



ForestValue

hardwood_joint

Rapport final

2019 - 2022

Convention CODIFAB 2019 UICB 01_11

Université de Lorraine - LERMAB



Le projet hardwood_joint sous l'égide de l'ERA-NET Cofund ForestValue est soutenu par BMLFUW (AT), ADEME (FR), FNR (DE) and Vin-nova (SE). ForestValue a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention N° 773324.

Avant-propos

Ce rapport présente les travaux en lien avec la convention 2019 UICB 01_11 entre le CODIFAB et l'Université de Lorraine, convention établie à partir du 1^{er} février 2019 pour financer la participation du Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le MATériau Bois (LERMAB) au projet européen ForestValue : le projet hardwood_joint – innovative joints in hardwoods.

L'organisme France Bois Forêt (FBF) et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) participent aussi au financement de la partie française du projet hardwood_joint. De même, deux industriels français accompagnent ce projet, la société SIMONIN et la société Würth France.

Ce rapport a été rédigé selon les exigences de la convention entre l'ADEME et l'Université de Lorraine pour le financement du projet hardwood_joint.

Sommaire

1	Harwood_joint : un projet européen	4
2	Organisation du projet.....	4
2.1	Déroulement du projet.....	4
2.2	Membres de l'équipe de recherche.....	5
2.3	Fonctionnement du consortium	5
3	Résultats.....	6
3.1	WPI : Modélisation d'assemblage	7
3.2	WP3 : Organe chargé latéralement	8
3.2.1	Tâche 3.2 – Essais de portance locale	8
3.2.2	Tâche 3.4 – Comportement mécanique des assemblages rainurés	9
3.3	WP4 : Assemblage avec préparation de surface d'usinage réalisée par commande numérique	12
3.3.1	Tâche 4.1 - Usinages	12
3.3.2	Règles de dimensionnement des assemblages rainurés	14
3.3.3	Tâche 4.2 – Modèle pour les assemblages rainurés	15
3.3.4	Tâche 4.3 – Modèle pour les assemblages à embrèvement multiple	15
3.3.5	Tâche 4.4 – Perçages de trous longs de petits diamètres	18
4	Conclusion	20

1 Harwood_joint : un projet européen

Ce travail s'inscrit dans un projet européen ForestValue : le projet hardwood_joint – innovative joints in hardwoods. Ce projet réunissait plusieurs équipes de recherche : l'équipe Timber Structures and Building Construction de l'Institut de technologie de Karlsruhe (Allemagne) qui était le coordinateur du projet, le Department of Building Technology de l'Université de Linnaeus (Suède), l'Institute of Timber Engineering and Wood Technology de l'Université de technologie de Graz (Autriche) et le Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le MATériau Bois (LERMAB) de l'Université de Lorraine (France).

L'objectif de ce projet était de contribuer à rendre le bois feuillu plus performant en structure à travers l'amélioration de la connaissance du dimensionnement des assemblages dans le cadre réglementaire et de l'innovation. Dans la réglementation actuelle, les spécificités du bois feuillu sont quasi ignorées. Le but était de conduire les expérimentations pour renseigner ce qui ne l'était pas, développer des modes d'assemblages plus spécifiques au bois feuillu pour tirer parti de la densité propre à ces essences, apporter les éléments pratiques propres à la réalisation et leur mise en œuvre, modéliser le comportement pour étendre les résultats expérimentaux et produire les règles de dimensionnement propres à améliorer la prévision et donc la performance des assemblages. Ce projet s'étendait initialement sur 36 mois à partir du 1^{er} février 2019, néanmoins, une demande de prolongation de 6 mois a été demandée au niveau européen et local. En effet, l'avancement du projet a été beaucoup retardé et perturbé par la crise sanitaire au sein des différentes équipes de recherche.

La finalité du projet est de favoriser la construction de structures à haute performance en bois de feuillu dans le secteur européen du bâtiment, ceci en développant des technologies d'assemblages communes, économiques, fiables et innovantes. Afin d'atteindre cet objectif, des études mécaniques et hygrothermique ont été menées sur trois essences de bois de feuillu : le chêne, le hêtre et le bouleau, ainsi que sur du LVL de hêtre. Ce document présente l'ensemble des résultats en présentant un bilan par tâches pour la partie française. Des rapports d'avancement à 18 mois, 24 mois et 30 mois ont déjà été transmis et des rapports détaillés par tâches sont joints à ce rapport final, il ne sera fait état ici que des résultats majeurs.

2 Organisation du projet

2.1 Déroutement du projet

Le LERMAB et sa branche mécanique Génie Civil bois a pu répondre à l'appel à projet ForestValue Joint Call 2017 avec le projet hardwood_joint – innovative joints in hardwoods grâce aux liens qu'il avait tissés dans le COST 1402 « Basis of structural timber design – from research to standards ». En effet, l'ensemble des partenaires Européens de ce projet s'étaient rencontrés et avaient déjà travaillé ensemble dans ses rencontres européennes depuis 2014 sur diverses thématiques d'assemblages. La réponse à l'appel à projet a été instruit durant l'été 2018 avec pas mal de peine car la recherche de financeurs Français durant cette période de vacances n'était pas propice surtout lorsque l'on est novice en ce domaine. Du fait d'une certaine reconnaissance de l'équipe mécanique du LERMAB en matière de développement d'assemblages, la recherche de financement a cependant heureusement abouti pour cofinancer les travaux. D'autre part, le dossier aurait dû être monté en concertation étroite avec les services de l'Université de Lorraine, ce qui n'a pas été le cas du fait des congés d'été, cela a posé quelques problèmes dans la finalisation de l'élaboration du budget de l'opération. Il était attendu une réponse et un démarrage du projet en septembre 2018, mais la réponse est arrivée fin 2018 et le projet a finalement été lancé fin février 2019. Pour réaliser ce projet qui nourrissait quelques ambitions, nous avons prévu de recruter des chercheurs mais que nous n'avons pas pu garder à l'automne 2018, n'étant pas certain de l'obtention des budgets. Le travail de recrutement a donc repris courant 2019 et deux chercheurs ont été recrutés à l'automne 2019. Sans être certain de l'obtention du projet, le LERMAB avait cependant par anticipation recruté sur budget propre une chercheuse à l'automne 2018. Cette chercheuse a d'autre part été prolongée sur fond propre depuis février 2022 afin de seconder le chef de projet à finaliser les travaux pour le rendu final.

Dans la conduite de ce projet qui a démarré de manière décalée, deux événements majeurs non prévus sont intervenus et ont perturbé son déroulement. En premier lieu, à l'automne 2019 ont démarré de grands travaux de réfection des installations de la halle technologique de l'ENSTIB, ces travaux se sont déroulés sur un an et demi et ont rendu beaucoup de matériels indisponibles de manière assez aléatoire du fait de l'avancement du chantier. Ceci a eu pour conséquences de limiter certaines tâches d'exploration et nous a obligé à nous lancer plus directement dans les phases de qualification à proprement parlé. En second lieu est intervenue la période de confinement COVID19 qui avec les travaux de l'ENSTIB et la fermeture d'été de l'Université a tenu éloignée de l'université l'équipe de recherche jusqu'à l'automne 2020. Cette période s'est avérée difficile à gérer pour le chef de projet. En effet, malgré la bonne volonté de l'équipe de recherche, il s'est avéré complexe de faire avancer à distance une équipe novice sur un sujet pointu en anticipation de matériels de préparation et de recherche inconnus d'eux. Il aurait fallu disposé pour le chef de projet de plus de temps, qu'il n'a pas pu mobiliser, du fait du surcroît de travail apporté par la perturbation des responsabilités qui étaient les siennes en termes d'enseignements et de responsabilités pédagogiques. À la suite de cette période, nous avons mis toute notre énergie à essayer de rattraper le retard pris. Deux élèves ingénieurs ont alors été recrutés en plus pour effectuer leurs stages de fin d'études afin de compléter l'équipe.

Pour compléter le déroulement du projet jusqu'à sa fin, à l'automne 2021, l'équipe mécanique du LERMAB s'est vu interdire l'utilisation de la dalle d'essais sur laquelle elle comptait pour réaliser les essais de validation des assemblages de bois feuillu par embrèvement et qui nécessite des capacités de chargement importantes. Cette décision abrupte et sans appel a obligé le chef de projet à revoir les priorités de la fin du projet bien qu'une demande de prolongation était en cours. En effet, cette décision remettant beaucoup de choses en cause et en particulier le devenir de certains collaborateurs, des opportunités de changement d'emploi ont été saisies. En conséquence, nous avons dû renoncer à réaliser une partie des essais sur lesquels nous nous étions engagés et passer du temps pour le chef de projet à terminer d'autres tâches sur lesquelles le laboratoire s'était également engagé.

En conclusion, il ne peut pas être dit que ce projet se soit bien déroulé. Il a été très perturbé et une grande énergie a été dépensé à savoir comment le faire avancer d'un point fonctionnement forcément au détriment de son avancement propre de recherche, ceci nourrit beaucoup de regrets.

2.2 Membres de l'équipe de recherche

Le Tableau 2-1 présente la liste des personnes qui ont participé au projet `hardwood_joint` et qui ont participé à son accomplissement.

Tableau 2-1 Liste des participants pour la partie française du projet `hardwood_joint`

Nom	Organisme	Rôle
JF. BOCQUET	Maître de conférences ENSTIB / LERMAB	Chef de projet
T. BENISTAND	ATER ENSTIB / LERMAB	Responsable tâche 3.2 Soutien tâche 3.4 et 4.3
A. HOSPITAL	Ingénieure de recherche LERMAB	Responsable tâches 1.3, 4.2 et 4.3
E. BALBO	Ingénieure de recherche LERMAB	Responsable tâches 3.4 et 4.1 Soutien tâche 4.4
A. PAUL	Assistant de recherche LERMAB	Responsable tâche 4.4
D. PARRELL	Étudiant ingénieur ENSTIB en stage de fin d'études au LERMAB	Exécutant tâche 4.3
M. VAGELLI	Étudiant ingénieur ENSTIB en stage de fin d'études au LERMAB	Exécutant tâche 4.3

2.3 Fonctionnement du consortium

Comme évoqué précédemment, les équipes de recherche du consortium se connaissaient préalablement au projet. Les tâches étant relativement bien séparées, aucun problème de coordination n'a eu lieu malgré les retards pris par chacune

des équipes du fait des conséquences du COVID19. Les réunions qui ont eu lieu en présentielle ou à distance se sont toujours extrêmement bien passées, toujours riches d'avis de spécialistes ayant des regards extérieurs avisés de chercheurs confirmés. Ces rencontres et la proximité de vue des équipes a permis des opportunités d'emploi de chercheurs qui a fortement enrichi le potentiel du consortium. Afin d'exposer les résultats du projet hardwood_joint, une présentation commune avec une partie des projets soutenus par le programme ForestValue a eu lieu lors d'une conférence finale le 21 et le 22 juin 2022 à Skellefteå en Suède.

D'un point de vue consortium et fonctionnement, le projet hardwood_joint a parfaitement fonctionné du point de vue de l'équipe Française.

3 Résultats

Cette section présente un résumé des travaux effectués pour chaque tâche du projet. Le tableau suivant liste les rapports détaillés pour les tâches correspondantes, le titre du document ainsi que le nom du fichier sont indiqués. Dans l'ensemble de ces rapports, le nom du fichier est utilisé comme renvoi vers un autre rapport du projet hardwood_joint. La rédaction a été effectuée en français mais un certain nombre de rapports sont disponibles en anglais car il avait été envisagé que ces rapports soient diffusés au niveau européen.

Tableau 3-1 Rapports d'exécution et technique pour la partie française du projet hardwood_joint

Tâche	Titre du document	Nom du fichier
3.1	Étude des transferts hygrothermiques dans une paroi multicouche à connexion rainurée	WP1-T1.3-RT-2022.pdf
3.2	Essais de portance locale sur le bouleau	WP3-T3.2-RE-2020.pdf
3.4	Essais de cisaillement longitudinal sur le bouleau et de cisaillement roulant sur le chêne	WP3-T3.4-RE-2021.pdf
3.4	Essais d'arrachements	WP3-T3.4-RT_Arrachement-2021.pdf
3.4	Essais de cisaillement d'assemblages rainurés	WP3-T3.4-RT_Assemblages-2022.pdf
4.1	Usinage des rainures	WP4-T4.1-RT-2021.pdf
4.2	Modélisation des assemblages rainurés	WP4-T4.2-RT-2022.pdf
4.3	Dimensionnement des embrèvements à pas multiple	WP4-T4.3-RT-2022.pdf
4.3	Essais de compression	WP4-T4.3(A1)-RE-2022.pdf
4.4	Perçages de trous longs de petits diamètres	WP4-T4.4-RT-2021.pdf

Publications scientifique :

- Benistand T, Bleron L., Bocquet J.F (2020) "Embedding Strength Prediction for European Hardwood Species" In: Proceedings INTER/53-07-9. (Nom du fichier :INTER_2020_53-07-03)

3.1 WPI : Modélisation d'assemblage

Le Work Package 1 était piloté par l'Université de Linnaeus, le LERMAB a collaboré étroitement à l'établissement des modèles mais a travaillé principalement au développement de la modélisation du gradient d'humidité dans les assemblages de lames croisées de bois feuillus (assemblage appelé assemblage rainuré par la suite). Les bois de feuillus étant plus sensibles aux phénomènes de retrait et gonflement, les variations dimensionnelles induisent des contraintes mécaniques importantes, il fallait absolument évaluer leur influence sur les assemblages développés par le LERMAB dans le Work Package 4. Ainsi, la tâche 1.3 a eu pour objectif de développer un modèle numérique afin d'étudier les transferts d'humidité dans les assemblages en bois de feuillus. Les principes de réduction de la taille des problèmes numériques à résoudre qui ont été développés dans cette étude pourront ultérieurement servir à l'étude des assemblages de bois feuillus de grandes tailles.

Une étude bibliographique sur les transferts de chaleur et d'humidité dans les milieux poreux tel que le bois a tout d'abord permis de formuler un modèle numérique. Les potentiels moteurs des transferts de chaleur et d'humidité choisis dans ce modèle étaient respectivement la température et l'humidité relative. Ce modèle a été implémenté dans le code de calcul aux éléments finis Cast3M. Deux validations du modèle en 1D ont été réalisées, une avec la norme EN 15026 et une avec le logiciel commercial WUFI.

Une fois le modèle 1D validé, le développement d'un modèle prenant en compte la géométrie complexe de l'assemblage rainuré a été effectué. En parallèle et afin de valider ce modèle, une étude expérimentale a été mise en œuvre (voir Figure 3-1). La grandeur physique mesurée pour ces essais n'était pas la teneur en eau du matériau mais directement la variation dimensionnelle des bois composant l'assemblage. Le système d'acquisition avec des capteurs de déplacement étant pour la première fois utilisé pour le suivi du retrait ou du gonflement des planches d'un assemblage rainuré, des essais préliminaires ont été réalisés. Ainsi, avant la mise en place des modules expérimentaux, des essais ont été réalisés pour tester le système d'acquisition et déterminer sa précision de mesure.



Figure 3-1 Photos des essais hygrothermique : (a) mesure avec capteur de déplacement (tige du capteur et tige filetée en contact dans un perçage effectué sur la hauteur de la planche), (b) assemblage rainuré avec 9 planches en hêtre instrumenté et (c) modules d'essais en cours de montage

Les données des essais ont permis de mettre en évidence la nécessité de développer un modèle hygrothermique 3D. Néanmoins, il n'a pas été possible de modéliser en 3D les transferts de température et d'humidité car les temps de calculs apparaissent extrêmement longs malgré les optimisations réalisées sur le code de calcul. Ainsi, un modèle 2.5D a été développé pour simuler de manière réaliste les essais, ce modèle thermo-hydrigue couple des simulations 1D et 2D.

Afin de comparer les données d'essais et les simulations numériques obtenues avec les modèle hygrothermique 2.5D, il a été nécessaire d'utiliser un modèle d'hygro-expansion. Ce dernier a permis de calculer à partir de la teneur en eau les déformations du bois ayant lieu au sein de l'assemblage rainuré lors des essais. Ainsi, il a été possible à partir des données d'essais d'ajuster le modèle hygrothermique 2.5D pour le processus d'adsorption et de désorption du bois constituant l'assemblage rainuré.

Le modèle 2.5D a été ensuite utilisé pour l'étude du comportement mécanique d'un mur réalisé avec des assemblages rainurés. Des simulations numériques ont permis d'estimer la variation de la teneur en eau aux différentes interfaces des assemblages en fonction du temps. Ensuite, les règles de calculs établies à la suite des essais de cisaillement de la tâche 3.4 du Work Package 3 ont permis d'estimer à terme la variation de rigidité des assemblages dans le temps. Il a été ainsi montré que la teneur en eau initiale des planches de bois utilisées est un paramètre important à prendre en compte.

La simplification du problème tridimensionnel qui a permis le développement du modèle hygrothermique 2.5D pourrait être extrapolée à la modélisation d'autres types d'assemblages car l'étude du retrait gonflement et sa prévision reste un problème majeur pour le dimensionnement fiable des assemblages quel que soit la nature du bois utilisé.

3.2 WP3 : Organe chargé latéralement

Le Work Package 3 était piloté par l'Institut de technologie de Karlsruhe, le LERMAB a participé à ce Work Package en réalisant des essais d'enfoncement (tâche 3.2) pour compléter les bases de données existantes permettant d'alimenter le Work Package 1. Durant ce projet, le LERMAB était également engagé dans la réalisation d'un contrat d'étude portant sur la réalisation d'un grand nombre d'essais d'assemblages pour l'association ADIVBOIS sur des bois résineux. Cette étude avait principalement pour but de vérifier qu'il était possible de maîtriser la raideur des assemblages de tige bois métal à plusieurs plans de cisaillement. De manière concertée, les résultats d'essais de cette étude ont pu être utilisés dans le Work Package 4 afin de valider les modèles développés et d'en tirer des lois de comportement et des éléments pour le dimensionnement des assemblages de bois feuillu sans refaire d'essais sur des assemblages feuillus de grande taille (tâche 3.4).

3.2.1 Tâche 3.2 – Essais de portance locale

Dans le cadre de l'ANR EFFEUR5 qui s'est terminée en 2019 et qui portait sur la caractérisation du bois feuillu en construction, la caractérisation de la résistance à l'enfoncement pour les organes de diamètre supérieur à 10 mm avait été conduite sur le chêne, le hêtre et le peuplier. Afin d'alimenter la partie modélisation par organe de type tige de la tâche du Work Package 1, il a été décidé par l'ensemble des participants du projet hardwood_joint que le LERMAB réaliserait les essais de caractérisation sur le bouleau dans la continuité de ses travaux. Un article¹ récapitulatif de tous ces travaux (incluant le bouleau, le chêne, le hêtre et le peuplier) a été présenté au congrès annuel INTER 2020. Les données obtenues ont rejoint une base de données² permettant la modélisation fine des assemblages de type tige.

Les essais de portance local sur le bouleau ont été réalisés avec un angle à 0° et à 90° entre la sollicitation et le fil du bois et pour des diamètres de broche de 12, 16 et 20 mm. La Figure 3-2 et la Figure 3-3 présentent la résistance à l'enfoncement en fonction du diamètre de la tige et de la densité pour les essais à 0° et 90°. L'équation moyenne et l'équation caractéristique de la résistance à l'enfoncement ont été reportées sur les figures pour être comparées aux équations présentées dans l'EN 1995-1-1. Dans le cas de la résistance à l'enfoncement parallèle au sens du fil l'équation actuelle de l'Eurocode ne doit pas nécessairement être modifiée mais la densité proposée dans l'EN 384 pour le bois dur doit être augmentée afin d'être plus cohérente avec les mesures expérimentales. Dans le cas de la résistance perpendiculaire à l'enfoncement l'équation proposée pour les essences de feuillus surestime de 35 % la résistance à l'enfoncement perpendiculaire au fil alors que l'équation proposée pour les résineux sous-estime de 10 % cette même résistance. Par conséquent, le bouleau doit être considéré comme un bois tendre pour l'estimation de la résistance à l'enfoncement parallèle et perpendiculaire au fil du bois.

¹ Benistand T, Bleron L., Bocquet J.F (2020) "Embedding Strength Prediction for European Hardwood Species" In: Proceedings INTER/53-07-9

² <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:lnu:diva-87945>

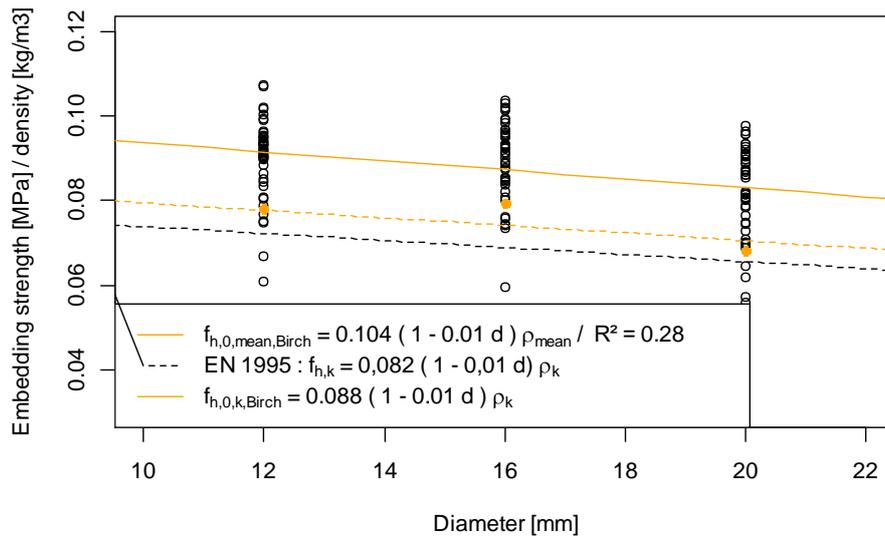


Figure 3-2 Résistance à l'enfoncement parallèle au sens du fil fonction du diamètre de la tige et de la densité

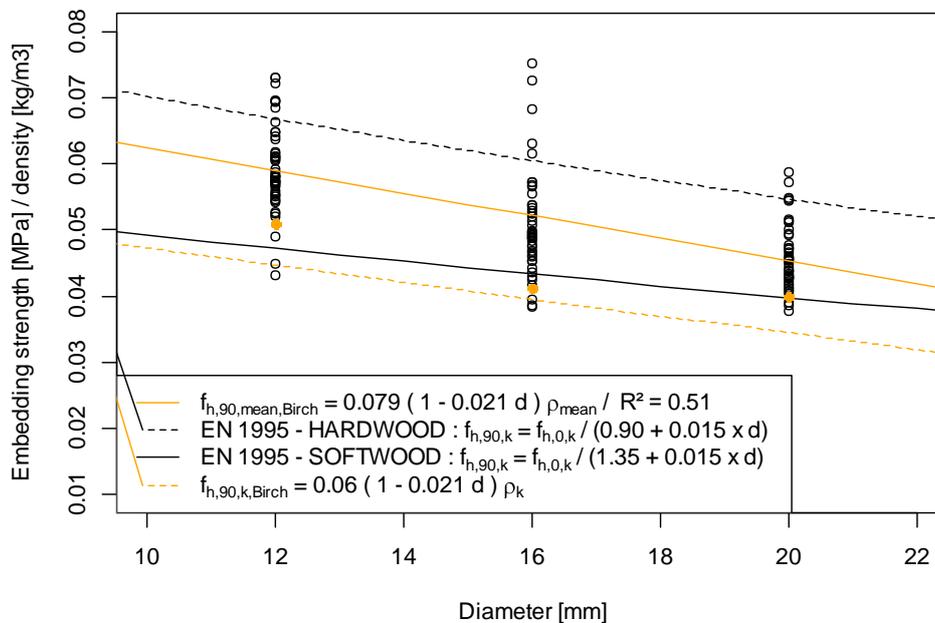


Figure 3-3 Résistance à l'enfoncement perpendiculaire au fil en fonction du diamètre et de la densité

Dans le cadre du projet hardwood joint, des essais à 45° entre la sollicitation et le fil du bois étaient attendus. Néanmoins, en comparant les résultats d'essais obtenus sur le bouleau avec les résultats obtenus sur le chêne et le hêtre dans le cadre de l'ANR EFFEUR 5, une très grande similitude est apparue. Aucun frein scientifique ne s'est opposé à étendre les lois d'extrapolation obtenues pour les bois feuillus dans le cadre de l'ANR au bois de bouleau. Ce constat présenté dans l'article cité précédemment a fait l'unanimité des observations lors de sa présentation fin août 2020 au congrès annuel INTER 2020.

3.2.2 Tâche 3.4 – Comportement mécanique des assemblages rainurés

La description des assemblages rainurés étudiés dans la tâche 3.4 a été effectuée lors de la tâche 4.1 du Work Package 4. Cet assemblage est constitué d'éléments bois (hêtre, chêne, bouleau et LVL de hêtre) maintenus par des vis (vis à pointe autoforeuse Würth ASSY 3.0 Ø5,0X80/72). Afin d'étudier le comportement mécanique de cet assemblage une première étape a été de quantifier la résistance des vis fournies par le partenaire Würth France en réalisant des essais

d'arrachement. La seconde étape consistait à étudier l'assemblage dans son ensemble grâce à des essais de cisaillement. Enfin, des essais complémentaires afin de caractériser certaines propriétés mécaniques du matériau bois utilisé ont été nécessaires car manquantes dans la littérature.

Essais d'arrachements

Afin de caractériser précisément le comportement des assemblages, des essais d'arrachement de vis ont été réalisés. Ces essais ont permis tout d'abord de quantifier la résistance à l'arrachement d'une seule vis, puis de quantifier l'influence de la proximité des vis les unes par rapport aux autres, et enfin de quantifier l'influence de la distance au bord des vis sur la perte de résistance à l'arrachement. Pour cela, des protocoles d'essais ont été définis et plusieurs montages d'essais ont été conçus puis dimensionnés. L'ensemble des campagnes d'essais d'arrachement prévues ont été entièrement réalisées.

Les valeurs de résistance au cisaillement des vis sont données dans le Tableau 3-2 pour chaque essence étudiée. Elles ont été déterminées lors d'essais en arrachement avec une vis. Afin de mettre en évidence l'influence possible due à la proximité des vis entre elles, une autre campagne d'essais a été effectuée avec 4 vis afin de conserver un chargement symétrique. Les résultats expérimentaux dans cette configuration ont été comparés aux résultats issus de la campagne d'essais d'arrachement avec une seule vis. Les résultats sont semblables, il n'y a donc pas d'influence sur la résistance à l'arrachement lorsque deux vis sont espacées de 5 mm dans une direction et 10 mm dans l'autre direction comme il est illustré sur la Figure 3-4.

Tableau 3-2 Synthèse des résultats d'arrachement simple pour chaque essence

	UNITÉ	LVL DE HETRE	BOULEAU	CHÊNE	HÊTRE
MASSE VOLUMIQUE MOYENNE	kg/m ³	805	566	722	741
TENEUR EN EAU	%	6,8	10,1	10,7	12,3
RESISTANCE AU CISAILLEMENT CARACTERISTIQUE	MPa	15,89	7,85 (8,16)*	12,80 (13,28)*	15,28
RESISTANCE AU CISAILLEMENT MOYEN	MPa	18,35	10,59 (10,37)*	16,53 (16,23)*	18,34
JEU MOYEN DE MISE EN ŒUVRE	mm	0,090	0,059	0,106	0,090
RAIDEUR VIS-BOIS	N/mm	4756	4136	5269	5539

*Valeurs pour $n_{\text{épreuve}} = 19$, où BOU-15-ARR et CHE-12-ARR sont exclues

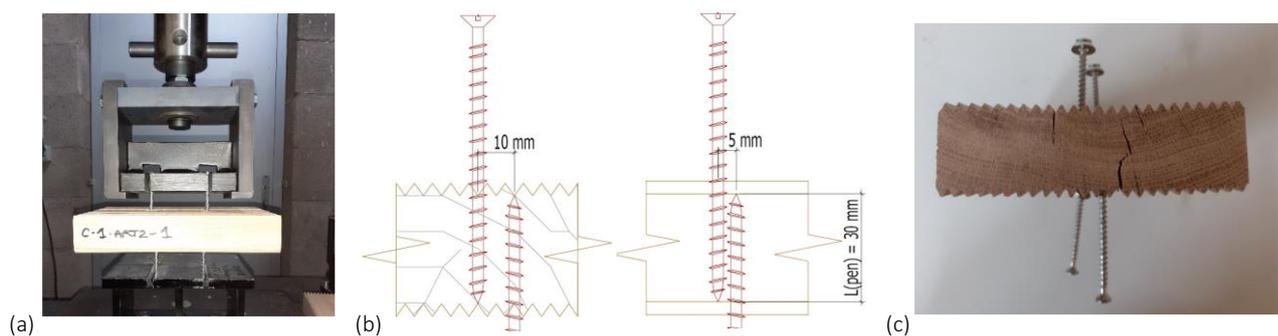


Figure 3-4 Essais d'arrachement double: (a) photo du montage avec une éprouvette, (b) espacement entre les vis selon la direction du bois, (c) photo d'une éprouvette après essais.

Une nouvelle campagne d'essais avec 4 vis a été réalisée afin d'étudier l'influence de la position des vis par rapport au bord et à l'extrémité des éprouvettes. Pour cette nouvelle configuration, la distance minimale entre les vis et le bord de l'éprouvette était de 20 mm alors qu'elle était de 55 mm pour la configuration avec 4 vis évoquée précédemment. Pour une distance au bord de 20 mm, une perte de résistance de l'ordre de 15 à 20 % a été observée sur le LVL, le hêtre et le chêne, à l'inverse, un gain de résistance de 10 % a été constaté sur le bouleau. Les essais étant réalisés dans des lames simplement équarries, l'effet de maintien des rainures en situation d'assemblage n'intervenait pas. En effet, grâce à ce

maintien, en situation d'assemblage, le fendage des planches n'intervient qu'en toute fin d'essai c'est-à-dire après la rupture par cisaillement du bois, cette diminution n'a pas été retenue comme influant la capacité de résistance en traction des vis dans la méthode de calcul de ces assemblages.

Le gain pour le bouleau peut être expliqué par la composition des éprouvettes de bouleau. En effet, les planches utilisées pour réaliser les éprouvettes provenaient de bois de petits diamètres, ainsi le centre des éprouvettes contenait le cœur de l'arbre. C'est là qu'avaient été réalisés les essais à une vis. Cette partie de la planche contenant beaucoup de bois juvénile, elle n'avait pas les mêmes propriétés que le bord des planches des essais à pinces réduites constitués principalement de bois mature.

Essais d'assemblages

Afin de qualifier la résistance au cisaillement des bois feuillus en situation d'assemblages rainurés, trois configurations d'assemblages ont été testées. Des essais à un angle de 0° par rapport au sens du fil du bois, à 45° et à 90° ont été réalisés. Ces assemblages étaient composés de lames rainurées et assemblées par des vis à pointe auto-foreuse Würth (ASSY 3.0 Ø5,0X80/72). Ces vis ont été retenues car elles permettaient une mise en œuvre sans fendage dans le bois feuillu assez exceptionnelle. En retenant une longueur de vis suffisante, seule la partie filetée était utilisée mécaniquement. La résistance à l'arrachement des vis étant peu influencée par le façonnage de sa partie filetée, les résultats trouvés sont transposables à d'autres types de vis. Si les fabricants de vis souhaitent optimiser dans le futur, ils auront toujours la possibilité de le faire en utilisant les propriétés de résistance de la tête non mise en jeu dans les essais réalisés.

Chaque configuration d'assemblage a été testée pour chaque essence en faisant varier le nombre de vis de 4 à 6 vis (Figure 3-5). Au départ, il était prévu de placer jusqu'à 8 vis mais comme la capacité des assemblages n'a pas varié entre 4 et 6 vis, cela ne s'est pas avéré utile, l'optimum était déjà dépassé. Ces essais réalisés avec une grande précision ont permis de déterminer la résistance du bois en cisaillement et la raideur de ces derniers.

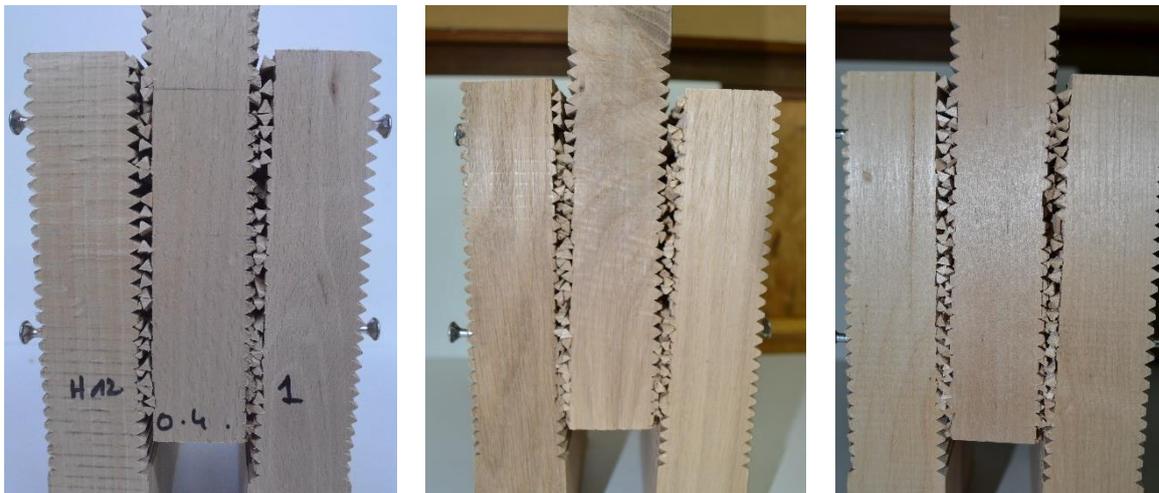


Figure 3-5 Essais d'assemblages dans le sens du fil à 4 vis sur du hêtre, du chêne et du bouleau

Cette campagne d'essais primaire a été complétée par deux autres séries d'essais. Afin d'établir une méthode de dimensionnement, il s'est avéré nécessaire d'évaluer le coefficient de frottement minimal qui pouvait se développer dans le contact entre les rainures. En effet les essais à quatre vis ont montré que pour s'opposer au déboîtement de l'assemblage, le frottement jouait un rôle très important. Le bois feuillu étant sensible aux variations d'humidité, des essais mécaniques ont été conduits pour évaluer l'influence du gain et de la perte d'humidité sur la raideur et la résistance des assemblages.

Essais complémentaires

Pour tenter de vérifier la véracité des valeurs de cisaillement trouvés dans les essais d'assemblages précédents, des essais de cisaillement longitudinal dans le bouleau ont été effectués ainsi que des essais de cisaillement roulant dans le chêne

afin de tenter de combler les manques de la bibliographie. Les résultats sont donnés dans le Tableau 3-3. Dans le cas des essais de cisaillement longitudinal pour le bouleau les valeurs de ruptures mesurées sont supérieures de 10 % à celles de la bibliographie pour une masse volumique 10 % plus faible. Pour le cisaillement roulant dans le chêne, la résistance est assez proche de celle estimée par la bibliographie. Les mêmes typologies de ruptures que celles trouvées en bibliographies ont été observées lors de la campagne expérimentale. La rupture en cisaillement roulant se produit quasiment systématiquement dans la zone initiale poreuse.

Tableau 3-3 Résultats expérimentaux

		Nombre d'éprouvettes	ρ_{mean} [Kg/m ³]	ρ_k [Kg/m ³]	ρ_{COV} [%]	$f_{v ou r mean}$ [MPa]	$f_{v ou r k}$ [MPa]	COV [MPa]
Bouleau – Cisaillement longitudinal	$f_{v,k}$	17	573	543	2,92	9,40	8,58	4,72
Chêne – Cisaillement roulant	$f_{r,k}$	15	679	611	5,44	4,52	3,75	9,64

3.3 WP4 : Assemblage avec préparation de surface d'usinage réalisée par commande numérique

Le Work Package 4 était piloté par le LERMAB, il avait pour objet l'étude d'assemblages avec préparation de surfaces d'usinages réalisées par commande numérique. Une première partie concernait la réalisation de surfaces rugueuses dans les plans de cisaillement des joints pour améliorer les effets de frottement (tâche 4.1). Une deuxième partie était basée sur les résultats de la tâche 3.4 du Work Package 3, l'objectif était de modéliser ces assemblages à l'aide de formulation non linéaires d'éléments finis de type joint via le code de calcul Cast3M (tâche 4.2). Une troisième partie était centrée sur l'étude d'assemblages avec préparation de surfaces rugueuses avec des entailles profondes : assemblages par emboîtement multiple (tâche 4.3), cette tâche nécessitait des tests de compression afin de caractériser les lois de comportement des bois utilisés. Ces lois pourront ensuite être utilisées pour la modélisation des assemblages. Pour terminer, la tâche 4.4 avait pour objet l'étude de la réalisation de trous longs et minces dans des bois durs sans déviations via des essais réalisés à l'aide d'une machine d'essai développée au LERMAB.

3.3.1 Tâche 4.1 - Usinages

Les assemblages étudiés dans la tâche 3.4 étaient des assemblages bois-bois dont la surface de contact était usinée afin de limiter le glissement d'une pièce sur l'autre, ces obstacles ont été appelés rainures. Or, comme il est montré sur la Figure 3-6, les lames de bois peuvent être croisées avec un angle variable, ainsi l'angle entre la direction des rainures et celle du fil du bois peut être différents pour chaque lame de bois. Il a donc été nécessaire d'usiner des rainures dans différentes directions vis-à-vis du fil du bois, les rainures ont été réalisées à l'aide de différentes machines.

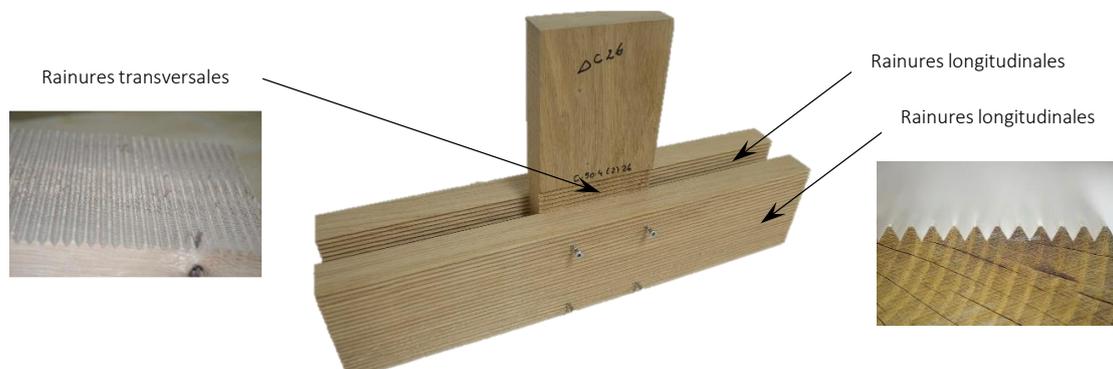


Figure 3-6 Assemblage rainuré avec un angle de 90° entre les lames en chêne.

Tout d'abord, pour les rainures longitudinales par rapport au sens du fil du bois, l'usinage a été réalisé sur une corroyeuse équipée d'outils à rainurer spécifiques. Les réglages de la corroyeuse afin d'obtenir un usinage satisfaisant ont été définis pour l'usinage du hêtre, du chêne, du bouleau et du LVL de hêtre croisé.

Ensuite pour toutes les autres directions de rainurage, la réalisation des surfaces rugueuses a été réalisée à l'aide d'un robot cartésien 5 axes polyvalent. Pour cela, un outil spécifique avec des plaquettes à rainurer a été adapté et utilisé (voir (a) de la Figure 3-7). Pour permettre un usinage aisé de ces éprouvettes spécifiques sans une machine dédiée, une table d'usinage a été réalisée afin de maintenir les pièces lors de l'usinage (voir (b) de la Figure 3-7).

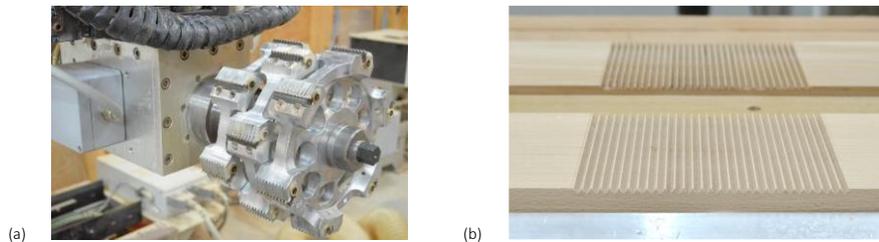


Figure 3-7 (a) Outil à rainurer utilisé par le robot cartésien 5 axes polyvalent et (b) rainures transversales en hêtre.

Les paramètres d'usinages pour les rainurages transversaux ont été définis pour le bois massif. Le LVL de hêtre quant à lui a soulevé de nombreuses problématiques d'usinage qui n'ont pas pu être résolues avant la fin du projet `hard_wood_joint`. En effet, lors de l'usinage, il a été observé que les rainures transversales pouvaient être « arrachées », voir (b) de la Figure 3-8. La fréquence de ce défaut d'usinage étant élevée et aléatoire, il a été impossible de réaliser le nombre nécessaire d'assemblages rainurés afin d'en étudier le comportement mécanique (tâche 3.4). Néanmoins, il a été possible de réaliser un module expérimental afin d'étudier les déformations des planches lors de la prise d'humidité (tâche 1.3). Le potentiel du LVL de hêtre à limiter le retrait a pu être mis en évidence, ce qui fait de ce bois reconstitué aux propriétés remarquables pour cette technique d'assemblage, un matériau de prédilection. Ces mauvais résultats d'usinage à l'angle n'étaient pas attendus car des essais préliminaires avaient été réalisés avec succès avant le démarrage du projet.



Figure 3-8 Rainures transversales en LVL : (a) usinage satisfaisant et (b) usinage non satisfaisant.

La difficulté d'usinage des rainures transversales dans le LVL de hêtre semblerait provenir d'un affaiblissement des propriétés locale du bois de hêtre par le process de déroulage, séchage, pressage lors de la fabrication du LVL et potentiellement d'un problème de jeu et de vibration de l'arbre de la broche du robot d'usinage. Faut de la désorganisation du temps, il n'a pas pu être programmé d'essais chez un de nos partenaires industriels, sur une autre machine, afin de comprendre plus finement le problème et de réduire le champ des possibles.

3.3.2 Règles de dimensionnement des assemblages rainurés

L'ensemble des résultats obtenus ont été analysés afin de proposer une méthodologie de dimensionnement de ces assemblages. En premier lieu, des dispositions constructives ont été édictées afin de cadrer la mise en œuvre : distances et pinces minimales, nombre de vis minimales, distances de recouvrement minimales. Ensuite, il a été proposé d'évaluer la raideur des assemblages, en considérant l'angle entre les lames. Dans un calcul de structure, il sera nécessaire de prendre en compte le jeu de retrait suivant les conditions de mise en œuvre de la structure. Pour terminer, la capacité résistante de l'assemblage est vérifiée comme étant le minimum entre la résistance au cisaillement des plans d'assemblages et la capacité de résistance au déboitement conféré par le frottement et la capacité de résistance à l'arrachement des vis. Le tout est écrit au format de la réglementation actuelle de l'Eurocode 5 (Figure 3-9).

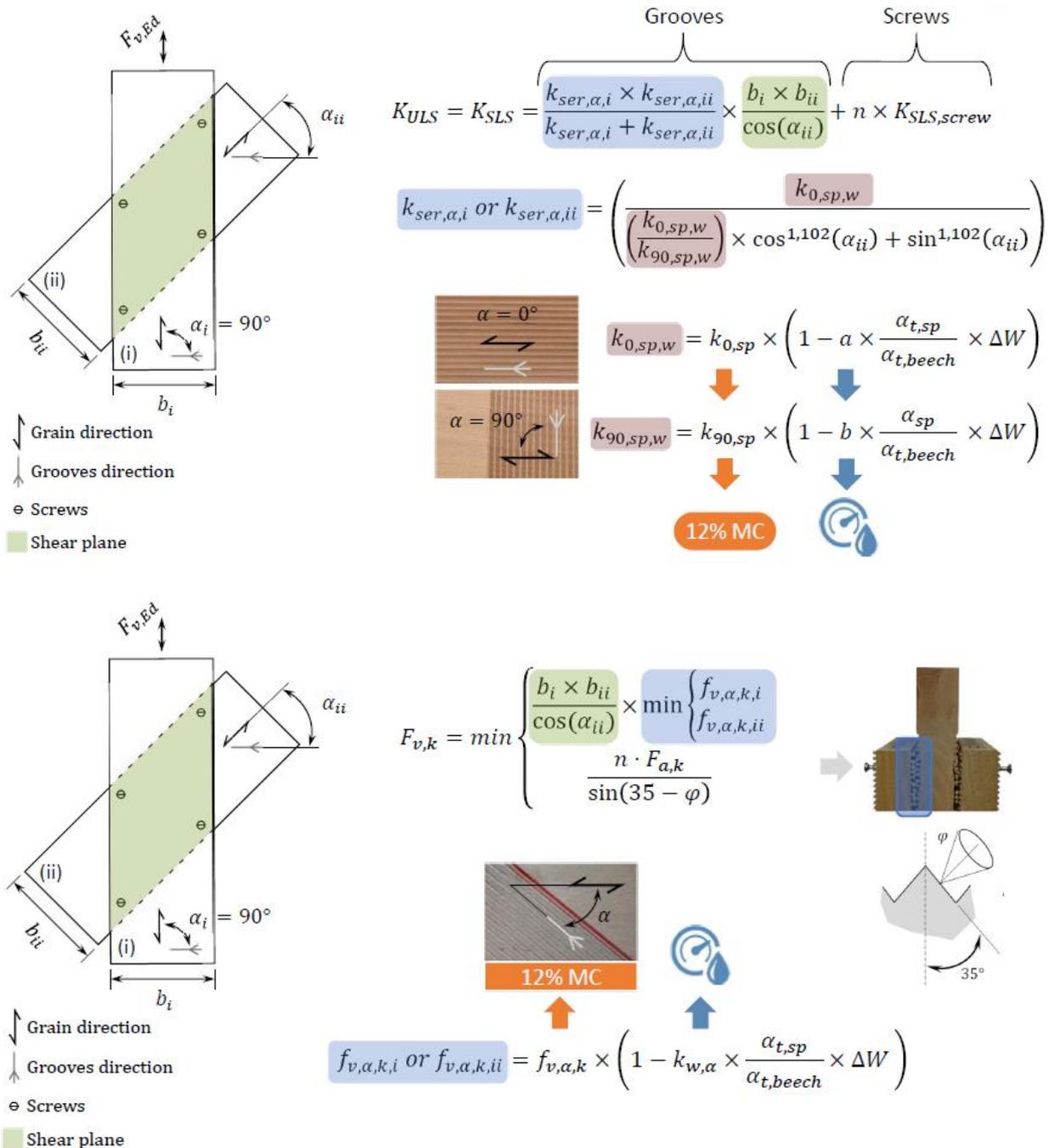


Figure 3-9 Règles de dimensionnement pour établir la capacité résistante et la raideur des assemblages rainurés au format de l'EUROCODE 5.

3.3.3 Tâche 4.2 – Modèle pour les assemblages rainurés

Les campagnes d'essais réalisées lors de la tâche 3.2 ont permis de caractériser le cisaillement longitudinal et le cisaillement transversal pour les trois essences de bois usinables. Ces essais ont permis de déterminer également les raideurs d'assemblages et les raideurs de surfaces pour approcher le comportement global des assemblages. La tâche 4.2 avait pour objectifs de définir les lois de comportement mécanique nécessaires à la modélisation de tels assemblages et donc de déterminer les paramètres permettant la modélisation indépendamment de l'apport de la raideur des vis. Le moyen retenu pour approcher les phénomènes a été la modélisation par éléments finis avec le logiciel Cast3M en introduisant des éléments finis de type joint entre les volumes de bois représentant les lames par des éléments finis 2D. Ainsi, les essais de cisaillement ont été modélisés et les paramètres des lois des éléments joints ont été identifiés afin que les simulations correspondent aux données des essais. Les lois de comportement mécanique des éléments joints correspondant aux rainures (modèle JOINT_BOIS) sont représentées sur la Figure 3-10, les valeurs des paramètres sont données par le Tableau 3-4. Ce tableau donne aussi les raideurs de surface cisailée par MEF, $k_{\alpha,MEF}$.

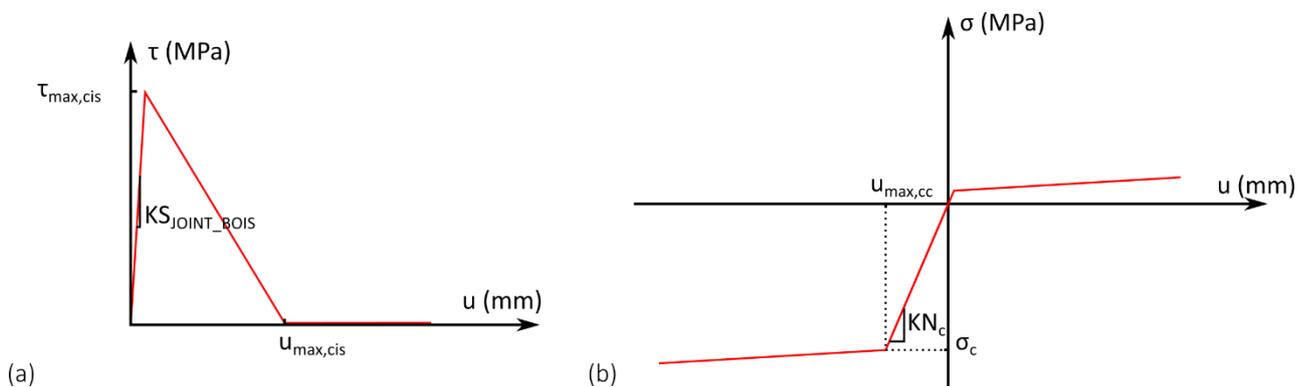


Figure 3-10 (a) Allure de la loi de cisaillement du modèle JOINT_BOIS et (b) allure de la loi de compression-traction du modèle JOINT_BOIS

Tableau 3-4 Raideurs d'interface et de surface cisailée déterminées à l'aide d'une modélisation par éléments finis

	H-0-4	H-90-4	C-0-4	C-90-4	B-0-4	B-90-4
σ_c (MPa)	10,08	10,08	8,34	8,34	7,4	7,4
KN_c (kN/mm)	253	253	217	217	193	193
$u_{max,cis}$ (mm)	7,15	8,80	7,86	8,15	8,42	6,90
$\tau_{max,cis}$ (MPa)	0,39	0,23	0,33	0,20	0,23	0,14
KS_{JOINT_BOIS} (kN/mm)	1146	164	2414	147	526	135
$k_{\alpha,MEF}$ (kN/mm)	2292	176	4828	152	1052	155

3.3.4 Tâche 4.3 – Modèle pour les assemblages à embrèvement multiple

L'embrèvement est un assemblage couramment utilisé en charpente traditionnelle. Il relie l'arbalétrier à l'entrait à proximité de l'appui de la ferme. Il peut être utilisé de façon pertinente dans la réalisation de poutre treillis, structures particulièrement adaptées au bois feuillu. La particularité des assemblages à embrèvement multiple est la réalisation de pas multiples permettant de transmettre les efforts de manière plus efficace, rendant ainsi possible une optimisation de la matière première Figure 3-11. Afin de dimensionner ces assemblages en feuillu une campagne expérimentale a été effectuée et plusieurs modèles numériques ont été développés.

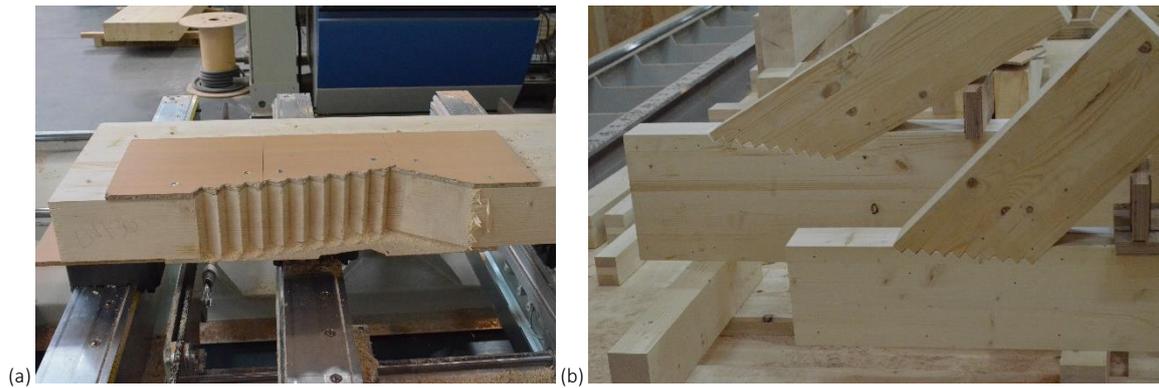


Figure 3-11 (a) Usinage d'un entrain à l'aide d'une défonceuse à commande numérique et (b) assemblages à embrèvement multiple

Une première phase de travail a permis de mettre en évidence les lacunes dans les méthodes de dimensionnement. Pour combler ces lacunes et déterminer ces paramètres manquants, il a été décidé de réaliser des modèles qui pourront permettre de faire varier les paramètres géométriques et matériels afin de déterminer les paramètres manquants sans multiplier le nombre d'essais coûteux. Une campagne d'essais sur assemblages de bois résineux a été réalisée et analysée. Le volume de bois feuillu pour faire les essais étant limité, il a été préféré de faire les essais préliminaires sur du résineux plutôt que sur du bois feuillu. Ces essais ont montré que les modes de rupture envisagés étaient bien ceux attendus. La résistance des assemblages a très souvent été pilotée par le comportement en compression transversale (voir a de la Figure 3-12), même pour des angles faibles. Le second type de rupture qui est apparu est le cisaillement (voir b de la Figure 3-12).

Les capacités de charge atteintes sont apparues surprenantes et ont modifiées en termes de priorité l'approche de modélisation. En effet, plutôt que de privilégier la modélisation de la rupture par écrasement du bois dans les dentures, il est apparu plus pertinent en première approche de modéliser l'évolution de la répartition de cisaillement le long du talon de l'assemblage afin de comprendre ces surcapacités. Pour donner suite aux premiers essais, il a été constaté qu'il n'était pas utile de tester les angles importants mais que, compte tenu des capacités résistantes des bois feuillus l'approche expérimentale n'était plus adaptée. L'approche expérimentale a donc été modifiée et des essais de validation refaits toujours sur du bois résineux.

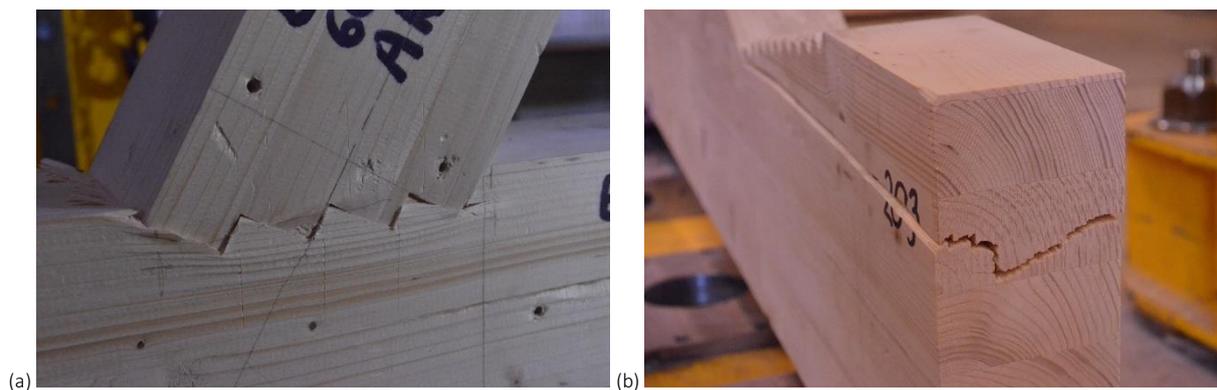


Figure 3-12 (a) Exemple de rupture en compression transversale et (b) exemple de rupture en cisaillement du talon

Néanmoins, les essais de bois résineux a permis la validation d'un modèle éléments finis développé sous Cast3M qui fonctionne en élastique puis en non linéaire avec des éléments de type joint afin de prendre en compte le comportement quasi fragile du bois en cisaillement. La Figure 3-13 présente la contrainte de cisaillement le long du joint pour différentes longueurs de talon. Il est possible de calculer la longueur effective à partir de cette courbe de cisaillement, la Figure 3-14 représente la longueur effective en fonction de la longueur cisailée pour des assemblages par embrèvements à pas multiple en épicéa avec un angle soit de 20°, soit de 30° entre l'entrain et l'arbalétrier.

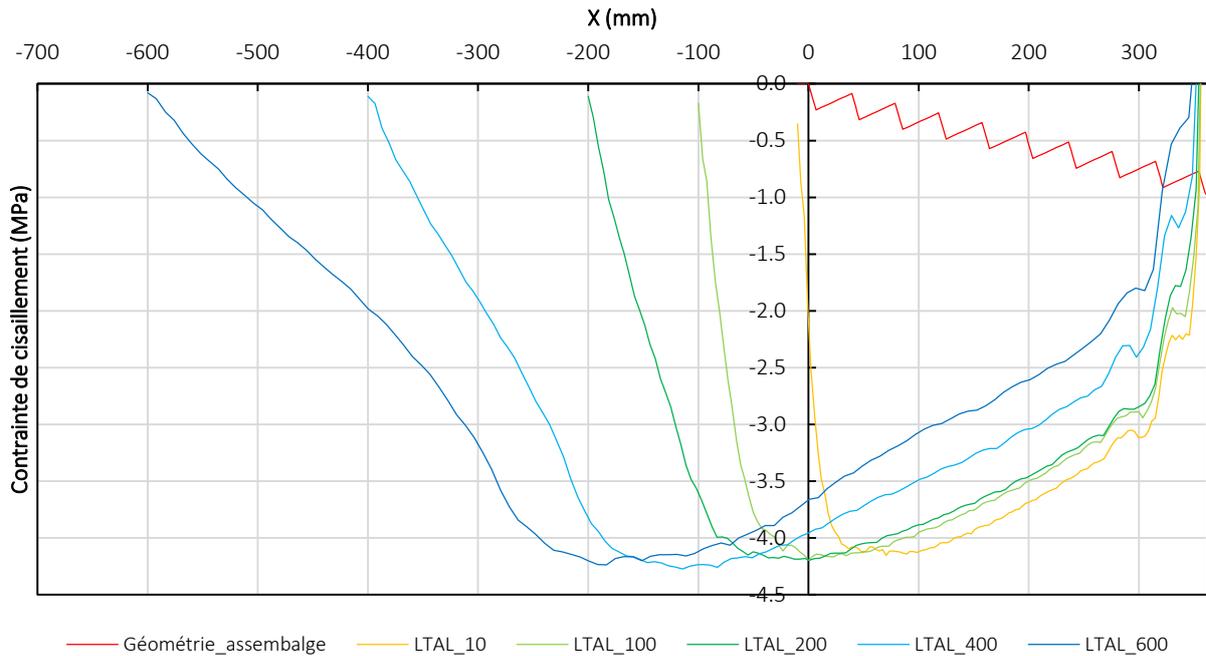


Figure 3-13 Contrainte de cisaillement le long du joint d'un assemblage par embovement à pas multiple en épicéa avec une angle de 30° entre l'arbalétrier et l'entrait.

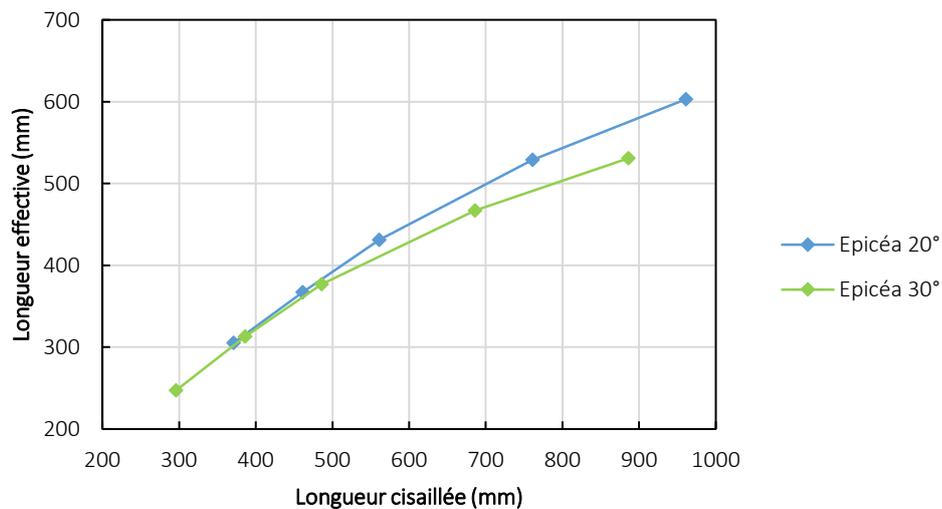


Figure 3-14 Longueur effective en fonction de la longueur cisailée

Afin de prendre en compte l'écrasement du bois dans les dentures lors des essais, un autre modèle, appelé modèle mousse, a été développé à partir des travaux de Tavakoli³ avec le logiciel ABAQUS. Afin de déterminer les paramètres nécessaires au modèle une campagne d'essais de compression a été réalisée sur différentes essences de bois, avec un angle entre le fil du bois et la force de chargement variable (voir Figure 3-15).

³ I. Tavakoli-Gheymani, « Modélisation tridimensionnelle d'assemblages de structures bois en tôle pliée mince par la méthode des éléments finis », Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2011.

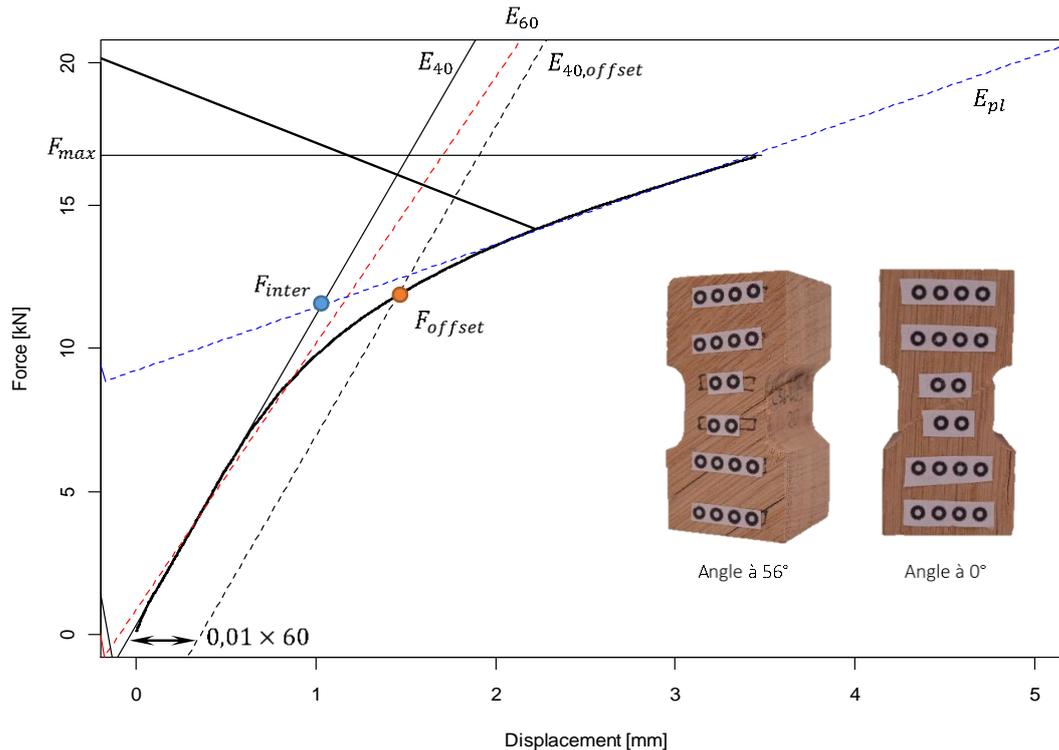


Figure 3-15 Courbe type des essais de compression et photo d'éprouvettes en chêne après essais avec un angle de 56° et un de 0°

Sur cette tâche, l'ensemble des problèmes scientifiques ont été cernés. En premier lieu, les modes de rupture principaux ont été identifiés et validés par une campagne de tests préliminaires sur du bois résineux. Les comportements ductiles et fragiles ont été modélisés suivant deux approches. Pour identifier les paramètres du modèle non linéaire, une vaste campagne de tests de compression a été réalisée sur des éprouvettes de petites tailles à différents angles par rapport au fil. Le modèle de prédiction fragile a été validé sur les essais de résineux. À ce jour, les travaux ne sont pas achevés : le modèle non linéaire plastique n'a pas été calé sur les résultats d'essais de petites tailles, la campagne d'essais sur assemblages de grande taille n'a pas pu avoir lieu. Ainsi le travail d'extrapolation des résultats à partir des modèles ne peut être achevé pour produire des règles de dimensionnement adaptées.

3.3.5 Tâche 4.4 – Perçages de trous longs de petits diamètres

Au démarrage de cette tâche, une bibliographie a été réalisée. Cette étude a montré que le perçage dans le bois était une science très empirique où très peu d'études scientifiques avaient été conduites, principalement à cause du fait que dans le bois, les conditions de coupe sont très loin d'être idéales. Contrairement au perçage des métaux par exemple, les vitesses idéales entraînent un échauffement important, des vibrations et un bourrage de copeaux. Aucune étude pratique sur les phénomènes de déviation du perçage n'a pu être trouvée bien que ce problème soit très fréquemment évoqué par les industriels. Il a donc été choisi de regarder en premier lieu, si les paramètres de coupe, même non idéaux, pouvaient exercer une influence sur la déviation du perçage pour des outils courants du commerce et en particulier le bourrage des copeaux le long des goujures de la mèche. Une machine de perçage complètement asservie a été adaptée et des programmes de pilotage couplés à de l'acquisition de données ont été mis au point. Parallèlement un protocole d'analyse d'images a été produit et amélioré afin de mesurer de manière simple la déviation des perçages. L'analyse des efforts en fonction des cycles de perçage a permis de découpler les efforts de frottement et les efforts de coupe et d'avance (Figure 3-16). Cependant, sans bourrage de copeaux, il a pu être constaté que la mèche pouvait dévier.

Mz décomposé (perçage et frottement)
 – LVL, 0°, N=500tr/min, fz=0,3mm

Mz décomposé (perçage et frottement)
 – LVL, 0°, N=500tr/min, fz=0,6mm

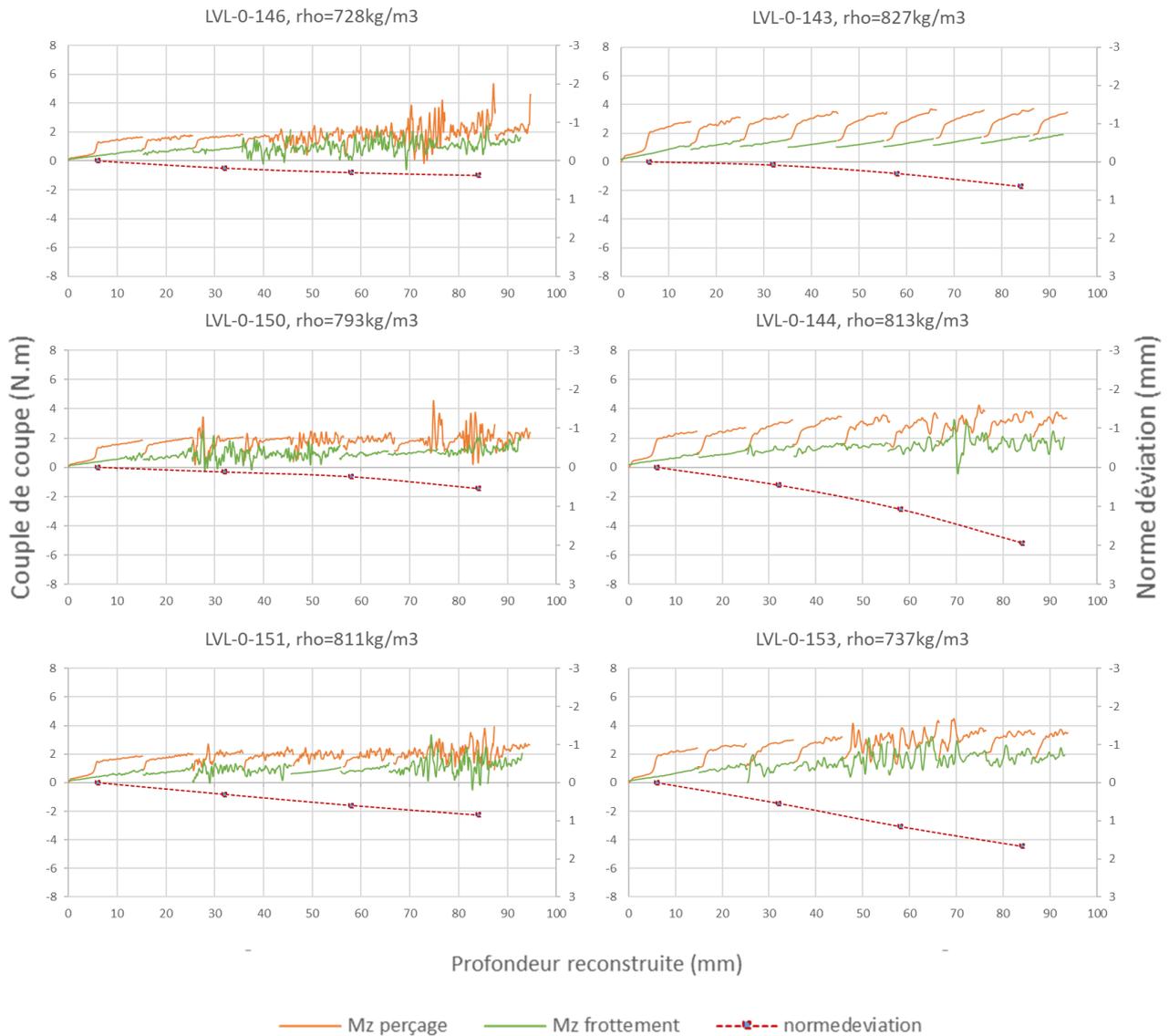


Figure 3-16 Exemple de mesure du couple de perçage, du couple de frottement et de la déviation de la mèche en fonction de la profondeur du perçage suivant les paramètres de coupe imposés.

Une faible déviation initiale entraînant rapidement une grande déviation. À travers les différentes campagnes d'essais, il n'a pas pu être mis en évidence de paramètres probants pouvant améliorer la rectitude du perçage à part le fait de réaliser un pré trou parfaitement aligné dans la direction de perçage. Il a donc été conclu que la rigidité de la mèche ne pouvait pas, à elle seule permettre de percer droits des trous de petits diamètres sur une grande longueur. Cependant, l'idée du pré trou a permis de comprendre que, comme dans le métal, c'est le trou qui doit guider la mèche et non la mèche qui doit guider le perçage. Ainsi, il a été permis de comprendre le fonctionnement de la mèche très particulière du fabricant allemand Züblin. Ces mèches favorisent dans un premier temps le perçage en refroidissant la partie tranchante de la mèche et évacuent de manière systématique les copeaux par pression d'air. Afin de démarrer l'autoguidage de la mèche par son propre trou, il apparaît fondamental de réaliser un pré trou parfaitement aligné avec la direction du perçage souhaitée. Les essais réalisés ont montré des résultats très satisfaisants même en perçant à des angles par rapport au fil. Cependant, étant donné la technologie de la mèche, il a pu être montré que la déviation de la mèche augmentait avec la vitesse d'avance.

4 Conclusion

Ce projet n'a pas présenté d'écueils scientifiques majeurs et l'ensemble des tâches proposées, bien qu'ambitieuses, étaient atteignables avec plus ou moins de remise en cause, de réflexions au fur et à mesure du déroulement des travaux et de leur avancement ce qui est normal.

La majeure partie des tâches promises sont cernées, en revanche, elles ne sont pour quelques-unes d'entre elles, pas achevées dans le sens où elles ne débouchent pas comme il était espéré sur des règles propres à améliorer le dimensionnement et la mise en œuvre des assemblages bois feuillu dans un futur proche. Les difficultés, comme il a été évoqué, sont venues de :

- la gestion temporelle du projet par son décalage de démarrage,
- la difficulté de recrutement qui s'en est suivie, couplée au changement de règles d'embauche de l'université,
- la réfection des locaux de l'ENSTIB qui héberge le LERMAB,
- le confinement du COVID 19 et les fermetures d'été imposées par l'université,
- la mise sous clef et l'interdiction d'utilisation de la dalle d'essais.

Malgré les difficultés organisationnelles, l'équipe a fait preuve d'un bon engagement et a rarement baissé les bras devant les événements. Ce projet tenant particulièrement à cœur au LERMAB, ce sont 87 000 euros de salaire qui ont été investis en complément sur fond propre avant, pendant et après pour compenser le décalage et le retard pris. Ceci n'est nullement à regretter, car il a permis à un bon nombre de tâches d'être accomplies en respect des engagements pris.

Au niveau des tâches exécutées, plusieurs conclusions sont à tirer. Au niveau du perçage de trous longs, il a été mis en évidence et compris que le perçage de petit diamètre rectiligne ne pouvait être obtenu par la rigidité de la mèche comme cela est le cas généralement en usinage standard par l'emploi de matériaux comme le carbure. Le réglage des paramètres de coupe n'a pas eu l'influence escomptée tout comme le bourrage des goujures. C'est, comme pour les matériaux durs, le perçage qui doit servir de guidage à la partie coupante. Ces procédés étant forcément plus long et délicat, le problème final restera la productivité. Il sera nécessaire de développer des machines dédiées et multibroches comme cela est déjà le cas dans l'industrie mécanique pour compenser le temps long de perçage.

L'étude des assemblages par rainures de petites tailles a été conduite jusqu'à produire une méthode de dimensionnement. Les tâches se sont déroulées correctement même si certaines auraient mérité une répétitivité plus importante afin de parfaire scientifiquement certains résultats, en particulier le frottement. L'approche de modélisation 2D développée avec Cast3M a permis d'identifier les raideurs de surfaces cisailées avec précision, ainsi ces raideurs peuvent être utilisées pour d'autres modèles afin de simuler le comportement des assemblages rainures en cisaillement longitudinal et transversal. Pour pousser plus en avant l'analyse et la compréhension de ces assemblages, il serait nécessaire de prendre en compte le comportement non linéaire des vis. Pour cela, une perspective de ce travail serait d'utiliser les modèles développés par l'équipe Suédoise du projet `hardwood_joint`, soit le Department of Building Technology de l'Université de Linnaeus. En effet, cette équipe de recherche était responsable du Work Package 1 qui avait pour objectif de développer des modèles numériques pour les charges latérales et axiales combinées qui prennent explicitement en compte l'effet du comportement des interfaces dans les assemblages. Bien que disposant déjà d'une méthode de dimensionnement, ce travail pourrait également se poursuivre par une étude du fluage, cela a été envisagé à un moment donné mais n'a pas pu être lancé. Ceci permettrait d'être plus fin dans l'optimisation du comportement différé.

Parallèlement à cette étude de caractérisation mécanique pure, une étude approfondie du comportement hygromécanique a été conduite. Il était indispensable, en vue d'une utilisation en structure dans le domaine public et privé de se doter d'éléments permettant d'expliquer le comportement des assemblages et leur évolution en cas de reprise et de perte d'humidité dans le temps qui arriveront inéluctablement. Le comportement étant tridimensionnel, une stratégie de modélisation 2.5 D couplée à une démarche expérimentale ont été déroulées afin d'être capable de simuler l'influence de perte et de reprise d'humidité dans une paroi. Cette démarche originale a permis de simuler l'évolution de la raideur des assemblages et de leur résistance au fil du temps à partir des données thermo hydriques extérieures à la paroi. Cette voie d'investigation et de simplification de problème tridimensionnel pourrait être extrapolée à la modélisation d'autres

types d'assemblages car l'étude du retrait gonflement et sa prévision reste un problème majeur pour le dimensionnement fiable des assemblages quel que soit la nature du bois utilisé.

Parallèlement à l'étude des assemblages à rainures de petites tailles, il était envisagé d'étudier le dimensionnement des assemblages avec des rainures plus profondes ou assemblages bois-bois à pas multiples. Pour cette partie, il était prévu de travailler avec de la modélisation et des campagnes d'essais permettant le calage et la vérification des modèles. L'étude expérimentale permettant le calage des paramètres a été entièrement réalisée. Pour les essais de grande taille, seule une étude préliminaire sur du bois résineux a pu être conduite. Les modèles non linéaires des éprouvettes de calage et des assemblages ont pu être réalisés mais ils n'ont pas été calés afin de pouvoir être utilisés pour en tirer des éléments pour le dimensionnement. Une modélisation élastique au comportement fragile a aussi été développée et validée sur les essais d'assemblages résineux. Cette partie n'est donc pas aboutie, mais l'essentiel des problèmes scientifiques ont été abordés et ont trouvés leur solution. Cette démarche pourra être poursuivie et être utilisée comme base si ces assemblages devaient faire l'objet d'une demande de réglementation plus pressante.

Ce projet a permis d'avancer sur le potentiel de réalisation des structures construites à base de lames de bois feuillu. Devant l'augmentation des prix du bois et la difficulté de s'approvisionner du fait du caractère spéculatif que peut représenter celui-ci, beaucoup d'industriel regarde pour faire des économies : ce qui était économique à un moment ne l'est plus aujourd'hui, la main d'œuvre ou l'automatisation peut remplacer une partie de matière brute faiblement sollicitée. Le bois feuillu présente des avantages mais à l'inconvénient majeur de donner lieu à du retrait. Le LVL de hêtre est à cet égard une petite révolution car il permet d'augmenter les performances mécaniques, il permet de les fiabiliser tout en limitant drastiquement le retrait par la présence de plis croisés. Le potentiel de ce bois n'a pas pu être démontré dans ce projet du fait du problème d'usinage rencontré. Il est essentiel de poursuivre les recherches sur l'usinage de ce type de matériaux car il sera la solution d'utilisation du bois feuillu en structure optimisée et performante de demain à des coûts compétitifs.