

# ForestValue

## hardwood\_joint

### WP4 – Tâche 2

## Modélisation des assemblages rainurés

Annabelle HOSPITAL

2019-2022





# Avant-propos

Ce travail s'inscrit dans un projet européen ForestValue : le projet hardwood\_joint – innovative joints in hardwoods. Ce projet réunit plusieurs équipes de recherche : l'équipe Timber Structures and Building Construction de l'Institut de technologie de Karlsruhe (Allemagne) qui est 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). La finalité du projet est de favoriser la construction de structures à haute performance en bois de feuillus 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 thermiques sont menées sur trois essences de bois de feuillus : le chêne, le hêtre et le bouleau, ainsi que sur du LVL de hêtre. Ce document présente une partie de la participation française à ce projet et concerne la modélisation par élément finis des essais mécanique d'assemblage rainurés.

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), l'organisme France Bois Forêt (FBF) et le Comité Professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois (CODIFAB) participent 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.



# Sommaire

1	Introduction .....	6
2	Modélisation des essais de cisaillement .....	7
2.1	Maillage et placement des cibles.....	7
2.2	Propriétés des matériaux .....	8
2.3	Éléments joints.....	9
2.4	Conditions limites et chargement .....	14
3	Résultats.....	15
3.1	Méthode de calcul des raideurs de surface.....	15
3.2	Hêtre résultats.....	16
3.3	Chêne résultats .....	17
3.4	Bouleau résultats .....	18
4	Bibliographie .....	19

# 1 Introduction

L'objet de ce travail est l'étude du comportement mécanique d'assemblage rainurés à l'aide d'une modélisation par éléments finis. Cette étude fait suite aux essais réalisés par le LERMAB dont les résultats sont disponibles au sein du rapport `hardwood_joint WP3-T3.4-RT_Assemblages-2022`. Seul les données nécessaires à la modélisation par éléments finis sont rappelées dans le rapport actuel.

Un assemblage rainuré est un assemblage bois-bois composé de deux lames croisées dont le maintien du contact bois sur bois est réalisé par des vis. Les deux lames sont identiques, l'une des faces est rainurée dans le sens longitudinal et l'autre face est rainurée dans la direction transversale au niveau de l'intersection des lames, voir la Figure 1-1.

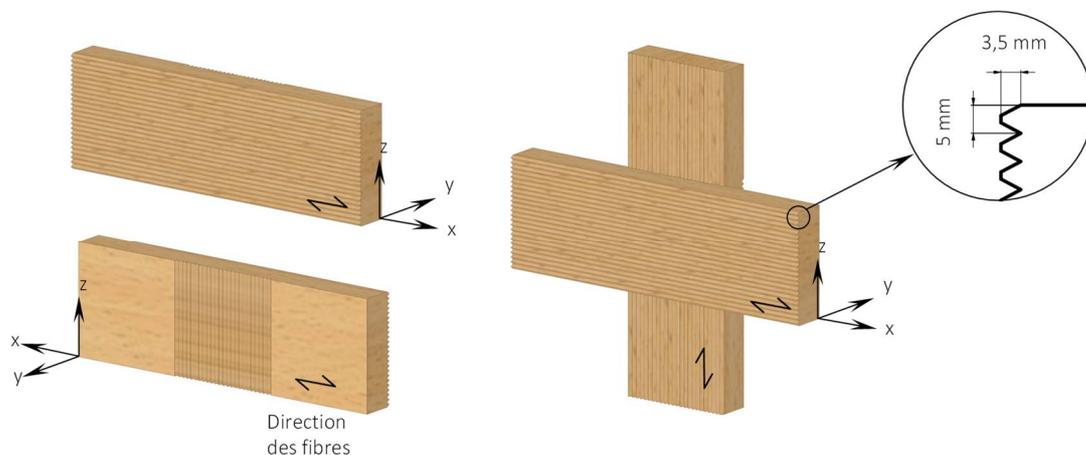


Figure 1-1 Schéma explicatif du fonctionnement de l'assemblage rainuré (les vis ne sont pas représentées)

Le LERMAB a réalisé des campagnes d'essais pour étudier le cisaillement longitudinal et le cisaillement transversal pour trois essences de bois : le hêtre, le chêne et le bouleau. Ces campagnes ont permis de déterminer les raideurs d'assemblages et les raideurs de surfaces pour le comportement global de l'assemblage. Les objectifs de cette étude sont de définir les lois de comportement mécaniques nécessaires à la modélisation de tels assemblages et de déterminer les raideurs de surfaces du contact bois-bois indépendamment de l'apport de la raideur des vis. Le moyen retenu est une modélisation par éléments finis avec le logiciel Cast3M en introduisant des éléments finis de type joint. Ainsi, les essais de cisaillement sont modélisés et la loi définie dans le modèle élément joint est modifiée afin que les résultats des simulations correspondent aux données des essais.

La première partie de ce rapport décrit le modèle utilisé, notamment le modèle des éléments finis de type joint. La deuxième partie présente les différents résultats obtenus grâce aux simulations, et ce, pour les différentes essences de bois et types d'essais.

## 2 Modélisation des essais de cisaillement

Le modèle retenu pour modéliser le comportement des assemblages rainurés en cisaillement est un modèle élastique orthotrope en 2 dimensions en contraintes planes. Le contact entre les éléments bois est représenté par des éléments finis de type joint, le modèle choisi parmi ceux disponibles dans le logiciel de calcul aux éléments finis Cast3M est le modèle JOINT\_SOFT. Cette partie présente le modèle développé sous Cast3M et détaille les données utilisées pour simuler les différents essais de cisaillement.

### 2.1 Maillage et placement des cibles

Deux types d'essais sont modélisés, des essais de cisaillement longitudinal ou essais à  $0^\circ$  (l'angle est défini par rapport au sens du fil), et des essais de cisaillement transversal ou essais à  $90^\circ$ . Pour chaque type d'essais les assemblages sont constitués de trois éléments bois maintenus à l'aide de 4 vis par surface de contact, voir Figure 2-1.

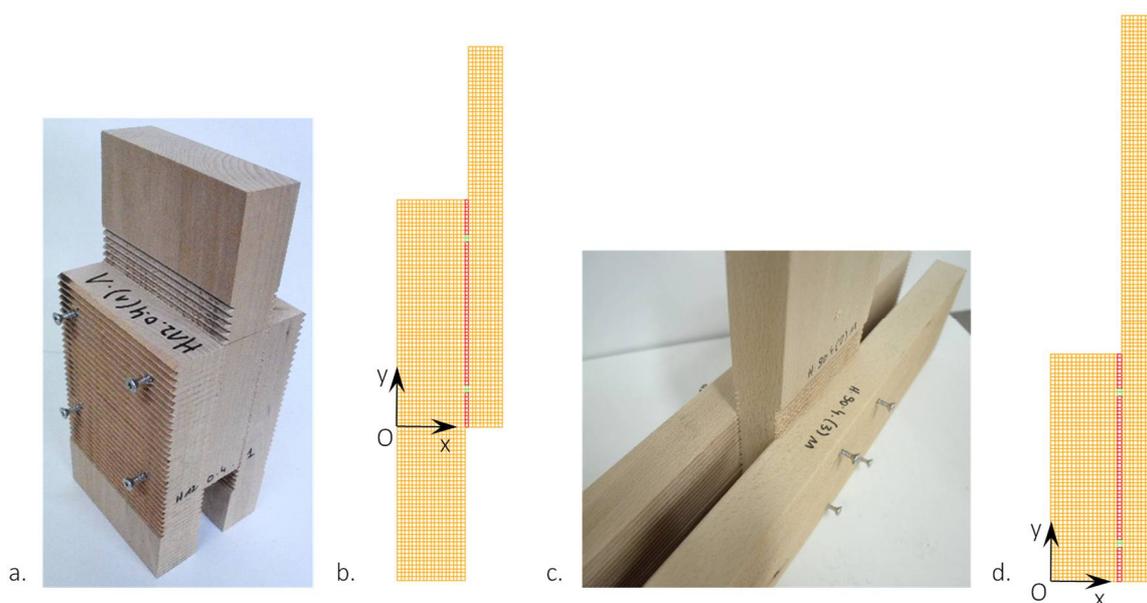


Figure 2-1 Photos d'éprouvettes d'essais de cisaillement et leur maillage sous Cast3M, a et b essais à  $0^\circ$ , c et d essais à  $90^\circ$

Les éprouvettes d'essais étant symétriques, seule une moitié de l'assemblage est maillée pour la modélisation, ainsi deux éléments bois sont créés. L'épaisseur réelle des éléments bois est de 37 mm et la hauteur des rainures est de 3,4 mm. Afin de modéliser au plus près les essais, le premier élément bois, M1, a une épaisseur de 35,25 mm et le deuxième élément bois, M2, a une épaisseur de 16,75 mm. Pour les essais à  $0^\circ$  la hauteur des éléments bois est de 200 mm, pour les essais à  $90^\circ$  la hauteur de l'élément M1 est de 120 mm et celle de l'élément M2 est de 300 mm. Pour les deux types d'essais, la surface de contact entre les deux éléments bois est de 120 x 120 mm. Les essais sont représentés en 2 dimensions dans le repère noté (O ; x, y), il est possible de définir la largeur des assemblages dans une troisième dimension notée z, cette largeur peut être ajoutée au modèle via l'objet MATE dans Cast3M par l'option 'DIM3', elle est de 120 mm dans le cas des éléments bois. Le maillage créé est régulier et sa densité, c'est-à-dire la distance entre 2 nœuds, est au minimum de 2 mm.

Sur la Figure 2-1 le maillage des éléments joints sont représentés en rouge et en vert. Afin de les visualiser plus facilement, le maillage est déplacé de 2 mm avec l'opérateur DEPL, cette opération n'influence pas le calcul et ne donne pas d'épaisseur au joint sur  $x$ . À la différence des éléments bois, il n'est pas possible de préciser la largeur de l'assemblage sur  $z$  lors de la définition du modèle joint via l'opérateur MATE. Ainsi, il est nécessaire de multiplier les seuils de contraintes et les raideurs définis dans la section décrivant le modèle JOINT\_SOFT par la largeur de l'assemblage dans la direction  $z$ . Il a été choisi de séparer le comportement des vis et le comportement des rainures à l'interface des assemblages. Ainsi, le maillage vert représente les vis de l'assemblage, leur diamètre nominal étant de 5 mm et leur diamètre d'âme étant de 3,2 mm, il a été choisi de représenter les vis avec un diamètre de 4 mm dans le modèle. Le maillage rouge représente les rainures.

Le dispositif de mesure des déplacements lors des essais est réalisé à l'aide d'une mesure optique par analyse d'images VDM<sup>1</sup>. Ce système, basé sur le suivi de déplacement de cibles, permet d'obtenir le déplacement relatif de deux objets (objet constitué d'une ou de plusieurs cibles) les uns par rapport aux autres. Le placement des cibles est différent selon le type d'essais, de plus, l'orientation de l'éprouvette est aussi différente. En effet, pour les essais à 0° la surface visible pour la caméra correspond à la tranche des éléments bois, or pour les essais à 90° cette surface correspond à la face des éléments bois. Ainsi, trois éléments bois sont visibles pour les essais à 0° et deux pour les essais à 90° comme le montre la Figure 2-2 (figure **a** pour les essais à 0° et figure **c** pour les essais à 90°).

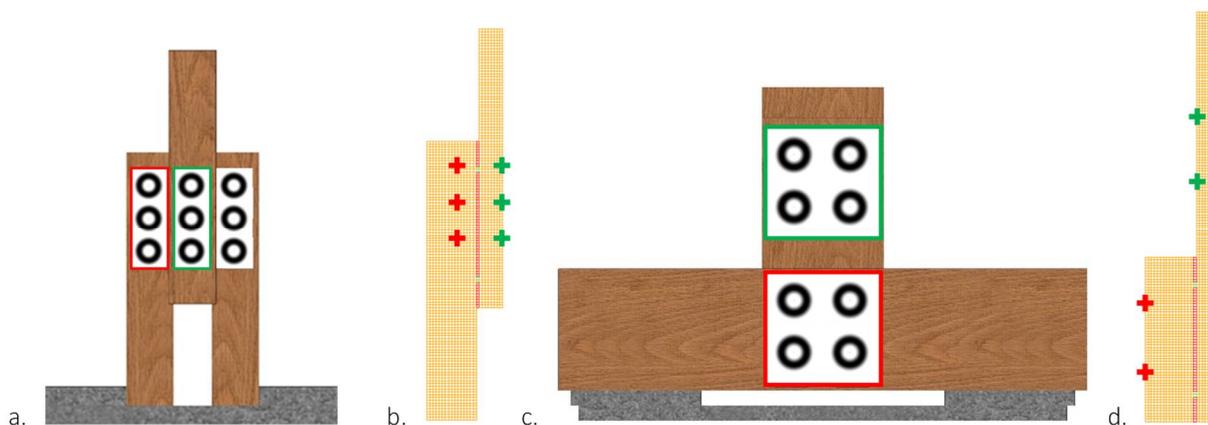


Figure 2-2 Disposition des cibles pour les essais de cisaillement longitudinal et transversal, objet A en rouge et objet B en vert

Les déplacements mesurés lors des essais correspondent aux déplacements de l'objet A par rapport à l'objet B. La Figure 2-2 (figure **b** pour les essais à 0° et figure **d** pour les essais à 90°) présente sur le maillage le placement des points utilisés lors du post-traitement des résultats de la modélisation des assemblages bois. Ces points correspondent aux centres des cibles, le déplacement de l'objet A par rapport à l'objet B est obtenu en réalisant la soustraction de la moyenne des déplacements de l'objet A par la moyenne des déplacements de l'objet B.

## 2.2 Propriétés des matériaux

Le bois est considéré comme un matériau homogène élastique orthotrope à l'échelle macroscopique. Néanmoins, le comportement dans les directions tangentielle et radiale ayant de fortes similitudes mécaniques, il a été choisi de considérer le bois comme un matériau isotrope transverse pour ce modèle. Ainsi, le module d'élasticité dans la direction radiale est pris comme égal à celui dans la direction tangentielle.

Afin de modéliser le bois comme un matériau élastique homogène, il est nécessaire de définir des coefficients de Poisson. La littérature donne une grande variation de valeurs pour ces coefficients pour les essences considérées dans cette étude. Ainsi, au vu de cette grande diversité et de la faible influence de la valeur de ces coefficients sur les résultats des

<sup>1</sup> Ce système de mesure a été développé par la société VIDEOMETRIC spécialiste de la numérisation 3D, de la mesure sans contact à très haute précision, <http://videometric.com/>

simulations, il a été décidé de modéliser les essais de cisaillement des assemblages rainurés en prenant les coefficients de Poisson comme nuls.

Les propriétés des matériaux nécessaires à la modélisation des assemblages sont données dans le Tableau 2-1. Les données pour le hêtre et le chêne sont issues de [1]. Il existe peu de données bibliographique pour le bouleau, ainsi les données choisies ont été déterminées à partir des travaux de [2] et [3]. Le module de cisaillement  $G_{TL}$  est calculé en fonction du module d'élasticité longitudinale d'après les travaux de thèse de Benistand [1]

Tableau 2-1 Propriétés mécaniques pour le hêtre, le chêne et le bouleau

	Hêtre	Chêne	Bouleau
$E_L$	14 524	13 595	14 857
$E_T$	886	760	674
$E_R$	886	760	674
$G_{LT}$	908	850	929
$G_{TR}$	416	593	253
$f_{c,90}$	10,08	8,34	7,4

## 2.3 Éléments joints

Afin de modéliser le comportement mécanique des assemblages rainurés, il a été choisi d'utiliser un modèle de joint plastique de type JOINT\_SOFT disponible dans Cast3M. Ce type de modèle joint utilise un critère de type Mohr-Coulomb et peut-être adoucissant en traction et en cisaillement.

Ce modèle est défini par des variables de type EVOLUTION : SJTB, SJCB et SJSB permettant de définir les lois de comportement mécanique de traction, compression et cisaillement. Des paramètres supplémentaires sont aussi à définir : le paramètre BETA permettant le contrôle de la décharge de cisaillement, la paramètre CPLG permettant le couplage des relations contraintes déformations et le paramètre PNOR définissant la position de la pointe (hypothétique) du cône de la surface de charge.

Cette section décrit ces paramètres et donne leurs valeurs pour les éléments joints représentant les vis et pour ceux représentant les rainures, ces deux modèles sont notés JOINT\_VIS et JOINT\_BOIS respectivement.

### 2.3.1 Loi de cisaillement

Un objet de type EVOLUTION (soit deux listes de réels), noté SJSB, est nécessaire dans le modèle JOINT\_SOFT afin de définir le comportement en cisaillement des éléments de type joint. Cet objet donne la contrainte de cisaillement en fonction du glissement.

#### Définition de la loi de cisaillement pour le modèle JOINT\_VIS

Dans le cas du modèle JOINT\_VIS, la loi de comportement en cisaillement est définie à partir des données des essais d'assemblages sans rainures aux interfaces, ces essais permettent de caractériser l'apport des vis sur la résistance et la raideur de l'assemblage.

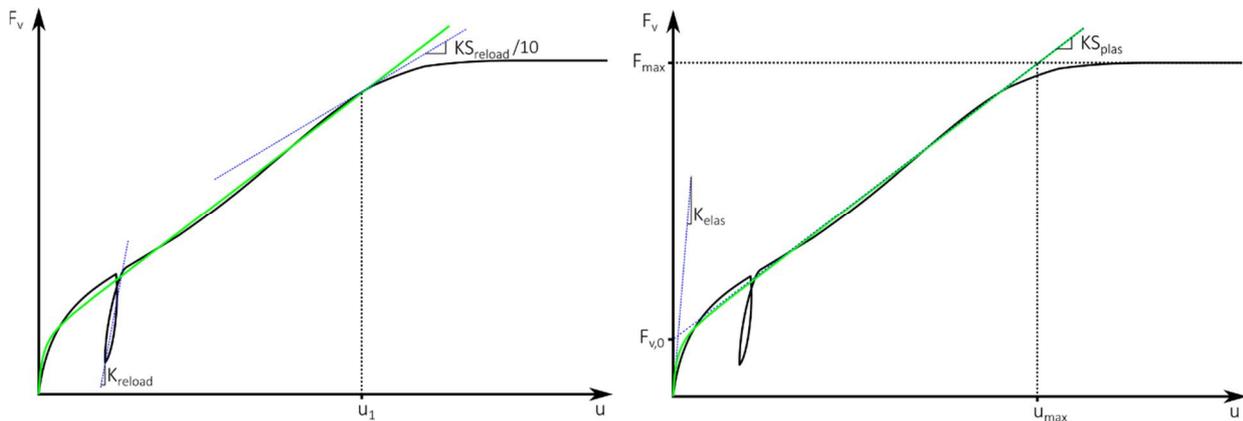


Figure 2-3 Illustration des paramètres décrivant la courbe d'essai de cisaillement d'assemblage sans rainures à l'interface de contact avec  $F_v$  l'effort de cisaillement et  $u$  le déplacement mesuré.

La Figure 2-3 représente en noir l'allure d'une courbe d'essai d'assemblage sans rainures et en vert la fonction Richard-Abbott (voir équation (3-2)) dont les paramètres sont calculés afin de correspondre au mieux à la courbe d'essai sur un intervalle donné. En effet, l'allure de cette dernière ne correspond à la fonction mathématique Richard-Abbott que sur une partie des données d'essai. Afin de déterminer cet intervalle, un paramètre  $u_1$  est défini comme étant l'ordonnée du point où une droite de pente  $K_{reload}/10$  est tangente à la courbe expérimentale. La pente  $K_{reload}$  est définie comme étant la pente de la courbe expérimentale lors du rechargement comme il est montré sur les courbes situées sur la partie gauche de la Figure 2-3.

La fonction Richard-Abbott s'exprime ainsi :

$$F_v = \frac{(K_{elas} - K_{plas}) \times u}{\left(1 + \left(\frac{(K_{elas} - K_{plas}) \times u}{F_{v,0}}\right)^D\right)^{1/D}} + K_{plas} \times u \quad (2-1)$$

Avec

- $F_v$  l'effort de cisaillement (kN)
- $K_{elas}$  pente initiale de la courbe ou raideur tangente initiale de l'évolution force glissement (kN/mm)
- $K_{plas}$  pente secondaire de l'évolution (kN/mm)
- $F_{v,0}$  l'effort de cisaillement de la droite de pente  $K_{plas}$  pour un glissement nul (kN)
- $D$  facteur contrôlant l'allure de la courbe dans la zone de transition élastique-plastique

La loi moyenne représentant le comportement en cisaillement des assemblages est obtenue en déterminant les paramètres pour la courbe moyenne des essais. Les valeurs obtenues pour les essais à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  des assemblages sans rainures pour chaque essence de bois sont données dans le Tableau 2-2. De plus, ce tableau donne la valeur  $u_{max}$  qui correspond au déplacement lorsque la fonction Richard-Abbott est égal à l'effort maximum ou effort seuil  $F_{max}$ .

Tableau 2-2 Valeurs des paramètres permettant de définir la loi de cisaillement du modèle JOINT\_VIS

	Essai de cisaillement longitudinal			Essai de cisaillement transversal		
	Hêtre	Chêne	Bouleau	Hêtre	Chêne	Bouleau
$K_{elas}$ (kN/mm)	132,34	31,61	61,33	18,70	86,97	26,69
$K_{plas}$ (kN/mm)	5,56	4,34	2,46	4,90	4,56	3,35
$F_{v,0}$ (kN)	9,30	8,51	13,48	6,57	7,95	8,15
$D$	1,04	2,73	0,68	3,75	0,66	1,53
$F_{max}$ (kN)	48,93	42,35	32,63	49,67	44,53	31,19
$u_{max}$ (mm)	7,15	7,86	8,42	8,80	8,15	6,90

Il est donc possible à présent de définir l'effort de cisaillement en fonction du déplacement en utilisant la fonction Richard-Abbott pour l'intervalle  $[0 ; u_{max}]$ , à partir du déplacement  $u_{max}$  la fonction atteint un seuil de valeur  $F_{max}$ .

Afin de donner la contrainte en fonction du déplacement pour le modèle JOINT\_SOFT, il est nécessaire de calculer cette contrainte à partir de l'effort de cisaillement obtenu précédemment. Le calcul est détaillé dans le cas de la contrainte maximale par l'équation (3-2).

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}/n_{cs}/n_{vis\_essai} \times n_{vis\_MEF}}{S} = \frac{F_{max}/2/4 \times 2}{4 \times 120} \quad (2-2)$$

Avec

$\tau_{max}$	contrainte de cisaillement maximale (MPa)
$F_{max}$	effort de cisaillement maximum (N)
$n_{cs}$	nombre de plans de cisaillement des essais
$n_{vis\_essai}$	nombre de vis par plan de cisaillement
$n_{vis\_MEF}$	nombre de vis dans la modélisation
$S$	surface de cisaillement (mm <sup>2</sup> )

#### Définition de la loi de cisaillement pour le modèle JOINT\_BOIS

Dans le cas du modèle JOINT\_BOIS, la loi de comportement en cisaillement est tout d'abord définie à partir des données des essais d'assemblages rainurés. Ensuite, cette loi est modifiée afin que les résultats des simulations numériques soient semblables aux données des essais. À cette fin, la raideur de cisaillement du modèle JOINT\_BOIS est multiplié par un facteur noté VAR\_KS.

La raideur de cisaillement de modèle JOINT\_BOIS est calculée selon l'équation (3-2) en fonction de la raideur obtenue lors des essais de cisaillement des assemblages rainurés. La contrainte de cisaillement maximale est calculée de manière similaire à partir de l'effort à rupture maximum. Le Tableau 2-3 présente les raideurs et les efforts à rupture permettant de définir la raideur et la contrainte de cisaillement du modèle JOINT\_BOIS pour les deux configurations d'essais pour chaque essence de bois.

$$KS_{JOINT\_BOIS} = \frac{KS_{ass}/n_{cs}}{S} = \frac{KS_{ass}/2}{120 \times 120} \quad (2-3)$$

Avec

$KS_{JOINT\_BOIS}$	raideur de cisaillement du modèle JOINT_BOIS ((N/mm) / mm <sup>2</sup> )
$KS_{ass}$	raideur de cisaillement des assemblages rainurés (N/mm)
$n_{cs}$	nombre de plans de cisaillement des essais
$S$	surface de cisaillement (mm <sup>2</sup> )

Tableau 2-3 Valeurs des paramètres permettant de définir la loi de cisaillement du modèle JOINT\_BOIS

	Essai de cisaillement longitudinal			Essai de cisaillement transversal		
	Hêtre	Chêne	Bouleau	Hêtre	Chêne	Bouleau
$K_{ass}$ (kN/mm)	528	642	346	128,8	122,5	106,5
$F_{v,mean}$ (kN)	188,4	156,6	109,3	112,7	97,7	69,1

La Figure 2-4 présente l'allure de la loi de cisaillement du modèle JOINT\_BOIS, soit la contrainte de cisaillement  $\tau$  (MPa) en fonction du déplacement  $u$  (mm),  $u_{max}$  est défini précédemment dans la loi de cisaillement pour le modèle JOINT\_VIS (voir Tableau 2-2).

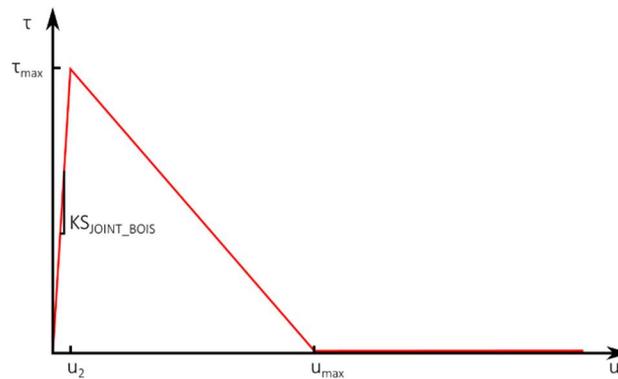


Figure 2-4 Allure de la loi de cisaillement du modèle JOINT\_BOIS

### 2.3.2 Loi de traction

Un objet de type EVOLUTION, noté SJTB, est nécessaire dans le modèle JOINT\_SOFT afin de définir le comportement en compression des éléments de type joint. Cet objet donne la relation contrainte normale – ouverture du joint en traction.

#### Définition de la loi de traction pour le modèle JOINT\_VIS

La loi de traction pour le modèle JOINT\_VIS est définie à partir des essais d'arrachement effectués par le LERMAB dans le cadre du projet hardwood\_joint, les résultats sont disponibles dans le rapport hardwood\_joint WP3-T3.4-RT\_Arrachement-2021. Ces essais sont effectués sur des éprouvettes où un couple de vis est vissé sur chaque face, l'arrachement des vis des deux faces se fait simultanément. Ainsi les comportements en arrachement de deux éléments bois est similaire à celui du comportement d'arrachement des essais. Le Tableau 2-4 donne les résultats des essais d'arrachement utiles pour la définition de la loi de traction du modèle JOINT\_VIS. À partir de la raideur expérimentale,  $K_{ser}$ , la raideur d'une vis est calculée selon l'équation (2-4) puis la raideur du modèle JOINT\_VIS est calculée selon l'équation (2-5). Le même calcul est appliqué sur l'effort de traction maximum pour obtenir la contrainte maximum de traction du modèle JOINT\_VIS.

Tableau 2-4 Valeurs des paramètres permettant de définir la loi de traction du modèle JOINT\_VIS

	Hêtre	Chêne	Bouleau
$F_{max}$ (kN)	13,51	14,88	9,00
$K_{ser}$ (N/mm)	7913	8829	7171

$$KN_{t,vis} = \frac{K_{ser}}{2} \quad (2-4)$$

Avec

$KN_{t,vis}$  raideur d'une vis (N/mm)

$K_{ser}$  raideur moyenne des assemblages sans rainures (N/mm)

$$KN_{t,JOINT\_VIS} = \frac{KN_{t,vis}}{S} = \frac{KN_{t,vis}}{4 \times 120} \quad (2-5)$$

Avec

$KN_{t,JOINT\_VIS}$  raideur de traction du modèle JOINT\_VIS (N/mm)

$S$  surface de cisaillement (mm<sup>2</sup>)

Définition de la loi de traction pour le modèle JOINT\_BOIS

La raideur de traction pour le modèle JOINT\_BOIS est prise comme égale à celle de compression et la contrainte maximale est prise comme quasi-nulle.

### 2.3.3 Loi de compression

Un objet de type EVOLUTION, noté SJCB, est nécessaire dans le modèle JOINT\_SOFT afin de définir le comportement en compression des éléments de type joint. Cet objet donne la relation contrainte normale – fermeture du joint en traction.

Définition de la loi de compression pour le modèle JOINT\_VIS

La loi de compression pour le modèle JOINT\_VIS est prise comme identique à la loi de traction du modèle JOINT\_VIS.

Définition de la loi de compression pour le modèle JOINT\_BOIS

La loi de compression pour le modèle JOINT\_BOIS est estimée à partir des propriétés mécaniques du bois. Le comportement de l'assemblage en compression est assimilé au comportement du bois massif pour une hauteur de joint de 3,5 mm (hauteur des rainures). La contrainte maximale est prise égale à la résistance en compression transversale  $f_{c,90}$  et la résistance en compression notée  $KN_c$  est calculée pour un joint de surface  $S$  de 1 x 1 mm et d'une hauteur  $l$  de 3,5 mm selon l'équation (3-2).

$$KN_c = \frac{E_T \times S}{l} = \frac{E_T \times 1 \times 1}{3,5} \quad (2-6)$$

### 2.3.4 Autres paramètres

Des paramètres supplémentaires sont nécessaires à la définition du modèle JOINT\_SOFT.

- Le paramètre BETA permet le contrôle de la décharge de cisaillement, il est pris comme étant égal à 1.
- Le paramètre CPLG permet le couplage entre les raideurs de compression et traction, il est pris comme égal à 0.
- Le paramètre PNOR définit la position de la pointe (hypothétique) du cône, il est défini comme étant la valeur négative du maximum de la contrainte de traction comme défini dans le modèle JOINT\_SOFT.

## 2.4 Conditions limites et chargement

Les essais de cisaillement longitudinal et transversal sont conduits de manière identique. Les assemblages sont constitués de 3 éléments bois, un effort vertical est soumis sur le montant central, cet effort est transmis aux rainures. Cette transmission d'effort induit un cisaillement sur l'ensemble des montants. Les deux éléments bois latéraux sont en appui sur la machine d'essais. La Figure 2-6 et la Figure 2-6 présentent le principe des essais en cisaillement longitudinal et transversal (**a** vue face caméra et **b** vue latérale).

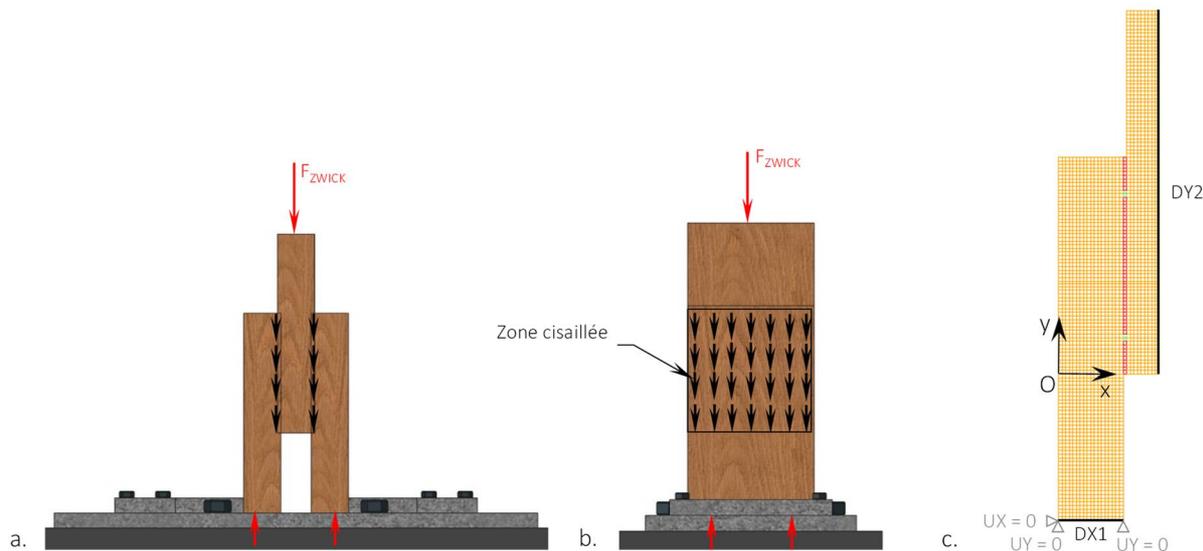


Figure 2-5 Principe des essais en cisaillement longitudinal : a et b configuration d'essais et c conditions aux limites imposées dans le modèle

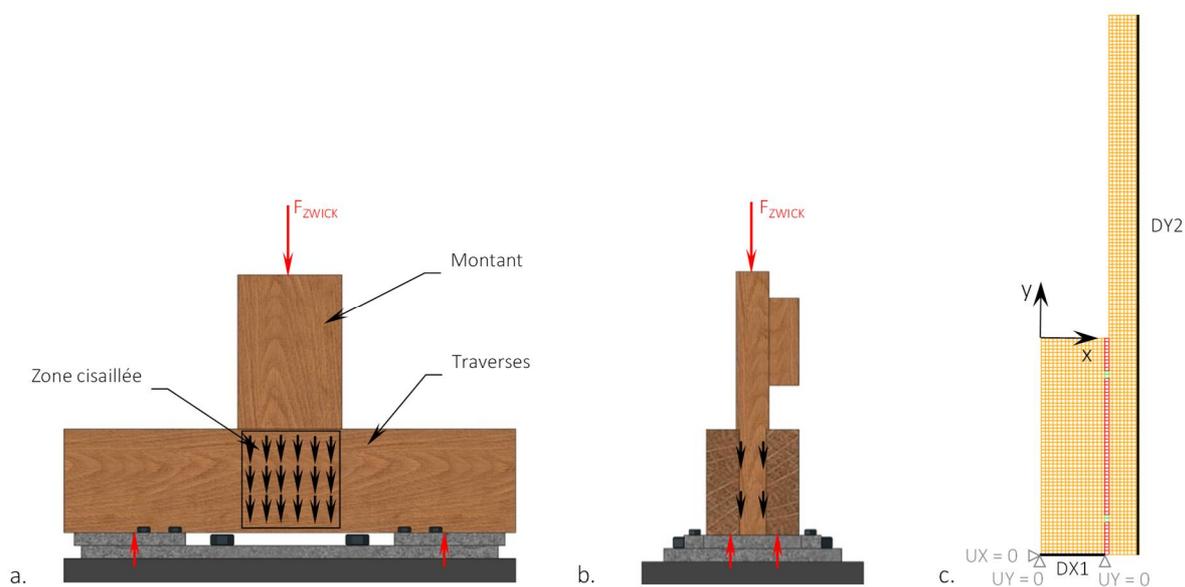


Figure 2-6 Principe des essais en cisaillement transversal : a et b configuration d'essais et c conditions aux limites imposées dans le modèle

La Figure 2-6 et la Figure 2-6 présentent les conditions limites imposées dans le modèle pour les deux configurations d'essais (c). Les conditions limites dans Cast3M sont formulées à l'aide de l'opérateur BLOQ dans le cas de blocage d'un ou de plusieurs degrés de liberté d'un objet géométrique. Ainsi, pour les deux configurations d'essais les déplacements UX et UY de la ligne DX1 sont bloqués. Un autre opérateur est aussi utilisé pour définir les conditions limites, SYMT, il permet de définir la relation de symétrie du maillage par rapport à la droite DY2. Le chargement est appliqué sur la droite DY2, il s'agit d'un déplacement dont la valeur est négative et exprimée en millimètres.

# 3 Résultats

## 3.1 Méthode de calcul des raideurs de surface

La définition des raideurs de surface cisailée est donnée en détail dans le rapport `hardwood_joint WP3-T3.4-RT_Assemblages-2022`. Les raideurs de surface, notées  $k_0$  et  $k_{90}$ , y sont définies en fonction des raideurs mesurées lors des essais de cisaillement, notées  $K_{ASS,0}$  et  $K_{ASS,90}$ . Ces raideurs de surface sont déterminées de manière globale sur l'assemblage, elles prennent en compte le comportement mécanique des éléments bois. Les raideurs de surface obtenues dans l'étude présentée ici permettent quant à elles de ne prendre en compte que le comportement mécanique des rainures.

La raideur obtenue lors des simulations numériques est la raideur d'interface, notée ici  $KS_{JOINT\_BOIS,\alpha}$  (avec  $\alpha$  égal à 0 ou 90), car seule une moitié l'assemblage est modélisée. Ainsi, les raideurs de surface cisailée sont données en fonction de la raideur d'interface.

Dans le cas des essais de cisaillement longitudinal (essais à 0°) :

$$k_{0,MEF} = 2 \times KS_{JOINT\_BOIS,0} \quad (3-1)$$

Avec

$k_{0,MEF}$  raideur de surface cisailée longitudinalement déterminée par MEF (kN/mm)  
 $KS_{JOINT\_BOIS,0}$  raideur d'interface obtenue par modélisation d'essais de cisaillement longitudinal (kN/mm)

Dans le cas des essais de cisaillement transversal (essais à 90°) :

$$k_{90,MEF} = \frac{1}{\frac{1}{KS_{JOINT\_BOIS,90}} - \frac{1}{k_{0,MEF}}} \quad (3-2)$$

Avec

$k_{90,MEF}$  raideur de surface cisailée transversalement déterminée par MEF (kN/mm)  
 $KS_{JOINT\_BOIS,90}$  raideur d'interface obtenue par modélisation d'essais de cisaillement transversal (kN/mm)

Les raideurs  $KS_{JOINT\_BOIS,0}$  et  $KS_{JOINT\_BOIS,90}$  dépendent du facteur `VAR_KS`. Ce dernier permet d'ajuster la loi de cisaillement du modèle joint des rainures afin que la raideur de cisaillement de la simulation Cast3M soit égale avec celle des essais entre 10 % et 40 % de l'effort de cisaillement maximum.

$$KS_{JOINT\_BOIS,\alpha} = VAR\_KS \times K_{ASS,\alpha} \quad (3-3)$$

La section suivante présente les résultats obtenus grâce aux simulations numériques. Afin de comparer la réponse du modèle avec les courbes d'essais, l'effort obtenu avec le modèle est multiplié par 2.

### 3.2 Hêtre résultats

Les valeurs des raideurs d'assemblage des essais de cisaillement, des raideurs d'interface d'essais et des raideurs d'interface déterminées par la méthode des éléments finis sont données dans le tableau de la Figure 3-1 pour les essais de cisaillement longitudinal et dans le tableau de la Figure 3-2 pour les essais de cisaillement transversal.

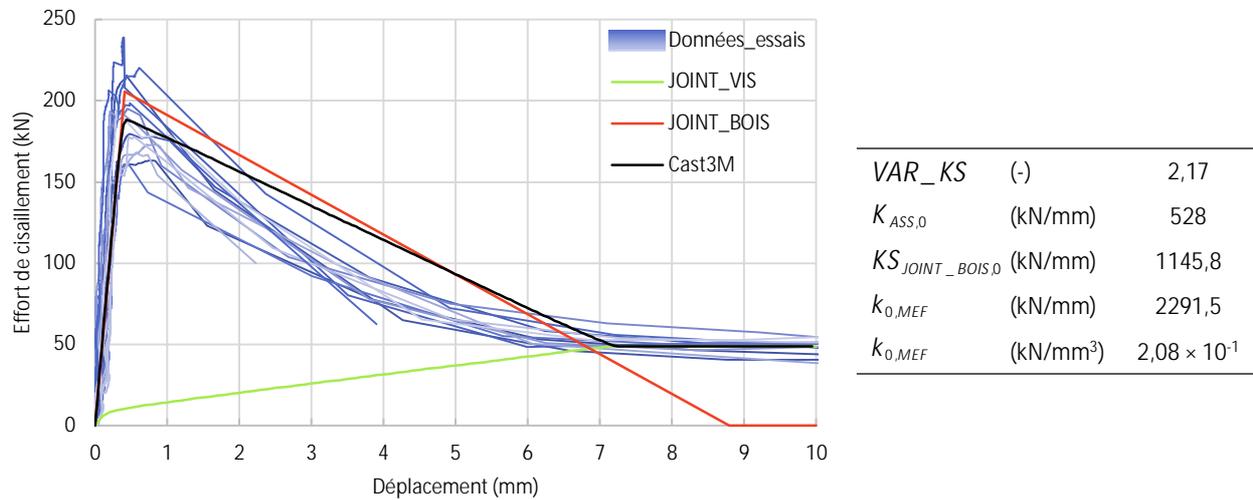


Figure 3-1 Comparaison entre les courbes expérimentales et les résultats de la simulation du modèle Cast3M pour les essais de cisaillement longitudinal d'assemblages rainurés en hêtre

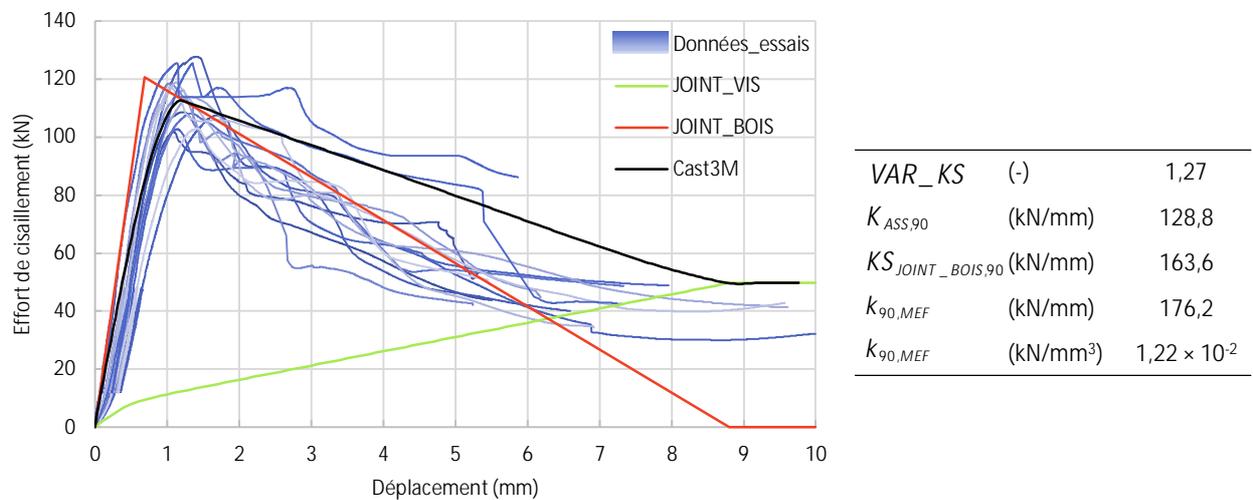
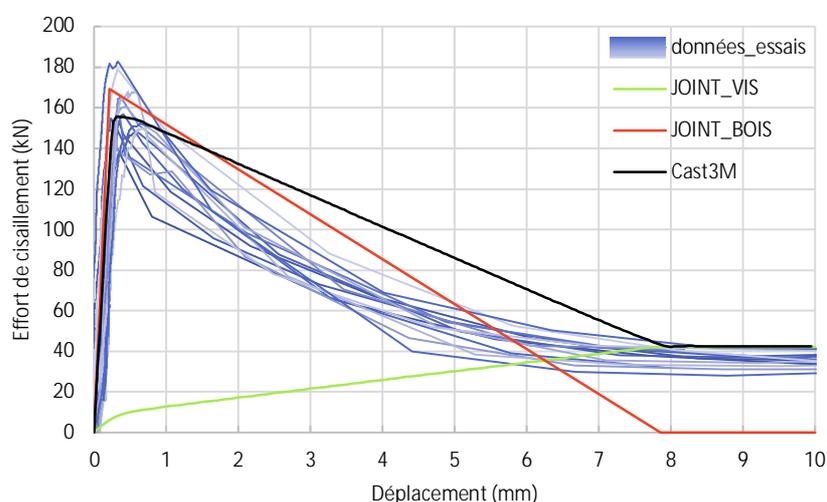


Figure 3-2 Comparaison entre les courbes expérimentales et les résultats de la simulation du modèle Cast3M pour les essais de cisaillement transversal d'assemblages rainurés en hêtre

La Figure 3-1 et la Figure 3-2 permettent de comparer les résultats numériques avec les données des essais de cisaillement transversal et longitudinal respectivement. Pour chaque figure, la courbe noire représente le comportement en cisaillement des assemblages calculé avec Cast3M, elle peut être comparée directement avec les données des essais représentées en bleu. La détermination de la loi de cisaillement des rainures (représentée en rouge) pour le modèle joint ne prend pas en compte l'allure de la courbe de cisaillement après l'effort maximal. Une amélioration du modèle pourrait prendre en compte cette allure mais elle n'était pas nécessaire pour cette étude qui portait sur la détermination des raideurs de surface cisailée.

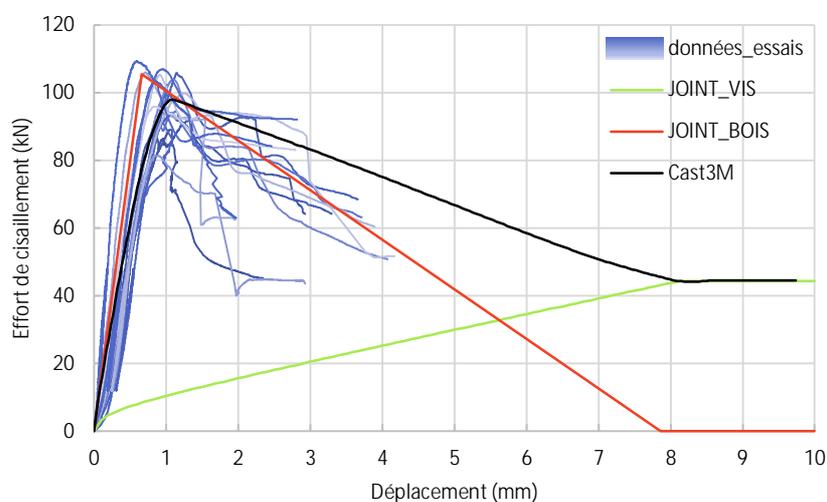
### 3.3 Chêne résultats

Les valeurs des raideurs d'assemblage des essais de cisaillement, des raideurs d'interface d'essais et des raideurs d'interface déterminées par la méthode des éléments finis sont données dans le tableau de la Figure 3-3 pour les essais de cisaillement longitudinal et dans le tableau de la Figure 3-4 pour les essais de cisaillement transversal.



$VAR\_KS$	(-)	3,76
$K_{ASS,0}$	(kN/mm)	642,0
$KS_{JOINT\_BOIS,0}$	(kN/mm)	2413,9
$k_{0,MEF}$	(kN/mm)	4827,8
$k_{0,MEF}$	(kN/mm <sup>3</sup> )	$3,34 \times 10^{-1}$

Figure 3-3 Comparaison entre les courbes expérimentales et les résultats de la simulation du modèle Cast3M pour les essais de cisaillement longitudinal d'assemblages rainurés en chêne



$VAR\_KS$	(-)	1,20
$K_{ASS,90}$	(kN/mm)	122,5
$KS_{JOINT\_BOIS,90}$	(kN/mm)	147,0
$k_{90,MEF}$	(kN/mm)	151,6
$k_{90,MEF}$	(kN/mm <sup>3</sup> )	$1,05 \times 10^{-2}$

Figure 3-4 Comparaison entre les courbes expérimentales et les résultats de la simulation du modèle Cast3M pour les essais de cisaillement transversal d'assemblages rainurés en chêne

La Figure 3-3 et la Figure 3-4 permettent de comparer les résultats numériques avec les données des essais de cisaillement transversal et longitudinal respectivement.

### 3.4 Bouleau résultats

Les valeurs des raideurs d'assemblage des essais de cisaillement, des raideurs d'interface d'essais et des raideurs d'interface déterminées par la méthode des éléments finis sont données dans le tableau de la Figure 3-5 pour les essais de cisaillement longitudinal et dans le tableau de la Figure 3-6 pour les essais de cisaillement transversal.

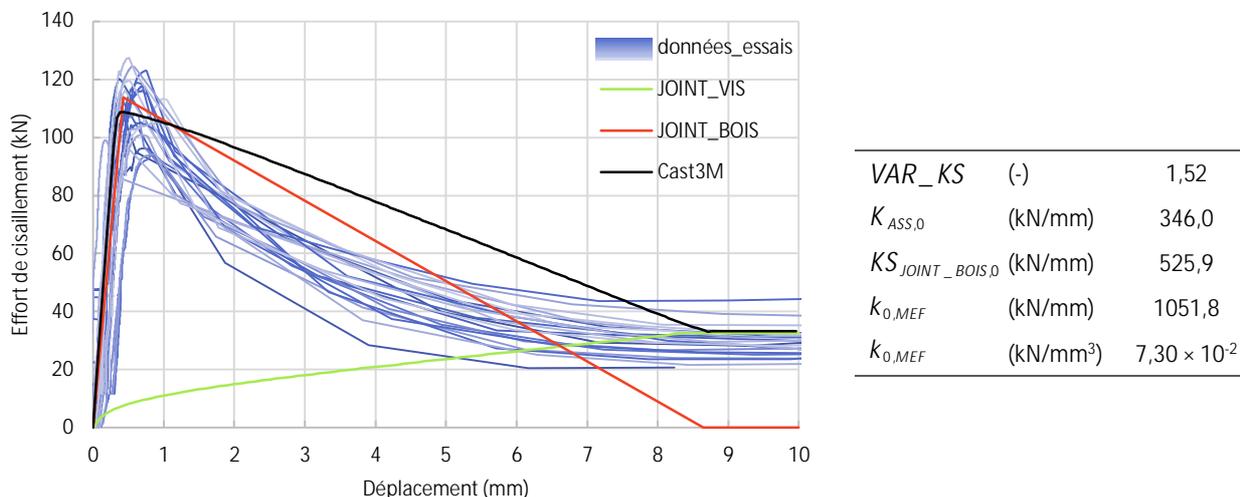


Figure 3-5 Comparaison entre les courbes expérimentales et les résultats de la simulation du modèle Cast3M pour les essais de cisaillement longitudinal d'assemblages rainurés en bouleau

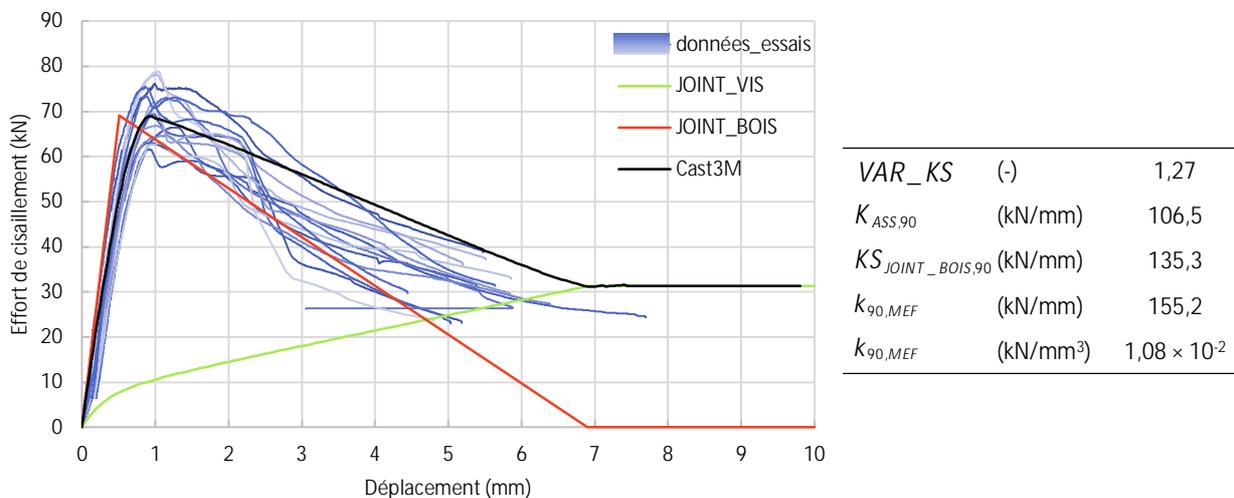


Figure 3-6 Comparaison entre les courbes expérimentales et les résultats de la simulation du modèle Cast3M pour les essais de cisaillement transversal d'assemblages rainurés en bouleau

La Figure 3-5 et Figure 3-6 permettent de comparer les résultats numériques avec les données des essais de cisaillement transversal et longitudinal respectivement.

## 4 Conclusion

Le tableau Tableau 4-1 récapitule les données d'essais, soit les raideurs d'interface des assemblages,  $K_{interface,\alpha}$ , pour les essais à 0° et les essais à 90°, ainsi que les raideurs de surface cisailée,  $k_\alpha$ , calculées à partir de ces essais dont les détails sont disponibles dans le hardwood\_joint WP3-T3.4-RT\_Assemblages-2022. Les résultats dus aux simulations numériques sont aussi donnés, soit les raideurs d'interface de surface cisailée par MEF qui correspondent aux raideurs de cisaillement du modèle JOINT\_BOIS,  $KS_{JOINT\_BOIS,\alpha}$ , et les raideurs de surface cisailée par MEF,  $k_{\alpha,MEF}$ .

Tableau 4-1 Raideurs d'interface et de surface cisailée déterminées de manière globale ou 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
$K_{interface,\alpha}$ (kN/mm)	264	64	321	61	173	53
$k_\alpha$ (kN/mm)	528	70	642	64	346	56
$KS_{JOINT\_BOIS,\alpha}$ (kN/mm)	1146	164	2414	147	526	135
$k_{\alpha,MEF}$ (kN/mm)	2292	176	4828	152	1052	155

Le modèle 2D développé avec Cast3M a permis d'identifier les raideurs de surfaces cisillées 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 l'optimisation de ces assemblages, il sera nécessaire de prendre en compte le comportement non linéaire des vis. Pour cela, une perspective de ce travail est 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 est responsable du Work Package 1 qui a pour objectif de développer des modèles numériques pour les charges latérales et axiales combinées qui prennent explicitement en compte l'effet appelé « effet de corde ».

## 5 Bibliographie

- [1] T. Benistand, Caractérisation mécanique des bois feuillus Français en vue de leur meilleure intégration aux Eurocodes 5, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2019.
- [2] D.W. Green, J.E. Winandy, D.E. Kretschmann, Mechanical properties of wood, Wood Handbook : Wood as an Engineering Material. Madison, WI : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General Technical Report FPL ; GTR-113: Pages 4.1-4.45. 113 (1999).
- [3] S. Collins, G. Fink, Mechanical properties of birch timber under compression loading parallel to grain, in: 2018.