

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 132 (2006)
Heft: 17: Assemblages inédits

Artikel: Bois soudé, de la recherche vers l'application
Autor: Stamm, Bernhard / Rossmair, Georg / Weinand, Yves
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-99494>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 08.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Bois soudé, de la recherche vers l'application

Les premiers essais de soudage du bois par friction permettent de décrire un processus en six phases, semblable dans les grands traits à celui du soudage de métaux ou de synthétiques. Afin de diriger ses recherches vers une application industrielle, le Laboratoire de construction en bois vient de développer, en collaboration avec une entreprise allemande, le prototype d'une machine de soudage pour le bois. Les expérimentations avec la nouvelle machine sont un succès.

Contrairement aux métaux ou aux matières thermoplastiques, lorsqu'il est soudé par friction, le bois subit une décomposition thermique qui entraîne une modification de sa structure moléculaire. Les connaissances en matière de soudage par friction des matériaux qui ne changent pas de structure ne sont donc pas forcément valables pour le bois, mais doivent être revues et réexaminées.

De nombreuses publications au sujet du soudage par friction des métaux et des synthétiques démontrent que la force de friction à l'interface entre les pièces est un paramètre capital dans le déroulement du processus de soudage [1, 2]¹. Lorsque des métaux ou des matières synthétiques sont soudés par friction, cette force dépend des paramètres de la machine à souder concernant la pression appliquée sur les pièces et la fréquence de vibration [3, 4, 5, 6]. La force de cisaillement est liée à l'énergie produite par la friction. Elle permet en outre de suivre le changement de l'état d'agrégation du matériau à l'interface.

Premières expérimentations

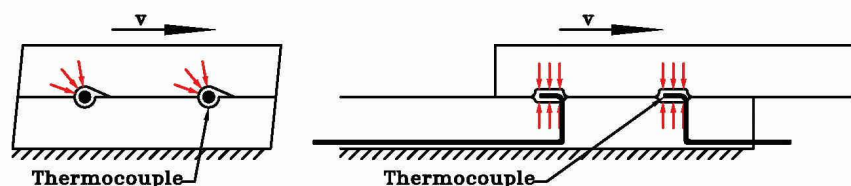
Afin de mieux comprendre le phénomène, nous avons construit un appareil pour mesurer la force de friction à l'interface entre les pièces durant l'ensemble du processus de soudage. Cette force de cisaillement – caractérisée par le coefficient de frottement – change en effet selon que l'interface est solide ou visqueux. En parallèle, nous avons également relevé l'évolution de la température de l'interface.

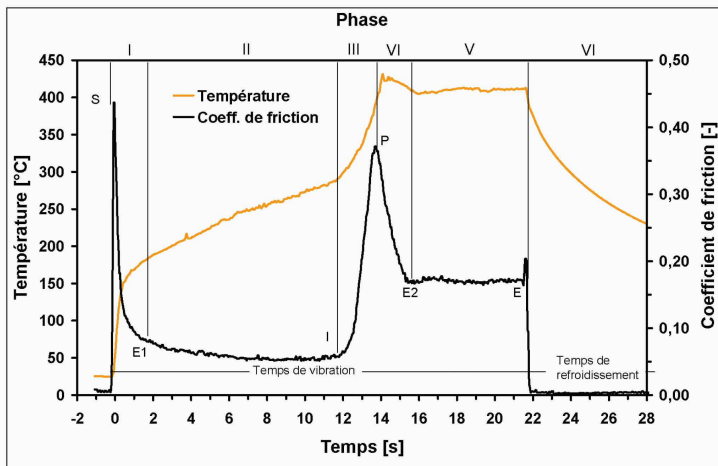
De manière générale, on peut décomposer un mouvement de friction circulaire en deux composantes x et y. Notre appareil de mesure étant capable de mesurer les forces de cisaillement dans les directions x et y – au moyen de capteurs de force de type HBM-U9B [7] – on peut déterminer la force de friction à l'interface à chaque moment du processus.

La chaleur générée à l'interface régissant le processus de soudage, l'évolution de la température dans la zone de contact est donc d'une importance majeure. On la mesure au moyen de thermocouples (Ni-CrNi, section 2x0,24 mm², isolation en soie de verre, T_{max}=1000 °C). Des essais préliminaires effectués avec un seul thermocouple se sont avérés insatisfaisants, car les forces de friction détruisaient régulièrement le capteur, empêchant de la sorte de déterminer la température. Afin de remédier à ce problème, la température moyenne de chaque échantillon a été mesurée à l'aide de quatre thermocouples placés à l'interface selon la figure 1.

Les échantillons utilisés pour l'évaluation de la force de friction sont composées de deux planches en bois de dimensions

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.





2

110x50x10 mm chacune, dont la surface a été rabotée. Les deux pièces sont soudées sur une surface de 50x50 mm, offrant ainsi à l'interface une surface de 2 500 mm².

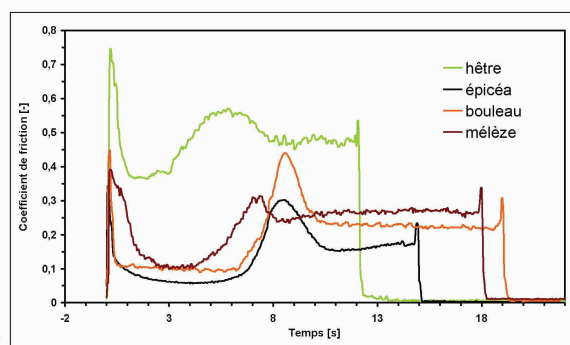
Le bois choisi pour l'expérimentation est l'épicéa. Afin de garantir une homogénéité aussi grande que possible, les échantillons ne doivent pas présenter de défaut visible. Avant l'essai, ils sont stockés dans une salle climatisée ayant des conditions contrôlées (20°C, humidité relative de l'air de 65 %).

Résultats et analyse

Les essais montrent que la force de friction évolue pendant le processus de soudage selon différentes phases, qui peuvent être séparées par des points caractéristiques (fig. 2). Ces points permettent une subdivision du processus en six phases : on passe d'un frottement sec à un frottement visqueux, pour terminer par la solidification de l'interface.

Phase I : Pendant la phase initiale du soudage, les deux morceaux sont maintenus en contact avec une certaine pression, qui demeure constante pendant toute la période de vibration (fig. 2, point S). Au tout début, les aspérités des surfaces sont polies par le frottement sec. La surface étant relativement rugueuse, on observe tout d'abord une rapide augmentation de la température à l'interface combinée avec une importante chute de la force de friction. À environ 150°C, le graphique indique une modification de la pente, provoquée par l'évaporation de l'humidité contenue dans l'échantillon (12,8 %) et par le polissage des surfaces par le mouvement de friction, un polissage qui participe aussi à la diminution du coefficient de frottement.

Phase II : Une fois les surfaces polies, la phase II (entre les points E1 et I) se caractérise par un coefficient de frottement relativement constant et une augmentation quasi linéaire de la température. Stokes a observé une phase semblable durant le frottement sec du processus de soudage par friction de matières thermoplastiques [4].



3

Phase III : Cette phase est caractérisée par une forte augmentation de la force de friction (à partir du point I) accompagnée d'une production de fumée. Pendant cette phase, les surfaces commencent à se décomposer à une température d'environ 300°C. La force de friction augmente continuellement pour atteindre un maximum au point P. Cette augmentation est due à la décomposition thermique des surfaces, qui se manifeste sous forme de petites taches qui grandissent rapidement. On suppose que le frottement sec se transforme en frottement visqueux pendant cette phase, qui voit la formation d'un film visqueux dans l'interface. Si l'on interrompt le processus au début de la phase, on observe que le matériau commence à se décomposer le long des cernes. Ceci est probablement dû à une pression plus élevée dans les zones de bois d'été, qui sont plus dures que les zones de bois de printemps. Le matériel décomposé présente une structure similaire à des petites gouttes, ce qui confirme la thèse que le bois « fond » d'une certaine manière dès le début de sa décomposition thermique.

Phase IV : C'est pendant cette phase que l'on atteint la température maximale, environ 420°C quelle que soit l'essence concernée. La force de friction diminue alors de sa valeur maximale pour se stabiliser à une valeur constante (à partir du point E2). Là aussi, Stokes a observé un comportement semblable durant le soudage de matières thermoplastiques [2].

Phase V : Cette phase se caractérise par une force de friction constante (entre E2 et E), qui se maintient jusqu'à l'arrêt du mouvement de friction. Au niveau thermique, la valeur constante de la température traduit l'équilibre qui s'établit entre la chaleur générée par l'énergie de friction d'une part, et son expulsion, à l'interface, par l'intermédiaire de fumée chaude et de cellules de bois « fondues » et décomposées d'autre part. Le bois atteint vraisemblablement un état de changement de phase, qui implique un équilibre énergétique se traduisant par une stabilité de la température. Une telle phase se présente lors de tout processus de soudage par friction [1, 2, 9].

Fig. 1 : Position des quatre thermocouples à l'interface

Fig. 2 : Classification du processus en différentes phases (I-VI) au moyen de l'évolution du coefficient de friction et de la température, pour un échantillon d'épicéa

Fig. 3 : Evolution du coefficient de frottement pour diverses essences de bois (hêtre, sapin, bouleau et mélèze)

Fig. 4 : Installation de soudage par friction pour le bois. Le soudage du bois est accompagné d'un développement de fumée.

Fig. 5 : Élément multicouche (100x500 mm) composé de planches d'épicéa ; les couches sont soudées perpendiculairement aux fibres comme du contreplaqué.

Phase VI : Cette phase correspond au refroidissement de la zone de contact et à la solidification du matériau « fondu » à l'interface. Après l'interruption du mouvement de friction, on applique une certaine pression dite « de refroidissement » pour rapprocher très étroitement et plaquer l'un contre l'autre les morceaux à souder. Cette pression est plus élevée que la pression pendant la phase de vibration. La compression de l'échantillon observée au microscope [7] se produit principalement pendant cette phase. La phase VI est celle où la liaison est achevée.

Si la *figure 2* concernait l'épicéa, la *figure 3* illustre la variation des coefficients de friction pour quatre essences de bois différentes (diagrammes des essais de soudage spécifiques). On constate que le soudage par friction du bois de hêtre, de bouleau et de mélèze donne lieu à des schémas comparables à celui de l'épicéa. Les conditions varient selon les particularités des différentes essences de bois, qui ont une influence sur le coefficient de frottement. Les échantillons de hêtre, dont les surfaces ont été rabotées de la même manière que celles des échantillons d'épicéa, présentent une variation de la température plus rapide dans la zone de contact. Cela est lié au coefficient de friction nettement plus élevé qui caractérise cette essence. Les essais effectués en vue d'étudier le comportement de différentes espèces de bois ne sont pas exhaustifs, et nous ne les mentionnons qu'afin de démontrer l'existence de similitudes de comportement.

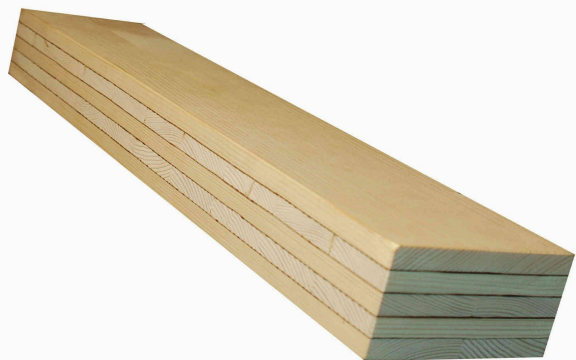
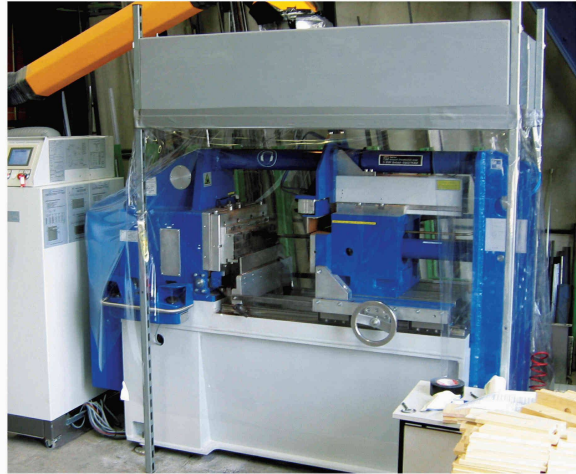
Selon les résultats obtenus, le déroulement du processus de soudage par vibration du bois est semblable à celui du soudage de métaux et de synthétiques.

Une machine à souder le bois

Les essais décrits ci-dessus ont été effectués avec un appareil de soudage par friction exerçant un mouvement circulaire. Compte tenu de l'orientation des cernes, ce type de mouvement mène à une réduction de la vibration [7] et les études réalisées avec une vibration linéaire ont conduit à de meilleurs résultats [10]. Afin de diriger notre recherche vers une éventuelle application industrielle, le Laboratoire de construction en bois (IBOIS) a développé, en collaboration avec une entreprise allemande, une machine de soudage par friction spécialement conçue pour le bois (*fig. 4*).

Cette installation permet de souder des surfaces bien plus grandes que celles utilisées lors des études précédentes. Ces surfaces étaient limitées à 25 cm², voir 50 cm² au maximum. Avec cette nouvelle machine, il est désormais possible de fondre des surfaces supérieures à 500 cm² et de souder des éléments multicouches en continu (*fig. 5*).

Afin d'empêcher que la vibration générée par le soudage



d'une nouvelle couche ne soit transmise dans les joints déjà existants, le dernier panneau soudé est tenu au moyen d'une fixation. L'installation est prévue sous forme de construction modulaire, plusieurs modules pouvant être enclenchés parallèlement, ce qui permet de souder des éléments présentant une diversité de longueur quasiment infinie.

Cette machine étant un prototype fabriqué pour la recherche, le mouvement de friction n'est pas fixé et il est possible de choisir entre une oscillation circulaire ou linéaire. On attribue ensuite une valeur à certains paramètres importants : fréquence du frottement, pression de contact pendant la phase de vibration et celle pendant la solidification de l'interface, ou encore amplitude de l'oscillation. Il est ainsi possible d'examiner les avantages et les désavantages des oscillations linéaires ou circulaires.

Les premiers essais avec la nouvelle machine sont un succès. On a pu réaliser des liaisons avec les deux types d'oscil-

lation et souder en quelques secondes et en une égale mesure autant du bois tendre (épicéa) que du bois dur (hêtre, chêne). La dimension des surfaces soudées est de 500 cm², et il est possible de l'étendre encore en variant la dimension de la fixation (surface d'appui).

Afin de déterminer la force de cisaillement, des surfaces de 20 cm par 10 cm ont été soudées par vibrations linéaires. Une fois les paramètres de la machine (fréquence, pression et déplacement vertical) réglés de manière idéale, on atteint une contrainte de cisaillement moyenne de 7,9 N/mm² pour le hêtre. Les paramètres de la machine varient fortement selon les essences de bois, chacune d'entre elles ayant une anatomie différente. La teneur en humidité du bois joue également un rôle prépondérant, car elle influence les caractéristiques de résistance du matériau.

Le soudage de l'épicéa sur des surfaces plus importantes présente encore quelques problèmes. En effet, si la valeur moyenne de la résistance au cisaillement atteint 5,2 N/mm² pour des petites surfaces (30x100 mm), elle diminue nettement pour des surfaces plus grandes : dans ce cas de figure, les tensions intérieures peuvent provoquer la déchirure des joints dans les bords. Actuellement, la recherche se consacre avant tout à la résolution de ce problème, étant donné que l'épicéa constitue l'essence la plus utilisée en Europe, surtout dans le domaine de la construction.

Compte des nombreux paramètres influençant le soudage (humidité, essence, taille de la surface, réglage de la machine à souder, etc.), le problème demeure cependant complexe. Les matériaux couramment soudés par friction ont une structure

homogène et leur comportement est thermoplastique. Le défi majeur réside donc d'optimiser le processus du soudage du bois, en dépit du manque d'homogénéité de ce matériau.

Bernhard Stamm, dr. ing. civil TU Karlsruhe (D)
Georg Rossmair, ing. civil FH Rosenheim (D)
Yves Weinand, prof. EPFL, architecte ISA, dr. ing. civil EPFL

EPFL-ENAC-IS-IBOIS
GC H2 711 (Bâtiment GC), Station 18, CH-1015 Lausanne

Bibliographie

- [1] A. VAIRIS, M. FROST : « High frequency linear friction welding of titanium alloy », *Wear* 217 (1998), 117-131
- [2] V.K. STOKES : « Vibration welding of thermoplastics (Part I) – a phenomenology of the welding process », *Polymer Engineering and Science*, 28(11) (1988b), 718-727
- [3] F.D. DUFFIN, A.S. BAHRANI : « Frictional behaviour of mild steel in friction welding », *Wear* 26 (1973), 53-74
- [4] V.K. STOKES : « Analysis of the friction (spin-) welding process for thermoplastics », *Journal of Materials Science*, 23 (1988a), 2772-2785
- [5] R.J. CRAWFORD, Y. TAM : « Friction welding of plastics », *Journal of Materials Science*, 16 (1981), 3275-3282
- [6] C.J. NONHOF, M. RIEPEN, A.W. MELCHERS : « Estimates for process conditions during the vibration welding of thermoplastics », *Polymer engineering and science*, 36 (1996), 20018-2028
- [7] B. STAMM, J. NATTERER, P. NAVI : « Joining wood by friction welding », *Holz als Roh- Werkstoff*, 63 (2005), 313-320
- [8] B. STAMM : « Development of friction welding of wood – physical, mechanical and chemical studies », Thèse sciences EPFL, no 3396 (2005)
- [9] A.K. SCHLARP : « Zum Vibrationsschweißen von Polymerwerkstoffen – Prozess-Struktur-Eigenschaften », Doctoral Thesis Universität-Gesamthochschule Kassel, Faculty of Mechanical Engineering (1989)
- [10] B. GFELLER, A. PIZZI, M. ZANETTI, M. PROPERZI, F. PICHELIN, M. LEHMANN, L. DELMOTTE : « Solid wood joints by in situ welding of structural wood constituents », *Holzforschung*, 58 (2004), 45-52



Lista Motion



Lista QUB



Lista Motion XXL



COMPASS DEVELOPMENTS SA

Le concept «new work» de Lista Office : deux mots pour exprimer notre volonté de favoriser l'échange, la communication et le bien-être à travers un design harmonieux et fonctionnel.

1, rue de Hesse
CH-1204 Genève
T 022 807 12 70 F 022 807 12 75
info@listacd.ch www.listacd.ch