

Influence des effets dynamiques et thermiques sur l'assemblage par clouage

Étude numérique et expérimentale

Fabien Goldspiegel^{1,2,*}, Philippe Michel², Jean-Baptiste Blumenfeld², Jean-Baptiste Oszenda², et Katia Mocellin¹

¹ CEMEF Mines ParisTech, PSL Research University, CNRS 7635, 06904 Sophia Antipolis, France

² RENAULT Technocentre, 1 Avenue du Golf, 78288 Guyancourt, France

Reçu le 11 octobre 2017 / Accepté le 21 septembre 2018

Résumé. L'assemblage par clouage de deux tôles d'acier est présenté au moyen d'une approche numérique et expérimentale. Un modèle de l'étape d'assemblage est réalisé et confronté aux données expérimentales pour différents paramétrages de la machine. La simulation est ensuite utilisée pour l'évaluation des phénomènes locaux observés au sein des tôles, tels que les modes de rupture et les élévations de température.

Mots clés : assemblage grande-vitesse / assemblage matériaux hybrides / simulation numérique / hautes vitesses de déformation / température adiabatique

Abstract. Thermal and dynamical effects in the high-speed nailing process: Numerical and experimental studies. High-speed nailing process is investigated through a coupled numerical and experimental approach in a superposition made of two steel layers. Finite element simulations of the joining stage are run at different joining pressure settings and compared to experiments. An insight into local phenomena that sheets are undergone during the nail insertion is also given by simulation, such as sheets failure modes and the thermal increase.

1 Contexte

Les politiques environnementales de réduction des émissions de CO₂ affectent désormais tous les grands secteurs industriels. L'automobile cherche pour sa part à atteindre ses objectifs, principalement par la voie de l'allègement. L'une des stratégies envisagée consiste en l'introduction de matériaux plus diversifiés dans la structure du véhicule [1] : aciers haute résistance, alliages d'aluminium, de magnésium, composites...

En raison d'incompatibilités physico-chimiques, l'intégration massive de ces matériaux dans le véhicule conduit à des configurations non soudables. L'assemblage de ces matériaux par déformation plastique – qui est resté jusqu'à présent très marginal chez la plupart des constructeurs – tend à devenir la solution privilégiée [2,3]. Les procédés classiques de rivetage, clinchage, sertissage sont bien connus et maîtrisés à échelle industrielle. En revanche, des procédés d'assemblages innovants et prometteurs font leur apparition sur les lignes de production mais restent encore peu étudiés : le fluo-vissage, le clouage grande

vitesse... Ces techniques exploitent les propriétés thermiques et dynamiques des matériaux pour étendre la capacité d'assemblage au-delà des procédés traditionnels [4].

Le clouage présente ainsi plusieurs avantages sur les autres procédés par déformation plastique :

- l'assemblage des pièces ne nécessite l'accès que par un seul côté ;
- aucun pré-trou n'est requis ;
- le temps de cycle est de l'ordre 20 ms ;
- des aciers à très hautes résistances peuvent être assemblés.

Toutes ces propriétés en font un procédé industriel attractif mais qui nécessite d'être davantage exploré, expérimentalement et numériquement, avant son déploiement à grande échelle.

La présente étude a ainsi pour but d'utiliser ces deux moyens, expérimentaux et numériques, afin d'enrichir la compréhension du procédé par des données thermomécaniques locales que seule la simulation est en mesure d'apporter. Cette approche se place dans une démarche globale visant à relier les conditions de tenues mécaniques en service aux conditions choisies pour réaliser l'assemblage.

* e-mail: fabien.goldspiegel@mines-paristech.fr

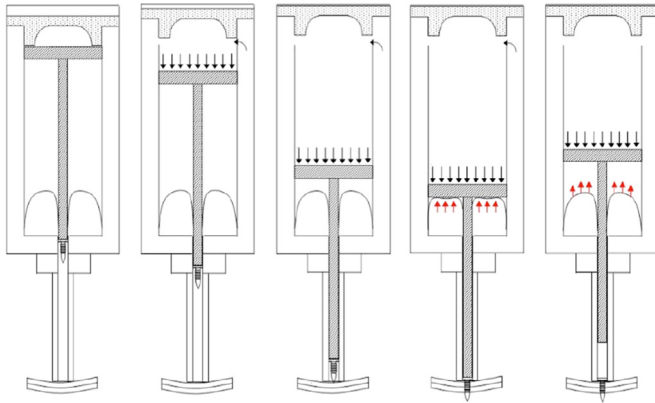


Fig. 1. Principales étapes d'assemblage.

Fig 1. Main joining steps.

2 Clouage : principe du procédé d'assemblage

2.1 Principe de fonctionnement

La machine de clouage consiste en un dispositif pneumatique dans lequel un piston peut se déplacer librement au sein d'une chambre. Le démarrage de la phase d'assemblage enclenche l'ouverture d'une valve de la chambre principale. De l'air sous pression pénètre ainsi dans la chambre et accélère le piston vers le bas. Un clou est positionné à la pointe du piston. Avant que celui-ci ait parcouru la totalité de la chambre, le clou entre en contact avec les tôles. L'inertie du piston permet la progression du clou dans les tôles jusqu'à ce que la limite basse de la chambre soit atteinte. L'énergie cinétique résiduelle du piston est alors dissipée par la présence d'un amortisseur, situé en butée basse (Fig. 1).

2.2 Paramètre pilotant l'assemblage : la vitesse

Ce procédé se distingue des moyens d'assemblage traditionnels par la grande vitesse d'insertion du clou. Contrairement au rivetage où cette insertion se fait à vitesse constante – au moyen de puissants vérins hydrauliques – le clouage s'effectue avec une énergie d'assemblage fixe. Le piston-poussoir doit être porté à une vitesse suffisamment importante pour fournir l'énergie nécessaire au clou pour traverser les tôles. L'assemblage est donc caractérisé par un seul paramètre : la pression d'air insérée dans la chambre. Pour le moment, l'estimation de ce paramètre reste très problématique car elle impose un nombre d'essais important, généralement entre 4 et 7, selon les configurations matériaux. En effet, la pression est augmentée progressivement d'un essai à l'autre jusqu'à ce que la pénétration totale du clou soit constatée. La tête du clou devant être à l'affleurement de la tôle supérieure. Au-delà, l'enfoncement supplémentaire risque de générer une flexion trop importante des tôles, provoquer l'écartement des tôles autour du clou et dégrader la cohésion à l'interface.

La figure 2 met en évidence l'importance de ce paramètre sur le parcours du piston : pour une pression de 7 bars le piston parcourt une distance plus importante qu'à 5 bars. Sa progression est donc limitée par l'énergie

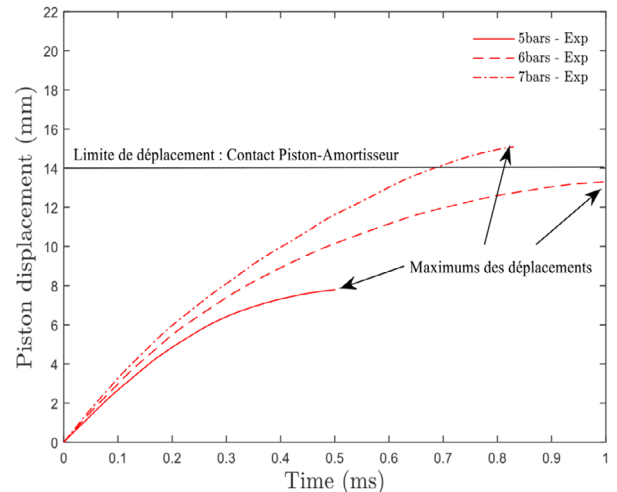


Fig. 2. Courbes de déplacement du piston pour un assemblage acier/acier à 3 différentes pressions d'assemblage (5, 6 et 7 bars).

Fig 2. Piston displacement curves in steel/steel configuration at three different joining pressure (5, 6 and 7 bars).

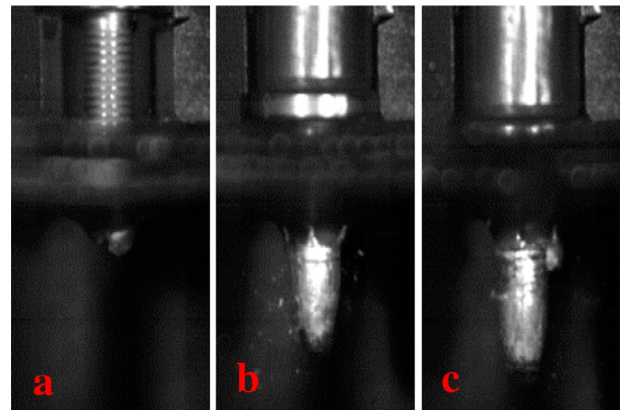


Fig. 3. État final pour 3 pressions d'assemblages différentes : (a) 5 bars ; (b) 6 bars ; (c) 7 bars.

Fig 3. Final state of joints processed at (a) 5 bars, (b) 6 bars and (c) 7 bars.

disponible au départ, à l'impact. Ce même écart se retrouve plus localement, au niveau de l'état de progression du clou au sein des tôles (Fig. 3).

À 5 bars, les tôles sont partiellement perforées ; à 6 bars, le clou n'a pas progressé jusqu'au bout ; à 7 bars, le clou est parfaitement inséré dans les tôles.

3 Modélisation numérique du clouage

3.1 Présentation du modèle

Un modèle numérique axisymétrique de la phase de clouage est réalisé avec le logiciel d'éléments finis Forge[®]. Les chargements et conditions limites propres au procédé industriel sont appliqués au piston afin de simuler le clouage de deux tôles d'acier DP780 (1,5 mm d'épaisseur)

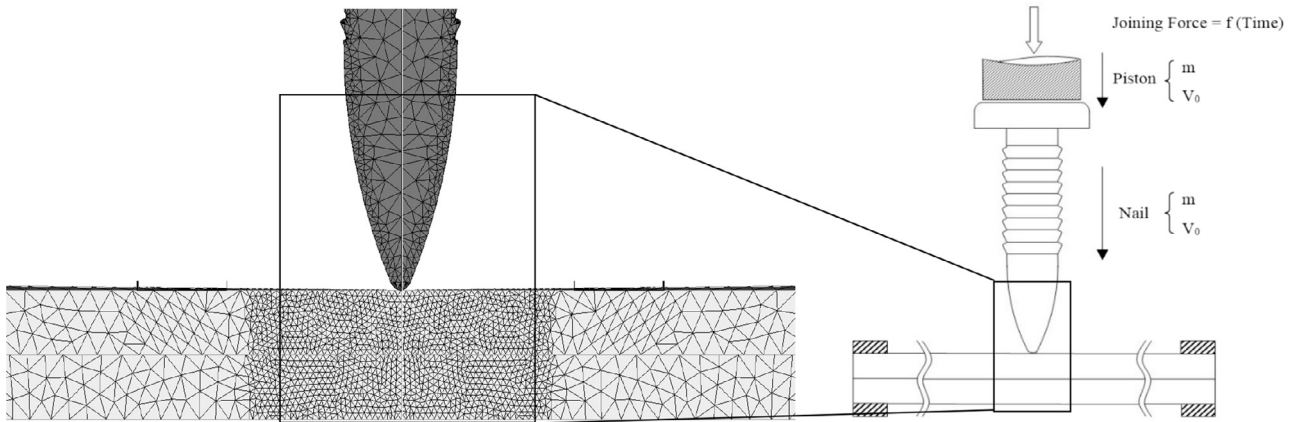


Fig. 4. Modèle numérique du clouage réalisé sous Forge[®] : chargements et conditions limites.

Fig 4. Finite element model of the high-speed nailing under Forge[®] software: boundary and loading conditions.

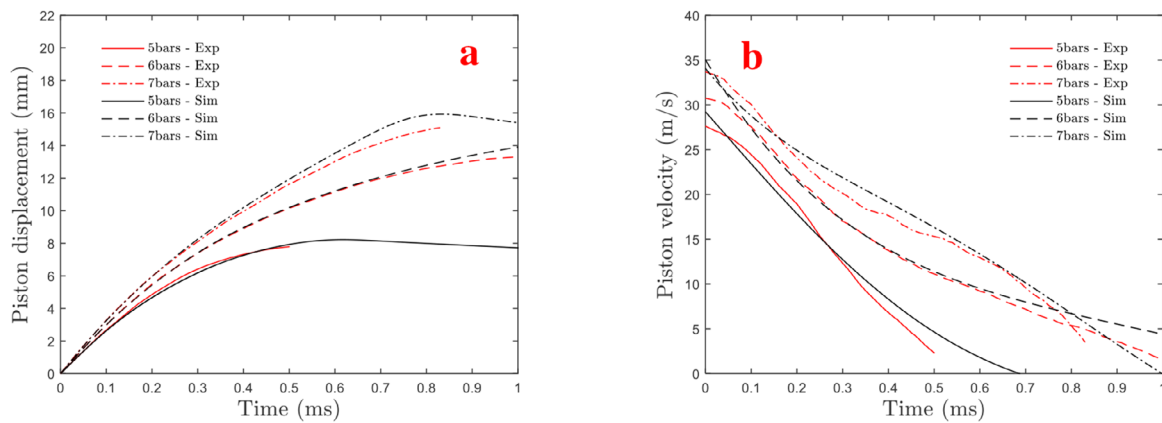


Fig. 5. Comparaison Exp vs. Num de la simulation du clouage pour 3 pressions différentes. a : déplacement vs. temps ; b : vitesse vs. temps.

Fig 5. Comparison between experimental and numerical joining conducted at three different pressure. a: piston displacement vs. time; b: piston velocity vs. time.

au plus proche des conditions expérimentales. Les tôles sont ainsi encastrées sur les bords laissant un diamètre libre de 30 mm et des conditions de vitesse initiale et de force sont imposées au piston. Celui-ci est considéré élastique pour que sa position et sa vitesse soit réactualisées à chaque incrément de calcul et que l'aspect dissipatif du procédé soit effectif. Un soin particulier a été apporté à la caractérisation des propriétés mécaniques du clou et de la tôle pour attester du comportement sous sollicitations dynamiques et prédire la rupture sous chargements complexes. Ceci a été davantage détaillé dans [5]. Une loi de comportement du type Johnson-Cook [6] et un critère d'endommagement couplé, du même nom [7], sont appliqués à la tôle. La figure 4 donne une vue synthétique du modèle utilisé.

Afin d'évaluer la validité de la simulation, deux approches sont présentées : la première consiste à comparer les mouvements du piston au cours de l'assemblage, seule donnée mise à disposition pour le suivi-process ; la seconde à comparer l'état de déformation et le faciès de rupture des tôles et du clou.

3.2 Validation du modèle : comparaison de la cinématique du piston

Le déplacement et la vitesse du piston, pour les trois configurations simulées (Fig. 5), sont dans une large mesure en accord avec les données expérimentales. La perte de vitesse due à l'impact et à la pénétration des tôles est bien capturée par le modèle et chaque courbe peut être distinguée des autres.

Cela signifie que pour une énergie cinétique donnée – une pression d'air insérée dans la chambre – le piston suit un parcours unique durant toute la phase d'assemblage. Un essai simulé avec une pression insuffisante pour le clouage peut donc être prédit par le modèle (voir Fig. 5 – Essai 5 bars) dans la mesure où l'énergie cinétique du piston y est cédée aux tôles sous forme de travail plastique. Dans ce cas, il serait donc cohérent de retrouver le clou que partiellement enfoncé dans les tôles. On observe en revanche certains écarts locaux entre les courbes numériques et expérimentales, sur la fin du procédé, qui correspondent à la phase de descente du clou dans les tôles et du contact

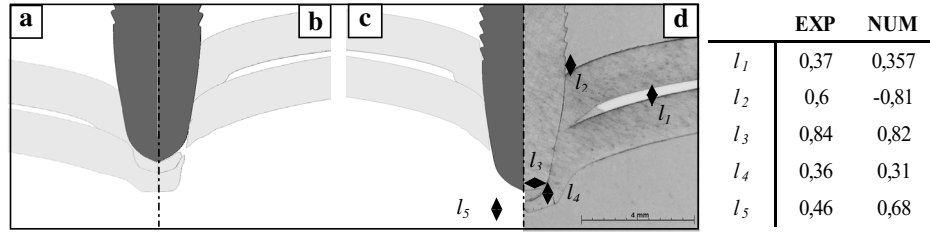


Fig. 6. Comparaison visuelle Exp vs. Num du clouage acier/acier à 5 bars (clou pris comme référence). a: $t_{\text{NUM}} = 0,237$ ms; b: $t_{\text{NUM}} = 0,378$ ms; c: État final NUM; d: État final EXP.

Fig 6. Visual comparisons between experimental and numerical steel/steel joints processed at 5 bars (nail geometry taken as the reference in the picture). a: $t_{\text{NUM}} = 0.237$ ms; b: $t_{\text{NUM}} = 0.378$ ms; c: NUM final state; d: EXP final state.

		Essai à 5 bars		Essai à 6 bars		Essai à 7 bars	
		EXP	NUM	EXP	NUM	EXP	NUM
Coupon	r_1	0,9	0,82	0,92	0,87	0,925	0,85
Tôle Sup	h_1	0,78	0,74	0,91	0,96	0,92	0,96
Coupon	r_2	0,85	0,95	0,95	0,85	0,85	0,92
Tôle Inf	h_2	1,13	1,32	0,97	1,16	1,12	1,64

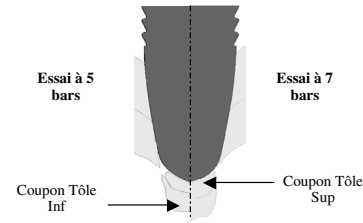


Fig. 7. Comparaison Exp vs. Num des géométries de coupons (rayon r ; hauteur h) dissociés des tôles.

Fig 7. Comparisons between experimental and numerical ejected plug geometry (radius r ; height h).

prolongé avec les stries du clou. Les propriétés de frottement à l'interface, les propriétés mécaniques locales des stries du clou ou même l'état d'endommagement des tôles pourraient en être la cause principale.

mesurées sur le coupon de la tôle inférieure permettent de valider l'ordre de grandeur obtenu dans la simulation et confirmer d'une cohérence dans le volume de matière retiré lors de la phase d'assemblage.

3.3 Validation du modèle : comparaison visuelle

La figure 6 présente une comparaison visuelle d'une configuration de clouage non traversant. Le résultat est globalement satisfaisant et rend compte de la déformation du clou, du fléchissement global des tôles, de l'écart résiduel restant entre elles, de la géométrie des coupons se détachant des tôles supérieures et inférieures ainsi que de la profondeur de pénétration de l'ogive. Les écarts mesurés les plus importants concernent la profondeur de pénétration de l'ogive, notée l_2 dans la figure 6, et l'épaisseur du coupon de la tôle inférieure, notée l_5 .

Cette analyse visuelle peut être étendue aux autres configurations de clouage mentionnées précédemment, à savoir 5 bars, 6 bars et 7 bars. Dans la figure 7, les coupons qui se sont désolidarisés du reste des tôles supérieures et inférieures au passage du clou sont mesurés, et comparés à ceux issus de l'expérience. On constate ainsi que les coupons, de forme cylindrique, voient leurs géométries évoluer avec la pression d'assemblage de l'essai. Par exemple, l'épaisseur h_1 augmente significativement de 5 à 7 bars. La vitesse d'impact a donc une influence sur la quantité de matière emportée au passage du clou. En revanche, pour la tôle inférieure, il est plus délicat de conclure : (1) le coupon reste généralement accroché à la tôle, ce qui rend la mesure difficile et peu répétable ; (2) la nature dynamique du procédé amène des dispersions qui nécessiterait une grosse quantité d'essais pour l'obtention d'une valeur moyenne. À défaut de précision, les valeurs

4 Analyse thermo-mécanique : simulation

La simulation numérique permet d'évaluer localement l'échauffement subi par les tôles au cours de la phase d'assemblage. La figure 8 présente ainsi, pour trois niveaux de pénétration du clou, le champ de température. Étant donné la rapidité du procédé (on atteint localement $10\,000\text{ s}^{-1}$), les mécanismes de transfert thermiques ne peuvent contrecarrer l'évolution locale de température. Ceci est mis en évidence dans [8] au moyen du nombre de Fourier qui permet d'évaluer dans quelles proportions les échanges thermiques ont lieu. Dans le cas présent, ce nombre bien supérieur à l'unité atteste que l'hypothèse d'adiabaticité est valide pour l'acier (ceci n'est pas forcément vrai pour un alliage d'aluminium). La température peut donc être calculée à partir du seul travail plastique.

Les grandes déformations plastiques observées en pointe de clou et dans les coupons amènent à des températures qui dépassent localement 600°C . À l'interface avec le clou, on observe une température plus importante dans la tôle supérieure, dans la zone la plus soumise au passage des stries, que dans la tôle inférieure. Cette différence peut s'expliquer par le fait que les deux tôles subissent une histoire thermomécanique très différente au cours du temps. En effet, après la perforation des tôles, on observe dans la figure 9 que les deux tôles sont dans un état de contrainte très différent : la tôle inférieure

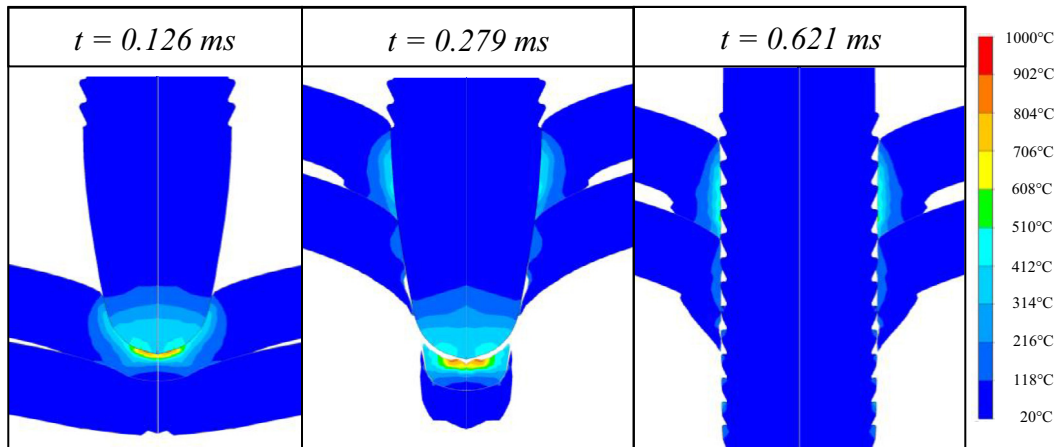


Fig. 8. Champ de température $T_{\text{adiabatique}}$ au cours d'un assemblage acier (1,5 mm)/acier (1,5 mm) à 7 bars.

Fig 8. Adiabatic temperature field $T_{\text{adiabatic}}$ during the joining stage of a steel (1.5 mm)/steel (1.5 mm) configuration run at 7 bars.

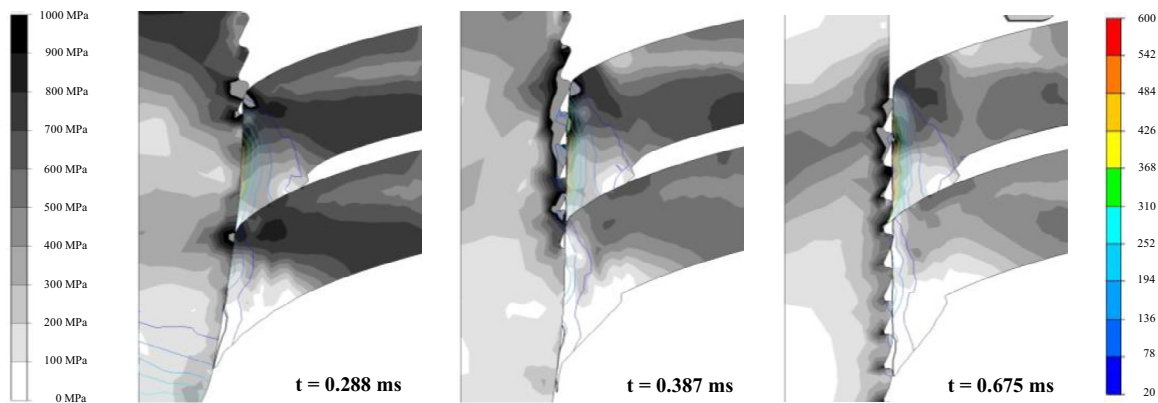


Fig. 9. État thermomécanique après la perforation des tôles et jusqu'au passage des dernières stries. Échelle blanc-noir : contrainte équivalente (MPa) ; échelle bleu-rouge : température adiabatique ($^{\circ}\text{C}$).

Fig 9. Thermomechanical state of the sheets after being perforated and during the nail ridges' descent black-white colorscale: equivalent stress (MPa); blue-red colorscale: adiabatic temperature ($^{\circ}\text{C}$).

présente des contraintes adoucies en raison de mécanismes de rupture favorisés pendant le clouage par les hautes triaxialités. Dans la tôle supérieure, un état de compression a permis de limiter l'adoucissement des contraintes : dans la [figure 9](#), la couleur à l'interface tend davantage vers le noir.

Au fur et à mesure de la descente du clou, les stries déforment l'interface des tôles par frottement.

Un travail plastique plus important sera donc généré dans la tôle supérieure favorisant l'échauffement.

5 Analyse thermo-mécanique : expérience

Afin d'évaluer la cohérence des résultats thermiques observés dans la simulation de clouage, des essais expérimentaux de mesures infra-rouges IR ont été conduits sur la plateforme d'assemblage de l'IRT M2P de Metz. Une caméra IR SC7600 a été utilisée pour effectuer les mesures de température pendant le clouage de deux tôles d'acier de 1,5 mm d'épaisseur, avec une pression machine de 7 bars.

Étant donné la rapidité du procédé et la mobilité de la surface sur laquelle la mesure est effectuée, nous avons choisi un accès par le dessous des tôles, au moyen d'un miroir de renvoi ([Fig. 10](#)).

La tôle inférieure a été préalablement peinte en noir de manière à conserver une émissivité la plus proche possible du corps noir théorique. Les quatre essais présentés ici ont été menés en fenêtrant graduellement le champ visuel de manière à augmenter la fréquence d'acquisition de la caméra.

On remarque que la température maximale mesurée augmente avec la fréquence d'acquisition ([Fig. 11](#)). Ainsi, un plus grand nombre d'images augmente la probabilité de mesurer un pic de température.

Le fenêtrage minimum de la caméra – 48×64 pixels – a permis d'atteindre la fréquence maximum de 2577 images/secondes, soit une à deux images sur toute la phase d'assemblage. La température maximum mesurée est ainsi de 450°C , dans la zone qui semble correspondre à l'ogive du clou.

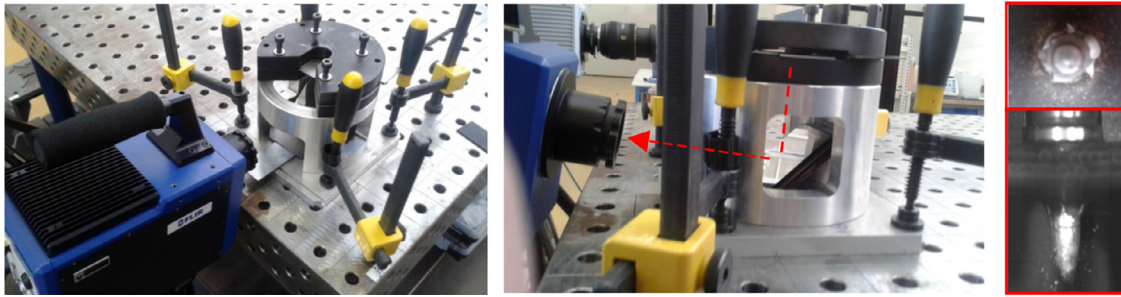


Fig. 10. Dispositif expérimental de mesures thermiques avec caméra IR, système de maintien des tôles avec accès par le côté et par dessous.

Fig 10. Experimental set-up used for thermal measurement with IR camera and sheets clamping device with access from beside and below.

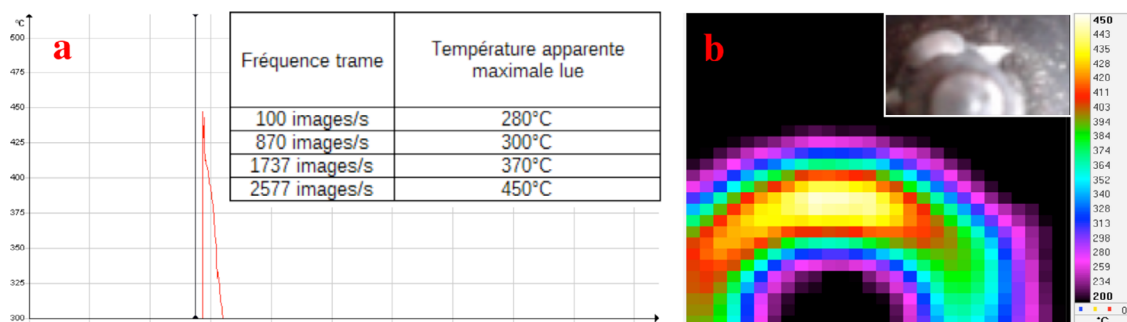


Fig. 11. Mesures infra-rouge réalisées pour différentes fréquences d'acquisition de caméra. a) Pic de température mesuré par caméra IR ; b) photo et image IR du clou vu du dessous à 2577 images/s.

Fig 11. Infra-red thermal measurements performed at four different recording frequencies. a) Pic's maximum temperature capture by camera; b) picture and associated IR picture from below the joining spot at 2577 frames/s.

Deux raisons portent à croire que la température réelle au sein des tôles est plus importante :

- l'émissivité de surface de la tôle s'écarte de celle d'un corps noir parfait au cours du clouage. La température vraie serait donc supérieure à la température apparente ;
- la fréquence d'acquisition ne permet pas la couverture de toute la phase de clouage. L'évènement thermique le plus important pourrait apparaître quelques instants avant ou après celui qui a été mesuré, sans pouvoir être détecté.

6 Conclusions

L'allègement des véhicules amène à une problématique d'assemblage ou le clouage peut s'avérer être une solution intéressante, pour sa rapidité d'exécution comme pour sa capacité à perforer tout type de matériaux. Cependant, son déploiement est encore limité par la faible connaissance et maîtrise industrielle du procédé et des paramètres influant la tenue mécanique du point d'assemblage.

La présente étude portait sur le clouage de deux tôles d'acier DP780, 1,5 mm d'épaisseur chacune, assemblées à différentes pressions machine. Les étapes d'assemblage ainsi que les courbes procédées ont été détaillées au moyen d'images obtenues par caméra rapide. Un modèle numérique du clouage a ensuite été présenté et ses résultats confrontés à trois cas expérimentaux, à savoir 5, 6 et 7 bars.

Un niveau de corrélation satisfaisant est obtenu par le modèle, qui atteste à la fois de la cinématique d'assemblage suivie par le piston pendant l'assemblage ainsi que par la similitude des phénomènes de déformation et de rupture observés à l'échelle du clou et des tôles. Ceci nous conforte dans l'idée que la simulation numérique est un outil puissant, capable de fournir un premier niveau d'informations concernant la faisabilité d'un assemblage cloué – pénétration partielle ou totale du clou, déformation extrême du clou... – sans pour le moment disposer d'un niveau de précision encore suffisant pour être complètement exempté d'essais expérimentaux de validation.

Le clouage étant par nature un procédé qui induit de la rupture, le volume des coupons de matière éjecté par le clou, vu dans la simulation, s'est montré en accord avec l'ordre de grandeur mesuré par microscopie. Les résultats de simulation ont ainsi permis de mettre en évidence les zones soumises aux plus fortes élévations de températures. L'analyse mécanique locale a montré une prédisposition à l'échauffement au niveau de l'interface tôle supérieure-clou, pas retrouvé à l'interface avec la tôle inférieure en raison d'un adoucissement des contraintes lors de l'étape de perforation des tôles.

Des essais de clouage, réalisés avec une caméra infra-rouge, ont montré des niveaux de température en cohérence avec les résultats observés dans la simulation numérique. La fréquence d'acquisition limite de la caméra atteinte – à

savoir 2577 images/seconde – et la variation de l'émissivité de surface pendant l'assemblage portent à croire que cette température est bien supérieure à celle mesurée. Cette approche numérique-expérimentale permet de mieux comprendre les phénomènes qui permettent la rentrée du clou dans les tôles, et idéalement, de pouvoir envisager de les relier aux propriétés mécaniques finales de l'assemblage en service

Remerciements. Ce travail est financé par la société Renault, dans le cadre d'une thèse CIFRE, en partenariat avec le laboratoire CEMEF Mines ParisTech. Les essais se sont déroulés à l'IRT M2P, sur la plateforme dédiée à l'assemblage mécanique gérée par M. Mangin, avec l'aide de M. Marchal et de Mme Aslan.

References

1. G. Meschut, V. Janzen, T. Olfermann, Innovative and highly productive joining technologies for multi-material lightweight car body structures, *J. Mater. Eng. Perform.* **23**(5), 1515 (2014)
2. K. Mori, N. Bay, L. Fratini, F. Micari, A.E. Tekkaya, Joining by plastic deformation, *CIRP Ann. Manuf. Technol.* **62**(2), 673 (2013)
3. G. Meschut, M. Matzke, R. Hoerhold, T. Olfermann, Hybrid technologies for joining ultra-high-strength boron steels with aluminum alloys for lightweight car body structures, *Procedia CIRP* **23**, 19 (2014)
4. M. Jäckel, C. Kraus, T. Kropp, Effects of increased tool velocity on mechanical joining of steel and aluminum sheet metals, *Procedia CIRP* **23**, 24 (2014)
5. F. Goldspiegel, K. Mocellin, P. Michel, Numerical simulation of high-speed nailing process, presented at the 20th International ESAFORM Conference on Material Forming (ESAFORM 2017), Dublin, Ireland, 1983, **1896**(1), <https://doi.org/10.1063/1.5008138>
6. Johnson and Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and temperatures, 7th Symp. Ballist. Haye, 1983, pp. 541–547
7. Johnson and Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Eng. Fract. Mech.* **21**(1), 31 (1985)
8. E. Felder, Effet thermique de la mise en forme – Theorie et phénomènes volumiques, *Tech. Ing.* **M3012** (2001)

Citation de l'article : Fabien Goldspiegel, Philippe Michel, Jean-Baptiste Blumenfeld, Jean-Baptiste Oszenda, Katia Mocellin, Influence des effets dynamiques et thermiques sur l'assemblage par clouage, *Matériaux & Techniques* **106**, 305 (2018)