



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/8760>

#### **To cite this version :**

Sandra ZIMMER-CHEVRET, Laurent LANGLOIS, Jonathan HATSCH, Nejah JEMAL, Gabriel ABBA - Etude des tolérances du procédé vis-à-vis des défauts de position et d'orientation de l'outil pour la robotisation du FSW - In: 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, France, 2013-08-26 - CFM'2013 - 2013

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



# Etude des tolérances du procédé vis-à-vis des défauts de position et d'orientation de l'outil pour la robotisation du FSW

S. ZIMMER (CHEVRET)<sup>a</sup>, L. LANGLOIS<sup>a</sup>, J. HATSCH<sup>b</sup>, N. JEMAL<sup>a</sup>, G. ABBA<sup>c</sup>, R. BIGOT<sup>a</sup>

a. ARTS ET METIERS ParisTech Metz, Laboratoire de Conception Fabrication Commande, 4 rue Augustin Fresnel, 57078 Metz Cedex 03

b. Institut de Soudure, Centre FSW, 2-4 rue Pilâtre de Rozier, 57420 Goin

c. ENIM, Route Ars Laquenexy, 57070 Metz

## Résumé :

Le FSW est un procédé de soudage innovant ayant démontré son aptitude à être industrialisé pour le soudage des alliages d'aluminiums. Afin de réduire les coûts d'investissement liés à l'achat de la machine et offrir une flexibilité en termes d'applications soudables, la robotisation du procédé apparaît comme une opportunité. Les robots poly-articulés remplissent ces critères mais sous l'action des efforts de soudage appliqués sur l'outil, leur structure fléchit. Ceci conduit à une déviation de la position de l'outil par rapport à la trajectoire nominale. L'étude proposée porte sur l'analyse des tolérances du procédé FSW vis-à-vis des défauts de suivi de trajectoire. Une étude expérimentale est présentée pour évaluer l'influence du défaut d'inclinaison angulaire de l'outil sur la qualité de la soudure, l'évolution du couple et l'effort d'avance. L'intérêt est de cerner l'impact d'une désorientation sur le torseur des actions mécaniques qui peut survenir avec un robot polyarticulé.

## Abstract :

Friction Stir Welding (FSW) is an innovative welding process increasingly used by industry for the welding of aluminum alloys. In order to reduce the high investment costs of a dedicated FSW's machine and in order to offer more flexibility to weld complex geometry, high payload robots may be used. A serial kinematics robot meets these specifications but under the stresses generated during welding, its structure readily deforms. The consequences are deviations of the tool nominal position with respect to the seam. The work presented here proposes to study the process tolerances with tool positioning defect. An experimental study enables to evaluate the influence of the tool position disorientation on weld quality, the travel force and torque generated. The objective is to estimate the impact of the disorientation on the tool mechanical interactions when welding using a serial kinematics robot.

**Mots clefs:** FSW, robotisation, erreur de position, tolérance du procédé

## 1 Friction Stir Welding

Le FSW (Friction Stir Welding) est un procédé de soudage à l'état solide [1] permettant de souder tous les alliages d'aluminium même ceux réputés difficilement soudables par les procédés de soudage à l'arc [2]. Pour réaliser du FSW, un outil en rotation, composé d'un épaulement et d'un pion (figure 1) est inséré dans le plan de joint des pièces à souder préalablement bridées. Lorsque l'épaulement est en contact avec la surface des pièces, un effort constant ( $F_z$ ) est appliqué selon l'axe de rotation (figure 1). L'outil est alors animé d'une vitesse d'avance suivant la ligne de joint. Le cordon de soudure est réalisé de proche en proche. Les paramètres opératoires (fréquence de rotation, vitesse d'avance et  $F_z$ ) sont choisis de sorte qu'il y ait l'apport d'énergie nécessaire à la formation d'un cordon de soudure sans défaut de compacité. En conséquence, durant toute l'opération de soudage FSW, des actions mécaniques (efforts et couple) sont appliquées par la matière sur l'outil (figure 1) [3]. Ceux-ci impactent les moyens de soudage (machine et système de bridage). Ces travaux de recherche se concentrent sur l'industrialisation du FSW dans l'objectif de caractériser les moyens de production. Une machine de FSW doit appliquer les paramètres opératoires nécessaires et maintenir une certaine position de l'outil par rapport aux surfaces à souder. Ces travaux sont

consacrés à l'étude des tolérances du procédé FSW vis-à-vis des défauts de positionnement de l'outil par rapport au plan de joint que l'on peut rencontrer avec l'utilisation d'un robot poly-articulé. Ce moyen de soudage permet de souder des pièces de forme complexe mais fléchit sous l'action des efforts. Cela peut engendrer une déviation de la position de l'outil par rapport à sa position nominale.

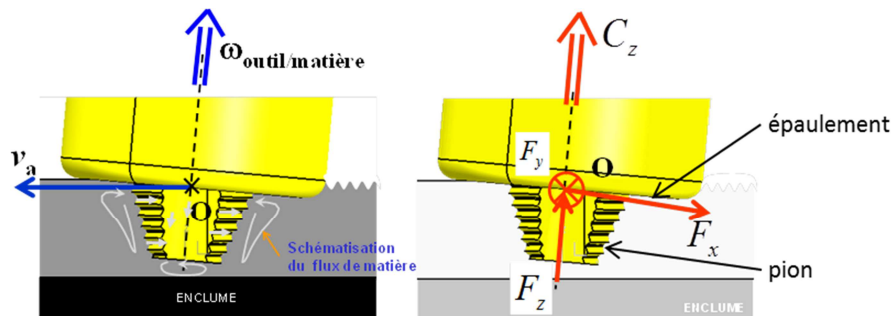


FIG. 1 – Schéma du principe local du FSW.

## 2 Problématique

Le FSW est un procédé de soudage à l'état solide de proche en proche. La première caractéristique lui permet de souder les alliages d'aluminium difficilement soudables du fait de leur sensibilité à la fissuration à chaud ou à la création de soufflures. Sa seconde caractéristique lui permet de souder des pièces de forme complexe à l'instar des procédés de soudage par fusion. Pour pouvoir bénéficier pleinement de ce second avantage, il serait intéressant d'utiliser des machines pouvant générer des trajectoires complexes dans des espaces de travail conséquents. L'utilisation des robots poly-articulés répond à cette problématique. Toutefois, deux difficultés majeures se présentent :

- en FSW l'outil est piloté en effort suivant son axe de rotation et non en position ;
- les efforts de soudage provoquent des déformations de la structure robotisées et ainsi des défauts de suivi de trajectoire et d'orientation de l'outil.

La déformation du robot va générer deux types de défaut géométrique outil/pièce :

- un décalage de l'outil par rapport à la ligne de joint ;
- une désorientation de l'outil par rapport à son axe théorique.

Si ces défauts géométriques sont d'une amplitude suffisante, ils peuvent conduire à des défauts dans les pièces soudées. L'amplitude des composantes du torseur des actions mécaniques outil/matière dépend de l'orientation de l'outil. Le défaut d'orientation de l'outil et de décalage résulte donc du couplage entre les efforts de soudage et la déformation du robot.

La configuration de soudage considérée est une soudure bout-à-bout rectiligne. Dans cette configuration, on peut associer à chaque point de la ligne de joint un repère  $R_p(O, x_p, y_p, z_p)$ . La ligne de joint est définie comme l'intersection de la surface d'accostage avec la surface supérieure des pièces à souder. Cette dernière est définie comme celle qui va recevoir l'épaulement lors de la soudure.  $x_p$  est le vecteur tangent à la ligne de joint dirigé dans le sens de la vitesse d'avance de soudage.  $z_p$  est le vecteur normal à la surface supérieure des pièces à souder.

Dans le repère  $R_p$ , l'orientation de l'axe de l'outil est donnée par deux angles  $\psi$  et  $\phi$  (figure 2.a). Pour définir la position de l'outil, il est nécessaire de définir le centre d'un repère outil. L'outil FSW est composé d'un pion et d'un épaulement. Il est possible, dans une grande majorité des cas, de définir une géométrie enveloppe du pion et de l'épaulement. La géométrie enveloppe du pion correspond à un cylindre ou un cône. Celle de l'épaulement correspond à un plan, un cône ou une calotte sphérique. Si la géométrie de l'outil est supposée parfaite, les axes de révolution des surfaces enveloppes du pion et de l'épaulement sont confondus. On peut définir le centre du repère outil comme l'intersection entre l'axe de révolution de la surface enveloppe de l'outil et d'un plan tangent du côté opposé au côté libre de la matière (figure 2.b). Au cours de l'opération de soudage, il sera supposé que l'axe de rotation de l'outil est confondu avec l'axe de révolution de sa surface enveloppe.

Dans le repère de la pièce, le torseur cinématique du mouvement de l'outil par rapport à la pièce et le torseur des efforts exercés par la matière sur l'outil sont donnés de façon générale par les relations (1) et (2) :

$$\{C_{\text{outil}/\text{pièce}}\} : \{\omega_{\text{outil}}; V_a \vec{x}_p + \delta_z \vec{z}_{\text{outil}}\}_{O_{\text{outil}}} ; \{T_{\text{matière}/\text{outil}}\} : \left\{ \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ C_z \end{pmatrix} \right\}_{(R_{\text{outil}})} \quad (1) \text{ et } (2)$$

Dans l'équation (1), le terme  $\delta_z$  correspond à la variation de position de l'outil suivant z, axe suivant lequel l'outil est piloté en effort. Sa position peut fluctuer au cours du soudage, dépendant de l'équilibre entre l'effort appliqué par la machine sur l'outil est celui renvoyé par la matière sur l'outil. La position et l'orientation de l'outil sont définies par les relations (3) et (4) :

$$\overrightarrow{O_p O_{\text{outil}}} = \delta_y \vec{y}_p + \delta_z \vec{z}_{\text{outil}} \quad \text{et} \quad \vec{z}_{\text{outil}} = \cos \varphi \cos \psi \vec{z}_p - \cos \varphi \sin \psi \vec{y}_p + \sin \varphi \vec{x}_p \quad (3) \text{ et } (4)$$

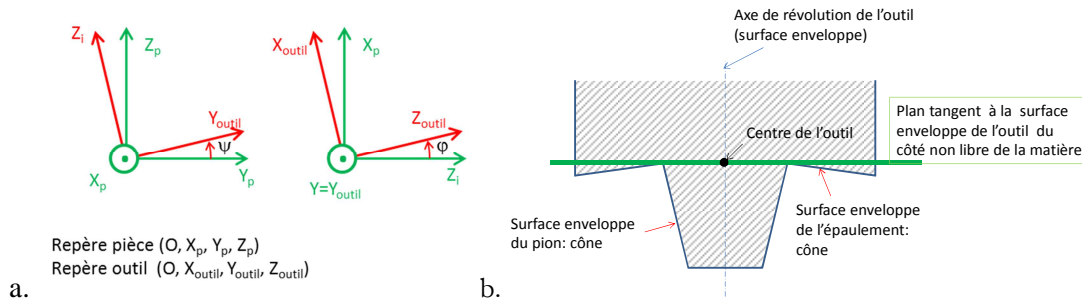


FIG. 2 – Repère local pièce et Repère de l'outil

Dans un fonctionnement idéal stationnaire, la profondeur de pénétration de l'outil peut être considérée comme stable au cours du soudage. La composante  $\delta_z$  du vecteur vitesse du centre de l'outil est nulle. De même, dans le cas d'une soudure bout-à-bout homogène, l'outil est centré sur la ligne de joint ( $\delta_y=0$ ) et l'angle  $\psi$  est nul. Les défauts considérés dans l'étude et susceptibles d'être générés par la déformation de la structure robotisée, sont : une variation des angles définissant l'orientation de l'axe de l'outil et une variation du décalage  $\delta_y$ . L'objectif du travail présenté dans cet article est, pour la configuration étudiée :

- de définir l'intervalle de tolérance du procédé vis-à-vis du défaut de position et d'orientation de l'outil par rapport à la ligne de joint,
- d'identifier les phénomènes « défaut » bornant l'intervalle de tolérance,
- d'établir le lien entre le défaut de position et d'orientation et l'évolution des composantes du torseur des actions mécaniques outil/matière.

Ce dernier point doit permettre dans le cas d'une structure robotisée « souple », d'appréhender le couplage entre la déformation du robot et le torseur des actions outil/matière. Dans le paragraphe suivant, le dispositif expérimental et le cas d'étude sont décrits. Les paramètres opératoires (vitesse de rotation, vitesse d'avance, effort de forge et angle d'inclinaison nominal) d'un essai dit de référence sont déterminés. Les résultats de cet essai concernant les composantes du torseur des efforts sont présentés. Les tableaux de paramètres des essais avec défaut sont présentés. Les résultats de la campagne expérimentale font l'objet du troisième paragraphe. Les défauts de soudage et les composantes des efforts outil/matière sont présentés et interprétés.

### 3 Procédure Expérimentale

L'étude porte sur une soudure bout-à-bout de deux tôles en alliage d'aluminium 6082-T651 d'épaisseur 6 mm. La longueur de la soudure est de 300 mm. Le diamètre d'épaulement de l'outil utilisé est de 21 mm pour une longueur de pion légèrement inférieure à 6 mm. Le pion a une forme enveloppe conique et comporte des filets. L'épaulement est concave. L'opération est pilotée en effort, comme cela est le cas lors du soudage FSW robotisé [4]. L'objectif de ces essais est d'étudier les défauts générés et l'évolution du couple outil, même si la configuration étudiée n'est pas robotisable ( $F_z > 10\text{kN}$ ). Les essais sont réalisés sur une machine MTS-ISTIR10, de l'Institut de Soudure, permettant un contrôle en effort suivant l'axe de l'outil. Les trois composantes de la résultante des efforts de soudage et le couple sont mesurés par la machine. Dans un premier temps, un essai de référence a été identifié. Les conditions opératoires de cet essai sont données dans le tableau 1. Ces paramètres conduisent à une soudure sans défaut de compacité. Dans l'étude expérimentale paramétrique, nous nous intéresserons à la valeur moyenne des composantes d'efforts en phase de soudage stationnaire. Pour chaque essai, la dérive éventuelle de l'effort d'avance et du couple a été contrôlée.  $\varphi$  correspond à l'angle de soudage opposé à la direction d'avance, généralement dénommé « tilt ».

Vitesse d'avance	Fréquence de rotation	Effort axial	$\varphi$	$\psi$	Décalage
mm/min	tr/min	kN	°	°	mm
600	1300	16	2,5	0	0

TAB. 1 – Conditions opératoires de la soudure de référence.

L'étude paramétrique porte sur trois paramètres identifiés au paragraphe précédent, les deux angles définissant l'orientation de l'axe de l'outil ( $\varphi$ ,  $\psi$ ) et le décalage de l'outil par rapport à la ligne de joint ( $\delta_y$ ). Dans l'étude paramétrique chaque paramètre est étudié séparément. L'effet combiné des trois défauts n'est pas étudié. Le tableau 2 donne les valeurs testées pour les trois paramètres. Du fait de la rotation de l'outil, les champs de température, de déformation, etc. ne sont pas symétriques par rapport à la ligne de joint. On ne peut donc pas réduire le nombre d'essais en considérant cette symétrie. Les valeurs négatives de  $\delta_y$  correspondent à des décalages du côté avance de la soudure. De même, les valeurs négatives de l'angle  $\psi$  correspondent à une inclinaison de l'outil du côté avance. La figure 3 présente la mise en œuvre expérimentale pour l'étude de l'influence de l'angle  $\psi$ .

Fréquence de rotation	Vitesse d'avance	Effort de forge	$\varphi$		$\psi$		$\delta_y$	
			Intervalle	pas	intervalle	pas	Intervalle (mm)	pas (mm)
1300 tr/min	600 mm/min	16 kN	0.5°; 5.5°	1°	(-8°); 8°	2°	(-6); 6	1

TAB 2 – Paramètres opératoires de l'étude expérimentale.

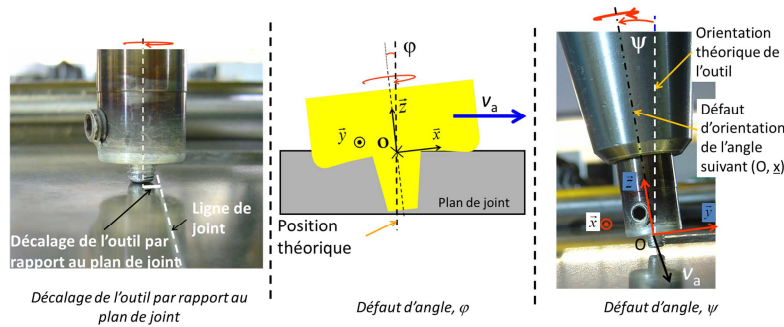


FIG. 3 – Présentation des défauts étudiés, mise en œuvre expérimentale.

### 4 Résultats et discussions

Le tableau 3 donne pour chaque soudure réalisée les défauts éventuels observés (contrôle macrographique). Lorsque le décalage est trop prononcé, ici pour une valeur d'environ 2mm, un défaut de pénétration partielle apparaît. On n'observe pas de différence notable entre un décalage du côté retrait et du côté avance. Pour l'angle de soudage  $\varphi$ , on constate un manque de pénétration pour un angle trop fort. Par contre, on constate une pénétration excessive de l'outil pour les angles trop faibles (voir tableau 3). L'inclinaison de l'outil d'un angle  $\psi$ , que ce soit du côté avance ou du côté retrait, provoque un amincissement de la section de la soudure et une bavure importante du côté opposé. En fonction du critère d'acceptabilité de ce défaut, l'angle toléré n'excède pas 2°. En dessous de 2°, aucun amincissement notable n'est constaté.

Décalage (mm)	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
Défaut	MP	MP	MP	MP	OK	OK	OK	OK	OK	MP	MP	MP	MP
MP: Manque de pénétration en racine - OK: Soudure sans défaut de compacité interne													
Angle $\varphi$ (°)	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5								
Défaut	PE	OK	OK	OK	MP								
PE: Pénétration excessive - MP: Manque de pénétration en racine													
Angle $\psi$ (°)	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8				
Défaut	Am	Am	Am	OK	OK	OK	Am	Am	Am				
Am: Amincissement de la soudure - OK: Soudure sans défaut													

TAB. 3 – Défauts obtenus dans les soudures réalisées avec différentes orientations de l'outil.

En FSW, la largeur de la zone malaxée n'est pas uniforme sur toute l'épaisseur des pièces. Au niveau de la surface supérieure, la largeur correspond environ au diamètre de l'épaulement. Au niveau de la surface

inférieure, si la pénétration de l'outil est suffisante, la largeur est équivalente au diamètre de l'extrémité du pion [3]. Si le décalage de l'outil est de l'ordre du rayon de l'extrémité du pion, il apparaît donc un manque de pénétration. Au-delà du rayon du pion, la hauteur non malaxée croît rapidement avec le décalage [3]. Au cours du soudage, la zone malaxée est confinée entre le pion, l'enclume et latéralement par les pièces elles-mêmes. Le flash apparaît quand l'épaule ne peut plus jouer son rôle de confinement, correspondant dans notre étude au cas où  $\psi$  est trop élevé. Le manque de pénétration correspond à un déficit de malaxage dans la zone située entre l'extrémité du pion et l'enclume due très souvent à une distance pion/enclume excessive mais qui peut provenir également d'une mauvaise orientation relative entre le bout du pion et l'enclume (ceci correspondrait au cas où  $\phi$  est trop élevé). L'amincissement observé pour les fortes valeurs de  $\psi$  correspond à l'indentation de l'épaule dans les pièces. Le couple et l'effort d'avance n'évoluent pas avec le décalage de l'outil par rapport à la ligne de joint. La position de la ligne de joint n'a pas d'influence notable sur l'interaction mécanique entre l'outil et la matière.

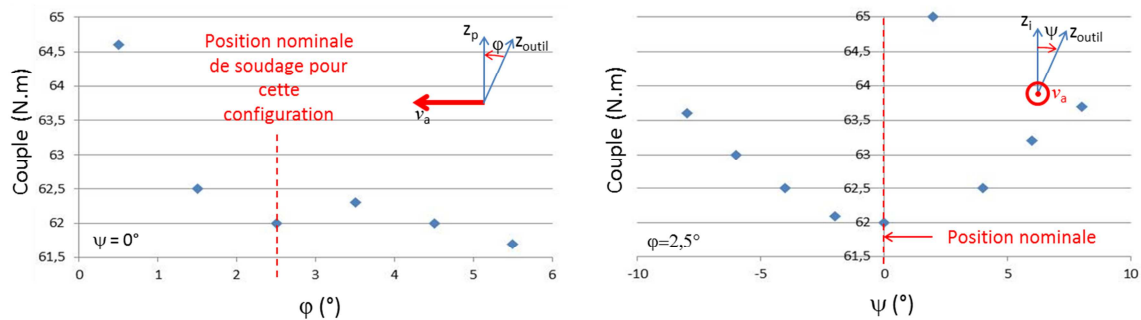


FIG. 4 – Evolution du couple en fonction des angles.

La figure 4 présente les valeurs moyennes de couple obtenues en fonction de l'orientation de l'outil. On remarque qu'entre  $0,5^\circ$  et  $2,5^\circ$  le couple décroît avec l'angle  $\phi$ . Au-delà de  $2,5^\circ$  la tendance est moins marquée. Le couple présente un minimum pour une valeur de l'angle  $\psi$  nulle, le point observé pour un angle de  $2^\circ$  semblant aberrant. Le couple de soudage détermine en grande partie la puissance de soudage. La puissance liée à l'avance ne contribue que pour quelques pourcents à la puissance totale. La vitesse d'avance étant identique pour chaque essai, l'énergie nominale et donc la température de la matière croît avec le couple. L'excès de pénétration observée pour les faibles valeurs de l'angle  $\phi$  est dû très probablement au fait que le couple est élevé et que la matière est très probablement plus chaude. La raison pour laquelle le couple est plus élevé pour les faibles valeurs de  $\phi$  est difficile à établir. On peut sans doute faire le lien entre l'augmentation du couple et l'augmentation de la pénétration. A l'augmentation du couple est associée une augmentation de l'énergie de soudage. Cette dernière est liée à une augmentation de la température de la matière et donc à la diminution de sa limite d'écoulement. Ceci expliquerait l'augmentation de la pénétration associée à l'augmentation de couple pour les faibles valeurs d'angle  $\phi$ .

Pour ce qui est de l'évolution de l'effort d'avance, il faut noter dans un premier temps que la valeur mesurée par la machine n'est pas la composante des efforts portée par le vecteur d'avance mais par le vecteur perpendiculaire à l'axe incliné de l'outil appelé  $\vec{x}_{outil}$  sur la figure 2.a. En inclinant l'outil davantage, une part plus importante de l'effort de forge est orientée dans la direction d'avance favorisant la progression de l'outil le long du joint. Sur la figure 5 sont présentées les évolutions de l'effort d'avance en fonction de l'orientation de l'outil. On peut remarquer dans un premier temps que la contribution de l'effort de forge à l'avance ne dépend pas de l'angle  $\psi$ . L'effort d'avance augmente avec l'angle  $\phi$  du fait principalement de l'augmentation de la contribution de l'effort de forge. L'effort d'avance augmente probablement du fait de l'augmentation de la surface de l'épaule projetée dans la direction de la vitesse d'avance. L'évolution de l'effort d'avance en fonction de l'angle  $\psi$  n'est pas symétrique contrairement à l'évolution du couple. Pour les valeurs négatives de  $\psi$  (outil orienté du côté avance) l'effort croît avec la valeur absolue de l'angle. Pour les valeurs positives (outil orienté du côté retrait), la valeur de l'effort change peu et ne présente aucune tendance marquée. Sous l'épaule, la vitesse relative outil/pièce du côté avance et du côté retrait sont de signe opposé. L'effort d'avance provient en grande partie de la différence entre le frottement du côté avance (qui s'oppose à l'avancée de l'outil) et celui du côté retrait (dans le sens du mouvement d'avance). En inclinant l'outil du côté avance, on accentue le frottement de ce côté, ce qui va dans le sens d'une augmentation de l'effort. En inclinant l'outil vers le côté retrait, on accentue le frottement de ce côté mais

cette augmentation pourrait être limitée par l'échauffement de la matière, le côté retrait étant plus froid que le côté avance [5].

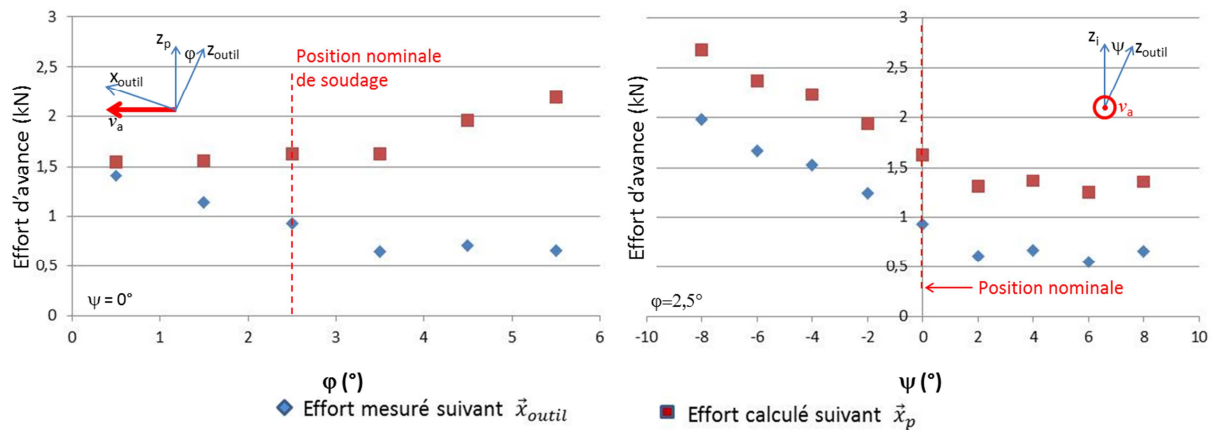


FIG. 5 – Evolution de l'effort d'avance en fonction de l'orientation de l'outil.

Le mouvement de la matière et les champs de température autour de l'outil FSW sont très complexes et demeurent méconnus malgré l'abondante littérature qui leur est dédiée. Etablir le lien entre les composantes du torseur des efforts outil/matière et les paramètres opératoires du procédé et/ou les dimensions de l'outil reste une tâche très délicate.

## 5 Conclusion et perspectives

Le développement d'une soudure robotisée nécessite de s'intéresser aux efforts de soudage et de déterminer la tolérance du procédé vis-à-vis des défauts d'orientation et de position de l'outil. Les efforts de soudage vont provoquer une déformation de la structure robotisée, ce qui va se traduire par des défauts de suivi de trajectoire. La désorientation de l'outil résultante va également être associée à une évolution des efforts de soudage. La problématique de la robotisation du soudage est couplée. Pour résoudre en partie cette problématique, on propose d'étendre la démarche expérimentale d'identification du domaine de soudabilité opératoire en intégrant des paramètres caractérisant les défauts générés par la déformation de la structure robotisée. Dans les travaux futurs, il sera nécessaire d'intégrer dans la démarche d'identification du domaine de soudabilité des paramètres caractérisant les défauts générés par le processus de fabrication des pièces soudées ou plus exactement par les opérations de fabrication antérieures à la soudure ceci en interaction avec les moyens de soudage (montage). Il s'agit, par exemple, d'étudier la sensibilité de la qualité de la soudure et des efforts de soudage au jeu d'accostage ou à la différence d'épaisseur entre les pièces à souder.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche pour le soutien financier du programme ANR-ARPEGE, projet ANR-2010-SEGI-003-01-COROUSO.

## Références

- [1] Thomas M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Templemith P., Dawes C.J, Patent Application, No. 9125978.8 (December 1991).
- [2] Mishra R.S, Ma Z.Y., Friction Stir Welding and processing, Materials Sciences and Engineering R 50 (2005) I-78, 2005
- [3] Hori H., Makita S., Hino H., Friction stir welding of rolling stock for subway, 1st International FSW Symposium, USA, 1999
- [4] Smith C.B., Robotic Friction Stir Welding using a Standard Industrial Robot, 4th FSW Symposium, 2003
- [5] A. Simar, A multiscale multiphysics investigation of aluminum friction stir welds from thermal modelling to mechanical properties through precipitation evolution and hardening Thèse de doctorat de l'Université Catholique de Louvain, 2006