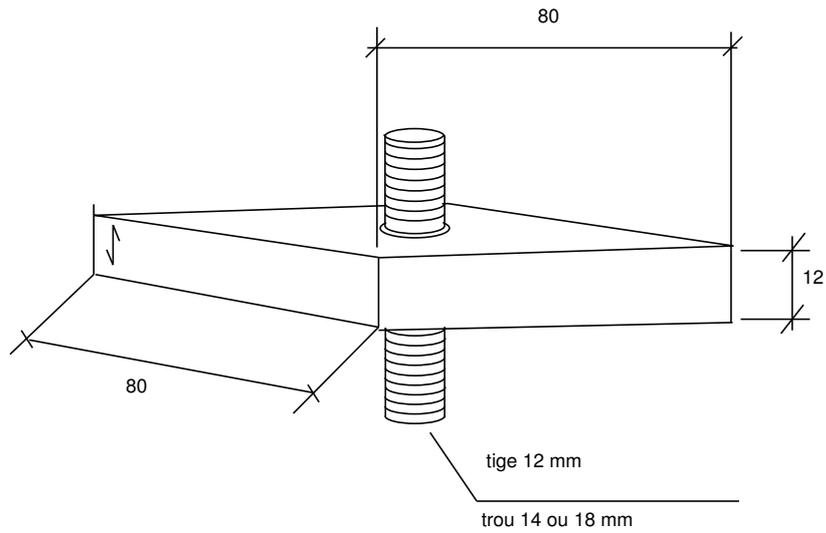


FIG. 2.27 – Géométrie de l'éprouvette de petites dimensions en mm

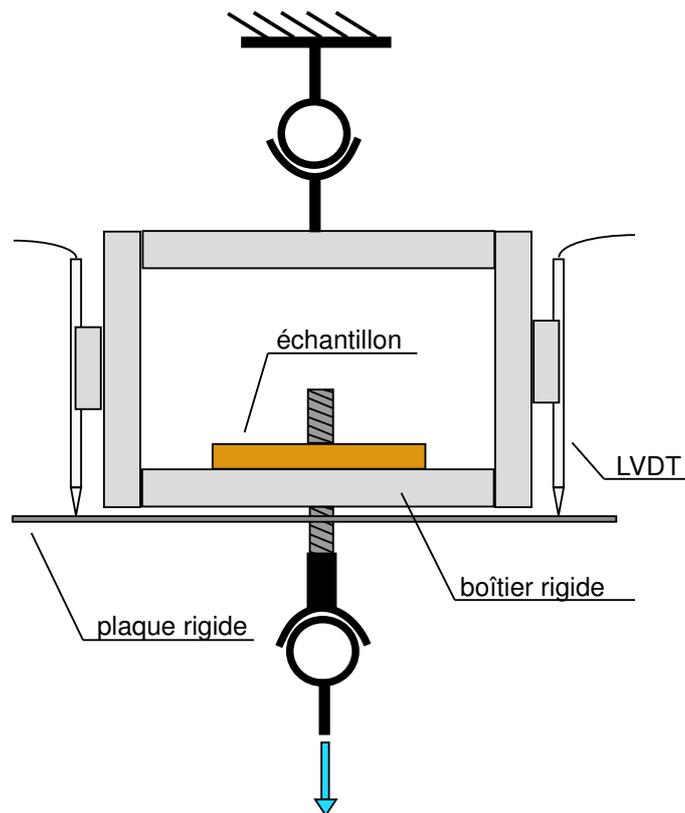


FIG. 2.28 – Système d'essai des éprouvettes de petites dimensions

La liaison locale a été conçue pour pouvoir exercer de la traction sur la tige et ainsi solliciter le joint de colle en cisaillement. Afin de permettre à cet effort d'être le plus pur

possible, le système d'essai décrit sur la figure 2.28 est rotulé à ses deux extrémités, venant donc se placer par lui même dans l'axe offrant les conditions idéales de sollicitation.

La boîte dans la quelle vient s'insérer l'échantillon est constituer de pièces suffisamment massive pour que l'on considère leurs déformations nulles au cours de l'essai (de l'ordre du micron). Elle est percée pour pouvoir laisser passer la tige. Ce trou peut cependant être modifié au moyen de bagues pour les cas où il doit être plus petit (cas des adhésifs fonctionnant en joint mince).

L'essai se déroule sur un bâti de type ADAMEL (figure 2.29 que l'on équipe avec un capteur de force de 2000 daN. Cette machine est conçue pour pratiquer des tests pilotés en déplacement. On fixe ainsi une vitesse de traverse de 1mm/minute et on enregistre pour des pas de temps très faibles la force et les déplacements donnés.



FIG. 2.29 – *Essai de court terme sur le bâti Adamel*

Le dispositif de mesure du déplacement de la tige complète le système. Il s'agit de deux LVDT (Linear Variable Differential Transformer) fixés au boîtier venant reposer sur une plaque rigide solidaire de la tige ; la moyenne des deux mesures donnent une valeur précise du déplacement de la tige.

La mesure offerte par les LVDT permet de tracer une courbe force déplacement dont un exemple est donné au graphique 2.30. Ces courbes servent à déterminer la force ultime à

laquelle l'échantillon a résisté mais aussi à calculer l'énergie de rupture G_f de l'interface adhésif bois .

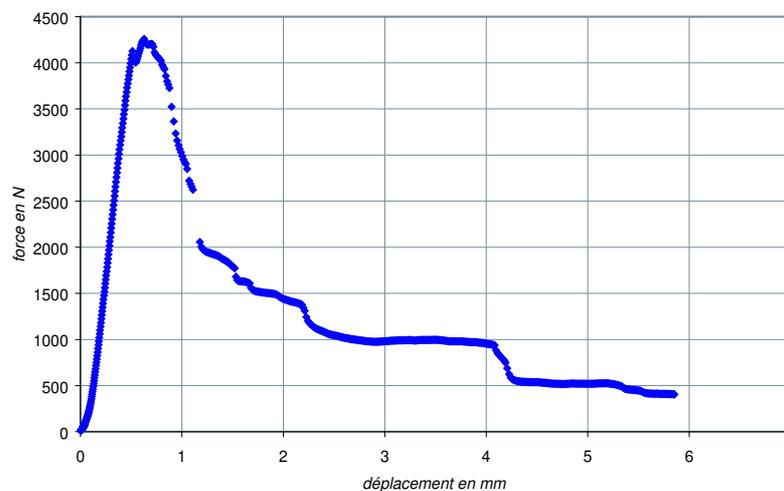


FIG. 2.30 – Exemple de courbe force déplacement pour les petites éprouvettes

2.2.1.3 Résultats

Comme nous l'avons déjà dit, la force à rupture mesurée sur des échantillons dont la longueur d'ancrage est faible permet de caractériser plus précisément l'interface par sa contrainte ultime τ_u . Effectivement, ce dernier paramètre vient se substituer à la contrainte moyenne (seul paramètre accessible pour de grandes longueurs) et est nécessairement plus élevée.

2.2.1.3.1 Goujons collés à l'époxy Les éprouvettes initialement prévues pour être testées devaient contenir de la tige de diamètre 12 mm. Un fois les essais de court terme achevés, nous avons évalué le poids à appliquer pour le chargement lors de l'essai long terme. Il s'est avéré à ce moment là que le système risquait de ne pas supporter une telle charge. C'est la raison pour laquelle nous avons réduit le diamètre de la tige et par la même de la surface de collage, diminuant considérablement la charge à appliquer. Un diamètre 8 mm a donc servi à la fabrication d'autres lots d'éprouvettes. Dans le souci de conserver le plus possible l'élanement du joint de colle, nous avons également réduit la longueur de collage de la tige à 10 mm au lieu de 12 mm. La valeur idéale aurait été 8 mm mais des problèmes techniques d'outillage ne nous ont pas permis d'atteindre cette cote.

Par précaution, nous avons vérifié que la modélisation numérique de cette petite éprouvette montrait que cette différence d'éclancement n'avait aucune incidence sur les contraintes dans le joint de colle.

L'ensemble des résultats sont présentés dans les graphiques 2.31, 2.32 et le tableau 2.8.

	ϕ_{tige} (mm)	l_a (mm)	$P_{f,moy}$ (N)	$\tau_{f,moy}$ (MPa)	COV (%)
20°C-65%HR	8	10	4250	9.66	18.2
	12	12	7472	11.01	11.7
amb°C-90%HR	8	10	4707	10.71	10.4
	12	12	6741	9.93	8

TAB. 2.8 – Essais de court terme sur les éprouvettes de petites dimensions collées à l'époxy

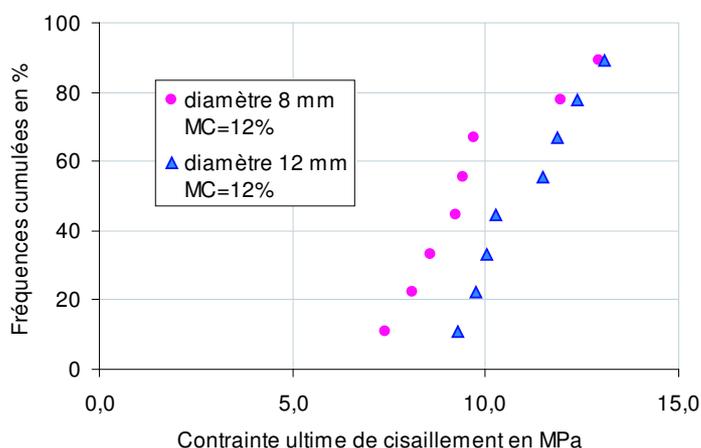


FIG. 2.31 – Résultats des essais de court terme sur les liaisons locales collées à l'époxy, MC=12%

Les contraintes ultimes à l'interface adhésif bois sont plus faibles (12% de moins) pour le plus petit diamètre à une humidité du bois de 12%. Ce n'est pas le cas pour les éprouvettes menées à 20% d'humidité où les valeurs sont quasi-identiques.

Il y a probablement ici un problème de représentativité des essais car les distributions de contraintes ultimes devraient se mêler davantage au graphique 2.31. En revanche, à 20% (graphique 2.32), les distributions sont équivalentes mais leurs pentes importantes laissent à penser que la représentativité est, là aussi, à considérer prudemment.

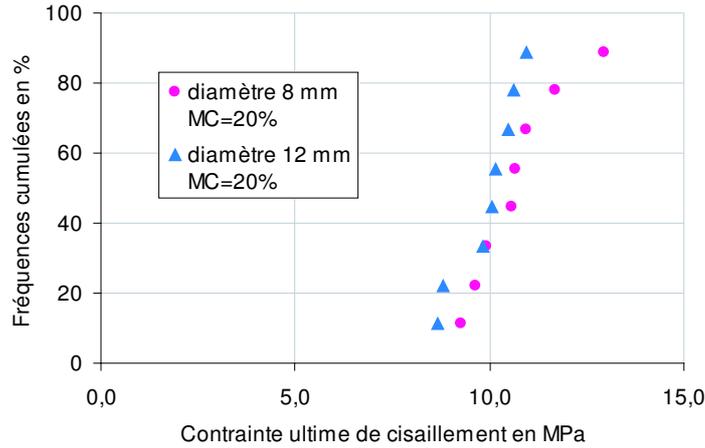


FIG. 2.32 – Résultats des essais de court terme sur les liaisons locales collées à l'époxy, $MC=20\%$

2.2.1.3.2 Goujons collés au polyuréthane L'adhésif polyuréthane nécessite, comme nous l'avons déjà vu, un joint de colle mince de l'ordre de 1 mm d'épaisseur. Dans ces conditions, la force à appliquer lors des essais de long terme ne dépassait pas la capacité portante des bâtis. Nous n'avons par conséquent pas fait d'essais supplémentaires comme il avait été nécessaire de le faire avec l'époxy. Le tableau 2.9 et le graphique 2.33 résument les données expérimentales de court terme pour les deux humidités de bois étudiées.

	ϕ_{tige} (mm)	l_a (mm)	$P_{f,moy}$ (N)	$\tau_{f,moy}$ (MPa)	COV (%)
20°C-65%HR	12	12	4937	9.35	13.3
amb°C-90%HR	12	12	4650	8.81	10

TAB. 2.9 – Essais de court terme sur les éprouvettes de petites dimensions collées au polyuréthane

Notons que le dispositif expérimental de la figure 2.28 est légèrement modifié puisque le diamètre de collage diminue pour le polyuréthane. On a donc introduit une sorte de bague dans l'orifice permettant le passage de la tige afin de conserver la même proportion de bois en appui dans la "boîte" d'essai, ceci toujours dans le souci de réduire au maximum les sources de variabilité.

Les modes de rupture observés pour les liaisons locales collées à l'époxy et au polyuréthane sont identiques et illustrés par la photo de la figure 2.34. On voit très nettement que la

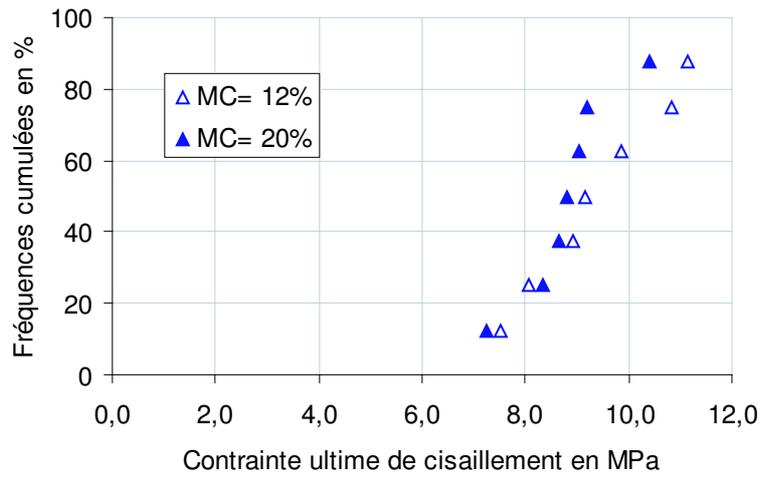


FIG. 2.33 – Résultats des essais de court terme sur les liaisons locales collées au polyuréthane

rupture s'est produite à l'interface entre l'adhésif et le bois et que l'on extrait l'ensemble tige-colle en un bloc.

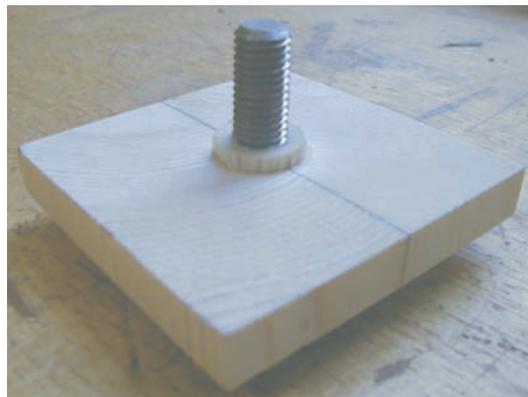


FIG. 2.34 – Illustration du mode de rupture pour les éprouvettes de petites dimensions

2.2.2 Influence de la température

Nous avons vu lors du constat bibliographique que l'effet de la température était un point important dans une liaison par goujons collés non seulement en cas d'incendie mais aussi lorsque les goujons collés sont mis en oeuvre dans des combles où, nous le savons, les températures peuvent être considérables (supérieures à 50°C). L'étude que nous avons menée permet de caractériser le comportement de l'interface entre le bois et l'adhésif alors que les essais visant à déterminer la température de transition vitreuse s'appliquent, eux, au polymère seul.

2.2.2.1 Fabrication de l'éprouvette

Les éprouvettes sont identiques à celles utilisées pour les essais à température ambiante à un détail près. La préparation de la tige comprend en effet l'usinage d'un emplacement dans lequel nous venons glisser une cartouche chauffante (contenant un thermocouple) permettant de mettre à la température désirée la tige et le joint de colle (voir figure 2.35).

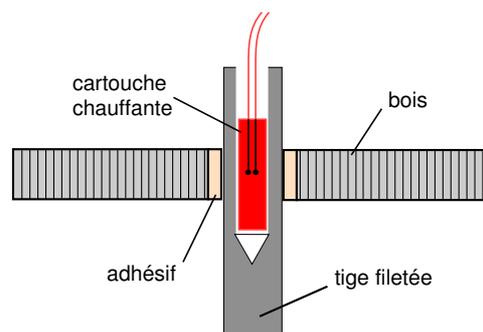


FIG. 2.35 – Schéma de principe du dispositif de chauffage de la liaison par l'intermédiaire d'une cartouche chauffante

2.2.2.2 Matériel et méthode

L'orifice dans lequel est placée la cartouche est dimensionné de manière à ce que le thermocouple soit centré dans l'épaisseur de la plaquette de bois de l'éprouvette pour une bonne répartition du profil de température. Plusieurs tests de calibration ont permis de vérifier que l'ensemble de la zone de la liaison avait une température uniforme et surtout de savoir au bout de combien de temps elle se stabilise. Nous avons, par exemple, fabriqué une éprouvette témoin dans laquelle nous avons collé des thermocouples afin de suivre l'évolution de la température à des points particuliers. Nous avons également prévu une

isolation thermique autour de l'éprouvette et dans le montage pour minimiser les pertes de chaleur. Le dispositif a donc été optimisé et le montage figure sur les photos de la figure 2.36.

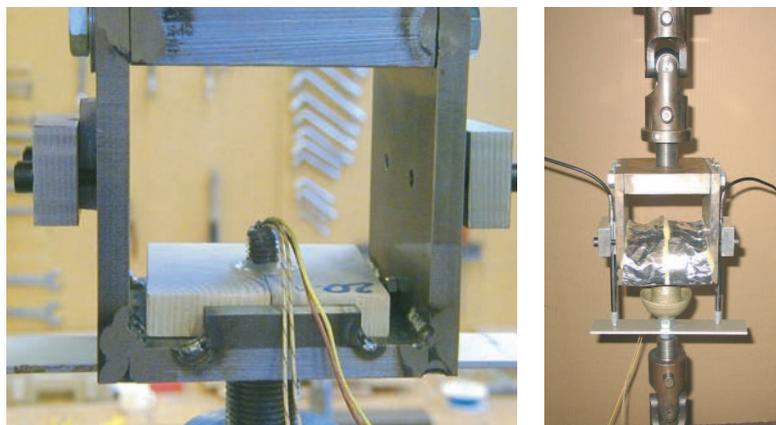


FIG. 2.36 – Dispositif d'isolation permettant de réaliser les essais à différentes températures

Le nombre d'essais pour chaque température est variable car fonction de la fabrication des éprouvettes. Effectivement, certains lots présentaient des défauts de fabrication où les mélanges des deux composants s'était mal fait. Nous n'avons alors pas tenu compte de ces résultats et réduit le nombre d'essais.

2.2.2.3 Résultats pour les deux adhésifs

Nous avons pratiqué plusieurs séries d'essais aux températures de 35°C , 50°C , 65°C , 80°C et 120°C pour l'époxy et 30°C , 45°C , 65°C , 85°C et 120°C pour le polyuréthane. Le graphique 2.37 montre l'évolution de la résistance moyenne avec l'augmentation de la température. Des essais de détermination de la température de transition vitreuse (T_g) ont été pratiqués parallèlement et les valeurs retenues par la méthode chimique (DSC) sont : 66°C pour l'époxy et 64°C pour le polyuréthane.

Le point qui semble important est l'observation des modes de rupture. Nous distinguons trois phases différentes pour l'époxy et le polyuréthane :

– à température ambiante et jusqu'à 35°C , rupture adhésive

C'est l'interface entre le bois et la colle qui rompt et l'ensemble tige-colle est extrait de la plaquette de bois.

– entre 45°C et 85°C , rupture adhésive

C'est l'interface entre la colle et la tige qui rompt et la tige seule sort le la colle.

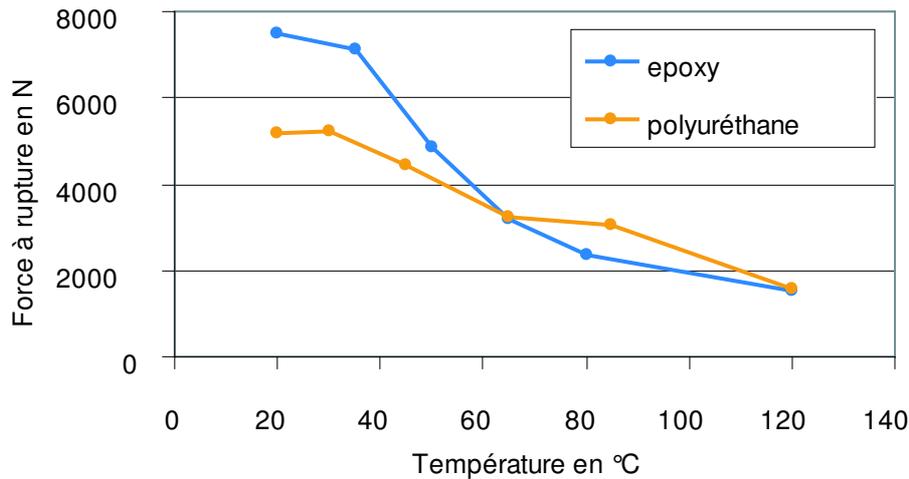


FIG. 2.37 – Evolution de la résistance à l'arrachement en fonction de la température (essais locaux)

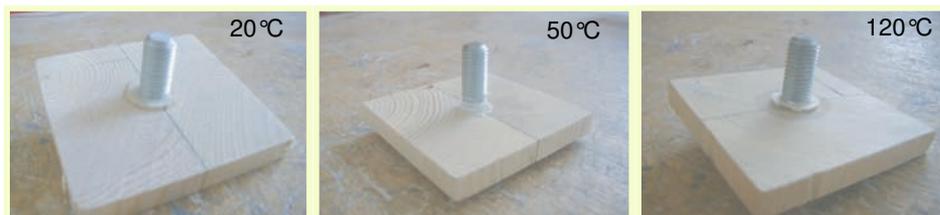


FIG. 2.38 – Modes de rupture des essais locaux pour différentes températures

– à 120°C, rupture cohésive

La rupture a lieu à l'intérieure du joint de colle et cette dernière perd presque toute résistance. La colle se détache en biseau.

Les modes de ruptures sont illustrés par les photos de la figure 2.38.

Nous avons constaté de fortes diminutions de résistance pour les deux adhésifs avec l'augmentation de la température et les figures 2.39 et 2.40 présentent respectivement des courbes force-déplacement obtenues lors des essais pour l'époxy et le polyuréthane.

Nous remarquons premièrement que les forces à rupture diminuent avec la température. Dans la première fourchette (20°C - 35°C), nous observons bien des ruptures fragiles correspondant au comportement caractéristique du bois. Deuxièmement, les températures plus fortes, la rupture devient ductile avec une diminution progressive de la rigidité de la liaison. Ces observations sont en accord avec les remarques précédentes sur les modes de rupture.

Les tableaux 2.10 et 2.11 donnent les moyennes des forces à rupture pour les différents

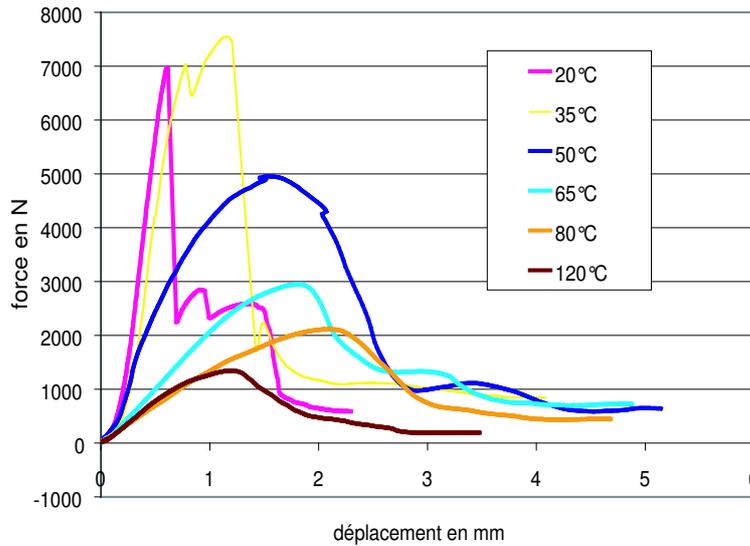


FIG. 2.39 – *Superposition de courbes force-déplacement des essais de court terme avec de l'époxy*

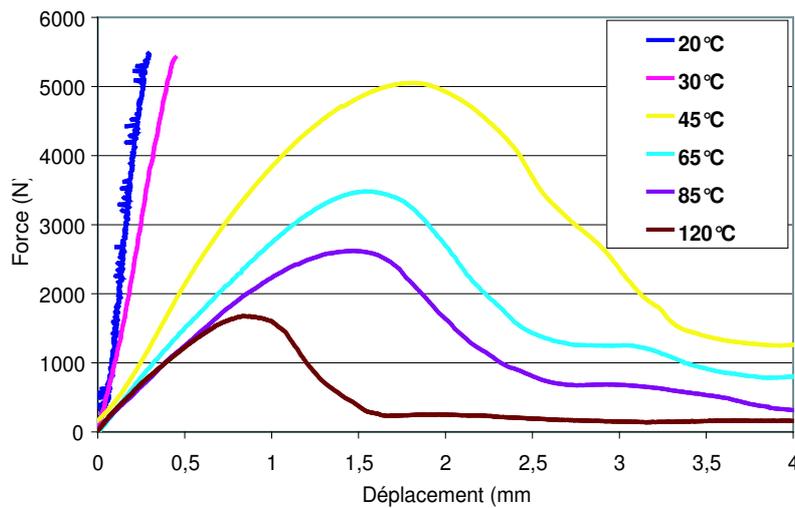


FIG. 2.40 – *Superposition de courbes force-déplacement des essais de court terme avec du polyuréthane*

paliers de température, on lit aussi les pourcentages de diminutions de résistance.

Toutes ces données laissent à penser que l'effet de la température peut jouer un grand rôle dans l'évaluation des risques auxquels sont soumis les goujons collés et ce pour des températures qui semblent faciles à atteindre sous une toiture. A titre d'exemple, à 50°C, la liaison époxy a perdu 35% de sa résistance et la liaison polyuréthane 20%. En cas de

	20°C	35°C	50°C	65°C	80°C	120°C
F_{rupt} moy (N)	7472	7116	4849	3176	2355	1521
COV (%)	11.7	10.5	8.0	22.2	15.3	12.9
Pourcentage de résistance	100	95	65	43	32	20

TAB. 2.10 – Récapitulatif des essais à différentes températures pour de l'époxy

	20°C	30°C	45°C	65°C	85°C	120°C
F_{rupt} moy (N)	5161	5206	4441	3230	3056	1584
COV (%)	10.3	13.1	23.3	19.1	16.2	13.1
Pourcentage de résistance	100	100	86	63	59	31

TAB. 2.11 – Récapitulatif des essais à différentes températures pour du polyuréthane

mise en oeuvre particulière, il faudrait donc appliquer des coefficients prenant en compte cette diminution de résistance, le tableau 2.12 en donnent des exemples.

température	adhésif	situation de service	coef
30°C	epoxy	extérieur sous abri	1.05
	polyuréthane	extérieur sous abri	1
50°C	epoxy	combles	1.35
	polyuréthane	combles	1.2

TAB. 2.12 – Exemple de coefficients à appliquer à la résistance en fonction de la température de service

2.3 Récapitulatif des essais à court terme

Il a été montré expérimentalement que des essais de traction sur une double liaison goujons collés étaient équivalents à des essais de flexion quatre points sur des poutres de structure, essais plus faciles à réaliser.

On constate que l'humidité du bois n'a qu'une faible influence sur la résistance à l'arrachement d'un goujon collé pour de l'époxy comme pour du polyuréthane, elle est cependant prise en compte par un facteur de pondération de la résistance.

Les résultats obtenus dans la campagne expérimentale sur le chêne montre une augmentation de la résistance de l'interface de l'ordre de 20% par rapport au lamellé collé à cause de la nature du bois. On déduit des essais une nouvelle valeur de la contrainte caractéristique maximale pour le chêne de $f_{ax,k} = 9MPa$, valeur qui viendrait en remplacement de 5.5 MPa proposé par Gustafsson (pour du lamellé collé).

L'exploitation de la base de données des essais de Feligioni (113 valeurs) a été complétée par les essais pratiqués au L.R.B.B. sur les éprouvettes de petites dimensions avec un diamètre de tige de 8 et 12 mm (16 valeurs). Le graphique 2.41 montre la position de nos points expérimentaux. Ils sont exclus de la partie basse de la distribution. Ceci pourrait s'expliquer par la configuration de l'éprouvette : lors du collage un amas d'adhésif se forme au dessus de la plaquette de bois, élément qui pourrait augmenter la résistance de manière indésirable. L'éprouvette utilisée pour les essais de Feligioni en est dépourvue. La tendance pour de nouveaux essais irait donc vers la configuration d'éprouvette de ses lots (figure B.1). La formulation 1.7 qu'il a mis au point permet de réduire les dispersions et rendre le calcul plus fiable. Elle est centrée sur la valeur moyenne alors que Gustafsson s'attache à la valeur caractéristique. Le changement de diamètre ne devrait pas avoir d'influence sur la résistance pour les essais en petites dimensions, or nous constatons des distributions différentes qui montrent un problème de représentativité de lot.

Dans le tableau 2.13 on donne $\tau_{f,moy} = \frac{P_{f,moy}}{\pi\phi_{trou}l_a}$ de l'ensemble des essais court terme.

Toutes les données de références sont donc maintenant disponibles. C'est à partir d'elles que nous allons déterminer la charge à appliquer lors des essais différés présentés dans les chapitres suivants.

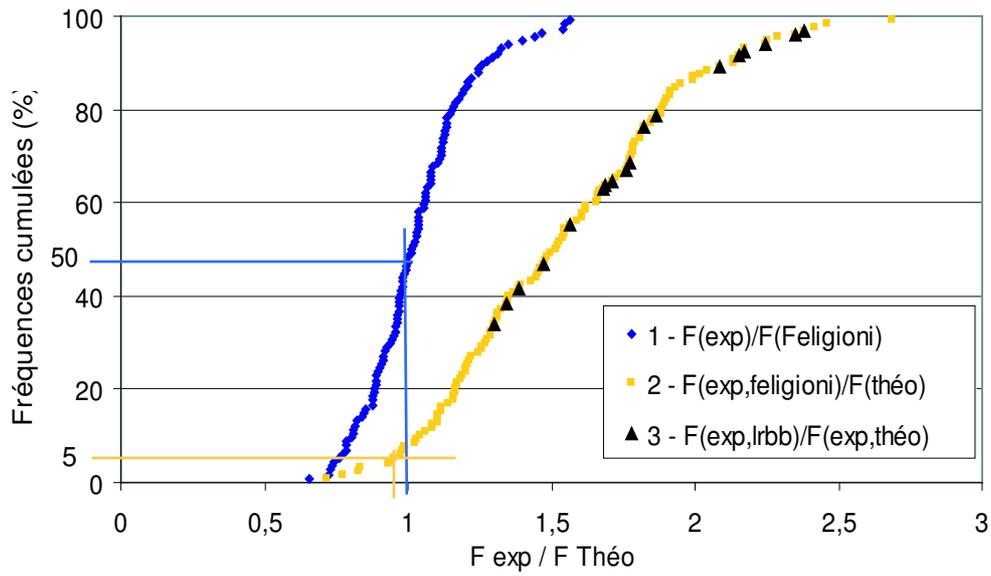


FIG. 2.41 – Analyse et intégration de la formule empirique de Feligioni dans le cadre réglementaire complétée des essais de petites dimensions

colle	ϕ_{tige} ϕ_{trou} (mm)	échelle	l_a (mm)	MC (%)	$\tau_{f, moy}$ (MPa)	% de résistance
EP	12 et 18	structurale	210	12	5.53	100
				20	5.16	93
	12 - 14 et 18	locale	12	12	11.01	100
				20	9.93	90
PU	12 et 14	structurale	210	12	6.50	100
				20	6.13	94
	12 et 14	locale	12	12	9.35	100
				20	8.81	94

TAB. 2.13 – Récapitulatif et comparatif des différents essais de court terme

Chapitre 3

Prédiction de la résistance résiduelle par accumulation d'endommagement

Lors d'un essai mécanique de long terme à charge constante, et dans la mesure où on se situe au dessus du seuil sous lequel aucune rupture ne se produit jamais, une éprouvette va impérativement rompre en un temps précis, inconnu. Il est intéressant d'observer comment évolue la résistance au cours du temps. Nous savons maintenant qu'elle est intacte pendant presque toute la vie de l'éprouvette mais qu'à un moment donné elle commence à décroître jusqu'à ce qu'elle atteigne le niveau de la charge appliquée, auquel cas l'éprouvette rompt. Il existe une méthode générale pour décrire ce phénomène, il s'agit des modèles d'accumulation d'endommagement.

On trouve de nombreux modèles décrits dans la littérature. En mécanique appliquée au bois, deux écoles principales sont inventoriées : la canadienne et l'américaine à cause simplement des nationalités de leur différents auteurs. Ils se différencient par leur forme : le modèle canadien est non linéaire et l'américain est une accumulation exponentielle d'endommagement.

L'ensemble de ces modèles introduit un paramètre α appelé variable d'endommagement. Ils fonctionnent comme des boîtes noires auxquelles on donne des informations d'entrée (comme le climat) et desquelles on récupère en sortie un temps de rupture caractéristique de la durée de vie. La valeur initiale de α est 0 quand l'essai débute et 1 lors de la ruine de l'échantillon. Entre les deux, $0 \leq \alpha \leq 1$ et cette évolution intermédiaire est associée à une réduction de résistance du matériau.

Si on considère la quantité $(1 - \alpha)$, elle est l'indicateur qu'une certaine résistance est toujours disponible dans le matériau. Sa diminution peut être due par exemple à une augmentation de la taille d'une fissure sans pour autant qu'elle soit instable et cause la ruine complète. On peut avoir une diminution des liaisons internes du bois par rupture de chaînes cellulosiques ou par glissement de chaînes les unes sur les autres ce qui entraîne une diminution du nombre de points de contact par unité de surface ([KUI99]).

Lors des différentes études existantes, les modèles sont calés sur les points correspondants aux ruptures des éprouvettes et on a constaté que les états d'endommagement précédents la ruine ne sont jamais décrits. Il est précisé dans [MVT94] que α ne peut être mesuré au travers d'un paramètre physique, il est donc pour l'instant impossible de le détecter par des capteurs de déplacements ou autre matériel employé habituellement. La seule chose mesurable est une résistance résiduelle lors d'un essai de court terme sur une éprouvette précédemment testée en long terme et déchargée avec un niveau de charge connu. On peut alors quantifier une perte de résistance.

3.1 Analyse du temps de rupture par les modèles d'endommagement

3.1.1 La courbe de Madison : les travaux de Wood

La première modélisation du comportement en durée de vie d'éléments de petite taille (sans défaut) a été réalisée par Wood en 1951 au Forest Products Laboratory de Madison. Un équation hyperbolique a été numériquement ajustée aux données expérimentales. Ce modèle est toujours utilisé aujourd'hui et reste une référence en matière de durée de vie. Cette représentation est connue sous le nom de "courbe de Madison" qui peut être écrite sous la forme d'un modèle d'endommagement de la manière suivante :

$$\frac{d\alpha}{dt} = A(\sigma - \sigma_0)^B \quad (3.1)$$

Les paramètres A et B sont les constantes, σ est le niveau de charge et σ_0 est le niveau de charge seuil en dessous duquel il est supposé qu'aucun endommagement n'a jamais lieu. Il faut souligner la difficulté d'évaluation du niveau de charge. Il s'agit du rapport $\frac{F_{longterme}}{F_{reference}}$ et tout se base sur le fait que $F_{reference}$ est représentatif du lot testé à long terme, ce qui n'est pas évident.

L'intégration de l'équation précédente donne :

$$\alpha = A(\sigma - \sigma_0)^B \cdot t \quad (3.2)$$

L'endommagement est donc linéairement croissant avec le temps et les constantes A, B et σ_0 devaient être déterminées avec la phase expérimentale. Quand $\alpha = 1$ et que la rupture se produit, on peut donner le temps de rupture T_f :

$$T_f = \frac{1}{A}(\sigma - \sigma_0)^{-B} \quad (3.3)$$

et le niveau de charge peut ainsi s'exprimer :

$$\sigma = A \cdot T_f^B + \sigma_0 \quad (3.4)$$

Après la détermination des constantes A et B selon les essais de Wood, l'équation de la courbe de Madison peut s'écrire :

$$\sigma = \frac{108.4}{T_f^{0.04635}} + 18.3 \quad (3.5)$$

L'équation 3.5 permet de formuler deux observations :

- Un niveau de charge inférieur à 18.3% peut être appliqué sans jamais entraîner de rupture de l'échantillon.
- Une durée de vie de 10 ans est obtenue pour un niveau de charge de 62%.

3.1.2 Les modèles d'endommagement d'après l'école canadienne

Barrett et Foschi [BF78a] et [BF78b] ont mis au point deux modèles de description de l'accumulation de l'endommagement. Ils sont communément appelés les modèles I et II.

Le **modèle I** se présente sous la forme :

$$\frac{d\alpha}{dt} = A(\sigma - \sigma_0)^B \cdot \alpha^C \quad (3.6)$$

on peut l'écrire différemment :

$$\frac{1}{\alpha^C} d\alpha = A(\sigma - \sigma_0)^B \cdot dt \quad (3.7)$$

en prenant la primitive de chaque membre entre 0 et t, on a :

$$\left[\frac{1}{1-C} \alpha^{-C+1} \right]_0^{\alpha^t} = [A(\sigma - \sigma_0)^B \cdot t]_0^t \quad (3.8)$$

on en sort donc la variable d'endommagement α à l'instant t :

$$\alpha_t = [A \cdot (1-C) \cdot (\sigma - \sigma_0)^B \cdot t]^{-\frac{1}{C-1}} \quad (3.9)$$

et le temps de rupture pour $\alpha = 1$:

$$T_f = \frac{1}{(1-C)} \cdot \frac{1}{(\sigma - \sigma_0)^B} \quad (3.10)$$

On remarque que si $C = 0$ ce modèle prend la même forme que celui de Wood précédemment explicité et si C est proche de 1, le processus est très lent. Le graphique 3.1 représente l'évolution de l'endommagement pour différentes valeurs de c .

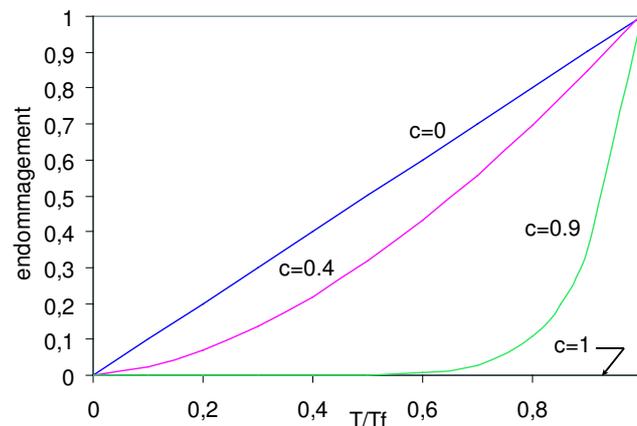


FIG. 3.1 – Effet du paramètre C sur l'accumulation d'endommagement, modèle I

Le modèle II de Barrett et Foschi s'écrit :

$$\frac{d\alpha}{dt} = A(\sigma - \sigma_0)^B + \lambda\alpha \quad (3.11)$$

Ce modèle est bien non linéaire et exprime le taux d'accumulation des dommages comme la somme d'un terme dépendant de l'effort et d'un terme dépendant des dommages. Plus tard, Foschi et Yao l'ont amélioré par l'expression :

$$\frac{d\alpha}{dt} = A(\sigma - NC_0\sigma_{ref})^B + C(\sigma - NC_0\sigma_{ref})^n\alpha \quad (3.12)$$

Si on intègre l'équation 3.12 de 0 à T_f , on obtient :

$$T_f = \frac{1}{C(\sigma - NC_0\sigma_{ref})^n} \ln\left[\frac{1 + \frac{a}{c}(\sigma - NC_0\sigma_{ref})^{b-n}}{\frac{a}{c}(\sigma - NC_0\sigma_{ref})^{b-n}}\right] \quad (3.13)$$

où :

- σ est la contrainte
- NC_0 est le niveau de contrainte seuil en dessous de laquelle aucune rupture ne se produit jamais
- σ_{ref} est résistance de référence
- a, b, c et n sont des constantes à déterminer par les campagnes expérimentales

Il faut noter que la résolution de l'équation 3.12 permettant de déterminer le temps de rupture décrit en 3.13 est basé sur l'hypothèse que la période pendant laquelle l'éprouvette est mis en charge est négligeable devant la durée totale de l'essai.

3.1.3 Les modèles d'endommagement d'après l'école américaine

A la même période que Foschi et Yao, Gerhards [GER87] a aussi publié un modèle d'accumulation d'endommagement. Au lieu de se baser sur des essais à charge constante, comme il avait précédemment été fait, il exploite des données d'essais à chargement rampe. Cette approche offre l'avantage d'estimer le comportement à long terme de la structure sans effectuer d'expériences de longue durée. Son modèle prend la forme :

$$\frac{d\alpha}{dt} = e^{-a+b \cdot \frac{\sigma(t)}{\sigma_0}} \quad (3.14)$$

a et b sont des paramètres à déterminer par l'expérience.

σ_0 est la contrainte de rupture obtenue pour l'essai statique de référence alors $NC = \frac{\sigma}{\sigma_0}$

L'équation 3.14 peut être résolue pour deux types de chargement :

- un chargement à vitesse constante (ou chargement rampe) où : $\sigma(t) = kt$, k une constante
- une charge constante où : $\sigma(t) = \sigma_c$

On peut donc déterminer par intégration le temps de rupture T_r pour un chargement rampe et T_c pour un chargement constant, ils s'écrivent :

$$T_r(k) = \frac{\sigma_0}{bk} \left(\ln\left(\frac{bk}{\sigma_0}\right) + a \right) \quad (3.15)$$

et

$$T_c = e^{a - \frac{b}{\sigma_0} \cdot \sigma_c} \quad (3.16)$$

Il y a donc une relation implicite entre $T_r(k)$ et T_c .

Dans Van de Kuilen [KUI99], le principe et les bases de la théorie de la cinétique des déformations sont expliqués et confrontés au modèle précédent. La cinétique des déformations permet d'écrire :

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_f} = c - d \ln T_c \quad (3.17)$$

qui peut aussi s'écrire :

$$T_c = e^{\frac{c}{d} - \frac{\sigma_c}{d\sigma_f}} \quad (3.18)$$

Si l'on compare les formulations 3.16 et 3.18, on se rend compte qu'elles sont identiques et que le terme "a" de la première correspond à "c/d" de la seconde. De la même manière, "b" équivaut à "1/(dσ_f)". Si on détermine ces paramètres par analyse de l'accumulation de l'endommagement, ils perdent leur réalité physique alors qu'ils pourraient être interprétés comme des valeurs caractérisant un type de liaison. Gerhards, souligne dans son modèle que les paramètres a et b sont hautement corrélés; on peut effectivement constater qu'ils sont, tous les deux, dépendants du coefficient "d" dans la cinétique des déformations. Ainsi, on peut donner une réalité physique au paramètre "b" : qui vaut $b = NkT\sigma_f\lambda$ où N est le nombre de liaisons par unité de surface transférant les charges et λ est la longueur de collage. Des précisions et détails sont donnés dans Van de Kuilen [KUI99].

La théorie basée sur la cinétique des déformations permet d'avancer une équivalence de cette forme :

$$t_f(k) = \frac{1}{\sigma_f \phi} \cdot t_c \quad (3.19)$$

où :

- t_f est le temps de rupture lors l'essai rampe $\sigma(t) = kt$

- σ_f est une grandeur représentative de l'essai de court terme (une force, une contrainte...).
- $\frac{1}{\phi} = \frac{NkT}{\lambda} = 5$ d'après Van de Kuilen [KUI99]. ϕ est le volume modifié d'activation
- t_c est le temps de rupture à charge constante que l'on aurait constaté pour un essai équivalent au court terme.

3.1.4 Equivalence de temps de rupture pour des chargements rampe ou constants, problème de la rupture court terme

Dans la représentation d'un essai de durée de vie, un point bien particulier est délicat à situer, il s'agit du résultat des essais de court terme qui doivent, eux aussi, être matérialisé. Dans le graphique d'une série d'essais réalisés à charge constante, il ne semble pas correct de placer un point basé sur un essai où la charge augmente jusqu'à la rupture, or c'est le cas du test de référence. Il est donc nécessaire d'établir une équivalence entre un temps de rupture à charge constante et un temps de rupture à vitesse de chargement constante.

Il est possible de se baser sur les résultats de Gerhards. En première approximation des coefficients de son modèle, on ne prend en compte que les points de long terme sous charge constante. Avec la méthode des moindres carrés, on cale un premier couple de coefficients et on les injecte alors dans la relation reliant le temps de rupture à la vitesse de chargement, équation 3.15. Dans cette équation, on connaît la vitesse de chargement d'après les essais instantanés ainsi que la charge de référence et on en déduit un nouveau temps de rupture. Il reste à ajuster une dernière fois les deux paramètres du modèle de Gerhards et la représentation des campagnes expérimentales de court comme de long terme est complète.

Le résultat de ce passage peut être simplement expliqué par le schéma de la figure 3.2. Ainsi, pour un même niveau de contrainte, le temps de rupture sous chargement rampe est supérieur au temps de rupture sous chargement constant.

Une fois ce point positionné correctement, on peut représenter le comportement de la liaison par goujons collés sur une l'échelle de temps complète et entièrement représentative. Le graphique 3.3 donne une vision de la modification qu'entraîne l'équivalence de temps que nous venons d'aborder avec le repositionnement du point des essais de référence. Ce point est d'autant plus important qu'il a un poids souvent aussi grand que celui de

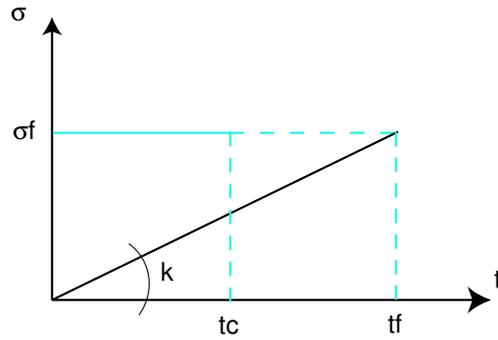


FIG. 3.2 – Relation entre une vitesse de chargement constante et un cas de charge constante

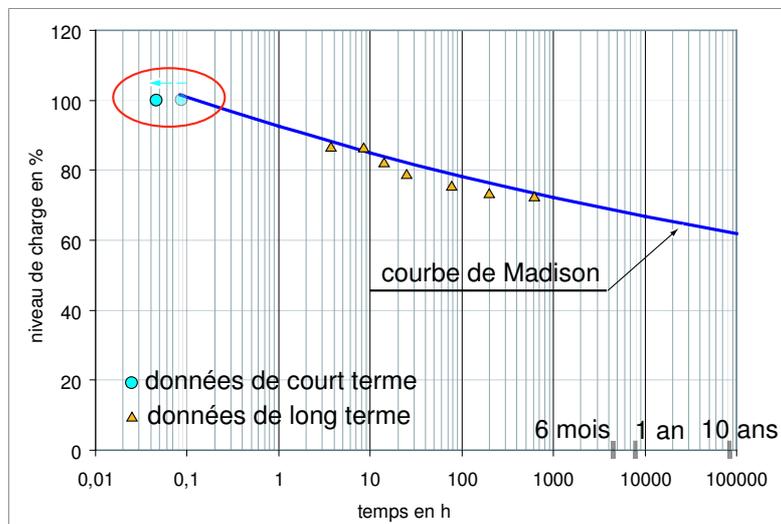


FIG. 3.3 – Décalage du point expérimental correspondant aux essais de référence

l'ensemble des résultats de long terme (selon le nombre d'éprouvettes).

3.2 Quantification de l'endommagement par la résistance résiduelle selon la représentation de Madsen

Madsen [MAD92] a mené de larges campagnes expérimentales sur les bois de structure. Il a pensé une nouvelle manière d'estimation de la résistance de référence, c'est la méthode de l'ordonnement par le lot jumeau qui donne une nouvelle évaluation du niveau de charge. Le prolongement de cette démarche lui a permis d'établir une méthodologie complète d'analyse des résistances. Il fractionne ainsi un lot de poutres testées en durée de vie (ou D.O.L. pour Duration Of Load) en trois groupes distincts :

- les B.O.L. (Brocke On up-Loading) qui ont rompu avant même que la charge de durée de vie ne leur soit complètement appliquée. On ne connaît, par conséquent, pas leur charge de rupture et on ne peut estimer aucune durée de vie,
- les poutres rompues en D.O.L. (Duration Of Load) pour lesquelles on dispose de toutes les informations : temps de vie et charge appliquée,
- les survivantes dont la résistance était supérieure à la charge appliquée et ce jusqu'à leur décharge. On ne dispose donc pas non plus de temps de rupture pour ces échantillons. La résistance, quant à elle, est estimée par un essai de court terme consécutif à la décharge. On évalue ainsi la résistance résiduelle des survivantes, qu'elles aient été endommagées ou non.

Le graphique 3.4 donne une représentation de ces groupes et fait apparaître tout l'intérêt de cette démarche dans notre recherche de l'évaluation de l'endommagement.

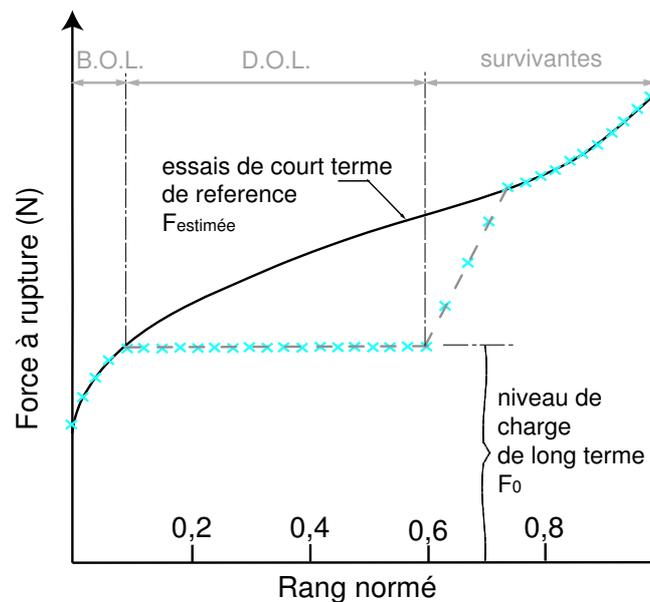


FIG. 3.4 – Représentation de l'essai de durée de vie selon la méthodologie de Madsen

La résistance résiduelle est donc une valeur clé ; elle permet de déterminer α et elle est obtenue par un essai de court terme une fois la poutre non rompue déchargée. Les poutres survivantes qui rejoignent la courbe de référence de court terme sont considérées comme non endommagées par l'essai de durée de vie. En revanche, les poutres endommagées et leur degré d'endommagement est bien visible sur cette représentation dans le dernier groupe à droite sur la figure 3.4.

Une relation de proportionnalité peut permettre de donner une valeur de α (equation 3.20),

la variable d'endommagement, pour les poutres qui ont été affectées par la campagne expérimentale.

$$\alpha = \frac{F_{estime} - F_{T_c}}{F_{estime} - F_0} \quad (3.20)$$

C'est sur le type de représentation du graphique 3.4 que nous calons une loi de Weibull pour obtenir l'estimation de la force initiale supposée de la poutre rompue en long terme.

Dans la continuité de cette démarche, nous proposons pour notre étude une façon d'évaluer la durée de vie qu'auraient eu les survivantes si l'expérience avait été menée jusqu'à la rupture de toutes les poutres du lot. Pour ce faire, nous utilisons la modélisation de Gerhards. Une fois les paramètres calés sur l'expérimentation de long terme et le taux de charge des poutres survivantes estimé, nous obtenons une prédiction de durée de vie que nous pouvons faire figurer sur le diagramme.

Une fois cette base théorique établie, nous pouvons maintenant présenter l'étude de durée de vie avec les essais en grandeurs structurales pour du lamellé collé et du chêne et les essais de petites dimensions.

Chapitre 4

Campagne expérimentale de long terme

4.1 Retour à la réglementation

Lors du calcul d'une structure aux états limites, il faut vérifier que la sollicitation de calcul S_d issue des combinaisons d'actions ne dépasse jamais la résistance de calcul R_d dépendante du matériau et des conditions d'utilisation de la structure. Si on explicite ces paramètres, on obtient l'inégalité suivante :

$$S_d \leq R_d = k_{mod} \cdot \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (4.1)$$

où :

- k_{mod} est un coefficient modificateur de la résistance d'une pièce de bois en tenant compte de sa durée de chargement et de son humidité.
- R_k est la résistance caractéristique de l'élément
- γ_M est un coefficient partiel de sécurité pour le matériau. Il vaut, par exemple, 1.3 pour le bois massif et 1.25 pour le lamellé collé.

La prise en compte du paramètre "effet de durée de vie" est donc possible dans l'Eurocode 5 grâce au coefficient k_{mod} pour lequel l'humidité du bois est considérée à travers la notion de "classe de service" qui est fonction de l'humidité relative de l'environnement de l'élément. En pratique, la classe de service 1 correspond à des bois à environ 12% d'humidité, la classe 2 des bois dont l'MC ne dépasse pas 20% et au delà nous nous situons en classe 3.

Le tableau 4.1 présente les coefficients en fonction de cinq classes de durée de charge pour du bois massif ou du bois lamellé collé.

classe de durée de chargement	durée	type d'action	k_{mod} classes de service 1 et 2	k_{mod} classe de service 3
permanente	plus de 10 ans	poids propre	0.60	0.50
long terme	6 mois à 10 ans	stockage	0.70	0.55
moyen terme	1 semaine à 6 mois	exploitation	0.80	0.65
court terme	moins d'une semaine	neige et vent	0.90	0.70
instantanée		action accidentelle	1.1	0.90

TAB. 4.1 – Valeurs du coefficient k_{mod} pour du bois massif ou lamellé collé

Ces valeurs sont données à titres indicatif et comparatif puisque le présent chapitre

permettra d'estimer ces mêmes coefficients k_{mod} pour les liaisons par goujons collés selon l'étude expérimentale de long terme qui suit.

4.2 Essais en grandeur structurale

4.2.1 Méthode et dispositif expérimental

Matériau organique, le bois ne peut pas bénéficier de la maîtrise et du contrôle de production industrielle comme peut le faire les métaux comme l'acier ou encore le béton. De ce fait, les propriétés mécaniques sont plus variables d'une pièce à l'autre et dépendantes de nombreux paramètres comme le climat sous lequel l'arbre a poussé, le terroir, paramètres qui sont, à l'évidence, impossibles d'exploiter. Le problème majeur rencontré lors des expérimentations sur le matériau bois est donc la connaissance de la résistance d'une pièce sans pratiquer d'essai destructif de caractérisation. Plusieurs méthodes existent à ce jour :

- **la poutre jumelle** (utilisée par Wood)

Cette méthode est basée sur le sciage des deux éprouvettes nécessaires (pour le court et le long terme) dans la même pièce de bois, on considère ainsi que leurs résistances instantanées sont identiques. Un problème apparaît cependant : il est d'autant plus difficile d'obtenir des poutres à propriétés mécaniques similaires que les dimensions sont grandes.

- **l'estimation non destructive de la résistance d'une pièce** (proposition d'Hoffmeyer)

Dans ce cas, l'estimation du niveau de contrainte est basée sur des essais non destructifs de caractérisation des pièces de bois. La contrainte appliquée est rapportée à une contrainte dépendant par exemple de la masse volumique ou du module d'élasticité. Ceci est utilisé en général pour du bois massif.

- **le lot jumeau** (d'après Madsen)

On applique ici la méthode de l'ordonnancement (ou méthode des lots ordonnés). L'hypothèse avancées dans cette démarche est que la i^{me} poutre rompue à long terme aurait eu la i^{me} résistance instantanée lue sur la distribution des figures 2.13 et 2.16. Ainsi on fait correspondre à chaque échantillon une résistance instantanée qui est, statistiquement, la plus proche de la sienne. On obtient ainsi des niveaux de charge réels.

Dans notre étude, on retient justement la méthode du lot jumeau, les deux autres étant respectivement ni applicables à la configuration de notre éprouvette ni utilisables en l'état des connaissances en matière d'END (Evaluation Non Destructive). On se sert alors d'un lot jumeau que l'on considérera comme statistiquement représentatif. La résistance moyenne du lot de poutres testé en court terme servira donc d'estimation pour la résistance supposée du lot testé à plus long terme. C'est dans le Niveau de Charge (NC) que l'on retrouve cette grandeur :

$$NC(\%) = \frac{F_{applique}}{F_{rupture(reference)}} \quad (4.2)$$

Lors du projet européen GIROD [BJ02], les campagnes expérimentales de durée de vie ont été menées pour deux niveaux de charge :

- 70% qui était considéré comme un faible niveau de charge,
- 80% considéré comme un haut niveau.

Cette fourchette nous a aidé à cibler le niveau de charge de notre étude à 75% de la valeur moyenne de référence, soit un niveau intermédiaire. On espère, par ce biais, que la durée de l'essai ira de quelques semaines à quelques mois au plus.

Le dispositif expérimental est prévu initialement pour pouvoir pratiquer des essais en atmosphère variable, il se trouve sous un abri ventilé à l'extérieur. Ceci peut permettre de simuler les conditions climatiques de la classe de service 2 de l'Eurocode 5 (voir photo 4.1). Les essais se pratiquent sur des éprouvettes de flexion pour une question de disponibilité de bancs d'essais même si le test de traction paraît moins imposant. Les bâtis de flexion où



FIG. 4.1 – *Dispositif expérimental des essais de durée de vie*

sont disposées les poutres pour l'essai de longue durée doivent permettre de reproduire les

mêmes dispositions expérimentales que lors des essais de référence. Une poutre en charge est photographiée la figure 4.2 où on voit que chaque banc est muni d'un capteur de déplacement potentiométrique permettant la détection de l'instant de rupture grâce à un système permanent d'acquisition de données. Ce sont des vérins pneumatiques, pilotés à distance, qui viennent appliquer la pression désirée sur chaque poutre par l'intermédiaire d'un chevêtre donnant les mêmes conditions d'appui que pour l'essai de court terme (voir figure 4.3).

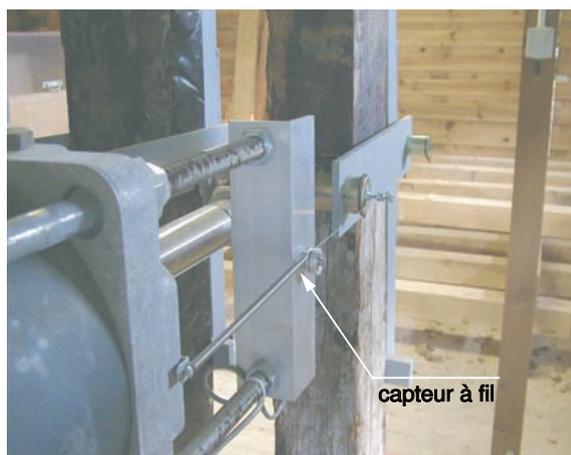


FIG. 4.2 – *Mesure de la flèche centrale et détection de la rupture*

En amont de l'expérience, une phase de préparation comporte l'étalonnage des vérins afin de maîtriser complètement la force appliquée à chaque éprouvette. Le principe est d'adapter un montage avec un capteur de force entre le vérin et la poutre. On relève ainsi les deux lectures à des pas réguliers : une correspond au capteur de force par l'intermédiaire d'un data logger (renvoyant une tension) et l'autre à la mesure de pression dans le vérin avec un manomètre numérique. Le niveau de pression fixé pour la charge des éprouvettes est donc relié à la courbe d'étalonnage de chaque vérin.

4.2.2 Essais sur du lamellé collé

Nous avons procédé à plusieurs campagnes de durée de vie avec du lamellé collé afin d'observer l'influence des paramètres suivants :

- l'humidité des pièces de bois,
- la taille de la section.

Le dispositif expérimental décrit dans le paragraphe précédent permet de mener des

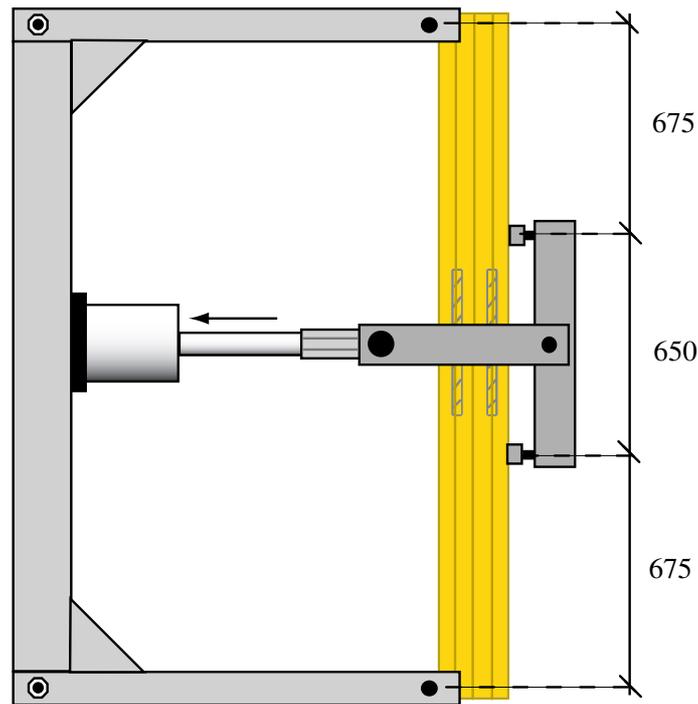


FIG. 4.3 – *Dispositif expérimental pour les essais de durée de vie en atmosphère variable - cotation en mm*

essais en atmosphère variable. Ceci va à l'encontre des conditions désirées lors de la première série d'essais. La préparation des éprouvettes représente donc une part importante de la réalisation de l'essai.

Les conditions climatiques ont été relevées pour chaque série et sont présentées en annexe aux figures A.1, A.2 et A.3.

4.2.2.1 Préparation des éprouvettes

Dans la première batterie de tests de durée de vie, les poutres doivent être à deux niveaux d'humidité constante : 12% et 20%. Elles sont conditionnées dans les mêmes ambiances que les éprouvettes destinées aux essais de court terme mais sont stabilisées ensuite par enrobage dans un film plastique étanche à l'air. On a ainsi enroulé chaque poutre dans des couches de cellophane afin d'empêcher tout échange hydrique avec l'atmosphère extérieure.

Nous avons tout de même pris la précaution de s'assurer de la validité de cette isolation et ce à deux niveaux de vérifications. Dans un premier temps, deux poutres témoins ont reçu quatre capteurs chacune, disposés par perçage au bord de la tige à une distance variable du centre de la poutre (voir photo 4.4).

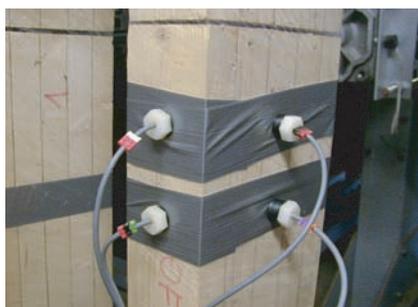


FIG. 4.4 – *Capteur d'humidité dans le bois*

Le principe de mesure est celui de l'équilibre hygrométrique. On laisse en fond de trou une cavité d'air qui tend à se mettre naturellement en équilibre avec l'humidité du bois puisque l'orifice est bouché et étanche à tout transfert avec l'atmosphère extérieure. On mesure HR et on peut donc déterminer MC d'équilibre grâce à l'isotherme de sorption de l'essence employée et surveiller les variations.

Dans un deuxième temps, une pesée à la fin de l'essai (au bout de cinq mois environ pour la première série) a permis de constater que la perte de masse était faible et négligeable (moins de 1%).

Ces deux moyens de vérifications concordent pour dire que l'humidité globale des pièces de bois n'a pas subi de variations significatives pendant toute la durée de l'essai.

4.2.2.2 Résultats

On dispose pour chaque série d'essais de 22 poutres qui vont être utilisées pour appliquer **la méthode de l'ordonnement** citée plus haut.

Cette technique de représentation des résultats a été proposée par Madsen [MAD71], elle a notamment fait ses preuves lors du projet européen AIR CT94-1057 dont les essais de durée de vie sont reportés dans Assouido [ASS01]. On peut considérer que la poutre médiane (ici la douzième pour laquelle plus de 50% des poutres sont cassées) est représentative du lot et qu'il n'est pas nécessaire d'attendre la rupture des poutres plus résistantes. L'existence de cette médiane implique, bien sûr, que le lot soit composé d'un nombre impair de poutres. Lorsque la poutre médiane est rompue, on peut décharger et pratiquer un autre test instantané pour déterminer la résistance résiduelle et évaluer l'endommagement des survivantes à l'issue du chargement selon la méthode de Madsen [MAD92].

En résumé, la technique de l'ordonnement permet de faire correspondre un nouveau taux de charge réel (au lieu de 75%) ordonné et de représenter dans le temps les ruptures en durée de vie.

Il arrive dans la pratique que des poutres rompent avant même que les 75% de niveau de charge ne soit appliqués. Ces poutres ne sont pas exploitables et ne peuvent pas être intégrées au lot d'essais de court terme parce qu'on ne peut pas évaluer la force à rupture du fait même du système de chargement. Effectivement, les vérins pneumatiques ont un délai de montée en pression qui est inconnu et différent de l'un à l'autre, la lecture fait au manomètre au moment de la rupture est donc en décalage avec la force réellement appliquée. Les poutres sont alors exclues du lot et considérées comme ayant des défauts de fabrication inadmissibles, seule manière d'expliquer un tel phénomène puisque le charge appliquée est plus petite que la plus faible valeur obtenue lors des essais de court terme. Ces cas de ruptures prématurées ont été constatés dans chaque série d'essai. Nous pouvons cependant éliminer des causes de rupture le mécanisme des bancs d'essais puisque les poutres en cause ne se situaient jamais dans le même bâti.

Si nous disposons d'un taux de charge réel et d'un temps de rupture, il est alors possible de tracer une représentation graphique de la durée de vie sur une échelle en semi-log comme la courbe de Madison. La subtilité de la représentation des résultats réside dans le positionnement des points correspondant aux essais de court terme. Effectivement, le graphique représente des durées de vie sous chargement constant, il n'est donc pas correct de placer les essais instantanés sans leur avoir appliqué un correctif de temps de rupture représentant le passage d'un essai rampe à un essai sous charge constante. Cette méthode de positionnement du point à court terme est détaillée dans la partie consacrée aux modèles d'endommagement.

4.2.2.2.1 A humidité constante Comme expliqué précédemment, il arrive que des poutres cassent lors du chargement. Pour cette série de tests, quatre poutres ont rompu prématurément, il reste donc un total de dix-huit poutres exploitables. La médiane est donc déplacée entre la neuvième et la dixième poutre puisque le lot s'est réduit à un nombre pair. La répartition des éprouvettes est résumée dans le tableau 4.2.

	Essais de court terme	D.O.L.	Poutres exclues	Survivantes
Nb de poutres	10	18	4	7

TAB. 4.2 – Répartition des poutres pour l'essai en D.O.L. à humidité constante sur du lamellé collé

La première observation importante, au vu des essais, est la similitude des modes de rupture quelque soit la durée d'application des charges et l'humidité des bois. C'est le

bois dans la zone toute proche du joint de colle que l'on appelle l'interface entre l'époxy et le bois qui rompt (voir photo 4.5).



FIG. 4.5 – Rupture par extraction de l'ensemble tige/adhésif lors des essais de long terme

Les temps de vie sont donc relevés et les poutres classées dans l'ordre de rupture pour leur faire correspondre une résistance estimée tirée de la loi de Weibull à deux paramètres calées sur les résultats des essais de court terme. On détermine donc les niveaux de charge correspondant à la probabilité de rupture de chaque poutre et on établit une représentation de la durée de vie.

Avec cette représentation nous sommes capables de déterminer un facteur global multiplicatif de la résistance pour un temps de vie donné ; facteur k_{mod} de l'Eurocode 5 prenant en compte l'effet de la durée d'application des charges et les conditions de service. Ainsi, nous pouvons lire sur le graphique 4.6 les valeurs de k_{mod} du tableau 4.3, grâce aux différents modèles calés sur les points expérimentaux.

	Wood	Barett et Foschi II	Gerhards
6 mois	0.69	0.76	0.68
1 an	0.67	0.76	0.66
10 ans	0.62	0.76	0.61

TAB. 4.3 – Valeurs du coefficient k_{mod} pour les deux humidités de bois constantes et le renfort scellé à l'époxy

Le graphique 4.6 comprend les modèles de durée de vie de Barrett et Foschi II, et Gerhards, ainsi que la courbe de Wood souvent prise comme référence pour la durée de vie.

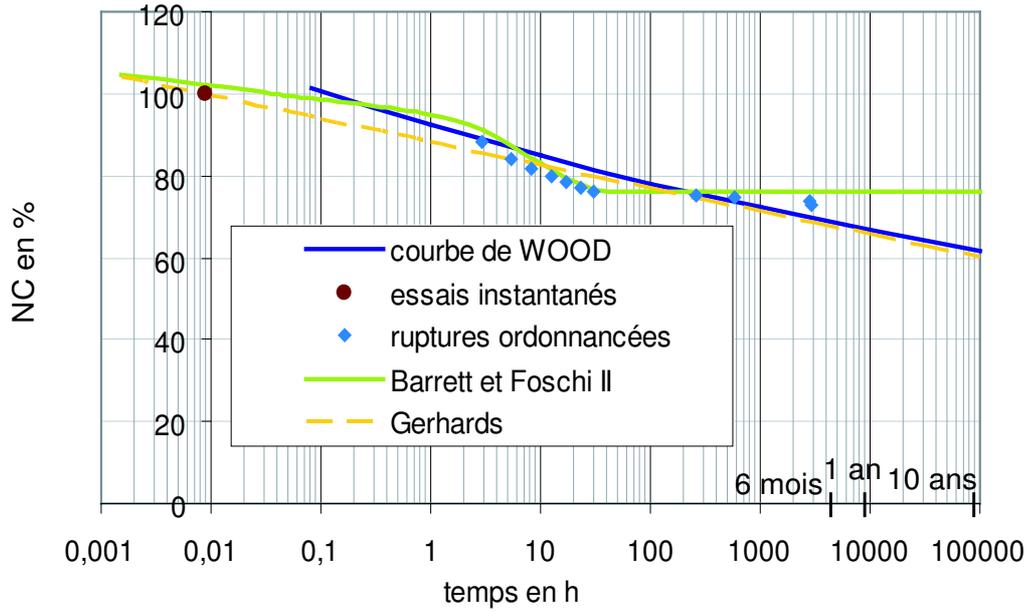


FIG. 4.6 – Représentation du comportement à long terme des poutres collées à l'époxy pour deux MC différentes : diagramme de durée de vie

Les paramètres liés à ces modèles ont été explicités dans la partie consacrée à l'endommagement et optimisés vis-à-vis des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés.

Les courbes représentées sur le graphique 4.6 correspondent respectivement aux équations 4.4 et 4.6 et viennent de l'intégration des équations reliant le niveau de charge à la variable d'endommagement α (équations 3.11 et 3.14) déjà établies :

– Barrett et Foschi modèle II :

$$NC(\%) = \frac{\sigma_0}{\sigma_s} + \left[\frac{\lambda}{a \cdot (\exp(\lambda t) - 1)} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (4.3)$$

– Gerhards

$$NC(\%) = 0.76 + \left[\frac{2.1}{1.5e^{13} \cdot (\exp(2.1t_c) - 1)} \right]^{\frac{1}{23}} \quad (4.4)$$

$$NC(\%) = \frac{\ln(\frac{1}{t_c}) + A}{B} \quad (4.5)$$

$$NC(\%) = \frac{\ln(\frac{1}{t_c}) + 36.2}{41} \quad (4.6)$$

L'étude que nous venons de décrire a été reproduite pour des poutres renforcées par des goujons collés au polyuréthane et donne les résultats présentés au graphique 4.7 et au

tableau 4.4.

Nous avons cependant rencontré des difficultés lors de la mise en place de cette série d'expérience : un grand nombre d'éprouvettes a rompu avant que la charge totale désirée ne leur soit appliquée. En effet, trois poutres à $MC = 12\%$ et neuf poutres à $MC = 20\%$ ne peuvent alors pas être exploitées dans notre étude. Aucune raison apparente ne permet de justifier cette constatation si ce n'est une série d'erreurs de mise ne oeuvre car les poutres provenaient de lots de fabrication différents pour une question de planning d'essais.

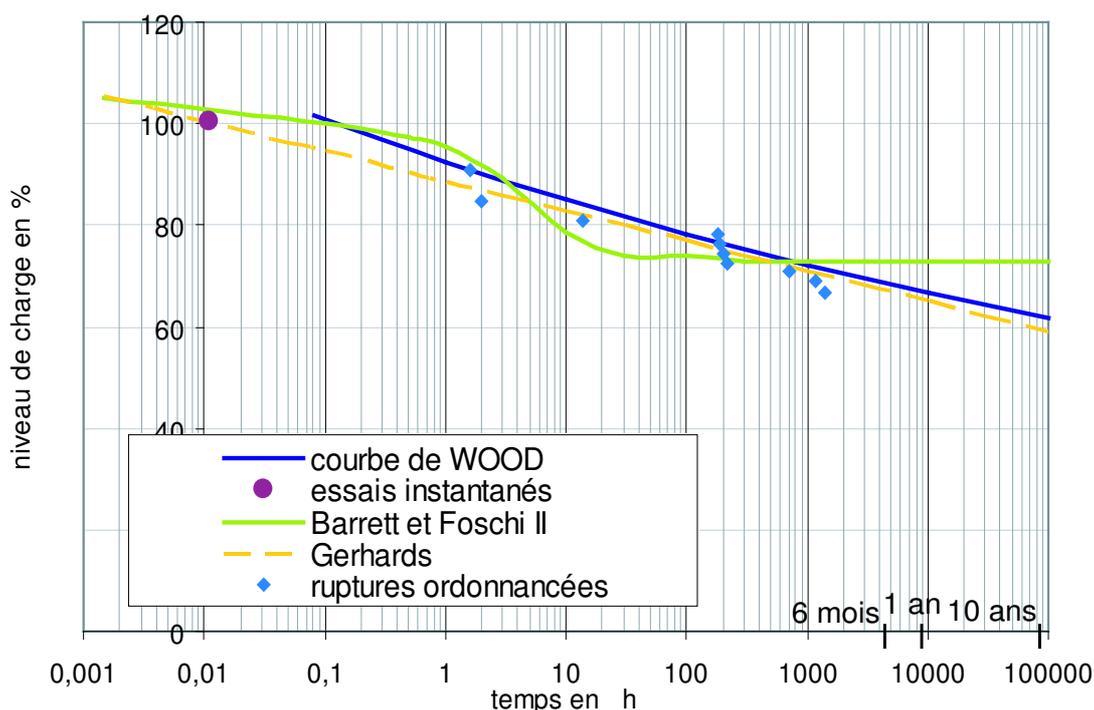


FIG. 4.7 – Représentation du comportement à long terme des poutres collées au polyuréthane pour deux MC différentes : diagramme de durée de vie

	Wood	Barett et Foschi II	Gerhards
6 mois	0.69	0.74	0.67
1 an	0.67	0.74	0.65
10 ans	0.62	0.74	0.60

TAB. 4.4 – Valeurs du coefficient k_{mod} pour les deux humidités de bois constantes et le renfort scellé au polyuréthane

Comme pour l'adhésif époxy, les paramètres des modèles d'endommagement on été

calés sur les résultats expérimentaux des goujons collés au polyuréthane et on obtient les équations 4.7 et 4.8 respectivement pour Barrett et Foschi et pour Gerhards :

$$NC(\%) = 0.74 + \left[\frac{4}{1e^{15} \cdot (\exp(4t_c) - 1)} \right]^{\frac{1}{24}} \quad (4.7)$$

$$NC(\%) = \frac{\ln(\frac{1}{t_c}) + 34.6}{39} \quad (4.8)$$

Afin de formuler des conclusions sur l'influence de l'humidité et d'établir une comparaison entre les deux adhésifs mis à l'épreuve, nous avons superposé les deux séries de tests sur un même graphique (figure 4.8) :

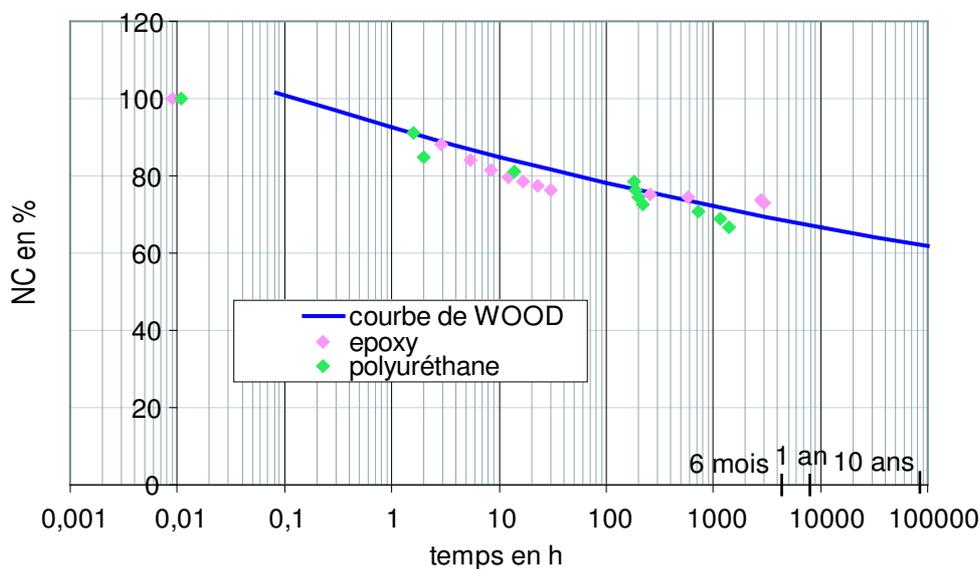


FIG. 4.8 – Représentation superposée des résultats à long terme des poutres renforcées au polyuréthane et à l'époxy pour deux MC différentes : diagramme de durée de vie

D'après le graphique 4.8, s'il paraît que les éprouvettes collées à l'époxy forment un palier de stabilisation au bout de quelques mois, celles qui ont été collées au polyuréthane semble, au contraire, suivre l'évolution de la courbe de Madison en restant cependant légèrement au dessus.

Il paraîtrait donc que la liaison goujons collés au PU ait un comportement moins performant en durée de vie qu'avec l'utilisation d'EP.

Nous avons vu que toutes les poutres ne sont pas rompues lors des essais de long terme et que nous pratiquons un test de court terme pour évaluer les résistances résiduelles des survivantes. C'est la méthode de Madsen qui est donc appliquée. Le graphique 4.9 et le tableau 4.5 montrent clairement l'endommagement des poutres déchargées et en donnent les valeurs du paramètre α , variable d'endommagement.

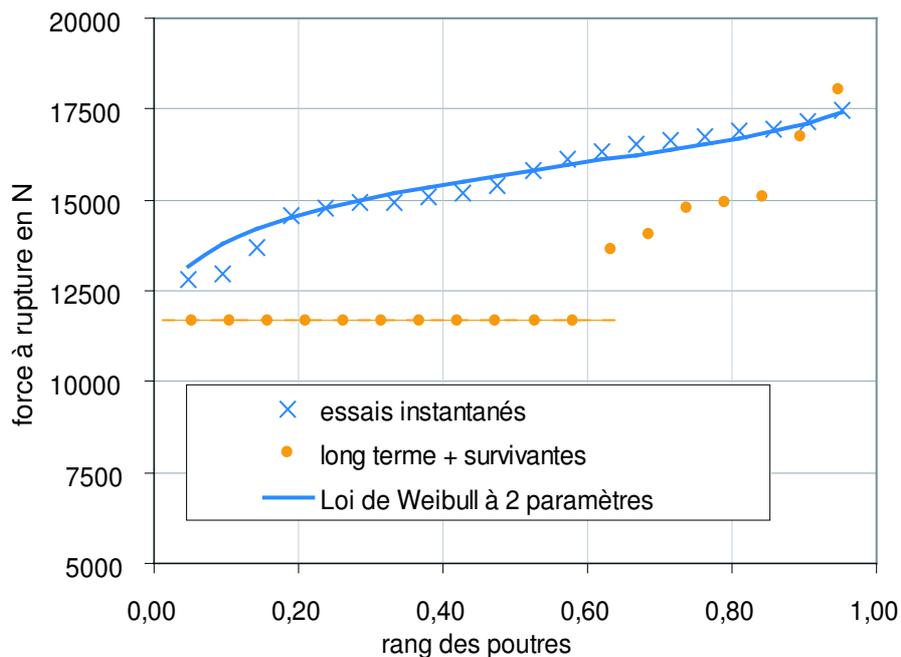


FIG. 4.9 – Représentation de Madsen pour les survivantes de la série de poutres collées à l'époxy (MC constantes) : visualisation de l'endommagement

Il faut noter que la résistance résiduelle a été multipliée par un coefficient 1.07 pour l'époxy pour les poutres dont $MC = 20\%$ afin de tenir compte de la diminution de résistance déjà constatée lors des essais instantanés.

Le graphique 4.9 révèle bien trois zones distinctes quant à l'état des poutres au moment de l'arrêt de l'expérience :

- Les points situés sur une ligne droite horizontale ($F_{rupt} = 11670N$) correspondent aux ruptures en durée de vie sous chargement constant.
- Les points intermédiaires situés entre la loi de Weibull et la ligne précédemment citée représentent les poutres n'ayant pas rompu à la fin de l'expérience. Elles ont été déchargées puis testées à court terme et ont perdu de la résistance au cours de l'essai.

- les deux derniers points, l'un sur la courbe de référence et l'autre au dessus correspondent également à des poutres non rompues mais qui, elles, n'ont pas montré d'endommagement significatif après le test instantané déterminant la résistance résiduelle.

n° de la poutre	$F_{résiduelle}$ en N	endommagement α
HR13	13632	0.56
HR12	14049	0.49
C7	14790	0.35
C8	14940	0.34
HR11	15098	0.33
HR14	16767	0.05
HR16	18019	0

TAB. 4.5 – Valeurs du paramètre α pour les deux humidités de bois constantes et le renfort scellé à l'époxy

Les valeurs du paramètre d'endommagement α du tableau 4.5 montrent une diminution progressive de la résistance. Il faut remarquer que la dernière valeur ($\alpha = 0$) était négative par le calcul mais ne correspondait alors à aucune réalité physique.

Dans le chapitre relatif à l'endommagement, nous avons indiqué qu'après l'ordonnement de Madsen, nous pouvons utiliser le modèle de Gerhards calé sur les essais de long terme afin de déterminer à quel instant les survivantes auraient dû rompre. Le tableau 4.6 donne les valeurs de durée de vie (DOL) potentielles.

Les résultats de cette opération paraissent difficilement utilisables puisque la plupart des temps de vie sont inférieurs à celui de la dernière poutres cassée lors de l'essai (voir graphique 4.10). On trouve donc d'après l'estimation que ces poutres auraient dû être cassées. La démarche paraissant être la bonne, il semble que ce soit le paramètre niveau de charge qui trouble l'estimation. Effectivement, les résultats de long terme forment un palier alors que la distribution en "S" des résistances de référence fait diminuer NC progressivement. La référence ne permet pas de faire figurer ce palier et ne suit pas la tendance réelle.

4.2.2.2 Pour deux dimensions de section La deuxième série d'essais de durée de vie sur des poutres de structure est composée d'un lot de onze poutres dont la section

n° de la poutre	endommagement α	DOL potentielle en h
HR13	0.56	696
HR12	0.49	927
C7	0.35	1239
C8	0.34	1678
HR11	0.33	2329
HR14	0.05	3405
HR16	0	5645

TAB. 4.6 – Durées de vie potentielles des survivantes pour les deux humidités de bois constantes et le renfort scellé à l'époxy

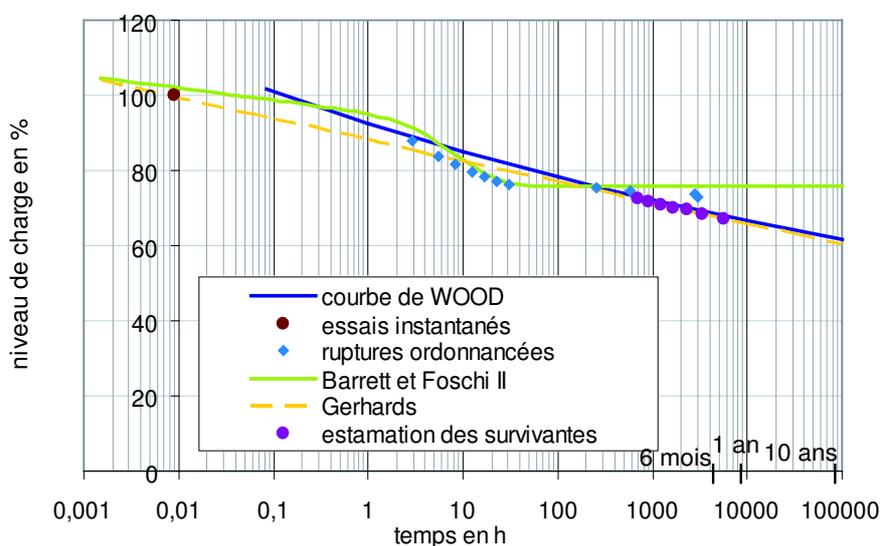


FIG. 4.10 – Représentation fictive des poutres survivantes à humidité constante sur le diagramme de durée de vie

est identiques à celle décrite précédemment et un lot de onze poutres aux dimensions plus importantes : $120 \times 200\text{mm}^2$. L'intérêt d'utiliser deux sections de bois différentes pourrait permettre de constater, ou non, si une "isolation" plus grande de la tige collée vis à vis de l'atmosphère extérieure entraîne un meilleur comportement à long terme. La campagne expérimentale a été menée pendant une saison particulièrement agressive puisqu'il s'agissait du printemps, saison globalement asséchante, connue pour favoriser les ruptures.

Le relevé de température et d'humidité de la période d'expérience est en annexe au

graphique A.3.

La répartition des poutres est répertoriée dans le tableau 4.7

Type de section	Court terme	D.O.L.	Poutres exclues	Survivantes
$80 \times 160mm^2$	10	5	5	1
$120 \times 200mm^2$	0	7	0	4

TAB. 4.7 – Répartition des poutres pour l'essai en D.O.L. à section variable sur du lamellé collé

Plusieurs petites sections ont rompu avant d'atteindre la charge constante leur étant destinée alors qu'aucune grosse section n'a été exclue du lot pour malfaçon. Les essais de court terme n'ont pas été pratiqués sur les grosses sections car la configuration de l'éprouvette permet de s'affranchir de la section de la poutre, l'essentiel étant que l'écartement des goujons soit le même pour les deux formes. On considère donc les mêmes essais de référence quelque soit la section de l'éprouvette.

Le graphique 4.11 et le tableau 4.8 présente les résultats de l'essai en durée de vie.

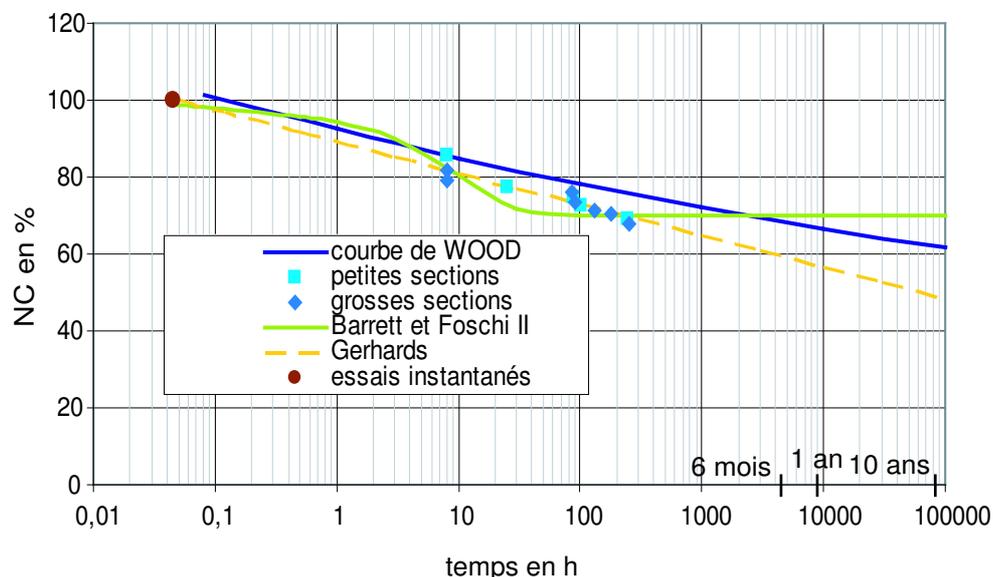


FIG. 4.11 – Représentation du comportement à long terme des poutres collées à l'époxy pour deux sections différentes : diagramme de durée de vie

Les modélisations après ajustement donnent les équations 4.9 et 4.10 :

	Wood	Barrett et Foschi II	Gerhards
6 mois	0.69	0.70	0.63
1 an	0.67	0.70	0.61
10 ans	0.62	0.70	0.54

TAB. 4.8 – Valeurs du coefficient k_{mod} pour les deux sections et le renfort scellé à l'époxy

$$NC(\%) = 0.70 + \left[\frac{2.4}{7e^{14} \cdot (\exp(2.4t_c) - 1)} \right]^{\frac{1}{26}} \quad (4.9)$$

$$NC(\%) = \frac{\ln\left(\frac{1}{t_c}\right) + 30.3}{35} \quad (4.10)$$

Les nouvelles données du graphique 4.11 et du tableau 4.8 permettent de formuler quelques observations. Il semblerait que la taille de la section n'ait pas d'influence sur le comportement à long terme puisque les points s'entremêlent sur le diagramme de durée de vie. Les coefficients k_{mod} extraits sont inférieurs aux précédents pour la modélisation de Gerhards qui est la plus pénalisante. Si la taille n'a pas d'influence, les variations climatiques semblent en avoir car les coefficients k_{mod} extraits de la modélisation sont nettement inférieurs à ceux des essais à humidité constante.

Il est cependant normal que les deux sections ne se différencient pas dans leur comportement puisque le transfert de masse dans la direction longitudinale du bois est le même dans les deux cas. L'embouchure, zone critique, est également sollicitée mécaniquement et hygrothermiquement pour les deux sections.

Dans cette série, toutes les poutres ne sont pas rompues non plus lors des essais de long terme. Nous avons donc testé les survivantes à court terme et le graphique 4.12 (représentation de Madsen) et le tableau 4.9 nous renseignent sur l'endommagement des poutres déchargées et donnent les valeurs du paramètre α , variable d'endommagement.

Comme précédemment, deux poutres semblent ne pas avoir été affectées significativement par l'expérience alors que le degré d'endommagement des autres est visible.

Pour cette série d'essai, nous avons aussi procédé à l'évaluation de la durée de vie potentielle des survivantes. Le tableau 4.10 les fait apparaître et nous voyons qu'elle est ici plus logique que la première estimation produite avec les éprouvettes à humidité constante.

L'hypothèse avancée selon laquelle le palier formé sur le diagramme de durée de vie

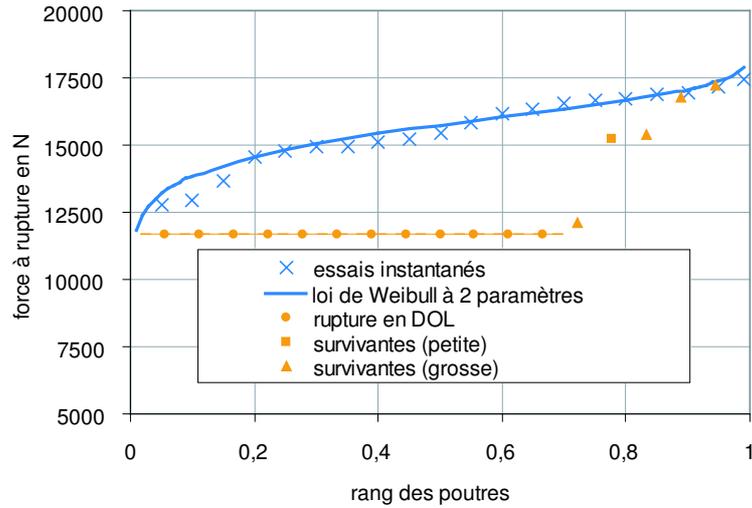


FIG. 4.12 – Représentation de Madsen pour les survivantes de seconde série de durée de vie (sections variables) : visualisation de l'endommagement

n° de la poutre	$F_{rsiduelle}$ en N	endommagement α
G8	12113	0.89
P7	15210	0.28
G11	15378	0.27
G9	16769	0.05
G1	17216	0.02

TAB. 4.9 – Valeurs du paramètre α pour les deux sections différentes et le renfort scellé à l'époxy

n° de la poutre	endommagement α	DOL potentielle en h
G8	0.89	223
P7	0.28	292
G11	0.27	390
G9	0.05	540
G1	0.02	848

TAB. 4.10 – Durées de vie potentielles des survivantes pour les deux sections différentes et le renfort scellé à l'époxy

des poutres collées à l'époxy fausserait l'estimation paraît se vérifier. Dans ce lot, le nuage de points des essais de long terme semble bien suivre la modélisation de Gerhards. La seule valeur qui n'est pas logique est la première poutre cassée (voir graphique 4.13).

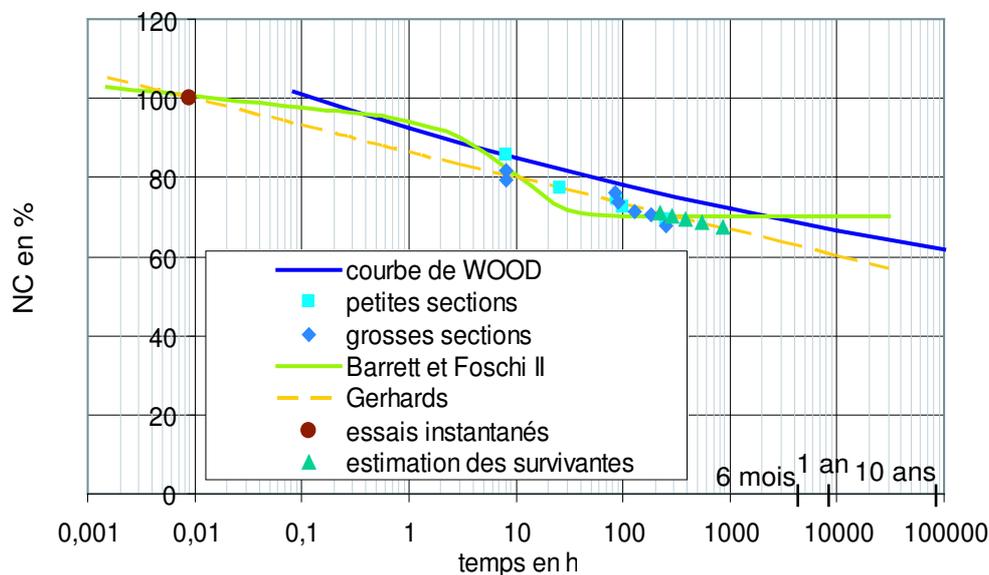


FIG. 4.13 – Représentation fictive des poutres survivantes pour deux tailles de section sur le diagramme de durée de vie

Ceci est justifiable par le fait que cette poutre était très proche de la rupture, on se situe tout près de la courbe de Gerhards mais du mauvais côté.

En somme, dans le cas où les durée de vie sont réparties presque linéairement, cette proposition d'évaluation de la durée de vie paraît correcte.

4.2.2.3 Le vieillissement en atmosphère variable

On appelle vieillissement une période de stockage pendant laquelle les poutres sont soumises à des sollicitations hygrothermiques sans sollicitation mécanique. Nous avons voulu étudier l'influence des variations climatiques sur la résistance des liaisons par goujons collés et nous avons, pour ce faire, stocké deux lots de poutres sous l'abri ventilé (un lot par adhésif). Ces poutres non chargées ont subi les variations de températures et d'humidité relative de l'air pendant une année complète. Elles ont ensuite été testées à court terme pour pouvoir faire un comparatif entre la résistance de référence et celle qui perdure après la période de vieillissement. Le tableau 4.11 fait une synthèse de ces résultats.

La comparaison des deux moyennes de forces à rupture ainsi que les deux graphiques 4.14 et 4.15 montreraient que le vieillissement n'a pas endommagé la résistance. Il

	LOT REFERENCE		LOT VIEILLI	
	$F_{ref,moy}$ en N	COV en %	$F_{vieil,moy}$ en N	COV en %
EP	15560	10.0	17512	12.6
PU	14227	10.9	14810	12.0

TAB. 4.11 – Forces à rupture en flexion après vieillissement

semble même que les éprouvettes renforcées avec de l'époxy aient une résistance supérieure après le vieillissement. Ceci peut être dû à la poursuite du processus de polymérisation de l'adhésif au cours du temps, les éprouvettes de référence ayant été testées juste après la période requise de séchage qui suit la fabrication.

Celles qui ont été renforcées avec du polyuréthane ne montrent pas de changement significatif de résistance.

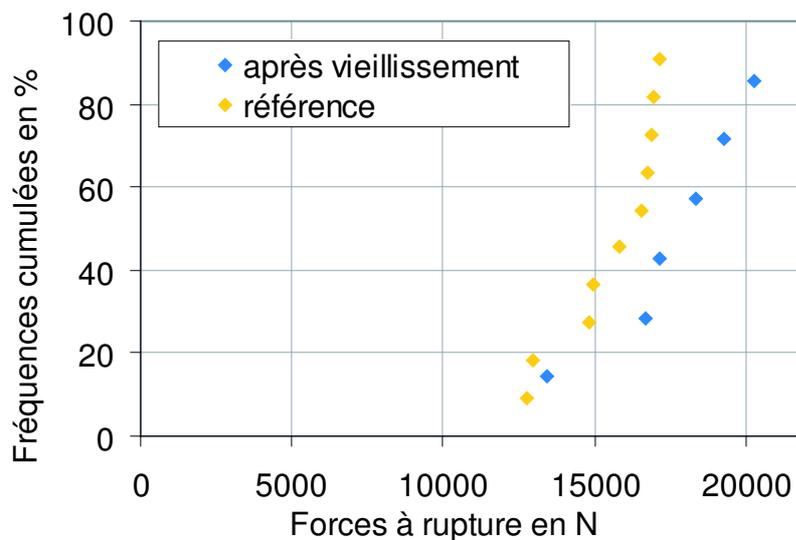


FIG. 4.14 – Distributions des poutres de référence et des poutres vieilles collées à l'époxy

Cette série d'essais étaient plus une batterie test dont l'observation été qualitative qu'un lot permettant de quantifier une diminution de résistance ou d'évaluer un coefficient de pondération. Nous ne connaissons pas l'effet que pouvaient avoir des sollicitations hygrothermiques sans chargement mécanique même pour de faibles gradients hydriques.

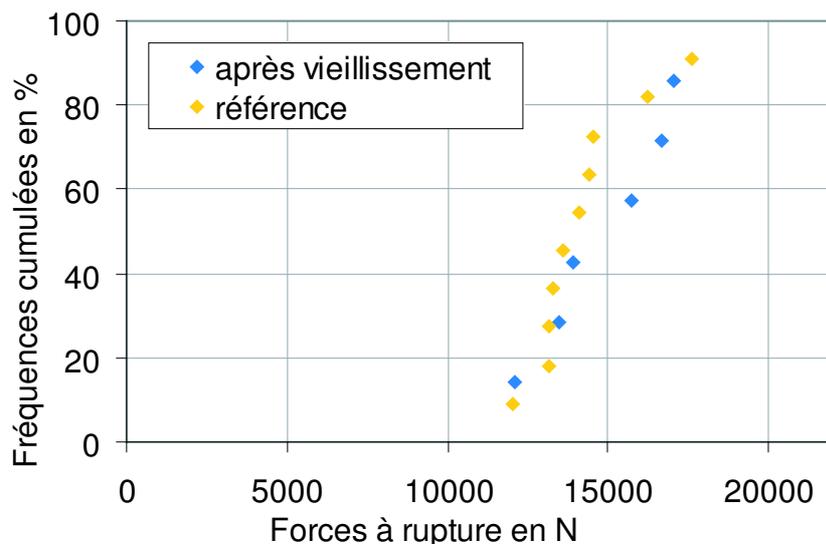


FIG. 4.15 – Distributions des poutres de référence et des poutres vieillies collées au polyuréthane

4.2.3 Essais sur du chêne

4.2.3.1 Les conditions d'essais

On pratique des essais de durée de vie sur le même type éprouvettes que celles qui ont servi aux essais de court terme présentés dans la partie qui leur est consacrée. La méthode d'application de la charge est, en revanche, différente. Nous avons opté pour un chargement "par paliers" afin de maîtriser la durée de l'essai et de pouvoir englober un large éventail d'efforts.

On débute donc le chargement à une niveau de charge relativement faible et les paliers successifs permettent de progresser en charge de manière à pouvoir rompre les poutres les plus résistantes en quelques mois. Ce choix a été déterminé principalement par le fait que les bois avaient des provenances multiples et qu'ainsi leur résistances pouvaient être très variées. Un taux de charge constant aurait été beaucoup trop risqué à mettre en oeuvre et délicat à fixer. La progression de la charge ainsi que les ruptures sont représentées sur le graphique 4.16.

Il s'agit de paliers de deux semaines entières et les increments de charge sont de l'ordre de 10% de la charge moyenne (soit 1500 N).

Les conditions climatiques de la période correspondant à l'essai de durée de vie sont reportées en annexe aux graphiques A.4 et A.5.

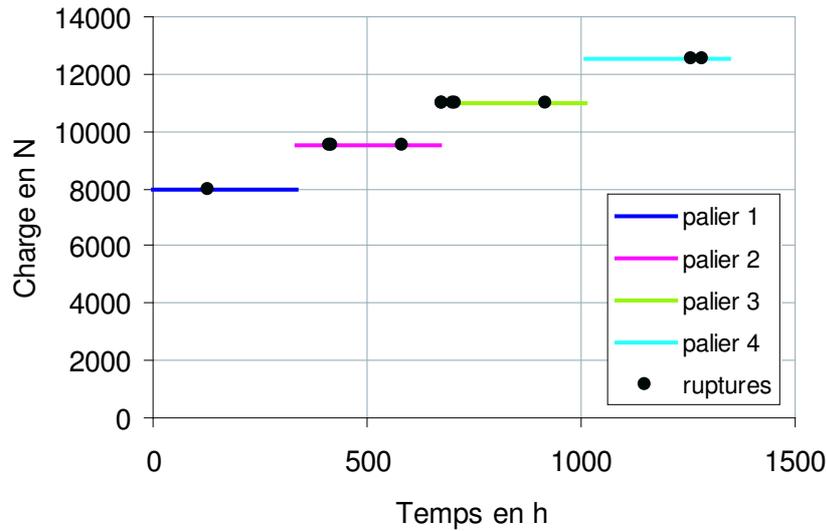


FIG. 4.16 – Schématisation du chargement par paliers et représentation des ruptures en D.O.L.

4.2.3.2 Les résultats

Lors du traitement des données, on peut procéder de plusieurs manières pour interpréter les résultats. Une des plus simples est de faire l'hypothèse du non endommagement de l'éprouvette au palier précédant la rupture. On prend ainsi individuellement les paliers en les considérant comme des essais à charge constante et on retient le temps de rupture du dernier palier comme durée totale de vie. Il apparaît bien que cette méthode peut être extrêmement défavorable et même trop pénalisante. Elle a fait ses preuves et des résultats satisfaisants sont présentés dans les travaux de Lebatteux [LEB97] pour des poutres homogènes mais semble mal s'appliquer au cas des goujons collés.

Effectivement, on voit sur le graphique 4.16 que des ruptures se produisent en fin de palier. On peut donc se demander si ce palier avait durer quelques heures de plus s'il n'aurait pas fait casser la poutre. Au lieu de ça, on considère qu'il ne crée aucun endommagement. Il paraît donc justifié d'employer une autre méthode.

Celle que nous allons présenter maintenant donne des résultats sensiblement différents. On fait l'hypothèse que le chargement par palier est suffisamment lent et régulier pour le considérer comme un chargement rampe lent. Il faut cependant intégrer dans l'équation de Gerhards la charge initiale de long terme puisque le chargement n'a pas débuté de 0. L'équation 3.14 devient :

$$\frac{d\alpha}{dt} = e^{-a+b \cdot \frac{(\sigma^*+kt)}{\sigma_0}} \quad (4.11)$$

a et b sont des paramètres à déterminer par l'expérience

σ_0 est la contrainte de rupture obtenue pour l'essai statique de référence

σ^* est la contrainte initiale appliquée au début de l'essai de ddv.

k est la vitesse de chargement

Après intégration, l'équation 4.11 devient :

$$T_r(k) = \frac{\ln\left(\frac{bk}{\sigma_0} + \exp\left(-a + \frac{b\sigma^*}{\sigma_0}\right)\right) - \left(-a + \frac{b\sigma^*}{\sigma_0}\right)}{\frac{bk}{\sigma_0}} \quad (4.12)$$

On considère en première approximation du couple de coefficients a et b le couple déduit de la campagne expérimentale sur le lot de poutres en lamellé collé à deux sections différentes puisque les MC varient aussi dans le cas du chêne.

On peut alors utiliser la même démarche que celle que nous avons déjà décrite pour repositionner le point des essais de court terme sur les diagrammes de durée de vie (méthode des moindres carrés et deuxième estimation du couple de coefficients).

On passe donc d'un temps de rupture à vitesse de chargement constante à un temps de rupture à taux de charge constant qui est un paramètre désormais familier pour la représentation de la durée de vie.

Le diagramme 4.17 représente les résultats finaux de l'essai sur les poutres en chêne et le modèle de Gerhards utilisé est ajusté et répond à l'équation 4.13 :

$$NC(\%) = \frac{\ln\left(\frac{1}{t_c}\right) + 30.7}{36} \quad (4.13)$$

Le tableau 4.12 apporte une évaluation des coefficients k_{mod} déduits de la modélisation de Gerhards.

Remarques quant au déroulement de l'essai :

- Les ruptures se sont produites presque systématiquement au moment le plus chaud de la journée ce qui présage d'une certaine sensibilité de cette liaison à la température (remarque déjà formulée lors des essais de petites dimension à différentes températures). La barre des 30°C a été franchie à plusieurs reprises.

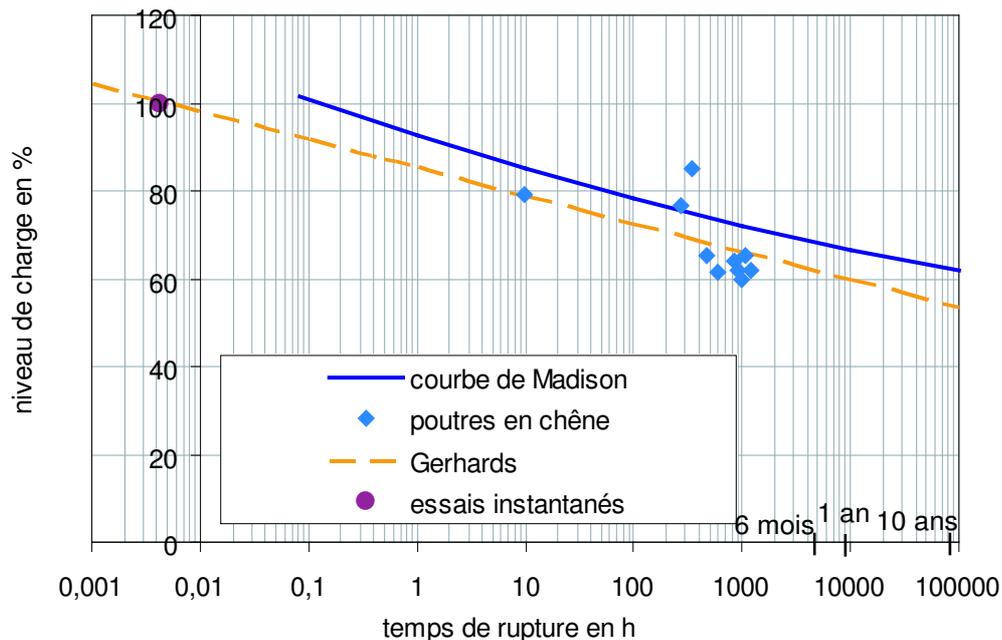


FIG. 4.17 – Représentation du comportement à long terme des poutres en chêne renforcées à l'époxy : diagramme de durée de vie

	Wood	Gerhards
6 mois	0.69	0.62
1 an	0.67	0.60
10 ans	0.62	0.54

TAB. 4.12 – Valeurs du coefficient k_{mod} pour les poutres chêne et le renfort scellé à l'époxy

- Le lot de poutre contenant des tiges de plus grande longueur a montré un changement de mode de rupture. Effectivement, seule une poutre sur six a rompu par plastification de la tige. On constate donc un affaiblissement de l'interface suffisant sous l'effet de la durée de charge pour passer d'une rupture de la tige à l'arrachement de l'ensemble tige-colle.

4.2.4 Conclusion sur les essais en grandeur structurale

Au regard de l'ensemble des données en grandes dimensions, nous pouvons dégager quelques tendances :

- ◊ L'humidité du bois ne paraît pas modifier significativement la durée de vie des éprouvettes puisque leur rupture sont réparties indifféremment dans le temps.

- ◇ Les différences de section ne font pas apparaître de dissociation des lots à long terme.
- ◇ L'emploi de deux essences et donc de bois ayant des masses volumiques sensiblement différentes ne semble pas influencer sur le comportement différé des poutres.

4.3 Essais de petites dimensions

Nous avons vu l'intérêt de pratiquer les essais de court terme sur des petites éprouvettes en terme de contrainte moyenne et ultime dans l'interface entre le bois et l'adhésif ; mais la phase expérimentale de long terme a un autre objectif. Nous voulons constater si le mécanisme d'endommagement qui se produit en durée de vie en liaison locale est comparable à celui des éprouvettes en grandeur structurale. Si tel est le cas, nous pourrions dans l'avenir nous affranchir d'essais encombrants et coûteux.

4.3.1 Conception des bâtis de l'essai

Le schéma de principe de la figure 4.18 montre le fonctionnement des bâtis servant aux essais de long terme sur les petites éprouvettes.

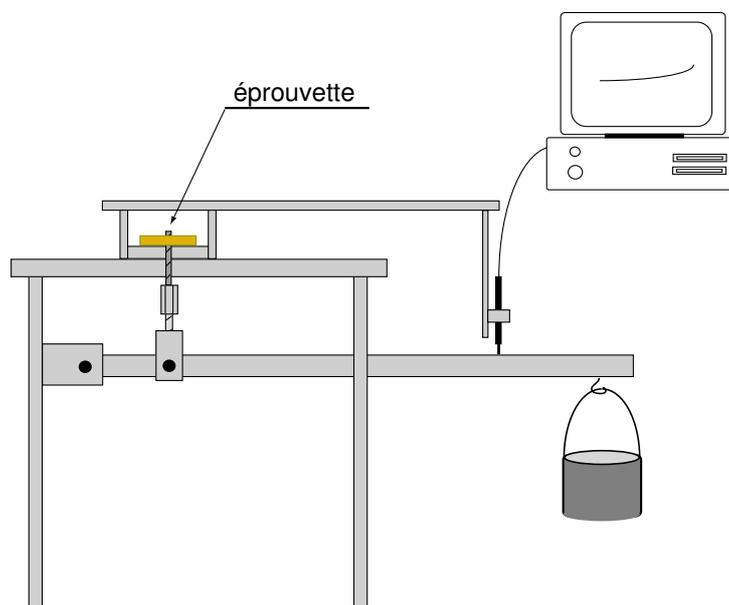


FIG. 4.18 – Schéma de principe d'un bâti d'essai à long terme pour les éprouvettes de petite taille

- Différentes précautions ont été prises lors de la conception de cette machine d'essai :
- un bâti métallique qui ne flue pas dans le temps

- la souplesse de positionnement de l'éprouvette,
- l'utilisation pour plusieurs diamètre de tige,
- la légère rotation possible de la tige pendant l'essai,
- le chargement progressif avec le sceau de grenaille,
- l'augmentation de la précision du déplacement grâce au renvoi du bras de levier.

Les capteurs de déplacement servent aussi de témoins de rupture puisqu'une acquisition de données, via un ordinateur câblé à tous les capteurs, relève et enregistre les tensions des LVDT à intervalles réguliers de cinq minutes.

La photo 4.19 montre les bâtis en fonctionnement pendant la première série d'essais.



FIG. 4.19 – *Dispositif expérimental de test des liaison locales en durée de vie*

4.3.2 Résultats

4.3.2.1 Collage à l'époxy

Le test de durée de vie était destiné à des éprouvettes contenant une tige de 8mm conformément aux remarques de la partie "campagne expérimentale de court terme". L'isolation avec l'atmosphère extérieure n'a pas pu être réalisée mais nous avons considéré l'ambiance à peu près stable pendant toute la durée de l'essai puisque, contrairement aux essais en grandeur structurale, les bâtis étaient situés à l'intérieur du laboratoire dans un

local chauffé. Les 12% d'humidité du bois requis ont donc été assuré sans grande variation. Le graphique 4.20 et le tableau 4.13 présente les résultats. Nous avons uniquement ajusté pour les séries d'essais en petites dimensions le modèle de Gerhards qui, selon les essais en grandeurs stucturelles, apporte la vision la plus sécuritaire.

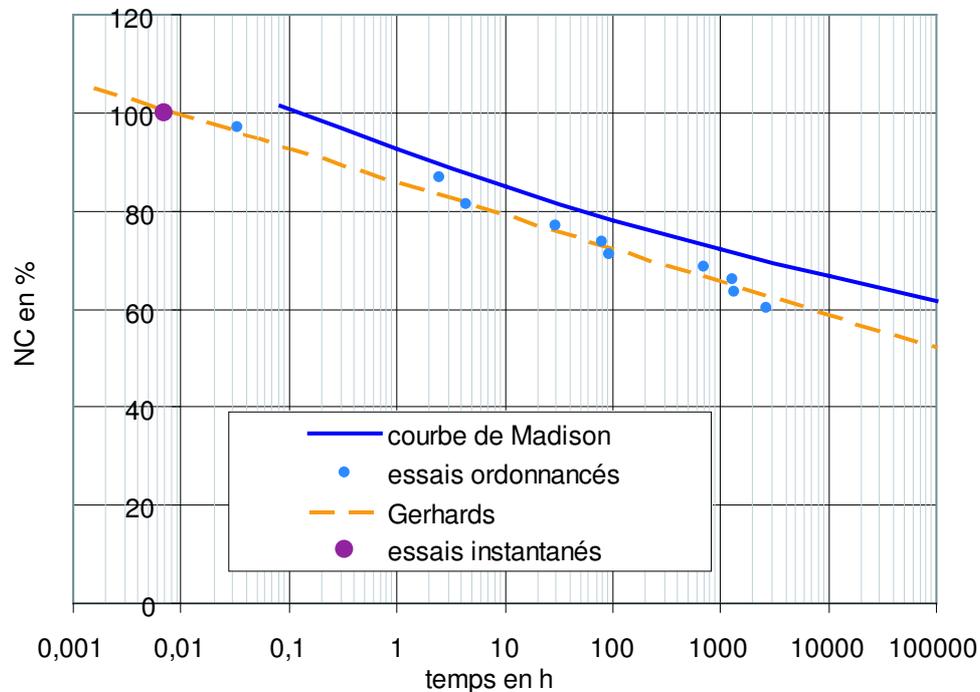


FIG. 4.20 – Représentation du comportement à long terme des petites éprouvettes collées à l'époxy : diagramme de durée de vie

Le modèle de Gerhards adapté à cette série d'essai répond à l'équation 4.14 :

$$NC(\%) = \frac{\ln(\frac{1}{t_c}) + 34}{29.2} \quad (4.14)$$

	Wood	Gerhards
6 mois	0.69	0.61
1 an	0.67	0.59
10 ans	0.62	0.52

TAB. 4.13 – Valeurs du coefficient k_{mod} pour les petites éprouvettes et le renfort scellé à l'époxy

Les coefficients k_{mod} déduits de la modélisation de Gerhards se révèlent un peu plus faibles que ceux qui caractérisent les poutres de structure. Ceci peut être dû à de trop

petites dimensions des éprouvettes qui ainsi multiplient l'effet des variations d'humidité dans le bois même si elles sont faibles.

4.3.2.2 Collage au polyuréthane

Dans le cas du collage au polyuréthane, ce sont des tiges de 12mm qui ont été mises en oeuvre. L'expérience s'est déroulée dans les mêmes conditions que pour le collage à l'époxy et les résultats sont présentés dans le graphique 4.21 et le tableau 4.14.

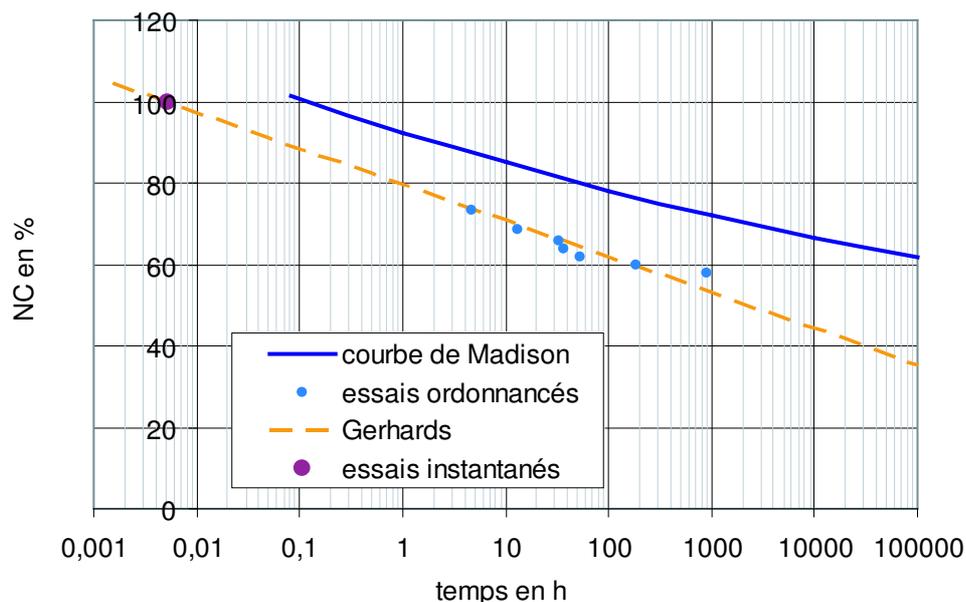


FIG. 4.21 – Représentation du comportement à long terme des petites éprouvettes collées au polyuréthane : diagramme de durée de vie

	Wood	Gerhards
6 mois	0.69	0.47
1 an	0.67	0.45
10 ans	0.62	0.36

TAB. 4.14 – Valeurs du coefficient k_{mod} pour les petites éprouvettes et le renfort scellé au polyuréthane

Dans le tableaux 4.14, les valeurs lues sont beaucoup plus faibles que pour les poutres en dimensions d'emploi. Ceci doit nous alerter sur les conditions climatiques de l'expérience. Effectivement, cette série d'essai a été pratiquée durant la période estivale dans

une pièce non climatisée. Il est donc possible que la température atteinte dans ce local d'essai ait été suffisamment importante pour affecter la résistance. Concrètement, ces essais mettent en évidence une forte chute de résistance de l'ordre de 50% au bout de six mois.

Au regard de ces données, il paraît délicat de substituer les essais en grandeur structurale par les essais de petites dimensions sans avoir testé un nouveau lot d'éprouvettes à une autre période de l'année.

4.4 Conclusion sur le long terme

Les essais pratiqués en quelques semaines ou mois rendent l'extrapolation à 10 ans vraisemblable (graphique 4.22) et la méthode de l'ordonnancement s'avère tout à fait utile pour calculer les niveaux de charge et représenter l'effet de durée de vie dont le graphique 4.22 donne une vision globale pour les petites et grandes dimensions.

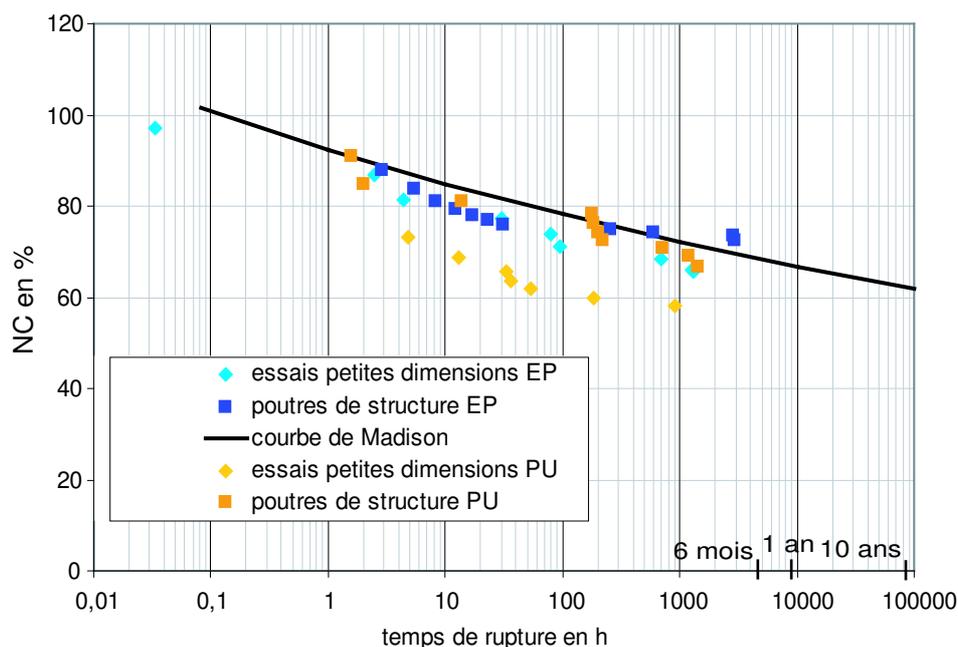


FIG. 4.22 – Représentation du comportement à long terme des petites et grandes éprouvettes (GL24h)

Par ailleurs, on ne constate pas d'effet de durée de vie significativement différent du lamellé collé au chêne.

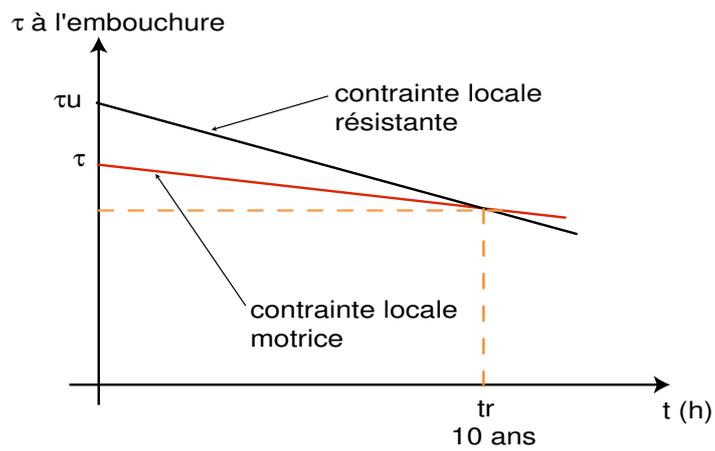
La teneur en eau du bois est apparue peu importante dans le comportement à long terme si elle est constante. En revanche, on constate une diminution du k_{mod} de 10% lorsque les poutres sont soumises à des variations d'humidité au cours d'une saison globalement asséchante. Ces résultats sont proches de ceux du programme européen GIROD.

En revanche, l'observation du comportement d'un goujon collé soumis à des sollicitations en température fait naître des craintes vis à vis de sa résistance. Nous avons constaté de grandes diminutions aux alentours de 50°C. Ceci est d'autant plus inquiétant qu'une modélisation de l'évolution de la température dans un élément en grandeur structural ne montre pas d'atténuation particulière de la température au niveau du joint de colle, comme c'est le cas pour l'humidité (selon [FMMS04]). Lors de notre série d'expériences, il est possible qu'une température trop importante ait été atteinte dans la pièce où se déroulaient les essais de petite dimension, ce qui pourrait expliquer l'éloignement des points (PU) de la courbe de Madison. Il nous est difficile d'affirmer que les essais locaux sont transposables aux essais en grandeur structurale en dehors des goujons collés à l'époxy ; il y a un changement d'échelle et de comportement, néanmoins, on peut tenter le rapprochement suivant :

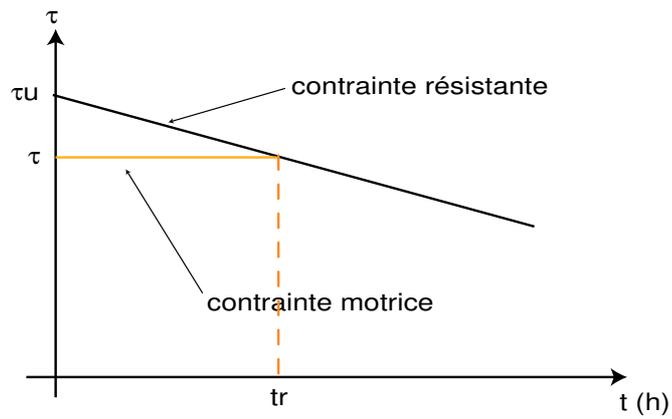
Nous avons schématisé sur la figure 4.23 l'évolution des propriétés mécaniques mises en jeu dans un essai de durée de vie.

Sur la courbe (a), la contrainte motrice τ (cisaillement au contact bois-colle) diminue lentement dans le temps (évolution montrée au chapitre 1 figure 1.10) à cause du comportement hygroviscoélastique du bois alors que la contrainte résistante τ_u diminue à plus grande vitesse sous l'effet du chargement maintenu constant (courbe (b) concernant les essais locaux). Le point d'intersection des deux courbes produit la rupture au niveau de l'embouchure et caractérise la durée de vie des éprouvettes structurales. On voit que l'évolution de la contrainte locale résistante déterminée par les essais locaux l'emporte sur celle de la contrainte motrice.

Finalement, contrairement à ce que l'on pouvait penser au début de ces travaux, les valeurs de k_{mod} ne sont jamais inférieures à 0,5. Les appréhensions alors émises ne paraissent donc plus justifiées aujourd'hui.



(a) essais structuraux



(b) essais locaux

FIG. 4.23 – Evolution des propriétés mécaniques lors d'un essai de durée de vie

Conclusion

L'étude de durée de vie menée pendant ces trois années nous a permis de recevoir et d'exploiter une grande quantité de données expérimentales. Le travail sur deux types d'adhésif, sur deux tailles d'éprouvettes différentes et sur deux essences amènent à formuler des conclusions balayant un domaine d'investigation relativement vaste.

Si une des problématiques essentielles de ce travail est de valider ou non les expérimentations de petites dimensions qui pourraient se substituer à celles en grandeur structurale, il n'est pas moins important de formuler dans un premier temps des remarques générales quant aux deux adhésifs testés.

Dans les campagnes expérimentales de GIROD, l'époxy n'est pas apparue affectée par l'humidité du bois dans son comportement à long terme alors que le polyuréthane l'est. Dans nos essais, en revanche, on constate que l'époxy et le polyuréthane sont très peu sensibles à l'humidité des bois aussi bien pour les essais de court terme (maximum de 7% de diminution de résistance) que de long terme. Effectivement, les poutres, dites humides ou sèches, renforcées à l'époxy rompaient alternativement sans préférence d'un lot à l'autre. Il en est de même pour le polyuréthane, des éprouvettes à 12% comme à 20% de MC ont cassé dans les premières heures d'expériences, puis au bout de plusieurs semaines.

La masse volumique est le deuxième paramètre qui pourrait influencer sur la résistance des assemblages. Les tendances observées par Feligioni [FLD⁺03] sont confirmées par nos séries d'essais puisque les coefficients représentatifs de l'influence de la durée de chargement varient peu pour du lamellé collé et du chêne qui ont des masses volumiques caractéristiques pourtant très différentes de l'ordre respectivement de $380\text{kg}/\text{m}^3$ et $580\text{kg}/\text{m}^3$. Nos observations semblent donc s'accorder avec celles qui ont déjà été formulées. Nous pouvons, en complément, statuer sur quelques axes d'observations particuliers.

Tout d'abord, au vu des premières séries d'essais sur les poutres structurales, il apparaît que l'EP et le PU ont des comportements similaires vis-à-vis de la durée de vie. A l'échelle de la décennie, les coefficients k_{mod} sont respectivement de 0.61 et 0.60. Ce n'est, à l'évidence, pas un écart significatif.

Puis, nous avons pu constater que le changement de dimensions des sections de poutres ne perturbe pas le déroulement de l'essai et ne permet pas de différencier les lots. Ainsi, les poutres renforcées à l'époxy rompent indifféremment dans le temps, qu'elles aient une petite ou une grande section et le coefficient k_{mod} à dix ans est de 0.54. Si la taille n'a pas d'influence, le climat joue en revanche un rôle qui paraît non négligeable puisque les variations d'humidité relative de l'air et de température extérieure semblent faire diminuer le k_{mod} de 0.61 à 0.54.

Enfin, si les modélisations des goujons collés à l'époxy sont semblables quelque soit l'échelle considérée (petites éprouvettes ou poutres de structure), nous ne pouvons pas en dire autant pour le polyuréthane qui révèle un comportement moins bon en petites qu'en grandes dimensions. Ce phénomène peut s'expliquer par deux constatations : les essais de référence ne seraient pas représentatifs des propriétés du lot testé à long terme et une trop forte température aurait pu perturber le comportement de telles éprouvettes dont les dimensions ne permettent pas d'isolation thermique en faveur du joint de colle. La méthodologie consistant à faire des essais sur des éprouvettes de petite dimension serait donc applicable mais de grandes précautions sont à prendre lors des essais de référence. On doit s'assurer que le nombre d'essais est suffisant pour que la distribution des résistances soit statistiquement bien représentative.

Annexe A

Conditions climatiques

A.1 Essai de durée de vie sur les poutres renforcées à l'époxy avec MC=constante

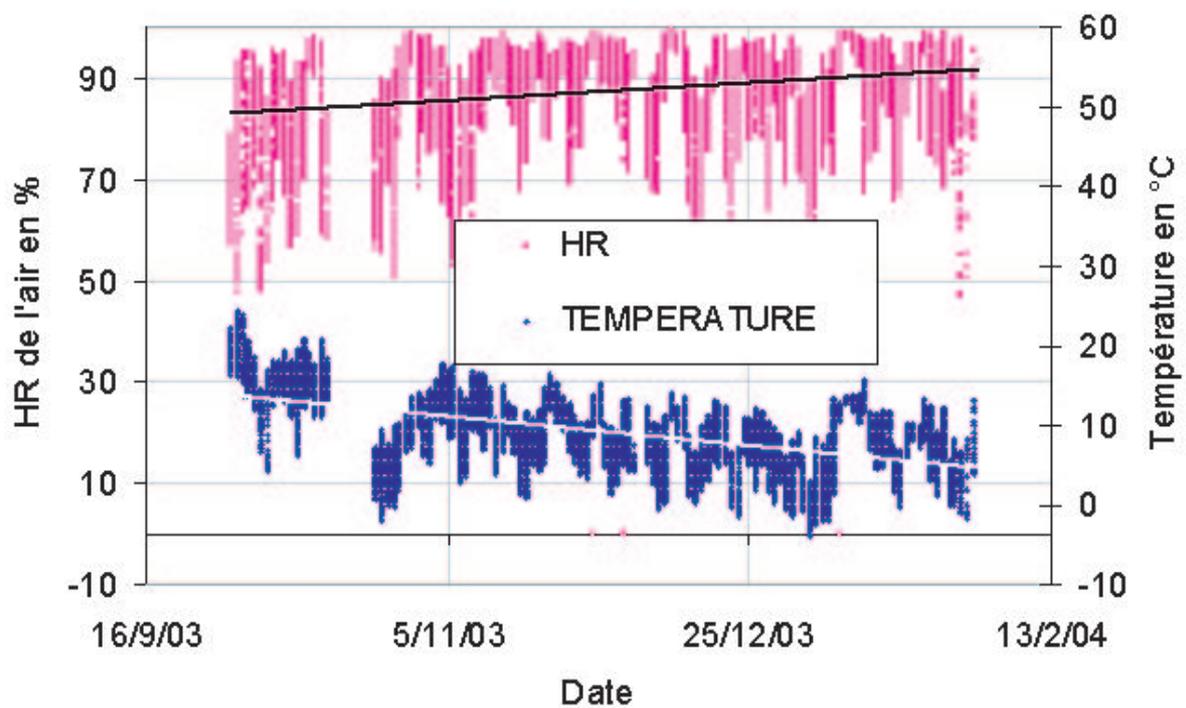


FIG. A.1 – Automne 2003

A.2 Essai de durée de vie sur les poutres renforcées au polyuréthane avec $MC=$ constante

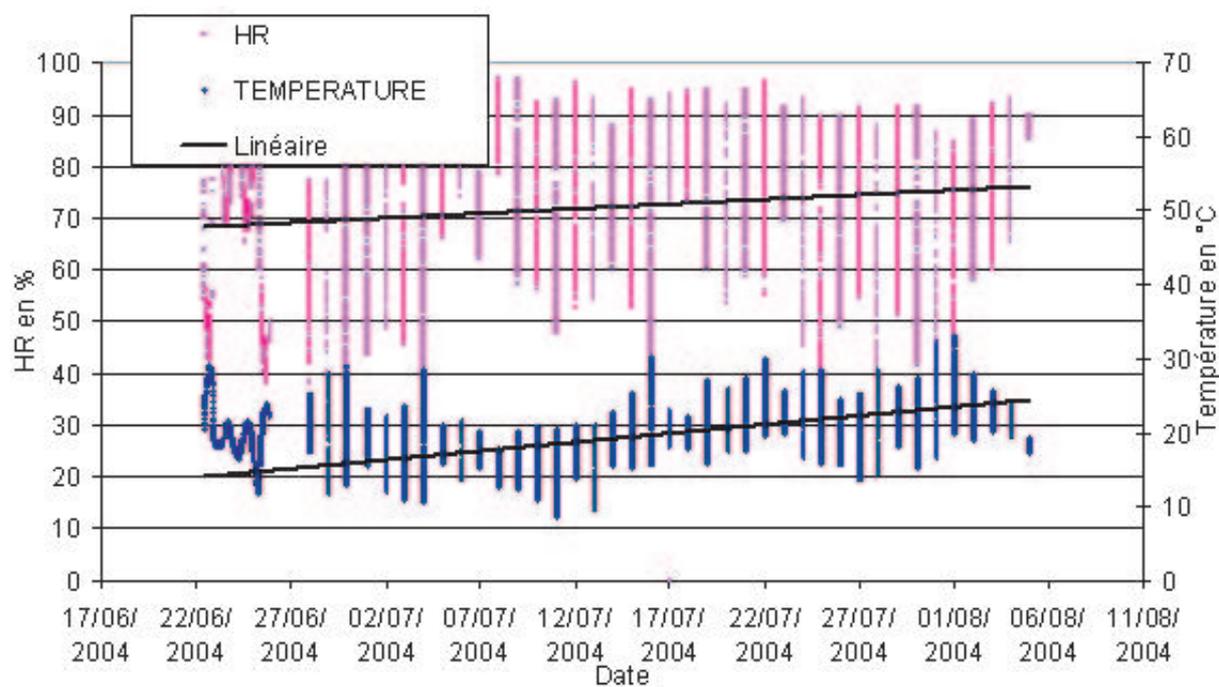


FIG. A.2 – *Eté 2004*

A.3 Essai de durée de vie sur les poutres renforcées à l'époxy avec deux tailles de section

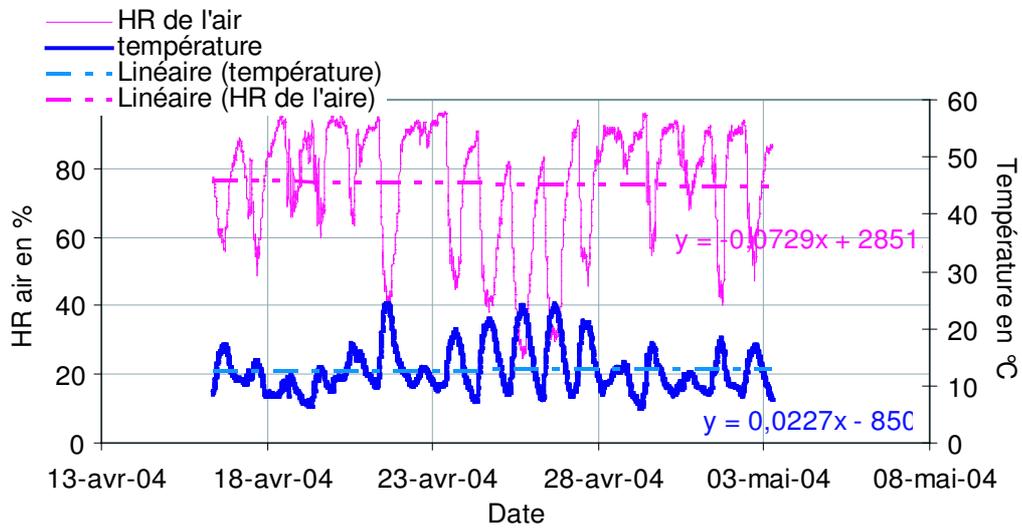


FIG. A.3 – *Printemps 2004*

On repère sur les équations des courbes de tendance que la pente de la température est positive alors que celle de l'humidité relative de l'air est négative. Il s'agit là d'un climat asséchant.

A.4 Essai de durée de vie sur les poutres chêne renforcées à l'époxy

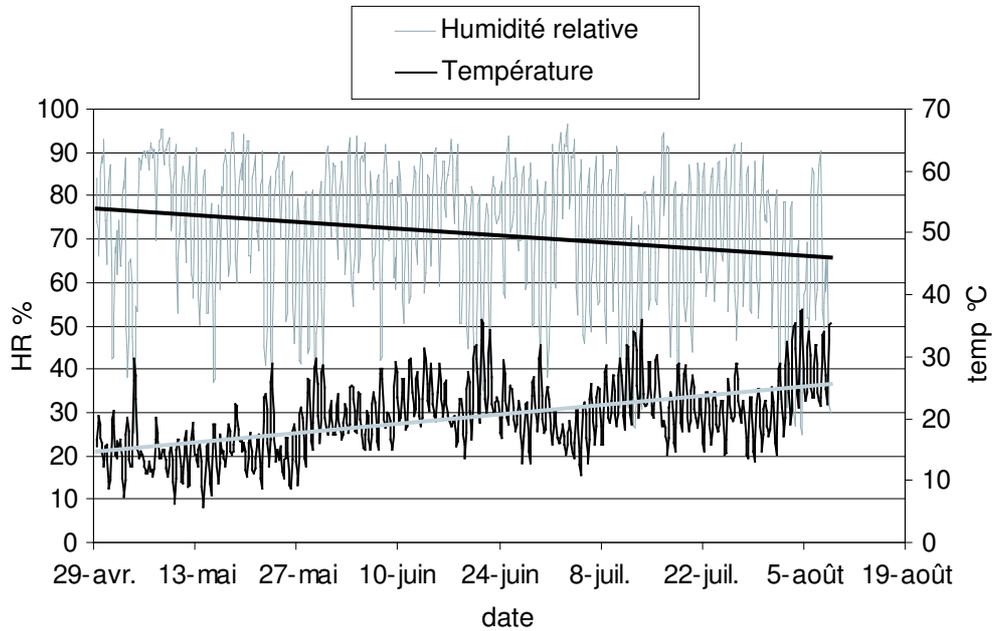


FIG. A.4 – Automne 2003

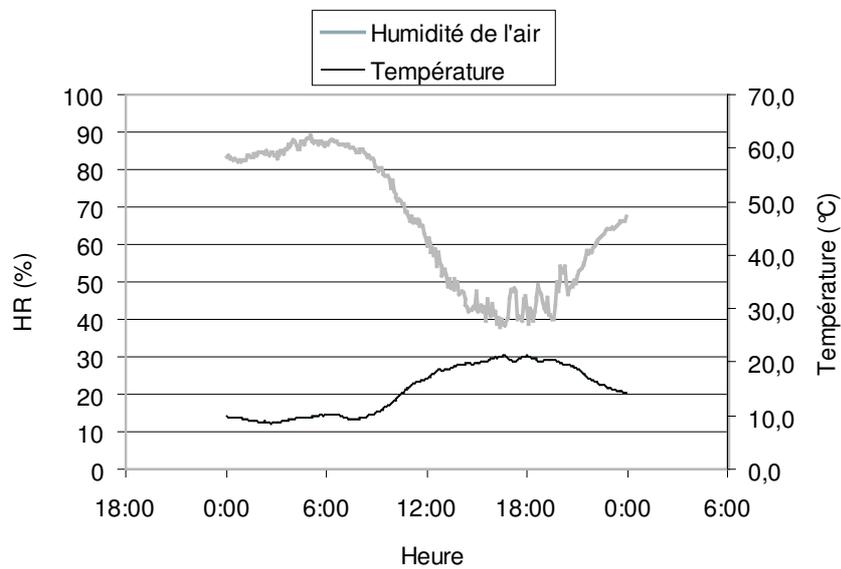


FIG. A.5 – 1er mai 2003

C'est une période asséchante que l'on considère comme relativement agressive.

Annexe B

Configuration d'éprouvette

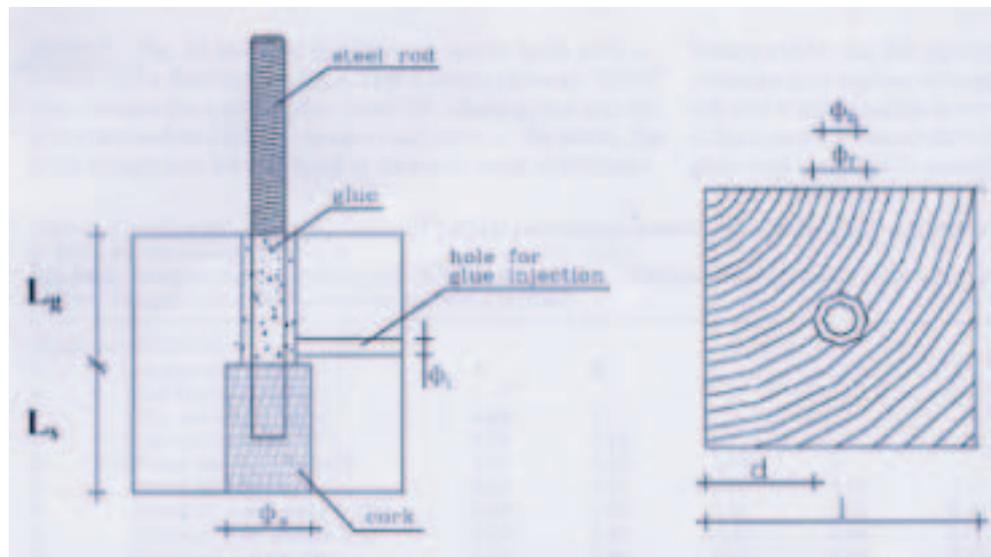


FIG. B.1 – *Éprouvette de Feligioni*

Bibliographie

- [503] EUROCODE 5. *Design of timber structures, Part 2 : Bridges, prEN 1995-2 second draft*, 2003.
- [ADL01] S. AICHER and G. DILL-LANGER. Influence of moisture, temperature and load duration on performance of glued-in rods. In *Proceedings of the international RILEM symposium*, pages 383–392, Stuttgart, Germany, 2001.
- [AFN85] AFNOR. Nfb51-004 "bois, détermination de l'humidité". Technical report, Septembre 1985.
- [AGW99] S AICHER., P.J. GUSTAFSSON, and M. WOLF. Load displacement and strength of glued-in rods in timber influenced by adhesive, wood density, rod slenderness and diameter. In *Proceedings of the international RILEM symposium on Timber Engineering*, pages 369–378, Stockholm, Sweden, 1999.
- [ASS01] A. ASSOUDO. *Comportement différé des poutres composites en bois en dimensions structurales*. PhD thesis, Université de Bordeaux 1, 2001.
- [BB94] A. BUCHANAN and D. BARBER. Fire resistance of epoxied steel rods in glulam timber. In *Proceedings of Pacific Timber Engineering Conference*, pages 590–598, Australia, 1994.
- [BD95] A. BUCHANAN and J. DENG. Design of epoxied steel rods in glulam timber. Technical report, Département de Civil Engineering University Canterbury, New-Zeland, 1995.
- [BD96] A. BUCHANAN and J. DENG. Strength of epoxied steel rods in glulam timber. In *International Wood Engineering Conference*, volume 4, pages 488–495, 1996.
- [BER01] A. BERNASCONI. Axially loaded glued-in rods for high capacity joints - behaviour and resistance. In *Proceedings of the international RILEM symposium*, pages 373–381, Stuttgart, Germany, 2001.

- [BF78a] J.D. BARRETT and R.O. FOSCHI. Duration of load and probability of failure in wood. part 1. modelling creep rupture. *Can. J. Civ. Eng.*, 5 :505–514, 1978.
- [BF78b] J.D. BARRETT and R.O. FOSCHI. Duration of load and probability of failure in wood. part 2. constant, ramp, and cyclic loadings. *Can. J. Civ. Eng.*, 5 :515–532, 1978.
- [BH01] J.G. BROUGHTON and A.R. HUTCHINSON. Adhesive systems for structural connections in timber. *International Journal of adhesion and adhesives*, 21 :177–186, 2001.
- [BJ02] C. BENGTTSSON and C.J. JOHANSSON. Girod : Glued-in rods for timber structures. Technical report, Swedish National Testing and Research Institute, 2002.
- [BL99] H.J. BLASS and B. LASKEWITZ. Effect of spacing and edge distance on the axial strength of glued-in rods. In *Proceedings CIBW18 Meeting 32 paper 32-7-12*, 1999.
- [BM99] A. BUCHANAN and P. MOSS. Design of epoxied steel rods in glulam timber. In *Proceedings of Pacific Timber Engineering Conference*, Rotura, 1999.
- [CAS98] S. CASAGRANDE. *Evaluation non destructive par une analyse vibratoire des performances mécaniques de bois reconstitués*. PhD thesis, Université de Bordeaux 1, 1998.
- [DAV97] G. DAVIS. The performance of adhesive systems for structural timbers. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 17 :247–255, 1997.
- [FLD+03] L. FELIGIONI, P. LAVISCI, G. DUCHANOIS, M. DE CIECH, and P. SPINELLI. Influence of glue rheology and joint thickness on the strength of bonded-in rods. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 61 :231–287, 2003.
- [FMMS04] C. FAYE, L. LE MAGOROU, P. MORLIER, and J. SURLEAU. French data concerning glued-in rods. In *Proceedings CIBW18*, 2004.
- [GER87] C.C. GERHARDS. A cumulative damage model to predict load duration characteristics of lumber. *Wood and Fiber Science*, 19(2) :147–164, 1987.
- [GM04] V. GARDELLE and P. MORLIER. Les assemblages par goujons collés, partie ii : Prédiction de la résistance à l’arrachement d’un goujon collé inséré parallèlement au fil du bois. *Annales GC Bois*, 2004.

- [GSAJ01] P.J. GUSTAFSSON, E. SERRANO, S. AICHER, and C.J. JOHANSSON. A strength design equation for glued-in rods. In *Proceedings of the International RILEM Symposium*, Stuttgart, Germany, 2001.
- [IRA99] IRABOIS. *Les cahier d'IRABOIS - Guide professionnel sur les assemblages : tiges ou goujons collés de grandes dimensions*, 1999.
- [KAN94] J. KANGAS. Joints of glulam structures based on glued-in ribbed steel rods. Technical Report 196, Technical Research Center of Finland, 1994.
- [KUI99] J.W.G. VAN DE KUILEN. *Duration of load effects in timber joints*. PhD thesis, Delf University, Netherlands, 1999.
- [LEB97] M. LEBATTEUX. *Durée de vie de poutres en bois reconstitué soumises à un environnement climatique naturel*. PhD thesis, Université de Bordeaux 1, 1997.
- [LEI00] R.H. LEICESTER. Applications of reliability concepts to timber engineering. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*, Canada, 2000.
- [MAD71] B. MADSEN. *Duration of load tests for dry lumber in bending*, volume vol 23. Forest products Journal, 1971.
- [MAD92] B. MADSEN. *Structural behaviour of timber*. Timber Engineering Ltd, Vancouver, Canada, 1992.
- [MAD00] B. MADSEN. *Behaviour of timber connections*. Timber Engineering Ltd, Vancouver, Canada, 2000.
- [MF01] A. MISCHLER and A. FRANGI. Pull-out tests on glued in rods at high temperatures. In *Proceedings CIBW18 Meeting 34, paper 34-16-3*, Italie, 2001.
- [MVT94] P. MORLIER, G. VALENTIN, and T. TORATTI. *Review of the theories on long term strength and time to failure*, pages 3–27. COST 508 Wood mechanics, Finland, 1994.
- [PLMM02] B. PIZZO, P. LAVISCI, N. MACCHIONI, and C. MISANI. A new approach to the design of epoxy adhesives for the restoration of timber structures. *European Timber Buildings as an Expression of Technological and Technical Cultures*, pages 245–254, 2002.
- [rf00] COLORETIM rapport final. Renforcement local d'éléments de structure bois avec des matériaux composites. Technical report, L.R.B.B., 2000.
- [RIB88] H. RIBERHOLT. Glued bolts in glulam proposals for cib code. In *Proceedings CIBW18 Meeting 21, paper 21-7-2*, Parksville, 1988.

- [SER01] E. SERRANO. Glued-in rods for timber structures - an experimental study of softening behaviour. *Materials and structures*, 34 :228–234, 2001.
- [SIM99] F. SIMON. Le collage structural vu par un mécanicien. *Annales GC Bois*, 1999.
- [SMFG04] J. SURLEAU, P. MORLIER, C. FAYE, and P. GARCIA. Les assemblages par goujons collé - partie 1 : aspect réglementaire et évaluation de la durée de vie. *Annales GC Bois*, 2004.
- [SMG02] J. SURLEAU, P. MORLIER, and P. GALIMARD. Duration of load effect of glued-in rods in full sized old oak. 2002.
- [TUR91] S. TURKOWSKIJ. Prefabricated joints of timber structures on inclined glued-in bars. In *Proceedings of International Timber Engineering Conference*, pages 3.143–3.148, London, England, 1991.
- [Unfdc96] parquets Union nationale française de charpente, menuiserie. *STEP 1, Structures en bois aux états limites - introduction à l'Eurocode 5 : matériaux et bases de calcul*. Eyrolles, 1996.
- [WH98] A.S. WHEELER and A.R. HUTCHINSON. Resin repairs to timber structures. *International Journal of Adhesion and adhesives*, 18 :1–13, 1998.

Table des figures

1	<i>Renforcement d'un entrain de ferme</i>	7
2	<i>Maquette d'un renforcement de pied de ferme</i>	8
1.1	<i>Visualisation des modes de rupture par le schéma de la section d'un goujon collé</i>	14
1.2	<i>Configuration des essais de pull-pull et pull-compression</i>	21
1.3	<i>Evaluation de la force à rupture en fonction de l/d</i>	21
1.4	<i>Rupture d'un goujon collé à l'interface entre le bois et la colle d'après le programme COLORETIM [rf00]</i>	22
1.5	<i>Evolution du rapport $\frac{\tanh \varpi}{\varpi}$ en fonction de ϖ</i>	25
1.6	<i>Analyse et integration de la formule empirique de Feligioni dans le cadre réglementaire</i>	26
1.7	<i>Niveau de sécurité des résultats expérimentaux vis-à-vis des valeurs caractéristiques</i>	28
1.8	<i>Allure du modèle éléments finis</i>	30
1.9	<i>Contrainte de cisaillement à l'interface bois-colle pour trois sections de bois</i>	31
1.10	<i>Contrainte de cisaillement à l'interface bois-colle pour deux modules d'élasticité</i>	32
1.11	<i>Contrainte ultime à l'interface bois-colle pour trois longueurs d'ancrage</i>	32
1.12	<i>Niveau de sécurité des résultats expérimentaux vis-à-vis des valeurs caractéristiques (formulation du guide français modifiée)</i>	33
2.1	<i>Isothermes de sorption du bois</i>	37
2.2	<i>Isothermes de sorption du bois dans le plan (température, HR de l'air)</i>	38
2.3	<i>Enceinte de stabilisation des bois</i>	39
2.4	<i>Système de ventilation</i>	39
2.5	<i>Géométrie de l'éprouvette de flexion</i>	41

2.6	<i>Géométrie de l'éprouvette de flexion, cotation en mm</i>	41
2.7	<i>Géométrie de l'éprouvette de traction, cotation en mm</i>	42
2.8	<i>Essai dans le bâti de traction</i>	43
2.9	<i>Essai sur le bâti de flexion</i>	44
2.10	<i>Rupture fragile de l'interface bois colle</i>	45
2.11	<i>Faciès de rupture d'un goujon collé à l'époxy</i>	45
2.12	<i>Essais de court terme sur les goujons collés à l'époxy</i>	46
2.13	<i>Représentation généralisée des essais de flexion avec l'époxy</i>	47
2.14	<i>Faciès de rupture d'un goujon collé au polyuréthane</i>	48
2.15	<i>Essais de court terme sur les goujons collés au polyuréthane</i>	49
2.16	<i>Représentation généralisée des essais de flexion avec le polyuréthane</i>	49
2.17	<i>Géométrie de l'éprouvette de flexion en chêne neuf ou ancien</i>	51
2.18	<i>Géométrie de la section de l'éprouvette en chêne</i>	51
2.19	<i>Usinage des appuis des poutres anciennes</i>	52
2.20	<i>Fréquences cumulées des contraintes à rupture pour les essais de court terme sur les poutres en chêne</i>	53
2.21	<i>Ruine ductile par plastification de la tige</i>	54
2.22	<i>Profils de contrainte en petites et grandes dimensions</i>	55
2.23	<i>Méthodologie de l'essai non destructif de caractérisation du module d'élasticité en flexion sur une pièce de bois</i>	57
2.24	<i>Répartition des modules d'élasticité longitudinaux en flexion des carrelats de lamellé collé</i>	57
2.25	<i>Fabrication des éprouvettes de petites dimensions</i>	58
2.26	<i>Série d'éprouvettes collées</i>	59
2.27	<i>Géométrie de l'éprouvette de petites dimensions en mm</i>	60
2.28	<i>Système d'essai des éprouvettes de petites dimensions</i>	60
2.29	<i>Essai de court terme sur le bâti Adamel</i>	61
2.30	<i>Exemple de courbe force déplacement pour les petites éprouvettes</i>	62
2.31	<i>Résultats des essais de court terme sur les liaisons locales collées à l'époxy, MC=12%</i>	63
2.32	<i>Résultats des essais de court terme sur les liaisons locales collées à l'époxy, MC=20%</i>	64
2.33	<i>Résultats des essais de court terme sur les liaisons locales collées au polyuréthane</i>	65

2.34	<i>Illustration du mode de rupture pour les éprouvettes de petites dimensions</i>	65
2.35	<i>Schéma de principe du dispositif de chauffage de la liaison par l'intermédiaire d'une cartouche chauffante</i>	66
2.36	<i>Dispositif d'isolation permettant de réaliser les essais à différentes températures</i>	67
2.37	<i>Evolution de la résistance à l'arrachement en fonction de la température (essais locaux)</i>	68
2.38	<i>Modes de rupture des essais locaux pour différentes températures</i>	68
2.39	<i>Superposition de courbes force-déplacement des essais de court terme avec de l'époxy</i>	69
2.40	<i>Superposition de courbes force-déplacement des essais de court terme avec du polyuréthane</i>	69
2.41	<i>Analyse et intégration de la formule empirique de Feligioni dans le cadre règlementaire complétée des essais de petites dimensions</i>	72
3.1	<i>Effet du paramètre C sur l'accumulation d'endommagement, modèle I</i>	76
3.2	<i>Relation entre une vitesse de chargement constante et un cas de charge constante</i>	80
3.3	<i>Décalage du point expérimental correspondant aux essais de référence</i>	80
3.4	<i>Représentation de l'essai de durée de vie selon la méthodologie de Madsen</i>	81
4.1	<i>Dispositif expérimental des essais de durée de vie</i>	86
4.2	<i>Mesure de la flèche centrale et détection de la rupture</i>	87
4.3	<i>Dispositif expérimental pour les essais de durée de vie en atmosphère variable - cotation en mm</i>	88
4.4	<i>Capteur d'humidité dans le bois</i>	89
4.5	<i>Rupture par extraction de l'ensemble tige/adhésif lors des essais de long terme</i>	91
4.6	<i>Représentation du comportement à long terme des poutres collées à l'époxy pour deux MC différentes : diagramme de durée de vie</i>	92
4.7	<i>Représentation du comportement à long terme des poutres collées au polyuréthane pour deux MC différentes : diagramme de durée de vie</i>	93
4.8	<i>Représentation superposée des résultats à long terme des poutres renforcées au polyuréthane et à l'époxy pour deux MC différentes : diagramme de durée de vie</i>	94

4.9	<i>Représentation de Madsen pour les survivantes de la série de poutres collées à l'époxy (MC constantes) : visualisation de l'endommagement</i>	95
4.10	<i>Représentation fictive des poutres survivantes à humidité constante sur le diagramme de durée de vie</i>	97
4.11	<i>Représentation du comportement à long terme des poutres collées à l'époxy pour deux sections différentes : diagramme de durée de vie</i>	98
4.12	<i>Représentation de Madsen pour les survivantes de seconde série de durée de vie (sections variables) : visualisation de l'endommagement</i>	100
4.13	<i>Représentation fictive des poutres survivantes pour deux tailles de section sur le diagramme de durée de vie</i>	101
4.14	<i>Distributions des poutres de référence et des poutres vieilles collées à l'époxy</i>	102
4.15	<i>Distributions des poutres de référence et des poutres vieilles collées au polyuréthane</i>	103
4.16	<i>Schématisation du chargement par paliers et représentation des ruptures en D.O.L.</i>	104
4.17	<i>Représentation du comportement à long terme des poutres en chêne renforcées à l'époxy : diagramme de durée de vie</i>	106
4.18	<i>Schéma de principe d'un bâti d'essai à long terme pour les éprouvettes de petite taille</i>	107
4.19	<i>Dispositif expérimental de test des liaisons locales en durée de vie</i>	108
4.20	<i>Représentation du comportement à long terme des petites éprouvettes collées à l'époxy : diagramme de durée de vie</i>	109
4.21	<i>Représentation du comportement à long terme des petites éprouvettes collées au polyuréthane : diagramme de durée de vie</i>	110
4.22	<i>Représentation du comportement à long terme des petites et grandes éprouvettes (GL24h)</i>	111
4.23	<i>Evolution des propriétés mécaniques lors d'un essai de durée de vie</i>	113
A.1	<i>Automne 2003</i>	117
A.2	<i>Eté 2004</i>	118
A.3	<i>Printemps 2004</i>	119
A.4	<i>Automne 2003</i>	120
A.5	<i>1er mai 2003</i>	120
B.1	<i>Eprouvette de Feligioni</i>	121

Liste des tableaux

1.1	<i>Résumé des facteurs de durée de vie selon GIROD</i>	18
1.2	<i>Répartition des essais intégrés dans la base de données</i>	28
1.3	<i>Intervalles de valeurs $\frac{P_f}{P_{f,k}}$ pour les deux adhésifs utilisés</i>	29
2.1	<i>Masse volumique des deux GL24h de provenances différentes</i>	37
2.2	<i>Comparaison du fonctionnement mécanique dans une éprouvette de traction et de flexion</i>	43
2.3	<i>Récapitulatif des résultats instantanés pour la flexion d'un poutre collée à l'époxy</i>	46
2.4	<i>Récapitulatif des résultats instantanés pour la flexion d'un poutre collée au polyuréthane</i>	48
2.5	<i>Récapitulatif des essais instantanés avec du lamellé collé</i>	50
2.6	<i>Tableau récapitulatif des essais de flexion de court terme sur les poutres en chêne</i>	53
2.7	<i>Module d'élasticité par essais vibratoires</i>	57
2.8	<i>Essais de court terme sur les éprouvettes de petites dimensions collées à l'époxy</i>	63
2.9	<i>Essais de court terme sur les éprouvettes de petites dimensions collées au polyuréthane</i>	64
2.10	<i>Récapitulatif des essais à différentes températures pour de l'époxy</i>	70
2.11	<i>Récapitulatif des essais à différentes températures pour du polyuréthane</i>	70
2.12	<i>Exemple de coefficients à appliquer à la résistance en fonction de la température de service</i>	70
2.13	<i>Récapitulatif et comparatif des différents essais de court terme</i>	72
4.1	<i>Valeurs du coefficient k_{mod} pour du bois massif ou lamellé collé</i>	84

4.2	<i>Répartition des poutres pour l'essai en D.O.L. à humidité constante sur du lamellé collé</i>	90
4.3	<i>Valeurs du coefficient k_{mod} pour les deux humidités de bois constantes et le renfort scellé à l'époxy</i>	91
4.4	<i>Valeurs du coefficient k_{mod} pour les deux humidités de bois constantes et le renfort scellé au polyuréthane</i>	93
4.5	<i>Valeurs du paramètre α pour les deux humidités de bois constantes et le renfort scellé à l'époxy</i>	96
4.6	<i>Durées de vie potentielles des survivantes pour les deux humidités de bois constantes et le renfort scellé à l'époxy</i>	97
4.7	<i>Répartition des poutres pour l'essai en D.O.L. à section variable sur du lamellé collé</i>	98
4.8	<i>Valeurs du coefficient k_{mod} pour les deux sections et le renfort scellé à l'époxy</i>	99
4.9	<i>Valeurs du paramètre α pour les deux sections différentes et le renfort scellé à l'époxy</i>	100
4.10	<i>Durées de vie potentielles des survivantes pour les deux sections différentes et le renfort scellé à l'époxy</i>	100
4.11	<i>Forces à rupture en flexion après vieillissement</i>	102
4.12	<i>Valeurs du coefficient k_{mod} pour les poutres chêne et le renfort scellé à l'époxy</i>	106
4.13	<i>Valeurs du coefficient k_{mod} pour les petites éprouvettes et le renfort scellé à l'époxy</i>	109
4.14	<i>Valeurs du coefficient k_{mod} pour les petites éprouvettes et le renfort scellé au polyuréthane</i>	110

Résumé

La technique de renforcement de structure par goujons collés est pratiquée depuis de nombreuses années en France mais les architectes sont réservés à l'idée de les prescrire : le comportement à long terme d'une telle liaison est effectivement mal connu ; c'est pourquoi des études de durée de vie émergent dans toute l'Europe.

Une proposition de modélisation de ce phénomène est établie et appliquée aux expérimentations pratiquées. On étudie donc l'influence de la durée de chargement, de l'humidité du bois, de la taille de la section et de sa densité. Deux adhésifs sont utilisés : époxy et polyuréthane. Les spécimens testés sont des poutres en grandeur structurale et des éprouvettes de petite dimension.

Le modèle de Gerhards permet d'extraire des facteurs modificatifs de la résistance (appelé k_{mod} dans l'Eurocode 5) prenant en compte les paramètres de l'expérience (durée de chargement, classe de service). Notre étude permet de conclure que ni l'humidité (classe 1 et 2), ni la masse volumique n'ont d'influence significative sur la durée de vie et nous pouvons transposer l'étude locale d'une liaison à un assemblage en grandeur structurale pour l'adhésif époxy.

Des essais à température variable sur les éprouvettes de petites dimensions révèlent une sensibilité particulière du joint de colle et confirme que ce paramètre doit faire l'objet d'études approfondies.

mots clés : goujons collés, durée de vie, température

Abstract

The glued-in rods technic has been used for many years in France but architects wonder today about their long term behaviour. Therefore studies are starting in Europe on the duration of load effect of such a joint.

A modelisation is made and applied to experimental results. We are looking for the influence of sustained loading, moisture content, section dimension of the piece of wood and its density. Two adhesives are tested : epoxy and polyurethane. Small specimens and structural beams are tested.

The Gerhards model is used to calculate decreasing resistance factors (called k_{mod} in Eurocode 5) including the different experience parameters such as time on sustained load and service classes. Thanks to this study, we are able to confirm that moisture content (classe 1 and 2) and density of wood have no significative influence on the duration of load and we can transpose a small scale study to a structural scale study for epoxy adhesive.

Tests are performed on small specimens at different temperatures and it is noteworthy that glued-in rods resistance are strongly depending on this parameter. It would be the aim of others investigations.

mots clés : glued-in rods, duration of load, temperature