



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/10985/9069>


To cite this version :

Laurent LANGLOIS - Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW - 2014

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



 COROUSSO	Projet COROUSSO Livraison n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page de garde

Projet COROUSSO

Tâche 2 : Modélisation du procédé FSW


Livraison 2.1 :

Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW

Projet ANR-2010-SEGI-003-COROUSSO

Partenaires :




 ANR <i>COROUSSO</i>	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 2/52

	Rédigé par	Approuvé par	Validé par
Date	20/03/2012	20/03/2012	10/01/2013
Nom(s)	L. LANGLOIS - LCFC	S. CHEVRET - IS	G. ABBA - LCFC
Signature(s)			

Liste de diffusion		
Nom	Organisme	Fonction
BOUJDAINE Fatiha	ANR	
	HAL	
LANGLOIS Laurent	LCFC	MCF
CHEVRET Sandra	LCFC	MCF



(Logigramme workflow)

Indice de révision	Modifié par	Description des principales évolutions	Date de mise en application	Pages concernées
B	G. ABBA	MAJ page de garde, auteur, liste de diffusion	29/11/2014	1-2


 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livraison n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 3/52

SOMMAIRE

1	Robotisation du FSW	5
1.1	Description cinématique et mécanique d'une opération de FSW	6
1.1.1	Principe physique local du FSW	6
1.1.2	Description d'une opération de FSW	7
1.2	Problématique de la robotisation du FSW	10
1.3	Evolution des efforts de couple de soudage en fonction des paramètres opératoire en FSW ..	11
1.3.1	Phase de plongée	11
1.3.2	Phase de soudage	11
1.4	Cas d'étude	13
1.5	Conclusion	13
2	Etude expérimentale des interactions mécaniques outil/matière en fsw	14
2.1	Etude paramétrique de l'interaction/matière en fonction de F_z , N et V_a	14
2.1.1	Description du type de résultats obtenus	15
2.1.2	Domaine de soudabilité et phénomènes limites aux frontières	16
2.2	Etude du torseur des actions mécaniques outil/matière	17
2.3	Influence de l'orientation de l'outil sur les efforts de soudage et la pénétration	21
3	Modélisation statistique des interactions mécaniques outil/matière	26
3.1	Introduction	26
3.2	Mise en place et validation des fonctions statistiques	27
3.3	Modèle statistique sur les composantes du torseur des efforts outil/matière	28
3.3.1	Modèle statistique du couple	28
3.3.2	Modèle statistique de l'effort d'avance	29
3.3.3	Modèle statistique sur l'effort transverse	29
3.4	Conclusions	30
4	Modélisation thermomécanique simplifiée de l'interaction mécanique outil/matière en fsw	30
4.1	Expression générale des composantes du torseur des interactions mécaniques outil/matière ..	31
4.1.1	Expression de la résultante et du couple de soudage	31
4.1.2	Modélisation simplifiée de l'interaction mécanique outil/matière locale	32
4.2	Contribution de l'épaule et de la surface latérale du pion	32
4.2.1	Contribution de l'épaule	32
4.2.2	Contribution de la surface latérale du pion	33
4.3	Interprétation	34
4.3.1	Sources de non uniformité de la contrainte autour de l'outil de soudage	34
5	Conclusion	37
	Bibliographie	39
	Annexes	41

 	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 4/52

Annexe 1 : Evolution des paramètres de conduite du FSW au cours de la transition entre la phase d'attente et la phase de soudage.....	42
Paragraphe Annexe 1	43
Annexe 2 : Evolution des efforts d'avance et transverse, de la pénétration et du couple de soudage au cours de la phase de soudage	48
Paragraphe Annexe 2.....	49

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livraison n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 5/52

1 ROBOTISATION DU FSW

Le procédé de soudage par friction malaxage (FSW) est un **procédé d'assemblage à l'état solide de proche en proche**.

A l'instar des procédés de soudage par friction, la température maximale atteinte par la matière des pièces de base est inférieure à la température de fusion. Cette propriété provient du fait que l'énergie de soudage est produite par frottement de la matière sur elle-même (soudage par friction rotative, soudage par friction linéaire, soudage par ultrason...) ou sur un outil (FSW). L'équilibre thermique dans l'assemblage est atteint quand l'énergie dissipée par interaction mécanique est suffisante pour maintenir la température des pièces. Ainsi, si on suppose que la matière atteint la température de fusion, le frottement dans cet état ne dégagerait pas l'énergie suffisante au maintien de la matière dans cet état. Dans la plupart des procédés par friction, l'équilibre correspond à une température proche de celle du forgeage à chaud. Pour les alliages d'aluminium on atteint une température de l'ordre de 450°C. Ceci permet de souder les alliages d'aluminium sensibles à la fissuration à chaud ou les alliages d'aluminium de fonderie, alliages difficile à assembler avec les procédés de soudage par fusion.


Les procédés de soudage par friction rotative ou par friction linéaire sont associés à des contraintes géométriques assez restrictives. En effet, les pièces à assembler doivent présenter des surfaces susceptibles de frotter l'une sur l'autre. Dans le cas du procédé de soudage par friction rotative, les deux pièces à assembler doivent présenter une surface d'appui relatif de forme quasi axisymétrique. Le procédé de soudage par friction malaxage opère les soudures à l'instar des procédés de soudage par fusion (Arc, laser, Faisceau d'électrons...). La soudure est obtenue petit à petit au fur et à mesure de l'évolution de l'outil le long du joint soudé. Ceci lui permet l'assemblage de formes complexes.

Le FSW conjugue les deux avantages d'être un procédé à l'état solide et d'être un procédé de soudage de proche en proche. L'intérêt est aujourd'hui de monter ce procédé sur des structures robotisées afin de bénéficier au maximum de l'avantage géométrique offert par le procédé et de présenter aux industriels un outil connu.

Les difficultés liées à la robotisation du FSW résident dans :

- L'existence d'une interaction mécanique entre l'outil et la matière soudée
- Le mode de pilotage particulier du procédé

Dans un premier temps, nous allons décrire de façon mécanique et cinématique une opération de FSW.

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livraison n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 6/52

1.1 Description cinématique et mécanique d'une opération de FSW

En FSW, la soudure est obtenue par l'action d'un outil dont le rôle est d'échauffer la matière et de la « mélanger ».

1.1.1 Principe physique local du FSW

La liaison est obtenue localement par l'action d'un outil constitué d'un épaulement et d'un pion. Le rôle de l'épaulement est d'apporter de l'énergie par frottement sur la surface des pièces et d'assurer une pression interne à la zone malaxée pour assurer la compacité du joint. Le rôle du pion est essentiellement de malaxer la matière, cette action apportant par dissipation plastique une partie de l'énergie de soudage. La matière malaxée est confinée entre l'épaulement, l'enclume placée à l'envers de la soudure et latéralement par les pièces à assembler elles-mêmes. La figure 1 reprend l'ensemble de ces éléments.

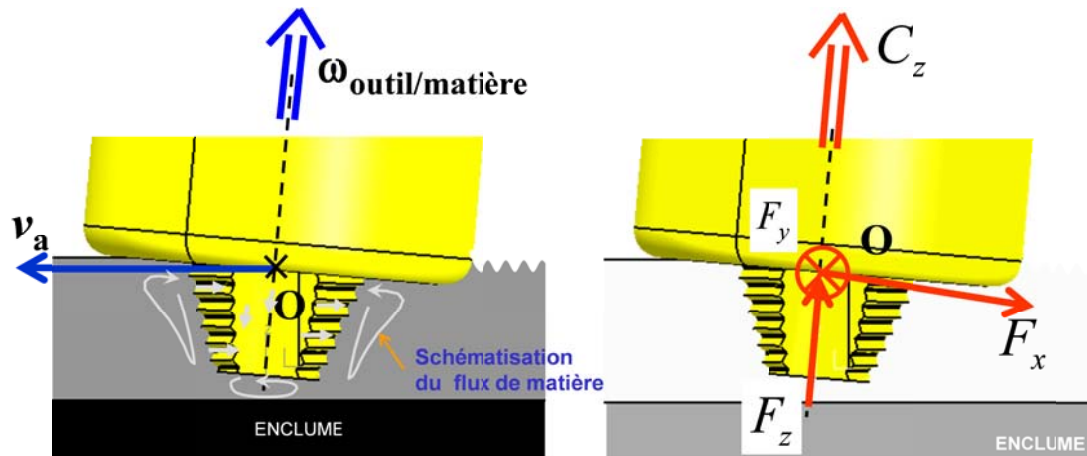



Figure 1 : Schéma du principe local du FSW

L'outil, lors de la phase de soudage, est animé d'un mouvement de rotation et d'un mouvement d'avance. Le mouvement de rotation contribue majoritairement au frottement outil/matière et au malaxage. Le mouvement d'avance influe sur le frottement et l'écoulement de la matière et assure la progression de l'outil le long du joint soudé.

Le torseur des efforts développés entre l'outil et la matière comporte une composante axiale appelée effort de forge (paramètre opératoire du procédé), une composante opposée à la vitesse d'avance appelée effort d'avance et une composante transverse. Les ordres de grandeur des efforts pour l'effort de forge vont de quelques kN pour les épaisseurs et les alliages d'aluminium les plus « tendres » à quelques 10kN pour les plus fortes épaisseurs. L'amplitude des efforts d'avance et transverse sont de l'ordre de 10% à 20% de celle de l'effort de forgeage. Le couple à la broche est de quelques 10 N.m à quelques 100Nm en fonction des applications.

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livraison n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 7/52

L'axe de l'outil est incliné par rapport à la normale à la surface des pièces à souder. La composante F_x de la résultante n'est de ce fait pas strictement opposée à la vitesse d'avance.

Pour assurer la compacité du joint soudé, il est nécessaire de maîtriser l'effort de forge au cours du soudage. Il est nécessaire que l'outil puisse adapter sa pénétration en fonction des variations de volume de matière à malaxer, ces dernières pouvant provenir par exemple des jeux d'assemblage.

La puissance de soudage correspond dans une majeure partie à celle de la broche. La puissance d'avance ne correspond qu'à 5% à 10% de la puissance totale.

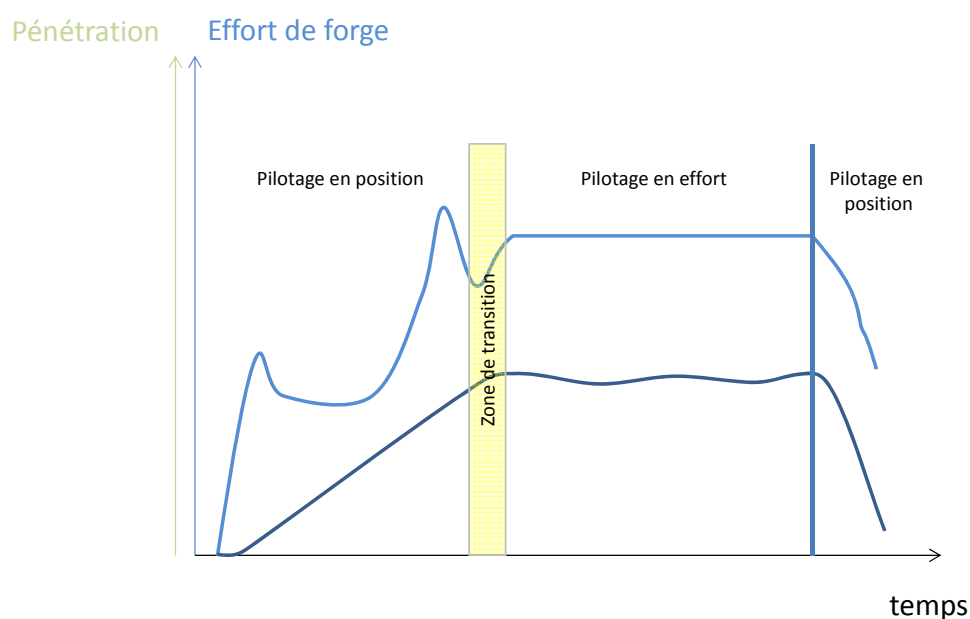
1.1.2 Description d'une opération de FSW

Ce paragraphe est dédié à la description d'une opération de soudage bout-à-bout avec un outil à pion solidaire de l'épaulement.

Sur la figure 1 sont présentées les différentes phases de soudage. L'opération de soudage est divisée en 3 grandes phases que sont :

- La phase de plongée
- La phase de soudage
- La phase de retrait

Dans la phase de plongée l'outil est inséré en force dans le joint entre les tôles à assembler jusqu'à ce que l'épaulement repose sur la surface des pièces. Lors de la phase de soudage, l'outil est animé du mouvement d'avance le long du joint, la soudure est obtenue de proche en proche. Lors de la phase de retrait, l'outil est simplement retiré du joint soudé.




	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 8/52

Figure 2 : Mode de pilotage de l'outil suivant son axe

Sur la figure 2, sont présentés de façon schématique les évolutions de la pénétration et l'effort de forgeage en fonction du temps sur toute l'opération de soudage.

La phase de pénétration est pilotée en position. Elle comporte souvent deux phases, une première à vitesse de pénétration sous la forme d'une rampe avec une valeur de pénétration visée et une seconde dite de maintien où l'outil est maintenu dans sa position. Cette deuxième partie sert à amener la matière dans un état thermomécanique permettant le début de la phase de soudage.

La phase de soudage est pilotée en effort. La consigne est la valeur de l'effort de forge. Dans cette zone, en fonction des jeux de soudage, de l'échauffement de ma matière, la pénétration de l'outil peut être amenée à évoluer.

Dans le tableau 1 sont regroupés les principaux paramètres de conduite du procédé pour les différentes phases. Il est à noter sur la vitesse de rotation lors de la phase de pénétration n'est pas forcément identique à celle de la phase de soudage. De même, certaines machines permettent d'avoir des vitesses de rotation lors de la phase de maintien différentes de celles des phases de pénétration et de soudage.


Plongée	Vitesse de pénétration	Vp
	Vitesse de rotation	Np
	Pénétration visée	Δz
Soudage	Effort de forgeage	Fz
	Vitesse d'avance	Va
	Vitesse de rotation	N

Tableau 1 : Paramètres de conduite des phases de soudage FSW

Entre la phase de pénétration et la phase de soudage, il y a une zone de transition où :

- Il y a transition en termes de vitesse de rotation et de vitesse d'avance
- Il y a transition dans le mode de pilotage

La figure 3 présente les paramètres de conduite d'une opération de soudage sur la machine de soudage MTS de l'Institut de Soudure.

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livraison n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 9/52

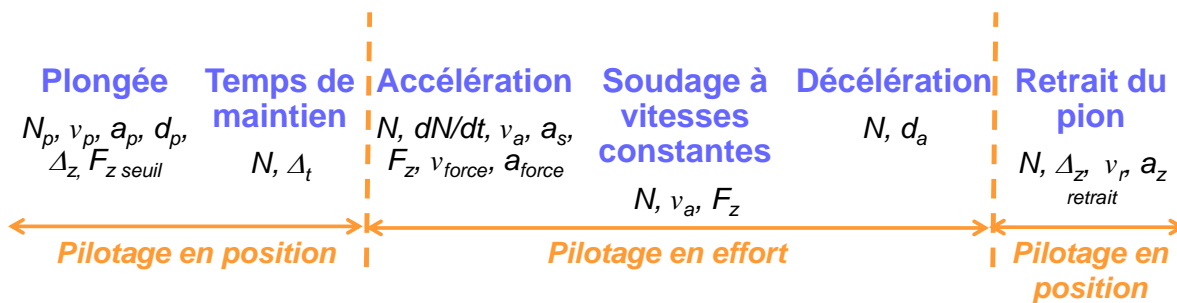


Figure 3 : paramétrage d'une opération de soudage sur la machine MTS de l'Institut de Soudure

Dans la phase d'accélération, la machine impose une accélération en vitesse de rotation et en vitesse d'avance. Pour l'effort, le pilotage passe par la mise en place de paramètre de contrôle concernant la dérivée première et seconde par rapport au temps de l'effort de forgeage. L'effort de forgeage n'est donc pas appliqué brutalement, ces deux paramètres servent à adoucir la transition entre la fin de la phase d'attente et le début de la phase de soudage. L'effort de forgeage atteint en fin de phase d'attente peut, en fonction des cas, être inférieur ou supérieur à l'effort de forgeage en consigne de la phase de soudage. La durée de la phase de transition peut donc être variable en fonction de la valeur v_{force} et a_{force} . En annexe 1 sont présentées les évolutions des paramètres de conduite du procédé au cours de la phase de transition pour trois cas.

Les principaux paramètres de soudage sont :

- Deux angles fixant l'orientation de l'axe de l'outil par rapport au joint soudé et aux pièces de base : φ (autour de y), ψ (autour de x)
- La vitesse de rotation de l'outil (N)
- La vitesse d'avance (V_a)
- L'effort de forge (F_z)

L'orientation de l'axe de l'outil par rapport aux pièces à souder, dans le cas d'une soudure bout-à-bout rectiligne est décrite sur la figure 4.

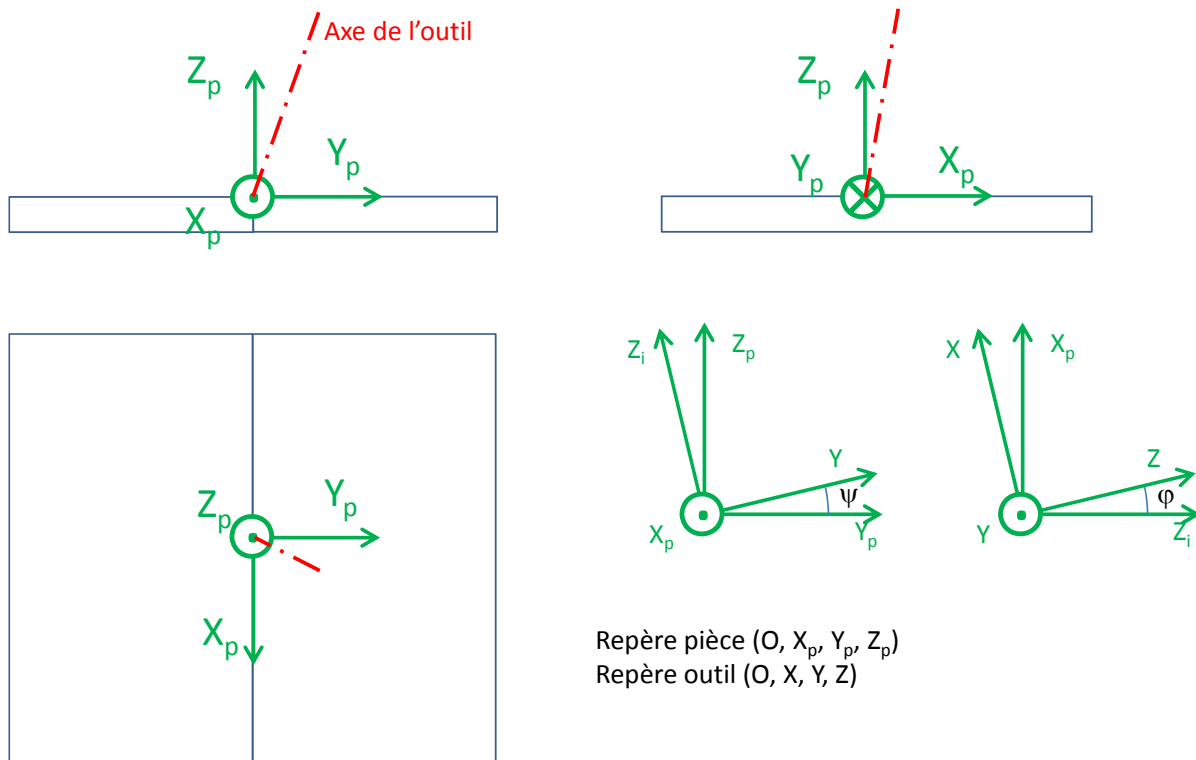


Figure 4 : orientation de l'outil par rapport aux pièces à souder

Dans ce qui suit, les composantes d'effort sont exprimées dans le repère outil.


En règle générale, dans le cas d'une soudure bout-à-bout, l'angle ψ est nul, l'axe de l'outil est dans un plan perpendiculaire à la surface des pièces à souder contenant la ligne de joint.

1.2 Problématique de la robotisation du FSW

L'utilisation d'un robot polyarticulé en FSW se heurte à plusieurs difficultés :

- Sous l'action des efforts outil/matière et particulièrement sous l'effet de sa composante transverse les outils peuvent être déviés de leur trajectoire
- Les solutions robotisées présentes aujourd'hui ne permettent le pilotage idéal de l'outil suivant son axe. En effet, l'outil est soit piloté en effort ou en position sur la totalité de l'opération de soudage sans transition entre la plongée et la phase de soudage.

Anticiper les déformations de la machine de soudage ou piloter l'outil en effort nécessite de connaître le lien entre d'un côté, l'orientation, la position et la cinématique de l'outil et de l'autre les composantes du torseur des actions mécaniques outil/matières. L'équation (1) donne un exemple du type de relation qu'il est nécessaire d'identifier.

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livraison n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 11/52

$$F_y = F_y(u_i) \quad (1)$$

Dans l'équation (1), désigne les paramètres de conduite du procédé.

Pour être capable de concevoir les lois de commande, il est nécessaire d'avoir le comportement dynamique des interactions mécaniques outil/matière. La relation (1) doit être étendue aux dérivées premières voire secondes des paramètres du procédé.

$$F_y = F_y(u_i, \dot{u}_i, \ddot{u}_i) \quad (2)$$

Dans ce qui suit, les relations du type de l'équation (1) seront déterminées de façon statistique en ne considérant comme paramètre d'entrée que la vitesse de rotation, la vitesse d'avance et l'effort de forge. L'influence de l'orientation de l'outil sera abordée mais les résultats acquis jusqu'à aujourd'hui, permettant d'établir des tendances, ne pas encore suffisants pour mettre en place des lois.

1.3 Evolution des efforts de couple de soudage en fonction des paramètres opératoire en FSW

Pour analyser le torseur des actions mécaniques outil/matière on va dissocier les phases de plongée et de soudage.

1.3.1 Phase de plongée


Au cours de la phase de plongée, l'outil est inséré progressivement en force à l'interface entre les deux pièces à assembler. Cette phase est pilotée en position.

Cette phase a été étudiée par plusieurs auteurs [1], [2], [3]. Ils présentent l'évolution de l'effort de forgeage au cours de la plongée sous la forme de deux pics. Le premier pic, en début de plongée, est dû à la résistance de la matière à la descente de la face inférieure du pion. Du fait du frottement du pion, la matière située sous le pion s'échauffe. A cet échauffement est associée une chute de la limite d'écoulement contribuant à initier le malaxage de la matière. Après ce pic d'effort, le pion pénètre provoquant l'extrusion de la matière malaxée le long de son flanc [4], [5]. Un deuxième pic d'effort apparaît au moment de l'accostage de l'épaule.

L'amplitude des pics d'effort sont fortement dépendant de la vitesse de pénétration [6]. Une influence indirecte de la vitesse de rotation est toutefois à noter [3]. Lorsque celle-ci est trop faible, l'énergie apportée par l'interaction mécanique entre l'outil et la matière semble insuffisante pour échauffer la matière afin de l'amener à l'état pâteux. Il en résulte un surcroît de l'effort de pénétration.

1.3.2 Phase de soudage

Le moment en O (voir figure 1) des actions mécaniques exercées par la matière sur l'outil se décompose comme le couple de soudage suivant l'axe de l'outil et deux autres moments autour de X et Y (voir figure 4).

 ANR <i>COROUSSO</i>	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 12/52

Ces dernières ne sont jamais étudiées dans la littérature ou sont très souvent considérées comme négligeable [7].

Les résultats expérimentaux de Mutukhumaran et al. [8] tendent à montrer que l'effort transverse exercée par la matière sur l'outil est orienté du côté avance. Balasugramanian et al. [7] attribue cette composante d'effort à un déséquilibre des conditions tribologiques entre l'avant et l'arrière du pion. L'amplitude des efforts d'avance et transverse sont de l'ordre de 10% de l'effort de forgeage. Toutefois, ces valeurs semblent fortement liées aux paramètres de soudage, au matériau ainsi qu'à la géométrie d'outil.

Un grand nombre d'auteurs constatent dans leurs essais une chute du couple avec l'augmentation de la vitesse de rotation [9], [10], [11]. De la même façon, ces mêmes auteurs constatent une faible sensibilité du couple à la vitesse d'avance. En fait l'énergie de soudage provient pour une majeure partie du travail du couple. Le travail de l'effort d'avance ne représente, en fonction des cas, que 5 à 10% de l'énergie totale. Malgré la chute du couple, l'énergie de soudage augmente avec la vitesse de rotation. A cette augmentation de l'énergie, les auteurs associent une chute de la contrainte d'écoulement du matériau expliquant la baisse du couple.

Plusieurs auteurs constatent également une chute de l'effort d'avance et de l'effort transverse avec l'augmentation de la vitesse de rotation. Ils constatent l'effet inverse avec l'augmentation de la vitesse d'avance. Ces auteurs expliquent ces résultats en considérant l'énergie nominale de soudage, cette dernière baissant avec l'augmentation de la vitesse d'avance. Une baisse de l'énergie nominale signifie que la même longueur de soudure est obtenue avec une énergie plus faible. Ceci signifie que la matière a atteint des températures plus faibles et donc un matériau à la limite d'écoulement plus élevée. Ceci explique l'amplitude plus forte de l'interaction mécanique entre l'outil et la matière.

A l'instar de tous les procédés de soudage par friction, il y a une relation forte entre, l'énergie de soudage produite, la température atteinte et le comportement de l'alliage soudé. Ce lien est illustré sur la figure 5. L'énergie de soudage correspond au travail des interactions outil/matière. Celui-ci, pour une cinématique d'outil donnée, est fonction de la résistance de la matière au malaxage. La résistance de la matière dépend en grande partie de sa température, cette dernière dépendant de l'énergie de soudage.

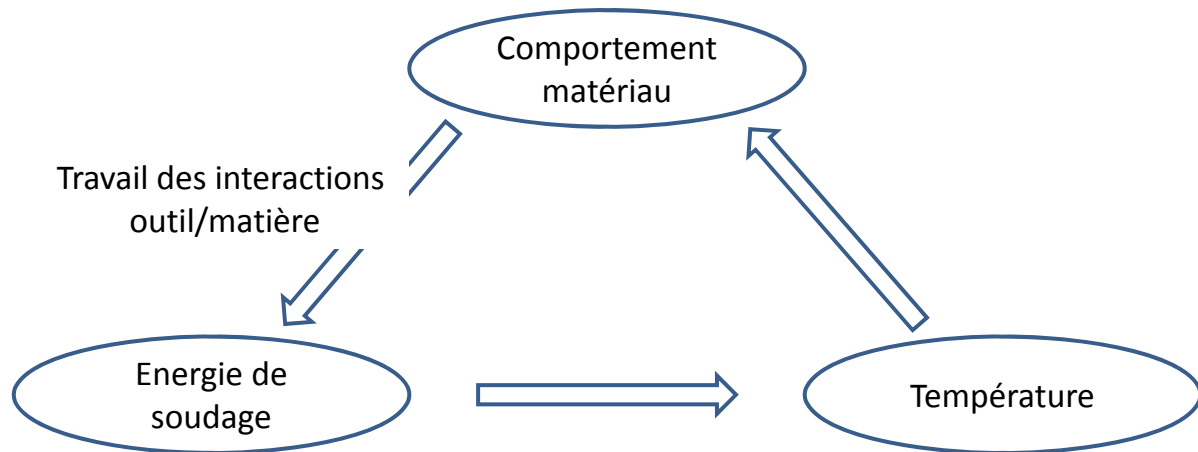


Figure 5 : Interaction mécanique et énergie de soudage

Tous les auteurs qui ont étudié les efforts en FSW ont constaté des oscillations sur toutes les composantes [12][7][8]. L'analyse en fréquence de ces oscillations fait systématiquement apparaître la fréquence de rotation. L'évolution de l'effort d'avance et transverse au cours d'une rotation de l'outil semblent montrer l'importance de la forme de l'outil ainsi que les paramètres opératoires sur ce phénomène.

1.4 Cas d'étude

Les modèles statistiques de ce travail ont été développés dans le cadre du soudage bout-à-bout de deux tôles d'épaisseur 6 mm dans un alliage d'aluminium 6082 T651.


L'outil utilisé est un outil standard pour l'épaisseur soudée. Il est constitué d'un épaulement lisse concave avec un pion conique fileté.

Les soudures ont été réalisées sur la machine MTS de l'Institut de Soudure. Entre chaque soudure, seuls les trois paramètres principaux ci-dessus ont été modifiés, les paramètres de la phase de plongée et du maintien ont notamment été conservés.

1.5 Conclusion

Ce document est consacré à la mise en place d'un modèle statistique reliant les paramètres de conduite du procédé FSW que sont la vitesse de rotation, la vitesse d'avance et l'effort de forge à l'effort d'avance, l'effort transverse, le couple ainsi que la pénétration de l'outil. Ce modèle s'appliquera au cas d'étude c'est-à-dire, le soudage bout-à-bout de deux tôles de 6 mm en alliage 6082 T651. Ces travaux s'appuient sur ceux les résultats expérimentaux de la thèse de Sandra Zimmer.

Dans un premier temps sont présentés les principaux résultats expérimentaux. Dans une deuxième partie seront présentés les modèles statistiques développés sur les différentes composantes du torseur des efforts et

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 14/52

sur la pénétration. Dans une troisième partie, un modèle thermomécanique simplifié permettra d'expliquer l'origine de la composante transverse de l'effort outil matière et de donner des explications possibles à son évolution en fonction des paramètres de conduite du procédé.

2 ETUDE EXPERIMENTALE DES INTERACTIONS MECANQUES OUTIL/MATIÈRE EN FSW

L'étude paramétrique expérimentale comporte deux volets. Le premier porte sur l'évolution du torseur des interactions mécaniques outil/matière en fonction de l'effort de forge, de la vitesse de rotation et de la vitesse d'avance. Le deuxième volet porte sur l'étude de l'influence de l'orientation de l'outil.

2.1 Etude paramétrique de l'interaction/matière en fonction de F_z , N et V_a

Pour cette étude, le domaine de variations pour chaque paramètre est donné dans le tableau 2. Trois niveaux seront testés pour chaque paramètre. Chaque jeu de paramètres sera testé trois fois pour obtenir une première idée de la répétabilité des essais. L'inclinaison de l'outil ne fait pas partie des paramètres de cette étude. Les deux angles sont fixés, $\varphi = +2.5^\circ$ et $\psi = 0^\circ$.

Paramètre		Minimum	Maximum
Vitesse de rotation	N (tr/min)	800	1800
Vitesse d'avance	V_a (mm/min)	300	900
Effort de forge	F_z (kN)	10	22

Tableau 2 : domaine de variation des paramètres de conduite du FSW

L'ensemble des autres paramètres d'entrée de l'opération de soudage regroupés sur la figure 3 sont conservés identiques pour tous les essais.

Les grandeurs de sortie de l'étude sont l'effort d'avance et transverse, le couple et la pénétration. Les deux premiers ne sont pas directement mesurés sur l'outil mais sont calculés à partir de la mesure du couple au niveau des axes 4 et 5 de la machine. Ce calcul est basé sur l'hypothèse que les composantes du moment des efforts outil/matière autour de x et y sont négligées. La composante du moment suivant l'axe de l'outil est mesuré indirectement par le couple à la broche. Enfin, la pénétration de l'outil est assurée par un vérin incorporé dans le rotor de la broche. La longueur de sortie du vérin donne la pénétration de l'outil et la pression dans le vérin sert de base au calcul de l'effort de forge.

La machine de soudage permet également la mesure des paramètres de consigne que sont donc la vitesse de rotation, vitesse d'avance et l'effort de forge.

2.1.1 Description du type de résultats obtenus

Sur la figure 6 est présenté le type de résultat donné par la machine de soudage. Sur la figure ne sont représentées que les évolutions des composantes de la résultante de l'effort outil/pièce, la pénétration et la vitesse d'avance.

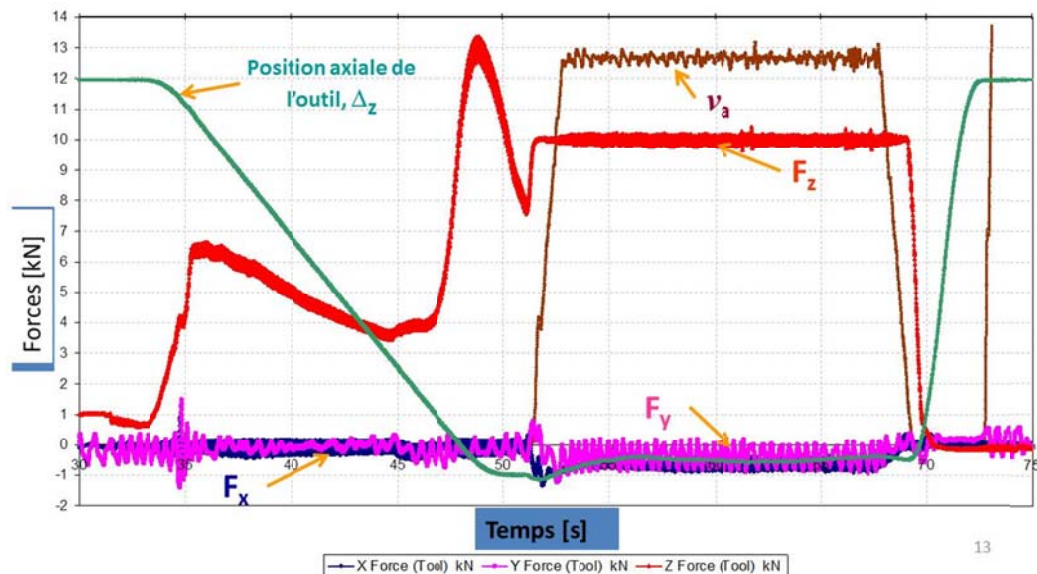



Figure 6 : Evolution des composantes de valeur d'effort en soudage FSW

Sur les courbes obtenues on distingue la phase de pénétration et maintien de la phase de soudage.

La phase de pénétration se caractérise par quatre stades que sont :

- Une montée brutale de l'effort de forge correspondant à l'entrée dans les pièces de l'extrémité du pion. Au début de la soudure, la matière est froide, l'effort nécessaire à la progression du pion entre les pièces est important.
- Un plateau où l'évolution de l'effort en fonction de la pénétration évolue peu. Dans le cas de la figure 5, l'effort chute lentement mais ceci n'est pas toujours le cas. Dans ce stade, la matière sous le pion est à l'état pâteux, la progression du pion dans le joint soudé se fait sans augmentation notable de l'effort de forge.
- Une remontée de l'effort de forgeage correspondant à l'entrée en contact de l'épaule sur la surface des pièces à assembler.
- Une chute de l'effort de forge après accostage de l'épaule avec l'arrêt de la pénétration. La matière s'écoule autour de l'outil maintenu en position, ceci provoquant une diminution de l'effort de forge.

La valeur de l'effort de forge à la fin de la phase d'attente dépend de l'ensemble du cycle de pénétration. Les paramètres choisis pour ce dernier sont tels que l'effort de forge atteint est de l'ordre de 10kN, valeur égale à

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 16/52

la limite inférieure du domaine de variation de l'effort de forge en phase de soudage. Les figures de l'annexe 1 illustrent les trois cas de figure de transition de l'effort de forge et des autres paramètres de soudage lors de la phase de transition.

Lors de la phase de soudage, l'effort de forge devient une consigne alors que la pénétration de l'outil dans la matière devient une sortie de l'étude. Sur la figure 4 on observe que cette pénétration évolue lors de la phase de soudage. De façon générale, il apparaît une phase transitoire pendant laquelle la pénétration peut évoluer de façon significative. Sur la figure 5, on remarque une remontée de l'outil sur les 4 ou 5 premières secondes de soudage, cette durée étant plus importante que celle de la phase de transition. Ensuite la pénétration semble se stabiliser. En fin de soudage, principalement du fait de la chute de la vitesse d'avance et de la moindre inertie thermique de l'extrémité des plaques, la pénétration connaît souvent un bref accroissement avant la phase de retrait.

2.1.2 Domaine de soudabilité et phénomènes limites aux frontières

Les défauts de soudage obtenus dans les soudures sont les suivants :

- Effondrement de la soudure
- Défaut tunnel
- Brulure en surface du cordon

L'effondrement du cordon de soudure est obtenu pour les soudures réalisées avec une vitesse d'avance faible, une vitesse de rotation élevée et l'effort de forgeage élevé. Cette effondrement correspond à une augmentation de la pénétration sur les premiers millimètres de soudure jusqu'au contact du bout du pion sur l'enclume. Lorsque l'extrémité du pion touche l'enclume, une part important de l'effort de forge est reprise par l'enclume directement. La pression dans la zone malaxée n'est plus assurée, on obtient des défauts de compacité dans la soudure.

Les défauts tunnel sont obtenus à l'inverse pour des vitesses d'avance élevées, une vitesse de rotation faible et un effort de forgeage faible. Le défaut tunnel correspond à un défaut de compacité au pied du pion du côté « advancing ». La matière ne se referme pas complètement à l'arrière de l'outil.

Les brulures apparaissent comme des « écailles » en surface des cordons. Ceci correspond à une fusion partielle de l'alliage d'aluminium sous l'épaulement. Ce type de défaut peuvent apparaître en mise en forme et correspondent souvent à un excès d'énergie développé en surface de pièce par l'action des frottements (frottement excessif et/ou vitesse de glissement excessive)

Sur la figure 7 sont présentées des macrographies ou des photographies des soudures présentant les principaux défauts rencontrés. Elles correspondent aux Neuf essais réalisés avec un effort de forge de 16kN.

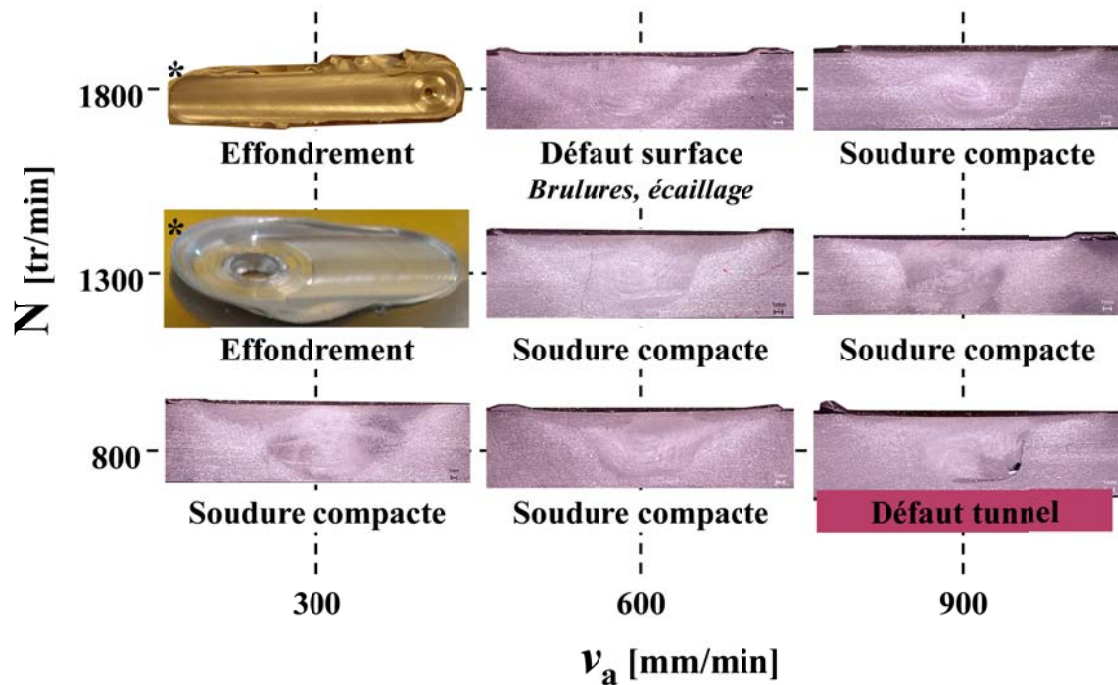



Figure 7 : Photographies et macrographies des soudures obtenues pour avec un effort de forge de 16kN et différentes valeurs de vitesse d'avance et de vitesse de rotation

L'étude expérimentale menée pour la détermination du domaine de soudabilité opératoire comprend des lignes de malaxage en pleine tôle et des soudures bout-à-bout. Les premiers servent surtout à définir un premier DSO en faisant abstraction des défauts d'accostage des tôles à souder. Les deuxièmes permettent de vérifier le DSO en prenant en compte le défaut de manque de pénétration.

2.2 Etude du torseur des actions mécaniques outil/matière

Dans le tableau 3 sont rassemblées les valeurs moyennes des efforts d'avance, transverse et du couple pour tous les essais réalisés dans l'étude expérimentale de détermination du domaine de soudabilité opératoire. A cette occasion, on peut remarquer que les valeurs d'effort obtenues en soudage en pleine tôle diffèrent peu de celles obtenues en soudage bout-à-bout.


 ANR <i>COROUSSO</i>	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW		ANR-10-SEGI-003-LI2.1
			29/03/2012
			indice B
			Page 18/52

	FZ	Va	N	défaut	Cz	Fx	Fy
1	10	300	800		68	1,04	0,37
2	10	300	1300		57,4	0,65	0,34
3	10	300	1800		50,9	0,55	0,77
4	10	600	800	tunnel	67,1	2,95	1,7
5	10	600	1300		58,9	1,4	0,6
6	10	600	1800		51,9	0,85	0,74
7	10	900	800	tunnel			
8	10	900	1300	tunnel	59,3	2,85	1,84
9	10	900	1800		54,2	1,6	1
10	16	300	800		70	0,65	0,47
11	16	300	1300	excès péné			
12	16	300	1800	excès péné			
13	16	600	800		73,5	1,7	0,6
14	16	600	1300		61,9	0,95	0,6
15	16	600	1800	brulure	54,2	1,15	1,54
16	16	900	800	tunnel	73,3	4,25	1,1
17	16	900	1300		63	2,2	0,4
18	16	900	1800		55,4	1,35	1,34
19	21,5	300	800	excès péné			
20	21,5	300	1300	excès péné			
21	21,5	300	1800	excès péné			
22	21,5	600	800		76,2	1,2	0,87
23	21,5	600	1300		64,3	1,2	1,54
24	21,5	600	1800	excès péné			
25	21,5	900	800		78,5	2,9	0,5
26	21,5	900	1300		65,2	2	0,8
27	21,5	900	1800	brulure	56,9	2,1	1,57

Tableau 3 : valeur moyenne des efforts et couple de soudage et défaut

Dans l'étude nous allons traiter les valeurs moyennes de l'effort d'avance, de l'effort transverse et du couple sur la phase de soudage. Il est toutefois important de regarder la forme de ces efforts et notamment leur dérive le long de la soudure ainsi que les composantes fréquentielle.

Sur la figure 8 sont présentées les évolutions de l'effort d'avance, de l'effort transverse et de la pénétration « relative » de l'outil en fonction du temps lors de la phase de soudage. La pénétration dite « relative » est définie comme la distance entre la surface de l'enclume et le bout du pion de l'outil. Lorsque la valeur augmente comme c'est le cas sur la figure 8 entre 60 et 64 secondes, cela signifie que l'outil remonte diminuant ainsi la valeur de la pénétration.

 COROUSSO	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 19/52

Sur la figure 8, on constate un régime transitoire en début de phase de soudage lors duquel l'outil va prendre sa pénétration en régime établi. On peut noter le même régime établi au travers de l'évolution de l'effort d'avance et dans une moindre mesure au travers de l'effort transverse.

En annexe 2 sont présentés de façon similaire les résultats obtenus pour d'autres jeux de paramètres.

De façon générale, on constate une évolution lente des composantes d'effort et de la pénétration à laquelle se superpose une oscillation à fréquence plus élevée (voir figure 6). L'amplitude de ces dernières peut atteindre une valeur de l'ordre de la valeur moyenne des efforts. Pour certains essais, on peut observer une inversion de signe de la composante d'effort transverse.

L'observation du couple montre que, pour tous les essais réalisés, il existe un régime transitoire qui peut s'étendre sur une grande partie des 300mm de soudure. Au-delà de ce régime transitoire, le couple semble de stabiliser. Il n'en est pas de même pour les composantes d'effort d'avance et transverse. Une grande variété d'évolution est constatée même si il demeure toujours un régime transitoire.

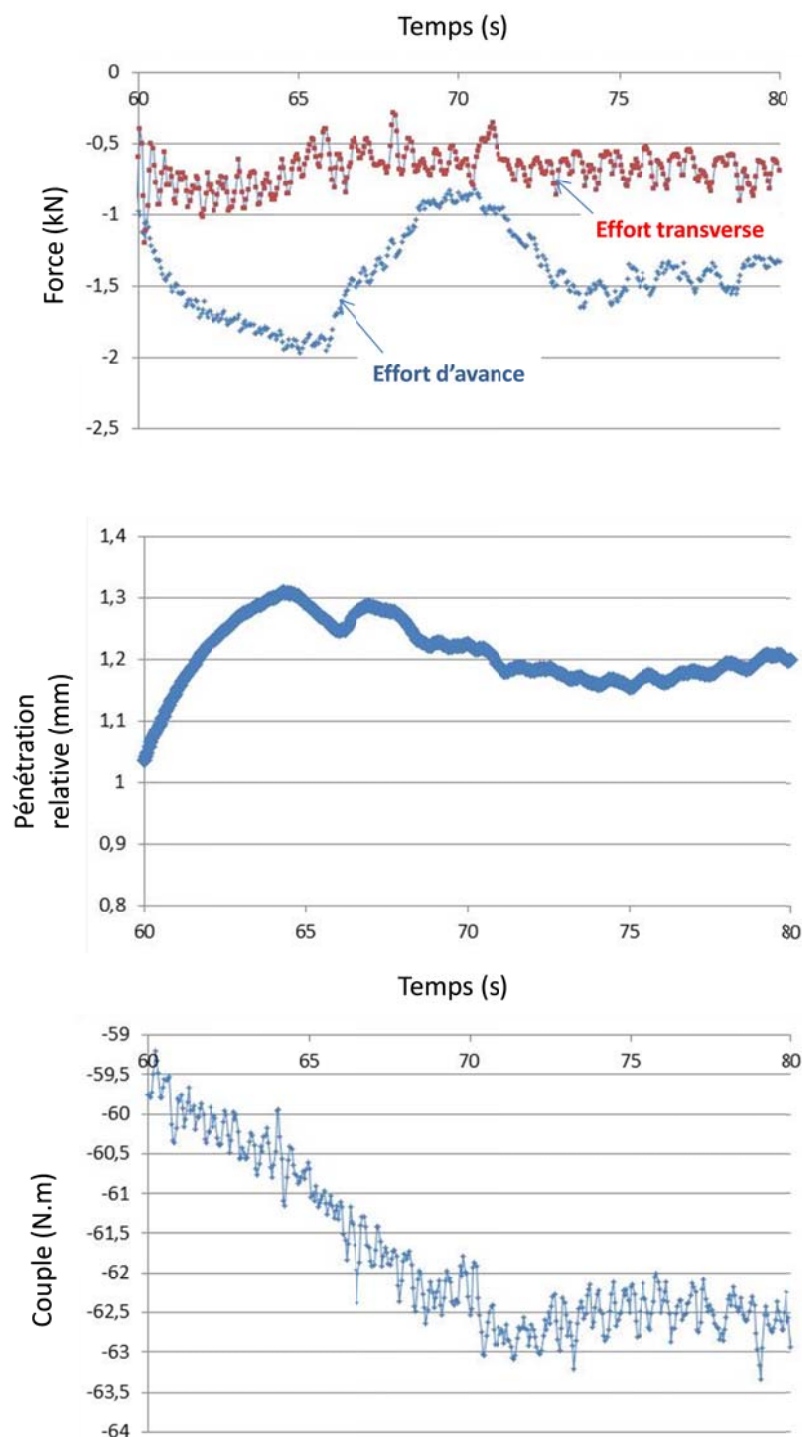


Figure 8 : Evolution de l'effort d'avance, de l'effort transverse, de la pénétration et du couple en fonction du temps lors de la phase de soudage ($F_z=10\text{kN}$, $N=1200\text{tr/min}$ et $V_a=600\text{mm/min}$)

Les modèles statistiques développés dans la partie 3 ne considèrent que la valeur moyenne des composantes d'effort sur la phase de soudage. Leur dérive et les oscillations ne sont pas considérées dans un premier temps.

2.3 Influence de l'orientation de l'outil sur les efforts de soudage et la pénétration

Pour déterminer l'influence de l'orientation de l'outil sur les efforts de soudage, une campagne d'essais a été menée. Les paramètres principaux de conduite du procédé sont ceux du point central de la campagne d'identification du DSO (voir tableau 2). L'influence de chaque angle fixant l'orientation de l'outil a été étudiée séparément. L'effet couplé des deux défauts d'orientation n'a pas été étudié.

La valeur des paramètres de chaque essai est donnée dans le tableau 4.

	Vitesse d'avance	fréquence de rotation	effort de forge	tilt	roll	
Essai	mm/min	tr/min	kN	°	°	Côté
1	600	1300	16	2,5	0	-
2	600	1300	16	2,5	-2	avance
3	600	1300	16	2,5	-4	avance
4	600	1300	16	2,5	-6	avance
5	600	1300	16	2,5	-8	avance
6	600	1300	16	2,5	2	retrait
7	600	1300	16	2,5	4	retrait
8	600	1300	16	2,5	6	retrait
9	600	1300	16	2,5	8	retrait
10	600	1300	16	0,5	0	-
11	600	1300	16	1,5	0	-
12	600	1300	16	2,5	0	-
13	600	1300	16	3,5	0	-
14	600	1300	16	4,5	0	-
15	600	1300	16	5,5	0	-

Tableau 4 : Conditions des essais pour l'étude de l'influence de l'orientation de l'outil sur les efforts

Pour cette campagne, chaque essai n'a été réalisé qu'une seule fois pour des raisons de temps. De même pour des raisons liées aux moyens expérimentaux seule la composante d'avance de l'effort et le couple ont été mesurés.

Sur le graphe de la figure 9 est présentée l'évolution de la valeur moyenne du couple, de la pénétration et de l'effort d'avance en fonction de l'angle de tilt.

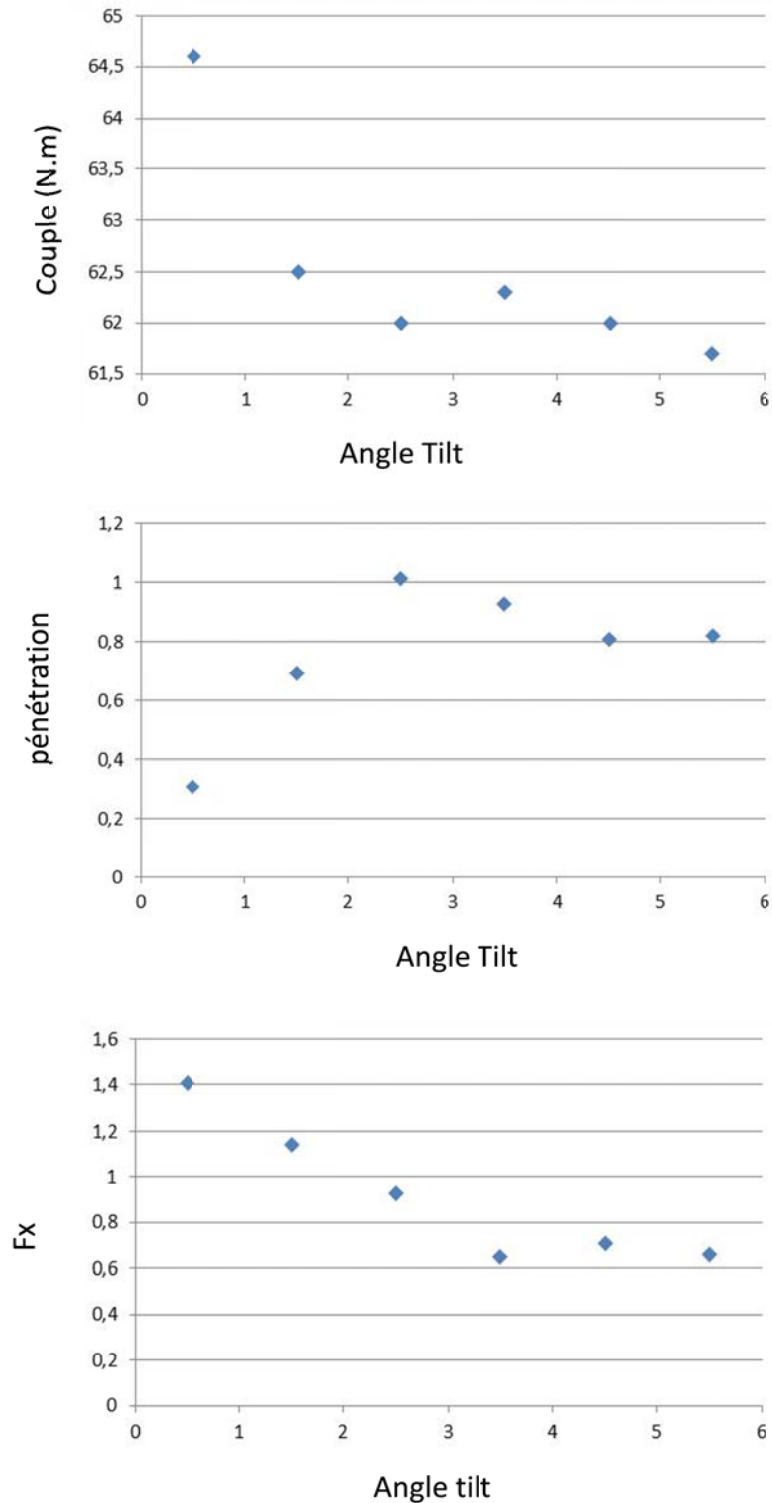



Figure 9 : Evolution du couple, de la pénétration et de l'effort d'avance en fonction de l'angle φ

 ANR <i>COROUSSO</i>	Projet COROUSSO Livraison n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 23/52

On remarque qu'entre 0,5° et 2,5° le couple, la pénétration et l'effort d'avance décroissent avec l'angle de Tilt. Au-delà de 2,5° les tendances sont moins marquées. L'interprétation physique de ce comportement 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 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 portés par le vecteur d'avance mais par le vecteur perpendiculaire à l'axe incliné de l'outil. En inclinant l'outil d'avantage, 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 ci-dessous sont présentés l'évolution du couple, de la pénétration et de l'effort d'avance en fonction de l'angle Roll. La valeur négative de l'angle de roll correspond à une inclinaison de l'outil du côté avance de la soudure.

On note un minimum du couple et de la pénétration pour un angle de roll nul, c'est-à-dire, quand l'axe de l'outil se trouve dans un plan perpendiculaire à la surface des pièces à souder contenant la ligne de joint. Pour les mêmes raisons que pour l'influence de l'angle de tilt, le lien entre le couple et la pénétration provient sans doute du fait que la puissance de soudage est directement liée au couple.

L'effet de l'inclinaison de l'outil sur l'effort d'avance ne présente pas l'allure « symétrique » des courbes de couple et de pénétration.

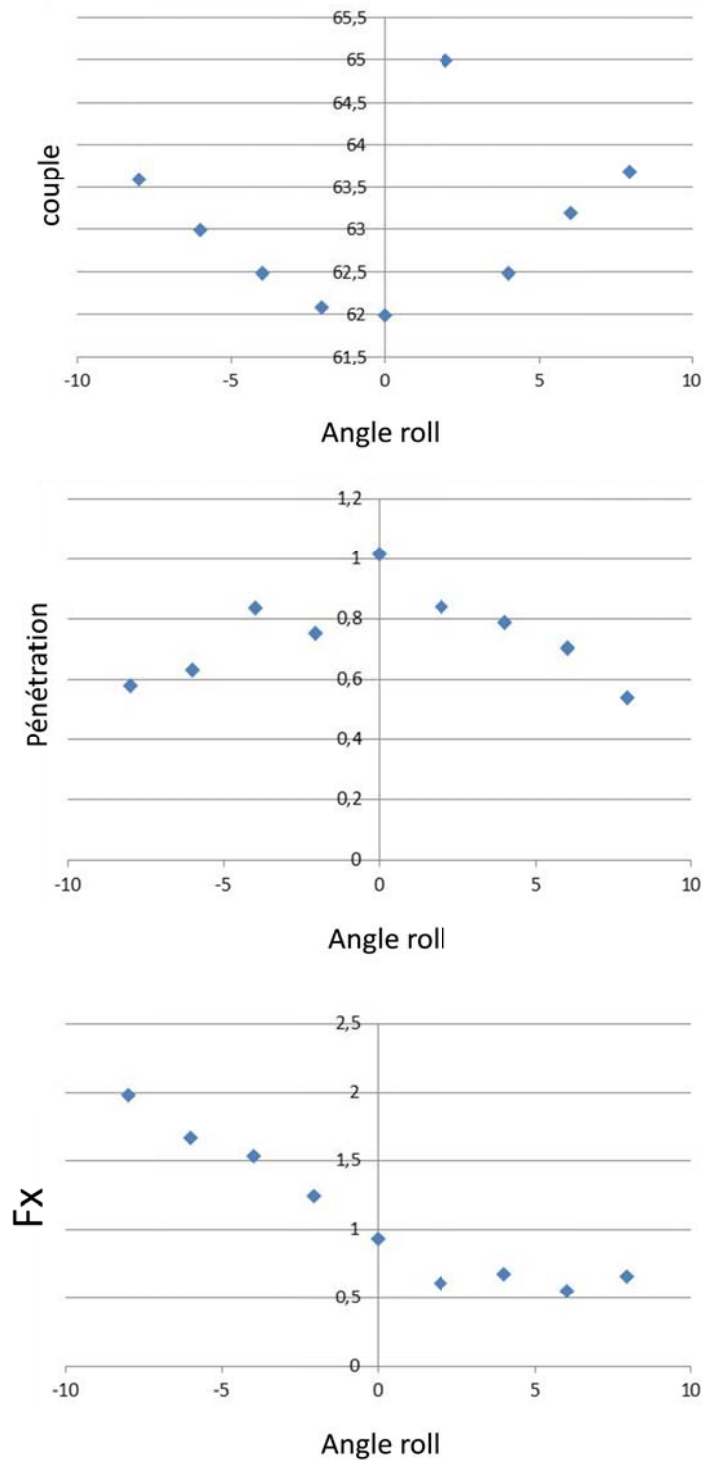


Figure 10 : Evolution du couple, de la pénétration et de l'effort d'avance en fonction de l'angle ψ

<p>AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE</p> <p>ANR</p> <p>COROUSSO</p>	<p>Projet COROUSSO</p> <p>Livrable n°2.1</p> <p>Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW</p>	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 25/52

On remarque que la position centrée représente un minimum pour le couple moyen ainsi qu'un maximum pour la pénétration.

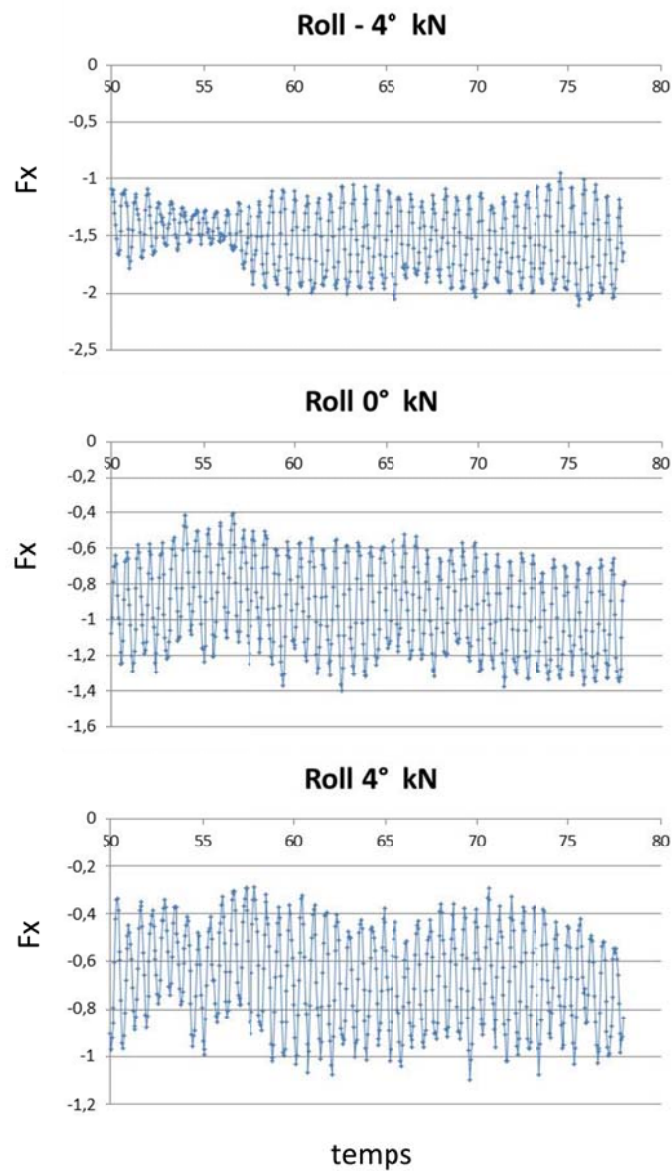


Figure 11 : fluctuation de l'effort d'avance

3 MODELISATION STATISTIQUE DES INTERACTIONS MECANQUES OUTIL/MATIÈRE

3.1 Introduction

Dans cette partie, nous allons étudier la possibilité de modéliser l'évolution des efforts d'avance et transverse ainsi que le couple en fonction des paramètres de conduites du procédé par des fonctions statistiques simples dont l'une des particularités majeure est de permettre leur intégration dans la conception de la commande du robot.

Dans le tableau 3 sont donnés les coefficients de corrélation linéaire entre les paramètres de conduite du procédé et la moyenne des grandeurs de sortie de l'étude.

	Cz	Fx	Fy	Δz
Va	0,06	0,73	0,4	-0,14
N	-0,92	-0,37	0,3	0,08
Fz	0,49	0,36	0,09	-0,94

Tableau 5 : coefficient de corrélation entre les efforts et couple de soudage et les paramètres de conduite du procédé


Dans ce tableau, on peut remarquer que le couple est fortement corrélé à la vitesse de rotation. L'effort d'avance est surtout corrélé à la vitesse d'avance et la pénétration à l'effort de forge. L'effort transverse ne semble pas fortement corrélé à un paramètre particulier.

La puissance de soudage s'exprime comme le co-moment du torseur des efforts et du torseur cinématique entre l'outil et la pièce. Dans notre cas, la puissance de soudage se résume à :

$$P = C_z \cdot N \cdot \frac{\pi}{30} + \frac{1}{60} V_a \cdot F_x \quad (3)$$

Avec F_x exprimé en kN, C_z en N.m, N en tr/min et V_a en mm/min (voir tableau 5)

Le signe du coefficient de corrélation entre le couple et la vitesse de rotation tend à montrer que le premier diminue lorsque le second augmente. Ceci s'expliquerait par le fait qu'avec l'augmentation de la vitesse de rotation on ait une augmentation de la puissance de soudage et donc de la température de la matière. La moindre contrainte d'écoulement de cette dernière expliquerait la diminution du couple.

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livraison n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 27/52

3.2 Mise en place et validation des fonctions statistiques

Comme dans les travaux de Zhao [13], les fonctions statistiques testées seront des fonctions puissance de la forme de l'équation 2 :

$$X = A.V_a^\alpha N^\beta F_z^\mu \quad (4)$$

Où X représente une des trois grandeurs de sortie de notre étude.

La détermination des coefficients de la loi statistique se fera par la méthode des moindres carrés. Les coefficients seront donc déterminés de telle façon que la somme des carrés des écarts entre les valeurs de la fonction et les valeurs expérimentales soient minimum.

La qualité de la fonction statistique sera déterminée par l'erreur quadratique moyenne et par le maximum de l'erreur quadratique. De même, nous déterminerons la précision des paramètres de la fonction.

Pour cela, nous allons considérer le logarithme de la fonction pour obtenir une relation qui puisse se mettre sous la forme :

$$M.u = b \quad (5)$$

Dans notre cas, M , u et b peuvent être explicités :

$$M = \begin{bmatrix} 1 & v_{a_i} & N_i & F_{z_i} \end{bmatrix}; u = \begin{bmatrix} A \\ \alpha \\ \beta \\ \mu \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} \ln(X_i) \end{bmatrix} \quad (6)$$

où i est le numéro de l'essai.

U est le vecteur inconnu, M et b dépendent pour le premier des jeux de paramètres de conduite du plan d'expérience et pour le deuxième des mesures expérimentales.


Le système ayant un nombre d'équations plus grand que le nombre d'inconnues, la résolution est obtenue en considérant le critère des moindres carrés. La méthode consiste à obtenir une solution u_s telle que la somme des carrés des erreurs est minimale. Soit ε le vecteur erreur défini par la relation ci-dessous

$$\varepsilon = b - M.u_s \quad (7)$$

L'erreur quadratique est exprimée comme :

$$Erreur = \varepsilon^T \varepsilon \quad (8)$$

Les paramètres de la loi statistique sont déterminés de façon à minimiser E .

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 28/52

———— (9)

Le critère des moindres carrés appliqué à une équation linéaire du type de III donne une solution définie par l'équation jjj

(10)

Le biais de la solution est donné par la relation suivante :

(11)

Enfin, l'incertitude sur la valeur des paramètres obtenue est calculée.

3.3 *Modèle statistique sur les composantes du torseur des efforts outil/matière*

3.3.1 **Modèle statistique du couple**

Un premier modèle à quatre paramètres a permis de donner :

$$C_z = 427.V_a^{0,04}.N^{-0,35}.F_z^{0,11} \quad (12)$$

Le tableau ci-dessous donne la précision sur les paramètres de la loi et l'erreur quadratique moyenne.

	A	α	β	μ		MSE
Incertitude	0,04	0,7	0,09	0,3		1,04%

Tableau 6 : Précision et erreur quadratique moyenne sur le modèle du couple


Dans ce tableau, on peut remarquer que la précision sur α , la puissance de la vitesse d'avance est faible devant celle des autres paramètres. Un nouveau modèle a été testé avec seulement trois paramètres en enlevant la sensibilité à la vitesse d'avance. Ce nouveau modèle permet d'obtenir la relation 13 la précision sur les paramètres et l'erreur quadratique moyenne associée sont données dans le tableau 5

$$C_z = 473.N^{-0,34}.F_z^{0,14} \quad (13)$$

	A	β	μ		MSE
Incertitude	0,054	0,12	0,31		2,21%

Tableau 7 : Précision et erreur quadratique moyenne sur le modèle du couple

Malgré la suppression de la sensibilité à la vitesse d'avance, l'erreur quadratique moyenne ainsi que la précision sur les paramètres restent faibles. Le modèle statistique obtenu donne donc de bons résultats sur le domaine de l'étude.

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livraison n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 29/52

3.3.2 Modèle statistique de l'effort d'avance

Un premier modèle à quatre paramètres a permis de donner :

$$F_x = 0,54 \cdot V_a^{0,94} \cdot N^{-0,65} \cdot F_z^{-0,02} \quad (14)$$

Le tableau ci-dessous donne la précision sur les paramètres de la loi et l'erreur quadratique moyenne.

	A	α	β	μ		MSE
Incertitude	-4,68	0,33	-0,55	-19,1		12,30%

Tableau 8 : Précision et erreur quadratique moyenne sur le modèle du couple

Dans ce tableau, on peut remarquer que la précision sur A et μ est faible devant celle des autres paramètres. Un nouveau modèle a été testé avec seulement deux paramètres en enlevant la sensibilité à l'effort de forge. Ce nouveau modèle permet d'obtenir la relation 15 la précision sur les paramètres et l'erreur quadratique moyenne associée sont données dans le tableau 5

$$F_x = V_a^{0,90} \cdot N^{-0,70} \quad (15)$$

	α	β		MSE
Incertitude	0,054	0,12		12,75%

Tableau 9 : Précision et erreur quadratique moyenne sur le modèle du couple

Le modèle statistique de l'effort d'avance donne une erreur quadratique moyenne supérieure à celle sur le couple tout en restant acceptable.

3.3.3 Modèle statistique sur l'effort transverse


Un premier modèle à quatre paramètres a permis de donner :

$$F_y = 13 \cdot V_a^{0,59} \cdot N^{0,37} \cdot F_z^{-0,02} \quad (16)$$

Le tableau ci-dessous donne la précision sur les paramètres de la loi et l'erreur quadratique moyenne.

	A	α	β	μ		MSE	Erreur Max
Incertitude	-1,3	1,58	2,85	-59,6		70,50%	162%

Tableau 10 : Précision et erreur quadratique moyenne sur le modèle du couple

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 30/52

Dans ce tableau, on peut remarquer que l'erreur quadratique moyenne est très importante. De même la précision sur les coefficients est élevée. La simplification de la loi par la suppression de la sensibilité à l'effort de forge et à la vitesse d'avance ne fera qu'augmenter l'erreur quadratique moyenne du modèle.

Les coefficients de la loi statistique ont été déterminés en considérant l'ensemble des essais expérimentaux moins ceux ayant conduit à un défaut d'effondrement. Une nouvelle identification a été menée en supprimant les essais ayant conduit à un défaut tunnel. On obtient une erreur quadratique moyenne légèrement plus faible que celle du précédent modèle. Cette légère amélioration n'est pas forcément attribuable à la meilleure précision du modèle. Elle peut être due au fait qu'on considère un nombre de points expérimentaux plus faible.

3.4 Conclusions

La modélisation statistique du couple de soudage et de l'effort d'avance par une loi puissance donne des résultats acceptables sur le domaine d'étude. Par contre, la modélisation de l'effort transverse pose plus de problème. Les erreurs quadratiques moyennes obtenues sont de l'ordre de 70% et la suppression des points expérimentaux correspondant à des soudures avec défaut n'apporte pas d'améliorations significatives.


Le problème rencontré avec l'effort transverse provient de l'irrégularité de son évolution au travers du domaine de soudage. Dans la partie suivante, un modèle simplifié du comportement mécanique outil/matière est présenté dans l'objectif de comprendre les raisons possibles du comportement de l'effort transverse avec les paramètres de conduite du procédé.

4 MODÉLISATION THERMOMÉCANIQUE SIMPLIFIÉE DE L'INTERACTION MÉCANIQUE OUTIL/MATIÈRE EN FSW

La modélisation proposée a pour objectif d'éclairer sur les principaux phénomènes à l'origine de l'évolution des composantes du torseur des efforts outil/matière en fonction des paramètres de soudage. L'objectif n'est pas de mettre en place un modèle multi physique prédictifs de l'amplitude des efforts outil/matière.

Le modèle s'appuie sur une géométrie simplifiée de la forme de l'outil. L'épaule est supposé plan et le pion cylindrique à base circulaire. L'axe de l'outil est maintenu perpendiculaire à la surface des pièces à souder.

Le schéma de la figure 12 présente les principaux éléments de la modélisation géométrique de l'outil

 COROUSSO	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 31/52

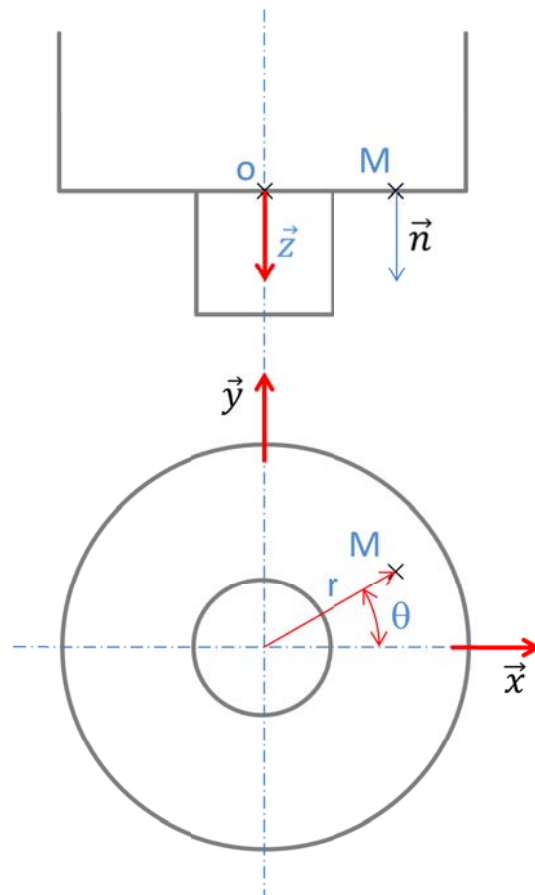


Figure 12 : Représentation simplifiée de la géométrie de l'outil de soudage FSW

4.1 Expression générale des composantes du torseur des interactions mécaniques outil/matière


4.1.1 Expression de la résultante et du couple de soudage

Soit S , la surface de l'outil en contact avec la matière. Les composantes du torseur des efforts entre l'outil et la matière sont données par les expressions ci-dessous :

$$(17)$$

$$(18)$$

Où \vec{R} est la résultante et M le moment en O du torseur des actions mécaniques exercées par la matière sur l'outil. σ est la contrainte en M et \vec{n} le vecteur normal au contact outil/matière en M dirigé vers la matière à souder.

	Projet COROUSSO Livable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 32/52

A partir de ces expressions et par simple projection, on obtient l'expression du couple de soudage, de l'effort de forge, de l'effort d'avance et de l'effort transverse :

$$C_z = \overrightarrow{M_O} \cdot \vec{z} \quad (19)$$

$$F_z = \vec{R} \cdot \vec{z}; F_x = \vec{R} \cdot \vec{x}; F_y = \vec{R} \cdot \vec{y} \quad (20), (21), (22)$$

4.1.2 Modélisation simplifiée de l'interaction mécanique outil/matière locale

Le torseur cinématique de l'outil par rapport à la pièce est déterminé par les deux paramètres de conduite que sont la vitesse d'avance et la vitesse de rotation.

$$\{\mathcal{C}^{outil/pièce}\} = \{\omega \vec{z}; V_a \vec{x}\}_O \quad (23)$$

La vitesse d'un point M, défini par coordonnées cylindriques (r , θ et z), appartenant à l'outil par rapport à la pièce vaut :

$$\vec{V}^M \in outil/pièce = (V_a - r\omega \sin \theta) \vec{x} + r\omega \cos \theta \vec{y} \quad (24)$$

Il ne s'agit pas ici de la vitesse de glissement de l'outil sur la matière mais de la vitesse relative d'un point de l'outil par rapport aux pièces à assembler. La vitesse de glissement fait intervenir le mouvement de la matière par écoulement plastique sous l'outil et ne peut être déduite directement des paramètres de conduite du procédé. Par la suite la vitesse relative du point M par rapport aux pièces est désignée par \vec{V}_M .

Pour relier la cinématique de l'outil aux efforts développés entre l'outil et la pièce, on va supposer que le vecteur contrainte à l'interface outil matière à la forme suivante :

$$\frac{d\vec{f}}{ds} = \sigma_n \vec{n} - \tau \frac{(\vec{V}_M - (\vec{V}_M \cdot \vec{n}) \vec{n})}{\|\vec{V}_M - (\vec{V}_M \cdot \vec{n}) \vec{n}\|} \quad (25)$$


La composante tangentielle du vecteur contrainte est portée par la vitesse relative entre l'outil et la pièce. Dans une certaine mesure cela revient à approcher la vitesse de glissement outil/matière par la vitesse relative outil/pièce. La cisson τ et la pression de contact vont dépendre des conditions tribologiques d'interface (température, vitesse de glissement, pression de contact, consistance des matériaux...).

4.2 Contribution de l'épaulement et de la surface latérale du pion

4.2.1 Contribution de l'épaulement

A l'interface entre l'épaulement et la matière la vitesse relative outil/matière et perpendiculaire à la normale au contact. La résultante des interactions mécaniques devient donc :

$$\overrightarrow{R_{épaulement}} = \int_{R_{pion}}^{R_{épaulement}} \int_0^{2\pi} \sigma_n r \cdot d\theta \cdot dr \vec{z} - \int_{R_{pion}}^{R_{épaulement}} \int_0^{2\pi} \tau \frac{(V_a - r\omega \sin \theta) \vec{x} + r\omega \cos \theta \vec{y}}{[(V_a - r\omega \sin \theta)^2 + (r\omega \cos \theta)^2]^{1/2}} r \cdot d\theta \cdot dr \quad (26)$$

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livraison n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 33/52

La contribution de l'épaulement à l'effort d'avance et à l'effort transverse devient :

$$F_{x,\text{épaulement}} = - \int_{R_{\text{pion}}}^{R_{\text{épaulement}}} \int_0^{2\pi} \tau \frac{(V_a - r\omega \sin \theta)}{[(V_a - r\omega \sin \theta)^2 + (r\omega \cos \theta)^2]^{1/2}} r \cdot d\theta \cdot dr \quad (27)$$

$$F_{y,\text{épaulement}} = - \int_{R_{\text{pion}}}^{R_{\text{épaulement}}} \int_0^{2\pi} \tau \frac{r\omega \cos \theta}{[(V_a - r\omega \sin \theta)^2 + (r\omega \cos \theta)^2]^{1/2}} r \cdot d\theta \cdot dr \quad (28)$$

Le couple de soudage autour de l'axe de l'outil est donné par l'équation suivante :

$$C_{z,\text{épaulement}} = - \int_{R_{\text{pion}}}^{R_{\text{épaulement}}} \int_0^{2\pi} \tau \frac{V_a \sin \theta - r\omega}{[(V_a - r\omega \sin \theta)^2 + (r\omega \cos \theta)^2]^{1/2}} r^2 d\theta \cdot dr \quad (29)$$

4.2.2 Contribution de la surface latérale du pion

A l'interface entre la partie latérale du pion et la matière, la partie tangentielle du vecteur contrainte est portée par \vec{e}_θ . Son sens est défini de façon à s'opposer à la vitesse relative entre l'outil et la pièce :

$$\frac{d\vec{f}}{ds} \cdot \vec{e}_\theta = -\tau \vec{V}_M \cdot \vec{e}_\theta \quad (30)$$

En introduisant l'expression de la vitesse relative sur la surface latérale du pion, on obtient :

$$\frac{d\vec{f}}{ds} \cdot \vec{e}_\theta = -\tau \text{sign} \left(1 - \frac{V_a}{R_{\text{pion}}\omega} \sin \theta \right) \quad (31)$$

En soudage FSW, la géométrie d'outil est les paramètres de conduite sont tels que le rapport $\frac{V_a}{R_{\text{pion}}\omega}$ est toujours plus petit que 1. On a donc :

$$\frac{d\vec{f}}{ds} \cdot \vec{e}_\theta = -\tau \quad (32)$$

En introduisant cette relation dans l'expression des composantes d'effort de soudage et transverse, il vient :


$$\vec{R}_{\text{pion}} = \int_0^{L_{\text{pion}}} \int_0^{2\pi} \sigma_n R_{\text{pion}} \cdot d\theta \cdot dz \vec{e}_r - \int_0^{L_{\text{pion}}} \int_0^{2\pi} \tau (-\sin \theta \vec{x} + \cos \theta \vec{y}) R_{\text{pion}} \cdot d\theta \cdot dz \quad (33)$$

La contribution de la surface latérale du pion sur l'effort d'avance et transverse devient donc :

$$F_{x,\text{pion}} = \int_0^{L_{\text{pion}}} \int_0^{2\pi} \sigma_n R_{\text{pion}} \cos \theta \cdot d\theta \cdot dz + \int_0^{L_{\text{pion}}} \int_0^{2\pi} \tau \sin \theta R_{\text{pion}} \cdot d\theta \cdot dz \quad (34)$$

$$F_{y,\text{pion}} = \int_0^{L_{\text{pion}}} \int_0^{2\pi} \sigma_n R_{\text{pion}} \sin \theta \cdot d\theta \cdot dz - \int_0^{L_{\text{pion}}} \int_0^{2\pi} \tau \cos \theta R_{\text{pion}} \cdot d\theta \cdot dz \quad (35)$$

La contribution du pion au couple de soudage est donnée par :

	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 34/52

$$C_{z,pion} = -R_{pion}^2 \int_0^{L_{pion}} \int_0^{2\pi} \tau \, d\theta \, dz \quad (36)$$

4.3 Interprétation

Dans le cas d'une pression de contact σ_n et d'une scission de frottement τ uniforme, on remarque que la contribution de l'épaulement et du pion à l'effort transverse est nulle. L'amplitude de l'effort d'avance ne dépend que du rapport ω/V_a .

La composante d'effort transverse provient probablement de la non-uniformité de la contrainte tangentielle de frottement autour de l'outil (épaulement + pion) et de la non-uniformité de la pression de contact autour du pion.

Sur l'épaulement, de façon générale, la contrainte tangentielle peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\tau = \tau(r, \theta) \quad (37)$$

Pour qu'apparaisse une composante transverse de l'effort, il est nécessaire que la répartition de contrainte tangentielle soit non symétrique par rapport à l'axe (O, \vec{y}) . Plus exactement, une condition suffisante pour que la contribution de l'épaulement à l'effort transverse soit nulle est que :

$$\tau(r, \pi - \theta) = -\tau(r, \theta) \quad (38)$$


L'épaulement est soumis à un effort transverse lorsque la contrainte tangentielle à l'avant du pion diffère de celle à l'arrière du pion.

La contribution du pion à l'effort transverse est nulle si la distribution de la pression de contact admet une symétrie d'axe (O, \vec{x}) et la contrainte tangentielle une symétrie d'axe (O, \vec{y}) .

Les conditions mises en évidence ici sont suffisantes mais ne sont pas nécessaires pour obtenir un effort transverse nul.

4.3.1 Sources de non uniformité de la contrainte autour de l'outil de soudage.

Le champ de température autour de l'outil n'est pas uniforme. Des simulations obtenues par calcul par éléments finis [Zhang] tendent à montrer que la température à l'arrière du pion est plus forte qu'à l'avant du pion (figure 13a.). Ce phénomène est dû en grande partie aux phénomènes de transport, à l'arrière de l'outil s'accumule la matière ayant été échauffée par friction et malaxée. L'avant de l'épaulement rencontre de la matière ayant seulement été préchauffée par conduction.

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 35/52

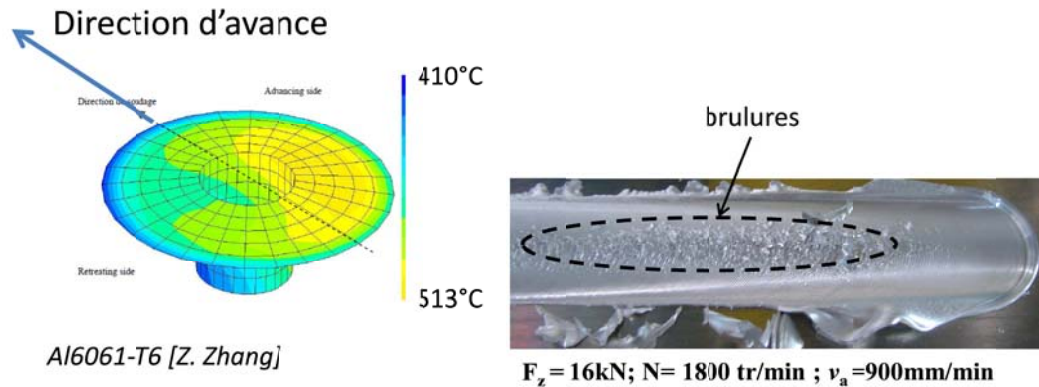


Figure 13 : a. Distribution de température autour de l'outil [Z. Zhang], b. photographie d'un cordon présentant le défaut de brulure [Zimmer09]

La contrainte d'écoulement et la contrainte tangentielle de frottement décroissant avec la température, ceci est à l'origine d'un déséquilibre mécanique entre l'avant et l'arrière de l'outil à l'origine d'une composante d'effort transverse.

Lorsque la vitesse de rotation et l'effort de forge sont élevés et que la vitesse d'avance est faible, peuvent apparaître des brulures en surface de cordon. Ceci, à l'instar des procédés de mise en forme, correspond à une entrée dans le domaine semi-solide du matériau. La densité superficielle de puissance dissipée par frottement au contact épaulement pièce peut être estimée à partir de l'équation 39 :

(39)

La vitesse V_M étant maximale en périphérie d'épaulement et d'amplitude principalement fonction de la vitesse de rotation, on constate donc une forte densité de chaleur dissipée produite en périphérie d'épaulement. Cette densité de chaleur appliquée à l'arrière de l'épaulement où la matière est chaude provoque l'entrée dans le domaine semi-solide du matériau. Dans cet état, la viscosité du matériau acquiert une forte sensibilité à la température et surtout à la vitesse de cisaillement. Plus exactement, la viscosité du matériau chute rapidement avec l'augmentation de la température et de la vitesse de cisaillement. A l'arrière de l'épaulement apparaît donc une zone « semi-solide » où la contrainte tangentielle de frottement est beaucoup plus faible qu'à l'avant du pion. Ceci expliquerait un fort accroissement de la valeur de l'effort transverse pour les soudures présentant des brulures.

La courbe de la figure 14 donne la valeur de l'effort transverse moyen pour différentes valeurs du rapport vitesse de rotation sur vitesse d'avance. Ces points ont été obtenus lors de la phase de recherche des domaines de variation de chaque paramètre pour construire le plan d'expériences. Sur cette figure, les points bleus ont été obtenus à vitesse de rotation constante et les points rouges à vitesse d'avance constante. Les triangles et carrés vides à gauche du graphe correspondent aux essais présentant un défaut tunnel. Les triangles et carrés vides de droite correspondent aux essais présentant un excès de pénétration.

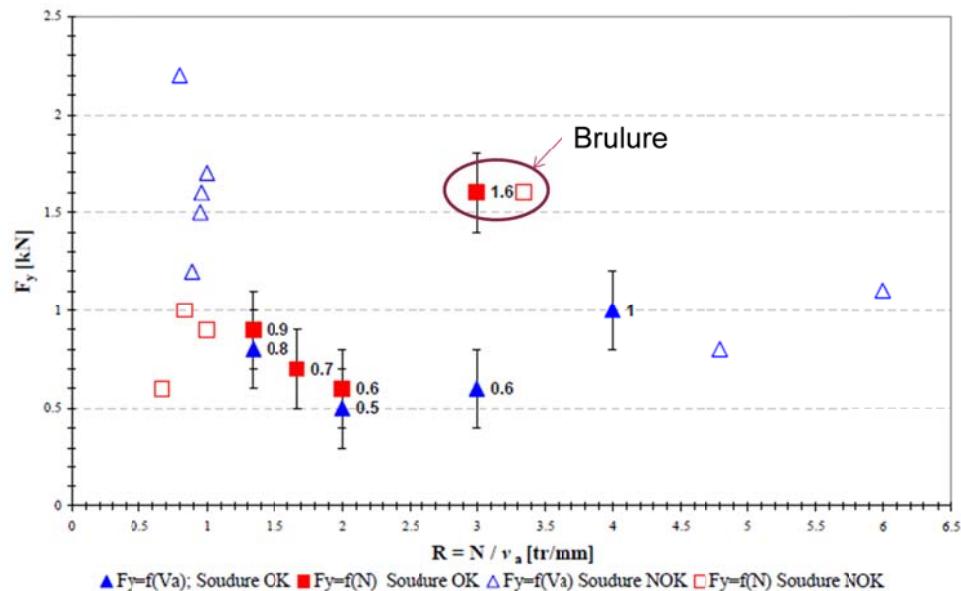



Figure 14 : Valeur moyenne de l'effort transverse pour différentes valeurs de la vitesse de rotation et de la vitesse d'avance

La figure 14 met en évidence une « rupture » dans l'évolution de l'effort transverse lorsqu'apparaît le défaut de brulure. Ce défaut pourrait donc être à l'origine, pour une part, de l'irrégularité de l'évolution de cette composante d'effort rendant très difficile sa modélisation par des lois statistiques.

Autour du pion, on note pour les faibles valeurs de vitesse de rotation et les grandes valeurs de vitesse d'avance l'apparition d'un défaut tunnel. Celui-ci apparaît sous la forme d'une cavité du côté avance de la soudure. Si on considère la pression de contact autour du pion, on se rend compte que la pression au niveau de la cavité est nulle. Il y a donc un déséquilibre des pressions autour du pion entre le côté avance et le côté recul. Ceci, selon la première partie de l'équation 35, contribue à augmenter la valeur de la composante transverse des efforts. Ceci peut expliquer que les valeurs d'effort transverse pour les triangles et rectangles vides de gauche de la figure 14 soient plus élevées que celles dans le domaine de fonctionnement.

Pour comprendre l'évolution des composantes d'effort en fonction des paramètres de conduite du procédé, il est nécessaire de considérer l'hétérogénéité de la scission de frottement et de la pression de contact autour de l'outil. Par exemple, la diminution du couple avec la vitesse de rotation peut s'expliquer par des considérations générales comme l'accroissement de la température du matériau associée à une chute de sa contrainte d'écoulement. Le souci est qu'avec la vitesse de rotation, augmente également la vitesse de déformation du matériau. Ces deux phénomènes (augmentation de la température et de la vitesse de déformation) ont des effets antagonistes sur la scission de frottement. En filage à chaud par exemple,

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livraison n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 37/52

l'augmentation de la vitesse de mise en forme, même si elle est associée à une augmentation de la température de pièce, nécessite un plus gros effort. L'échauffement ne suffit pas à compenser l'effet de l'augmentation de la vitesse de déformation (viscosité).

L'évolution des composantes d'effort et notamment du couple peut être expliquée en considérant l'entrée dans le domaine semi-solide de la zone en périphérie de l'épaule située à l'arrière du pion. La progression de cette zone et la chute de viscosité associée à l'augmentation de la vitesse de rotation pourrait contribuer également à la chute de couple.


De façon plus générale, les phénomènes thermomécaniques et tribologiques complexes à l'origine de l'hétérogénéité autour de l'outil du frottement et de la pression de contact vont contribuer à l'évolution des efforts d'avance, transverse et au couple de soudage. La complexité de ces phénomènes, leur apparente instabilité ou la faible maîtrise des conditions de leur apparition sont probablement à l'origine des irrégularités de leur évolution.

5 CONCLUSION

Pour concevoir la commande d'un robot polyarticulé soudeur FSW, pour anticiper ces déformations pour permettre un suivi de trajectoire correct, il est nécessaire de modéliser l'évolution des composantes de torseur des actions mécaniques outil matière en fonction des paramètres de conduite du procédé. Ces derniers sont la vitesse d'avance et la vitesse de rotation de l'outil, l'effort de forge et deux angles fixant l'orientation de l'axe de l'outil par rapport aux pièces à assembler. Les éléments de réduction du torseur des interactions mécaniques outil/matière au niveau de l'outil se réduisent au couple de soudage (moment autour de l'axe de l'outil), un effort d'avance, un effort transverse et un effort axial qui dans le cas du FSW est un paramètre opératoire.


La mise en place du modèle est basée sur des résultats de l'étude expérimentale de la thèse de Sandra Zimmer concernant le soudage bout-à-bout de deux tôles en alliage d'aluminium 6082T651 de 6mm d'épaisseur. Le modèle mis en place ne concerne ici que les trois principaux paramètres opératoires que sont la vitesse d'avance et de rotation et l'effort de forge. L'évolution des composantes du torseur des interactions mécaniques outil/matière en fonction de l'orientation de l'outil a fait l'objet d'une étude à part.

Compte tenu de la complexité des phénomènes physiques mis en jeu au cours du procédé, l'évolution des efforts et couples de soudage ont été modélisés par des lois statistiques établies sur la base des valeurs moyennes expérimentales. Ces résultats ne tiennent pas compte des dispersions importantes sur les grandeurs mesurées du fait d'oscillations et de dérives.

 ANR <i>COROUSSO</i>	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 38/52


Le modèle statistique mis en place pour l'évolution du couple et l'effort d'avance donne des résultats satisfaisants. Par contre, la modélisation de l'effort transverse n'est pas satisfaisant. Les erreurs quadratiques moyennes des modèles sont de l'ordre de 70%.

La difficulté rencontrée pour la modélisation de l'effort transverse provient sans doute de l'irrégularité de son évolution en fonction des paramètres opératoires. Notamment, il apparaît que cette composante d'effort est très sensible aux hétérogénéités thermomécaniques (frottement, pression de contact) autour de l'outil. La non maîtrise de ces paramètres, leur sensibilité à des paramètres soit non identifiés soit non maîtrisables, rend difficile l'estimation de la composante transverse de l'effort.


 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 39/52

Bibliographie


- [1] M.F. Zaeh, D. Eireiner, L. Papadakis, « Friction Stir Welding with modern milling machines. Requirements, approach and application », 2004, 5th International FSW Symposium, Metz, France
- [2] S. Sheiki, « Herstellung und Bewertung der Umformbarkeit von reibrührgeschweissten Tailored Blanks aus Aluminiumlegierungen » Thèse de doctorat de l'Université de Duisbourg-Essen, 2005
- [3] S. Zimmer, L. Langlois, J. Laye, R. Bigot, « Experimental investigation of the influence of the FSW plunge processing parameters on the maximum generated force and torque », 2010, Int J Adv Manuf Technol 47 (1-4) pp. 201-215
- [4] A. Gerlich, P. Su, T.H. North, « tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloys », 2005, J. Mat Sci 40:6473-6481
- [5] S. Mandal, J. Rice, A.A. Elmustafa, "Charactérisation of the influence of FSW tool geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool", 2008, Journal of Material Processing Technology 203 (1-3), pp 411-419
- [6] A. Simar, « A multiscale multiphysics investigation of aluminium friction stir welds from thermal modelling to mechanical properties through precipitation evolution and hardening », 2006, thèse de doctorat de l'Université Catholique de Louvain
- [7] H. Balasubramanian, B. Gattu, R.S. Mishra, "process forces during friction stir welding of aluminium alloys", 2009, Science and Technology of Welding and Joining, Vol14-2 pp141-145
- [8] S. Muthukumaran, S.K. Mukherjee, "Multi-layered metal flow and formation of onion rings in friction stir welds, 2008, Int J Adv Manuf Technol 38:68-73
- [9] R. Johnson, "Forces in Friction stir welding of aluminium alloy", 2001, 3rd International FSW Symposium, Japan
- [10] M.J. Peel, A. Steuwer, P.J. Withers, T. Dickerson, Q. Shi, H. Shercliff, "dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082. Part I: Process Parameter Effects on Thermal History and Weld Properties", Metallurgical and Material transaction, Volume 37 A 2183
- [11] A. Arora, R. Nandan, A.P. Reynolds, T. Debroy, "Torque, power requirement and stir zone geometry in friction stir welding through modeling and experiments", 2009, Scripta Materialia 60 pp13-16
- [12] T. Jene, G. Dobmann, G. Wagner, D. Eifler, "Monstir-Monitoring of the friction stir welding process", 2008, 7th International FSW symposium, Japan

	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 40/52

- [13] X. Zhao, “Empirical Dynamic Modeling and nonlinear force control of friction stir welding”, 2007, Thèse de l’Université du Missouri-Rolla

	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 41/52

Annexes

 ANR <i>COROUSSO</i>	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 42/52

Annexe 1 : Evolution des paramètres de conduite du FSW au cours de la transition entre la phase d'attente et la phase de soudage

PARAGRAPHE ANNEXE 1

Ci-dessous sont présentées trois figures illustrant trois types d'évolution possible au cours de la transition entre la phase d'attente et la phase de soudage. Pour les trois essais, les paramètres de la phase de pénétration et de la phase d'attente sont identiques.

Dans le tableau Annexe1_1 sont donnés les paramètres opératoires de la phase de soudage :

	N (Tr/min)	Va (mm/min)	Fz (kN)
Essai 1	800	900	16
Essai 2	1800	300	10
Essai 3	1300	900	21,5

Tableau Annexe1_1

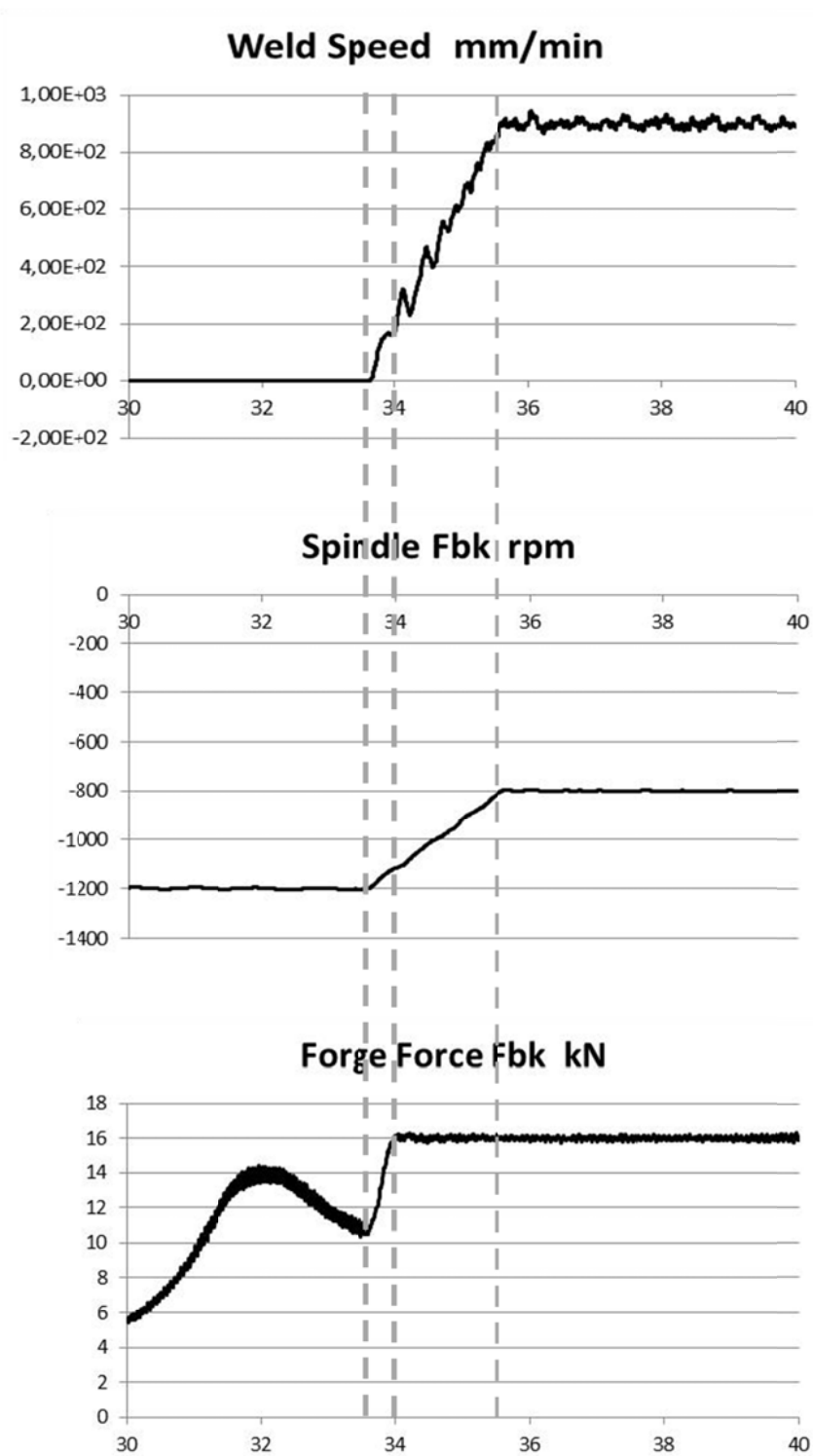
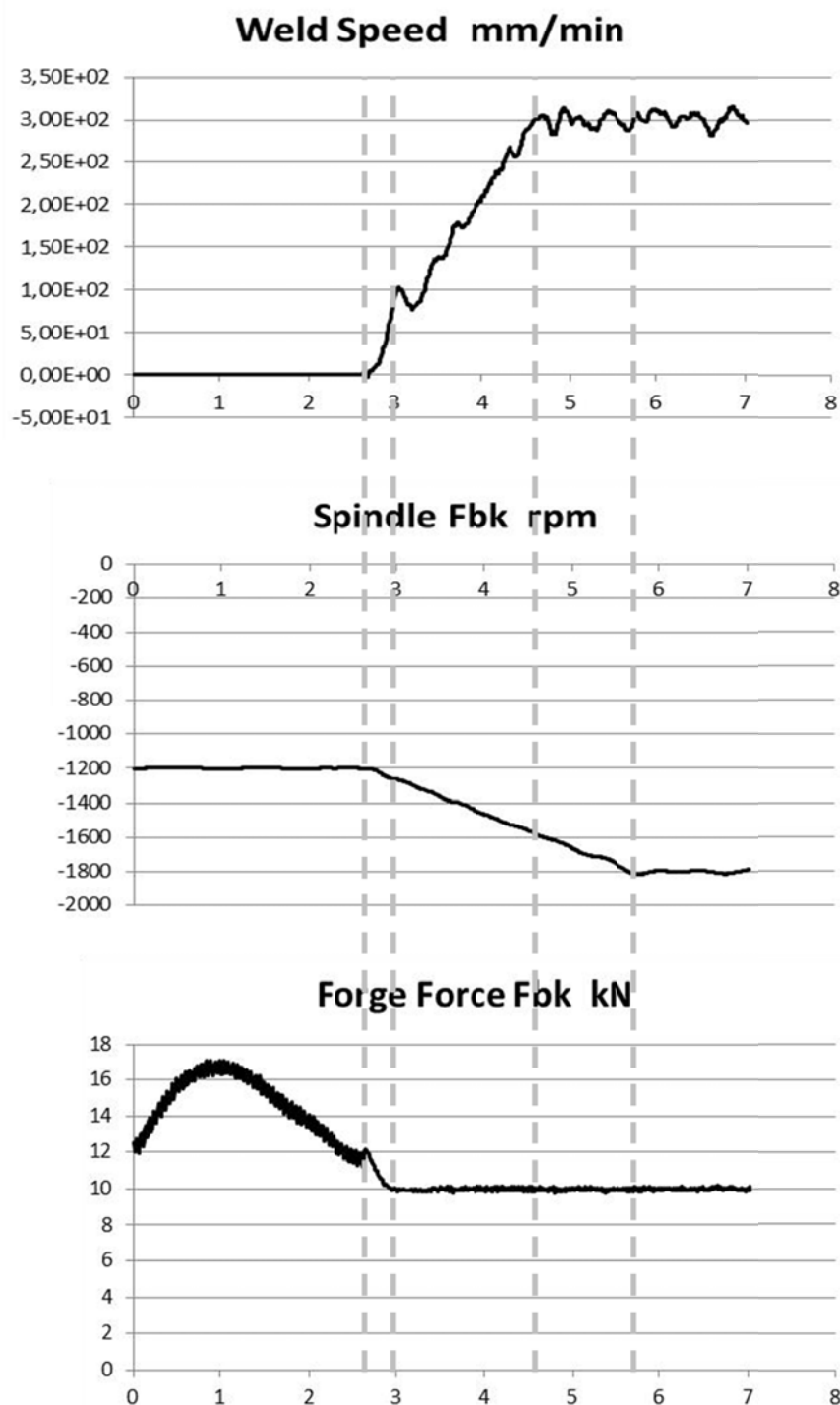
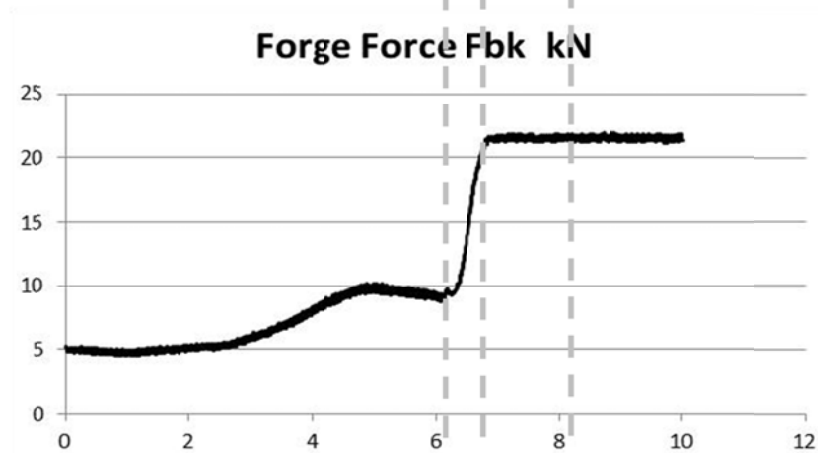
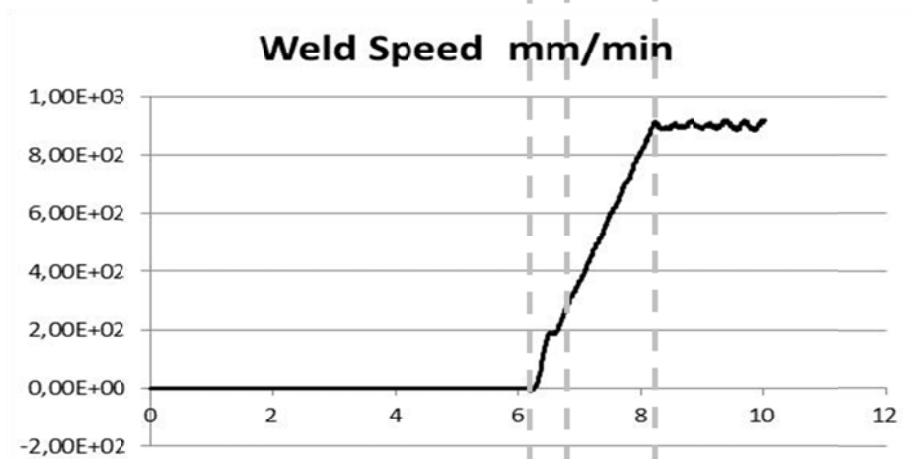
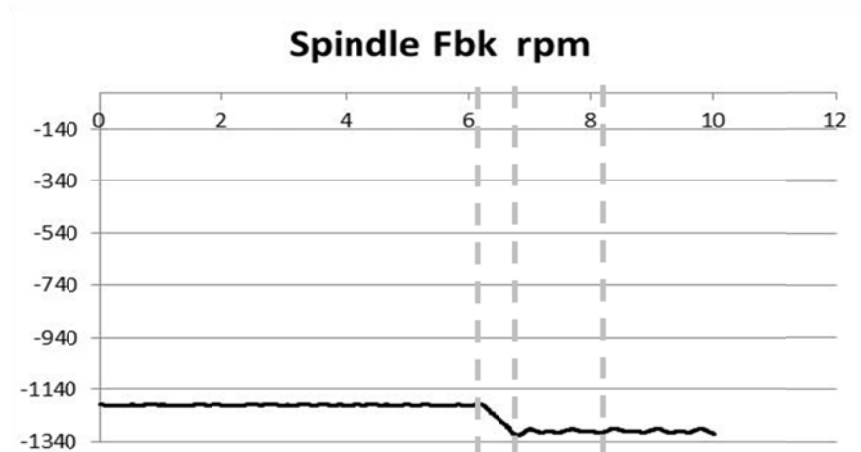




Figure annexe1 _ 1 :





	<p>Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW</p>	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 47/52

	Projet COROUSSO Livrable n°2.1 Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 48/52

Annexe 2 : Evolution des efforts d'avance et transverse, de la pénétration et du couple de soudage au cours de la phase de soudage

PARAGRAPHE ANNEXE 2

Ci-dessous sont présentées trois figures illustrant l'évolution des efforts d'avance et transverse, de la pénétration et du couple de soudage en fonction du temps pour trois jeux de paramètres différents. Dans le tableau Annexe2_1 sont présentés les jeux de paramètres considérés :

	N (Tr/min)	Va (mm/min)	Fz (kN)
Essai 1	1200	600	6
Essai 2	1200	600	14
Essai 3	1200	230	10,8

Tableau Annexe 2_1

Il est à noter que l'essai 1 a conduit à un défaut tunnel, l'effort de forge étant insuffisant pour assurer la compacité de la soudure.

Les trois essais illustrent la grande variation de l'effort d'avance constatée sur l'ensemble des campagnes expérimentales. Hormis certains essais, il ne semble pas exister de zone de stabilisation de cet effort. Les fluctuations de l'effort transverse semblent de moindre amplitude.

Sur l'essai 1, il apparaît une certaine similitude entre l'évolution de la pénétration et celle du couple. Une augmentation de la pénétration étant associée à une augmentation du couple de soudage. L'énergie de soudage déterminant l'énergie de soudage, une augmentation de celui-ci correspond à une soudure plus chaude ce qui expliquerait que pour un effort de forge constant la pénétration augmente.

Il est à noter sur cet essai le pic de couple apparaissant à 71s. A ce pic est associé un pic en pénétration ainsi qu'une chute rapide en effort transverse. Le lien entre la pénétration et le couple a déjà été discuté. Il est plus difficile d'expliquer le lien avec l'effort transverse.

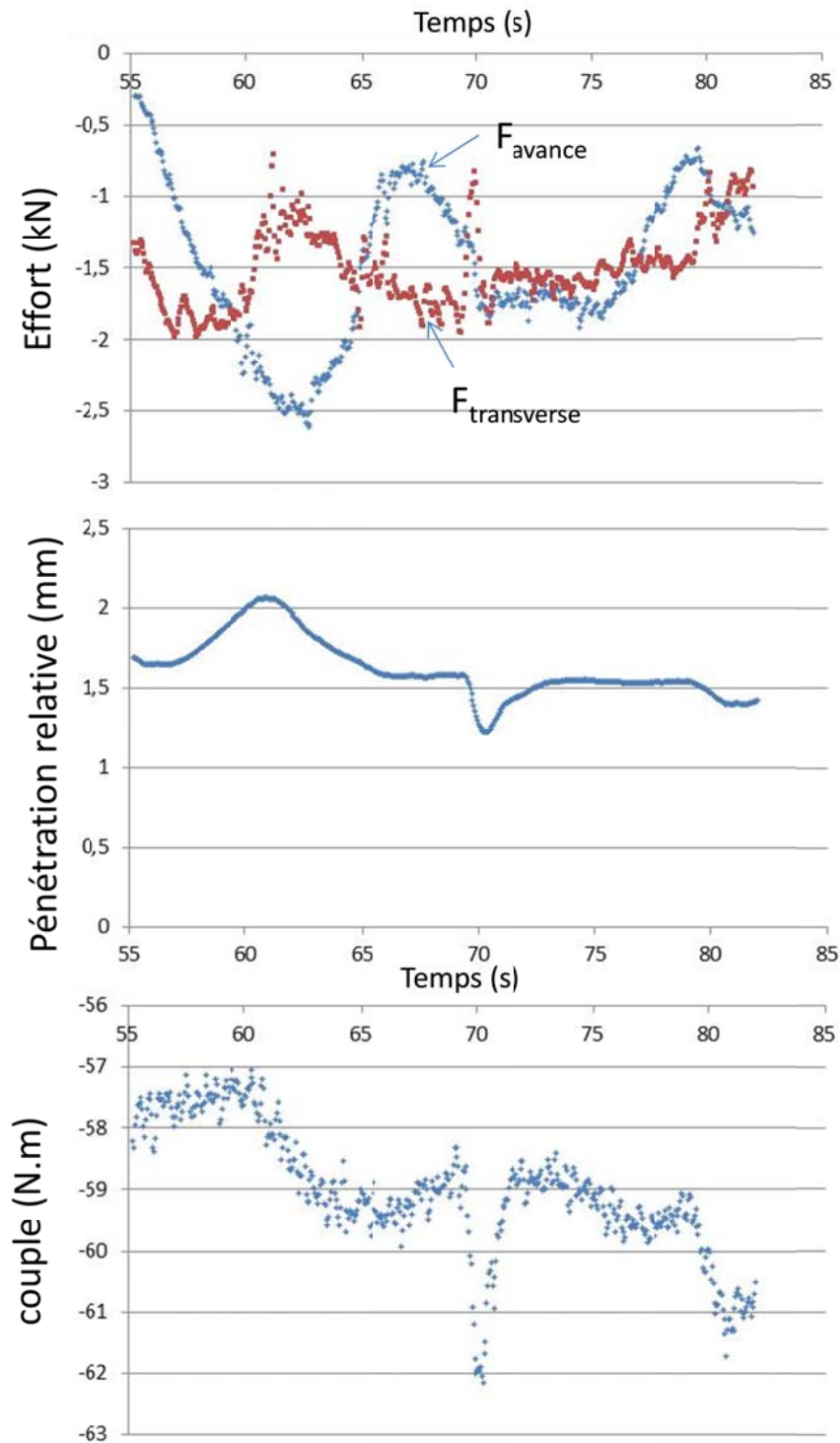


Figure annexe2_1 : Evolution des efforts transverses, de la pénétration et du couple lors de la phase de soudage ($F_z=6\text{kN}$, $N=1200\text{ tr/min}$, $V_a=600\text{mm/min}$)

<p>AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE</p> <p>ANR</p> <p><i>COROUSSO</i></p>	<p>Projet COROUSSO</p> <p>Livrable n°2.1</p> <p>Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW</p>	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 51/52

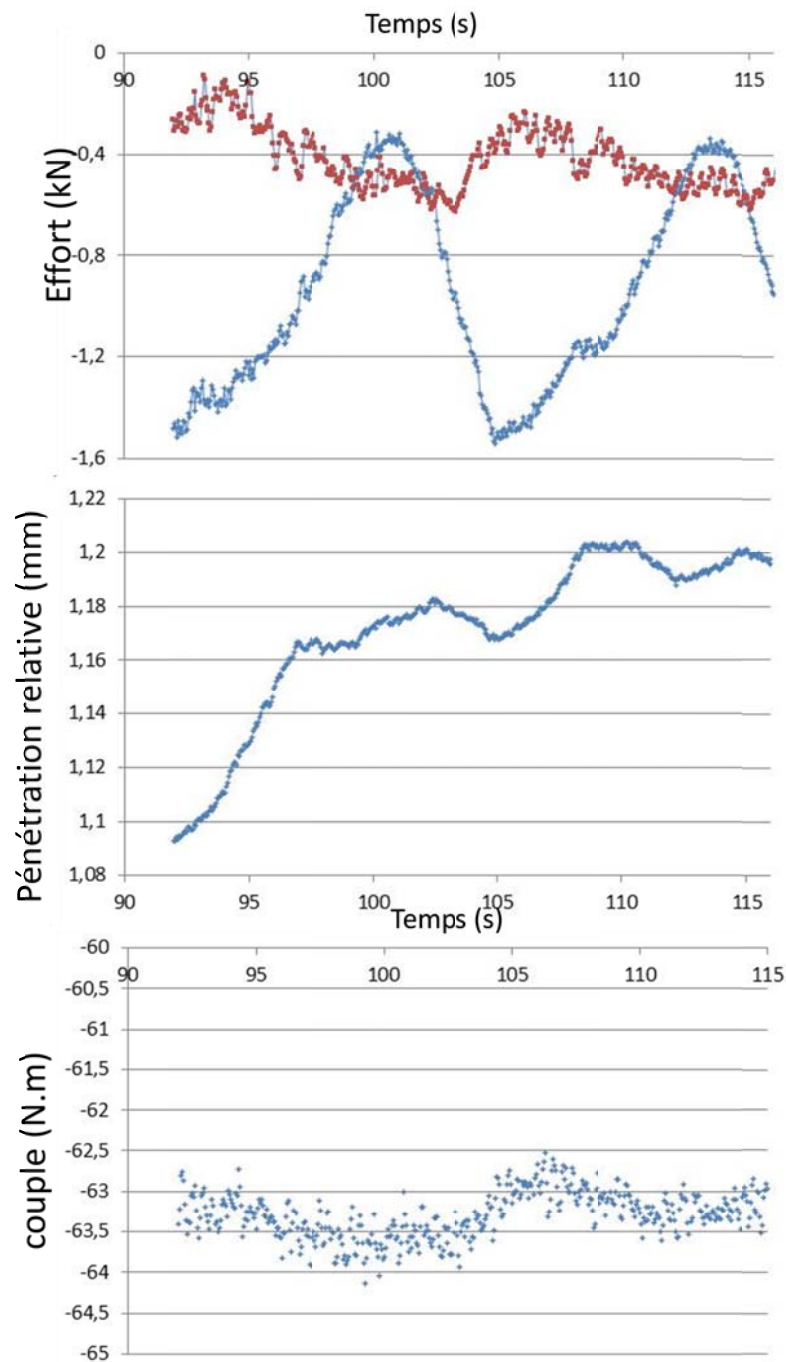


Figure annexe2_2 : Evolution des efforts transverses, de la pénétration et du couple lors de la phase de soudage ($F_z=14\text{kN}$, $N=1200\text{ tr/min}$, $V_a=600\text{mm/min}$)

<p>AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE</p> <p>ANR</p> <p>COROUSSO</p>	<p>Projet COROUSSO</p> <p>Livrable n°2.1</p> <p>Modélisation des interactions mécaniques outil/matière en FSW</p>	ANR-10-SEGI-003-LI2.1
		29/03/2012
		indice B
		Page 52/52

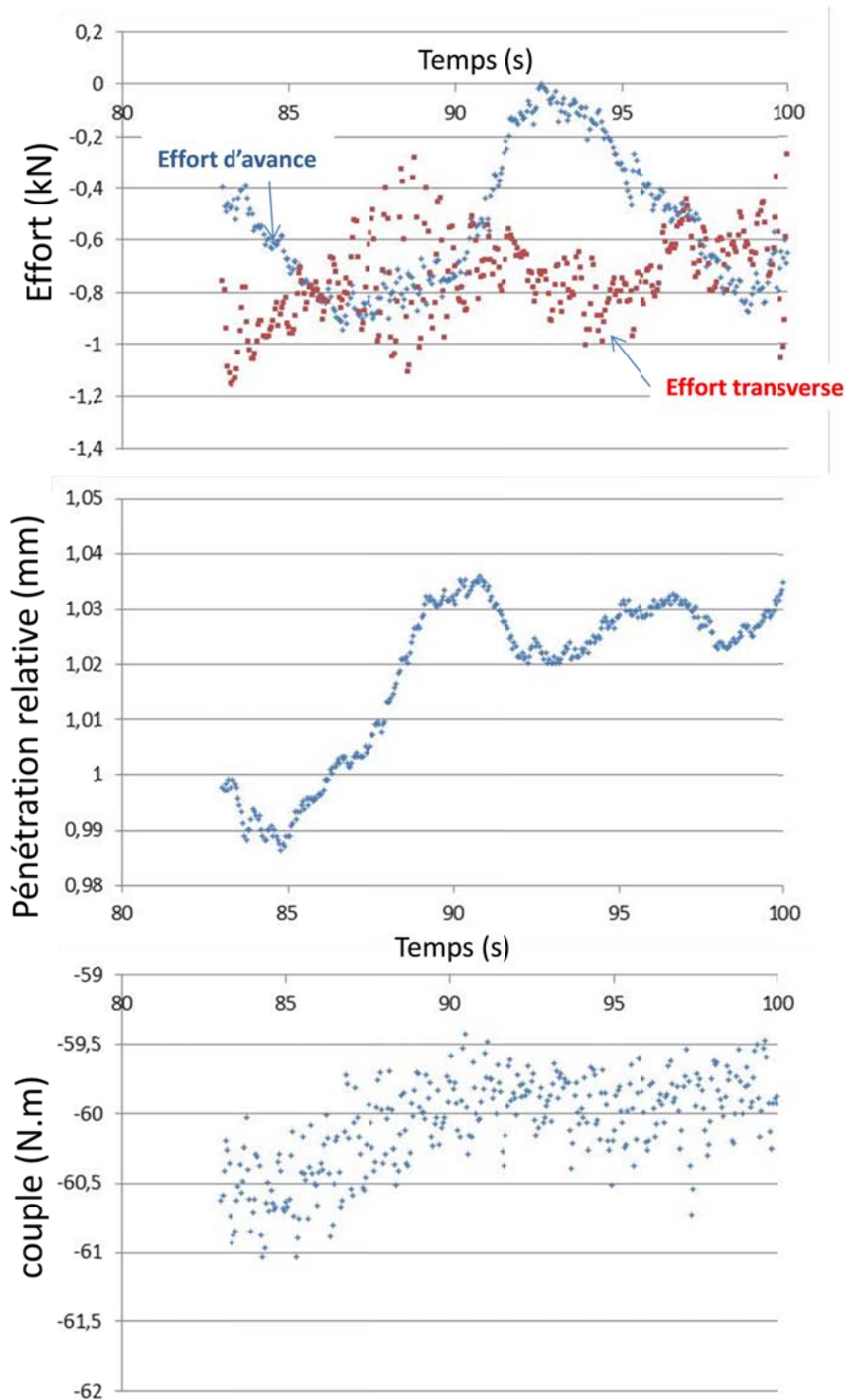


Figure annexe2_2 : Evolution des efforts transverse, de la pénétration et du couple lors de la phase de soudage ($F_z=14\text{kN}$, $N=1200\text{ tr/min}$, $V_a=600\text{mm/min}$)