

Optimisation et caractérisation d'un assemblage hybride Polymère/Acier

F. Le Poulain^a, C. Guéret^b, R. Créac'hcadec^b

a. Université de Bretagne Occidentale, Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL), UMR CNRS 6027, F-29200 Brest, franck.lepoulain@univ-brest.fr

b. ENSTA Bretagne, Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL), UMR CNRS 6027, F-29200 Brest, gueret.clement@hotmail.com, romain.creac'hcadec@ensta-bretagne.fr

Résumé :

Pour réduire les dépenses énergétiques dans le domaine des transports, une solution consiste à alléger les structures en remplaçant les matériaux par d'autres ayant une résistance spécifique plus élevée. Cela entraîne forcément des assemblages de type métal/polymère. Actuellement le collage est le procédé le plus utilisé mais d'autres procédés d'assemblage direct sont en plein développement. L'objectif de cette étude est d'optimiser un assemblage hybride polyamide/acier obtenue sous pression à chaud et de le caractériser mécaniquement à l'aide de l'essai de cisaillement sur substrats épais TAST pour le comparer au collage. Nous avons étudié deux assemblages PA66/acier et PA12/acier. Dans un premier temps un plan d'expérience a été réalisé pour voir quels sont les paramètres qui ont la plus grande influence sur le comportement du joint. Nous avons montré que la vitesse de refroidissement et la température de chauffe sont les paramètres majeurs. Nous avons ensuite déterminé les paramètres optimaux du process. Nous avons montré qu'il est nécessaire d'atteindre la pyrolyse du polymère et d'avoir la vitesse de refroidissement la plus rapide pour obtenir les résultats optimaux. Nous avons également montré que ce type d'assemblage permet d'obtenir des valeurs de contraintes de cisaillement à rupture similaires avec celles des assemblages collés.

Abstract :

One way to reduce energy costs in public transport is to lighten the structures by replacing materials with others with a higher specific resistance. This necessarily leads to hybrid joints metal/polymer. Currently bonding is the most used process but other direct joining processes are in full development. The objective of this work is to optimize hot pressing polyamide/steel hybrid joints and test it mechanically using the Thick Adherend Shear Test to compare it to bonding. We studied two joints PA66 / steel and PA12 / steel. First, we investigated the influence of the process parameters using the design of experiments. We have shown that the cooling rate and the heating temperature are the major parameters. We then determined the optimal parameters of the process. We have shown that it is necessary to achieve polymer pyrolysis and have the fastest cooling rate for optimal results. We have also shown that this type of joining makes it possible to obtain similar shear stress values with bonded joints.

Mots clefs : assemblage hybride polymère/acier, assemblage sous pression à chaud, essai TAST

1 Introduction

Un des enjeux majeur aujourd'hui est la diminution de la consommation globale d'énergie dans tous les secteurs d'activités (aéronautique, automobile, ferroviaire...). Une solution consiste à alléger les structures en remplaçant les matériaux par d'autres ayant une résistance spécifique (rapport résistance / poids) plus élevée. Compte-tenu des coûts des matériaux composites par rapport au métal, une substitution complète du métal est peu probable. La plupart des applications nécessite un assemblage composite/métal qui ont des propriétés physiques et chimiques très différentes. Actuellement le collage et l'assemblage mécanique (boulonnage, rivetage) sont les techniques les plus répandues pour assembler les métaux avec les composites [1]–[3]. Ce sont des techniques sans apport de chaleur qui présentent chacune des inconvénients. Le collage nécessite une préparation des surfaces ainsi qu'un long traitement de durcissement. La tenue en température et les efforts transmissibles des assemblages collés restent faibles notamment pour les composites à matrice thermoplastiques. Le boulonnage et le rivetage nécessitent un perçage des matériaux ce qui augmente le coût, le poids ainsi que les concentrations de contrainte. Pour pallier ces inconvénients, de nouveaux procédés thermiques appartenant à la catégorie du soudage ont été développées. Cependant, ils ne permettent que l'assemblage de composite à matrice thermoplastique avec les métaux. Parmi ces techniques on peut noter le soudage laser [4], [5], le soudage par ultrasons [6], le soudage par friction (Friction lap welding et Friction Spot Joining) [7], [8], le soudage par induction [9] et l'assemblage sous pression à chaud [10], [11].

Chacune de ces techniques possède ses propres paramètres expérimentaux mais quel que soit le procédé d'assemblage l'objectif est d'apporter suffisamment de chaleur pour faire fondre le polymère et créer des liaisons entre le thermoplastique et le métal. Cependant les paramètres expérimentaux (temps, température, pression, vitesse de refroidissement,...) qui gouvernent les mécanismes d'adhésion sont mal compris et mal maîtrisés. L'objectif de cette étude est l'optimisation et la caractérisation d'un assemblage hybride polymère/acier sous pression à chaud afin de comprendre l'influence et le poids respectifs de différents paramètres qui interviennent dans le procédé d'assemblage.

2 Procédure expérimentale

Les matériaux utilisés sont des tôles d'acier S235 d'épaisseur 2mm et les polymères utilisés sont des plaques de polyamide 66 (PA66) et de polyamide 12 (PA12) d'épaisseur 2mm. Les principales différences sont que le PA66 a une résistance, une rigidité et une résistance à la température plus élevées ($T_f=260^\circ\text{C}$) que le PA12 ($T_f=180^\circ\text{C}$), mais il a une absorption d'eau plus élevée et une résistance chimique moindre. Dans cette étude nous étudions l'influence de la pression de contact entre le polymère et le métal. Lorsque que cette pression devient trop importante le polymère perd fortement de son épaisseur et l'essai de type simple recouvrement à substrat fin devient inutilisable. Nous utilisons donc l'essai TAST (Thick Adherend Shear Test) pour déterminer la résistance en cisaillement de l'assemblage. La géométrie des éprouvettes est donnée sur la figure 1.

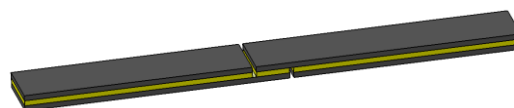
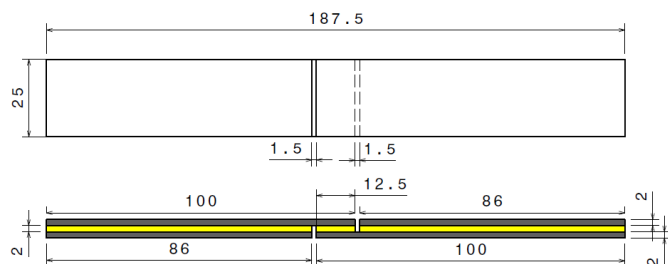


Figure 1 : Géométrie de l'essai TAST

Afin de garantir la répétabilité des résultats mécaniques, les échantillons de PA66 et PA12 sont étuvés pendant 24 heures à 80°C avant d'être assemblés. Les échantillons métalliques sont sablés avec du sable RUGOS 2000 de granulométrie 50/80 ce qui leur donne une rugosité moyenne $Ra=4,2\mu m$.

Les échantillons sont placés dans une presse hydraulique DK Technologies TCE qui possède une force de fermeture pouvant atteindre 40 tonnes. Cette presse hydraulique est composée de 2 plateaux chauffants qui peuvent atteindre une température maximale de 450°C. La température a été mesurée par thermocouple de type K placés au milieu de la surface inférieure et supérieure de l'acier dans le joint de recouvrement. Ces plateaux sont équipés d'un système de refroidissement pouvant varier entre une vitesse maximale de 25°C/min et une vitesse minimale de 2°C/min.

Les paramètres du procédé d'assemblage liés la presse chauffante sont la température de chauffe des plateaux, la pression exercée par la force de fermeture des plateaux, le temps de maintien et la vitesse de refroidissement.

Dans un premier temps nous utilisons un plan d'expérience à 4 facteurs (les 4 paramètres propres à la presse) et 2 niveaux (les bornes inférieures et supérieures de chaque paramètre), donc 16 essais différents pour avoir une première idée de l'influence des différents paramètres. A partir d'essais préliminaires et des études bibliographiques, nous avons fixé les bornes de chacun de ces paramètres :

- La température a été choisie pour varier entre 300 et 320 ° C. Celle-ci doit être au-dessus de la température de fusion pour permettre le changement d'état du polymère et ainsi créer des liaisons entre le polymère et l'acier,
- La pression exercée sur l'éprouvette varie entre une valeur de 0,5 et 2,1 MPa en faisant varier l'effort de fermeture des plateaux entre 0,25 et 1 tonne,
- Nous avons décidé de faire varier le temps de maintien à T max entre 2 minutes et 5 minutes,
- La vitesse de refroidissement varie entre une vitesse max de 25°C/min et une vitesse mini de 2°C/min.

Le tableau 1 recense la totalité des essais.

Essais	Température (°C)	Temps de maintien (min)	Pression (MPa)	Vitesse de refroidissement (°C/min)
1	300	5	0,55	2
2	300	2	2,1	2
3	320	5	0,55	2
4	320	2	2,1	2
5	320	2	0,55	25
6	300	2	0,55	2
7	320	2	0,55	2
8	320	5	2,1	2
9	300	5	0,55	25
10	300	2	2,1	25
11	300	5	2,1	25
12	300	2	0,55	25
13	320	2	2,1	25
14	320	5	2,1	25
15	300	5	2,1	2
16	320	5	0,55	25

Tableau 1 : Plan d'expérience

Pour chaque essai, 3 éprouvettes sont réalisées. Les essais de cisaillement TAST permettent d'obtenir la force de cisaillement à rupture F_{max} . Nous déterminons F_{max} en faisant la moyenne des résultats obtenus pour chacune des 3 éprouvettes. Plus l'effort maximal est élevé et meilleur est la qualité de l'adhésion.

3 Résultats et discussions

Les résultats obtenus à partir de ces essais donnent des premières tendances. Les figures 2a, 2b, 2c et 2d indiquent la variation de la force de cisaillement maximum aux bornes inférieures et supérieures de chaque paramètre déterminé à partir du plan d'expérience. La figure 2a indique que pour une température de chauffe des plateaux de 300°C, $F_{max}=6,1$ kN tandis que pour une température de chauffe des plateaux de 320°C, $F_{max}=5,6$ kN. Pour le temps de maintien (figure 7b), $F_{max}=5,9$ kN pour un temps de maintien de 2min et $F_{max}=5,8$ kN pour un temps de maintien de 5min. C'est la vitesse de refroidissement (figure 7c) qui a la plus grande influence sur F_{max} . Pour un refroidissement lent de 2°C/min $F_{max} =4,9$ kN tandis que pour un refroidissement rapide de 25°/min, $F_{max}=6,8$ kN (soit une augmentation de 30%). Quant à la pression (figure 7d), on ne note pas de différence notable dans la force max de cisaillement que celle-ci soit à 0,55 ou 2,1 MPa.

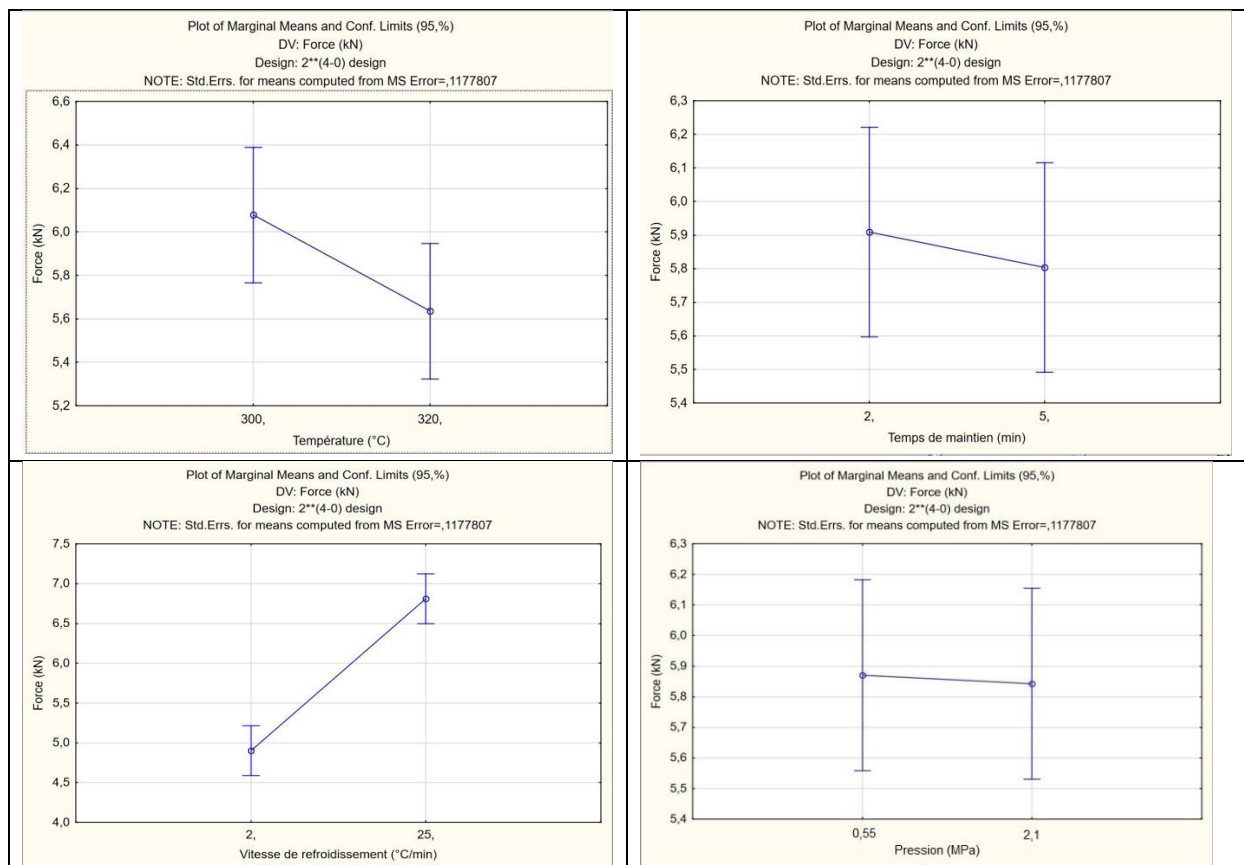


Figure 2 a,b,c,d : Effets des paramètres

3.1 Influence de la vitesse de refroidissement

Nous avons fait varier la vitesse de refroidissement sur 4 niveaux différents (2, 5, 10 et 25°/min) en donnant une valeur stable à la pression, au temps de maintien et à la température des plateaux :

- PA66 : température 300°C, temps de maintien 2 min, pression 2,1MPa,
- PA12 : température 320°C, temps de maintien 2 min, pression 2,1MPa.

Les résultats des essais TAST sont présentés sur la figure 3 non plus en effort maximal à rupture mais en contrainte de cisaillement à rupture ($\sigma=F/S$ où $S=12,5\text{mm}\times 25\text{mm}$).

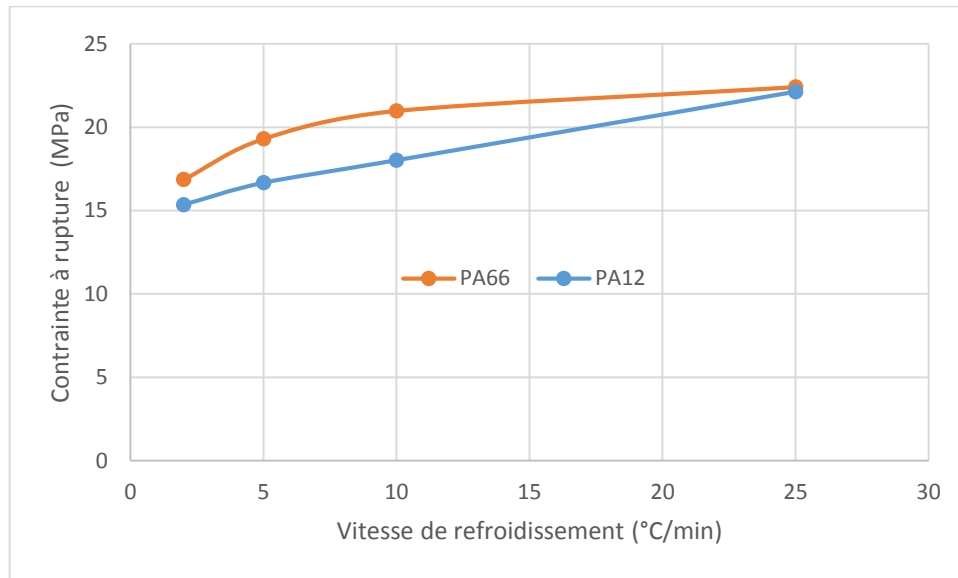


Figure 3 : influence de la vitesse de refroidissement

On observe pour les deux polymères des comportements identiques : plus la vitesse de refroidissement est rapide et plus la contrainte de cisaillement à rupture est élevée. Pour une vitesse de refroidissement rapide de 25°C/min, $\sigma = 22,4$ MPa pour le PA66 tandis que pour une vitesse de refroidissement plus lente de 2°C/min, on obtient une contrainte de cisaillement de 16,8 MPa, soit une diminution de 25%. Pour le PA12 et pour une vitesse de refroidissement de 25°C/min, $\sigma=22,1$ MPa, tandis que pour une vitesse de refroidissement de 2°C/min, cette valeur chute à $\sigma=15,3$ MPa, soit une diminution de 31%. Pour analyser ces résultats, nous nous sommes intéressés au faciès de rupture au niveau de la surface de collage pour le PA66. Les figures 4.a, 4.b, 4.c et 4.d représentent ces faciès pour des vitesses de refroidissement de 2, 5, 10 et 25 °C/min.

Nous observons que suivant la vitesse de refroidissement les faciès de rupture sont complètement différents. Tout d'abord au niveau de la nature de la rupture, on observe un mixte entre rupture cohésive et rupture adhésive quelle que soit la valeur de la vitesse de refroidissement. Ensuite, on observe la formation de bulles et que le taux de bulles dépend de la vitesse de refroidissement. Cette formation de bulles correspond au dégagement gazeux généré par la pyrolyse du polyamide. C'est un phénomène qui a déjà été observé pour d'autres procédés de soudage polymère-métal [5], [12]. Les essais préliminaires nous ont montré qu'il fallait dépasser la température de fusion du polymère d'au moins 40°C pour le PA66 donc qu'il faut atteindre la température de dégradation du polymère pour obtenir la création de liaisons.

Nous avons quantifié le pourcentage surfacique de bulles à l'aide d'un logiciel d'analyse d'images. L'influence de la vitesse de refroidissement sur la contrainte de cisaillement à rupture et sur le pourcentage de bulles est présentée sur la figure 5.a.

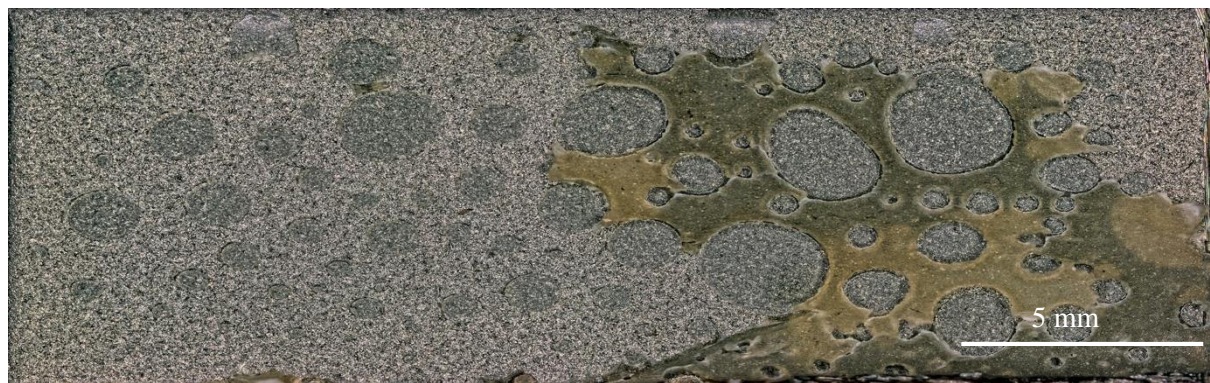


Figure 4.a : Faciès de rupture pour un refroidissement de 2°C/min:

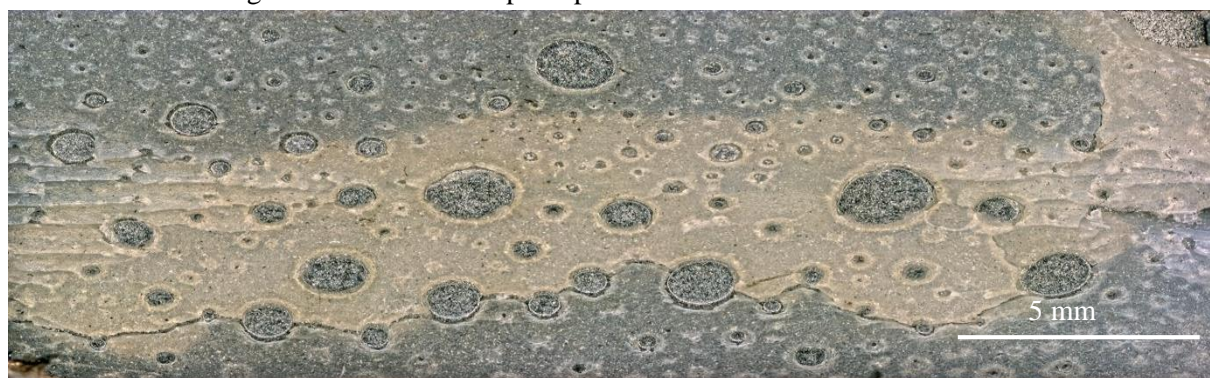


Figure 4.b : Faciès de rupture pour un refroidissement de 5°C/min:

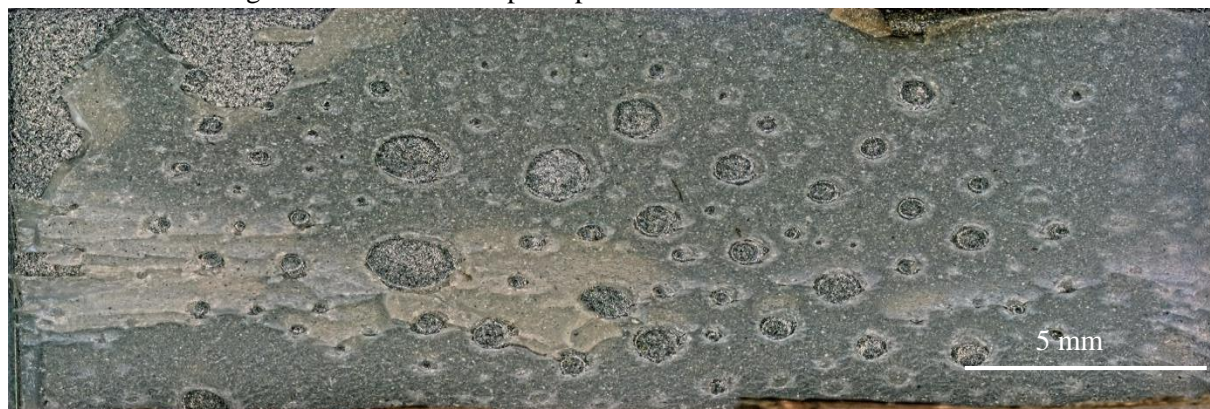


Figure 4.c : Faciès de rupture pour un refroidissement de 10°C/min:



Figure 4.d : Faciès de rupture pour un refroidissement de 25°C/min:

On observe que, plus la vitesse de refroidissement est faible, plus le pourcentage surfacique de bulles augmente. Pour une température de refroidissement de 25°C/min, 0,28% de la surface de collage contient des bulles, 6,91% à 10°C/min, 10,08% à 5°C/min et 24,94% à 2°C/min.

Nous constatons que c'est pour un pourcentage de bulles très faible (0,28%) que la contrainte de cisaillement à rupture est la plus élevée ($\sigma = 22,4$ MPa). Pour un pourcentage de bulles de 6,91%, la contrainte de cisaillement σ est de 20,9 MPa, pour un pourcentage de 10,08%, $\sigma = 19,29$ MPa, et pour un pourcentage de bulles de 24,94%, $\sigma = 16,86$ MPa. L'influence du pourcentage de bulles sur la contrainte à rupture est présentée sur la figure 5.b.

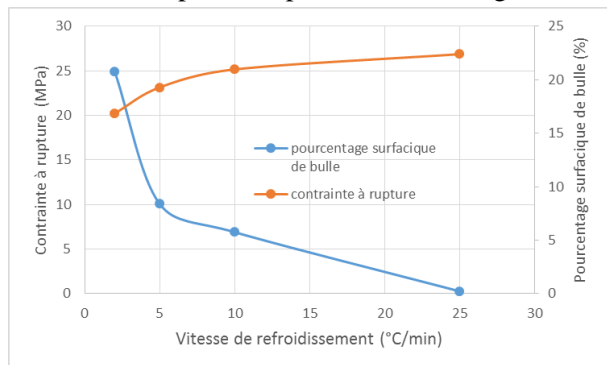


Figure 5.a : influence de la vitesse de refroidissement sur la contrainte à rupture et sur le pourcentage de bulles

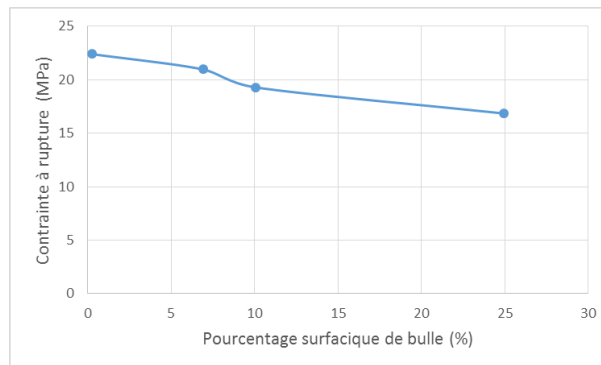


Figure 5.b : influence du pourcentage de bulles sur la contrainte à rupture

On peut conclure que, plus la vitesse de refroidissement est faible, plus le pourcentage surfacique de bulles augmente et plus la contrainte à rupture est faible. Cela s'explique par le fait qu'il faut atteindre la température de pyrolyse du polymère pour obtenir la création de liaisons et qu'une vitesse de refroidissement plus lente engendre un temps de chauffe plus important dans des plages de températures où le polymère se dégrade.

3.2 Influence de la température

PA66

Nous avons fait varier la température de chauffe des plateaux entre une valeur de 300 et 325°C avec un incrément de 5°C. La valeur des autres paramètres reste fixe : vitesse de refroidissement 25°C/min, temps maintien 2 min, pression 2,1MPa. Les résultats des essais TAST sont présentés sur la figure 6. Nous avons également déterminé le pourcentage surfacique de bulles qui est affiché sur ce même graphique.

On observe que le pourcentage surfacique de bulles augmente proportionnellement avec la température de chauffe des plateaux ce qui paraît cohérent puisqu'une température plus haute va dégrader le polymère plus rapidement. Par contre on observe que la valeur de la contrainte de cisaillement à rupture augmente proportionnellement avec l'augmentation de la température entre 300 et 320°C, puis elle diminue lorsque l'on arrive à une valeur de température critique qui est ici 320°C. Ce résultat confirme une nouvelle fois qu'il faut atteindre la température de dégradation du polymère pour obtenir la création de liaisons. Par contre, ce résultat montre qu'il y a un seuil pour lequel la contrainte de cisaillement à rupture est maximale et qui correspond environ à 4% de surfaces de bulle.

PA12

Nous avons fait varier la température des plateaux d'une valeur de 20°C au-dessus de la température de fusion du polymère (180°C pour le PA12) par palier de 5°C puis de 10°C aussi longtemps que la contrainte de cisaillement à rupture augmentait. Les résultats des essais TAST sont présentés sur la figure 8. Nous n'avons pas déterminé le pourcentage surfacique de bulles pour ces essais.

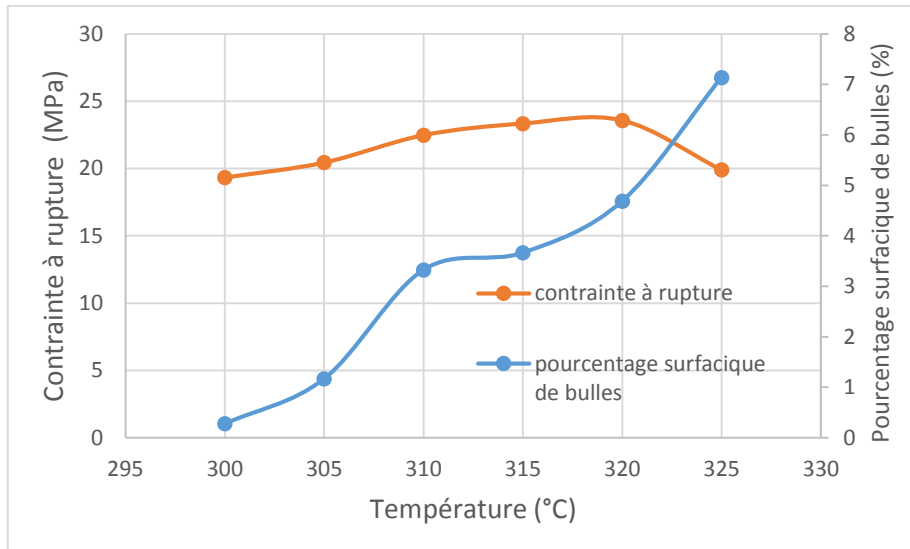


Figure 6 : Influence de la température de chauffe des plateaux sur la contrainte de cisaillement et sur le pourcentage surfacique de bulles (PA66)

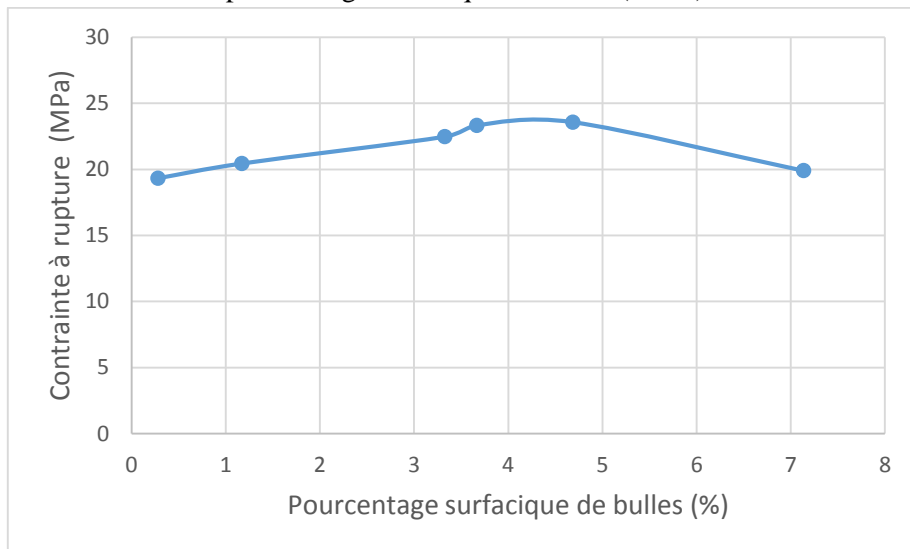


Figure 7 : influence du pourcentage de bulles sur la contrainte à rupture (PA66)

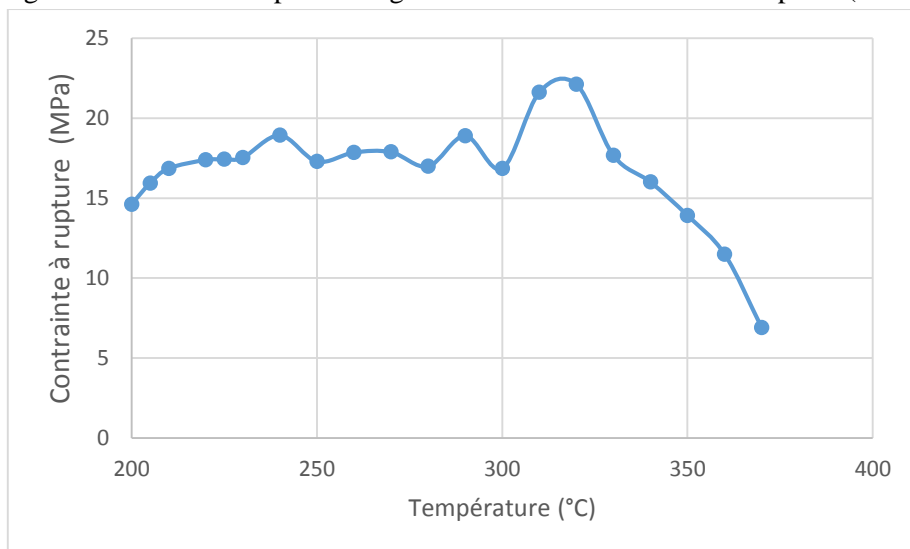


Figure 8 : Influence de la température de chauffe des plateaux sur la contrainte de cisaillement (PA12)

On observe sur la figure 8 qu'entre 200°C et 300°C, la contrainte de cisaillement reste à peu près constante ($\sigma \approx 17$ MPa) puis qu'elle augmente pour atteindre son maximum à 320°C ($\sigma = 22,1$ MPa). Passée cette température de 320°C, on observe une chute brutale de la contrainte de cisaillement. On retrouve bien le même comportement pour le PA12 que celui constaté pour le PA66. On note que dans les 2 cas, que ce soit pour une matrice en PA66 et une matrice en PA12, la température optimale est la même (320°C) alors que les températures de fusion sont $T_f = 260^\circ\text{C}$ pour le PA66 et $T_f = 180^\circ\text{C}$ pour le PA12.

3.3 Influence du temps de maintien

Nous avons étudié l'influence du temps de maintien uniquement pour le PA66 et uniquement sur 2 niveaux : 2 et 5 minutes. Les résultats des essais TAST sont présentés sur les figures 9.a et 9b. La pression est fixe à 2,1MPa pour ces essais.

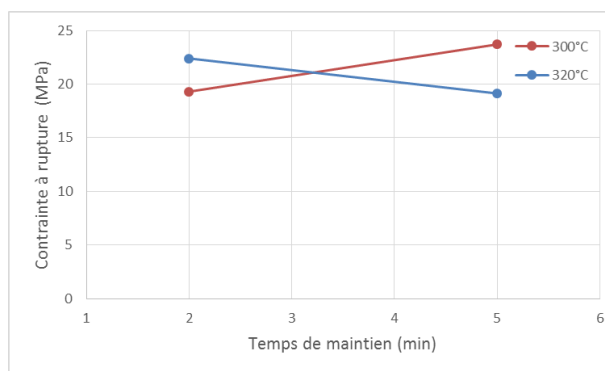


Figure 9.a : influence du temps de maintien pour une vitesse de refroidissement de 25°C/min

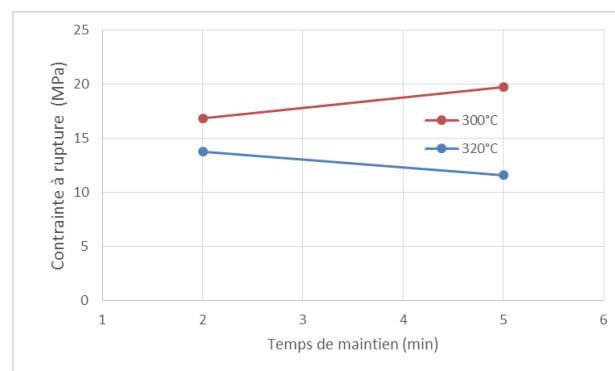


Figure 9.b : influence du temps de maintien pour une vitesse de refroidissement de 2°C/min

On observe sur la figure 9.a que pour une vitesse de refroidissement de 25°C/min et une température de chauffe de 300°C qu'une augmentation du temps de maintien permet d'améliorer la contrainte de cisaillement à rupture. Nous avons également mesuré le pourcentage surfacique de bulles pour cet essai. Pour un temps de maintien de 2 min on obtient $\sigma = 19,3$ MPa avec pourcentage surfacique de bulles de 0,28%. Pour un temps de maintien de 5 min on obtient $\sigma = 23,7$ MPa avec pourcentage surfacique de bulles de 2,48%. Ce résultat montre à nouveau qu'il faut atteindre un certain niveau dans la dégradation du polymère pour obtenir une adhésion maximale.

On observe sur la figure 9.a pour une température de chauffe de 320°C le phénomène inverse : une augmentation du temps de maintien entraîne une diminution de la contrainte de cisaillement à rupture. Bien que nous n'ayons pas quantifié le pourcentage de bulle pour cet essai, on retrouve bien la notion de seuil critique de dégradation du polymère pour lequel l'adhésion est maximale. Pour une température de chauffe des plateaux de 320°C un temps de maintien de 5 min entraîne une dégradation trop importante par rapport à un temps de maintien de 2 minutes.

Nous observons le même phénomène pour une vitesse de refroidissement de 2°C/min (figure 9.b). Pour une température de chauffe de 300°C, un temps de maintien de 5min permet d'améliorer la contrainte de cisaillement à rupture ($\sigma = 19,7$ MPa) par rapport à un temps de maintien de 2 min ($\sigma = 16,9$ MPa) tandis que pour une température de chauffe de 320°C un temps de maintien de 5min entraîne une diminution de la contrainte de cisaillement à rupture ($\sigma = 11,6$ MPa) par rapport à un temps de maintien de 2 min ($\sigma = 16,9$ MPa). On notera que les valeurs de la contrainte de cisaillement à rupture sont sensiblement plus faibles pour une vitesse de refroidissement lente (2°C/min) que pour une vitesse élevée (25°C/min).

Bien que le temps de maintien soit un paramètre programmable indépendant sur la presse, son influence sur l'adhésion du polymère/métal est couplé aux autres paramètres et notamment la température de chauffe des plateaux.

Pour atteindre une adhésion maximale, il semble qu'il faille atteindre un certain niveau de pyrolyse au niveau de l'interface polymère/métal puisque c'est à l'interface que vont se créer les liaisons atomiques. Les deux paramètres qui vont permettre la création des liaisons atomiques sont la température de chauffe des plateaux et le temps de maintien. Une fois que l'on a atteint ce seuil de pyrolyse à l'interface il faut refroidir le plus rapidement pour éviter que la dégradation se fasse dans le volume du polymère

3.4 Influence de la pression

Nous avons étudié l'influence de la pression exercée par les plateaux sur l'éprouvette uniquement pour le PA66 et uniquement sur 2 niveaux : 0,5MPa et 2,1MPa. Les résultats des essais TAST sont présentés sur la figure 10. Le temps de maintien est fixe à 5min pour ces essais et la vitesse de refroidissement est fixe à 25°C/min

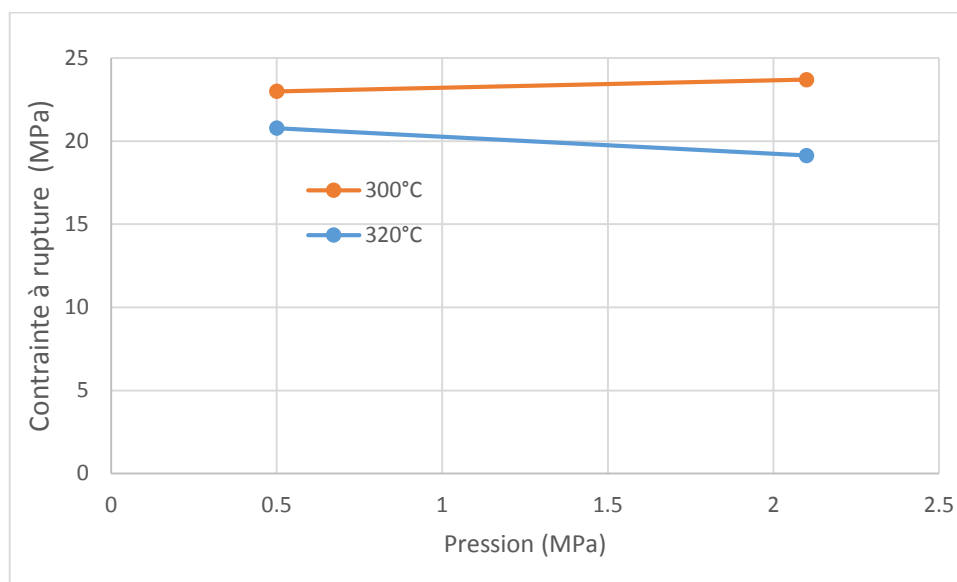


Figure 10 : influence de la pression exercée par les plateaux

On observe sur la figure 10 que la pression n'a quasiment pas d'influence sur la contrainte de cisaillement à rupture que ce soit pour une température de chauffe de 300°C ou de 320°C. On notera cependant que la contrainte de cisaillement est plus élevée pour une température de 300°C avec un temps de maintien de 5 min que pour une température de 320°C avec un temps de maintien de 5min alors que l'on obtenait un résultat inverse pour un temps de maintien de 2min.

3.5 Paramètres optimaux

A partir des résultats précédents, nous pouvons établir les paramètres optimaux de la presse chauffante pour obtenir la meilleure adhésion de l'assemblage hybride polymère thermoplastique/acier. Les résultats sont donnés ci-dessous :

- Température des plateaux : 320°C,
- Temps de maintien : 2 minutes,
- Vitesse de refroidissement : 25 °C/min,
- Pression : 2,1 MPa.

Nous avons tracé sur la figure 11 l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement de la traverse pour les paramètres optimaux et pour les 3 éprouvettes réalisées avec ces paramètres pour le PA66. On constate que cet essai est répétable car les 3 courbes sont presque identiques ce qui montre la fiabilité du mode opératoire employé.

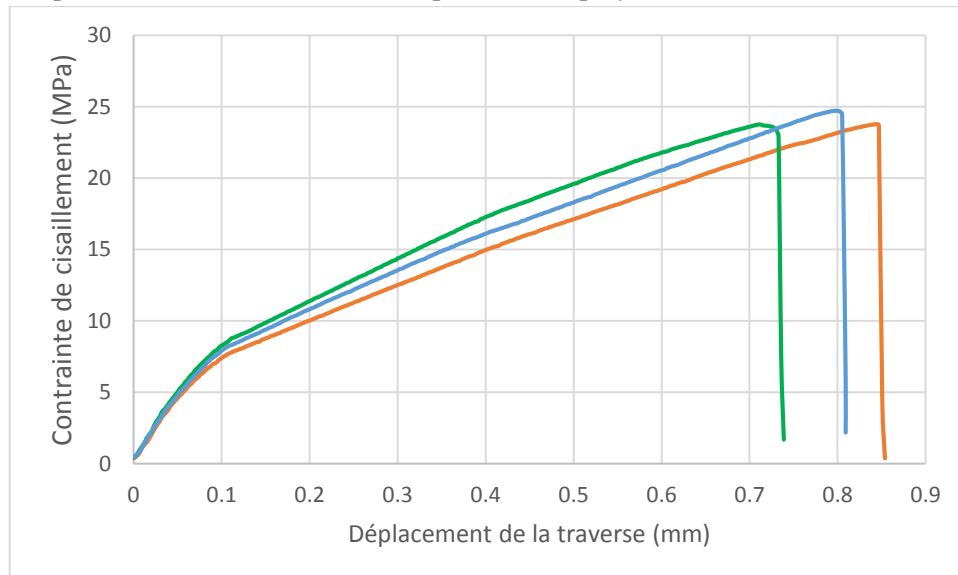


Figure 11 : évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement de la traverse

On notera que les paramètres optimaux sont les mêmes pour une matrice en PA66 ou une matrice en PA12 bien que la température de fusion du PA12 soit inférieure de 80°C à celle du PA66. On obtient avec ces paramètres une contrainte en cisaillement $\sigma=23,6$ MPa pour le PA66 et une contrainte en cisaillement $\sigma=22,1$ MPa pour le PA12. On peut voir que ces valeurs sont très proches bien que le coût du PA12 soit plus élevé que celui du PA66. Il est également important de noter que ces valeurs de contraintes de cisaillement à rupture sont comparables avec les assemblages collés qui ont une contrainte en cisaillement moyenne de $\sigma = 19$ MPa.

4 Conclusion

L'objectif de cette étude est l'optimisation et la caractérisation d'un assemblage hybride polymère/acier sous pression à chaud afin de comprendre l'influence et le poids respectifs de 4 paramètres qui interviennent sur le comportement en cisaillement.

Nous avons montré que pour obtenir une adhésion maximale, il faut atteindre la température de pyrolyse jusqu'à un certain seuil. On observe la formation de bulles qui sont les gaz générés par la matrice en polyamide lors de sa pyrolyse. La température de chauffe des plateaux et le temps de maintien sont les paramètres qui vont gouverner la pyrolyse. Ces deux paramètres sont intimement liés : une température de chauffe plus élevée avec un temps de maintien court donnent des résultats similaires à ceux obtenus avec une température de chauffe moins élevée avec un temps de maintien plus long.

Nous avons montré que la vitesse de refroidissement doit être la plus élevée possible car une vitesse de refroidissement plus lente engendre un temps de chauffe plus important dans des plages de températures où le polymère se dégrade. Nous avons également montré que la pression exercée par les plateaux n'a pas d'influence dans la plage où elle a été testée.

Nous avons pu déterminer les paramètres optimaux du procédé d'assemblage sous pression à chaud et nous avons montré que ce type d'assemblage permet d'obtenir des valeurs de contraintes de cisaillement à rupture similaires avec les assemblages collés.

Pour conclure sur le développement des nouveaux procédés d'assemblage hybride polymère/métal par voie thermique (soudage laser, ultrasons, friction, induction) dans l'industrie, ceux-ci doivent fournir une chauffe rapide et homogène au niveau de l'interface polymère/métal pour atteindre la pyrolyse uniquement à la surface du polymère (création de liaisons) puis refroidir rapidement pour stopper la pyrolyse et donc arrêter la dégradation du polymère dans son volume.

Références

- [1] A. Pramanik *et al.*, « Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – A review », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 101, p. 1-29, oct. 2017.
- [2] Amancio-Filho S.T. et dos Santos J.F., « Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: Recent developments and trends », *Polymer Engineering & Science*, vol. 49, n° 8, p. 1461-1476, mai 2009.
- [3] P. Kah, R. Suoranta, J. Martikainen, et C. Magnus, « Techniques for joining dissimilar materials: Metals and polymers », *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 36, n° 2, 2014.
- [4] K. Jung, Y. Kawahito, et S. Katayama, « Laser direct joining of carbon fibre reinforced plastic to stainless steel. », *Science & Technology of Welding & Joining*, vol. 16, n° 8, p. 676-676-680, nov. 2011.
- [5] C. Lamberti, T. Solchenbach, P. Plapper, et W. Possart, « Laser Assisted Joining of Hybrid Polyamide-aluminum Structures », *Physics Procedia*, vol. 56, p. 845-853, janv. 2014.
- [6] F. Balle, G. Wagner, et D. Eifler, « Ultrasonic metal welding of aluminium sheets to carbon fibre reinforced thermoplastic composites », *Advanced Engineering Materials*, vol. 11, n° 1, p. 35-35-9, janv. 2009.
- [7] S. T. Amancio-Filho, C. Bueno, J. F. dos Santos, N. Huber, et E. Hage, « On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures », *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, n° 10, p. 3841-3848, avr. 2011.
- [8] F. C. Liu, J. Liao, et K. Nakata, « Joining of metal to plastic using friction lap welding », *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 54, p. 236-244, févr. 2014.
- [9] P. MITSCHANG, R. VELTHUIS, et M. DIDI, « Induction Spot Welding of Metal/CFRPC Hybrid Joints », *Welded Metal/CFRP-Structures: Mechanical Properties, Microstructures and Simulation*, vol. 15, n° 9, p. 804-804-813, janv. 2013.
- [10] B. M. Arkhurst, J. H. Kim, et M.-Y. Lee, « Hot metal pressing joining of carbon fiber reinforced plastic to AZ31 Mg alloy and the effect of the oxide surface layer on joint strength », *Applied Surface Science*, oct. 2017.
- [11] Sabah Hussein, Abdulmuhssan Mhessan, et Mustafa Alwan, « Hot Press Joining Optimization of Polyethylene to Aluminium Alloy AA6061-T6 Lap Joint Using Design of Experiments », *Ej*, vol. 21, n° 7, déc. 2017.
- [12] F. C. Liu, K. Nakata, J. Liao, S. Hirota, et H. Fukui, « Reducing bubbles in friction lap welded joint of magnesium alloy and polyamide », *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 19, n° 7, p. 578-587, oct. 2014.