



### **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/10985/9066>


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

Sandra ZIMMER-CHEVRET, Laurent LANGLOIS, Amarilys BEN ATTAR - Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot - 2014

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

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



	Projet COROUSSO Livrable n°2.3 Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page de garde

Projet COROUSSO

Tâche 2 : Modélisation du procédé FSW


Livrable 2.3 :

Modèle exploitable pour la définition de la  
commande du robot

Projet ANR-2010-SEGI-003-COROUSSO

Partenaires :




 <p>AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE <b>ANR</b> <i>COROUSSO</i></p>	<p>Projet COROUSSO Livraison 2.3 : Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot</p>	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 2/20

	Rédigé par	Approuvé par	Validé par
Date	20/09/2014	29/09/2014	30/09/2014
Nom(s)	S. ZIMMER CHEVRET – LCFC L. LANGLOIS – LCFC A. BEN ATTAR – IS	L. LANGLOIS – LCFC	G. ABBA - LCFC
Signature(s)			

Liste de diffusion		
Nom	Organisme	Fonction
BOUJDAINE Fatiha	ANR	Chargée de mission scientifique
	HAL	
ZIMMER Sandra	LCFC - ENSAM	MCF
LANGLOIS Laurent	LCFC - ENSAM	MCF
BEN ATTAR Amarilys	Institut de Soudure	ingénieur

(Logigramme workflow)


Indice de révision	Modifié par	Description des principales évolutions	Date de mise en application	Pages concernées

	<p>Projet COROUSSO Livraison n°2.3 Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot</p>	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 3/20

## SOMMAIRE

1	Introduction.....	5
2	Modélisation des efforts de soudage.....	7
2.1	Différents types de modèles d'efforts.....	7
2.1.1	Modèle statistique.....	7
2.1.2	Modèle dynamique.....	8
2.1.3	Modèle thermomécanique.....	9
2.2	Synthèse des résultats précédents.....	10
2.3	Validité du modèle pour une autre configuration de soudage.....	10
3	Validation du modèle.....	15
4	Conclusion.....	16
	Bibliographie.....	16
	Annexe.....	18

<p>AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE</p> <p><b>ANR</b></p> <p><i>COROUSSO</i></p>	<p>Projet COROUSSO Livrable 2.3 : Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot</p>	<p>ANR-10-SEGI-003-LI2.3</p> <hr/> <p>29/09/2014</p> <hr/> <p>indice A</p> <hr/> <p>Page 4/20</p>
--	---	---

	<p>Projet COROUSSO Livrable n°2.3 Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot</p>	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 5/20


## 1 INTRODUCTION

Lors du soudage FSW, un outil tournant est inséré dans le plan de joint et est animé d'un mouvement d'avance. L'interaction outil / matière permet de générer l'apport de chaleur nécessaire à la formation du cordon de soudure. Toutefois, cette dernière génère également des actions mécaniques appliquées par la matière sur l'outil. Ces actions mécaniques ne sont pas négligeables. D'après la littérature, l'effort résistif à l'avance et l'effort latéral sont l'ordre de 10% de l'effort normal appliqué [1]. Ces actions mécaniques sont un des désavantages du procédé. En effet, ces efforts dimensionnent les moyens de soudage à utiliser. C'est pourquoi, de manière historique les machines dédiées utilisées pour réaliser du FSW étaient constituées de structure extrêmement rigides et de ce fait surdimensionnées (les premières présentaient des poutres en béton). La Figure 1 présente la première machine de FSW installée en France, de type ESAB. Elle présente une poutre rigide et un système de bridage hydraulique intégré.



Figure 1: Première machine de FSW en France, de type ESAB (1999)

L'objectif de ce livrable est de regarder s'il est possible de modéliser les efforts générés au cours du soudage en fonction des paramètres opératoires. Ce modèle doit être suffisamment simple pour être intégré dans la commande des robots, mais également être suffisamment prédictif pour donner des informations fiables à la commande. La Figure 2 schématise les relations entre les paramètres opératoires et les grandeurs de sorties.

 <b>AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE</b> <b>ANR</b> <b>COROUSO</b>	Projet COROUSO Livrable 2.3 : Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 6/20

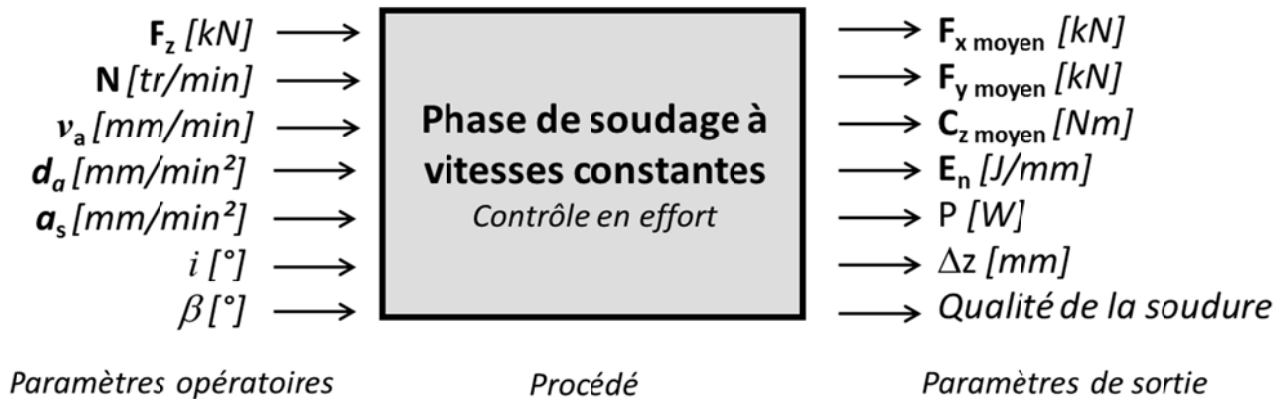


Figure 2: Relation entre paramètres opératoires et les paramètres de sorties quantifiables

Pour réaliser une soudure sans défaut, il est nécessaire :

- D'appliquer des paramètres opératoires,  $N$ ,  $v_a$ ,  $F_z$  appartenant au domaine de soudabilité opératoire conduisant à une soudure de qualité respectant le cahier des charges. L'application de ces paramètres opératoires génère des interactions mécaniques entre l'outil et la matière qui se manifestent par les efforts  $F_x$ ,  $F_y$  et le couple  $C_z$ . Les deux autres moments composant le torseur des actions mécaniques, outil / matière,  $M_x$  et  $M_y$ , ne sont pas mesurés dans nos travaux et ne sont pas étudiées par la littérature.
- De suivre la trajectoire imposée. Le suivi de trajectoire comporte deux aspects : le premier est le suivi de la ligne de joint (ou de la trajectoire programmée) et le second est le respect des orientations de l'outil par rapport à la ligne de joint. Selon les technologies d'outil, l'outil doit toujours respecter une certaine inclinaison ( $i$ ,  $\beta$ ) vis-à-vis de la surface. Cette orientation doit être maintenue constante tout le long de la ligne de joint et plus particulièrement lors du soudage de pièces de formes complexes.

Ainsi, une machine de soudage FSW doit impérativement :

- Permettre à l'outil FSW d'assurer l'ensemble des positions et orientations par rapport à la ligne de joint dans les tolérances imposées par le procédé [2].
- Imposer la cinématique de l'outil imposée par le DSO
- Appliquer / supporter les actions mécaniques générées lors du soudage pour permettre le respect de la trajectoire et de la cinématique de l'outil.

Ce sont ces raisons qui ont poussé les premiers constructeurs de machines FSW à construire des machines rigides mais peu flexibles en termes de géométrie soudable (Figure 1). Dans l'objectif de la robotisation du procédé FSW, il est nécessaire que le robot puisse également respecter ces caractéristiques, au moins dans des tolérances du procédé. Le projet COROUSO a pour vocation d'identifier et de modéliser les actions mécaniques générées en vue de les implémenter dans la commande de robot, pour que cette dernière puisse compenser les déformations générées par les actions mécaniques (Figure 3) pendant l'opération de soudage.

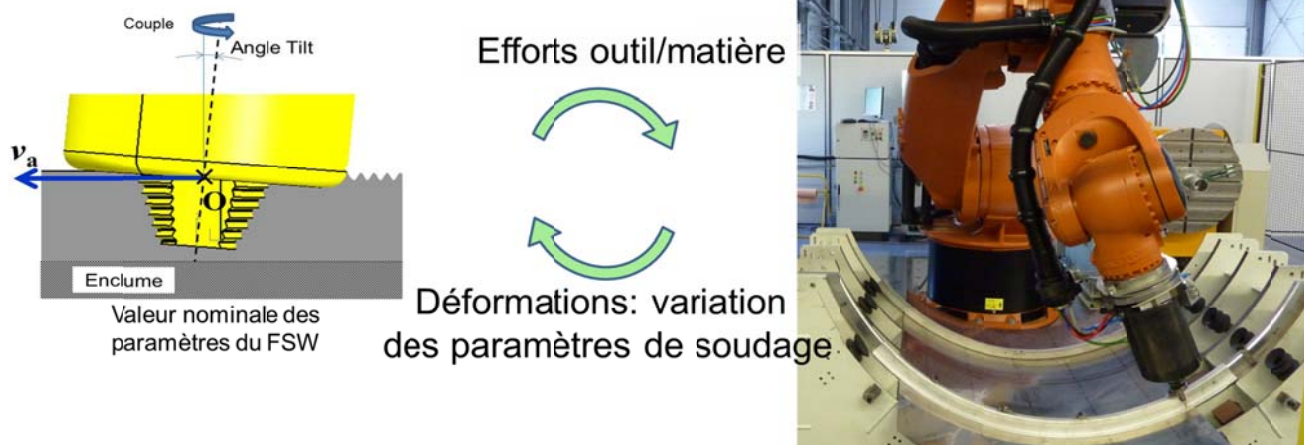


Figure 3: Schématisation de la relation entre les interactions outil / matière et les paramètres de soudage


## 2 MODÉLISATION DES EFFORTS DE SOUDAGE

Dans le livrable L2.1, les interactions mécaniques entre l'outil et la matière ont été analysées. Une modélisation des efforts  $F_x$ ,  $F_y$  et du couple  $C_z$  a également été proposée. Les résultats sont basés sur l'étude du domaine de soudabilité opératoire du 6082-T651 en épaisseur 6mm avec un outil présentant un épaulement de diamètre 21mm. La gamme d'effort du DSO de cette configuration se situe entre 12 et 14kN. Cette gamme d'effort se situe au-dessus de celle admissible par les robots polyarticulés, moyen limité à un effort maximal de 9-11kN.

### 2.1 Différents types de modèles d'efforts

#### 2.1.1 Modèle statistique

Le modèle statique est un modèle qui ne prend pas en compte le temps, il n'est pas adapté pour modéliser le procédé au cours d'une soudure mais uniquement la valeur d'effort ou de couple moyenne pendant le régime permanent. C'est pourquoi, si ce modèle est utilisé, les valeurs moyennes des grandeurs seront prises en considération. Le modèle proposé par ZHAO est un modèle puissance [3]. Ce même type de modèle a été utilisé dans les travaux présentés dans le livrable 2.1. Les équations (2), (3) et (4) présentent les grandeurs de sorties modélisables en fonction des paramètres  $v_a$ ,  $N$  et  $F_z$ . A noter que par rapport au livrable 2.1, la variation de la profondeur de pénétration est prise en compte. L'équation (4) propose également de regarder quelle est l'influence des paramètres opératoires sur la profondeur de pénétration. Cette dernière peut indiquer un manque de pénétration en racine et joue un rôle sur les efforts et le couple générés mais ne sera pas utilisée

	Projet COROUSSO Livrable 2.3 : Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 8/20

pour la commande. Dans l'étude du FSW, cette grandeur est plus qualitative car pouvant donner un lien avec la présence de défaut de manque de pénétration en racine.

$$F_x = A_1 \cdot v_a^{\alpha_1} \cdot N^{\beta_1} \cdot F_z^{\gamma_1} \quad (1)$$

$$F_y = A_2 \cdot v_a^{\alpha_2} \cdot N^{\beta_2} \cdot F_z^{\gamma_2} \quad (2)$$

$$C_z = A_3 \cdot v_a^{\alpha_3} \cdot N^{\beta_3} \cdot F_z^{\gamma_3} \quad (3)$$

$$\Delta_z = A_4 \cdot v_a^{\alpha_4} \cdot N^{\beta_4} \cdot F_z^{\gamma_4} \quad (4)$$

### 2.1.2 Modèle dynamique

Pour pouvoir piloter une opération de soudage par FSW, il faut pouvoir modéliser cette opération en temps réel. Il est donc nécessaire de calculer les efforts sur l'outil, les positions, les vitesses et les accélérations de l'outil en fonction du temps. Plusieurs études ont été réalisées à ce sujet.

M. Brès [4] propose ce type de modèle dynamique en vue de la modélisation pour la robotisation du procédé FSW. Les équations (5), (6) et (7) présentent le modèle.

$$F_x = v_x \cdot \dot{x} \quad (5)$$

$$F_y = v_y \cdot \dot{y} \quad (6)$$


$$F_z = E(z) + v_z(z, \dot{z}) \cdot \dot{z} \quad (7)$$

Où :

- $E(z)$  est la composante élastique identifiée par les essais réalisés à profondeur de pénétration constante et interpolée entre les points d'essai
- $v_x$  et  $v_y$  et  $v_z(z, \dot{z})$  sont les viscosités du matériau respectivement dans les directions d'avance, transversale et verticale. La viscosité  $v_z$  dépend en plus de la profondeur et du sens de progression dans la matière.

Pour utiliser ce type de modèle, il est nécessaire de connaître la viscosité du matériaux.

Zhao [3] a proposé des modèles dynamiques numériques et analogiques pour le procédé FSW en utilisant la profondeur de pénétration ( $d$ ) comme entrée. Les paramètres du modèle ont également été estimés par la méthode des Moindres Carrés Récurrents. Il a ainsi pu obtenir les fonctions de transfert des 3 composantes de l'effort de soudage :

 AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE <b>ANR</b> COROUSSO	Projet COROUSSO Livrable n°2.3 Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 9/20

$$F_z(s) = \frac{Kv^{0,097}\omega^{-0,230}(s + 2.25)}{(s + 25.5)(s + 2.65)}d^{2.207}(s) \quad (8)$$

$$F_x(s) = \frac{0,151}{0,635s + 1}(v^{0,999}\omega^{-1,232})(s) \quad (9)$$

$$F_y(s) = \frac{20,8d^{-3,93}\omega^{-0,277}}{0,421s + 1}v^{0,654}(s) \quad (10)$$

Il apparaît alors une dynamique du deuxième ordre pour la force  $F_z$  et des dynamiques du premier ordre pour les forces  $F_x$  et  $F_y$ .

Pour modéliser les efforts FSW au sein de loi de commande des robots Qin [5] propose un modèle mixte, statique et dynamique avec amortissement :

$$F_z = [K_{fsw}d + f_{fsw}\dot{d}] \quad (11)$$

$$F_x = K_x \text{sign}(v) [ |v|^{\beta_x} \Omega^{\lambda_x} |F_z|^{\gamma_x} ] \quad (12)$$

$$F_y = K_y \text{sign}(v) [ |v|^{\beta_y} \Omega^{\lambda_y} |F_z|^{\gamma_y} ] \quad (13)$$

$$C_z = K_{cz} \Omega^{\lambda_c} |F_z|^{\gamma_c} \quad (14)$$

Où :


- $v$  est la vitesse d'avance,
- $K_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  sont des paramètres pouvant être estimés avec les méthodes des moindres carrés
- $K_{fsw}, f_{fsw}$  sont des coefficients pouvant être définis par l'expérience.

Les equations (12), (13) et (14) sont des modèles statiques. L'équation (11) pour modéliser la force  $F_z$  est basée sur un modèle dynamique du premier ordre [5]. D'après Qin [5], ce modèle dynamique simplifié est adaptable à une commande de robot en prenant en compte le temps avec la vitesse et l'accélération de l'outil.

Dans le cadre du projet COROUSSO ce modèle a été retenu pour la modélisation des efforts.

### 2.1.3 Modèle thermomécanique

Il serait possible de réaliser un modèle plus complet en prenant en compte les variations de la température en fonction du temps et ses effets sur les autres grandeurs du problème, en particulier la viscosité du matériau qui agit sur le coefficient de frottement avec l'outil et qui provoque un bouclage de l'influence de la température.

 <b>AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE</b> <b>ANR</b> <b>COROUSSO</b>	Projet COROUSSO Livrable 2.3 : Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 10/20

Ce modèle ne sera pas étudié car il est difficile d'avoir l'évolution de la température en cours de soudage ou de la simuler. Ceci serait difficile à mettre en œuvre. De plus, la précision apportée par ce type de modèle est-elle nécessaire au regard du procédé FSW ?

## 2.2 Synthèse des résultats précédents

L'étude, objet du rapport 2.1 porte sur l'analyse du domaine de soudabilité opératoire de l'alliage 6082-T651 épaisseur 6mm (diamètre d'épaulement de l'outil, 21mm). Une étude paramétrique des efforts avait été menée sur les efforts en fonction des paramètres opératoires. Les modèles proposés étaient les suivants :

$$F_x = 0.54 \cdot v^{0.938} N^{-0.6469} F_z^{-0.0212} \quad (15)$$

$$F_y = 13,515 \times 10^{-4} \cdot v^{0.5959} N^{0.3708} F_z^{-0.0203} \quad (16)$$

$$C_z = 427,05 \cdot v^{0.04} N^{-0.35} F_z^{0.1158} \quad (17)$$

La précision des modèles pour l'effort  $F_x$  et le couple  $C_z$  avait été jugés satisfaisants, avec une erreur quadratique moyenne inférieure à 13%. Par contre, la modélisation de l'effort  $F_y$  présentait une erreur plus importante (erreur quadratique moyenne de l'ordre de 70%). Cet effort de par sa nature, reste difficile à modéliser. En effet, il est très dépendant de l'interaction outil /matière et par conséquent des coefficients de frottement entre ces deux éléments. Ceci semble être difficile à modéliser à partir des données d'entrée connues, à savoir  $v_a$  et  $F_z$  et  $N$ .

Dans le livrable 2.1, une simplification des modèles a également été proposée. Les équations (18), (19) et (20) présentent les résultats obtenus. Dans la configuration étudiée, l'erreur obtenue est du même ordre de grandeur qu'avec les modèles complets.


$$F_x = V^\alpha \times N^\beta \quad \text{avec } \alpha = 0,897, \beta = -0,704. \quad (18)$$

$$F_y = A \cdot V^\alpha \times N^\beta \quad \text{avec } A = -6.65, \alpha = 0,58, \beta = 0,3756 \quad (19)$$

$$C_z = A \cdot N^\beta \cdot F_z^\mu \quad \text{avec } A = 473.33, \beta = -0.337, \mu = 0.1383 \quad (20)$$

## 2.3 Validité du modèle pour une autre configuration de soudage

Implémenté au sein de la commande des robots FSW, l'objectif de ces modèles est de pouvoir être appliqué à tous types de matériaux et d'épaisseurs. Une question se pose, qu'en est-il si la configuration de soudage change ? Les modèles sont-ils toujours encore applicables ?

 <b>ANR</b> <b>COROUSSO</b>	Projet COROUSSO Livrable n°2.3 Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 11/20

Une étude sur la modélisation des efforts a été menée pour la configuration suivante, soudage du 6082-T651 d'épaisseur 6mm avec un outil présentant un épaulement de 12mm. Dans cette étude, seule l'outil de soudage a été modifié par rapport à la configuration précédente.

Avec les modèles développés précédemment, équations (15), (16) et (17), les courbes modélisées suivent en générale l'allure des courbes expérimentales à l'erreur près. La Figure 4 présente les données obtenues avec ces modèles et les données expérimentales (outil présentant un diamètre d'épaulement de 21mm). En bleu l'effort en fonction de la vitesse d'avance pour les données expérimentales, en rouge, la courbe issue du modèle statique, équation (16). La courbe modélisée a la même allure que la courbe expérimentale.

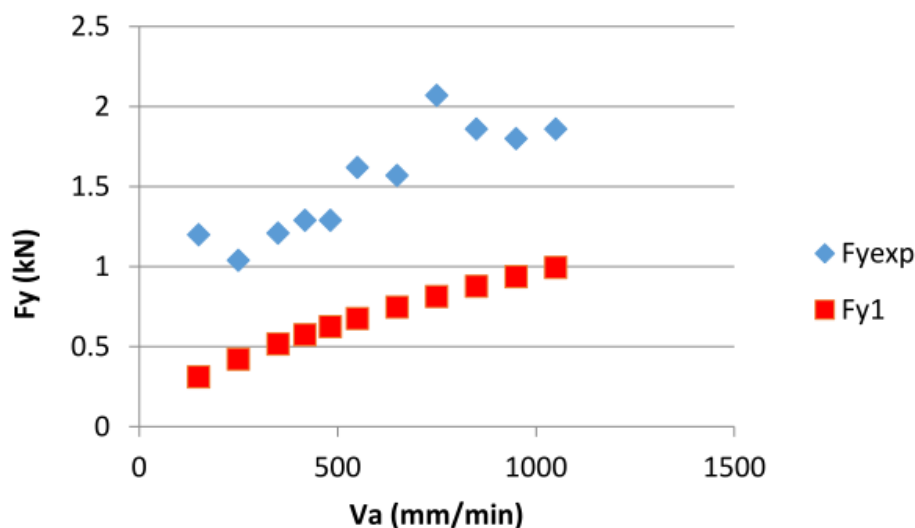


Figure 4: Comparaison entre efforts modélisés (carrés rouges) et les données expérimentales (losanges bleus) pour le soudage de l'alliage 6082-T651 d'épaisseur 6mm avec un outil de diamètre d'épaulement de 21mm

Les équations (15), (16) et (17) ont été appliquées aux données expérimentales issues de l'expérimentation réalisée avec un outil avec un diamètre d'épaulement de 12mm. Les résultats de la modélisation pour l'effort  $F_y$  sont présentés sur la Figure 5. Il peut être noté que l'allure de la courbe obtenue par la modélisation ne correspond plus à la tendance observée par l'expérimentation. Ceci est problématique et démontre que les modèles ne sont pas transposables d'une configuration de soudage à l'autre.

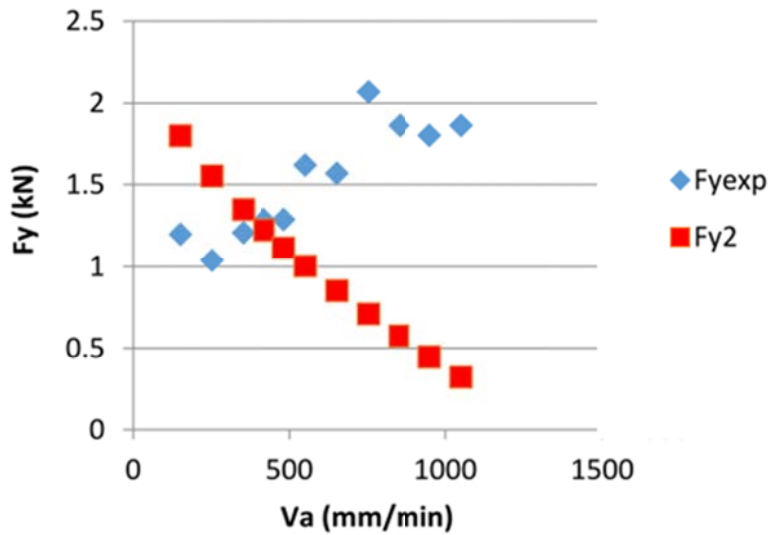


Figure 5: Comparaison entre efforts modélisés (carrés rouges) et les données expérimentales (losanges bleus) pour le soudage de l'alliage 6082-T651 d'épaisseur 6mm avec un outil de diamètre d'épaulement de 12mm

Avec les données obtenues avec l'épaulement de 12mm, les équations simplifiées (18), (19) et (20) qui obtenaient des erreurs similaires aux équations prenant tous les paramètres opératoires en compte a également été testé. Avec ces données, les erreurs obtenues sont plus grandes et les résultats obtenus précédemment ne semblent pas s'appliquer à cette configuration.

Sur la base de ces résultats, le modèle a été adapté à la nouvelle configuration de soudage. A l'aide de la méthode des moindres carrés, les coefficients des équations ont été recalculés. Pour le calcul des paramètres  $A_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  et  $\gamma_i$  ont été réalisés à partir de tous les points expérimentaux, même les essais présentant des défauts internes de types défaut tunnel ou manque de pénétration en racine.


(20)

(21)

(22)

(23)

Afin de pouvoir évaluer l'influence de la qualité de la soudure sur la qualité de la modélisation des efforts, les coefficients  $A_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  et  $\gamma_i$  ont été déterminés sur la seule base des essais ne présentant pas de défaut. Les équations deviennent alors :

	Projet COROUSSO Livrable n°2.3 Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 13/20


$$F_x = 2.23 * v_a^{1.39} * N^{-0.844} * F_z^{-1.22} \quad (24)$$

$$F_y = 5.6 * 10^{-6} * v_a^{0.669} * N^{0.697} * F_z^{0.422} \quad (25)$$

$$C_z = 370 * v_a^{-0.0169} * N^{-0.294} * F_z^{0.144} \quad (26)$$

$$\Delta_z = 4.06 * 10^{-6} * v_a^{-0.186} * N^{0.843} * F_z^{2.38} \quad (27)$$

La Table 1 compare les deux modèles avec la prise en compte des défauts et sans la prise en compte des défauts. Les paramètres pour le couple  $C_z$  et  $\Delta_z$  sont relatives proches mais pour les efforts  $F_x$  et  $F_y$  des différences peuvent être notifiées. Il peut être noté que le modèle obtenu sans la prise en compte des défauts internes n'est pas forcément plus précis. En effet s'il l'est pour  $F_x$ , ce n'est pas le cas pour  $F_y$ . Cela est sans doute lié au fait que les défauts entraînent une grande élévation de  $F_x$  dans un domaine non linéaire, plus difficile à modéliser. Les supprimer rend donc le modèle plus fiable. À l'inverse, supprimer des points diminue la précision du modèle, et si ces points participaient à la linéarité de la courbe, cela se ressent dans la précision. C'est probablement le cas pour  $F_y$ .

 <b>ANR</b> <i>COROUSSO</i>	Projet COROUSSO Livrable 2.3 : Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 14/20

Modélisation Fx						Incertitude	Erreur Max
	Ln(A)	A	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$		
Tous les points de mesures	6.727	834.356	0.823	-1.469	-0.311	21.1%	34.5%
Points sans défauts internes	0.805	2.238	1.392	-0.844	-1.227	23.7%	8.2%


Modélisation Fy						Incertitude	Erreur Max
	Ln(A)	A	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$		
Tous les points de mesures	-6.040	2.38E-03	0.353	0.544	0.142	15.5%	25.4%
Points sans défauts internes	-9.791	5.60E-05	0.669	0.697	0.422	17.7%	34.4%

Modélisation Cz						Incertitude	Erreur Max
	Ln(A)	A	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$		
Tous les points de mesures	5.283	197.049	0.023	-0.224	0.094	1.2%	4.2%
Points sans défauts internes	5.914	370.147	-0.017	-0.294	0.144	32.0%	1.4%

Modélisation $\Delta_z$						Incertitude	Erreur Max
	Ln(A)	A	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$		
Tous les points de mesures	-9.017	1.21E-04	-0.384	0.836	2.429	17.1%	45.6%
Points sans défauts internes	-10.112	4.06E-05	-0.186	0.843	2.377	18.1%	48.7%

Table 1: Comparaison entre les modèles développés, avec tous les points et avec les points ne présentant pas de défauts internes

En conclusion, pour optimiser la précision du modèle, il semblerait intéressant de prendre en compte toutes les données pour le calcul des paramètres du modèle pour  $F_y$  et  $C_z$  mais pour le calcul des paramètres de  $F_x$  et  $\Delta_z$ , il semblerait judicieux de supprimer les points présentant des défauts internes. Les Figure 7, Figure 8 et Figure 9, présentées en annexe, illustrent ces propos de manière graphique.

 <b>ANR</b> <i>COROUSSO</i>	Projet COROUSSO Livrable n°2.3 Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 15/20

### 3 VALIDATION DU MODÈLE

Pour modéliser les actions mécaniques appliquées sur l'outil au cours du soudage FSW, le modèle utilisé est implémenté dans la commande de robot est le suivant [5] :

$$F_z = [K_{fsw}d + f_{fsw}\dot{d}] \quad (28)$$

$$F_x = 0.54 \text{sign}(v) [|v|^{0.9} \Omega^{-0.64} |F_z|]^{-0.02} \quad (29)$$

$$F_y = 1.3 \times 10^{-3} \text{sign}(v) [|v|^{0.59} \Omega^{0.37} |F_z|]^{-0.02} \quad (30)$$

$$C_z = 473\Omega^{-0.34} |F_z|^{0.14} \quad (31)$$

Avec :  $K_{fsw}=10^8 \text{ kg/s}^2$  et  $f_{fsw} = 10^7 \text{ kg/s}$

Les essais réalisés avec ces modèles implémentés au sein de la commande de robot et utilisés pendant le soudage FSW ont démontré que la correction de trajectoire dans le plan semble être acquise (Figure 6). D'une manière globale le décalage de l'outil passe de 4mm à un décalage inférieure à 1mm. Avec un décalage de l'outil de 4mm, la soudure présente un défaut de manque de pénétration en racine, défaut inadmissible en termes de qualité de soudure. Par contre, avec un décalage de l'outil de moins de 1mm par rapport au plan de joint, le décalage est admissible. En effet, le défaut de manque de pénétration en racine n'apparaît plus car ce décalage est dans la tolérance du procédé FSW, à savoir dans ce cas d'études environ 2mm [2], [Livrable 2.1].

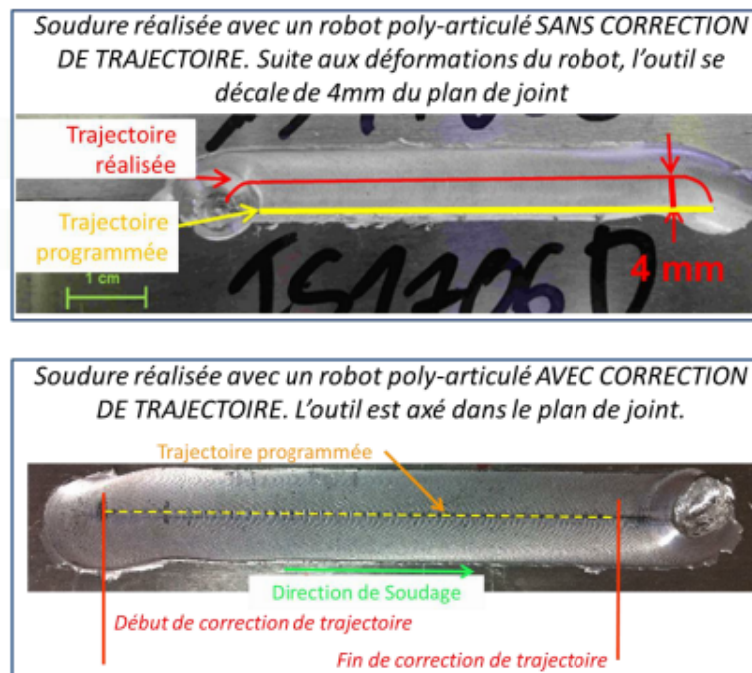



Figure 6: Comparaison d'une trajectoire réalisée avec et sans correction d'outil

	Projet COROUSSO Livrable 2.3 : Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 16/20

## 4 CONCLUSION


Dans ce livrable un état de la bibliographie a été réalisé concernant les modèles utilisés. Différents modèles sont proposés, modèles statiques, thermiques ou dynamiques. Certain auteur, en vue de la robotisation, propose d'utiliser un modèle statique pour la détermination des efforts  $F_x$  et  $F_y$  et d'utiliser un modèle dynamique présentant un terme d'amortissement pour l'effort  $F_z$ . Ce type de modèle a été validé lors du soudage d'une ligne droite dans un plan. La correction obtenue, c'est-à-dire présentant une déviation inférieure à 1mm, respecte les tolérances admissibles de la position de l'outil par rapport au plan de joint. Il faudra néanmoins le valider pour le soudage de formes complexes.

Une étude a été réalisée sur la transposition du modèle sur une autre configuration de soudage, même matériau et même épaisseur, mais le soudage est réalisé avec un outil différent. Les résultats montrent que les modèles statiques sont fortement dépendants de la configuration et par conséquent non transposable. Un travail reste à faire pour l'étude sur la modélisation lors du soudage avec d'autres matériaux et d'autres épaisseurs. Les équations des modèles statiques simplifiées ne semblent pas également être adaptées au procédé, car elles ne s'appliqueraient pas bien à toutes les configurations. D'autre part, une étude a également été réalisée sur la « qualité » des données à savoir la prise ou compte ou non des données issues de soudure avec et sans défauts internes. Selon les paramètres, les résultats diffèrent. Pour la modélisation de  $F_y$  et  $C_z$  il serait judicieux de prendre compte toutes les données pour le calcul des paramètres du modèles mais pour le calcul des paramètres de  $F_x$  et  $\Delta_z$ , il semblerait intéressant de ne considérer que les essais ne présentant pas des défauts internes.


En perspective, il serait intéressant d'étudier si d'autres paramètres ne devraient pas être intégrer dans le modèle pour la commande de robot à savoir l'angle de soudage ( $i$ ) et l'angle de clin ( $\beta$ ). Ce deux paramètres influent sur les efforts et ne sont communément pas modélisés. Ils pourraient avoir une utilité au sein de la commande pour le soudage de pièces de formes complexes.

## Bibliographie

	Auteurs : S.Z, L.L, A.BA
--	-----------------------------

	Projet COROUSSO Livrable n°2.3 Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 17/20

- [1] S. Zimmer, L. Langlois, J. Laye, J-C. Gousain, P. Martin, R. Bigot, 2008, "Methodology for qualifying a Friction Stir Welding equipment", 7th International Symposium on FSW à l'Awaji Island (Japon)
- [2] S. Zimmer, 2013, Etude des tolérances du procédé vis-à-vis des défauts de position et d'orientation de l'outil pour la robotisation du FSW, 21eme Congrès Français de Mécanique, Bordeaux.
- [3] Zhao Xin, 2007, Empirical Dynamic modeling and nonlinear force control of Friction Stir Welding, Master of Science in mechanical, University of Missouri-Rolla engineering.
- [4] A. Brès, 2008, Modélisation et simulation du soudage par Friction Malaxage utilisant des robots industriels, Ecole Polytechnique de Montréal.
- [5] J. Qin, 2013, Commande hybride position/force robuste d'un robot manipulateur utilisé en usinage et/ou en soudage. Thèse doctorat. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Metz, France.

	Projet COROUSSO Livrable 2.3 : Modèle exploitable pour la définition de la commande du robot	ANR-10-SEGI-003-LI2.3
		29/09/2014
		indice A
		Page 18/20

## Annexe

Analyse de la précision du modèle en fonction de la présence de défauts

Modèle 1 établi avec toutes les données (points présentant des défauts et sans défauts) :

$$F_x = 834 * v_a^{0.825} * N^{-1.469} * F_z^{-0.3106} \quad (20)$$

$$F_y = 0.00238 * v_a^{0.3533} * N^{0.5436} * F_z^{0.1424} \quad (21)$$

$$C_z = 197 * v_a^{0.02278} * N^{-0.2237} * F_z^{0.0945} \quad (22)$$

$$\Delta_z = 0.0001 * v_a^{-0.3843} * N^{0.8363} * F_z^{2.4295} \quad (23)$$

Modèle 2 établi à partir des données expérimentales aboutissant à des soudures sans défauts :

$$F_x = 2.23 * v_a^{1.39} * N^{-0.844} * F_z^{-1.22} \quad (24)$$

$$F_y = 5.6 * 10^{-6} * v_a^{0.669} * N^{0.697} * F_z^{0.422} \quad (25)$$

$$C_z = 370 * v_a^{-0.0169} * N^{-0.294} * F_z^{0.144} \quad (26)$$

$$\Delta_z = 4.06 * 10^{-6} * v_a^{-0.186} * N^{0.843} * F_z^{2.38} \quad (27)$$

Les figures ci-dessous présentent les courbes obtenues.

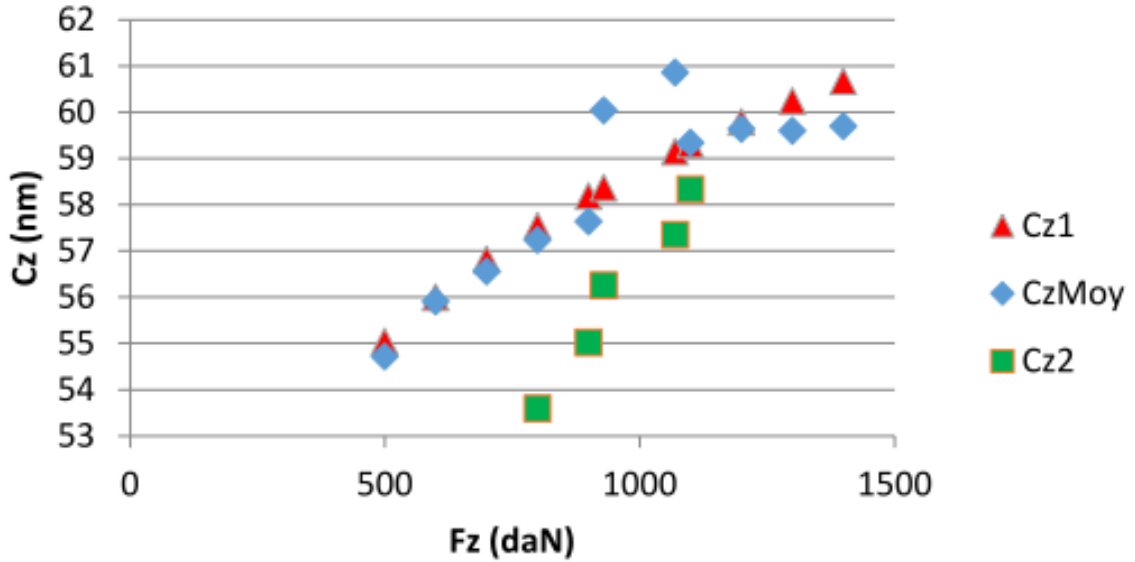


Figure 7: Comparaison des modèles pour la grandeur de sortie  $C_z$  en fonction de  $N$ . (1) avec défauts - (2) sans défauts

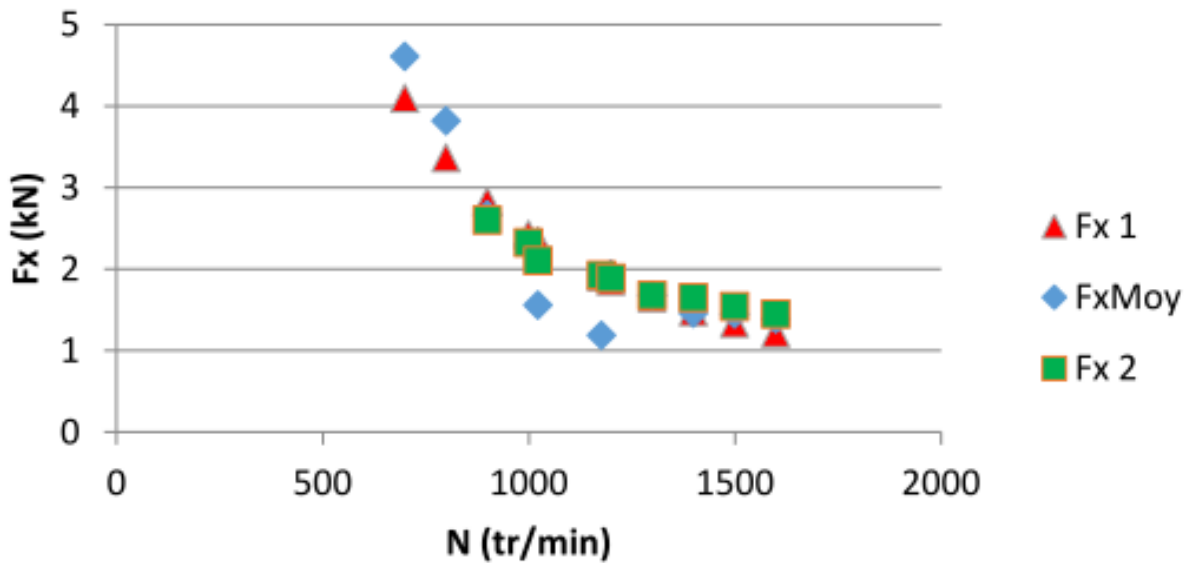


Figure 8: Comparaison des modèles pour la grandeur de sortie  $F_x$  en fonction de  $N$ . (1) avec défauts - (2) sans défauts

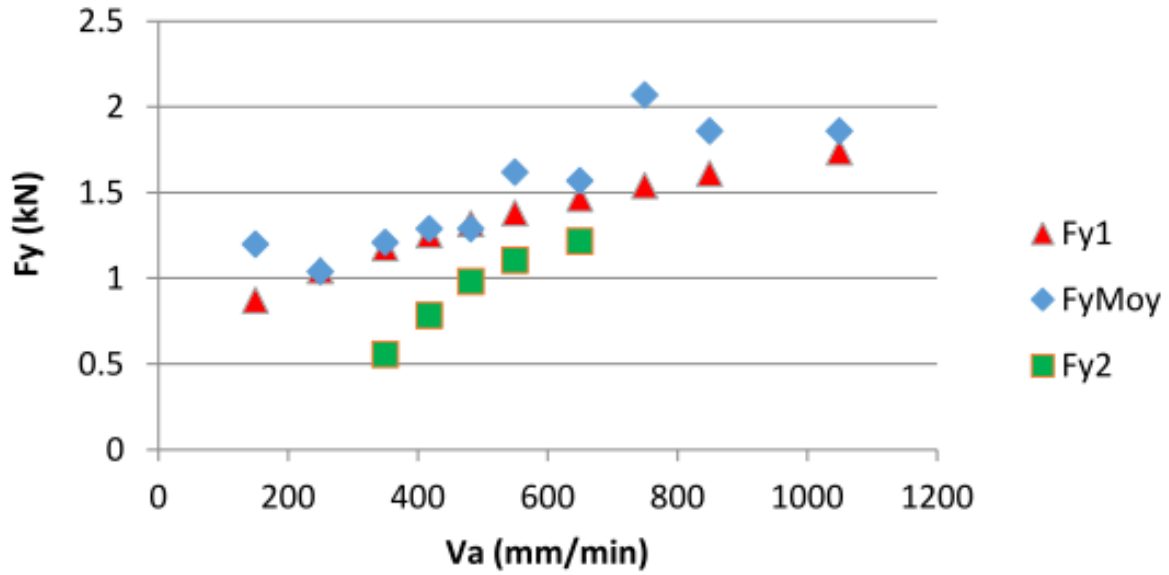


Figure 9: Comparaison des modèles pour la grandeur de sortie  $F_y$  en fonction de  $N$ . (1) avec défauts - (2) sans défauts