



**HAL**  
open science

## Compréhension et optimisation du procédé de soudage par ultrasons (US) appliqué aux papiers/cartons

Quentin Charlier, Jérémie Viguié, C. Gauthier, Barthelemy Harthong, Didier Imbault, J.-B. Toni, M. Terrien, Robert Peyroux

► **To cite this version:**

Quentin Charlier, Jérémie Viguié, C. Gauthier, Barthelemy Harthong, Didier Imbault, et al.. Compréhension et optimisation du procédé de soudage par ultrasons (US) appliqué aux papiers/cartons. 25e Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-04281705

**HAL Id: hal-04281705**

**<https://hal.science/hal-04281705>**

Submitted on 14 Nov 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Compréhension et optimisation du procédé de soudage par ultrasons (US) appliqué aux papiers

Q. CHARLIER<sup>a,b\*</sup>, J. VIGUIE<sup>a</sup>, C. GAUTHIER<sup>b</sup>, B. HARTHONG<sup>b</sup>, D. IMBAULT<sup>b</sup>, J.B. TONI<sup>b</sup>, M. TERRIEN<sup>a</sup> et R. PEYROUX<sup>b</sup>

a. Université Grenoble Alpes, Grenoble INP, CNRS UMR 5518, LGP2, 38000 Grenoble, France

b. Université Grenoble Alpes, Grenoble INP, CNRS UMR 5521, 3SR, 38000 Grenoble, France

\*Correspondance : quentin.charlier@lgp2.grenoble-inp.fr

## Résumé:

*Le soudage par ultrasons est un candidat sérieux concernant le développement de méthodes pour l'assemblage de papiers et cartons sans ajout de substances additionnelles. Cependant, le soudage ultrasons des papiers et cartons reste un défi technologique compte tenu de la faible soudabilité des matériaux lignocellulosiques. Cette étude se concentre sur l'utilisation de ce procédé pour l'assemblage des papiers, l'objectif étant d'identifier les conditions opératoires permettant la formation de joints soudés à hautes propriétés mécaniques. Pour cela, un dispositif de soudage instrumenté a été développé pour permettre l'enregistrement des différents paramètres procédé au cours du soudage et les confronter ainsi avec les performances mécaniques des joints soudés. Les soudages ont été réalisés sur un papier référence disposant d'une bonne soudabilité pour mettre en avant spécifiquement la contribution des paramètres procédés. Les résultats indiquent que le procédé est particulièrement sensible à la puissance fournie par le générateur haute-fréquence et l'épaisseur des échantillons. La puissance semble être un indicateur fiable de la sévérité du soudage. Une forte chute des propriétés mécaniques des joints soudés est observée aux faibles épaisseurs. Il semblerait que les couchages déposés sur la surface des papiers soient les principaux éléments contribuant au développement de l'adhésion au niveau du joint de soudure. Globalement, l'instrumentation du dispositif a permis une meilleure compréhension du soudage par ultrasons des papiers.*

## Abstract:

*Ultrasonic welding is a serious candidate in the development of methods to assemble papers and paperboards without using additional substances. However, the ultrasonic welding of papers remains a technological challenge considering the low weldability of lignocellulosic materials. This study aims to investigate on the ultrasonic welding process applied to papers in order to identify the processing conditions which favor the formation of strong welded joints. To reach such a goal, an instrumented ultrasonic welding device was set up to allow the recording of process parameters in order to confront operating conditions to the mechanical properties of welded joints. Experimentations were performed using a reference paper displaying a good weldability to specifically highlight the contribution of process parameters. Results indicate that the process is highly sensitive to the power supplied by the*

*high frequency generator and sample thickness. Power seems to be a reliable indicator of the severity of the process. A strong decrease in the strength of the welded joints is observed when working with low thicknesses. It seems that the layers coated on top of papers are the main part of the material contributing in the development of adhesion at the welding joint. Overall, instrumenting the device has led to a better understanding of the ultrasonic welding of papers.*

**Mots clefs :** Soudage par ultrasons, papiers et cartons, dispositif expérimental, instrumentation, optimisation du procédé, assemblage sans colle

## 1 Introduction

Le soudage par ultrasons (US) est une méthode de mise en forme pour l'assemblage de matériaux qui consiste en l'application de vibrations acoustiques haute-fréquence sous contrainte. Elle présente beaucoup d'avantages : vitesse élevée, procédure assez simple à automatiser, pas besoin d'ajouter de substances additionnelles type colle, et la chaleur est générée directement à l'interface de soudage. Cette méthode est déjà utilisée à l'échelle industrielle pour assembler polymères thermoplastiques ou métaux. Le soudage US des thermoplastiques a déjà été longuement étudié ces 40 dernières années via des méthodes expérimentales ou numériques [1-4]. Aujourd'hui, il est reconnu que la génération de la chaleur est hétérogène et qu'elle résulte de deux mécanismes consécutifs [5]. La chaleur est d'abord générée sur des zones localisées via des phénomènes de friction à l'interface, jusqu'à ce que les températures de transitions soient atteintes (transition vitreuse ou fusion). Ensuite, le reste de la chaleur est obtenue par dissipations visqueuses, s'étendant depuis les zones localisées à toute la surface de soudage. Ce dernier mécanisme correspond à la quasi-totalité de l'énergie requise pour effectuer le soudage.

Aujourd'hui, le soudage US apparaît comme une alternative à l'utilisation d'adhésifs pétro-sourcés pour l'assemblage des papiers et cartons, notamment en raison des similarités chimiques entre polymères thermoplastiques et matériaux lignocellulosiques. En revanche, l'application de ce type de procédés aux matériaux lignocellulosiques en général n'a que peu été étudiée jusqu'ici. Seules quelques études datant d'une quinzaine d'années se sont intéressées au soudage par friction linéaire du bois, montrant qu'il est possible par cette technique d'assembler des pièces [6-11]. Au jour d'aujourd'hui, seuls quelques articles scientifiques, publiés par notre équipe, discutent du soudage US appliqué aux papiers et cartons [12-14]. Mais il reste encore beaucoup à faire pour améliorer notre compréhension de cette technologie quant à son utilisation aux matériaux lignocellulosiques. En particulier, deux problématiques inter-corrélées sont identifiables :

- Les papiers/cartons étant moins sensibles aux procédés de soudage que les thermoplastiques, peut-on (et si oui comment) optimiser le procédé pour faciliter l'assemblage ces matériaux ?
- Les papiers/cartons présentant une multitude de grammages, structures, et compositions de surface, quelles devraient être ces propriétés pour favoriser le caractère soudable ?

Dans ce contexte, le principal objectif de cette étude est l'optimisation du procédé de soudage US appliqué aux papiers. Pour dissocier la contribution du procédé des propriétés matériaux, les expériences ont été réalisées avec un papier référence de soudabilité connue. Cela signifie que si les performances mécaniques des joints soudés n'atteignent pas le niveau attendu, ce sera imputé à de mauvaises conditions opératoires. Pour atteindre cet objectif, un dispositif de soudage instrumenté dédié à l'assemblage de papiers et cartons a été mis en place au laboratoire 3SR (Grenoble). Le banc

d'essai, présenté en détail dans la suite de cette étude, permet de suivre l'évolution des paramètres procédé pendant le soudage via l'enregistrement des données de l'appareil et l'ajout de divers capteurs et dispositifs de mesures. La soudeuse instrumentée a ensuite été utilisée pour étudier l'influence des conditions opératoires sur les propriétés mécaniques des joints soudés. Les paramètres procédé clés seront identifiés et leur influence sera discutée pour mettre en avant les conditions opératoires permettant le bon soudage des papiers.

## 2 Matériaux et méthodes

### 2.1 Matériaux

Le papier référence est un papier kraft glacé de 80 g/m<sup>2</sup> (Terrana, de Gascogne Papier), fourni par le Centre Technique du Papier (CTP) (Figure 1). C'est un papier dense (1.21 g/cm<sup>3</sup>) de haute propriétés mécaniques (force de rupture 8.26 kN/m sens marche, 4.00 kN/m sens travers). Une couche de poly(vinyle alcool) (PVOH) a été déposée par le CTP sur le papier référence : 2.7 g/m<sup>2</sup> au recto, et 0.5 g/m<sup>2</sup> au verso. L'épaisseur totale du papier couché est proche de 100 µm. Comme mentionné dans l'introduction, ce papier a été choisi afin de mettre en avant la contribution de la partie procédé sur le soudage US des papiers. En conséquence, il a été vérifié et il sera admis dans cette étude que les faces recto présentent une bonne soudabilité, les faces verso présentent une faible soudabilité, et que le papier non-couché ne se soude pas.



Figure 1 : Papiers soudés partiellement pelés (gauche), échantillon prêt à être soudé (centre), dimensions des échantillons et des surfaces soudés (droite).

### 2.2 Soudage Ultrasons

Une soudeuse US ESW, fournie par Sonimat, a été utilisée pour assembler les papiers. C'est une presse électromécanique équipée d'un capteur de force de 2000 N et d'un ensemble acoustique connecté à un générateur haute-fréquence de 20 kHz (Figure 2). L'ensemble acoustique (la partie vibrante) est monté sur la tête de presse tandis que l'enclume et son outillage sont montés sur le bâti. Un écran de contrôle, situé sur la colonne de la presse, permet à l'opérateur de régler les paramètres de soudage. L'ensemble acoustique, conçu et fabriqué par Sonimat, est composé d'une sonotrode (de surface 20x25 mm<sup>2</sup>), d'un booster (gain 2.0) et d'un convertisseur piézoélectrique (CR 20) (Figure 3). L'amplitude crête-à-crête nominale de la vibration acoustique est de 92 µm. Elle peut être ajustée entre 30 et 100 % de sa valeur nominale via l'écran de contrôle.

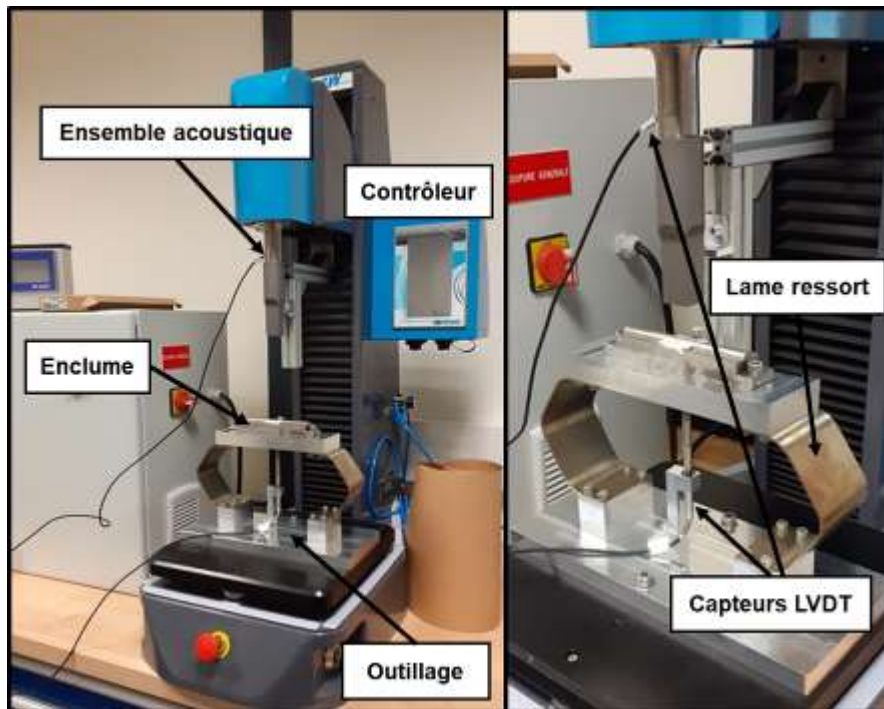


Figure 2 : Dispositif de soudage instrumenté



Figure 3 : Composants du dispositif de soudage (de gauche à droite) : ensemble acoustique, enclume n°2, enclume n°1.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de travailler avec des enclumes mobiles. Cela signifie que l'enclume n'est pas fixée au bâti, mais sur un outillage laissant un degré de liberté au système dans la direction de la tête de presse. Nous considérons que c'est la meilleure configuration pour souder des matériaux fins comme les papiers. L'outillage utilisé dans le cadre de cette étude a été conçu par notre équipe. Il est composé de deux ressorts à lame fixés sur le bâti de la soudeuse (Figure 2). L'enclume est disposée sur les ressorts. La raideur équivalente du dispositif est de 450 N/mm. Deux enclumes (n°1 et n°2, Figure 3), fournies par Sonimat, ont été utilisées. L'enclume n°1 présente une surface cylindrique de rayon de courbure 5 mm. Elle conduit à des soudages linéaires de longueur 25 mm et largeur approximative 1 mm (1D, Figure 1). L'enclume n°2 présente une surface plate texturée (répétition du motif 1 mm). Elle conduit à des surfaces soudées de 20x25 mm<sup>2</sup> (2D, Figure 1).

La procédure de soudage est programmée via l'écran de contrôle. L'opérateur choisit le mode de déplacement (force ou vitesse), la condition de fin de soudage (temps, distance, énergie), la vitesse, l'amplitude, et éventuellement l'application d'une contrainte post-soudage (temps, force). Pour réaliser le soudage, les papiers sont agrafés puis disposés sur l'enclume et maintenus par de la pâte adhésive (Figure 1). La soudeuse calibre sa position en effectuant un zéro mécanique à 20 DaN. Les soudages sont ensuite réalisés à 23±2 °C et 45±5 % d'humidité relative. Le déclenchement des ultrasons est

effectué 1.5 mm au-dessus du zéro mécanique, quand sonotrode et enclume ne sont pas encore en contact.

## 2.3 Instrumentation du dispositif de soudage

La machine de soudage utilisée dans cette étude a été initialement dimensionnée pour des besoins industriels. En conséquence, l'exportation des données depuis le contrôleur n'est pas possible. Une carte d'acquisition NI 6361 a donc été connectée à la soudeuse pour permettre l'enregistrement des données de l'appareil (force et puissance). La carte possède 16 entrées analogiques et 24 entrées numériques et peut acquérir des signaux jusqu'à une fréquence de 2 MHz sur une voie. Les données sont envoyées sur un ordinateur et traitées via un programme LabVIEW.

Deux capteurs de déplacements LVDT (Orbit DP/10/S, de Solartron) ont été intégrés au banc d'essai, pour suivre séparément le déplacement de la tête de presse et de l'enclume (Figure 2). La combinaison des deux informations permet également de déduire la réduction d'épaisseur des matériaux au cours du soudage. Les capteurs fonctionnent sur une gamme de 10 mm avec une précision proche de 1  $\mu\text{m}$ . Les données sont enregistrées à une fréquence de 4000 Hz via la carte d'acquisition NI 6361 et traitées pour le programme LabVIEW.

## 2.4 Méthodologie

Des études préliminaires ont été réalisées de manière à identifier, parmi toutes les variables reliées au procédé, les paramètres les plus influents sur les performances mécaniques des papiers soudés. Parmi eux ont été identifiés la force et l'amplitude. Cependant, ces deux paramètres sont également reliés, car modifier la force ou l'amplitude revient à changer la puissance fournie par le générateur haute fréquence. Comme détaillé ultérieurement, c'est en fait la puissance qui semble être l'indicateur clé du soudage US. En conséquence, nous avons choisi de dimensionner la plupart de nos expériences en faisant varier la puissance maximal ( $P_m$ ). La subtilité est que cette puissance correspond plutôt à un paramètre de sortie et non d'entrée de la procédure. Pour ajuster la puissance dans le cadre de cette étude, nous avons fait varier la force en travaillant à amplitude fixe. Sauf si contre-indications dans la partie résultats, les conditions de soudages suivantes ont été utilisées par défaut : mode de déplacement en force (la tête avance à vitesse constante jusqu'à atteindre l'effort de consigne), condition de fin de soudage en énergie, vitesse 2.0 mm/s, amplitude 60%, effort post-soudage de 1 s égal à l'effort de consigne. Les travaux présentés dans cet article correspondent principalement à une sélection de résultats majeurs obtenus dans le cadre d'une étude plus large menée par notre équipe. Le lecteur est invité à se reporter aux travaux publiés pour plus de détails concernant les paramètres balayés lors des études préliminaires, la méthodologie générale, et les subtilités opératoires du soudage US [13].

## 2.5 Performances des papiers soudés

Des tests de pelage en T ont été réalisés pour évaluer les propriétés mécaniques des papiers soudés à l'aide d'une machine Instron 5944 équipée d'un capteur de force de 2 kN, à un déplacement de 1 mm/s (Figure 4). Les papiers sont pelés le long de la largeur du joint soudé. Les forces de pelage mesurées sont ramenées à la longueur de la soudure et exprimées en N/m. Les efforts de pelage utilisés ultérieurement pour discuter des performances mécaniques des papiers soudés correspondent au pic de

force mesuré, relatif à la rupture des joints (Figure 4). Moyenne et écart-type sont calculés sur 3 échantillons. Les tests de pelage ont été effectués à  $23 \pm 2$  °C et  $45 \pm 5$  % d'humidité relative.

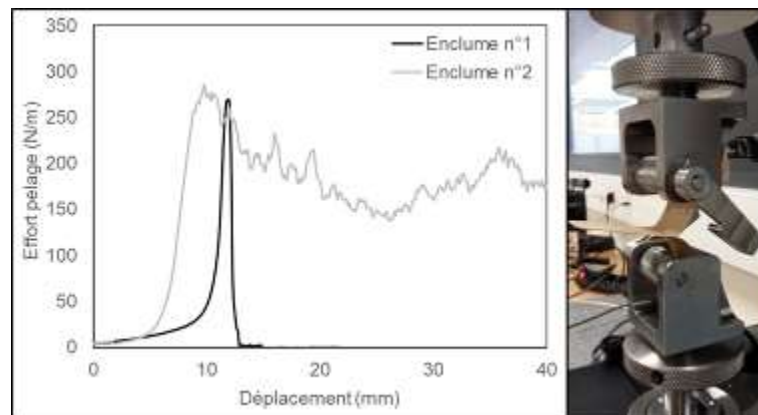


Figure 4 : Test de pelage pour l'évaluation des performances mécaniques des papiers soudés (droite), et courbes caractéristiques de l'essai de pelage en fonction des surfaces de soudage (gauche).

### 3 Résultats et discussion

#### 3.1 Influence de la puissance

La puissance semble être le paramètre le plus important du procédé de soudage US. Pour des trop faibles valeurs de  $P_m$ , les papiers ne se soudent pas. Quand la puissance augmente, les papiers s'assemblent progressivement et les efforts de pelage augmentent avec  $P_m$  jusqu'à atteindre un plateau (Figure 5). La valeur de ce plateau semble dépendre de la soudabilité du matériau : il est d'environ 250 N/m pour des soudages recto sur recto, 150 N/m recto sur verso, et 20 N/m verso sur verso (Figure 5). La propagation de la rupture est principalement adhésive à faible  $P_m$ , puis devient progressivement cohésive quand l'effort de pelage (et donc  $P_m$ ) augmente et se rapproche de la valeur du plateau. Pour des valeurs de  $P_m$  encore plus grandes, le procédé commence à endommager le matériau. Des dégradations partielles sont observables à l'interface de soudage. Le papier commence à brûler.

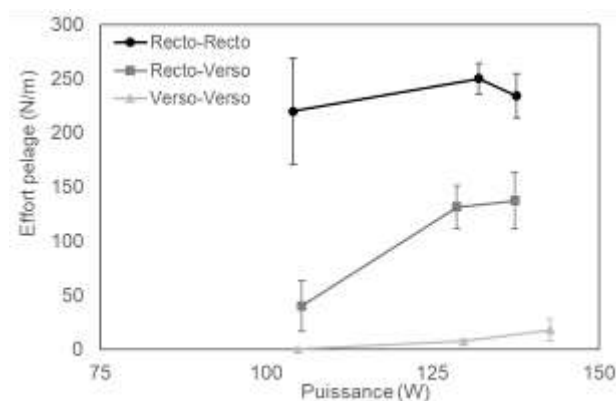


Figure 5 : Effort de pelage en fonction de  $P_m$  pour trois combinaisons de papier référence soudées avec l'enclume n°1 (condition de fin : 25-40-50 J).  $P_m$  a été ajustée en modifiant l'effort de soudage (25-45-55 DaN).

La forme de la courbe de puissance est dépendante des propriétés des matériaux. Des expériences effectuées avec différents types de papiers et cartons ont montré que chaque matériau, à conditions

opératoires fixées, présente une unique enveloppe de puissance (Figure 6). Cela signifie que la valeur de  $P_m$ , et donc les conditions énergétiques du soudage, sont susceptibles de changer d'un papier à un autre pour des procédures identiques. En revanche, l'enveloppe de puissance n'est pas influencée par les propriétés de surface des papiers (nature et poids de couchage, tant que ce dernier est suffisamment faible par rapport au grammage) (Figure 6). Les conséquences de cette observation sont très importantes. Premièrement, la soudeuse US ne « voit » que le bulk du matériau : structure, propriétés mécaniques, épaisseur. La réponse de la machine lors du soudage d'un matériau peut être évaluée qualitativement par l'observation de la courbe de puissance. Cette dernière décrit comment le matériau réagit au soudage US, donc comment il est capable de récupérer l'énergie fournie sous forme de vibrations acoustiques par la sonotrode et la convertir en chaleur à l'interface. Deuxièmement, la soudabilité semble principalement découler des propriétés de surface (du couchage), ces dernières n'affectant pas le procédé. Cela signifie dans le cas présenté ici que la soudeuse ne différencie pas les soudage recto sur recto et verso sur verso malgré le fait que les propriétés mécaniques des joints soudés soient différentes. Les propriétés de surface semblent donc régir le développement de l'adhésion à l'interface de soudage à partir de la chaleur apportée. En conséquence, l'assemblage de papiers par soudage US semble se résumer à une double condition (les deux phénomènes étant a priori indépendants): trouver des paramètres de soudage optimisés pour fournir au système vibrations acoustiques et donc chaleur à l'interface, et avoir des propriétés de surface permettant le développement de l'adhésion. Par ailleurs, les courbes de puissances et  $P_m$  semblent être des indicateurs fiables de la sévérité du soudage, qui pourrait être définie comme la quantité d'énergie par unité de volume reçue en instantané à l'interface de soudage. Dans le cas du soudage US des papiers, le réseau fibreux joue le rôle de support dans la formation des joints soudés, le principal contributeur étant le couchage. On retrouve des cas similaires dans la littérature, comme par exemple le soudage US de composites carbone-époxy où l'on vient disposer des films thermoplastiques à l'interface pour développer de l'adhésion [15]. Ces résultats confirment qu'il est très important de séparer les contributions procédé et matériau pour améliorer notre compréhension du soudage US des papiers.

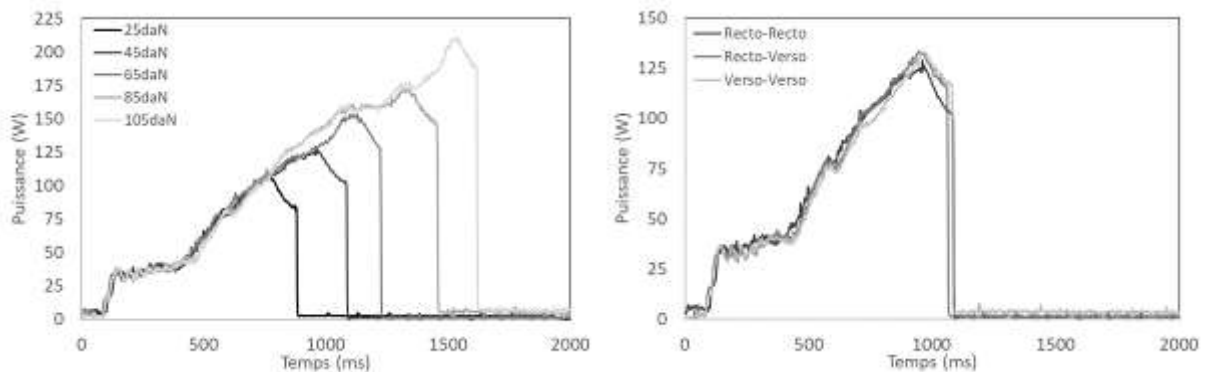


Figure 6 : Courbes caractéristiques de puissance à différents efforts de soudage (recto sur recto, gauche) and courbes de puissance des trois combinaisons étudiées soudées à 45 DaN avec l'enclume n°1 (droite). Conditions de soudage (gauche) : effort de soudage 25-45-65-85-105 DaN, condition de fin 20-45-70-110-145 J.

### 3.2 Influence de l'épaisseur

L'objectif de cette section est de mettre en avant l'influence de l'épaisseur des matériaux soudés. Pour atteindre cet objectif, une démarche expérimentale a été mise en place pour souder des papiers référence recto sur recto tout en faisant varier l'épaisseur effective des échantillons. Les papiers à



souder ont été positionnés entre une à plusieurs couches de papier d'impression (non-soudable). La quantité de couches de papier d'impression a été ajustée afin d'obtenir une gamme la plus large possible d'épaisseurs : de 0.2 mm à 2.0 mm (10 feuilles de chaque côté). Les papiers références ont toujours été positionnés au milieu de la pile et soudés avec l'enclume n°2. Les résultats montrent que les performances mécaniques des joints soudés sans surépaisseurs sont mauvaises (Figure 7) compte tenu des résultats obtenus en 3.1 (Figure 5). En revanche, quand l'épaisseur augmente, les efforts de pelage s'améliorent jusqu'à atteindre la valeur plateau identifiée précédemment (250 N/m, Figure 7) sur l'intervalle 0.5-1 mm. Au-delà, les propriétés mécaniques chutent. Le fait que nous utilisons une pile de papier pour artificiellement augmenter l'épaisseur pourrait cependant introduire des phénomènes parasites de dissipation d'énergie entre les couches. Il est donc probable les informations obtenues sur la gamme 1-2mm ne soit plus représentatives seulement de la seule influence de l'épaisseur.

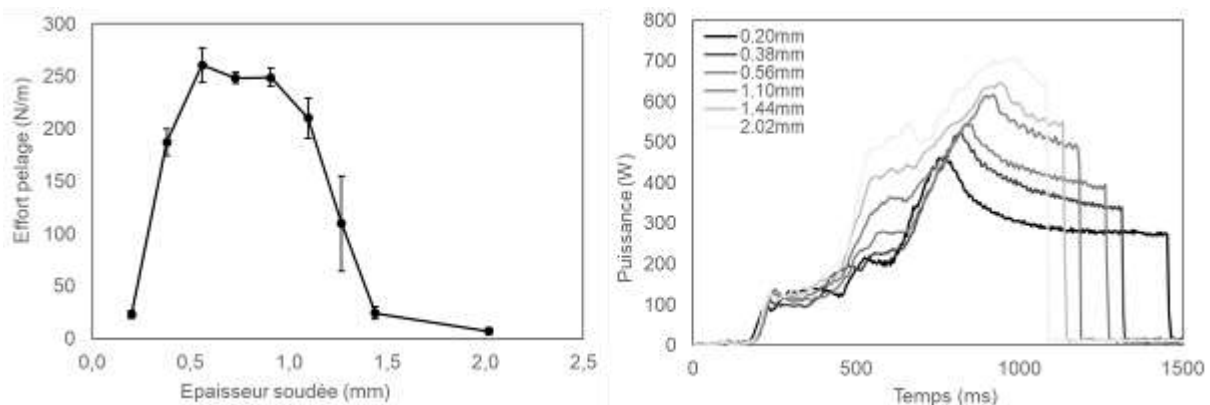


Figure 7 : Effort de pelage en fonction de l'épaisseur (gauche) et courbes de puissance associées (droite) pour des échantillons soudés recto sur recto en utilisant l'enclume n°2. L'épaisseur des échantillons a été modifiée en positionnant le papier référence entre des couches de papier d'impression. Conditions de soudage : effort 55 DaN, amplitude 100%, condition de fin 250 J.

Il est à noter que la réponse en puissance de la machine est affectée par le changement d'épaisseur provoqué par la pile. Les valeurs de  $P_m$  sont en effet différentes pour les trois plus faibles épaisseurs (466, 526, and 546 W) (Figure 7) ce qui pourrait expliquer en partie le comportement mécanique des joints soudés. Nous avons donc reproduit cette expérience en ajustant l'effort de soudage pour obtenir des  $P_m$  identiques pour ces 3 épaisseurs. Les mêmes résultats ont été obtenus, ce qui tend à confirmer qu'un effet induit par l'épaisseur existe.

L'épaisseur semble donc être un paramètre pouvant hautement affecter les performances au soudage, en particulier quand l'épaisseur de l'assemblage à souder se rapproche de l'amplitude de vibration. Il semble qu'il y ait une épaisseur critique au-delà de laquelle l'efficacité du procédé est dégradée (0.5 mm dans notre cas). Dans de telles conditions, nous supposons qu'il devient difficile de convertir l'énergie acoustique fournie au système en chaleur à l'interface. En particulier, nous pensons que la plupart du travail mécanique est transmis directement à l'enclume. En augmentant artificiellement l'épaisseur, le rendement du soudage s'améliorerait permettant ainsi une meilleure conversion de l'énergie mécanique en chaleur. Ce phénomène pourrait également exister pour les films thermoplastiques, mais il est probable que la meilleure soudabilité des polymères ait tendance à effacer ces effets liés au procédé. Dans notre cas, l'effet d'épaisseur a été compensé par la modification de la surface de soudage. Les performances mécaniques présentées dans la section 3.1 ont été obtenues à l'aide de l'enclume n°1 qui permet d'obtenir des surfaces de soudage plus petites. Nous supposons que

la réduction de la surface (environ d'un facteur 20) entraîne une forte augmentation de la pression à la l'interface ce qui permet de compenser cet effet d'épaisseur. Nous pensons également que ce phénomène peut être géré par d'autres stratégies comme le dimensionnement d'ensembles acoustiques adaptés aux épaisseurs très faibles, ou encore travailler avec des fréquences plus élevées. Ces sujets mériteraient d'être approfondis, tout comme l'étude de la réponse mécanique dans l'épaisseur des matériaux fins sous sollicitations ultrasonores.

Néanmoins, l'épaisseur reste un point critique concernant le soudage US des papiers. Dans le domaine de l'emballage, il est commun de travailler avec des épaisseurs de moins de 100  $\mu\text{m}$ . Jusqu'ici, l'influence de ce paramètre n'a pas été beaucoup discutée dans la littérature, même pour l'assemblage de polymères [16-18]. Les phénomènes observés par les auteurs de ces travaux sont assez éloignés de nos observations bien qu'encore une fois, il est fortement probable que la bonne soudabilité des matériaux thermoplastiques tende à masquer cet effet d'épaisseur.

## 4 Conclusion

Le soudage US des papiers est un procédé très sensible. Ceci est principalement dû au fait que les papiers sont plus difficiles à souder que les polymères. Il semblerait que le réseau fibreux joue le rôle de support pour le couchage qui serait le principal élément contribuant au développement de l'adhésion à l'interface de soudage. L'assemblage de papiers par soudage US semble se résumer à une double condition: trouver des paramètres de soudage optimisés pour fournir au système vibrations acoustiques et donc chaleur à l'interface, et avoir des propriétés de surface permettant le développement de l'adhésion. Donc l'optimisation du procédé est une condition obligatoire pour pouvoir souder du papier. Cela confirme aussi la pertinence de la stratégie de séparer les contributions du procédé et des matériaux compte tenu du caractère hybride du soudage.

Les paramètres influents le plus sur les propriétés mécaniques des papiers soudés sont la puissance fournie par le générateur haute fréquence et l'épaisseur de l'assemblage. La puissance est une donnée clé renseignant la sévérité du procédé, qui pourrait être définie comme la quantité d'énergie par unité de volume reçue en instantané à l'interface de soudage. C'est un paramètre de sortie du procédé, mais qui peut être facilement ajusté en modifiant l'effort de soudage ou l'amplitude des vibrations. Enfin l'épaisseur semble être un enjeu important, étant donné qu'une chute des performances mécaniques des joints soudés est observée aux faibles épaisseurs. Cet effet est attribué à une diminution du rendement de conversion des vibrations en chaleur à l'interface quand l'épaisseur de l'assemblage à souder devient trop faible.

Globalement, l'instrumentation du dispositif de soudage et la démarche expérimentale mise en place dans cette étude ont porté leur fruit. Une meilleure compréhension du procédé de soudage US appliqué aux papiers a été permise par la mise en lien entre paramètres procédé et propriétés mécaniques des joints soudés. Le dispositif instrumenté est un outil efficace pour étudier par l'expérimentation le comportement au soudage US des papiers.

## Références

- [1] H. Potente, Ultrasonic Welding - Principles & Theory, Materials & Design, (1984), 5(5), 228. DOI:10.1016/0261-3069(84)90032-3

- [2] M.N. Tolunay, P.R. Dawson, K.K. Wang, Heating and bonding mechanisms in ultrasonic welding of thermoplastics, *Polymer Engineering & Science*, (1983), 23(13), 726. DOI:10.1002/pen.760231307
- [3] A. Benatar, R.V. Eswaran, S.K. Nayar, Ultrasonic Welding of Thermoplastics in the Near-Field, *Polymer Engineering & Science*, (1989), 26(23), 1689. DOI:10.1002/pen.760292311
- [4] A. Benatar, Z. Cheng, Ultrasonic Welding of Thermoplastics in the Far-Field, *Polymer Engineering & Science*, (1989), 26(23), 1699. DOI:10.1002/pen.760292312
- [5] Z. Zhang, X. Wang, Y. Luo, Z. Zhang, L. Wang, Study on Heating Process of Ultrasonic Welding for Thermoplastics, *Journal of Thermoplastic Composite Materials* (2010), 23, 647. DOI:10.1177/0892705709356493
- [6] B. Stamm, Development of friction welding of wood – physical, mechanical and chemical studies, Thèse, EPF Lausanne, Suisse, 2005.
- [7] B. Gfeller, M. Zanetti, M. Properzi, A. Pizzi, F. Pichelin, M. Lehmann, L. Delmotte, Wood bonding by vibrational welding, *Journal of Adhesion Science and Technology* (2003), 17(11), 1573. DOI:10.1163/156856103769207419
- [8] J.-M. Leban, A. Pizzi, S. Wieland, M. Zanetti, M. Properzi, F. Pichelin, X-ray microdensitometry analysis of vibration-welded wood, *Journal of Adhesion Science and Technology* (2004), 18(6), 673. DOI:10.1163/156856104839310
- [9] C. Ganne-Chedeville, M. Properzi, A. Pizzi, J.M. Leban, F. Pichelin, Parameters of wood welding: study with infrared thermography, *Holzforschung*, (2006), 60, 434. DOI:10.1515/HF.2006.068
- [10] L. Delmotte, C. Ganne-Chedeville, J.M. Leban, A. Pizzi, F. Pichelin, CP-MAS 13C NMR and FT-IR investigation of the degradation reactions of polymer constituents in wood welding, *Polymer Degradation and Stability* (2008), 93, 406. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.020
- [11] C. Ganne-Chedeville, M. Properzi, J.M. Leban, A. Pizzi, F. Pichelin, Wood Welding: Chemical and Physical Changes According to the Welding Time, *Journal of Adhesion Science and Technology* (2008), 22, 761. DOI:10.1163/156856108X295392
- [12] A. Regazzi, J. Viguie, B. Harthong, P. Dumont, D. Imbault, R. Peyroux, M. Rueff, Q. Charlier, D. Guerin, L. Leroy, M. Krouit, M. Petit-Conil, Ultrasonic welding of 100% lignocellulosic papers, *Journal of Materials Science* (2019), 54, 12938. DOI:10.1007/s10853-019-03763-7
- [13] Q. Charlier, J. Viguie, B. Harthong, JB Toni, M. Terrien, D. Imbault, R. Peyroux, Experimental investigation and process optimization of the ultrasonic welding applied to papers, *Materialwiss Werkstofftech* (2021) 52, 891-906. DOI:10.1002/mawe.202100031
- [14] C. Monot, J. Viguie, Q. Charlier, J. Bras, D. Guérin, B. Harthong, D. Imbault, R. Peyroux, M. Rueff, L. Leroy, M. Caron, Ultrasonic Welding of Folding Boxboards, *BioResources* (2021), 16(3), 5766-5779.
- [15] F. Lionetto, M. Nicolas Morillas, S. Pappadà, G. Buccoliero, I. Fernandez Villegas, A. Maffezzoli, Hybrid welding of carbon-fiber reinforced epoxy-based composites, *Composites, Part A* (2018), 104, 32. DOI:10.1016/j.compositesa.2017.10.021
- [16] J. Vogel, D. Grewell, M. Kessler, D. Drummer, M. Menacher, Ultrasonic and Impulse Welding of Polylactic Acid Films, *Polymer Engineering & Science* (2011), 51(6), 1059. DOI:10.1002/pen.21919
- [17] S. Volkov, I. Garanin, Y. Khopolov, Ultrasonic welding of artificial leather with simultaneous surface stamping, *Weld Welding International* (1998), 12(1), 76. DOI:10.1080/09507119809448974
- [18] M. Nase, S. Bach, A. Zankel, J.P. Majschak, W. Grellmann, Ultrasonic Sealing Versus Heat Conductive Sealing of Polyethylene/Polybutene-1 Peel Films, *Journal of Applied Polymer Science* (2013), 130, 383. DOI:10.1002/app.39171