

Chapitre V. Essais expérimentaux

I. Introduction	95
II. Description des essais	96
II.1. Equipement de soudage	96
II.2. Mesures	98
III. Protocole expérimental	101
IV. Résultats et analyses	101
IV.1. Répétabilité	101
IV.2. Comparaison des configurations mono et bi-matériaux	108
IV. 2. a. Analyse de la qualité de la soudure	111
IV. 2. b. Analyse thermique	118
IV. 2. c. Analyse des efforts	120
IV.3. Influence des paramètres procédés d'entrée	121
IV.4. Analyse de configurations présentant des défauts	128
V. Conclusion	131

I. Introduction

La précision de la modélisation du FSW dépend de nombreux paramètres tels que ceux de la loi de comportement du matériau ou de la loi de frottement à l'interface entre l'outil et les tôles, ou encore tels que les coefficients d'échange thermique entre les outils et le matériau ou les caractéristiques thermiques des matériaux Ayant validé notre code sur une configuration de soudage pour laquelle ces données avaient déjà été calibrées (Guerdoux 2007), nous souhaitons étendre cette étude à un cas de soudage de la configuration industrielle (voir Figure V-1) pour lequel ces paramètres sont mal connus. Leur identification ou calibration nécessite de disposer de résultats expérimentaux en mesurant les forces, le couple axial de l'outil et les températures dans la plaque et l'outil. Les expériences ont également pour objectif de déterminer une fenêtre de soudage, la configuration de soudage et l'influence des matériaux. Plusieurs types de joints de soudure par recouvrement sont ainsi étudiés. Une attention particulière portera sur l'obtention des joints de mauvaise qualité qui se traduit par l'apparition de défauts ; ceci dans le but d'évaluer la capacité du modèle à prédire ces défauts.

L'objectif industriel est de souder les raidisseurs ou lisses sur les peaux du fuselage des avions. La configuration d'assemblage classiquement utilisée dans l'aéronautique est présentée sur la Figure V-1. Un profilé en aluminium 7075 d'une épaisseur de 1,2 mm est assemblé par recouvrement par rivetage sur une peau en aluminium 2024 de 2,5 mm d'épaisseur. L'objet de la thèse est de remplacer cette opération de rivetage, par soudage par FSW.

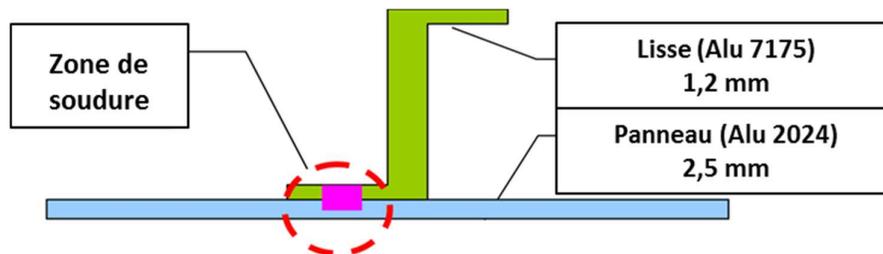


Figure V-1 : Configuration de soudage industrielle.

Nous considérons donc une configuration de soudage par recouvrement de deux aluminiums de séries différentes. Pour la calibration de notre modèle, des essais sont réalisés à l'échelle du laboratoire, alors que des essais plus complexes avec les pièces réelles seront réalisés ultérieurement. Des tôles de dimensions 150 * 300 mm des nuances et des épaisseurs demandées sont assemblées (voir Figure V-2).

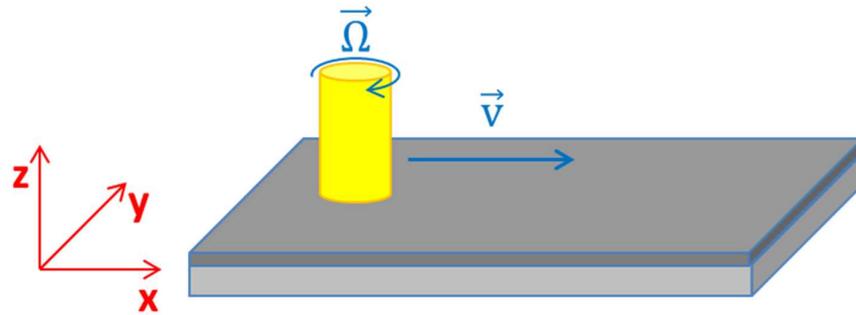


Figure V-2 : Configuration de soudage à l'échelle du laboratoire.

II. Description des essais

Les essais ont été réalisés à l'Institut Maupertuis (IM) de Rennes, un centre de R & D en technologie industrielle qui accompagne les PME sur des projets de recherche ou de développement. Il est spécialisé, entre autres technologies, dans le procédé FSW.

II.1. Equipement de soudage

Dans les premiers temps, des machines de fraisage étaient utilisées pour effectuer les opérations de soudage FSW. Aujourd'hui, deux types d'installations permettent de réaliser des assemblages avec ce procédé : les robots industriels et les bancs de soudage. Ces derniers sont plus anciens ; ils sont adaptés aux grandes séries et aux pièces longues. Ils sont robustes mais très coûteux, d'où un fort intérêt pour l'utilisation de robots qui peuvent être 5 fois moins chers. En revanche, les robots nécessitent des broches spéciales (plus compactes et plus légères) encore en cours de développement, et les efforts imposés ne peuvent être aussi élevés qu'avec un banc. Cela peut limiter la taille des pièces à souder ou amener à des problèmes de rigidité, de déformation élastique du bras du robot. Nos essais ont été réalisés sur un robot industriel Fanuc S – 900iB 400 (voir Figure V-3). Initialement ces robots sont utilisés pour la manutention. Ce robot a donc été adapté au FSW à l'IM dans le cadre de la thèse de (Guillo 2014). Le contrôle de force du robot est robuste ; il est orienté selon 6 axes ; la charge maximale imposée est de 6 000 N. Un pilotage en force plutôt qu'en position permet de corriger les défauts de planéités du montage, de la tôle ou de la cage sur laquelle est installé le robot. La broche de soudage peut tourner à une vitesse maximale de 1 400 tpm. La vitesse d'avance est comprise entre 3 et 12 mm/s selon les épaisseurs à souder qui peuvent aller jusqu'à 4 mm.



Figure V-3 : Robot Fanuc S – 900i B 400.

L'outil de soudage (voir Figure V-4) a été conçu par l'IM ; il est en acier Z38CDV5 (Aisi H11) trempé à 50+/-2HRC. Ses caractéristiques géométriques sont présentées dans le Tableau V-1 ci-dessous et sur la Figure V-5 :

Epaulement				Pion			
Forme	Diamètre	Scroll		Forme	Diamètre	Hauteur	Filets
		Profondeur	Largeur				
Plate	9,6 mm	0,5 mm	1 mm	Conique	4 mm 3 mm	2,6 mm	Pas = 1 mm

Tableau V-1 : Géométrie de l'outil.

Nous avons vu au Chapitre I.II.3 que la qualité d'une soudure peut être améliorée par la géométrie des outils. L'outil utilisé comporte ainsi un épaulement plat et scrollé (voir Figure V-5) ainsi qu'un pion conique et fileté avec un pas de 1 mm.



Figure V-4 : Outil FSW conique fileté (pion) et scrollé (épaulement).

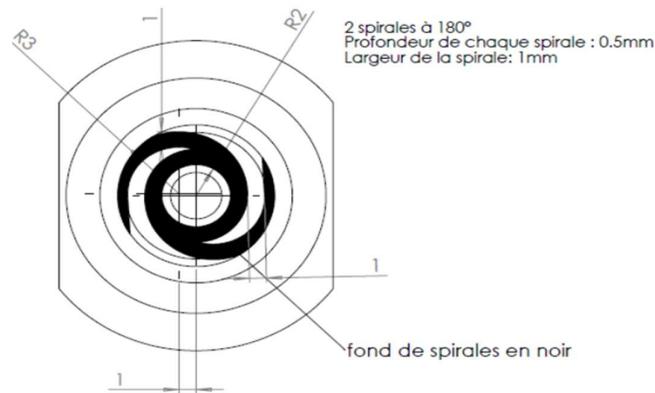


Figure V-5 : Plan CAO du scroll sur l'épaulement (données Institut Maupertuis).

II.2. Mesures

Des mesures de températures sont réalisées dans l'outil et à la surface de la tôle soudée. Un système d'acquisition des températures tournant avec l'outil (voir Figure V-6) a été spécialement développé par l'Institut Maupertuis pour notre souhait de mesurer la température à l'intérieur de l'outil. Le système d'acquisition est composé d'une carte SD embarquée sur le porte outil et permettant d'enregistrer les mesures ; le porte outil est composé d'ailettes afin d'augmenter les échanges de chaleur par convection pour refroidir le système de mesure. Un microcontrôleur et un accéléromètre permettent de déclencher l'acquisition lorsque l'outil est mis en rotation.

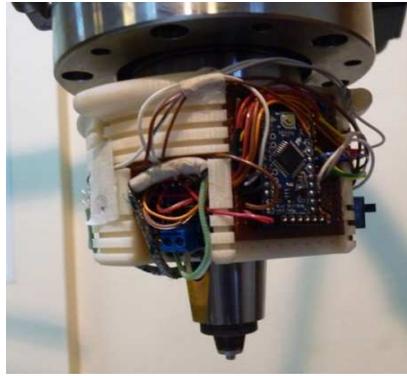


Figure V-6 : Système d'acquisition de température dans l'outil.

L'outil est percé pour introduire les 2 thermocouples nécessaires à la mesure du gradient de température (voir Figure V-7). La précision de ces thermocouples est de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Le capteur que nous nommons T1 est placé au centre, au niveau du pion et l'autre que nous nommons T2 est placé au niveau de l'épaule (voir Figure V-8). Ils sont fixés à l'aide d'une pâte métallo-céramique chargée en acier inox mono-composant tenant jusqu'à plus de $1\ 000^{\circ}\text{C}$. En raison des courts-circuits entre les 2 capteurs lorsque ceux-ci fonctionnent ensemble, nous avons alternativement relevé la température d'un capteur puis de l'autre en reproduisant chaque essai.

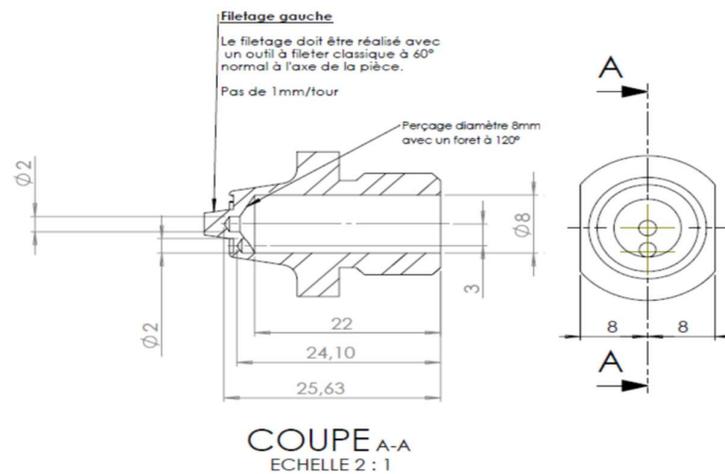


Figure V-7 : Emplacement des capteurs de température dans le plan de coupe de l'épaule de l'outil.

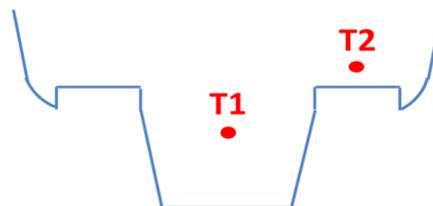


Figure V-8 : Schéma de la position des thermocouples T1 et T2 dans le plan de coupe perpendiculaire à l'épaule de l'outil.

Le robot est relié à un système d'acquisition des informations mécaniques. Les mesures des trois composantes de la force agissant sur l'outil sont effectuées avec une précision de 0,2 %. Le couple axial est relevé avec une précision de 10 % soit une incertitude de mesure d'environ 1 Nm. Notons que le robot est piloté en position durant les phases de plongée, de dwelling et durant le premier centimètre d'avance de l'outil afin d'atteindre progressivement la force de forgeage. L'asservissement en effort vient ensuite ; la force appliquée est préalablement estimée lors d'un essai dédié.

Des mesures de température ont été effectuées dans la tôle en différents positions (x,y) (voir Figure V-9). Elles permettent d'observer un gradient de température dans la direction y perpendiculaire à la soudure ainsi que de repérer l'établissement d'un régime permanent le long de la soudure en x. Le capteur est posé à la surface de la tôle et fixé à l'aide d'un scotch en aluminium. L'incertitude de positionnement sera à considérer lors de l'analyse des résultats. Un capteur de type K permettant une tenue à la chaleur jusqu'à 400°C a été initialement utilisé. Il s'est avéré trop imprécis car il était trop lent pour détecter la montée rapide et de courte durée de la température lorsque l'outil passe. Un capteur plus fin a été utilisé ; il ne supporte que 250°C mais est plus réactif. Comme nous ne pouvons placer le capteur à moins de 10 mm de la ligne de la soudure, afin de ne pas l'arracher au passage de l'outil, à cette distance les températures atteintes par la matière ne dépassent pas 250 °C. Une différence de mesure supérieure à 100 °C a été observée entre les deux capteurs (pour une même position). Un système d'acquisition Arduino permet ensuite de traiter le signal électrique (voir Figure V-10).

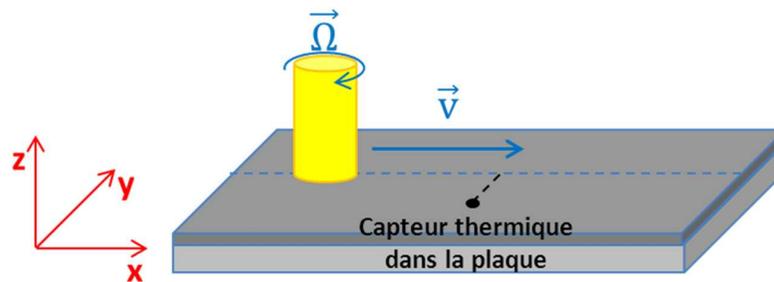


Figure V-9 : Positionnement du capteur de température sur la tôle supérieure.

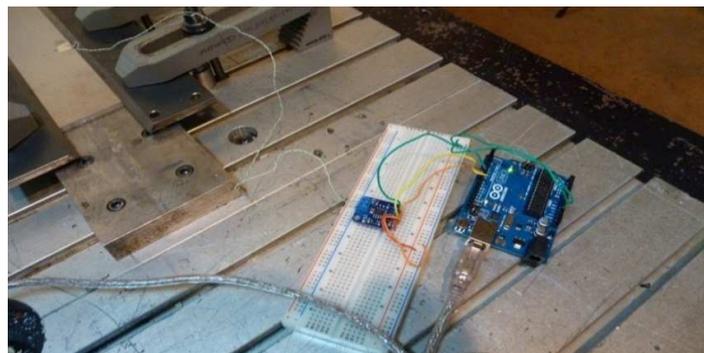


Figure V-10 : Système d'acquisition de température dans la plaque.

III. Protocole expérimental

La configuration industrielle consiste à souder les 2 tôles en aluminium par recouvrement. Lors des essais, on considère 3 configurations de soudage décrites sur la Figure V-11 correspondant aux différentes combinaisons possibles entre les matériaux, afin d'observer l'influence des matériaux sur les conditions de soudage et de comparer le soudage mixte avec le soudage mono-matériau.

Une campagne de 31 essais a été réalisée, en commençant par une étude du domaine de fonctionnement afin de disposer de quelques jeux de paramètres pour lesquels la soudure est correcte. Des essais en dehors du domaine de fonctionnement permettent ensuite d'obtenir des défauts géométriques qui permettront de valider le code pour la formation des défauts.



Figure V-11 : Les 3 configurations de soudage par recouvrement testées.

Les paramètres procédés appliqués à l'outil durant les différentes phases du procédé sont comme suit. L'outil est incliné de $0,5^\circ$ vers l'arrière. Pendant la phase de plongée, la vitesse de descente est de 1 mm/s ; ensuite la phase de dwelling dure 5 s. Enfin, il y a la phase d'avance avec une vitesse que nous avons fait varier entre 2 et 6 mm/s (2,4 et 6 mm/s) et une vitesse de rotation que nous avons fait varier entre 800 et 1 400 tpm (800, 1 000, 1 200 et 1 400 tpm). La force de soudage est adaptée aux vitesses d'avance et de rotation, avec des valeurs de 3 600, 4 000, 4 400, 4 800 et 5 200 N. Il n'a pas été possible d'appliquer une force supérieure à 6 000 N sous risque de casser le robot. De même nous n'avons pas pu appliquer une vitesse d'avance supérieure à 6 mm/s.

IV. Résultats et analyses

Nous précisons qu'en raison de la présence de bruit sur les courbes de forces et de couples, nous avons dû lisser les résultats.

IV.1. Répétabilité

Afin d'évaluer la répétabilité du robot et des essais en général, et d'analyser la fiabilité des résultats, nous avons réalisé plusieurs essais pour la configuration 2024/2024 avec 2 jeux de paramètres (vitesse d'avance, vitesse de rotation, effort axial) : $(v, w, F) = (2 \text{ mm/s}, 1\ 000 \text{ tpm}, 4\ 000 \text{ N})$ et $(v, w, F) = (2 \text{ mm/s}, 800 \text{ tpm}, 4\ 400 \text{ N})$ (voir Tableau V-2).

	Configuration	F (N)	w (tpm)	v (mm/s)	Qualité
Essai 1	2024/2024	-4000	1000	2	Pas de trous
Essai 2	2024/2024	-4000	1000	2	Pas de trous
Essai 3	2024/2024	-4000	1000	2	Pas de trous
Essai 4	2024/2024	-4000	1000	2	Micro-trou
Essai 5	2024/2024	-4000	1000	2	Pas de trous
Essai 7	2024/2024	-4000	1000	2	Pas de trous
Essai 13	2024/2024	-4000	1000	2	Pas de trous
Essai 15	2024/2024	-4000	1000	2	Micro-trou
Essai 27	2024/2024	-4400	800	2	Pas de trous
Essai 28	2024/2024	-4400	800	2	Porosités surface en fin de soudure

Tableau V-2 : Récapitulatif des essais pour la configuration 2024/2024.

La Figure V-12 et la Figure V-13 présentent la position de 6 capteurs échelonnés le long de la ligne de soudure, à différents éloignements de celle-ci et leur température.

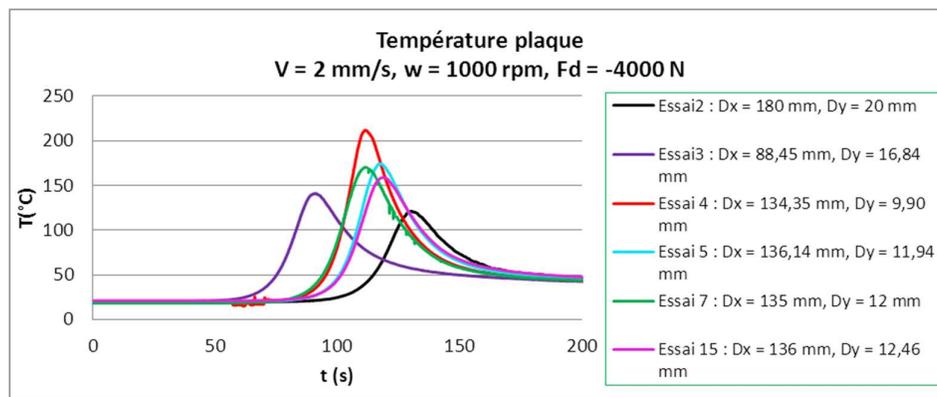


Figure V-12 : Evolution de la température pour le jeu de paramètres de soudage (2 mm/s ; 1 000 tpm ; 4 000 N) en des capteurs placés à différentes positions.

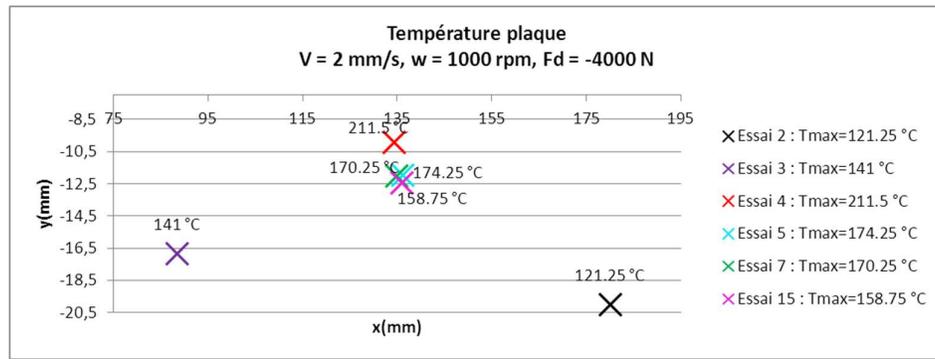


Figure V-13 : Position des capteurs de température pour le jeu de paramètres (2 mm/s ; 1 000 tpm ; 4 000 N) et valeur maximale de la température mesurée.

Il est délicat d'analyser la répétabilité des résultats de température dans la plaque en raison de l'erreur de mesure due au positionnement manuel du capteur. L'écart de température entre 2 capteurs placés à des positions légèrement différentes peut ainsi avoir 3 origines : une erreur de répétabilité, la température dans la plaque n'est pas encore stabilisée selon l'axe x ou un fort gradient thermique non linéaire selon l'axe y. Par exemple pour les capteurs des essais 5 et 15 (écart selon l'axe x faible de 0,15 mm), on estime un gradient de température de 15,5°C pour un écart de position suivant y de 0,52 mm. Pour les essais 4 et 7 (0,75 mm d'écart selon l'axe x), l'écart de température est de 40°C pour une différence de position de 2,1 mm selon l'axe y. Nous comparons alors les essais 5 et 7 où les capteurs sont très proches selon les axes x (1,15 mm) et y (0,06 mm). La différence de température de seulement 4°C nous donne ainsi une idée de la précision des mesures.

La répétabilité des essais s'observe de manière plus facile et plus pertinente sur les mesures mécaniques et thermiques dans l'outil. Elles permettent également d'étudier l'apparition de la phase stationnaire. La Figure V-14 montre l'évolution de la température en fonction du temps pour le capteur T1 (placé le plus au centre de l'outil et au niveau du pion) lors de 7 essais identiques. Nous observons une variation de température de moins de 6 °C (voir Figure V-14 et Tableau V-3) sachant que la précision des thermocouples est de +/- 1,5 °C. Notons que la température n'est pas stabilisée à la fin de la trajectoire de 270 mm ; elle continue de croître ; la montée en température de l'outil est lente et l'équilibre thermique dans le système outil - tôle à souder - plaque support n'est pas encore complètement atteint. Ceci peut s'expliquer par la nature des matériaux à souder, par une phase de dwelling (ou de soudage) trop courte ou encore par le type d'outil utilisé.

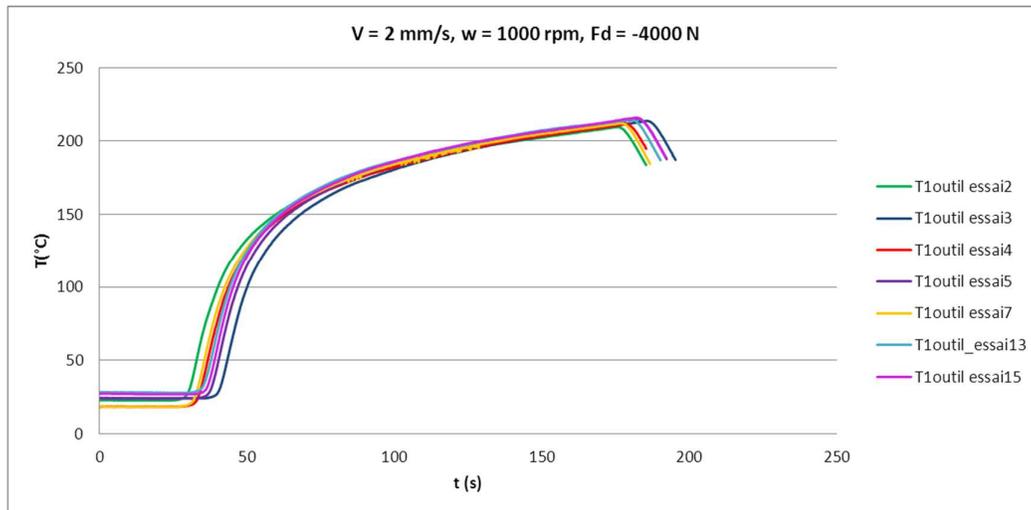


Figure V-14 : Répétabilité des mesures de température du capteur T1 dans l'outil.

Lorsque les essais se succèdent, l'outil n'a pas le temps de refroidir complètement. Les températures sont donc différentes en début de soudage, et comme la température ne converge pas vers un état stabilisé, son évolution pourrait être impactée par sa valeur initiale. Cependant, à température initiale identique (voir Tableau V-3), on note une différence de température de seulement 1°C en fin de soudage, ce qui montre que les essais sont parfaitement reproductibles. Nous observons également (voir Tableau V-3) que la température finale augmente avec la valeur de la température initiale mais qu'une variation initiale de 10°C se traduit par un écart de seulement 4°C en fin de soudage. Plus important, les pentes des courbes sont parfaitement identiques dans la seconde moitié de l'essai, indépendamment de la température initiale. Nous en concluons que cette température initiale n'est pas déterminante dans nos analyses, comme l'atteste la pratique industrielle.

N° Essai	4	7	2	3	5	15	13
T initiale (°C)	18,5	18,5	22,5	24	24	27	28
T finale (°C)	211,5	212,2	210	213,7	215	216	214,7

Tableau V-3 : Températures initiale et finale pour le capteur T1 dans l'outil.

Nous notons également une bonne répétabilité de l'effort imposé (de 4 000 N) : la force de forgeage présente les mêmes oscillations entre les valeurs de 3 900 N et 4 100 N (avant lissage des courbes) pour les différents essais (voir Figure V-15).

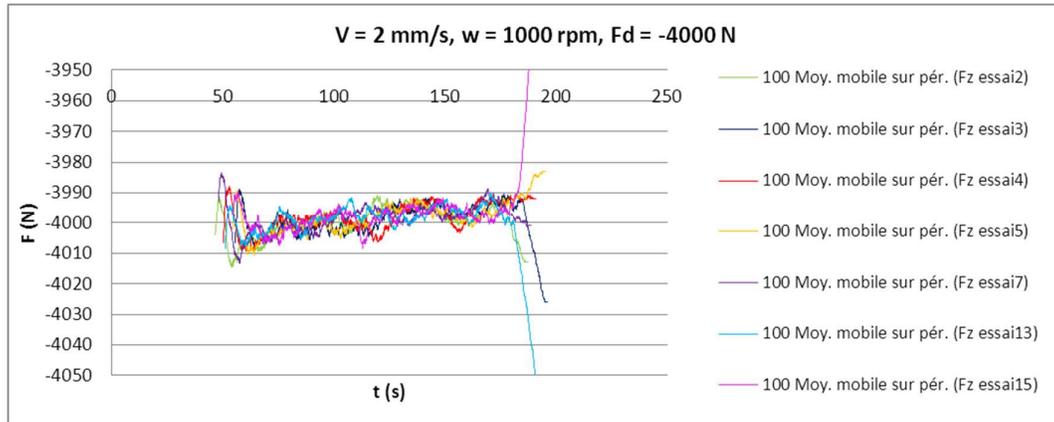


Figure V-15 : Répétabilité de la force imposée sur l'outil.

La force transverse et la force longitudinale sont moins bruitées mais présentent une répétabilité moins nette. La force longitudinale suivant x (voir Figure V-16), c'est-à-dire selon la ligne de soudure, comme la force transversale suivant y (voir Figure V-17) présentent une variabilité de 100 N maximum entre les essais.

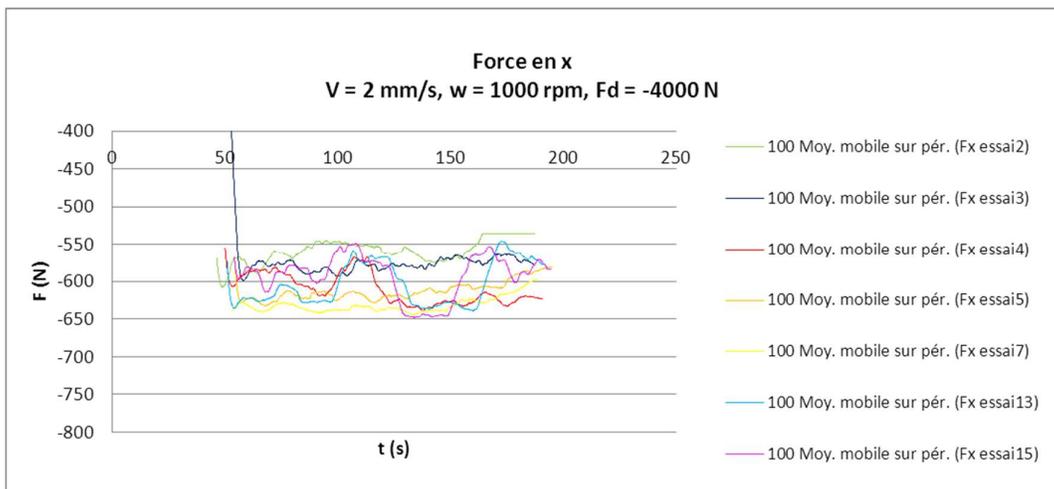


Figure V-16 : Répétabilité de la force longitudinale en x.

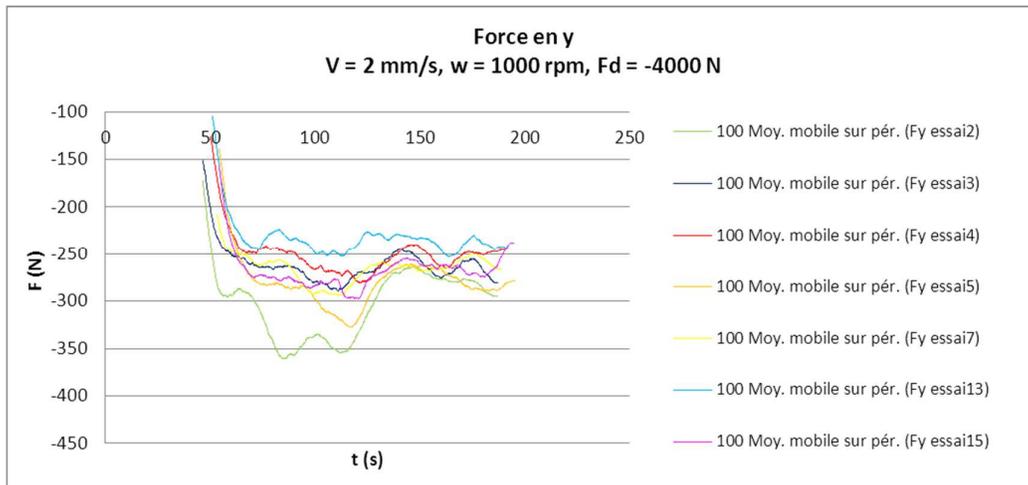


Figure V-17 : Répétabilité de la force transverse en y.

Si la soudure est de qualité (en dehors d'une faible porosité observée sur la Figure V-18), sans défauts, les essais (n° 27 et 28) sont parfaitement répétables (voir Figure V-19 et Figure V-20) (0,1 % de précision de mesure / 1 à 2 % d'erreur de répétabilité sur F_x et F_y) mais s'il apparaît des instabilités de soudage (défauts, porosités) alors les effets sont plus marqués sur les forces en y et x) et la mauvaise répétabilité (2,5 % d'oscillations sur F_z imposée / 7 à 20 % d'erreur de répétabilité sur F_x (voir Figure V-16) et F_y (voir Figure V-17)) traduit le caractère chaotique de la formation des défauts (sans défauts : n° 3, 7, 13 ; avec défauts de 10 à 60 μm : n° 2, 4, 5, 15 pour lesquels on observe des variations nettes des valeurs en z (voir Figure V-15)).



Figure V-18 : Essai 28, porosité en surface.

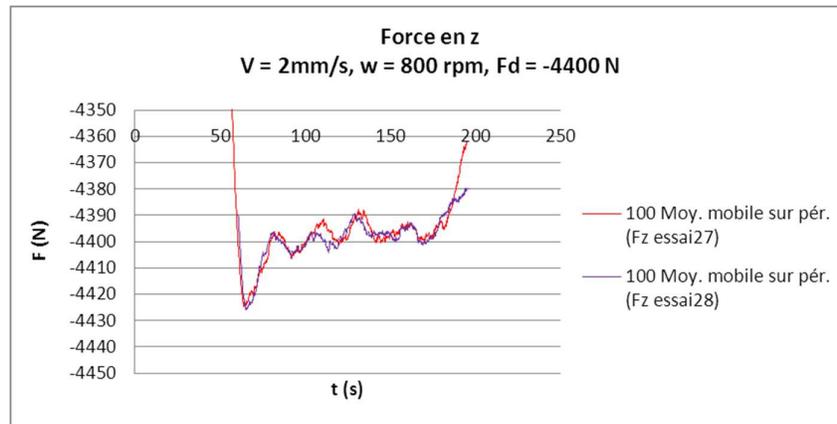


Figure V-19 : Répétabilité de la force axiale imposée pour une soudure sans défauts.

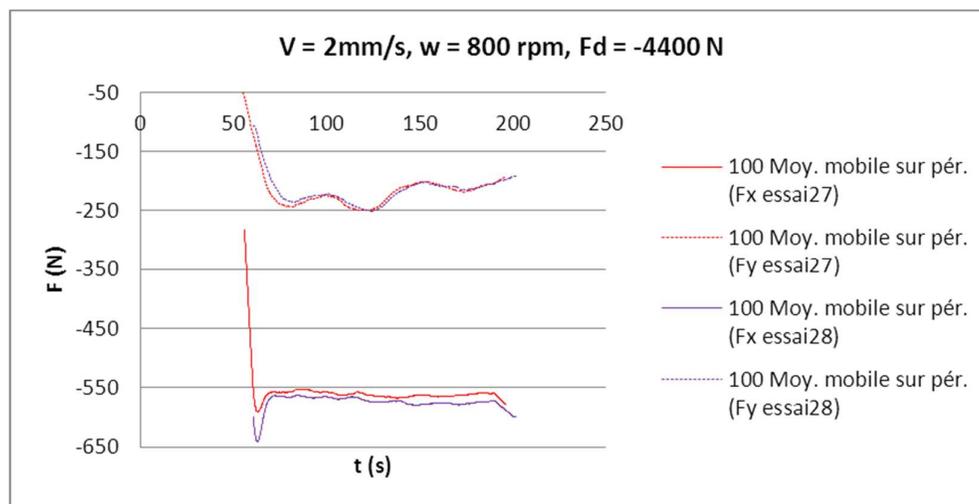


Figure V-20 : Répétabilité des forces transverses pour une soudure sans défauts.

Nous souhaitons maintenant étudier le couple sur l'outil. La valeur à vide (relevée 5 fois de suite) se situe entre -1,4 et 0,6 Nm. Notons que le couple n'est pas stabilisé puisqu'il continue de diminuer, ce qui est en accord avec la poursuite de l'augmentation de température et la diminution de la contrainte d'écoulement. Si la soudure est de qualité, sans défauts, les essais (n° 27 et 28) sont parfaitement répétables (1 % de précision de mesure / 0,8 % d'erreur de répétabilité) (voir Figure V-22) mais pour le jeu de paramètres pour lequel il apparaît des instabilités de soudage (défauts, porosités) (n° 1, 5 et 13) alors les différences entre les essais sont plus marquées sur les couples (voir Figure V-21) comme elles l'étaient sur les forces tout en étant bien moins importantes (3 % d'erreur de répétabilité).

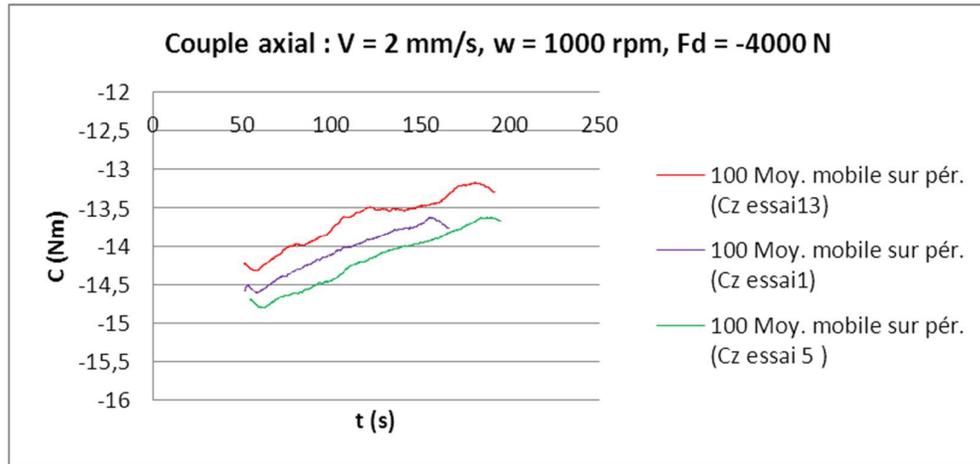


Figure V-21 : Répétabilité du couple pour l'essai 2 mm/s, 1000 tpm, 4000 N.

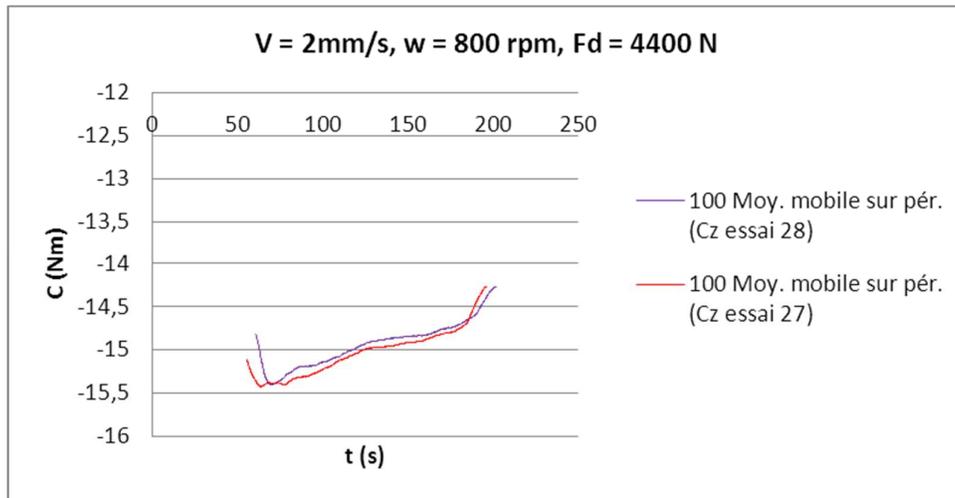


Figure V-22 : Répétabilité du couple pour l'essai 2 mm/s, 800 tpm, 4400 N.

IV.2. Comparaison des configurations mono et bi-matériaux

Nous étudions le soudage de l'assemblage industriel 7075/2024 et le comparons avec celui mono-matériau 2024/2024 et celui 7075/7075 afin de déterminer l'influence du matériau sur les observables thermiques et mécaniques et ainsi choisir la configuration à simuler. Les différents paramètres procédés testés pour chaque configuration ainsi que la qualité résultante de la soudure sont répertoriés dans les Tableau V-4, Tableau V-5 et Tableau V-6.

	Configuration	F (N)	w (tpm)	v (mm/s)	Qualité
Essai 1	7075/2024	-4800	1200	2	Pas de trous, bavures, hooking
Essai 6	7075/2024	-4000	1000	2	Trous interface tôles
Essai 8	7075/2024	-4400	1200	4	Trous en surface et interface tôles
Essai 10	7075/2024	-4000	1000	2	léger flash coté reculant
Essai 11	7075/2024	-4400	800	2	Micro trous interface tôles
Essai 14	7075/2024	-4400	800	2	Micro trous interface tôles
Essai 19	7075/2024	-4800	1000	2	Pas de trous, bavures
Essai 20	7075/2024	-4800	800	2	Pas de trous, bavures
Essai 21	7075/2024	-5200	1200	4	Trous interface tôles
Essai 22	7075/2024	-5200	1000	4	Trous interface tôles
Essai 23	7075/2024	-5200	800	4	Trous interface tôles
Essai 24	7075/2024	-5200	1200	6	Trous en surface et interface tôles
Essai 26	7075/2024	-5200	1000	6	Trous interface tôles
Essai 27	7075/2024	-5200	800	6	Trous interface tôles + trou bas de pion
Essai 28	7075/2024	-3600	800	4	Tranchée en surface coté avançant

Tableau V-4 : Récapitulatif des essais pour la configuration 7075/2024.

	Configuration	F (N)	w (tpm)	v (mm/s)	Qualité
Essai 5	2024/2024	-4000	1000	2	Pas de trous
Essai 9	2024/2024	-4400	1000	4	Trous interface tôles
Essai 10	2024/2024	-4400	1200	4	Trous interface tôles
Essai 11	2024/2024	-4800	1200	6	Trou surface lors du contrôle en position, Trous interface tôles
Essai 13	2024/2024	-4000	1000	2	Pas de trous
Essai 14	2024/2024	-4000	800	2	Trou en surface, état granuleux Trous interface tôles
Essai 17	2024/2024	-4000	1000	2	Pas de trous
Essai 27	2024/2024	-4400	800	2	Pas de trous
Essai 29	2024/2024	-4800	1200	2	Pas de trous, bavures côté reculant
Essai 30	2024/2024	-3600	800	2	Trou mi pion
Essai 31	2024/2024	-3600	800	4	Trou bas de pion et porosité en surface

Tableau V-5 : Récapitulatif des essais pour la configuration 2024/2024.

	Configuration	F (N)	w (tpm)	v (mm/s)	Qualité
Essai 2	7075/7075	-4800	1200	2	Flash, effondrement de l'outil dans la tôle
Essai 3	7075/7075	-4800	1200	4	Pas de trous, kissing bond
Essai 15	7075/7075	-4400	800	2	Pas de trous (trou en surface en contrôle en position)
Essai 16	7075/7075	-4000	1000	2	Pas de trous
Essai 17	7075/7075	-4000	1000	2	Pas de trous (trou en surface en contrôle en position)
Essai 18	7075/7075	-4400	1000	2	Pas de trous, hooking
Essai 25	7075/7075	-5200	1200	6	Pas de trous
Essai 29	7075/7075	-3600	800	4	Tranchée en surface coté avançant

Tableau V-6 : Récapitulatif des essais pour la configuration 7075/7075.

IV. 2. a. Analyse de la qualité de la soudure

Nous commençons par étudier la configuration mixte, pour cela nous nous intéressons aux macrographies des plans de coupe de la Figure V-23 :

- Tous les essais réalisés sur l'assemblage mixte 7075/2024 avec une vitesse d'avance supérieure ou égale à 4 mm/s produisent des trous à mi-hauteur ou en bas de pion, quelle que soit la vitesse de rotation testée et pour une force appliquée jusqu'à 5200 N. Le défaut obtenu au niveau du bas du pion est typique du FSW, caractéristique d'une soudure trop froide : le trou tunnel (essai n° 27). L'essai n° 28 a même créé une tranchée.
- Une force de forgeage trop faible entraîne un manque de pénétration et conséquemment la majorité des défauts observés. Ceux-ci sont localisés à l'interface entre les 2 plaques, ce qui est un défaut type du soudage par recouvrement qui n'apparaît pas en configuration bout à bout. En augmentant la force (essai n° 6 / 19 et n° 11 / 20) ces défauts disparaissent.
- Les essais réalisés à la vitesse de 2 mm/s sont concluants sous les conditions que la vitesse de rotation soit de 800 tpm ou 1000 tpm et que la force soit de 4800 N. Avec une vitesse de 1200 tpm et une force de 4800 N (essai n°1), le soudage ne produit pas de trou mais un défaut bien connu des joints par recouvrement est visible, le hooking (Yazdanian & Chen 2009), (Acerra et al. 2009) : la matière remonte sur les bords du cordon du côté de la zone d'avance et elle s'amincit du côté de la zone du retrait (voir la macro à droite de la Figure V-25). Ce défaut engendre une réduction de la résistance de la soudure aux sollicitations en traction.
- En conclusion, la fenêtre de soudage de la configuration en 7075/2024 pour une épaisseur de tôle de 3,7 mm au total, est la suivante : 2 mm/s pour la vitesse d'avance, [800 tpm ; 1000 tpm] pour la vitesse de rotation et la force est adaptée en fonction de ces 2 vitesses.

	w = 800 tpm	w = 1000 tpm	w = 1200 tpm
V = 2 mm/s	<p>Essai 11 Fz = 4400N</p> <p>Essai 20 Fz = 4800N</p>	<p>Essai 6 Fz = 4000N</p> <p>Essai 19 Fz = 4800N</p>	<p>Essai 1 Fz = 4800N</p>
V = 4 mm/s	<p>Essai 28 Fz = 3600N</p> <p>Essai 23 Fz = 5200N</p> <p>Tranchée</p>	<p>Essai 22 Fz = 5200N</p>	<p>Essai 8 Fz = 4400N</p> <p>Essai 21 Fz = 5200N</p>
V = 6 mm/s	<p>Essai 27 Fz = 5200N</p> <p>Trou lap + trou tunnel</p>	<p>Essai 26 Fz = 5200N</p>	<p>Essai 24 Fz = 5200N</p>

Figure V-23 : Coupes perpendiculaires au cordon de soudure et analyse macro à la binoculaire et au MEB pour l'assemblage mixte 7075/2024.

Analysons les résultats de soudage de la configuration en 2024/2024 présentés sur la Figure V-24 :

- Tous les essais où la vitesse d'avance est supérieure ou égale à 4 mm/s ont généré des trous. Ces défauts étaient déjà présents avec l'assemblage mixte pour ces mêmes paramètres et pour une force plus élevée ; ils sont de taille inférieure avec l'assemblage en 2024.
- Pour une force de forgeage donnée, nous pouvons observer l'influence de la vitesse de rotation sur l'apparition de défauts (essai n° 13 / 14).
- Les essais 30 et 31 présentent un trou dû à une mauvaise combinaison des vitesses en sus d'une force trop faible.
- L'influence de la force sur la qualité de la soudure est nettement visible sur les essais 30, 14 et 27 ; nous reviendrons sur ce point au paragraphe IV.3 lorsque nous traiterons de l'influence des paramètres précédés. Il est possible qu'une augmentation complémentaire de la force de forgeage, permette d'éliminer certains défauts observés (n° 9, 10).
- En conclusion, la fenêtre de soudage de la configuration en 2024/2024 pour une épaisseur de tôle de 3,7 mm au totale, est la suivante : 2 mm/s pour la vitesse d'avance, [800 tpm ; 1000 tpm ; 1200 tpm] pour la vitesse de rotation et la force est adaptée en fonction de ces 2 vitesses.

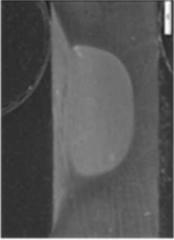
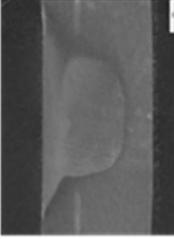
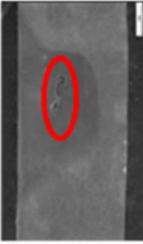
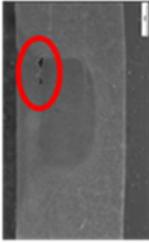
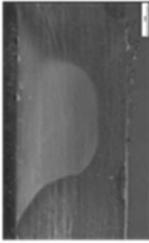
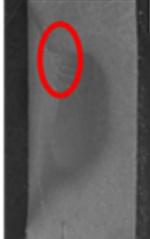
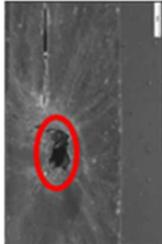
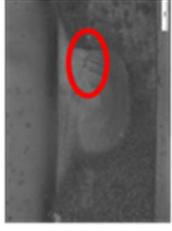
	$w = 1200 \text{ tpm}$	$w = 1000 \text{ tpm}$	$w = 800 \text{ tpm}$	
$V = 2 \text{ mm/s}$	<p>Essai 29</p>  <p>$F_z = 4800\text{N}$</p>	<p>Essai 13</p>  <p>$F_z = 4000\text{N}$</p>	<p>Essai 30</p>  <p>$F_z = 3600\text{N}$</p> <p>Essai 14</p>  <p>$F_z = 4000\text{N}$</p> <p>Essai 27</p>  <p>$F_z = 4400\text{N}$</p>	
$V = 4 \text{ mm/s}$	<p>Essai 10</p>  <p>$F_z = 4400\text{N}$</p>	<p>Essai 9</p>  <p>$F_z = 4400\text{N}$</p>	<p>Essai 31</p>  <p>$F_z = 3600\text{N}$</p>	
$V = 6 \text{ mm/s}$	<p>Essai 11</p>  <p>$F_z = 4800\text{N}$</p>			

Figure V-24 : Coupes perpendiculaire au cordon de soudure et analyse macro à la binoculaire pour la configuration de soudage 2024/2024 suivant différentes valeurs des paramètres du procédé.

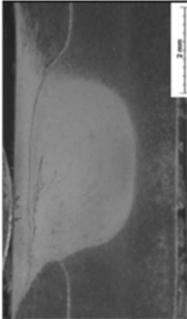
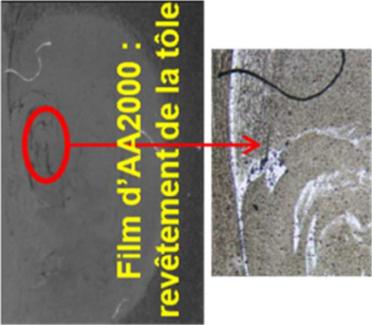
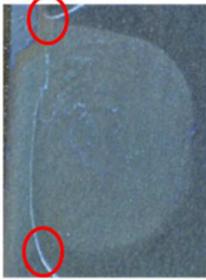
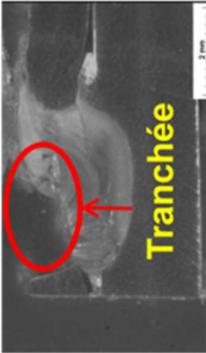
	w = 800 tpm	w = 1000 tpm	w = 1200 tpm	
V = 2 mm/s	<p>Essai 15</p>  <p>Fz = 4400N</p>	<p>Essai 16</p>  <p>Film d'AA2000 : revêtement de la tôle</p> <p>Fz = 4000N</p>	<p>Essai 18</p>  <p>Fz = 4400N</p>	<p>Essai 2</p>  <p>Effondrement dans la tôle, solidus 7075=477° < solidus 2024=502°</p> <p>Fz = 4800N</p>
V = 4 mm/s	<p>Essai 29</p>  <p>Tranchée</p> <p>Fz = 3600N</p>		<p>Essai 3</p>  <p>Fz = 4800N</p>	
V = 6 mm/s			<p>Essai 25</p>  <p>Fz = 5200N</p>	

Figure V-25 : Coupes perpendiculaires au cordon de soudure et analyse macro à la binoculaire et au MEB pour le matériau 7075.

Analysons les résultats des essais du soudage 7075/7075 présentés sur la Figure V-25.

- Pour l'essai 29, avec des données de procédé identiques, nous observons un comportement semblable au soudage mixte et en 2024 avec la création d'un trou tunnel.
- Les traces visibles sur l'essai 16 (2 mm/s ; 1000 tpm ; 4000 N) sont le signe d'un défaut de type « joint line », « oxyde rémanent » ou « kissing bond ». Elles peuvent être le siège de fissures et affecter la tenue mécanique en fatigue du joint soudé (Zimmer et al. 2007), (Britos 2010). Ce défaut apparaît lorsque le malaxage et les déformations du matériau sont insuffisants à cause de conditions de soudure froide, d'un manque de pénétration. Dans le cas de tôles revêtues, il peut également s'expliquer par un nettoyage insuffisant des tôles avant soudage. En augmentant la force de 4000 N à 4400 N (essai 16 à 18) le revêtement semble mieux broyé, cependant le défaut de hooking apparaît.
- Avec le jeu de paramètres (2 mm/s ; 1200 tpm ; 4800 N), nous obtenons une soudure sans défauts avec le 2024, tandis qu'un défaut de hooking était présent pour l'assemblage mixte. Avec le 7075, qui passe du domaine solide au domaine solide / liquide à une température plus basse de 25°C (voir les propriétés des solidus et liquidus pour les 2 matériaux dans le Tableau V-7) que le 2024, l'échauffement s'avère trop important avec ces paramètres et le matériau devient trop liquide : l'outil s'enfonce fortement dans la tôle jusqu'à la perforer en formant une bavure (ou flash). Ce comportement est également visible dans les réponses mécanique et thermique de l'outil : les efforts (voir Figure V-26) et le couple (voir Figure V-27) augmentent fortement ; la température (voir Figure V-28) dans une moindre mesure.

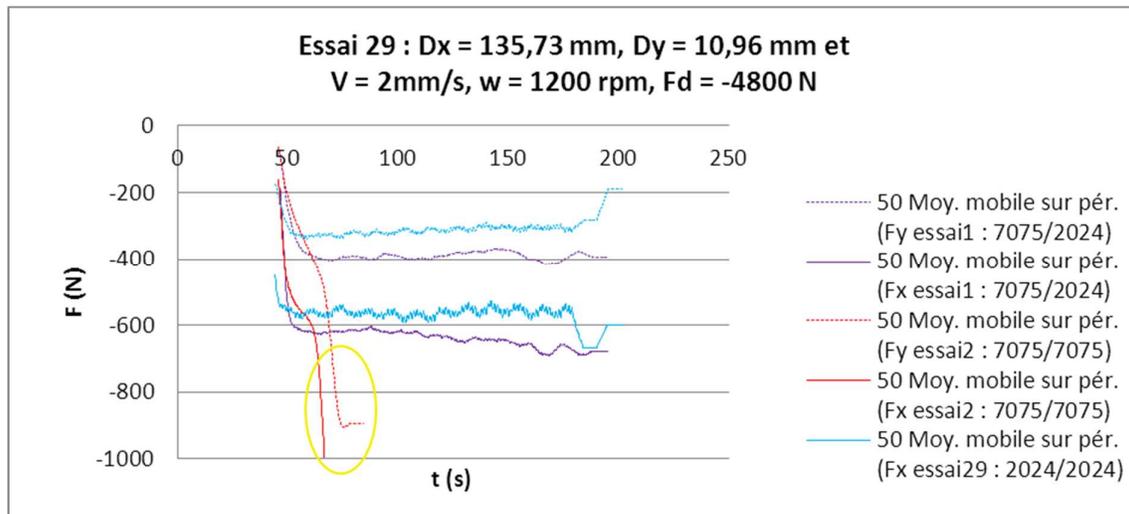


Figure V-26 : Influence du matériau soudé sur les forces transverse enregistrées dans l'outil : effondrement du 7075.

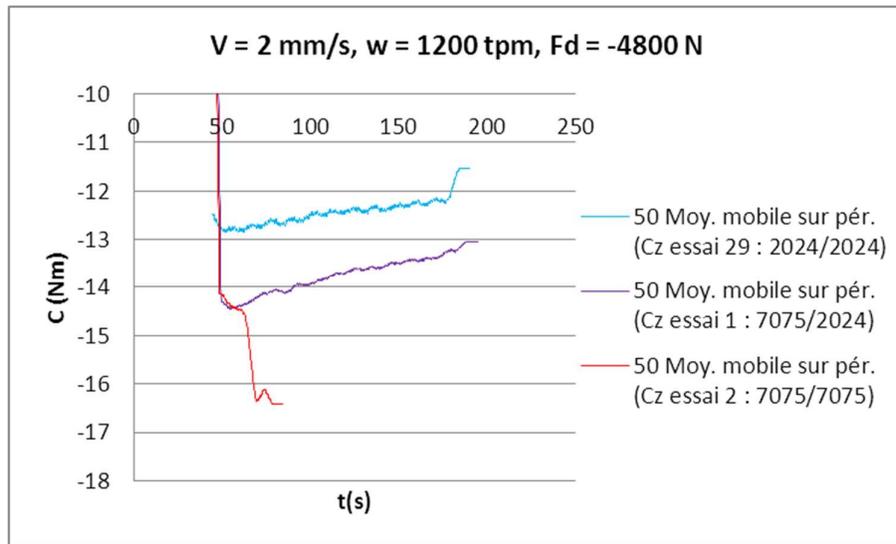


Figure V-27 : Influence du matériau soudé sur le couple enregistré dans l'outil : effondrement du 7075.

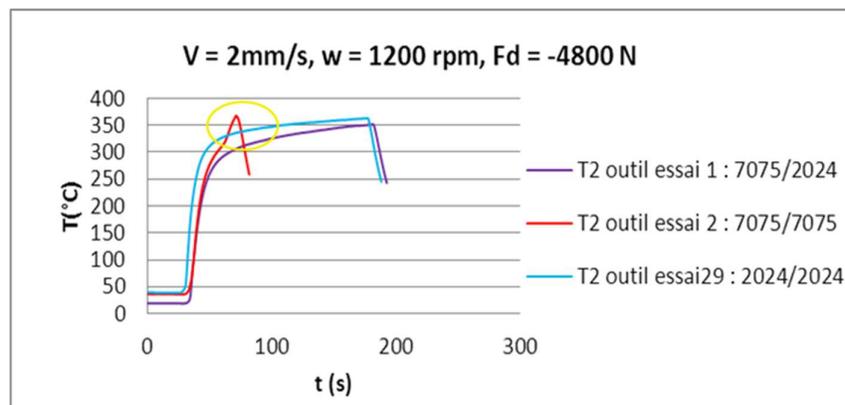


Figure V-28 : Influence du matériau soudé sur la température dans l'outil enregistrée dans le thermocouple T2 : effondrement du 7075.

- Les essais 3, 15 et 25 présentent des soudures sans défauts. La fenêtre de soudage ainsi définie est plus large que pour les deux précédents assemblages : la vitesse d'avance est comprise entre 2 mm/s et 6 mm/s et la vitesse de rotation entre 800 tpm et 1200 tpm.

De cette analyse des 3 configurations de soudage, nous concluons que le comportement de l'assemblage 2024/2024 est très proche de celui de l'assemblage mixte d'étude 7075/2024 ; les fenêtres de soudage sont similaires. Le comportement de l'assemblage mixte semble être gouverné par celui du matériau 2024, ce qui peut s'expliquer par le fait que le solidus du 7075 est de 25°C inférieur à celui du 2024 (voir Tableau V-7) et que l'épaisseur de 2024 malaxée est supérieure à celle du 7075 (voir Figure V-29).

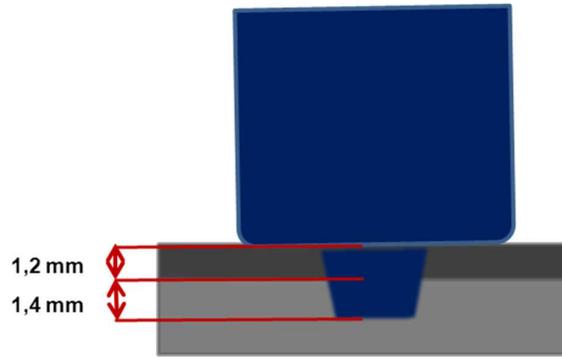


Figure V-29 : Part de chaque matériau.

IV. 2. b. Analyse thermique

Nous étudions, dans un premier temps, la sensibilité de la montée en température de l'outil.

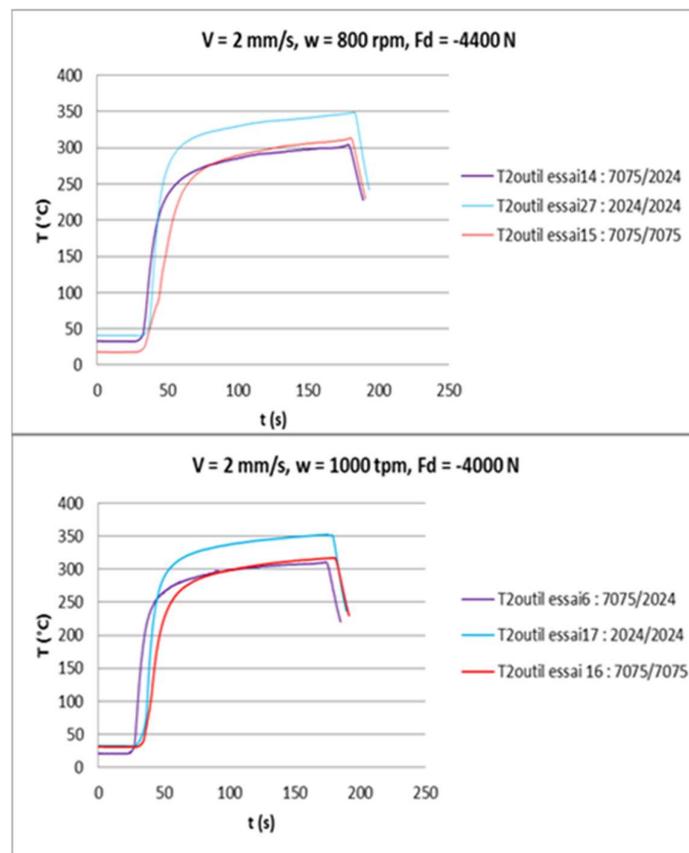


Figure V-30 : Influence du matériau soudé sur la température du thermocouple T2 pour 2 jeux de paramètres procédé.

La Figure V-30 présente l'évolution de la température du thermocouple T2 pour 2 jeux de paramètres du procédé $((v, w, F) = (2 \text{ mm/s}, 800 \text{ tpm}, 4400 \text{ N} : \text{n}^\circ 14, 15 \text{ et } 27) ; (v, w, F) = (2 \text{ mm/s}, 1000 \text{ tpm}, 4000 \text{ N} : \text{n}^\circ 6, 16 \text{ et } 17))$ pour lesquels les soudures sont sans défauts ou n'apparaissent dans le cas de l'assemblage mixte qu'avec une très petite taille. Dans les 2 cas, la température la plus faible est

enregistrée pour la configuration mixte et la plus forte pour la configuration en 2024, avec une quarantaine de degrés en plus ; la configuration en 7075 s'échauffe de 5 degrés de plus que la configuration mixte. Les températures observées pour le thermocouple T1 donnent lieu aux mêmes conclusions, si ce n'est que les écarts sont plus faibles entre le 7075 et le 2024 : la différence est de seulement 15°C (voir Figure V-31) pour 35°C précédemment. La différence porte essentiellement sur le gradient thermique dans l'outil : il est de 110°C pour les configurations mixtes et en 7075, et de 140°C pour le 2024. La nature de l'alliage influence donc la température et son gradient, qui tous deux résultent d'une variation de la nature du contact à la surface de l'outil (frottement et déformation plastique) et de la conductivité thermique du matériau.

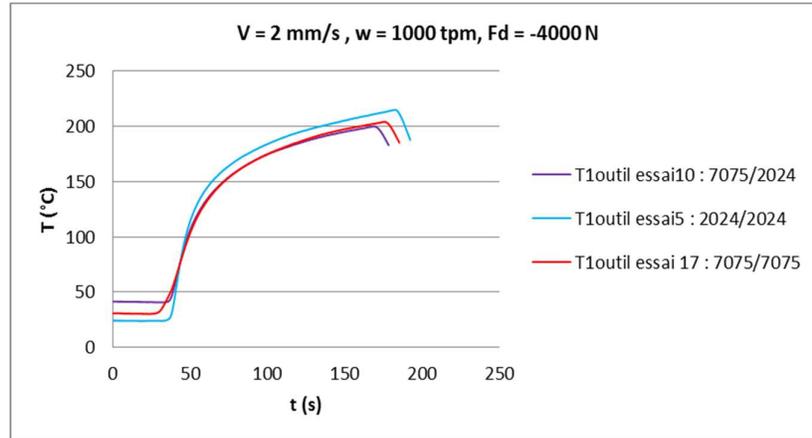


Figure V-31 : Influence du matériau soudé sur la température du thermocouple T1.

En soudage mixte, la température est très proche de celle en 7075, ce qui s'explique par le fait que le 7075 est le matériau en contact avec l'outil dans la configuration mixte. Quant aux écarts importants relevés entre le 7075 et le 2024, ils s'expliquent en partie par les différences de propriétés thermiques présentées dans le Tableau V-7 (où ces valeurs sont données à 25°C). Ainsi, l'effusivité est de $17156 J \cdot m^{-2}K^{-1}s^{-1/2}$ pour le 2024 et de $18727 J \cdot m^{-2}K^{-1}s^{-1/2}$ pour le 7075, ce qui implique qu'à l'équilibre thermique (et pour un contact outil/matériau identique) la chaleur transmise à l'outil par frottement du 7075 soit plus faible.

Pour T = 25°C	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$C \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$	$\lambda \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	Solidus (°C)	Liquidus (°C)
2024	2780	875	121	502	638
7075	2810	960	130	477	635

Tableau V-7 : Propriétés thermiques des aluminiums 2024 et 7075.

L'état stationnaire n'étant pas complètement atteint dans l'outil, il ne l'est pas davantage dans la tôle à 12 mm de la ligne de soudure. Nous comparons toutefois les résultats obtenus avec les 3 capteurs placés à 134, 135 et 136 mm le long de la ligne de soudure (voir Figure V-32). La température du capteur du 7075/2024 est de 0,5 °C supérieure à celle du cas 7075 alors qu'il est de 0,5 mm plus éloigné de la ligne de soudure et qu'un fort gradient de température est à considérer. Nous pouvons donc conclure que la température de soudage mixte est plus élevée que celle du soudage du 7075. En suivant la même analyse, la température du soudage de l'assemblage mixte est également

supérieure à celle du soudage du 2024. Les températures dans la plaque sont plus difficiles à interpréter et les différences entre les configurations sont moins marquées que les températures dans l'outil.

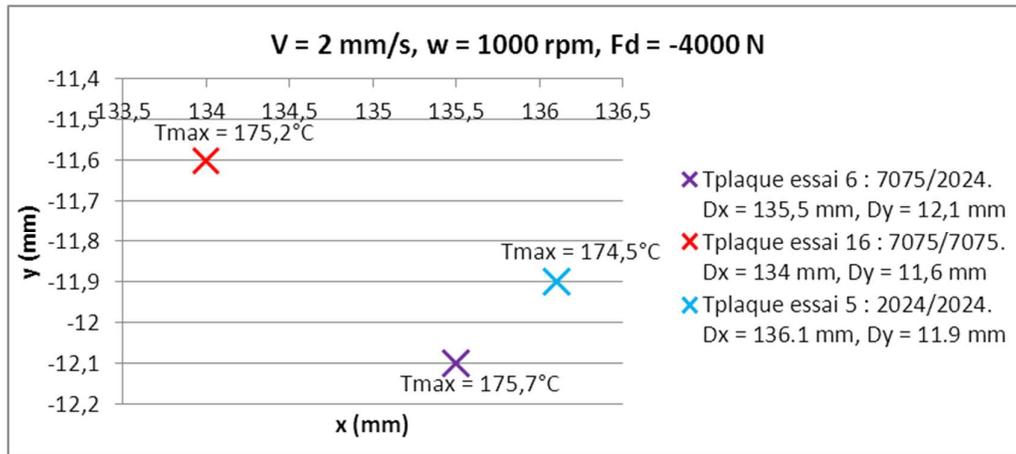


Figure V-32 : Positionnement des capteurs sur la plaque et température mesurées en ces points pour les 3 configurations de soudage.

Les mesures de température réalisées dans la plaque sont moins précises et moins discriminantes que celles effectuées dans l'outil car elles se trouvent bien plus loin de la zone de malaxage et sont ainsi fortement moyennées. C'est pourquoi il est important de disposer de mesures dans l'outil pour conduire une analyse plus précise.

IV. 2. c. Analyse des efforts

Nous nous intéressons maintenant aux résultats mécaniques des essais, et dans un premier temps à l'influence du matériau sur les efforts longitudinaux et transversaux (voir Figure V-33) lorsque l'effort axial imposé est de 4400 N.

Les efforts sont plus élevés avec la configuration mixte. Dans la direction x (longitudinale), l'effort de la configuration mixte présente une centaine de newtons d'écart avec la configuration en 2024, qui elle-même présente le même écart avec celle en 7075. Dans la direction y (transverse), l'effort de la configuration mixte présente en moyenne 250 N d'écart avec la configuration en 7075, qui elle-même présente 50 N d'écart avec celle en 2024. Le matériau résultant du soudage mixte du 7075 et du 2024 nécessite des efforts nettement plus importants pour le déformer ce qui peut être relié à une température d'outil plus faible.

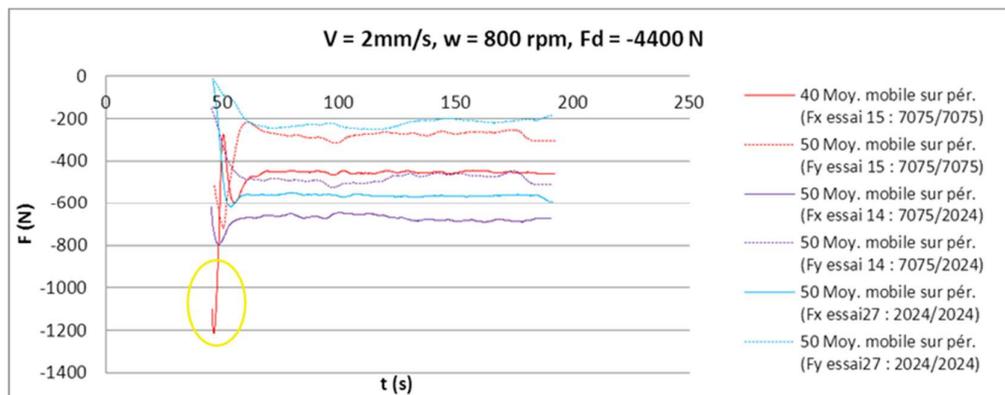
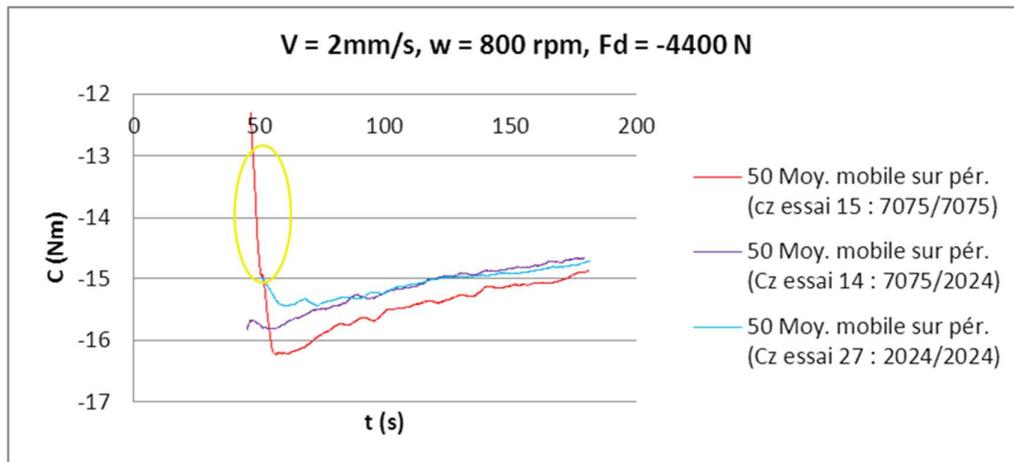


Figure V-33 : Forces transversales en x et en y pour les 3 configurations.**Figure V-34 : Couple axial pour les 3 configurations.**

L'influence du matériau sur le couple est présentée sur la Figure V-34. Les courbes des configurations, mixte et en 2024 sont très proches. Le couple de l'assemblage en 7075 est plus fort, ce qui est en accord avec une température plus faible. Notons que les valeurs initiales extrêmes des forces et du couple pour l'essai 15 sont dues à la formation d'un trou en surface en début de soudure (lorsque l'outil amorce son avancée et est piloté en position) ; ce défaut disparaît par la suite mais il montre comment un défaut de ce type entraîne une diminution du couple et une augmentation des efforts comme nous le reverrons plus loin (voir Figure V-33 et Figure V-34).

Il apparaît de cette étude comparative des 3 configurations que le comportement du matériau dans la configuration mixte se rapproche d'avantage de celle dans la configuration en 2024 seul. Compte-tenu de l'ensemble de ces résultats, dans une première approche, nous pouvons raisonnablement approximer le comportement de l'assemblage 7075/2024 par celui du 2024/2024 et ainsi nous satisfaire de la simulation numérique du soudage mono-matériau. La suite de ce chapitre est donc consacrée à l'étude de la seule configuration 2024/2024, en prévision de la comparaison des résultats expérimentaux aux calculs numériques.

IV.3. Influence des paramètres procédés d'entrée

Dans ce paragraphe, notre intérêt se porte sur l'influence des paramètres du procédé sur les différentes observables thermiques et mécaniques. Notre analyse des résultats est plutôt qualitative car, comme nous l'avons vu, les valeurs de températures d'outil et de couple ne sont pas stabilisées lorsque la soudure arrive en bout de tôle. Cet effet est d'autant plus important que la vitesse d'avance est élevée ; plus la soudure est rapide et moins le régime stationnaire est atteint rapidement. Nous précisons de nouveau les caractéristiques des différents essais analysés pour la configuration en 2024/2024, dans le Tableau V-8.

	Configuration	F (N)	w (tpm)	v (mm/s)	Qualité
Essai 5	2024/2024	-4000	1000	2	Pas de trous
Essai 9	2024/2024	-4400	1000	4	Trous interface tôles
Essai 10	2024/2024	-4400	1200	4	Trous interface tôles
Essai 11	2024/2024	-4800	1200	6	Trou surface lors du contrôle en position, Trous interface tôles
Essai 12	2024/2024	-4800	1400	6	Trou en surface lors du contrôle en position + trous interface tôles
Essai 13	2024/2024	-4000	1000	2	Pas de trous
Essai 14	2024/2024	-4000	800	2	Trou en surface, état granuleux + Trous interface tôles
Essai 16	2024/2024	-4400	1000	4	
Essai 17	2024/2024	-4000	1000	2	Pas de trous
Essai 18	2024/2024	-4400	1200	4	
Essai 21	2024/2024	-4800	1200	6	
Essai 23	2024/2024	-4800	1400	6	Trous interface tôles
Essai 24	2024/2024	-4400	1000	4	Trous interface tôles, légères bavures
Essai 26	2024/2024	-4000	800	2	Pas de trous (trou surface lors du contrôle en position)
Essai 27	2024/2024	-4400	800	2	Pas de trous
Essai 28	2024/2024	-4400	800	2	Porosités surface en fin de soudure
Essai 29	2024/2024	-4800	1200	2	Pas de trous, bavures
Essai 30	2024/2024	-3600	800	2	Trou mi pion
Essai 31	2024/2024	-3600	800	4	Trou bas de pion et porosité en surface

Tableau V-8 : Récapitulatif des essais pour la configuration 2024/2024.

Le graphique de la Figure V-35 présente l'évolution de la température du capteur T2 en fonction du temps pour différents paramètres du procédé, en faisant varier la force, les vitesses d'avance et de rotation (voir Tableau V-9).

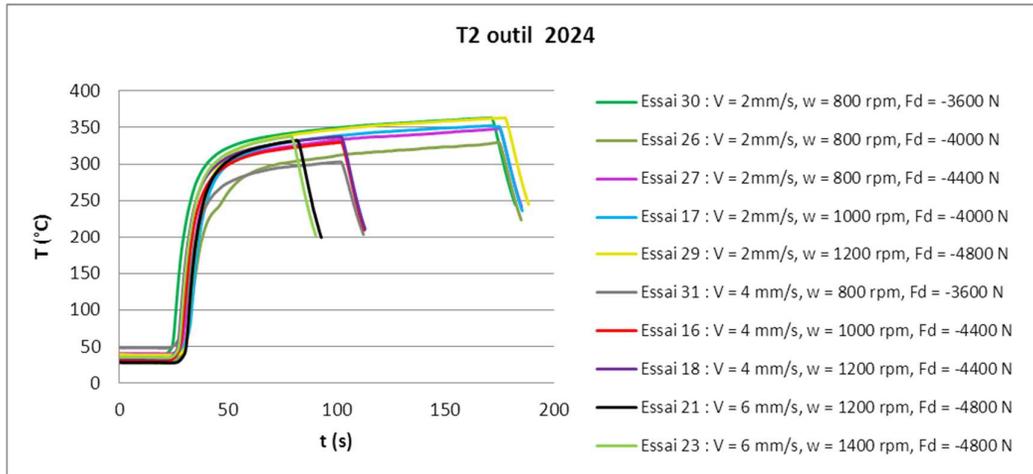


Figure V-35 : Influence des paramètres (v,w,F) sur T2 outil.

Essai	30	26	27	17	29	31	16	18	21	23
V (mm/s)	2	2	2	2	2	4	4	4	6	6
w (tpm)	800	800	800	1000	1200	800	1000	1200	1200	1400
V/w	0,150	0,150	0,150	0,120	0,096	0,3	0,24	0,18	0,3	0,258
F (N)	3600	4000	4400	4000	4800	3600	4400	4400	4800	4800
T2 max (°C)	318,5	329,75	348,75	352,5	363,25	303,25	329,75	337,25	332,5	338

Tableau V-9 : Influence des paramètres (v,w,F) sur T2 outil.

Le rapport de soudage⁴, est couramment utilisé pour qualifier la nature de la soudure : plus sa valeur augmente, plus la soudure est froide. Ce résultat est bien retrouvé lors de nos observations : la température augmente lorsque nous diminuons ce rapport en réduisant la vitesse d’avance ou en augmentant celle de rotation. Cependant, il est nécessaire d’effectuer ces comparaisons à force constante. Effectivement, la température augmente avec la force pour des vitesses d’avance et de rotation constantes, ou pour un rapport de soudage constant, étant donné que l’échauffement croit avec la pression de contact. Ainsi, pour l’essai 26, le rapport de soudage de 0,15 avec une force de 4 000 N donne une température de 329,75°C, alors que l’essai 18 avec rapport de soudage plus grand (0,18) et une force plus grande (4 400 N) donne une température plus élevée égale à 337,25°C. L’effet de l’augmentation de la force l’emporte dans ce cas sur celle du rapport de soudage.

⁴ égal à la vitesse d’avance divisée par la vitesse de rotation

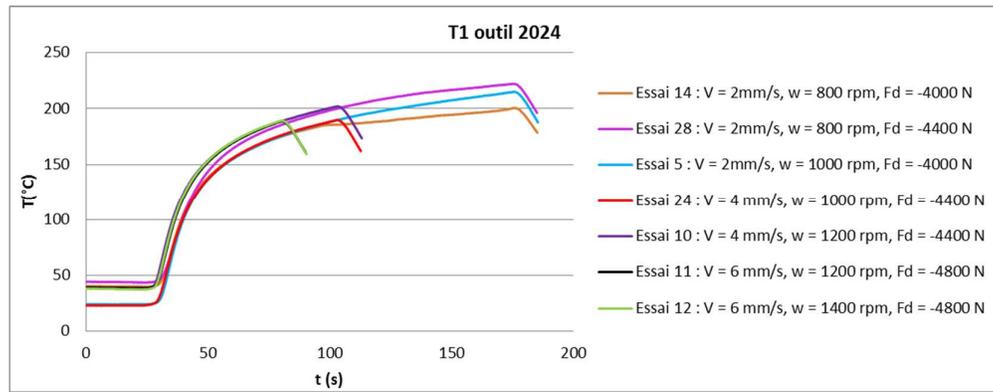


Figure V-36 : Influence des conditions du procédé sur l'évolution du capteur T1 dans l'outil pour un soudage 2024/2024.

Essai	14	28	5	24	10	11	12
V (mm/s)	2	2	2	4	4	6	6
w (tpm)	800	800	1000	1000	1200	1200	1400
V/w	0,150	0,150	0,120	0,24	0,18	0,3	0,258
F (N)	4000	4400	4000	4400	4400	4800	4800
T1 max (°C)	200,25	222,25	215	189,75	202	188,75	189,25

Tableau V-10 : Influence des paramètres (v,w,F) sur T1 outil.

Les résultats du capteur T1 (voir Figure V-36 et Tableau V-10) sont parfaitement et logiquement en accord avec ceux du capteur T2.

La réponse mécanique de l'outil reflète également le comportement du matériau. Etudions dans un premier temps le couple axial. Pour des vitesses d'avance et de rotation fixées, le couple augmente avec la force (voir Figure V-37), ce qui est conforme aux attentes pour un contact non collant. En revanche, les efforts transverses et longitudinaux diminuent. L'augmentation de la force entraîne une élévation de la température qui réduit les efforts transverses mais accroît la contrainte normale, le cisaillement et l'énergie dissipée et par conséquent le couple (à vitesse de rotation constante). Notons que les essais 30 et 26 présentent des défauts de type trou tunnel et petites cavités (localisées à l'interface entre les 2 tôles), de sorte que le couple est plus faible qu'en l'absence de défauts.

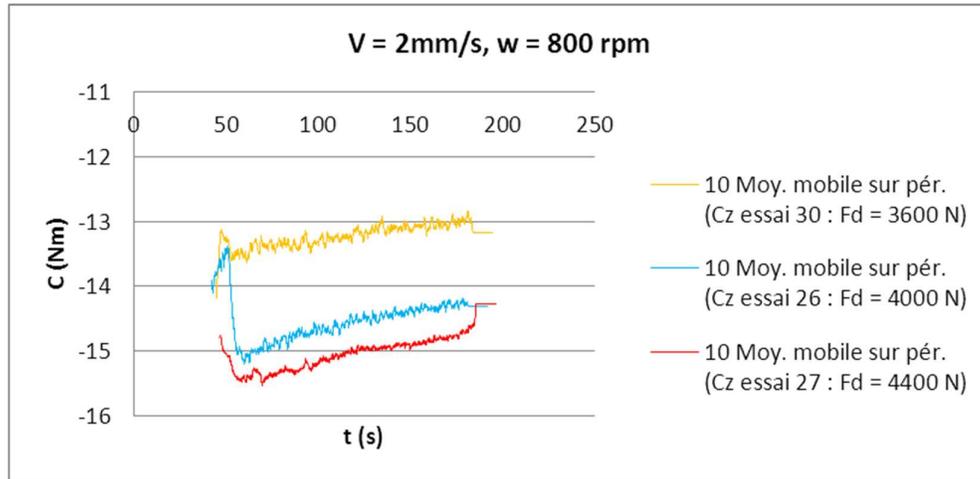


Figure V-37 : Influence de la force de soudage sur le couple axial pour le 2024.

Lorsque la vitesse d'avance croît (voir Figure V-38), le couple augmente lui aussi ; pour une vitesse multipliée par 3, le couple est multiplié par 1,1. Cette analyse doit toutefois être pondérée par le fait que l'essai 21 présente un trou qui, comme nous l'avons vu précédemment, provoque la baisse du couple.

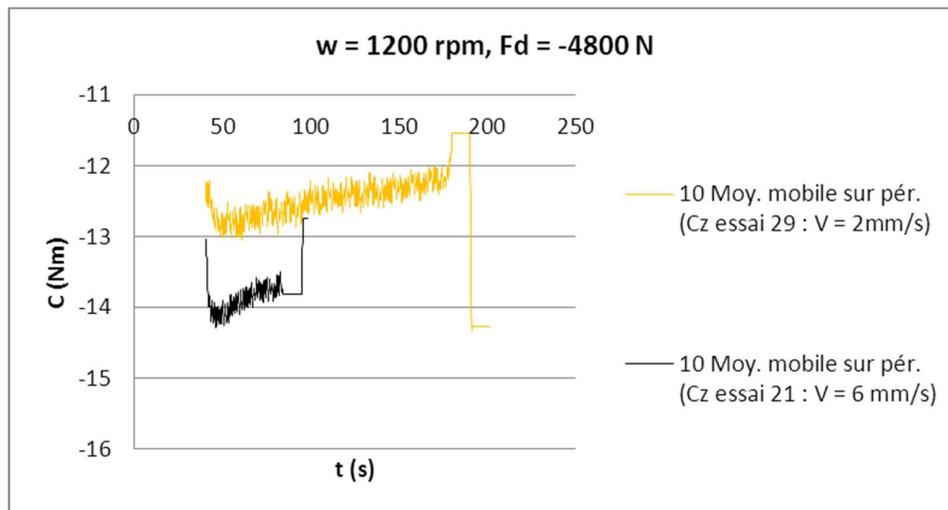


Figure V-38 : Influence de la vitesse d'avance sur le couple axial pour le 2024.

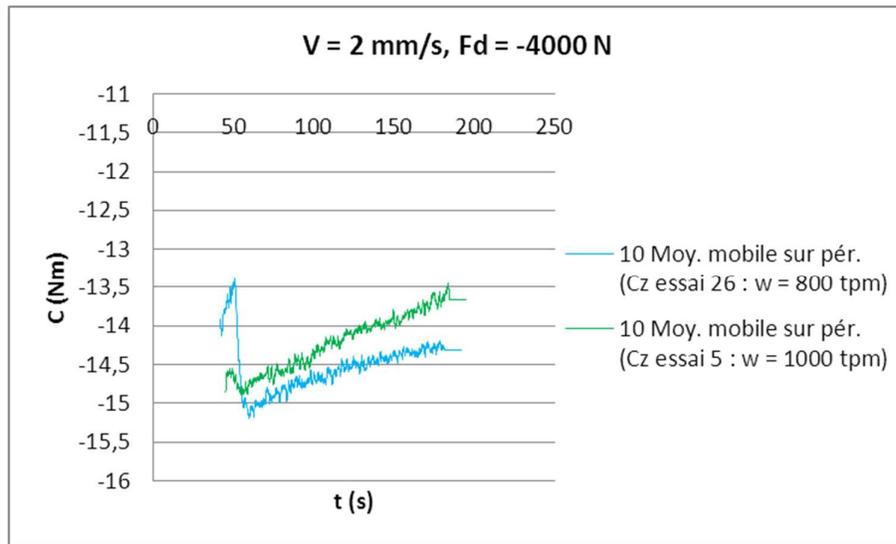


Figure V-39 : Influence de la vitesse de rotation sur le couple axial pour le 2024 à 2 mm/s et 4000 N.

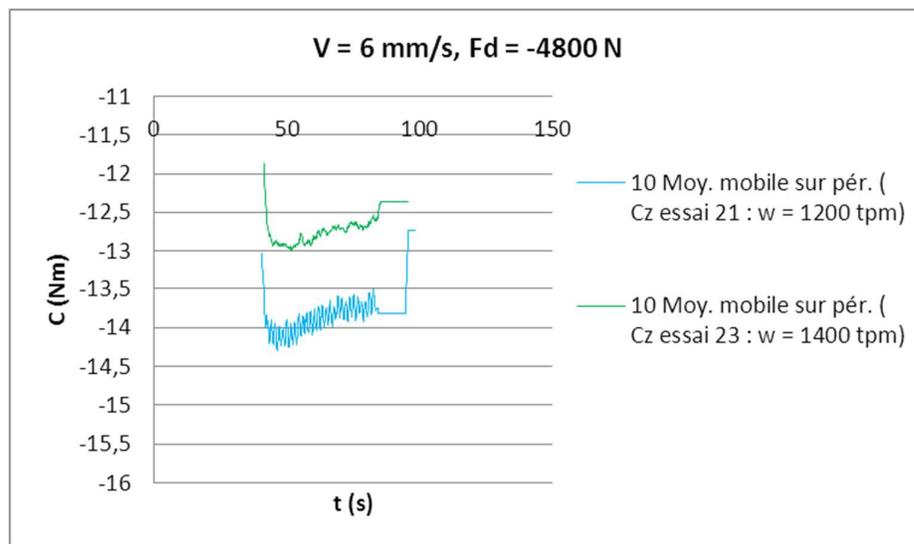


Figure V-40 : Influence de la vitesse de rotation sur le couple axial pour le 2024 à 6 mm/s et 4800 N.

Comme la relation suivante, entre la puissance, le couple et la vitesse de rotation, l'indique, plus la vitesse de rotation augmente, plus le couple diminue (voir Figure V-39) car la puissance fournie au système s'amplifie mais moins rapidement que proportionnellement à la vitesse de rotation.

$$P = \omega \times C_z, \quad \text{V-1}$$

Une autre manière de dire les choses est que la génération de chaleur et la température augmentent avec la vitesse de rotation entraînant une diminution de la contrainte d'écoulement et donc du couple. Cette variation de la valeur du couple est d'autant plus forte que la vitesse de rotation est élevée (voir Figure V-40). Ceci met en évidence un changement de la nature du contact à fortes vitesses de rotation (température plus élevée) ; celui-ci devient plus glissant (Gemme et al. 2010).

Intéressons-nous maintenant à l'influence des paramètres du procédé sur la formation des défauts.

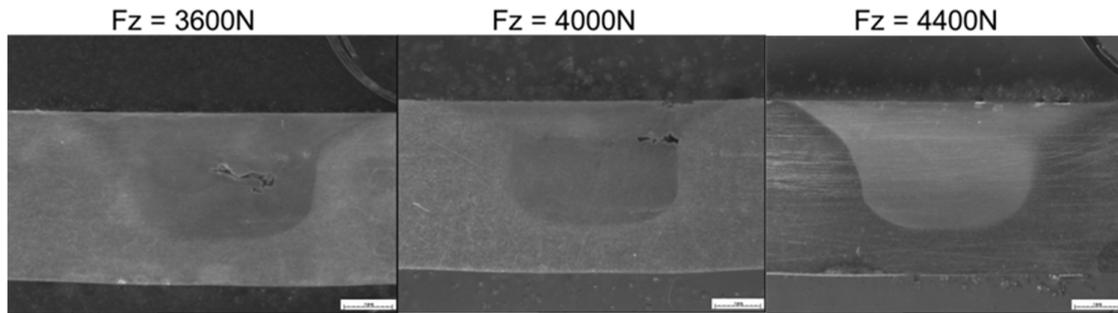


Figure V-41 : Influence de la force axiale imposée, sur la formation de défauts

Lorsque l'effort augmente, la température s'élève et la formation de défauts est réduite (voir Figure V-41). Les macrographies montrent nettement l'influence de l'effort sur la compacité de la soudure. Il est notamment intéressant de noter la transition du trou tunnel (obtenu à 3 600 N) au petit trou situé à l'interface entre les tôles (pour une force de 4 000 N) et finalement à la soudure sans trou (pour une force de 4 400 N).

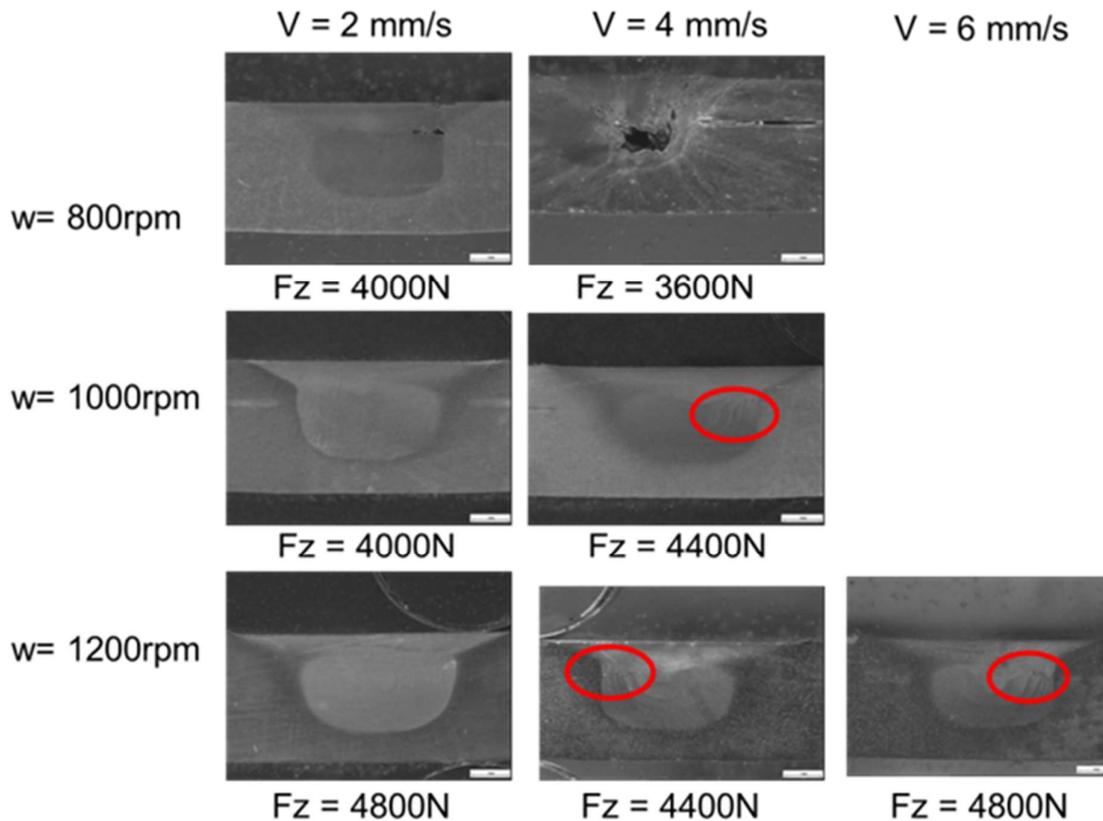


Figure V-42 : Influence de la vitesse de rotation et de la vitesse d'avance sur la formation de défauts pour la configuration en 2024/2024.

Les macrographies de la Figure V-42 montrent l'influence du rapport de soudage (v/ω). Lorsqu'il augmente, nous observons la transition : pas de défauts - petit trou discontinu - trou tunnel continu.

Cette étude de sensibilité a mis en évidence des résultats connus du procédé FSW.

L'influence des deux vitesses d'avance et de rotation, à force constante, sur la température de la soudure et donc sur sa qualité est conforme à ce qui est habituellement observé. Une soudure trop froide due à une vitesse d'avance trop grande ou une vitesse de rotation trop faible, conduit à un mauvais malaxage de la matière (kissing bond) et à l'apparition de défauts macroscopiques de type trous. Il a été noté que le couple augmente avec la vitesse d'avance et diminue avec la vitesse de rotation.

Nous allons ci-après relier ces défauts aux observables des essais que sont le couple axial, la température et les efforts mesurés.

IV.4. Analyse de configurations présentant des défauts

Le premier cas que nous considérons est l'essai 2 de la configuration 7075/7075 où nous avons assisté à un effondrement du matériau car la soudure était trop chaude. La vitesse d'avance est de 2 mm/s, celle de rotation est de 1 200 tpm et la force axiale est de 4 800 N. Le couple (voir Figure V-43), l'effort transverse et l'effort longitudinal (voir Figure V-44) augmentent brusquement tandis qu'une réduction brutale de l'effort axial imposé apparaît (voir Figure V-45).

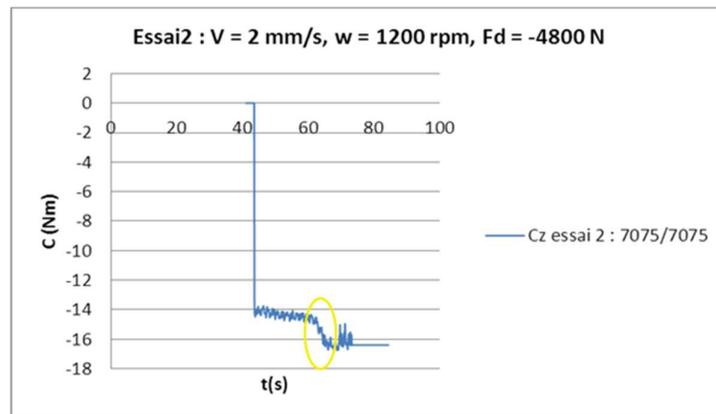


Figure V-43 : Couple axiale mesuré lors de l'essai 2 en 7075.

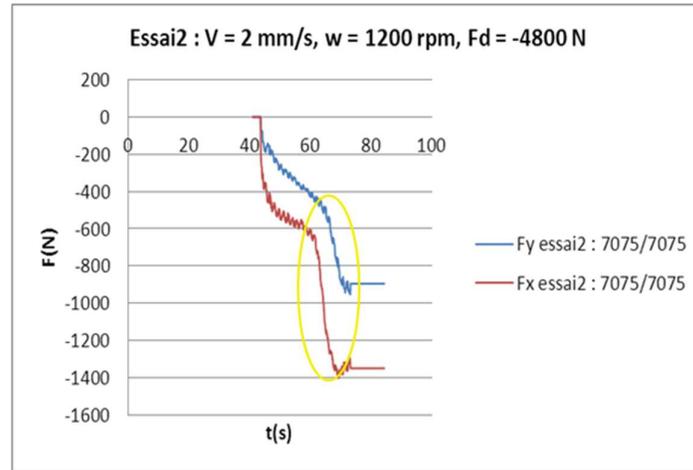


Figure V-44 : Forces longitudinale et transverse mesurées lors de l'essai 2 en 7075.

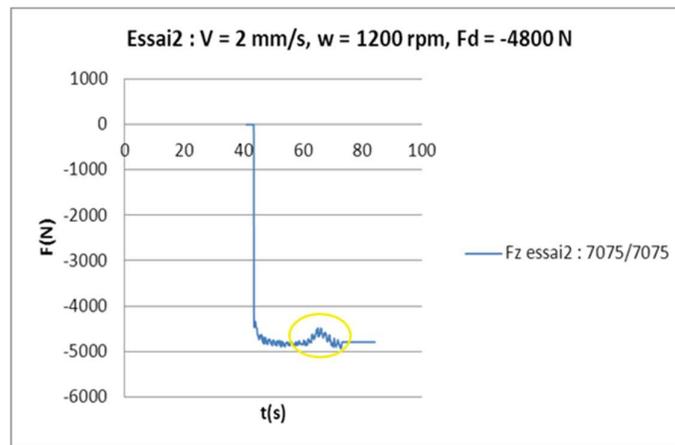


Figure V-45 : Force axiale (imposée) lors de l'essai 2 en 7075.

Un autre cas particulier est l'essai 14 (voir Tableau V-8) avec le matériau 2024. Un trou apparaît en surface au milieu de la ligne de soudure (voir Figure V-46).



Figure V-46 : Trou en surface en milieu de soudure pour l'essai 14 en 2024/2024.

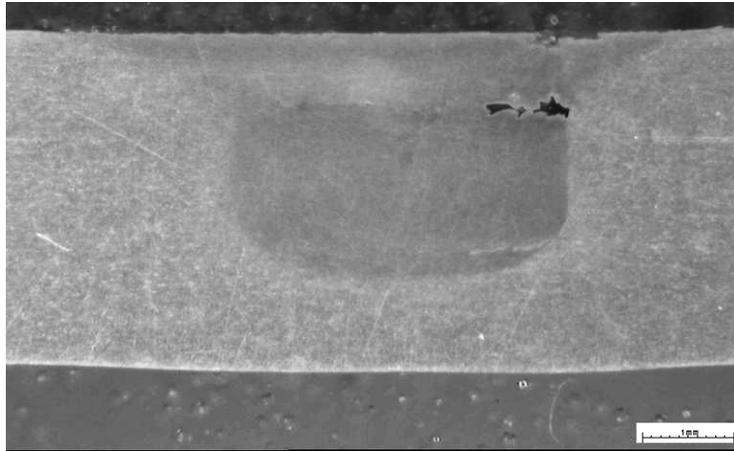


Figure V-47 : Essai 14 en 2024/2024. Macrographies d'une coupe dans le plan perpendiculaire au cordon : apparition d'un trou dû à un manque de pénétration.

Ce défaut de surface est accompagné d'un défaut en profondeur (voir Figure V-47), il se traduit par une diminution du couple axial (voir la courbe en rouge de la Figure V-48) après environ 100 s de soudage, ce qui correspond à 200 mm de cordon de soudure et qui coïncide avec l'apparition du trou en surface. Cette causalité est cohérente dans le sens où il y a moins de matière en rotation. Le phénomène est également visible sur les forces avec un saut des courbes : la force transverse augmente alors que la force longitudinale décroît.

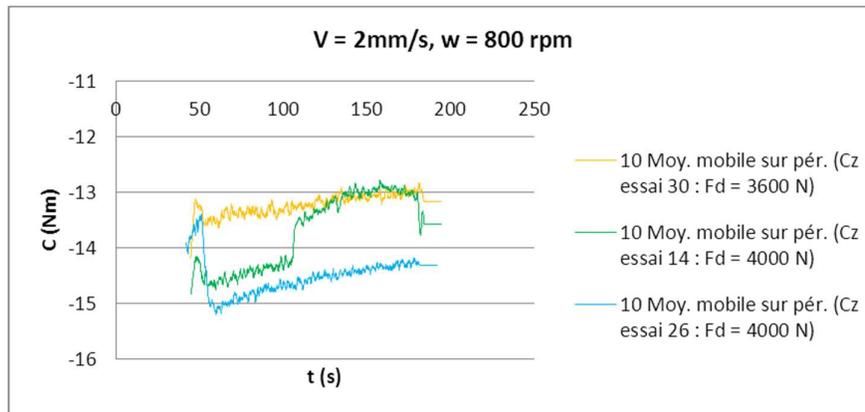


Figure V-48 : Influence de la force axiale imposée sur le couple : trou en milieu de soudure pour l'essai 14.

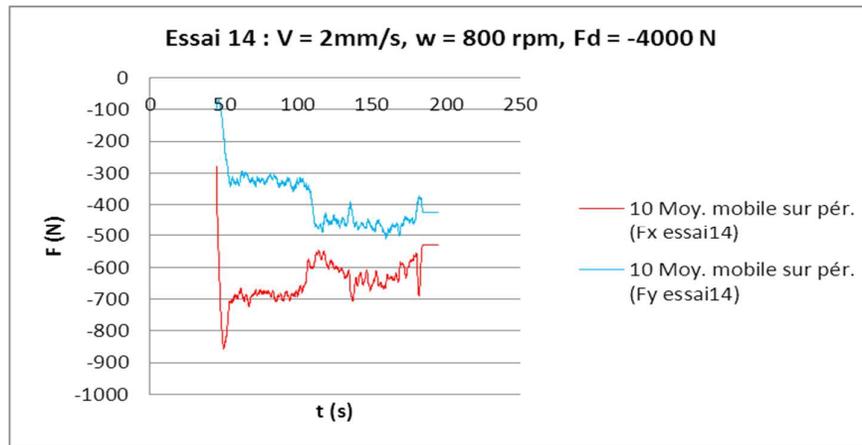


Figure V-49 : Force longitudinale et force transverse pour l'essai 14 avec trou en milieu de soudure.

Nous avons vu que la formation de défauts se traduit sur la réponse mécanique de l'outil : les efforts transverses varient brutalement et le couple diminue. Nous avons également observé le rôle d'une augmentation de la force axiale sur la disparition de ces trous ; cette augmentation va de pair avec une augmentation du couple et une diminution des efforts transverses. Cependant, si cette force devient trop élevée en étant combinée à une vitesse de rotation trop grande, elle conduit à d'autres défauts macroscopiques tels que les bavures ou à des défauts microscopiques tels que le hooking.

V. Conclusion

Plusieurs campagnes expérimentales ont pu être menées avec succès (bonne reproductibilité des essais). Elles nous ont permis d'accumuler de nombreux résultats, tout particulièrement la température dans l'outil, grandeur peu couramment obtenue et qui a nécessité le développement d'un montage spécial pour notre étude.

Nous avons étudié 3 configurations de soudage : 7075/2024, 2024/2024 et 7075/7075 et déterminé les fenêtres de soudage de chacune d'elles. Malgré l'influence du matériau sur les résultats obtenus, la configuration mono-matériau 2024/2024 présente des résultats très proches de la configuration d'étude multi-matériaux 7075/2024 ; en particulier, et c'est le plus important, leurs fenêtres de soudage sont très semblables. Nous pouvons donc raisonnablement remplacer l'étude de la configuration 7075/2024 par celle mono-matériau 2024/2024 dont le comportement est très proche et qui est plus facile à simuler numériquement.

Nous disposons de mesures d'efforts, de couple, de température dans la plaque et dans l'outil. Nous avons également pu estimer le gradient de température dans l'outil et dans la plaque. Nous connaissons, de plus, la sensibilité de ces différentes observables et de l'apparition de défauts aux paramètres du procédé, ce qui constitue une source complémentaire de validation de la simulation numérique.

Le chapitre suivant est consacré à la calibration du modèle numérique pour la configuration de soudage choisie.