

# Approche tribologique du soudage du bois par frottement

G. HAMANT<sup>a</sup>, P-H. CORNUAULT<sup>a</sup>, V. PLACET<sup>a</sup>, P. BINDER<sup>b</sup>, X. ROIZARD<sup>a</sup>

a. Institut Femto-ST, Département Méc'appli, 26 rue de l'épitaphe, 25 030 Besançon Cedex

b. GIP ITT Tecbois, rue de Strasbourg, 39 330 Mouchard

## Résumé :

*Depuis peu, la mise en évidence de la possible réalisation d'assemblages en bois soudés par frottement sans aucun apport de matière extérieure présente d'intéressantes perspectives tant d'un point de vue économique qu'environnemental. Dans ce cadre, notre étude vise à étudier l'influence des paramètres décrivant le procédé sur la qualité de l'assemblage via un couplage entre des essais instrumentés sur tribomètre et une caractérisation du cordon de soudure par microscopie électronique, tomographie aux rayons X et essais mécaniques.*

## Abstract :

*The opportunity to join wood parts together by friction welding without supplementary material introduction has been recently highlighted and suggests very interesting economical and environmental perspectives within sight of glue quantity reduction for wood joining. In this context, the present paper depicts a tribological approach of wood welding performed by a coupling of instrumented friction tests with welded interface characterization using scanning electron microscopy, X-ray tomography and mechanical tests.*

**Mots clefs :** hêtre, soudage, frottement, tribologie, tomographie RX

## 1 Introduction

Depuis quelques années, l'utilisation du matériau bois a pris un nouvel essor, notamment dans le domaine de la construction, en vertu de son faible impact environnemental. Néanmoins, l'assemblage de pièces en bois nécessite encore l'utilisation massive de colles qui présentent un coût environnemental et économique non négligeable. Au cours de la dernière décennie, la découverte de la possibilité d'assembler des pièces en bois par frottement sans aucun apport de matière extérieure a permis d'envisager la réalisation d'assemblages à haute qualité environnementale ainsi qu'un gain économique lors de leur production (élimination des colles et du temps de séchage). Découvert en 2005, le soudage du bois est effectué par translation ou rotation d'une pièce de bois massif sur une autre sous une pression appliquée perpendiculairement au plan de l'interface. En raison de l'augmentation de température au niveau du contact due aux efforts de frottement, le matériau se transforme localement en un troisième corps visqueux issu de la dégradation et des réarrangements moléculaires de certains polymères constitutifs tels que la lignine et les hémicelluloses qui, après frottement, se solidifient pour former un cordon de soudure. Bien que les processus chimiques de dégradation de l'interface conduisant au soudage aient été déjà étudiés [1], aucune approche tribologique du procédé, à notre connaissance, n'a été menée. De plus, la caractérisation microstructurale du cordon de soudure est généralement destructive et bidimensionnelle. L'objectif de cet article est d'offrir une étude tribologique du procédé de soudage dans le cas du hêtre, via un couplage entre des essais sur tribomètre instrumenté et une caractérisation du cordon de soudure. Cette dernière s'appuie notamment sur la tomographie aux rayons X qui permet une étude tridimensionnelle et non destructive du cordon.

## 2 Matériau et dispositif expérimental

Dans cet article, les investigations sont menées sur des échantillons issus de bois de hêtre à 12% d'humidité. Les échantillons ont été prélevés dans un billon, selon une même génératrice, et usinés à l'aide d'outils conventionnels. Rappelons que le caractère orthotrope du matériau lui confère des propriétés différentes selon les directions longitudinale, radiale et tangentielle. Dans le cadre de cette étude, il a été décidé de solliciter les surfaces en frottement sur une coupe transversale du matériau. Le tableau 1 donne les propriétés

générales du hêtre à 12% d'humidité selon une direction perpendiculaire à la surface frottée (direction longitudinale).

Propriété	Symbole	Valeur(s)	Unité
Masse volumique	$\rho$	670 à 700	$kg.m^{-3}$
Module d'Young	E	14 à 15	GPa
Contrainte de rupture en traction	$\sigma_m$	100 à 130	MPa
Limite d'élasticité	$\sigma_e$	50 à 60	MPa
Conductivité Thermique	$\lambda$	0,35	$W.m^{-1}.K^{-1}$
Température de Transition Vitreuse	$T_g$	80 à 100	°C

TAB. 1 – Quelques propriétés rhéologiques et thermiques du hêtre à 12% d'humidité dans la direction longitudinale d'après [2,3].

La tomographie aux rayons X a été utilisée afin de caractériser la morphologie microstructurale du matériau en raison de son caractère poreux et de son faible coefficient d'absorption des RX [4]. La figure 1a, qui donne un aperçu de la microstructure du matériau étudié selon une coupe transversale, permet de mettre en évidence l'anisotropie du matériau par l'alternance de cernes de croissance annuelles, la présence des rayons ligneux et la répartition des vaisseaux. Bien que le hêtre soit une essence à pores diffus, on note cependant des variations notables du diamètre des vaisseaux entre le bois d'été et le bois de printemps.

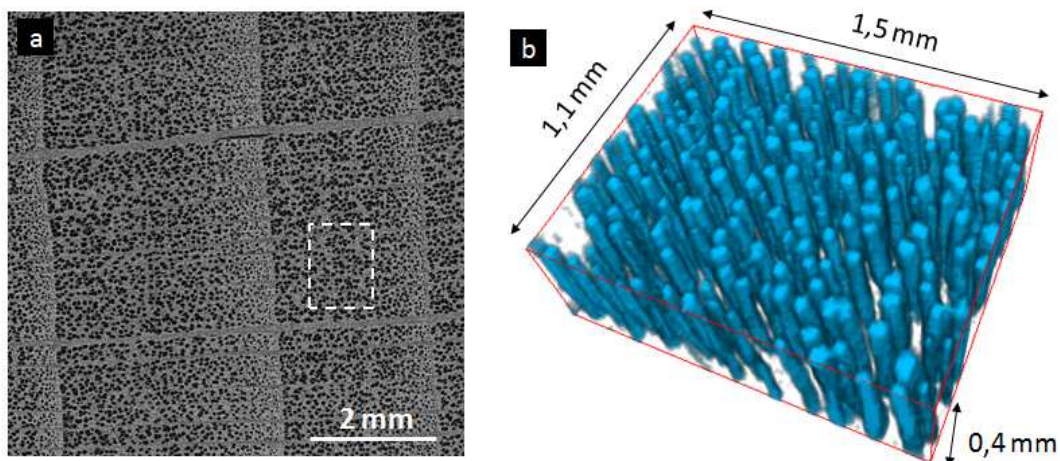


FIG. 1 – Projection obtenue par tomographie aux rayons X du hêtre étudié dans un plan parallèle à une coupe transversale (a), et observation 3D de la morphologie des porosités (b) issue du bloc encadré dans (a).

Une reconstruction 3D des porosités (vide cellulaire des fibres et vaisseaux) issue d'une série de projections parallèles a été réalisée après seuillage des niveaux de gris puis binarisation à l'aide du logiciel libre ImageJ (figure 1b). Elle permet de mettre en évidence la forte densité de pores linéiques et perpendiculaires à la coupe transversale.

Des essais de frottement alternatifs linéaires ont été réalisés en configuration pion/plan à partir de tourillons et blocs prélevés dans la même grume et dont les dimensions sont précisées dans la figure 2b. Ces essais ont été conduits à l'aide d'un tribomètre Plint instrumenté avec une amplitude de débattement du pion sur le plan de  $\pm 2,2$  mm, une vitesse linéique de  $0,44$  m.s<sup>-1</sup> et une pression apparente lors de l'établissement du contact allant de 1,8 à 2,4 MPa, appliquée via un ressort.

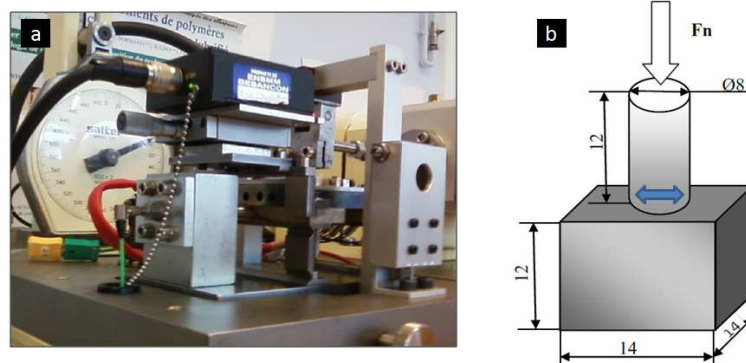


FIG. 2 – Photographie du tribomètre Plint utilisé (a), et schéma du contact tourillon/bloc sur ce dispositif (b). Les dimensions indiquées sont en mm.

Au cours des essais, les acquisitions des signaux de force normale  $F_N$ , force tangentielle  $F_T$  et déplacement  $D$  sont respectivement effectuées par un capteur d'effort résistif situé sous le ressort, un capteur piézoélectrique lié au porte-échantillon du bloc, et un capteur laser pointé sur le porte échantillon du tourillon (cf figure 2a). L'ensemble des signaux ( $F_N$ ,  $F_T$  et  $D$ ) sont acquis et traités à l'aide d'un programme développé au laboratoire avec une fréquence d'acquisition de 1kHz correspondant à 20 mesures par cycle de frottement et pour chaque grandeur. Après essai, l'évolution des cycles de frottement ( $\mu$  en fonction de  $D$  avec  $\mu = F_T/F_N$ ) peut être observée. De plus, le coefficient de frottement moyen  $\mu_{moy}$  est obtenu en effectuant la moyenne sur 2 cycles des  $\mu$  calculés.

### 3 Comportement tribologique lors du processus de soudage

#### 3.1 Phases de frottement

La figure 3 donne l'évolution au cours du temps de la charge  $F_N$  et de  $\mu_{moy}$ , au cours d'un essai caractéristique, avec une pression apparente initiale de 2 MPa.

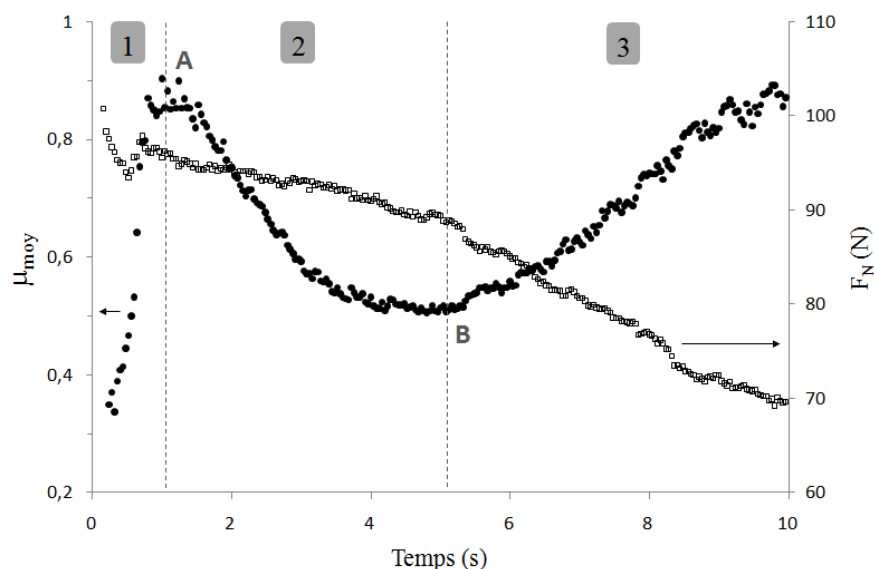


FIG. 3 – Evolution de  $\mu_{moy}$  et  $F_N$  au cours du temps lors du soudage.

Cette figure fait apparaître 3 étapes caractéristiques de l'évolution tribologique du contact :

- Phase n°1 : au cours de la 1<sup>ère</sup> seconde de frottement,  $\mu_{moy}$  augmente très fortement jusqu'en A, tandis que  $F_N$  diminue puis se stabilise. Proche du point A, une importante production de fumée s'échappe du contact, comme l'avait également constaté Ganne-Chedéville [5].
- Phase n°2 : à partir de A,  $\mu_{moy}$  diminue progressivement avant de limiter sa décroissance pour atteindre un minima en B. De son côté,  $F_N$  décroît proportionnellement au temps.

- Phase n°3 : Au-delà de B, la décroissance linéaire de  $F_N$  se poursuit avec une pente plus marquée et  $\mu_{moy}$  augmente linéairement.

La chute de la pression apparente a été interprétée comme étant la conséquence d'une dégradation du matériau ayant pour origines : d'une part une modification de l'interface, et d'autre part une usure du matériau puisque des copeaux de matière sombre s'échappent en pétales au cours des deux dernières phases. L'augmentation de la température dans une zone proche de l'interface conduit vraisemblablement à une activation des propriétés viscoélastiques du matériau et une réduction de sa rigidité. Par ailleurs, la forte baisse du coefficient de frottement plaide également pour l'établissement d'un 3<sup>ème</sup> corps sous la forme de lignine fondue, comme l'ont également observé Pizzi et al [6,7]. En revanche, au-delà de B, la hausse de  $\mu_{moy}$  et la chute d'autant plus marquée de  $F_N$  tendent à montrer que l'usure du contact prend le dessus sur l'action du 3<sup>ème</sup> corps. Il est important de noter que si l'allure générale de l'évolution de  $\mu_{moy}$  a été confirmée sur l'ensemble des essais réalisés, la durée des deux premières phases n'est pas reproductible d'un essai à l'autre en raison de la variabilité du processus d'accommodation des surfaces (phase n°1) et de la microstructure du matériau.

### 3.2 Modification de l'interface

Des observations MEB ont été effectuées sur des surfaces frottées à différentes étapes du procédé. Ainsi, la figure 4 présente les faciès observés en début de phase n°2 (4a et 4b), et en début de phase n°3 (4c et 4d).

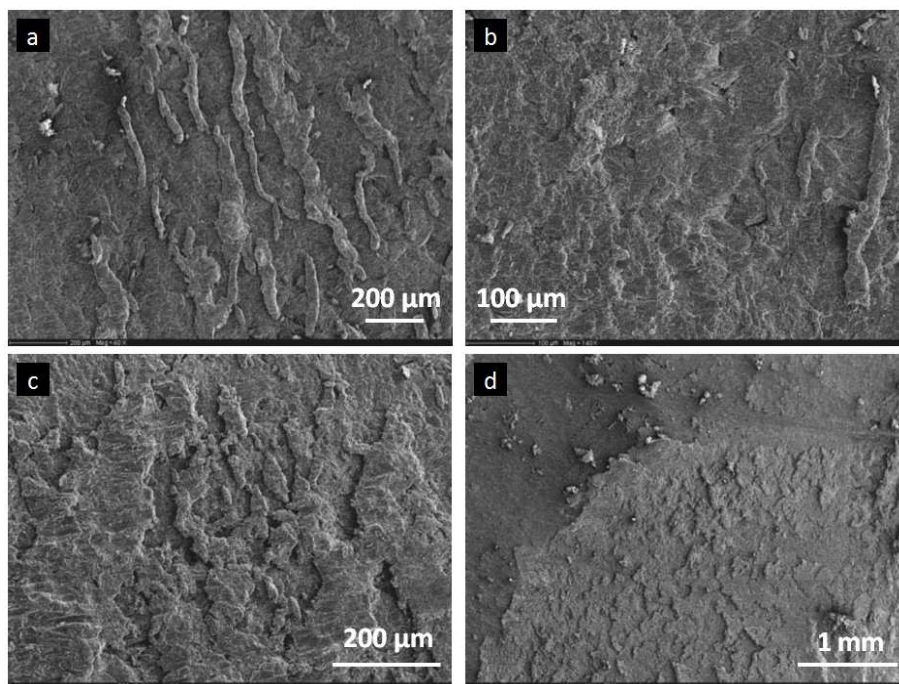


FIG. 4 – Observations MEB des surfaces frottées du tourillon (a et c) et du bloc antagoniste (b et d) pour des essais réalisés avec une pression apparente initiale de 2,4 MPa pendant 2,5 s (a et b), et pendant 7 s (c et d). La direction du débattement est horizontale.

En début de phase n°2, les surfaces sont couvertes de matière issue de la décomposition du matériau prenant la forme de rouleaux dont l'axe principal est orienté perpendiculairement à la direction de débattement. D'après nos observations, la densité de rouleaux semble d'autant plus importante que la phase n°2 s'écoule. On note que la présence des rouleaux est moins importante sur les surfaces du bloc en raison d'une plus faible durée de sollicitation que celle du tourillon. Avant d'aborder la phase n°3, les surfaces sont très largement couvertes de rouleaux qui ont été écrasés et/ou cisailés. Ces observations confirment l'hypothèse d'extrusion des fibres formulée par Ganne-Chedéville [5].

## 4 Morphologie du joint de soudure

Les essais expérimentaux menés ont permis de montrer qu'un assemblage soudé pouvait être obtenu en stoppant le frottement des pièces à un temps proche de celui du point B de la figure 3, puis en appliquant pendant une minute une pression supplémentaire, dite pression apparente de maintien, afin de solidifier le

3<sup>ème</sup> corps. La figure 5 donne un aperçu d'un assemblage soudé par frottement ainsi que la morphologie du cordon de soudure dans un plan perpendiculaire à la direction de débattement.

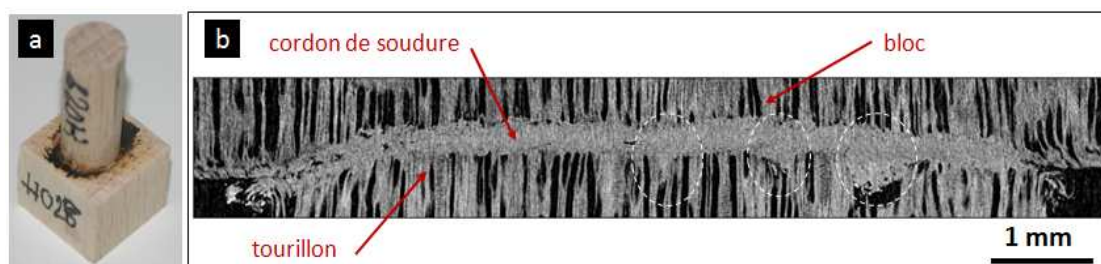


FIG. 5 – Photographie d'un contact soudé avec une pression apparente initiale de 2.4 MPa appliquée pendant 5,2 s et une pression apparente de maintien de 2.8 MPa appliquée pendant 1 min (a), et projection 2D obtenue par tomographie aux rayons X de l'assemblage dans un plan radial du tourillon et perpendiculaire à son déplacement (b). Les ovales indiquent les zones d'imprégnation du 3<sup>ème</sup> corps dans les porosités du hêtre.

La figure 5b permet de constater l'établissement continu du 3<sup>ème</sup> corps entre les deux surfaces, formant un cordon de soudure d'une épaisseur moyenne d'environ 300  $\mu\text{m}$ . Néanmoins, de nombreuses porosités du cordon ont été observées sur d'autres coupes situées à proximité des bords du tourillon. Le plus grand intérêt de cette caractérisation non destructive de l'assemblage est de mettre en évidence l'existence de sites d'imprégnation du 3<sup>ème</sup> corps dans les porosités du hêtre qui, à notre connaissance, n'ont pas été observés dans d'autres études. Par augmentation de la surface de contact entre les deux pièces, ces sites d'imprégnation auront probablement un effet bénéfique sur la tenue mécanique de l'assemblage.

## 5 Résistance mécanique des assemblages

Des essais de traction uniaxiale ont été réalisés sur 5 assemblages soudés avec une pression apparente initiale de 2,1 MPa jusqu'au point B précédemment défini (temps allant de 3,9 à 4,7 s), suivi d'une pression de maintien de 2 MPa pendant 3 min. Les contraintes de rupture apparentes obtenues varient sur une large plage allant de 0,6 à 6,1 MPa. Cette variabilité a été attribuée à la variation de la qualité de l'interface (porosités du cordon, sites d'imprégnation...).

## 6 Conclusions

Une approche expérimentale novatrice du procédé de soudage du bois par frottement a été proposée. L'étude du coefficient de frottement au cours du procédé s'est avéré être particulièrement intéressante en vue de décrire l'évolution de l'interface. On retiendra en particulier l'existence d'un minima dans la courbe  $\mu_{\text{moy}}(t)$  aisément identifiable et qui témoigne d'un changement phénoménologique caractérisé par la destruction d'un 3<sup>ème</sup> corps. En amont de ce minima, la diminution progressive du coefficient de frottement a été attribuée à la production de rouleaux ligneux et/ou hémicellulosiques dans l'interface qui ont pu être observés, et qui valident les prédictions de Pizzi *et al.* La détermination de ce minima s'avère donc intéressante en vue de déterminer le temps optimum de soudage de divers assemblages en bois. Enfin, la caractérisation non-destructive des cordons de soudure par tomographie aux rayons X a permis de mettre en évidence un phénomène d'infiltration du 3<sup>ème</sup> corps dans les fibres poreuses du matériau ainsi que l'existence de porosités dans la jonction. Ces deux aspects jouent alors un rôle prépondérant sur la contrainte mécanique admissible des assemblages.

## Références

- [1] : P. Omrani, E. Masson, A. Pizzi, H.R. Mansouri, *Emission of gases and degradation volatiles from polymeric wood constituents in friction welding of wood dowels*, Polymer Degradation Stability, vol. 93, pp. 794-799, 2008.
- [2] : Fiche technique du CIRAD, <http://tropix.cirad.fr/tempere/HETRE.pdf>, 2008.
- [3] : Fiches techniques du CNDB, [http://www.cndb.org/?p=fiches\\_essences](http://www.cndb.org/?p=fiches_essences), 2010.
- [4] : J. Baruchel, J-Y. Buffière, E. Maire, P. Merle, G. Peix, *X-ray tomography in material science*, Hermes Science Publications, 203 p., Paris, 2000.

- [5] : C. Ganne-Chedéville, *Soudage linéaire du bois : étude et compréhension des modifications physico-chimiques et développement d'une technologie d'assemblage innovante*, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 2008.
- [6] : C. Ganne-Chedéville, J-M. Leban, M. Properzi, F. Pichelin, A. Pizzi, *Temperature and density distribution in mechanical vibration wood welding*, Wood Science Technology, vol. 40-1, pp. 72-76, 2005.
- [7] : A. Pizzi, J-M. Leban, C. Ganne-Chedéville, M. Properzi, L. Delmote, F. Pichelin, *Le soudage du bois par friction*, Techniques de l'ingénieur, IN59, 7p., 2006.