



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/10985/9094>

To cite this version :

Nejah JEMAL, Amarilys BEN ATTAR, Sandra ZIMMER-CHEVRET, Laurent LANGLOIS -
Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé - 2014

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



 COROUSSO	Projet COROUSSO Livraison n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page de garde

Projet COROUSSO

Tâche 2 : Modélisation du procédé FSW

Livraison 2.4 :

Influence de la géométrie de l'outil sur la
robustesse du FSW robotisé

Projet ANR-2010-SEGI-003-COROUSSO

Partenaires :



	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 2/80

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

Liste de diffusion		
Nom	Organisme	Fonction
	ANR	
	HAL	

(Logigramme workflow)

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

    	Auteurs : N.J., A.BA., L.L., S.C.
--	---

 AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 3/80

SOMMAIRE

1	Introduction.....	5
2	Présentation de l'outil FSW	5
2.1	Épaulement.....	6
2.1.1	Variante technologique de l'épaulement : double épaulement	8
2.2	Le Pion	9
2.2.1	Variante technologique du pion	10
2.3	Corps de l'outil.....	11
2.4	Matériaux de l'outil FSW	11
3	Présentation des essais	12
3.1	Matériau à souder	12
3.2	Montage de bridage	12
3.3	Définition des géométries utilisées pour l'outil FSW	13
3.4	Critères de comparaison	14
3.5	Campagnes expérimentales	15
3.6	Choix et définition des outils de l'étude.....	15
4	Etude de la géométrie des outils FSW	18
4.1	Effet sur le domaine de soudabilité	18
4.1.1	Définition d'un point de fonctionnement.....	18
4.1.2	Définition du domaine de soudabilité (DSO)	19
4.1.3	Etude du domaine de soudabilité	20
4.1.2.1.	Outil COROUSSO avec pion de base 7 mm : COR-12-BO7	30
5	Effet de la géométrie de l'outil sur les actions mécaniques.....	38
5.1	Effet sur les actions mécaniques en phase de pénétration.....	38
5.1.1	Analyse de l'effort Fz_outil	39
5.1.2	Analyse du couple Cz-outil.....	40
5.2	Effet de la géométrie sur les actions mécaniques en phase de soudage	41
5.2.1	Variation des éléments géométriques sur le pion.....	41
5.2.2	Variation des dimensions de l'outil	44
5.2.3	Variation de la géométrie du pion.....	46
6	Comparaison des outils FSW d'un point de vue rendement énergétique et malaxage	50
6.1	Effet de la géométrie de l'outil sur l'écoulement	50
6.1.1	Comparaison de la morphologie des cordons FSW	50
6.1.2	Comparaison des indicateurs d'écoulement autour du pion	52
6.2	Effet de la géométrie sur la température de soudage.....	55
6.2.1	Introduction.....	55
6.2.2	Comparaison de l'énergie développée au cours du soudage.....	55
7	Conclusion	56

 AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR <i>COROUSSO</i>	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 4/80

Bibliographie	58
Annexes	59
Annexe 1 : Variation des dimensions de l'outil FSW	61
1. Effet sur Fx	62
2. Effet sur Fy	63
3. Effet sur Cz	65
Annexe 2 : Variation de la géométrie du pion	67
1. Effet sur Fx_outil	68
2. Effet sur Fy_outil	69
3. Effet sur Cz_outil	71
Annexe 3 : Variation des éléments géométriques sur le pion	73
1. Effet sur Fx_outil	74
2. Effet sur Fy_outil	75
3. Effet sur Cz_outil	77
Annexe 4 : Machine MTS I-STIR 10	79

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 5/80

1 INTRODUCTION

En soudage par friction malaxage (FSW), l'outil est l'acteur principal de l'opération de soudage. Dans sa configuration conventionnelle, l'outil FSW n'est pas consommable. Sa partie active constituée principalement d'un épaulement et d'un pion permet le malaxage de la matière autour de son axe de rotation.

L'interaction outil/matière provenant du malaxage expose l'outil à différents modes d'usure. Plusieurs dégradations peuvent être identifiées sur un outil FSW.

En effet, l'outil FSW peut se dégrader par plusieurs facteurs ce qui peut avoir un impact indésirable sur la qualité du cordon. Les facteurs de dégradation sont accentués à haute température. Ces dégradations sont liées aux frottements outil/matière qui ne sont pas encore bien maîtrisées.

En FSW, la morphologie globale du cordon et de ses différentes zones (noyau, ZATM, ZAT) présente un facteur primordial sur sa qualité mécanique. Cette morphologie est directement liée à la géométrie de l'outil.

En effet, L'interaction outil/matière évolue selon la géométrie de l'outil FSW donc de ses surfaces actives.

Dans cette étude, on s'intéresse à étudier l'influence de la géométrie de l'outil et de sa dispersion sur la qualité du cordon ainsi que sur les efforts engendrés au cours du soudage.

Cette étude permettra aussi de construire des domaines de soudabilités et de les localiser en fonction des différents outils testés.

Cette étude est considérée comme une première étape pour construire une aide à la décision pour la conception des outils FSW. Un choix optimisé de la géométrie de l'outil assurera l'obtention d'une qualité acceptable du cordon avec une durée de vie de l'outil correcte et des efforts admissibles par les moyens de soudage.

Cette étude analyse les actions mécaniques engendrées par les différents outils utilisés au cours de la phase de pénétration et de la phase de soudage.

A partir de l'étude du domaine de soudabilité des différentes géométries, on identifie la robustesse de ces géométries d'outil vis-à-vis les variations des conditions de soudage donc des paramètres opératoires.

2 PRESENTATION DE L'OUTIL FSW

Un outil FSW conventionnel présente deux parties principales un épaulement et un pion. Ces deux entités sont généralement coaxiales. Les éléments surfaciques de chaque partie constituent les zones d'interaction outil/matière.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 6/80

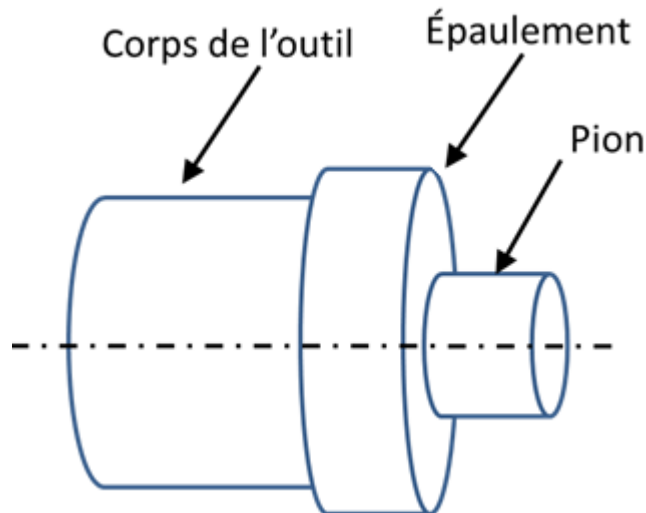


Figure 1. Schématisation d'un outil FSW.

L'épaulement et le pion peuvent présenter plusieurs formes en fonction qu'ils présentent différents profils tels que des rainures, des filets, des gorges, etc. . L'outil FSW a fait l'objet de plusieurs améliorations principalement sur deux axes. Le premier est l'aspect géométrique afin d'avoir un meilleur écoulement de la matière. Le deuxième est au niveau matériau pour élargir la fenêtre d'application du FSW et assurer sa tenue mécanique dans les conditions sévères de soudage. Un traitement thermique améliore la dureté de l'outil et prolonge sa durée de vie.

2.1 Épaulement

L'épaulement de l'outil FSW a deux principaux rôles en soudage par friction malaxage.

Le premier est celui de confiner la matière autour du pion. En effet, il permet de forger la matière en la bloquant au-dessous de l'outil. L'effort de forgeage au cours de la phase de soudage se traduit par une pression exercée principalement par l'épaulement sur la matière.

La pénétration de l'épaulement (ou indentation de l'épaulement) dans la matière doit être minimale pour ne pas amincir les pièces à souder. Cette pénétration visualisée en surface permet le malaxage de la matière en surface des pièces à souder désigné par le nom *flow arm*.

Généralement, le contact l'épaulement/matière indique la fin de la phase de pénétration. En effet, cette dernière est achevée lorsque l'épaulement vient accoster sur la surface supérieure des pièces à souder.

Le deuxième rôle de l'épaulement est de fournir un apport de chaleur important par l'effet du frottement dynamique. Le flux de chaleur fourni par frottement aux pièces à souder dépend du diamètre de l'épaulement. L'augmentation du diamètre de l'épaulement assure un apport de chaleur plus important et peut ainsi modifier la morphologie du cordon. L'équation présentée dans les travaux de H. Schmidt [2] met en évidence la relation de l'apport de chaleur avec le rayon de l'épaulement.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 7/80

—

Afin d'améliorer les rôles de l'épaulement décrits précédemment, plusieurs formes ont été ajoutées sur ce dernier. La forme la plus couramment utilisée est le *scroll* vu sa capacité à engager la matière à l'avant de l'outil pour être malaxer et ainsi diminuer la présence du flash. En effet, le scroll permet de réaliser des soudures sans angle de soudage (*tilt*). Toutefois, le choix des formes reste très dépendant de la configuration de soudage. Par exemple, il est déconseillé d'utiliser le scroll pour souder deux pièces d'épaisseur différente. Dans ce cas de figure, le scroll intensifie le flash.

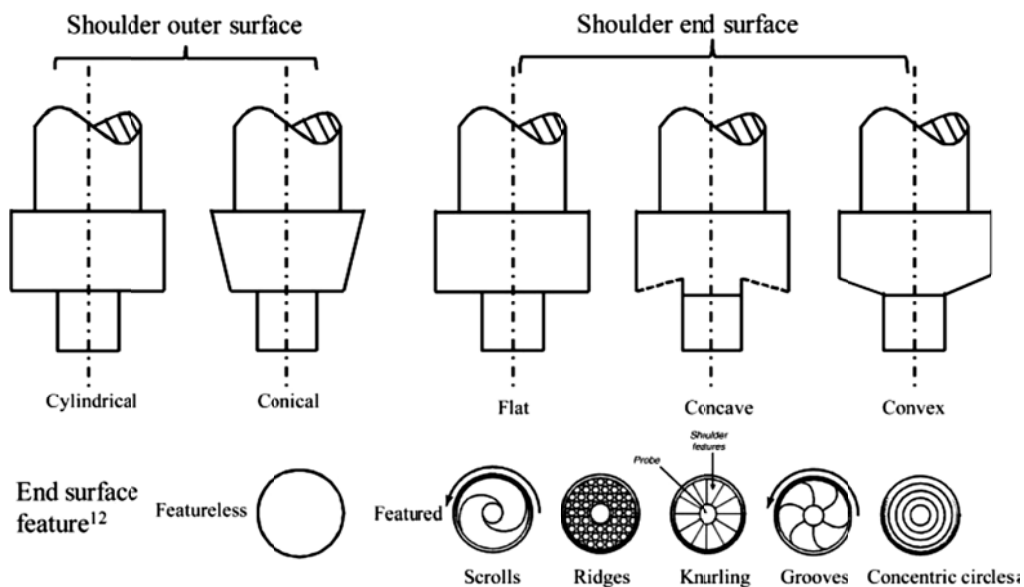


Figure 2. Différentes géométries et formes utilisées pour l'épaulement d'un outil FSW [1]

Les premiers essais avec une géométrie convexe de l'épaulement n'était pas concluant [4]. En effet, cette géométrie ne permet pas de retenir la matière refoulée par le pion lors du malaxage. L'ajout d'un scroll sur l'épaulement permet de ramener la matière au centre de l'outil et de l'empêcher de s'échapper au bord de l'épaulement. La géométrie de l'épaulement convexe avec un scroll a permis plus de flexibilité au niveau de la surface de contact épaulement/matière. Elle est donc mieux adaptée pour le soudage des surfaces gauches.

La figure 3 présente un épaulement convexe avec un scroll. Cette géométrie permet de rigidifier l'outil et de limiter la concentration de contrainte au niveau de la jonction épaulement pion.

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 8/80



Figure 3. Outil FSW en PCBN avec un épaulement convexe comportant un scroll [4].

Récemment, des travaux sont orientés vers une technique de soudage avec un épaulement fixe. Dans cette configuration, seul le pion est mis en rotation. Cette technique est mieux adaptée au soudage en angle où l'épaulement peut épouser la forme de l'angle sans qu'il y ait collision épaulement/pièces à souder lors du soudage. Le rôle principal de l'épaulement est alors de maintenir la matière dans la zone malaxée. L'apport de chaleur de l'épaulement est nul. Cette technique permet d'obtenir un aspect plus symétrique du cordon entre sa surface et sa racine.

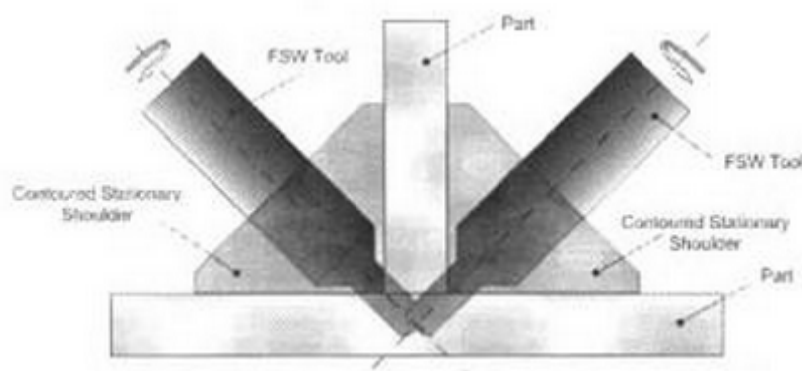


Figure 4. Configuration de soudage en angle avec un épaulement non rotatif [9].

La figure 4 présente une configuration de soudage en angle d'un joint en T avec un épaulement fixe (non rotatif). Pour cette configuration, une préparation spéciale des bords n'est pas nécessaire.

2.1.1 Variante technologique de l'épaulement : double épaulement

L'outil à double épaulement est une variante technologique permettant d'améliorer la forme de la soudure et éliminer le défaut dû au manque de pénétration. Cette configuration de soudage ne nécessite pas d'enclume à l'envers de la soudure. Avec un outil à double épaulement la génération de la chaleur par frottement et

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 9/80

déformation plastique s'effectue par les deux faces des pièces à souder. L'apport de chaleur est donc identique sur les deux faces ce qui se traduit par une morphologie symétrique du cordon.

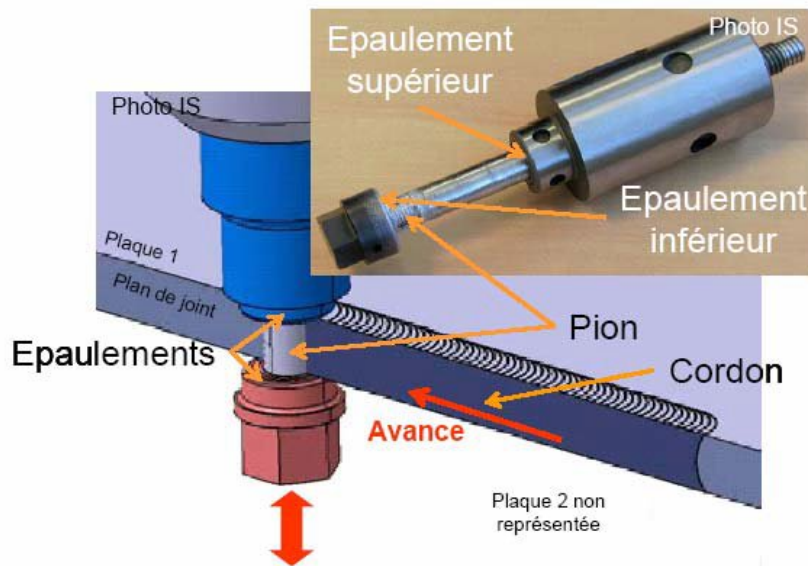


Figure 5. Configuration de l'outil à double épaulement [11].

Pour placer le pion dans les pièces au début de la soudure, il faut percer au préalable un trou. Une fois que le pion et l'épaulement supérieur sont en place, l'épaulement inférieur est vissé sur le pion. Cette technologie permet de souder les pièces d'épaisseur importante car l'effort de forgeage est réparti sur les deux épaulements.

2.2 Le Pion

Le pion est l'acteur principal de l'opération de malaxage. Il assure la déformation plastique de la matière en malaxant la matière des pièces à souder. Généralement, la géométrie du pion est conçue afin d'assurer une amélioration de l'écoulement du matériau et minimiser les efforts appliqués sur l'outil. La longueur du pion doit être adaptée à l'épaisseur des pièces à souder. Une longueur adéquate du pion permet de souder sur toute l'épaisseur sans avoir un défaut de manque de pénétration.

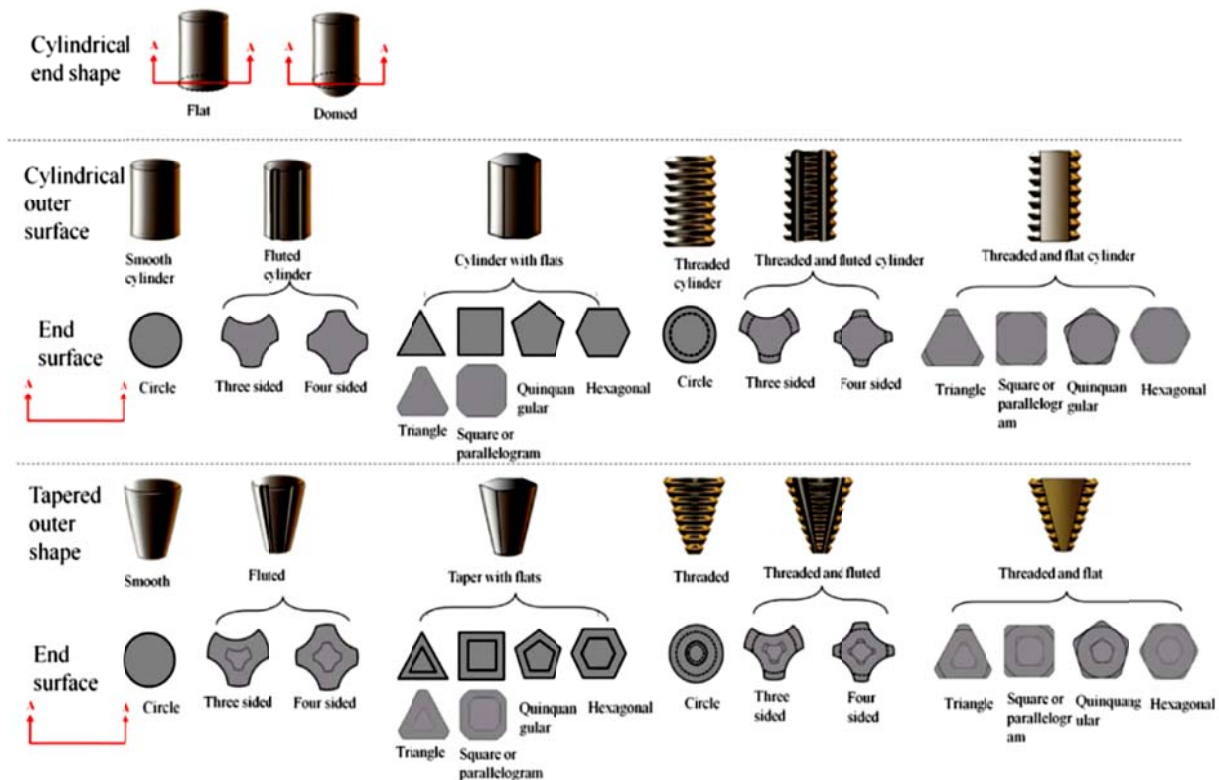


Figure 6. Synthèse des géométries et des formes utilisées pour le pion FSW [1].

Le pion peut présenter différentes formes pour améliorer l'écoulement de la matière et ainsi le malaxage du cordon. La figure 6 présente les formes et les géométries principales utilisées pour la conception du pion FSW.

Le pion FSW a un double rôle. Il doit assurer à la fois le malaxage de la matière et la génération de la chaleur par frottement et déformation. De ce fait, l'outil FSW assure le phénomène physique de stick-slip donc une alternance entre le glissement et l'adhérence. Cette hypothèse est largement utilisée pour la modélisation numérique et analytique du contact outil/matière [10].

2.2.1 Variante technologique du pion

L'outil rétractable est une variante technologique du pion pour laquelle sa longueur peut être réglée au cours du soudage. Cette technologie a permis le soudage des pièces d'épaisseur variable le long du joint de cordon. L'outil rétractable a permis aussi d'éviter le trou présent en fin de soudure FSW inévitable avec un outil conventionnel. Cette technologie nécessite un pilotage de la sortie du pion indépendant de celui de l'outil donc de l'épaulement.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 11/80

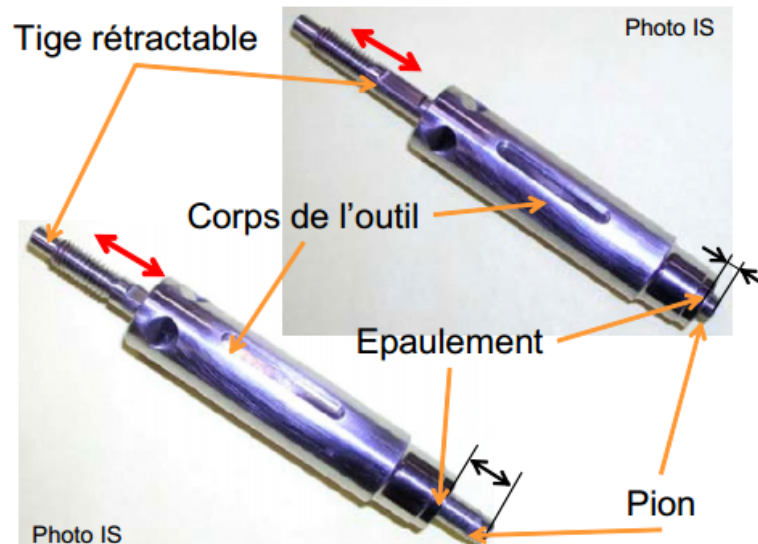


Figure 7. Outil FSW à pion rétractable [11]

2.3 Corps de l'outil

Le corps de l'outil assure le montage et le maintien de l'outil sur la broche de la machine de soudage. Généralement, le corps de l'outil FSW n'est pas monté directement sur la broche. Il est associé à un porte outil.

Dans certains cas, La longueur du corps de l'outil ou du porte-outil permet d'améliorer l'accessibilité à la ligne du joint. L'évacuation de la chaleur de l'outil par convection est assurée par la surface du corps. Pour améliorer le refroidissement de l'outil FSW au cours du soudage, le corps de l'outil peut contenir des formes géométriques telles que les gorges.

2.4 Matériaux de l'outil FSW

En FSW conventionnel, l'outil est considéré comme non consommable. Néanmoins, les conditions extrêmes de soudage diminuent sa durée de vie et peuvent rapidement l'endommager.

Le matériau de l'outil FSW doit assurer sa résistance aux contraintes exercées par la matière. La partie active de l'outil se dégrade sous l'effet des efforts engendrés lors de l'interaction outil/matière tribologie et les conditions thermiques extrêmes. Pour chaque phase de soudage, l'outil est sollicité à des efforts différents et qui varient selon les conditions opératoires.

En phase de pénétration, le pion subit un effort de forgeage important. De même lors de la phase de soudage, l'effort de cisaillement appliqué par la matière au niveau de l'épaulement peut provoquer la rupture du pion. L'outil doit assurer à la fois le malaxage et le frottement avec la matière à souder. Ces fonctions dégradent rapidement l'outil, l'alternance du contact outil/matière glissement/adhérence mène à l'usure des formes usinées sur le pion et ou l'épaulement.

Les matériaux des outils FSW ont été développés pour répondre aux besoins de soudage de différents types d'alliages.

En raison des différentes nuances et épaisseurs des structures soudées en FSW, l'outil doit présenter pour chaque application une bonne dureté à haute température.

La figure suivante présente une synthèse des matériaux d'outil existants utilisés en FSW.

Alloy	Thickness		Tool material
	mm	in.	
Aluminum alloys	<12 <26	<0.5 <1.02	Tool steel, WC-Co MP159
Magnesium alloys	<6	<0.24	Tool steel, WC
Copper and copper alloys	<50	<2.0	Nickel alloys, PCBN(a), tungsten alloys
Titanium alloys	<11 <6	<0.4 <0.24	Tool steel Tungsten alloys
Stainless steels	<6	<0.24	PCBN, tungsten alloys
Low-alloy steel	<10	<0.4	WC, PCBN
Nickel alloys	<6	<0.24	PCBN

(a) PCBN, polycrystalline cubic boron nitride

Figure 8. Synthèse des matériaux utilisés pour les outils FSW [4]

3 PRESENTATION DES ESSAIS

Dans ce livrable, on s'intéresse à l'étude des effets géométriques de l'outil FSW sur le procédé. Les différentes investigations déployées dans la conception des outils FSW vont nous permettre de discuter l'utilité des formes et des géométries utilisées et de mieux l'adapter au FSW robotisé. Cette étude permettra d'identifier et de situer les domaines de soudabilité des outils conçus selon les différentes formes géométriques utilisées.

3.1 Matériau à souder

Les soudures sont réalisées sur des coupons de l'alliage d'aluminium 6082 T651 en épaisseur 6mm. Tous les essais ont été réalisés en pleine tôle sur la machine de soudage FSW MTS-ISTIR de l'Institut de Soudure. (Voir annexe 4).

3.2 Montage de bridage

Le montage de soudage utilisé pour ces essais est présenté dans la figure 9. Pour assurer la répétabilité des essais et éviter toutes perturbations des résultats par d'autres paramètres environnementaux, la configuration

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 13/80

du montage de bridage a été maintenue durant tous les essais. La ligne de la soudure est référencée afin d'assurer une bonne répétabilité des essais. La température de la pièce à souder et de l'enclume est ramenée à la température ambiante avant chaque essai de soudage.

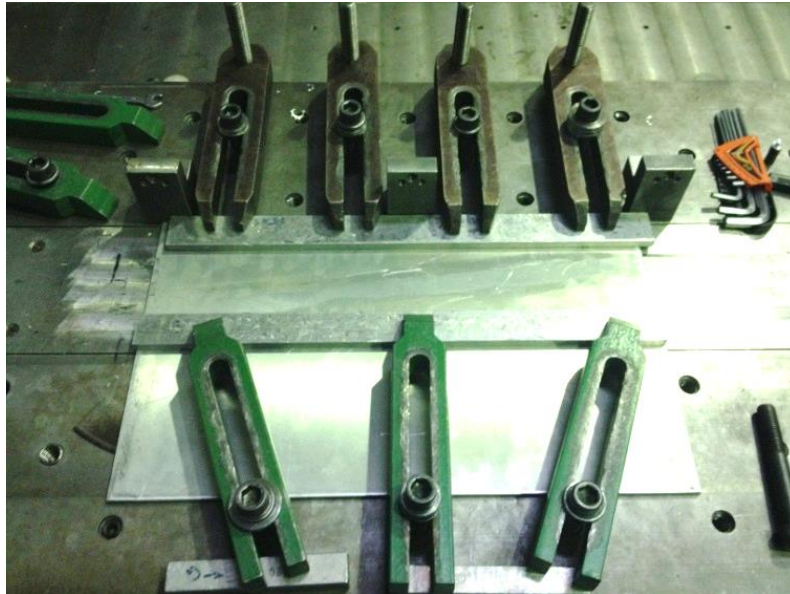


Figure 9. Montage de bridage pour les essais FSW.

3.3 Définition des géométries utilisées pour l'outil FSW

Pour formaliser la conception de l'outil FSW, nous avons opté pour une décomposition simplifiée de l'outil FSW, ce qui permet de faciliter l'étude et l'interprétation de l'influence de chaque partie et de chaque forme correspondante indépendamment. En effet, cette décomposition géométrique permet d'avoir une comparaison plus facile de chaque partie et peut servir comme outil d'aide à la conception des outils FSW.

Dans cette étude, on s'intéresse seulement à la partie active de l'outil, cette dernière pouvant être décomposée en quatre surfaces : la surface latérale du pion, la surface de la base de l'épaule, la surface latérale de l'épaule et le bout du pion. Ses parties représentent l'environnement d'interaction outil/matière et ont une influence directe sur la qualité du cordon FSW obtenu.

Le graphe de la figure suivante présente les différentes entités géométriques dans un outil FSW :

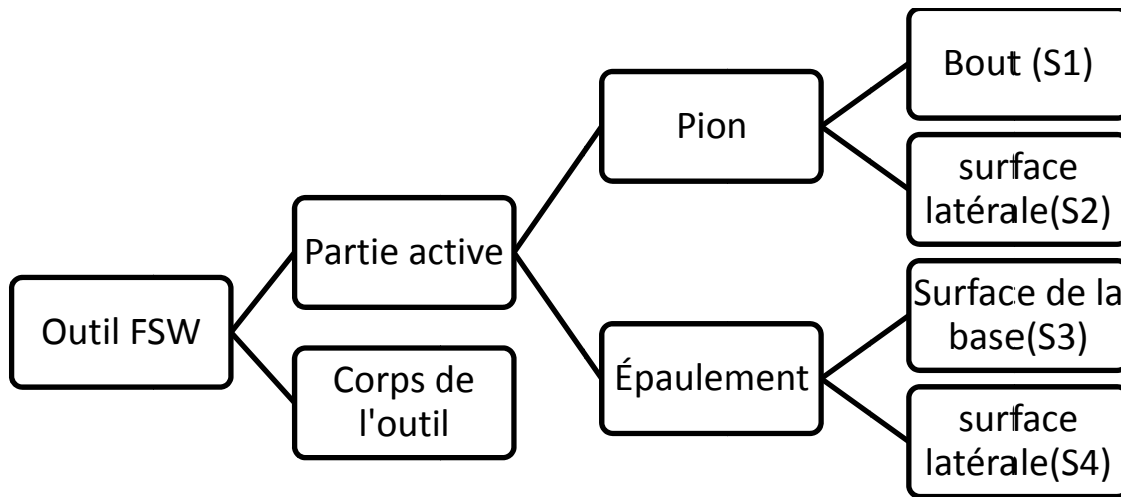


Figure 10. Décomposition de l'outil FSW.

Sur une présentation simplifiée de la géométrie de l'outil FSW, nous définissons les différentes surfaces de l'outil FSW.

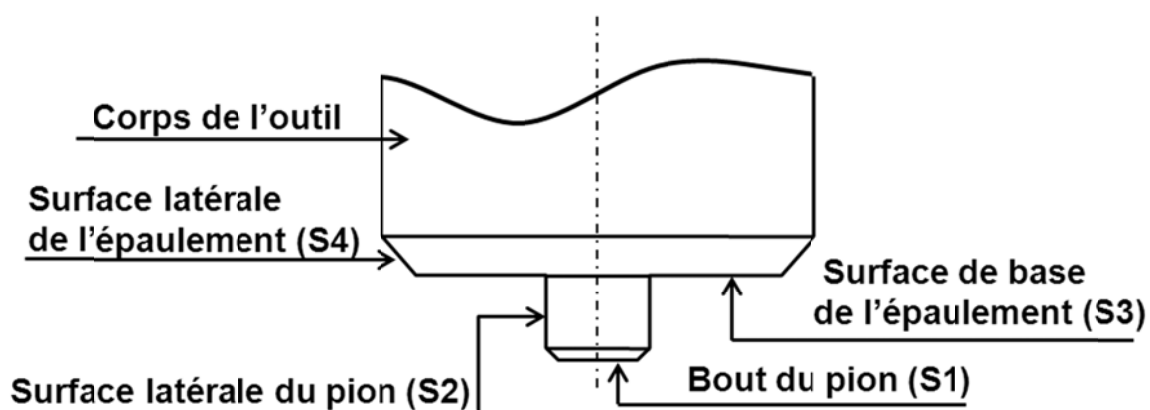


Figure 11. Identification des différentes parties de l'outil FSW

Chaque entité surfacique de l'outil peut jouer un rôle important au niveau du malaxage et de la génération de chaleur lors de l'opération de soudage. Afin d'améliorer ces deux aspects, plusieurs détails de forme peuvent être associés à ces surfaces telles que des rainures, des gorges, des méplats etc.

3.4 Critères de comparaison

Il existe plusieurs critères pour comparer des outils FSW. Ils sont choisis afin d'améliorer les conditions de soudage principalement :

- Diminuer l'effort de forgeage F_{z_outil}
- Minimiser les efforts développés au cours de soudage (l'effort d'avance et l'effort transverse)

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 15/80

- Améliorer la tenue mécanique du cordon (malaxage)
- Prolonger la durée de vie de l'outil et de ses entités géométriques
- Flexibilité de l'outil FSW (mono-bloque ou multi- blocs/rétractable)
- Réduire le coût de l'outil

	Epaulement					Désignation	Prix unitaire	Effet de malaxage	Tenue mécanique	Effet Fx	Effet Fy	Effet Fz	Effet Cz	durée de vie
Matière														
Géométrie	création d'une liste(cylindrique, prismatique...													
Côtes nominales caractéristiques	longueur	diamètre	Angle	Epaisseur										
	type	pas	orientation											
Filet														
Rainure														
Forme spéciale														
Totaux														

3.5 Campagnes expérimentales

Les essais de références abordés dans le livrables 2.2 ont été réalisés avec un outil de géométrie bien définie. Le but de cette tâche est d'identifier l'influence de la géométrie de l'outil sur les efforts développés au cours des différentes phases de soudage ainsi que sur la qualité du cordon et son DSO.

L'outil FSW a un effet direct sur la morphologie du joint et sa microstructure. La présente étude expérimentale est consacrée à identifier l'impact des géométries et des formes utilisées dans la conception d'un outil FSW sur la qualité du cordon et son domaine de soudabilité. Parallèlement, nous présentons l'influence de la géométrie de l'outil sur les efforts développés au cours des différentes phases de soudage

Dans les perspectives, cette étude sera une base d'étude de ces entités géométriques d'un point de vue technologique principalement la durée de vie de l'outil et la tolérance du procédé envers une éventuelle usure de l'outil.

3.6 Choix et définition des outils de l'étude

L'étude bibliographie montre qu'il existe une grande variété de choix pour la géométrie et les formes de l'outil FSW.

Pour mener une étude comparative en se basant sur l'influence de la géométrie de l'outil. Nous avons proposé plusieurs formes et géométries. La présente étude est effectuée sur dix outils FSW.

Cette étude préliminaire sur la géométrie des outils FSW a pour but d'analyser la robustesse du procédé FSW envers le changement de la géométrie de l'outil. Pour cela, nous avons réalisé des soudures avec différentes géométries du pion.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 16/80

Ces essais permettent dans un premier temps de vérifier la faisabilité de soudage avec différents formes sur le pion.

Une analyse visuelle des cordons ainsi qu'une étude métallographique ont été réalisées afin d'évaluer la qualité des joints soudés au niveau macrographique.

Pour passer à un niveau acceptable du domaine de soudabilité opératoire avec un robot soudeur, il fallait passer à un effort de forgeage inférieur à celui utilisé pour souder la même configuration d'assemblage.

Pour opter à cette diminution, nous avons utilisé un outil ayant un épaulement de rayon plus petit que celui utilisé habituellement. Cet outil sera l'outil de référence avec la nomination COR-12-6.

Le tableau suivant regroupe l'ensemble des outils utilisés pour cette étude :

Tableau 1. Tableau récapitulatif des outils étudiés.

Outil de Référence		Outils testés		
Variation des formes	COR-12-6	COR-SM	COR-SF	COR-LISS
				
Variation		COR-11-6	COR-13-6	COR-12-6-B7

 AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR <i>COROUSSO</i>	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 17/80



COR-12-6 : C'est un outil à pion conique avec un filet et 3 méplats et un épaulement concave de diamètre 12 mm. Le diamètre de base du pion est de 6 mm.

- Variation des formes sur le pion de l'outil de référence
 - 1- COR-SM : est un outil avec la même géométrie et les dimensions de l'outil COR-12-6 mais sans méplat.
 - 2- COR-SF : est un outil avec la même géométrie et les dimensions de l'outil COR-12-6 mais sans filet sur le pion.
 - 3- COR-LISS : comme l'indique son nom c'est un outil à pion lisse avec la même géométrie et les dimensions de l'outil COR-12-6 mais sans formes (sans méplats, sans filets) ajoutées sur le pion.
- Variation de la géométrie du pion
 - 1- COR-CYL : c'est un outil avec un pion cylindrique de diamètre 6mm possédant les mêmes formes (filet, 3 Méplats) et les mêmes dimensions de bases de l'outil de référence.
 - 2- HEXA-CONI : c'est un outil avec un pion hexagonal conique. Les dimensions de bases (longueur pion diamètres primitifs) sont les mêmes que celles de l'outil COR-12-6.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 18/80

- 3- HEXA-CYL : c'est un outil avec un pion hexagonal conique. Les dimensions de bases (longueur pion diamètres primitifs sont les mêmes que celles de l'outil COR-12-6.
- Variation des dimensions de l'outil de référence
 - 1. COR-11-6 : c'est un outil COR où seulement le diamètre de l'épaulement a été modifié. Ce dernier passe de 12mm à 11mm.
 - 2. COR-13-6 : c'est un outil COR où seulement le diamètre de l'épaulement a été modifié. Ce dernier passe de 12mm à 13mm.
 - 3. COR-12-6-B7 : c'est un outil COR où seulement le diamètre de base du pion passe à 7 mm au lieu de 6 mm dans l'outil de référence.

4 ETUDE DE LA GEOMETRIE DES OUTILS FSW

Pour faciliter les méthodologies de conception des outils FSW ainsi avoir une vision plus claire sur le choix technologique adéquat à chaque type d'utilisation. Nous allons comparer les outils utilisés selon différents critères.

Pour cette étude, nous cherchons principalement à adapter l'outil aux applications de soudage FSW robotisé. Ceci est effectué par le biais de la comparaison des différentes géométries de l'outil FSW à travers leurs influences principalement sur :

- DSO (Vitesse d'avance, vitesse de rotation, effort de forgeage)
- F_x _outil, F_y _outil, C_z _outil
- Malaxage de la matière
- Température de soudage

où F_x _outil est l'effort d'avance, F_y _outil est l'effort transverse et C_z _outil le couple.

4.1 Effet sur le domaine de soudabilité

4.1.1 Définition d'un point de fonctionnement

Un point de fonctionnement correspond à un cordon sans défaut selon l'exigence de la norme relative au FSW et ou le cahier des charges.

Dans la présente étude, nous considérons qu'un point de fonctionnement est valide seulement si le cordon FSW correspondant ne présente aucun macro-défaut interne ou surfacique, une pleine pénétration du pion et une indentation de l'épaulement acceptable.

Un point de fonctionnement robuste est situé au centre d'un domaine de soudabilité il est alors moins sensible aux variations des conditions opératoires. Ceci dépend toutefois de la taille du domaine de soudabilité.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 19/80

4.1.2 Définition du domaine de soudabilité (DSO)

En FSW, le domaine de soudabilité est lié à une configuration bien définie principalement l'aspect géométrique et métallurgique de l'outil et de l'assemblage à souder. Pour déterminer un domaine de soudabilité, il est nécessaire de définir au préalable les exigences sur la qualité du cordon FSW. Ces exigences sont fixées selon le cahier des charges d'un client et ou les normes relatives au FSW. En Europe, La norme ISO 25239 définit les exigences de qualité relative au soudage par friction malaxage de l'aluminium.

Le domaine de soudabilité opératoire peut être défini selon plusieurs paramètres opératoires du procédé. Pour des raisons de simplification, Ce domaine est généralement défini par les trois paramètres opératoires principaux du FSW ($N[\text{tr/min}]$, $V[\text{mm/min}]$, $F_z[\text{kN}]$) pour un outil et un assemblage à souder (nuance, épaisseur).

Pour une configuration donnée, un ou plusieurs domaines de soudabilité opératoire peuvent exister. Ces domaines sont généralement classés selon les conditions de soudage froides ou chaudes. Cette définition est liée au rapport de la vitesse d'avance sur la vitesse de rotation.

Le domaine de soudabilité opératoire peut être défini comme étant l'espace de travail comportant comme limites les valeurs minimales et maximales des paramètres opératoires (Vitesse d'avance, Vitesse de rotation et l'effort de forgeage). Ce domaine est généralement construit autour d'un point de fonctionnement.

Dans le rapport 2.2, nous avons analysé l'influence d'autres configurations de soudage susceptibles d'être rencontrées en FSW sur la qualité du cordon donc sur le domaine de soudabilité opératoire. Par cette étude, nous avons vérifié la possibilité de projeter un point du domaine de soudabilité sur d'autres configurations de soudage.

Dans la suite nous présentons quelques notions sur le DSO :

- Construction d'un domaine de soudabilité

Pour construire le domaine de soudabilité opératoire, il faut tester des paramètres opératoires selon le savoir-faire et le retour d'expérience pour une configuration de soudage bien définie. Généralement, le DSO est construit à partir des essais en pleine tôle. Une fois la qualité et la répétabilité du point de fonctionnement validées, on fait varier un seul paramètre pour trouver ces valeurs maximale et minimale respectant une qualité acceptable du cordon.

- Ordre du domaine de soudabilité opératoire

Dans ce travail, on attribue un ordre pour le domaine de soudabilité opératoire. L'ordre du domaine de soudabilité correspond au nombre de paramètres opératoires pris en considération dans l'étude. Pour un domaine de soudabilité d'ordre 2, seulement deux paramètres opératoires sont étudiés.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 20/80

- Limite du domaine de soudabilité opératoire

Une limite d'un domaine de soudabilité opératoire est tracée entre un cordon admissible selon les exigences définies dans le cahier des charges et un autre inacceptable.

- Niveau du domaine de soudabilité opératoire

Le domaine de soudabilité opératoire d'un point de vue technologique peut être limité en sous domaine. En effet, les machines utilisées en FSW (fraiseuse modifiée, machine dédiée FSW, ROBOT etc.) ne balaye le DSO de la même manière. Le DSO est alors limité par la capacité (vitesse, couple, effort) de chaque machine.

L'accessibilité de la machine ainsi que son volume de travail sont considérés aussi comme des verrous technologiques et peuvent limiter le DSO.

4.1.3 Etude du domaine de soudabilité

Dans la présente étude, le domaine de soudabilité identifié dans la tâche précédente T 2.2 est considéré comme un DSO de référence. Nous testerons, dans la suite, la validité de ce domaine lorsque la géométrie de l'outil change. Dans une première étape seulement le pion de l'outil FSW a été modifié. Les outils utilisés pour cette étude sont présentés dans le paragraphe ().

Le domaine de soudabilité est construit à la fois par le contrôle visuel de la soudure et l'examen macrographique attribué.

Afin de distinguer le type de défaut dans le domaine de soudabilité, nous attribuons à chaque défaut un motif représentatif.

Le tableau suivant représente les différents défauts rencontrés avec leurs motifs représentatifs

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 21/80

Tableau 2. Tableau des défauts obtenus en FSW.

✕ Défaut Tunnel Interne (DTI)	Ce défaut se forme derrière l'outil généralement du côté avance.
+ Manque de Pénétration (MP)	L'outil ne malaxe pas la matière en racine de la soudure. Ce défaut est catégoriquement inacceptable en soudage bout à bout
⊞ Flash Excessif (FE)	Le cordon représente un flash excessif difficilement détachable.
□ Effondrement (EFF)	L'outil s'enfonce dans la matière et peut ainsi endommager l'enclume.
○ EFF+DTI	Combinaison d'un défaut d'effondrement et d'un tunnel.
✕ DTI+MP	Combinaison d'un défaut d'effondrement et d'un tunnel.
◇ Pion cassé	Rupture de l'outil FSW généralement au niveau du raccordement pion épaulement.

Dans cette partie, nous rapportons les macrographies des cordons de quelques outils utilisés. Ces macrographies sont issues des campagnes d'essais du domaine de soudabilité et représentent des essais réalisés en pleine tôle. Pour construire ces domaines et tester leurs validités, nous nous sommes basés sur certains critères de qualité du cordon dont la compacité, la pénétration du pion et l'indentation de l'épaulement. Ces cordons représentent les macrographies transversales prises au milieu du cordon FSW.

4.1.3.1 Outil COROUSSO de référence : COR-12-6

La détermination du domaine de soudabilité opératoire de l'outil COROUSSO a été réalisée sur une approche expérimentale de type plan d'expériences.

L'outil COROUSSO a été conçu afin de diminuer l'effort de forgeage. Les premiers essais expérimentaux ont montré l'aptitude de l'outil COROUSSO à souder avec un effort de forgeage de 10kN. Une fois un point de soudabilité identifié, nous avons essayé d'étendre le domaine de soudabilité autour de ce point.

Pour chaque soudure inacceptable, le défaut correspondant est identifié avec son motif représentatif.

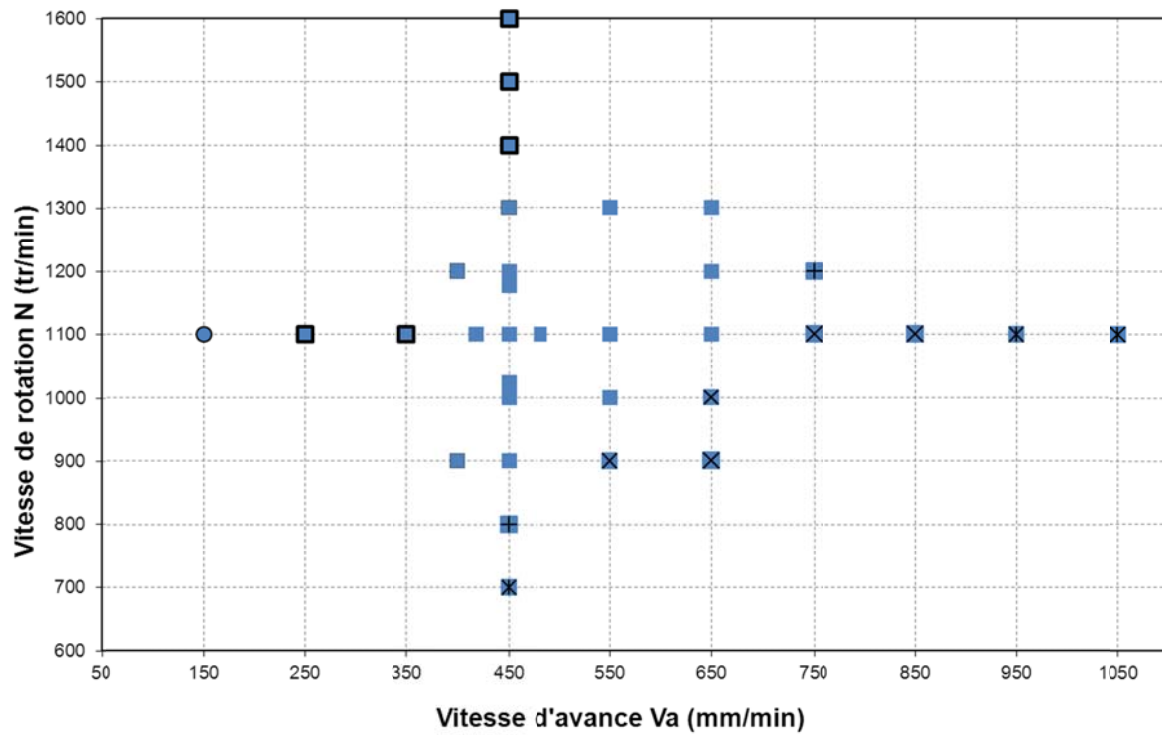


Figure 12. Essais pour l'identification du DSO de l'outil COROUSSO.

La figure 13 montre les bornes de l'effort de forgeage pour les vitesses ($V_a=450\text{mm/min}$ et $N=1100\text{tr/min}$). La borne inférieure de l'effort est limitée avec un défaut de manque de pénétration. Un défaut d'effondrement est observé lorsque l'effort dépasse 11kN.

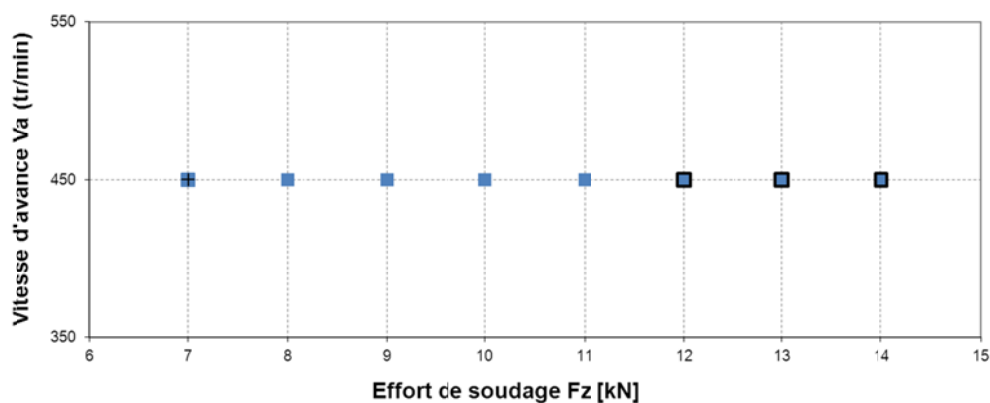


Figure 13. Identification des bornes de l'effort de forgeage à $V_a= 450\text{mm/min}$ et $N=1100\text{tr/min}$

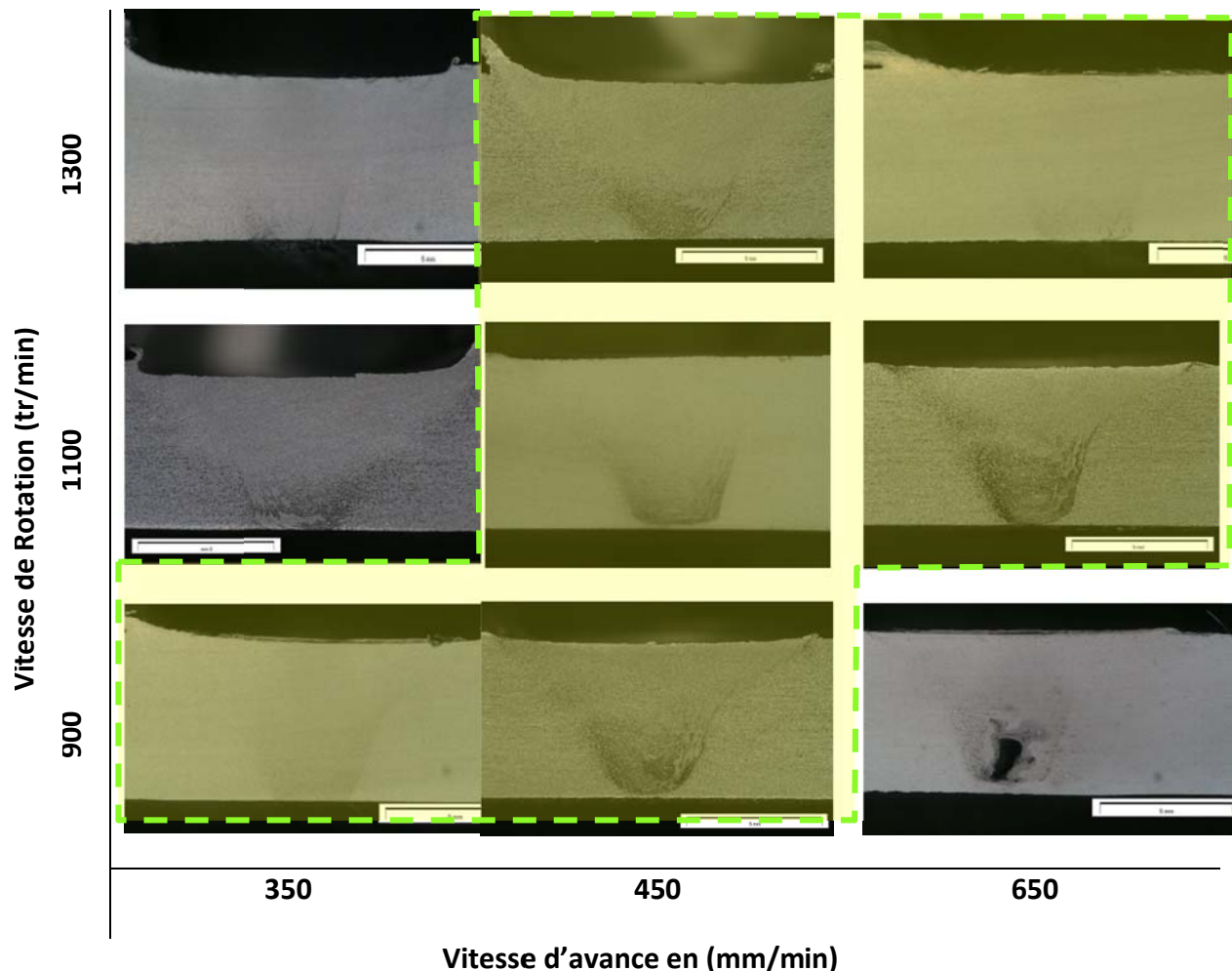
L'outil COR-12-6 sera la référence des essais suivants, il sera alors l'objet d'une comparaison avec les autres outils utilisés dans cette étude.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 23/80

4.1.3.2 Macrographie cordon Outil COR-12-6

Pour construire de domaine de soudabilité avec un pion COR-12-6 sur un alliage d'aluminium 6082-T651 d'épaisseur 6mm, on s'est basé sur le retour d'expérience de l'Institut de Soudure. Un recalage des paramètres opératoires a été effectué pour passer d'un outil classique de diamètre d'épaulement égal à 21,5 mm à un diamètre de 12mm. Ce recalage des paramètres opératoires est basé essentiellement sur la diminution de l'effort de forgeage.

Un effort de forgeage de 10kN a été jugé capable d'avoir un cordon sein et respectant les exigences de qualité prédéfinies. Sur un plan de 10kN, nous avons construit un domaine de soudabilité. Les macrographies issues de cette campagne sont représentées dans la figure suivante :



Le point testé avec une vitesse de rotation de 900tr/min et une vitesse d'avance de 650mm/min sort du domaine de soudabilité. Avec ces paramètres, un défaut tunnel est formé au pied du cordon.

Cette soudure est dite froide, les paramètres opératoires n'assurent pas un apport thermique suffisant pour ramener la matière à une température minimale pour le soudage FSW.

4.1.3.3 Outil à pion sans méplat : COR-SM

La figure ci-dessous représente les points de soudage testés :

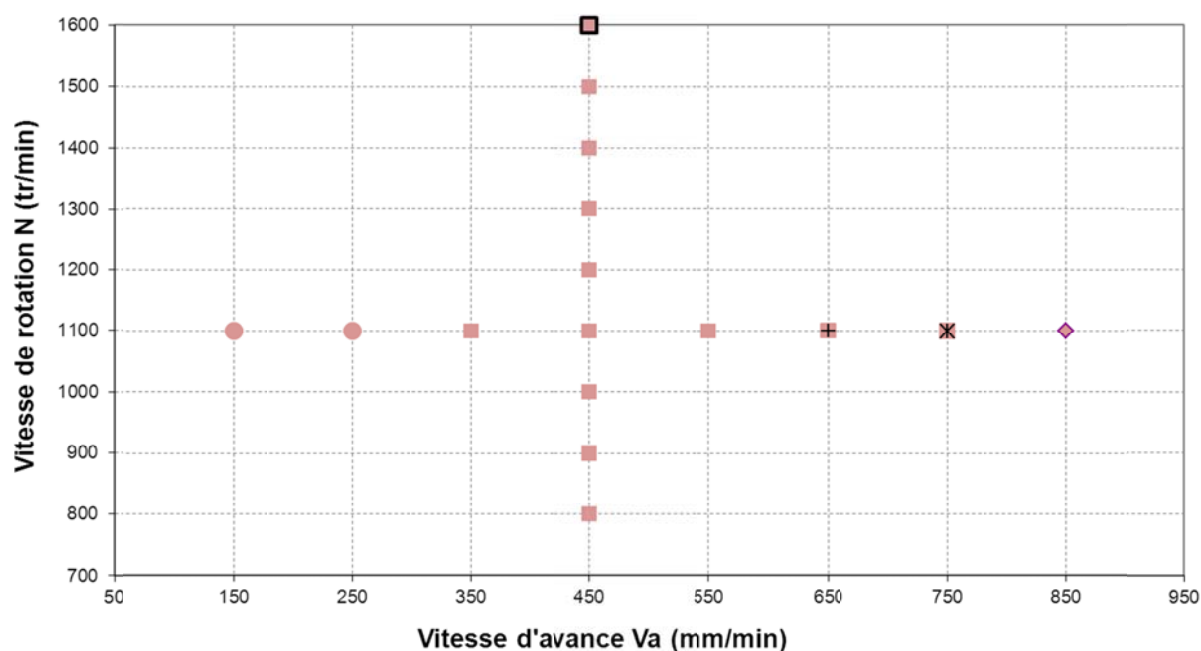


Figure 14. Essais pour l'identification du DSO d'un outil avec pion sans méplats

Dans le plan d'effort égal à 10kN, les limites des zones de soudabilités en vitesse de soudage semblent être très proches par rapport à l'outil COROUSSO [350mm/min 650mm/min]. Néanmoins, l'outil COR-SM a permis d'étendre les limites minimales et maximales de la vitesse de rotation. Elles deviennent respectivement 800tr/min et 1500tr/min au lieu de 900tr/min et 1300tr/min pour l'outil de référence.

Les essais de soudage réalisés avec la variation de l'effort de forgeage sont reportés dans la figure 15.

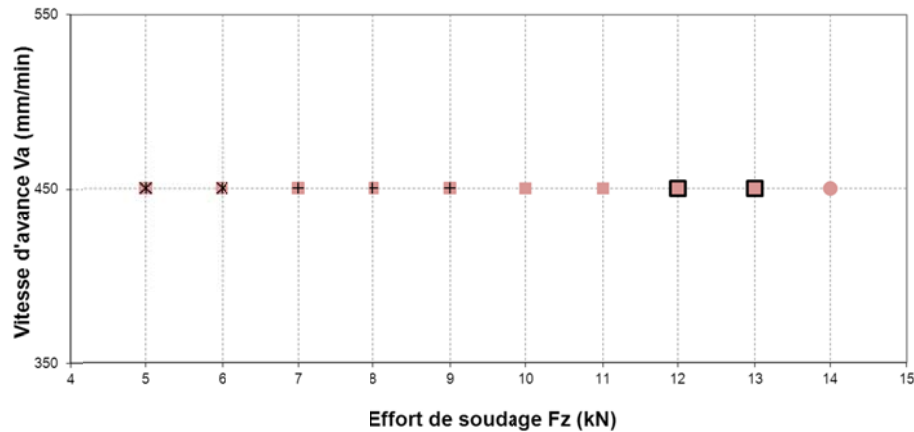


Figure 15. Identification des bornes de l'effort de forgeage à $V_a = 450$ mm/min et $N = 1100$ tr/min.

Contrairement aux vitesses, la marge de manœuvre l'effort de forgeage de cet outil a été réduit par rapport à l'outil de référence. Un effondrement de l'outil est observé lorsque l'effort de forgeage passe de 10kN à 11kN.

4.1.3.4 Outil COROUSSO : COR-SF

Utilisé avec les paramètres de soudage de l'outil de référence, l'outil COR-SF n'a pas permis d'obtenir des soudures sans défauts. Un défaut interne de type tunnel a été observé sur la majorité des essais.

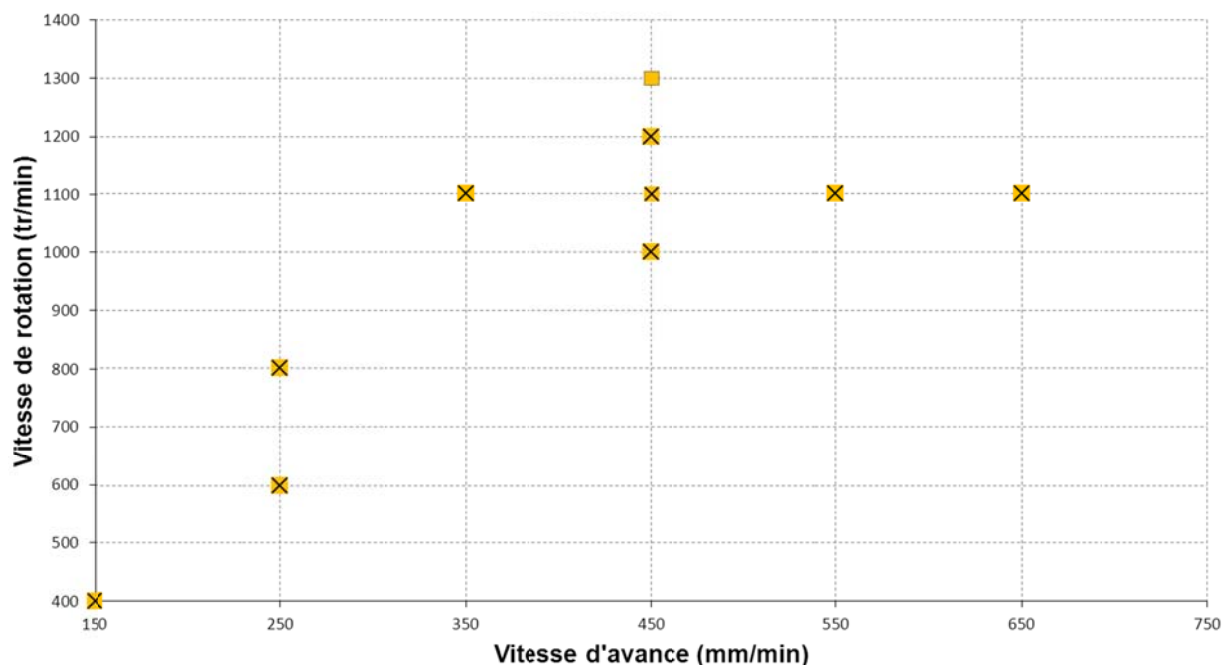


Figure 16. Essais pour l'identification du DSO d'un outil avec pion sans filet

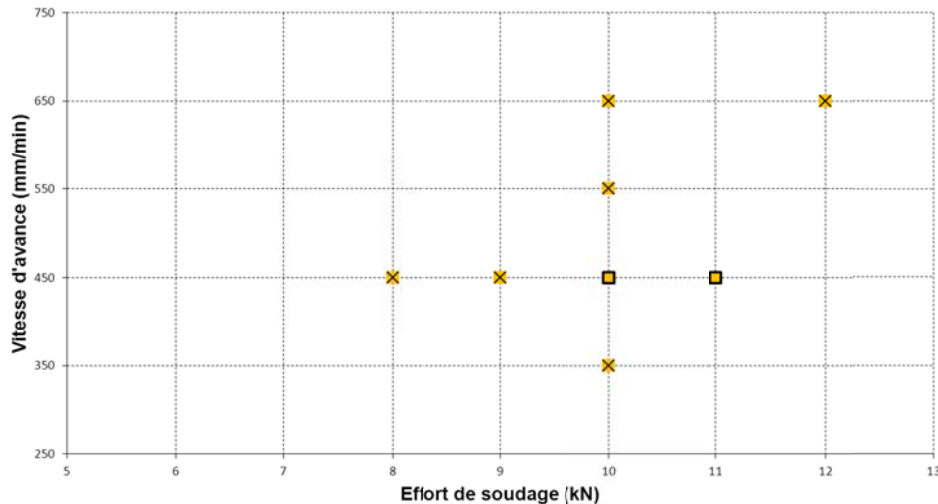


Figure 17. Identification des bornes de l'effort de forgeage à $V_a = 450$ mm/min et $N = 1100$ tr/min.

Le domaine de soudabilité de l'outil COR-SF semble être très décalé par rapport à celui de l'outil de référence. Pour une configuration de soudage avec une épaisseur de 6mm, il est alors fortement conseillé d'avoir des filets sur le pion de l'outil FSW.

4.1.3.5 Outil COROUSSO : COR-LISS

Similairement à l'outil COR-SF, l'outil lisse n'a pas permis d'obtenir des soudures saines avec les paramètres de l'outil de référence. Des défauts de type tunnel sont observés du côté avance pour les mêmes paramètres de soudage de l'outil de référence. Pour l'outil COR-LISS, nous avons trouvé des points de fonctionnement avec des vitesses de soudage lentes de 100mm/min en vitesse d'avance et 400tr/min pour la vitesse de rotation.

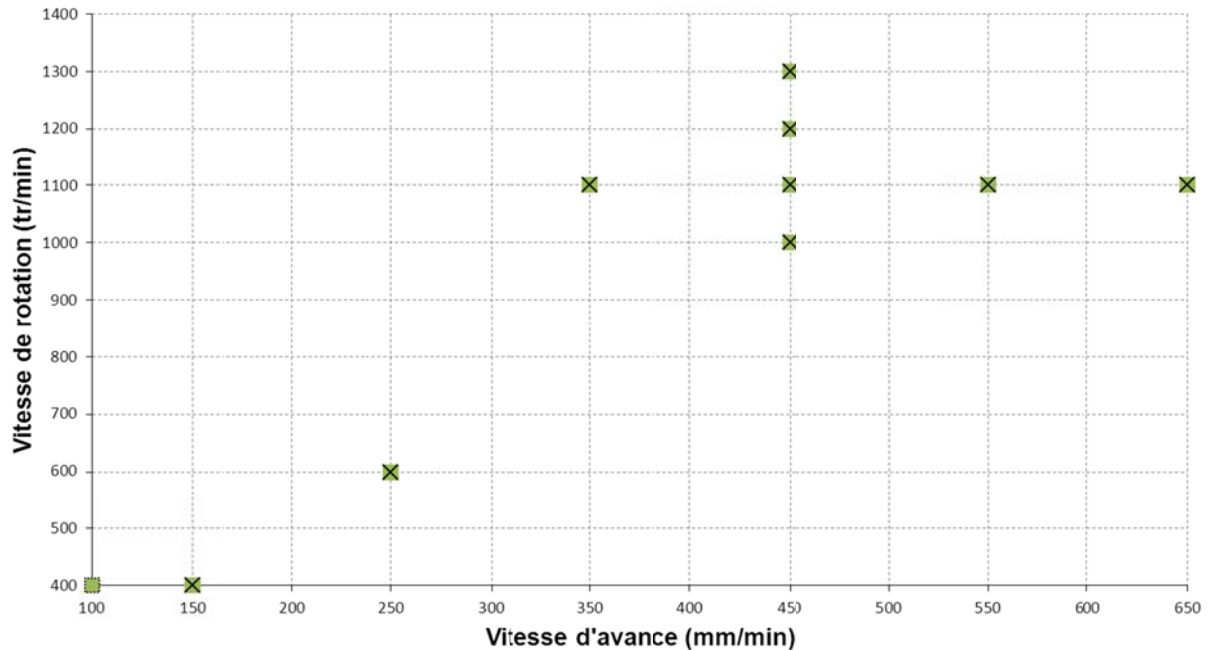


Figure 18. Essais pour l'identification d'un point de fonctionnement de l'outil avec pion lisse COR-LISS

L'outil COR-LISS a montré son aptitude à souder des cordons sains avec un faible effort de forgeage et une vitesse d'avance de 200mm/min. Généralement, les outils lisses sont utilisés avec des faibles vitesses d'avance afin de mieux entrainer et déformer la matière autour du pion ainsi reboucher les défauts de type tunnel.

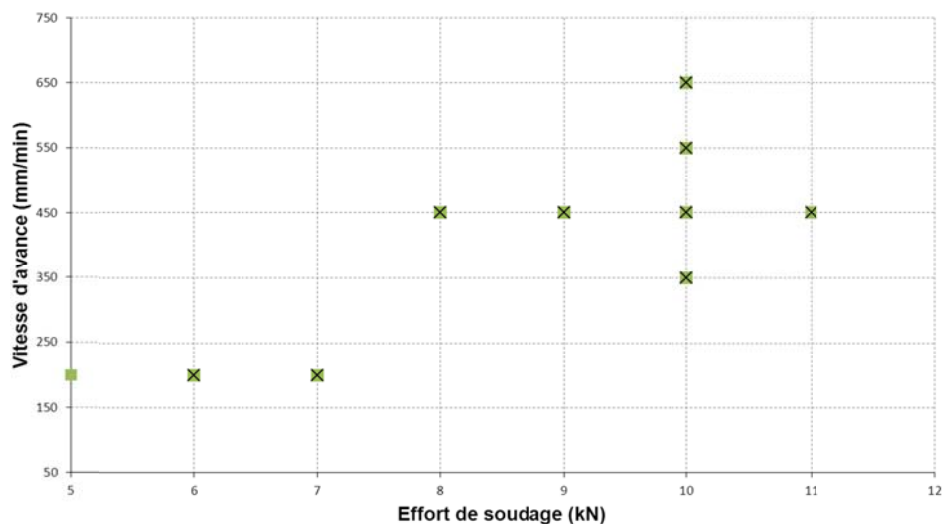


Figure 19. Identification d'un point de fonctionnement avec la variation de l'effort de forgeage.

4.1.3.6 Outil COROUSSO : COR-11-06

La figure 20 représente les points de soudage testés avec l'outil COR-11-06 :

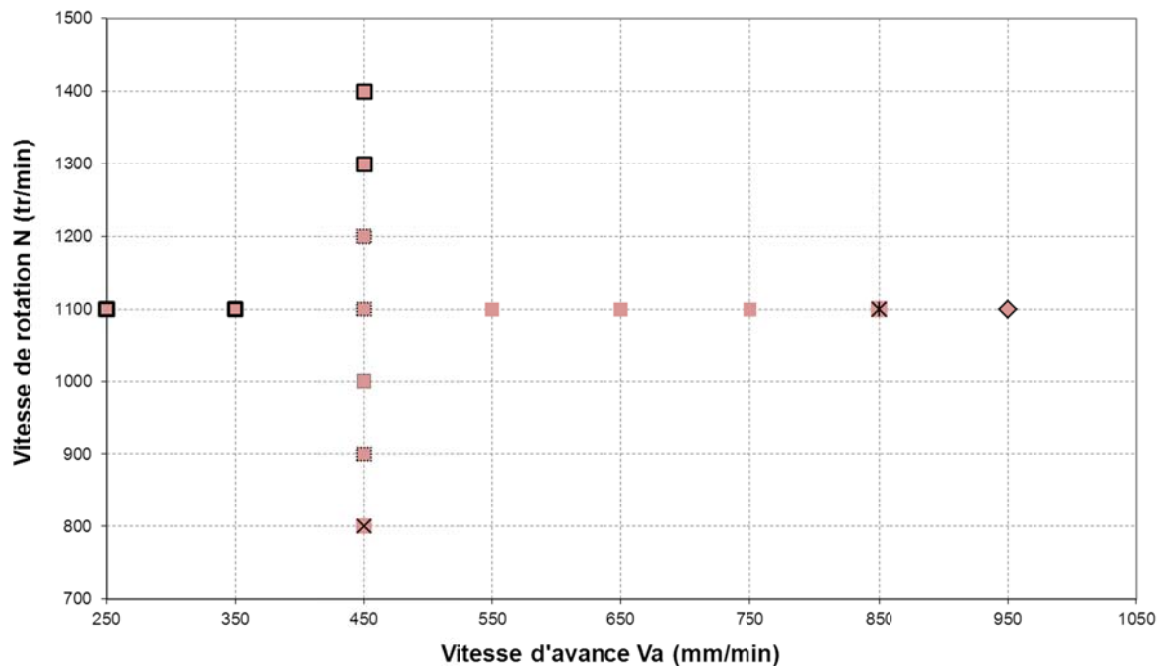


Figure 20. Essais pour l'identification des points de fonctionnement avec l'outil COR-11-6.

En comparant le DSO de l'outil COR-11-6, on constate que la diminution de l'épaulement a contribué à l'apparition du flash. La diminution de l'épaulement de l'outil de référence à limiter la plage de la vitesse de rotation. Par contre, l'outil en question a permis d'obtenir des soudures acceptables à une vitesse d'avance de 750mm/min.

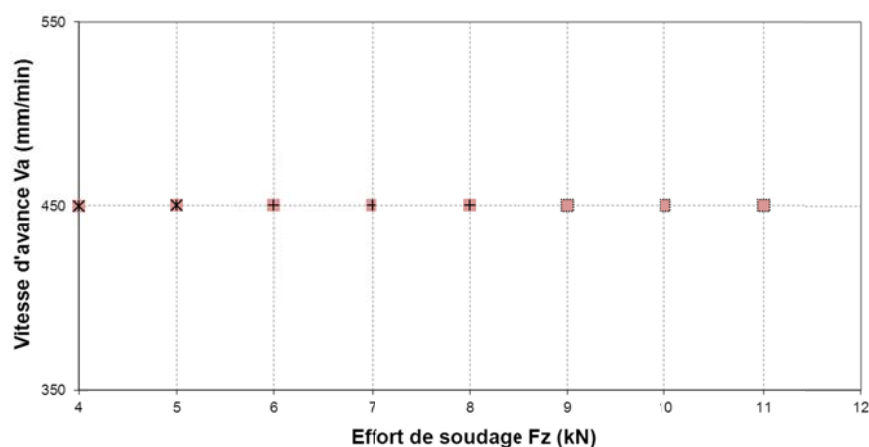


Figure 21. Identification des bornes de l'effort de forgeage à Va= 450 mm/min et N=1100 tr/min.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 29/80

Pour un couple de vitesse (1100 tr/min ; 450 mm/min), l'outil COR-6-11 ne donne pas des soudures acceptables. Tout de même, il est possible de trouver des paramètres de vitesse adéquats pour les efforts de 7kN et 8kN afin de combler le défaut de manque de pénétration.

4.1.3.7 Outil COROUSSO : COR-13-06

Dans le plan d'effort égal à 10kN et à la différence de l'outil COR-12-6, l'outil de diamètre d'épaulement égal à 13 mm provoque un défaut de manque de pénétration. Dans ce cas, l'augmentation du diamètre a contribué à une diminution de la pression hydrostatique. L'outil ne développe pas assez d'énergie et la soudure est dite froide. Afin de palier ce défaut, il est possible d'augmenter la vitesse de rotation. La figure 22 montre qu'avec des vitesses de rotation supérieures à 1100 tr/min le défaut de manque de pénétration disparaît.

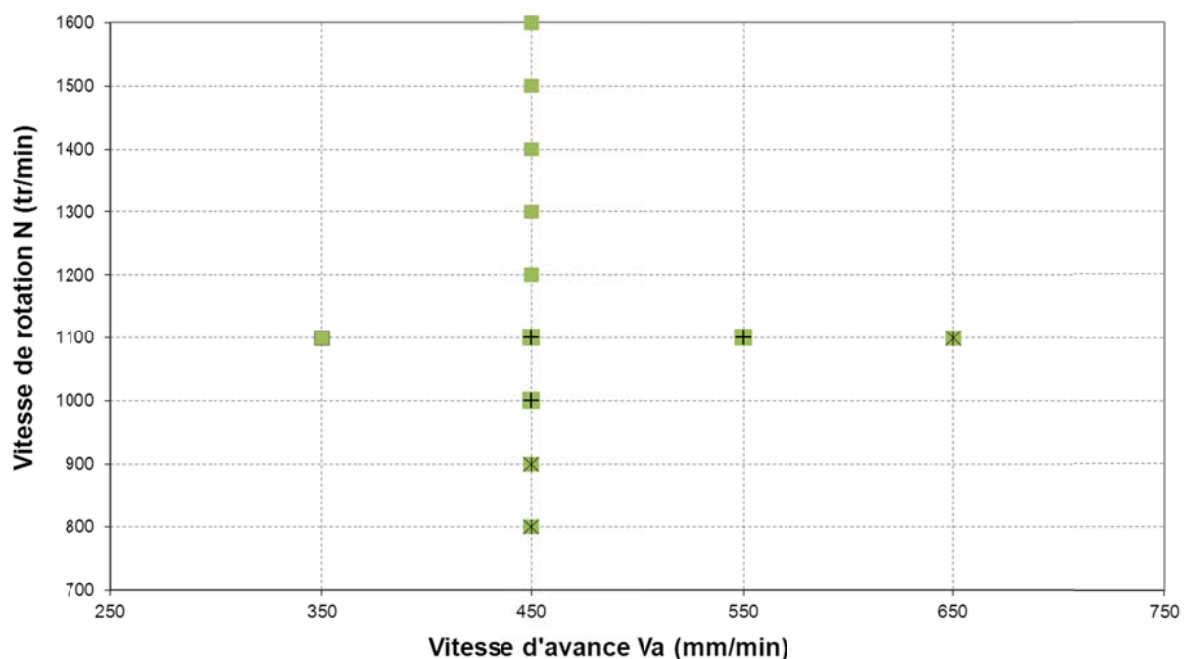


Figure 22. Essais pour l'identification des points de fonctionnement avec l'outil COR-13-6.

Pour des vitesses de rotation et d'avance correspondant à 1100tr/min et 450 mm/min, L'outil avec un épaulement de 13 mm permet d'avoir des soudures sans défauts internes avec des efforts de 11kN et 12kN. Toutefois, ces efforts de forgeage attribue à l'apparition d'un flash à la limite de l'excessif.

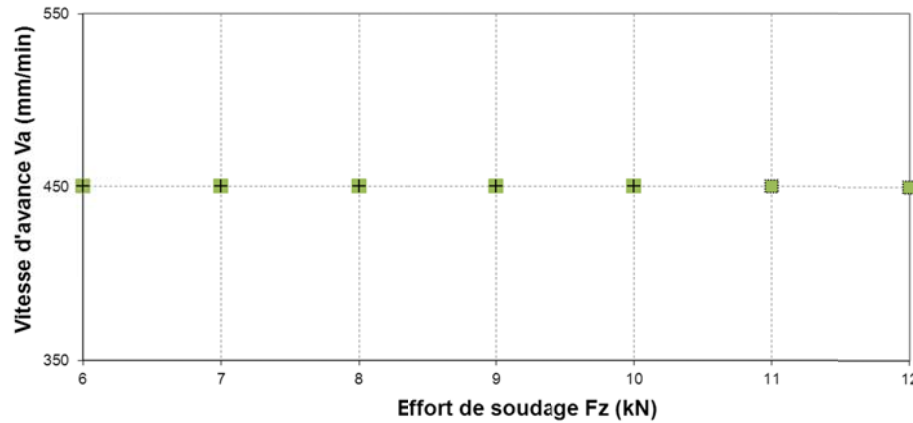


Figure 23. Recherche de point de fonctionnement de l'outil COR-13-6 avec la variation de l'effort.

4.1.2.1. Outil COROUSSO avec pion de base 7 mm : COR-12-BO7

Dans la figure 24, nous avons reporté les paramètres de soudage testés avec le pion de référence sur un outil à pion de diamètre de base égale à 7mm. Géométriquement, cet outil semble être similaire à l'outil COR-11-6 au niveau de la surface active de l'épaulement. Pour une vitesse de soudage égale à 450mm/min, cette géométrie permet d'obtenir des cordons acceptables avec des vitesses de rotation inférieures à 800 tr/min.

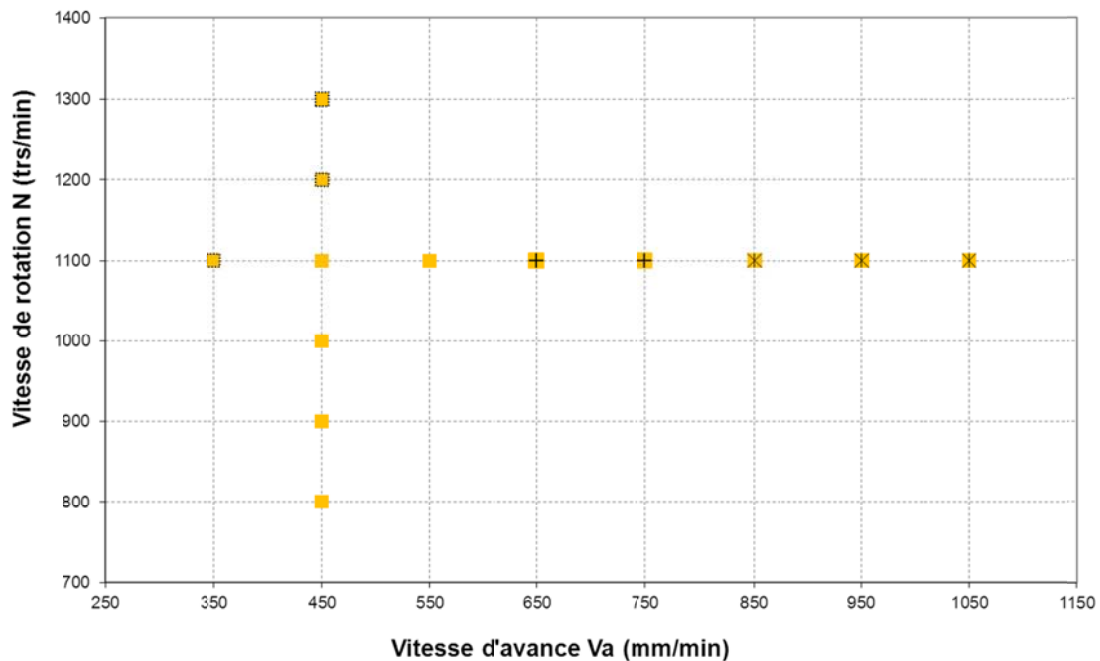


Figure 24. Essais pour l'identification des points de fonctionnement avec l'outil COR-12-B7.

	Projet COROUSSO Livraison n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 31/80

A surface active égale de l'épaule, l'outil COR-B7 développe plus d'énergie de déformation par rapport à l'outil COR-11-6. Ceci est dû au volume de malaxage du pion. Ce surplus d'énergie permet à cet outil d'obtenir des soudures exemptes du défaut de manque de pénétration à faible effort de forgeage.

La figure 25 montre les points de fonctionnement de l'outil COR-B7 trouvés avec la variation de l'effort de forgeage.

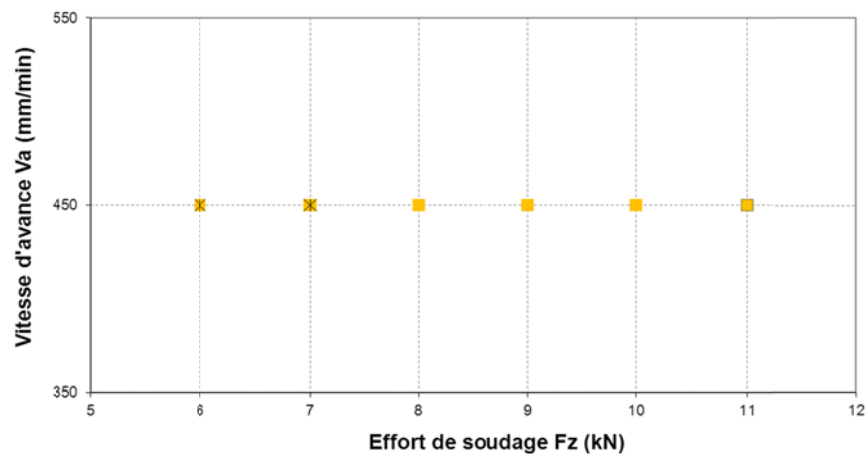


Figure 25. Identification des bornes de l'effort de forgeage à $V_a = 450$ mm/min et $N = 1100$ tr/min.

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 32/80

4.1.3.8 Outil COROUSSO cylindrique : COR-CYL

La figure 26 illustre les points testés pour identifier le positionnement du domaine de soudabilité de l'outil COR-CYL avec celui du pion COROUSSO.

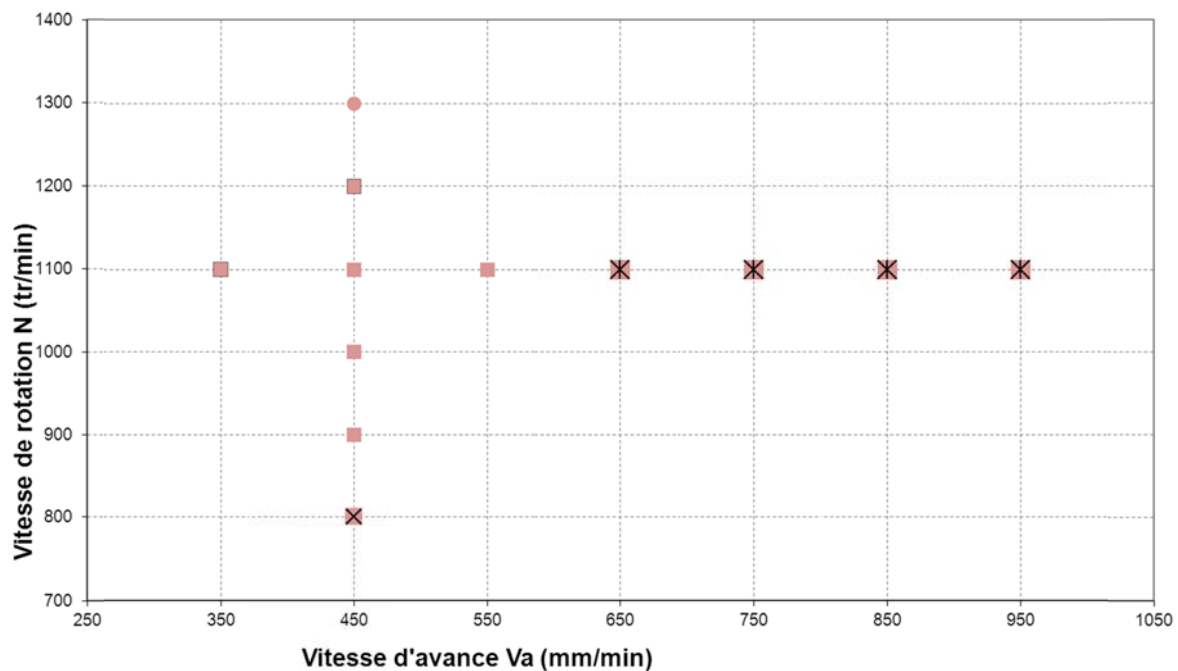


Figure 26. Essais pour l'identification du DSO d'un outil avec pion cylindrique.

Pour un effort de forgeage de 10kN, on identifie la plage des vitesses permettant d'avoir une qualité acceptable du cordon FSW. Pour une vitesse de rotation de 1100 tr/min, L'intervalle de la vitesse de soudage est [450mm/min ; 550mm/min]. Ces limites correspondent respectivement à un début d'effondrement obtenu à 350mm/min et l'apparition d'un défaut tunnel interne pour une vitesse d'avance égale à 650mm/min.

Pour des points appartenant au DSO de l'outil COROUSSO, l'outil cylindrique présente un aspect de cordon FSW plus chaud. Le domaine de soudabilité de l'outil cylindrique sera alors décalé vers des vitesses de rotation moins importantes. Le recalage des paramètres pour obtenir un cordon FSW sain peut être aussi basé sur la diminution de l'effort de forgeage.

Pour le couple de paramètre $V_a=450\text{mm/min}$ et $N=1100\text{tr/min}$, nous avons varié l'effort de forgeage pour identifier ses bornes inférieure et supérieure.

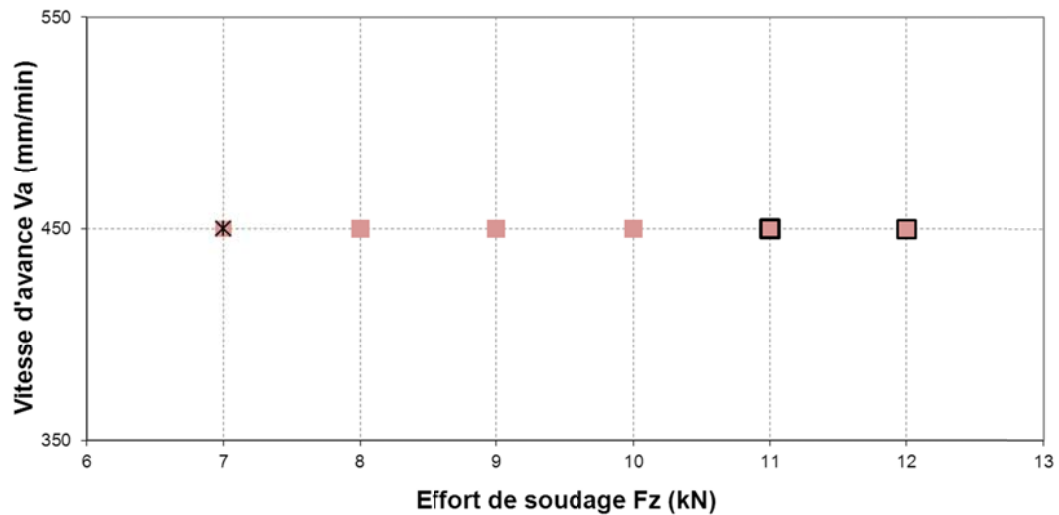
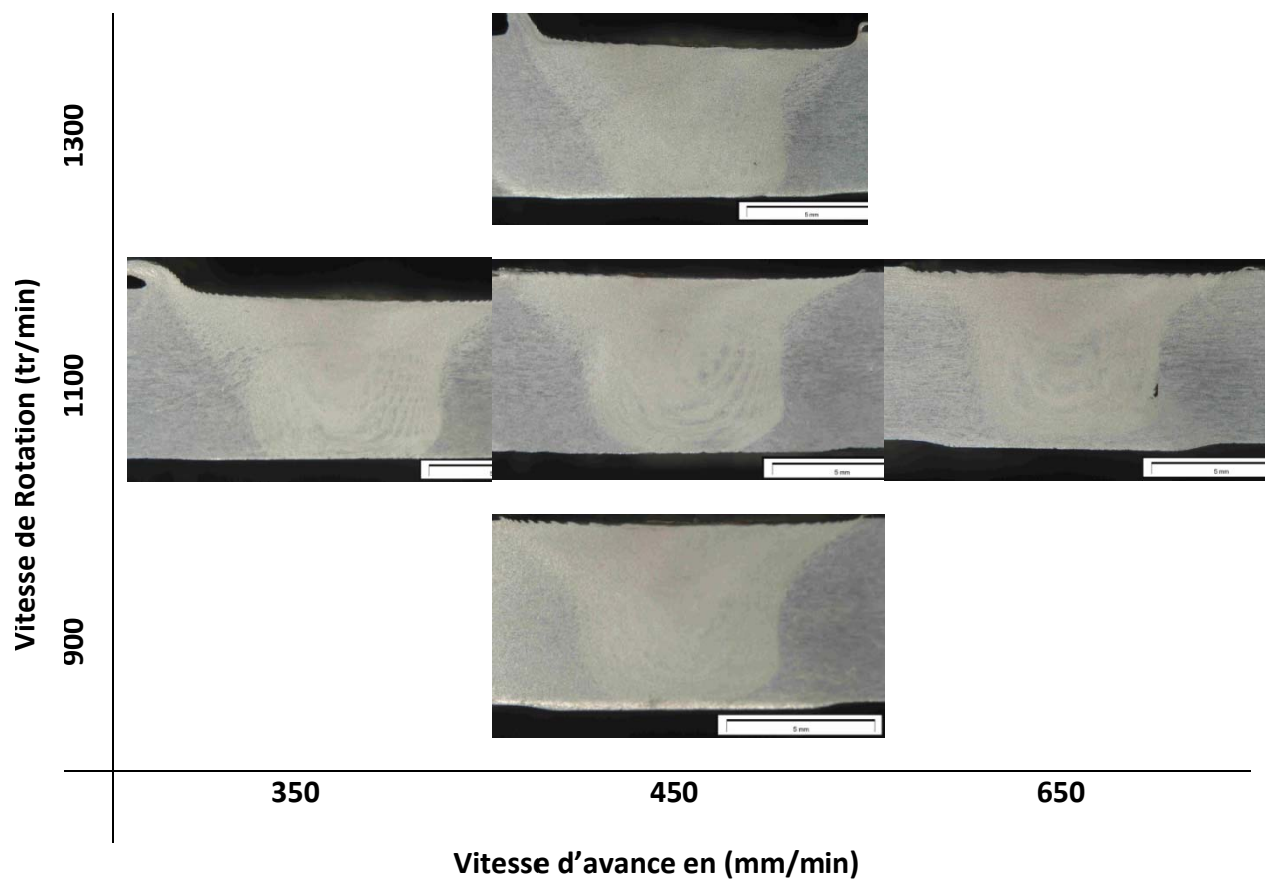


Figure 27. Identification des bornes de l'effort de forgeage à Va= 450 mm/min et N=1100 tr/min.



	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 34/80

Le point testé avec une vitesse de rotation de 900 tr/min et une vitesse d'avance de 650mm/min sort du domaine de soudabilité. Avec ces paramètres, un défaut tunnel est formé au pied du cordon. Une augmentation de la vitesse de rotation ou de l'effort de forgeage permettra d'éviter ce défaut. Il est à noter qu'un défaut tunnel placé au pied du cordon FSW peut être éliminé par une simple l'augmentation de l'effort de forgeage. Par contre, il est conseillé d'optimiser les autres paramètres avant d'agir sur l'effort si ce défaut est placé au cœur du cordon.

4.1.3.9 Outil à pion hexagonal conique : COR-HEXA-CONI

Après avoir identifié le domaine de soudabilité de l'outil de référence COR-12-6, nous avons testé ces paramètres avec un outil avec un pion conique et hexagonal. Ces essais ont montré que les points du DSO de l'outil COROUSSO n'appartiennent pas au DSO du pion hexagonal. Aucun point de fonctionnement n'a été trouvé.

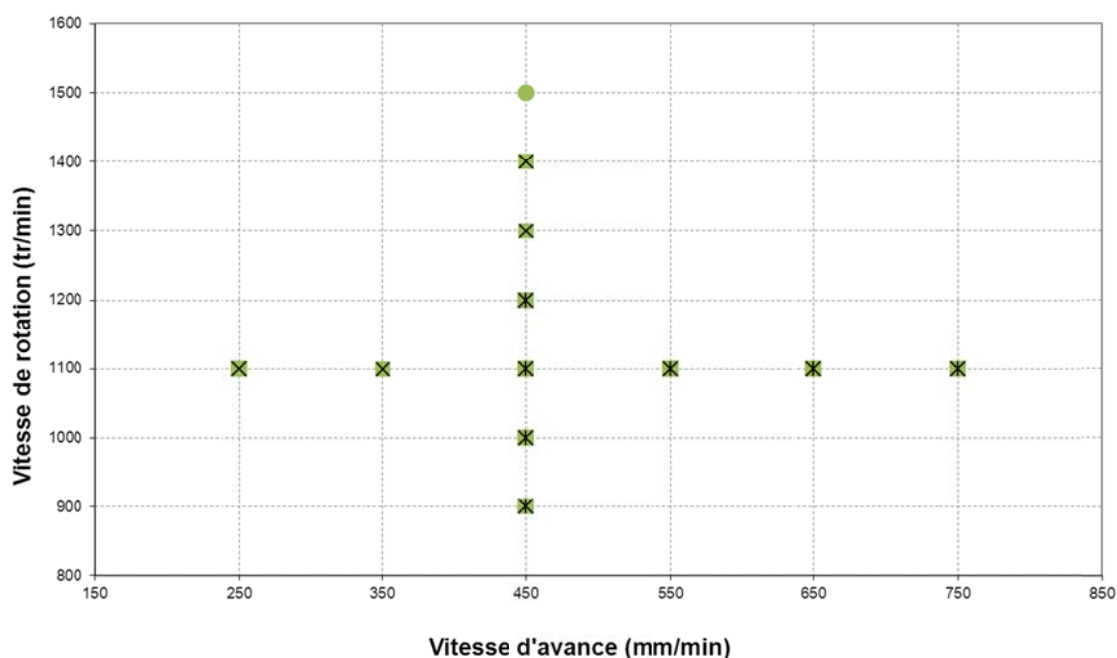


Figure 28. Essais pour l'identification du DSO d'un outil avec pion hexagonal conique.

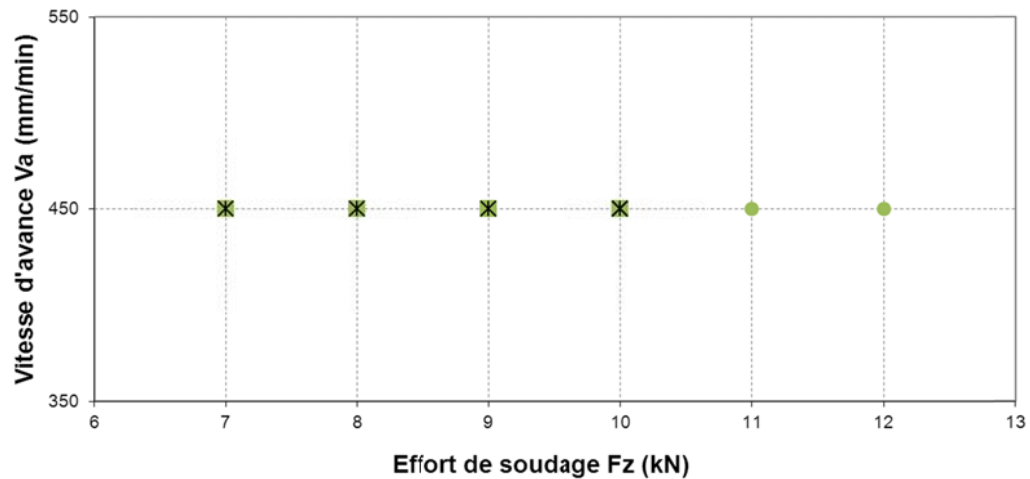
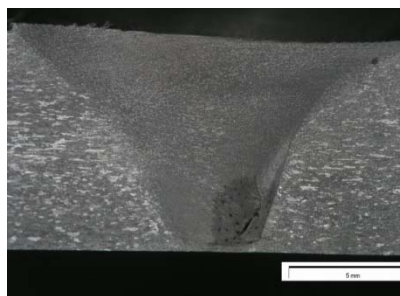


Figure 29. Identification des bornes de l'effort de forgeage à $V_a = 450 \text{ mm/min}$ et $N = 1100 \text{ tr/min}$.

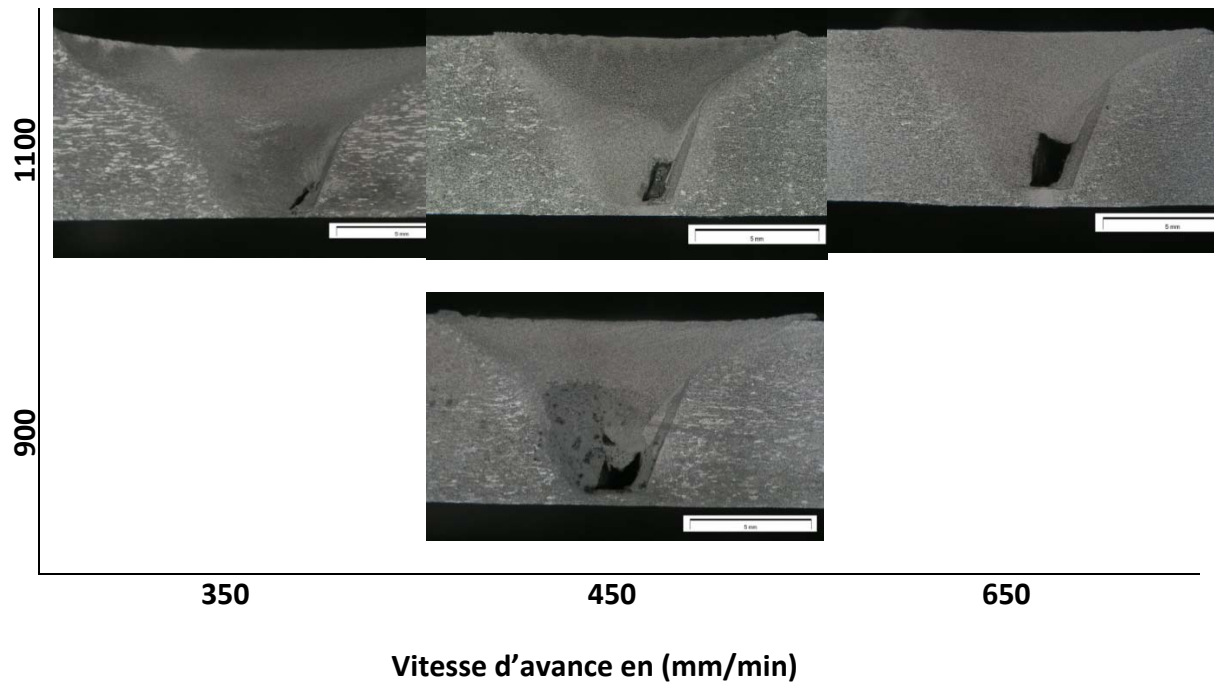
Les défauts obtenus avec les points testés sont pour la plupart de type tunnel. Ce défaut prouve que la géométrie du pion n'arrive pas à reboucher le tunnel. L'outil travaille dans des conditions de soudage froides. Une diminution de la vitesse de soudage assurera un meilleur malaxage du cordon et peut éliminer le défaut tunnel.

Malgré l'aspect visuel correct des cordons obtenus, les observations macrographiques ont révélé un défaut de type tunnel au pied du cordon. Ce défaut observé du côté *advancing* est accentué lorsque la vitesse d'avance passe de 450 mm/min à 650 mm/min . le même effet est observé lorsque la vitesse de rotation diminue. En effet, les rapports des vitesses testés ne permettent pas de reboucher le défaut tunnel.

Vitesse de Rotation
1300



	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 36/80



Au point 450mm/min et 1100tr/min, nous avons augmenté l'effort de forgeage pour éviter le défaut tunnel. Comme le montre la figure 30, l'augmentation de l'effort de forgeage n'a pas permis d'éliminer le défaut tunnel.

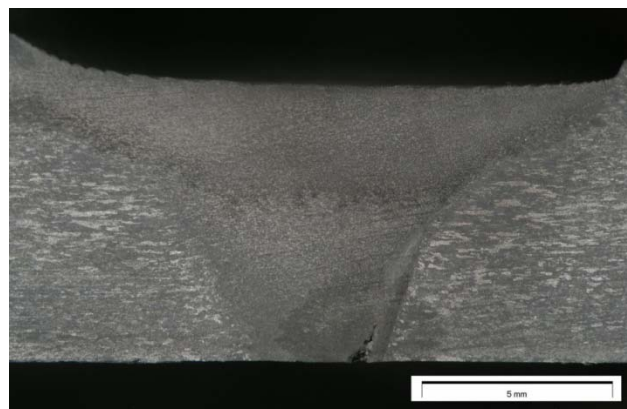


Figure 30. Macrographie d'un cordon FSW réalisé avec 1100 tr/min 450mm/min et 12kN

Suite à cette augmentation de l'effort de forgeage, l'outil s'effondre dans la matière. Dans ce cas l'outil peut endommager l'enclume.

On peut conclure que la plage des vitesses testées ne permet pas d'avoir un cordon FSW de qualité acceptable.

4.1.3.10 Outil à pion hexagonal cylindrique : COR-HEXA-CYL

Pour un outil hexagonal cylindrique aucun point de fonctionnement n'a pu être identifié par rapport aux points de fonctionnement de l'outil de référence.

Les figures 31 et 32 montrent que les cordons soudés avec cet outil présentent tous des défauts de type tunnel.

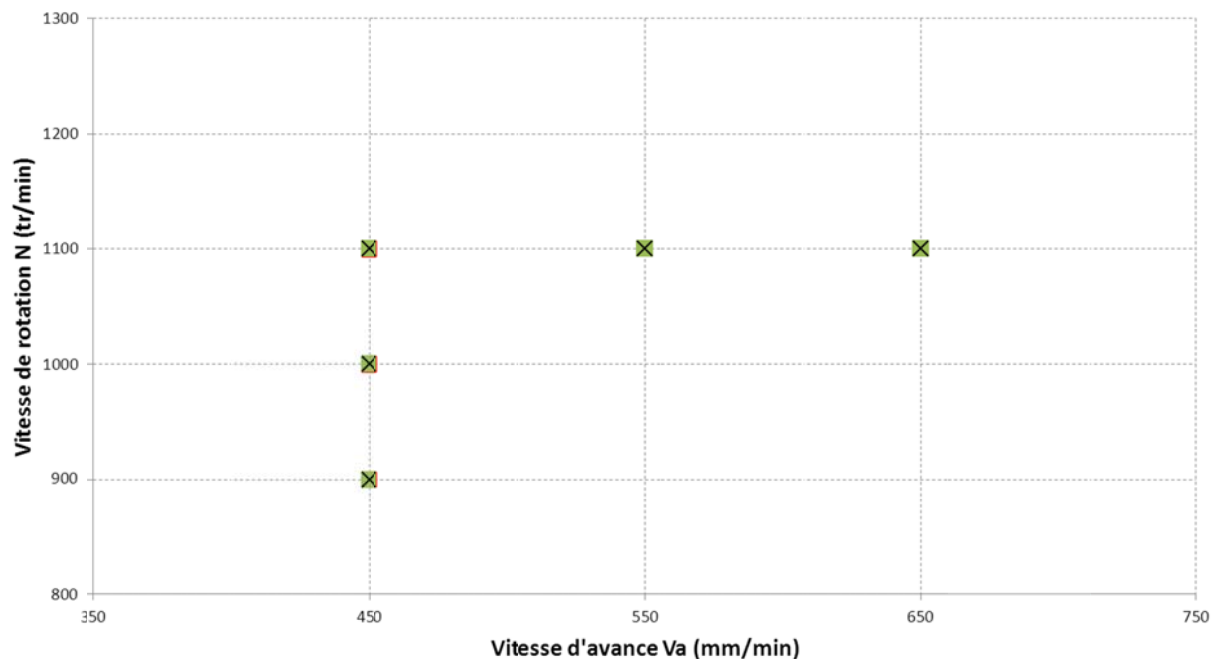


Figure 31. Essais pour l'identification du DSO d'un outil avec pion hexagonal cylindrique.

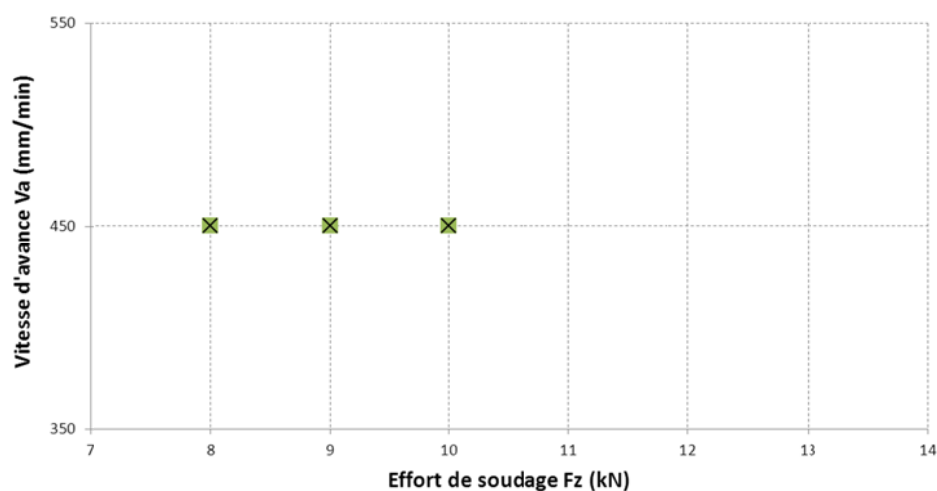


Figure 32. Identification des bornes de l'effort de forgeage à Va= 450mm/min et N=1100tr/min.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 38/80

5 EFFET DE LA GEOMETRIE DE L'OUTIL SUR LES ACTIONS MECANIQUES

Dans cette partie, on s'intéresse à l'effet de la géométrie de l'outil sur les composants du torseur mécanique de la réaction de la matière sur l'outil.

Les actions mécaniques mesurées par la machine dans le repère outil sont présentées sur la figure 33.

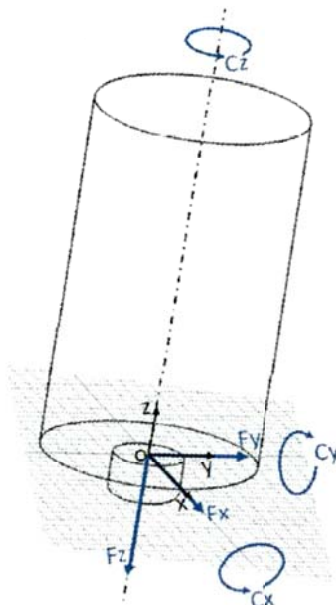


Figure 33. Présentation des actions mécaniques sur l'outil FSW dans le repère outil.

On s'intéresse principalement aux composants F_{x_outil} , F_{y_outil} et C_{z_outil} . La composante F_{x_outil} représente l'effort dans la direction d'avance de l'outil. La composante F_y correspond à l'effort transversal et la composante C_{z_outil} représente le couple.

5.1 Effet sur les actions mécaniques en phase de pénétration

La phase de pénétration est la première phase en FSW. Elle conditionne la suite de l'essai de soudage.

Dans cette phase, l'outil en rotation est plongé dans la matière. Il est généralement piloté en position, ce qui consiste à déplacer l'outil selon son axe z jusqu'à atteindre une position consigne.

Le frottement outil/matière permet de chauffer la matière et de la ramollir pour faciliter la plongée de l'outil. La force de plongée est généralement importante et dépasse parfois la capacité de la machine spécialement le robot. Dans cette configuration un pilotage en effort avec des paliers assure la pénétration de l'outil.

Ici, on s'intéresse à étudier l'influence de la géométrie de l'outil sur les actions mécaniques en phase de pénétration.

5.1.1 Analyse de l'effort F_{z_outil}

La figure ci-dessous présente l'évolution de l'effort de pénétration des quelques outils utilisés dans cette étude. Ces essais sont réalisés avec la même configuration de soudage (mêmes paramètres de pénétration, même alliage).

Durant cette phase, l'outil est soumis à une importante force verticale opposée à son déplacement. Ces efforts varient selon plusieurs paramètres essentiellement l'alliage à souder, la vitesse de pénétration et la géométrie de l'outil.

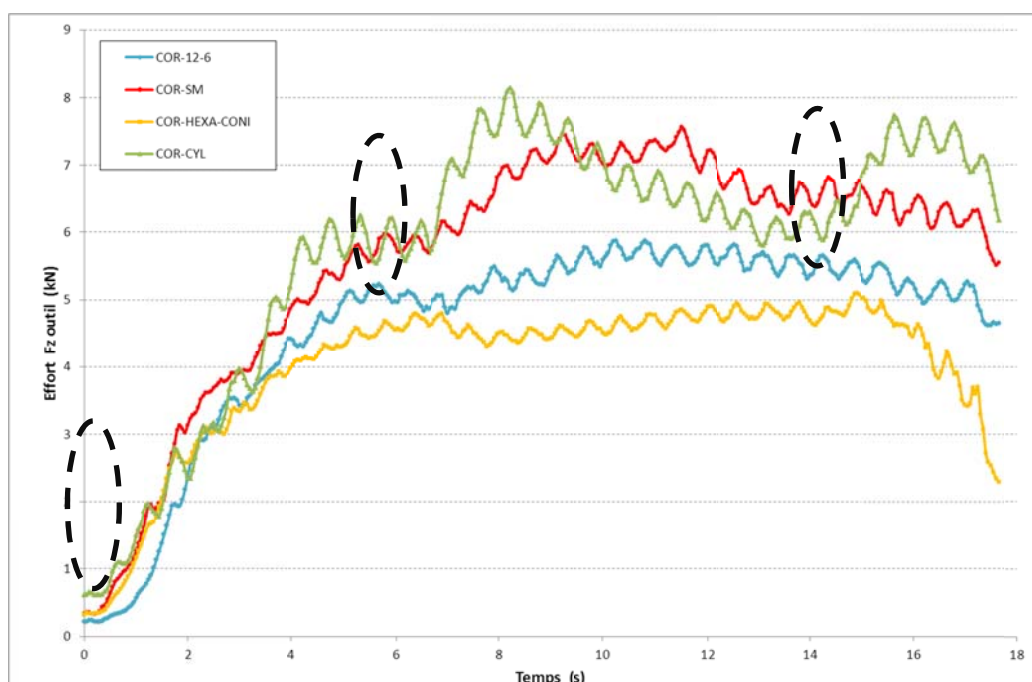


Figure 34. Évolution de l'effort F_{z_outil} des différents outils au cours de la phase de pénétration.

La figure 34 montre l'influence de la géométrie des différents outils sur l'évolution de l'effort de plongée.

On remarque que les outils ayant les plus grandes surfaces du bout du pion atteignent les efforts de plongée les plus importants.

Au démarrage de la phase de pénétration, la surface du bout du pion est la première surface à entrer en contact avec la matière. Elle subit alors la majorité de la pression appliquée par la matière sur l'outil.

Dans cette phase on peut assister à trois pics dans la courbe de l'évolution de l'effort F_z . Un premier pic est dû à l'engagement de l'outil dans la matière. Le deuxième pic d'effort en phase de pénétration correspond au contact de la matière extrudée par le pion avec l'épaulement. L'intensité de ce pic dépend du volume et de l'état physique de la matière refoulée par le pion.

Un dernier pic traduit le contact de l'épaulement avec la surface supérieure des pièces à souder.

En phase de pénétration, les méplats jouent le rôle des arrêtes. Il y a moins d'adhérence entre l'outil et la matière, on assiste à un enlèvement de la matière similaire à celui qu'on trouve dans le procédé de perçage.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 40/80

5.1.2 Analyse du couple Cz-outil

La figure 35 représente l'évolution du couple Cz au cours de la phase de pénétration pour une même configuration (pénétration, vitesse de pénétration, accélération de la pénétration, vitesse de rotation). Afin d'améliorer la lisibilité des courbes d'évolution du couple Cz, nous avons tracé la moyenne mobile de ses évolutions sur 10 points.

L'évolution des courbes du couple Cz-outil montrent une tendance similaire. Ceci rend la comparaison des effets géométriques sur le couple en phase de pénétration difficile.

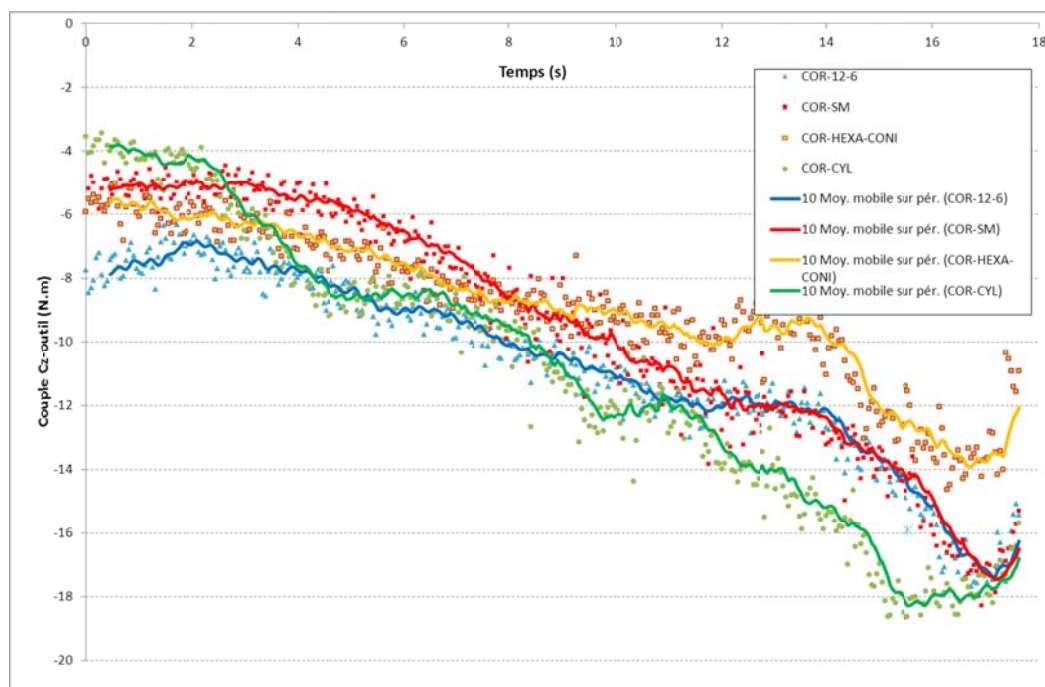


Figure 35. Évolution du couple Cz-outil des différents outils FSW ;
Pénétration=-5.2mm, Vp=20mm/min, Np=1100tr/min.

Au début de la phase de pénétration, l'outil cylindrique possède le couple le plus important. En effet, la déformation de la matière pour pénétrer dans la matière s'effectue par la surface du bout du pion (S1). Au fur et à mesure que l'outil cylindrique, le couple Cz-outil chute d'une façon significative par rapport aux autres outils. Ceci est expliqué par l'apport thermique du pion cylindrique qui devrait être plus important par rapport aux autres géométries.

En comparant l'évolution du couple pour l'outil COR-12-6 et COR-SM, on constate que les méplats permettent de diminuer le couple dans la première phase de pénétration. Les couples Cz de ces outils se rejoignent à la fin de la phase de pénétration.

5.2 Effet de la géométrie sur les actions mécaniques en phase de soudage

5.2.1 Variation des éléments géométriques sur le pion

Le pion de l'outil FSW peut comporter plusieurs éléments géométriques. Dans cette étude, on s'intéresse aux principaux éléments géométriques utilisés qui sont le filetage et les méplats. La présence de ces derniers sur le pion a montré un réel avantage au niveau du malaxage de la matière autour de l'outil.

5.2.1.1 Influence sur l'effort d'avance F_{x_outil}

Afin d'illustrer l'influence de la forme du pion sur l'effort d'avance, nous avons choisi de présenter ce dernier en fonction de la vitesse d'avance.

La figure 36 montre que la présence d'un filetage dans le pion augmente l'effort d'avance. Cette observation reste valide pour les autres variations de paramètre opératoire (Voir annexe 3). Néanmoins, la présence du filetage permet d'avoir des soudures acceptables ainsi d'élargir le domaine de soudabilité.

D'autre part, on note que la présence des méplats sur le pion favorise la diminution de l'effort d'avance.

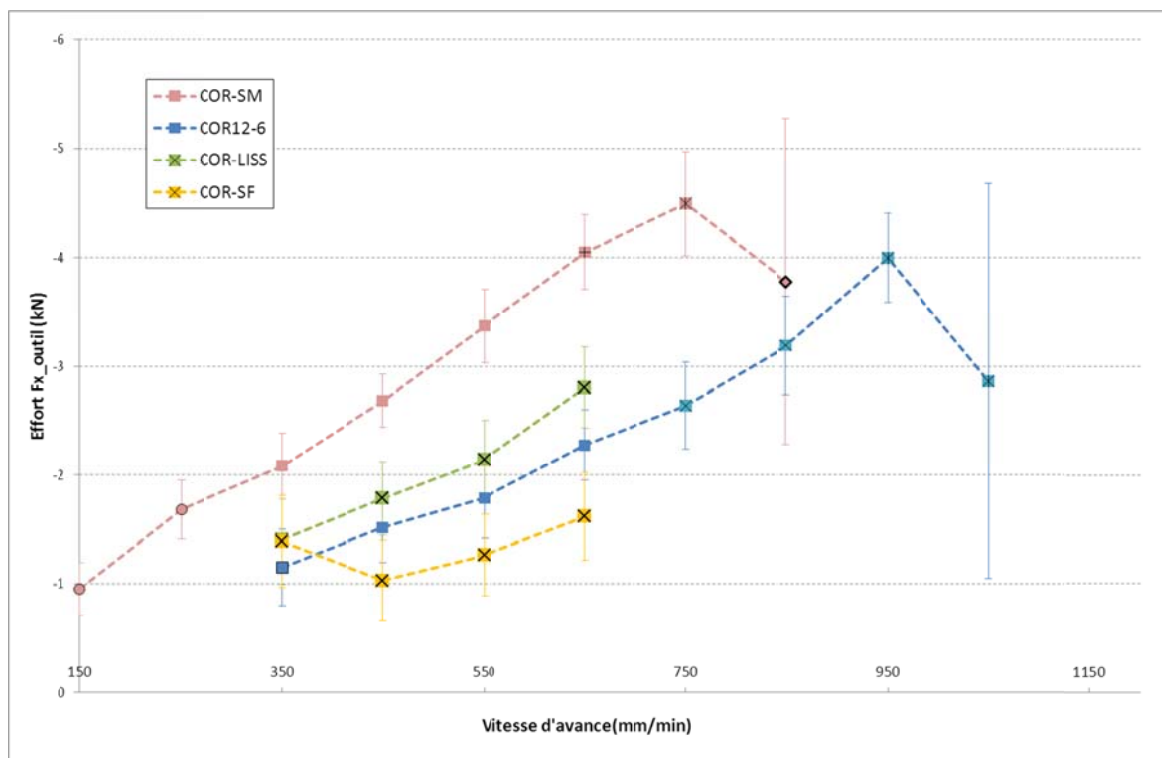


Figure 36. Influence des éléments géométriques sur le pion FSW sur l'effort F_{x_outil} (en fonction de la vitesse d'avance).

5.2.1.2 Influence sur l'effort transversal F_{y_outil}

L'influence des éléments géométriques sur l'effort F_y est présentée en fonction de la vitesse de rotation sur la figure 37.

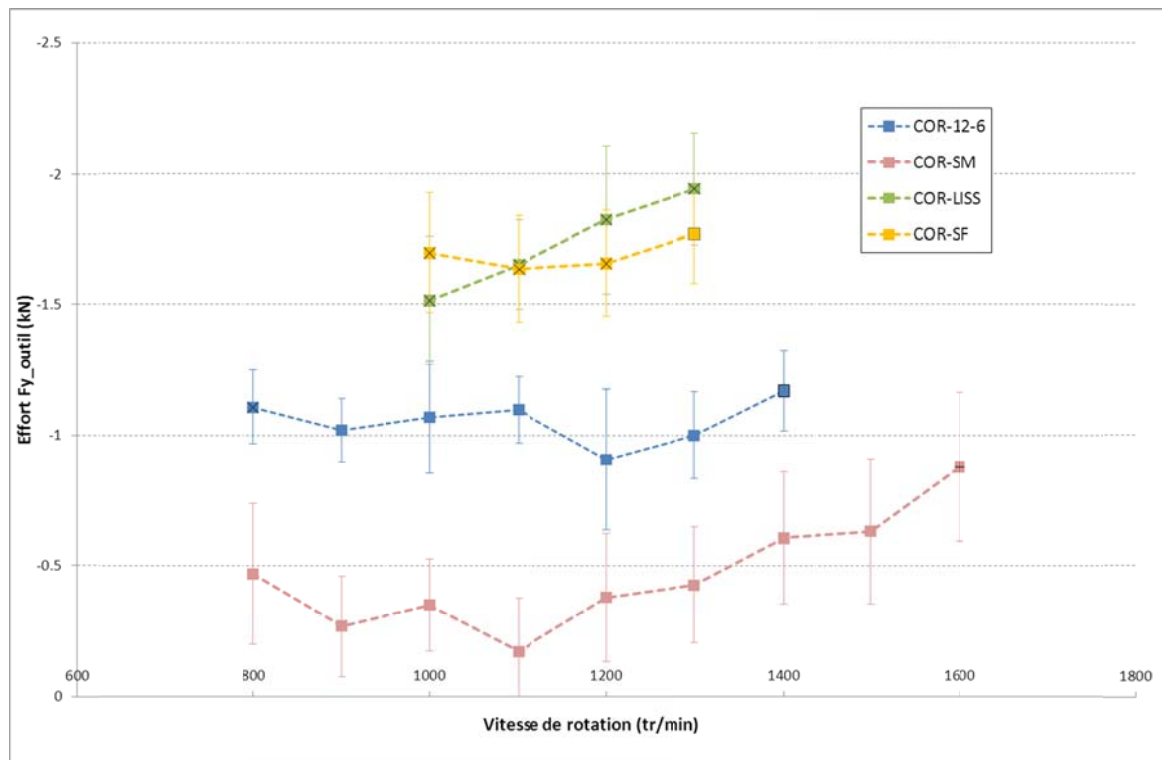


Figure 37. Influence des éléments géométriques du pion sur l'effort F_{y_outil} .

A l'encontre de l'effort d'avance, la présence du filetage sur le pion permet de diminuer l'effort transversal. L'effet des méplats sur l'effort F_y n'est pas facilement identifiable. En analysant les tracées de l'effort F_y en fonction des autres paramètres, on peut constater que l'effet des méplats sur l'effort transversale est couplé avec les paramètres opératoires.

5.2.1.3 Influence sur le couple C_{z_outil}

Pour les différentes vitesses de rotation testées, les formes géométriques testées ne présentent pas des tendances apparentes sur le couple à la broche de la machine de soudage. Les effets de ces derniers sont alors couplés avec les paramètres de soudage.

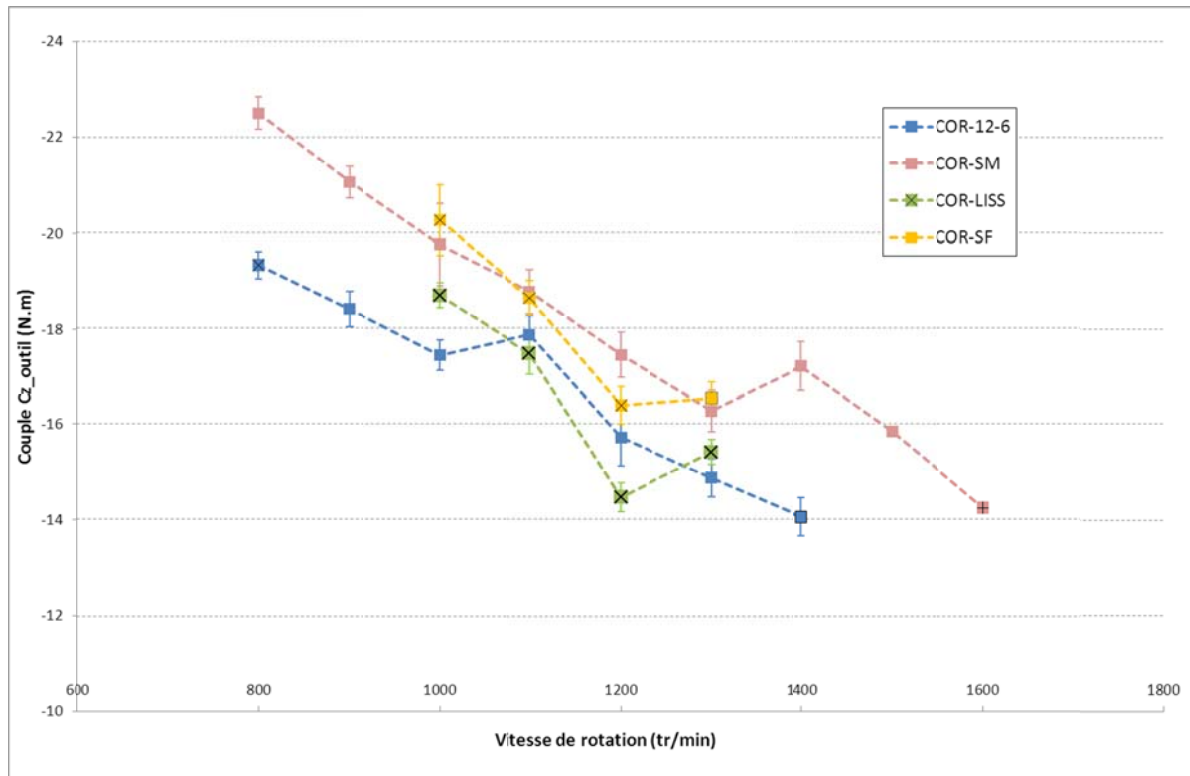


Figure 38. Influence des éléments géométriques du pion sur le couple Cz_{outil} .

Pour des soudures acceptables, La figure 38 montre que l'outil de référence COR-12-6 génère moins de couple par rapport à l'outil avec filetage (COR-SM). Ceci peut être expliqué par le volume de la matière entraînée et plastifiée par le pion qui est moins conséquent par rapport à l'outil de référence.

Les courbes de variations du couple par rapport aux autres paramètres opératoires sont représentées en annexe 3.

5.2.2 Variation des dimensions de l'outil

Dans cette partie, on n'intéresse à analyser l'effet des variations de quelques dimensions de l'outil. Il s'agit principalement du diamètre de l'épaule et du diamètre de base du pion.

5.2.2.1 Influence de sur l'effort de soudage Fx-outil

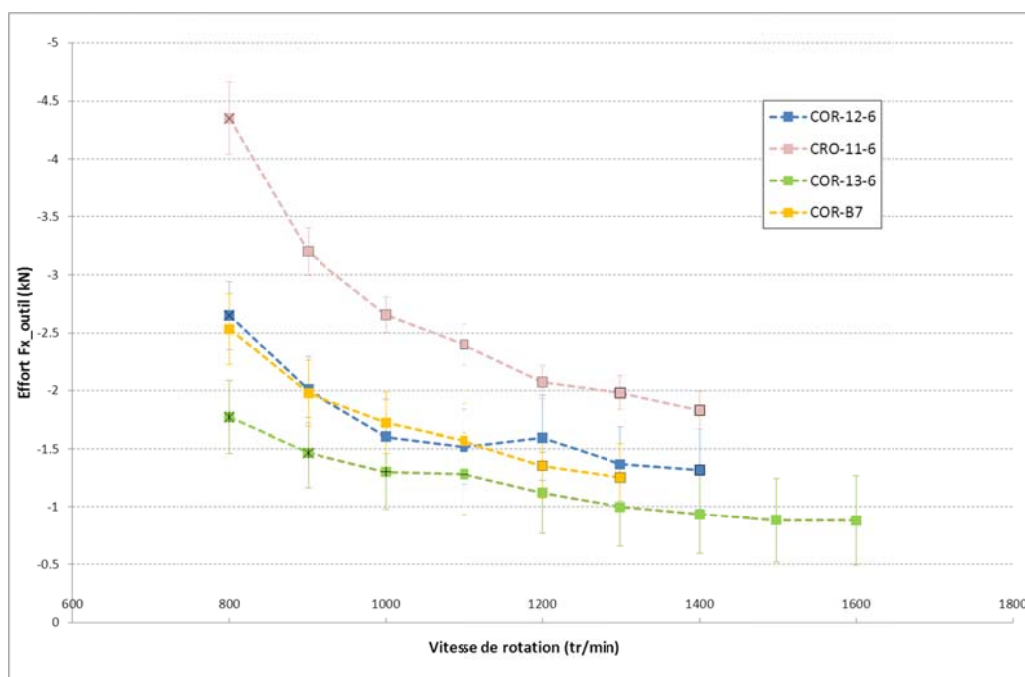


Figure 39. Influence de la variation des dimensions de l'outil FSW sur l'effort d'avance.

Le diamètre de l'épaule joue un rôle important sur l'effort Fx_outil. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation l'augmentation du diamètre de l'épaule favorise une diminution de l'effort Fx. Ceci peut s'expliquer par l'échauffement de la matière à l'avant de la soudure.

Cette diminution de l'effort Fx peut être observée sur la courbe de l'effort Fx en fonction de la vitesse d'avance voir annexe 1.

En fonction de l'effort de forgeage, cette observation est confirmée pour un effort de forgeage égale à 10kN.

5.2.2.2 Influence de sur l'effort de soudage Fy-outil

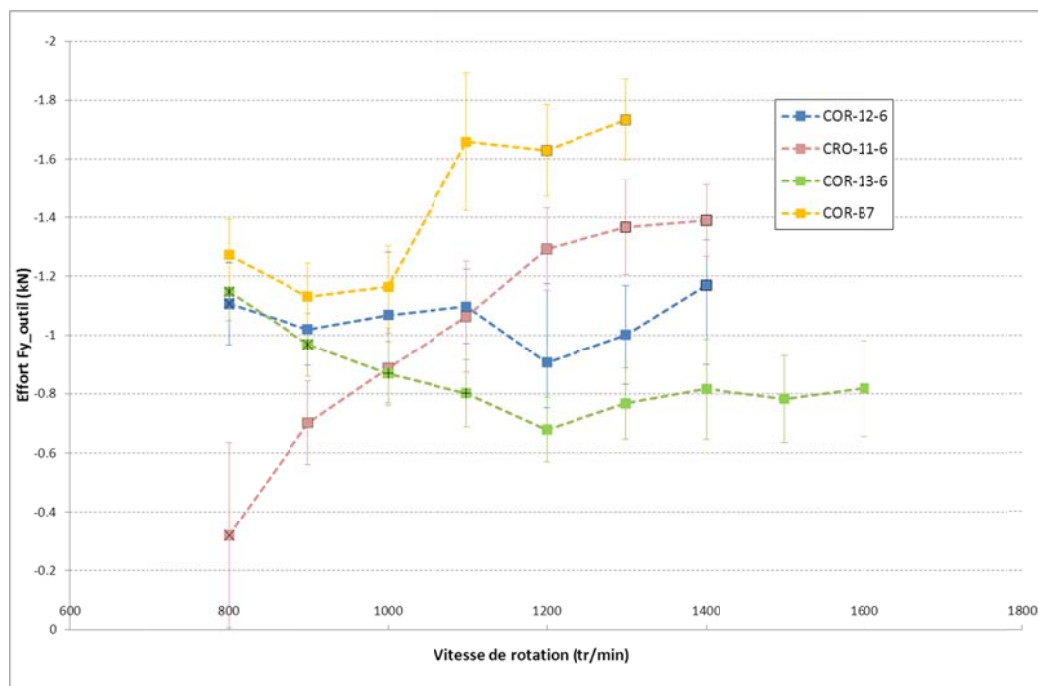


Figure 40. Influence des dimensions de l'outil FSW sur l'effort transversale.

L'outil avec une base de pion de diamètre égale à 7 possède l'effort transversal le plus élevé.

Le graphe montre que pour des soudures correctes (à partir d'une vitesse de 1100 tr/min), l'augmentation du diamètre de l'épaule permet d'atténuer la valeur de l'effort Fy.

En effet comme mentionné précédemment lorsque le diamètre de l'épaule augmente la température de la matière autour du pion augmente.

L'effet d'une augmentation du diamètre de l'épaule sur l'effort Fy_outil reste mineur par rapport à une même augmentation du diamètre de base ceci s'explique par la surface active du pion responsable de la génération de l'effort Fy.

Ces observations restent valables sur les graphiques de l'effort Fy_outil en fonction des autres paramètres de soudage voir annexe 1.

5.2.2.3 Influence de sur le couple de soudage Cz-outil

La figure 41 montre que Le couple Cz au niveau de l'outil chute lorsque la vitesse de rotation augmente.

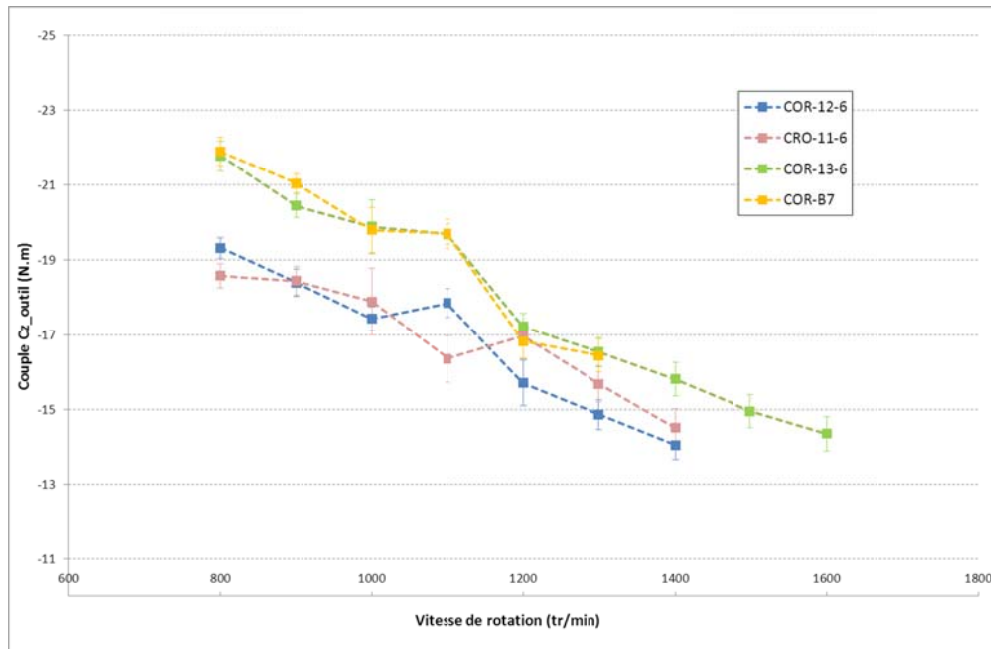


Figure 41. Influence des dimensions de l'outil FSW sur le couple Cz.

Les variations dimensionnelles de la géométrie des pions testés dans cette étude n'a pas permis d'identifier une relation directe avec le couple de soudage sur toute les variations possibles des paramètres de soudage. Cependant l'outil avec le plus grand diamètre 13 mm demeure l'outil qui génère le plus couple Cz.

5.2.3 Variation de la géométrie du pion

La géométrie du pion est un facteur essentiel dans la définition morphologique du cordon. Dans ce paragraphe, on présente les résultats de l'influence de quelques géométries du pion sur les composantes du torseur mécanique.

5.2.3.1 Effet sur la vitesse d'avance

Les courbes représentées dans la figure 42 montrent l'évolution de l'effort d'avance en fonction de la vitesse de rotation. Seulement l'outil de référence COR 12-6 et l'outil COR-CYL ont permis d'obtenir des cordons acceptables dans cette gamme de vitesse.

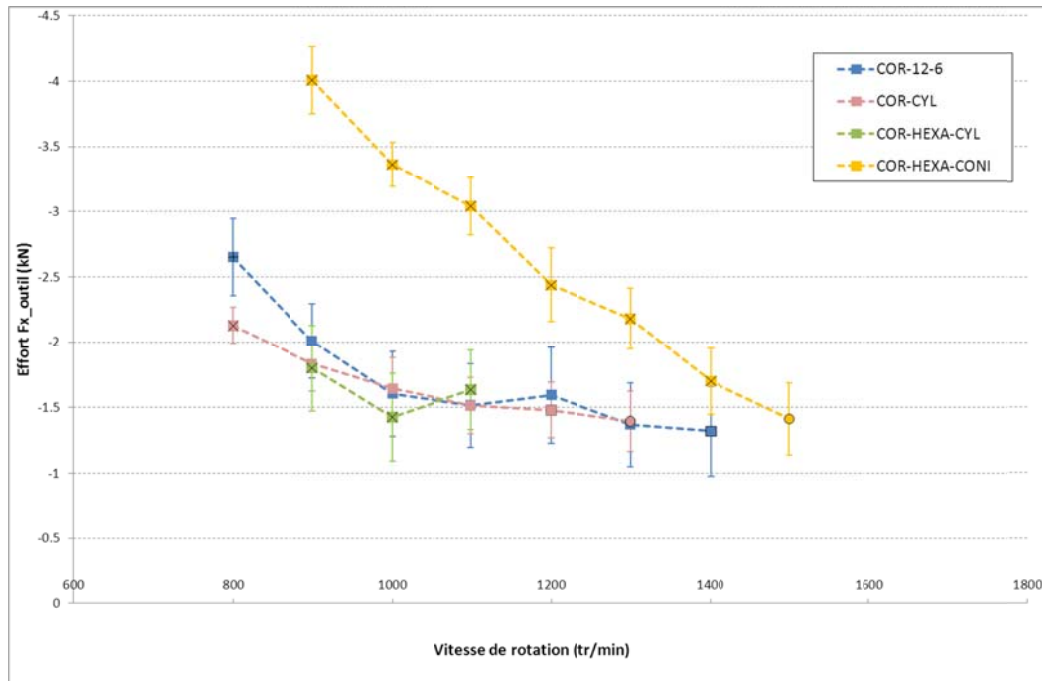


Figure 42. Évolution de l'effort F_{x_outil} en fonction de la vitesse de rotation pour différents géométries du pion FSW.

L'outil cylindrique semble générer les plus faibles amplitudes au niveau de l'effort d'avance. Ceci démontre l'influence de la géométrie de l'outil. La géométrie cylindrique semblerait favoriser la génération de la zone plastifiée à l'avant du pion de manière homogène réduisant l'effort d'avance. Sa forme symétrique doit également permettre à l'outil d'être de manière permanente entouré d'une matière à viscosité homogène.

Les évolutions de l'effort d'avance en fonction de la vitesse de soudage et de l'effort de forgeage sont représentées en annexe 2.

5.2.3.2 Influence sur l'effort F_{y_outil}

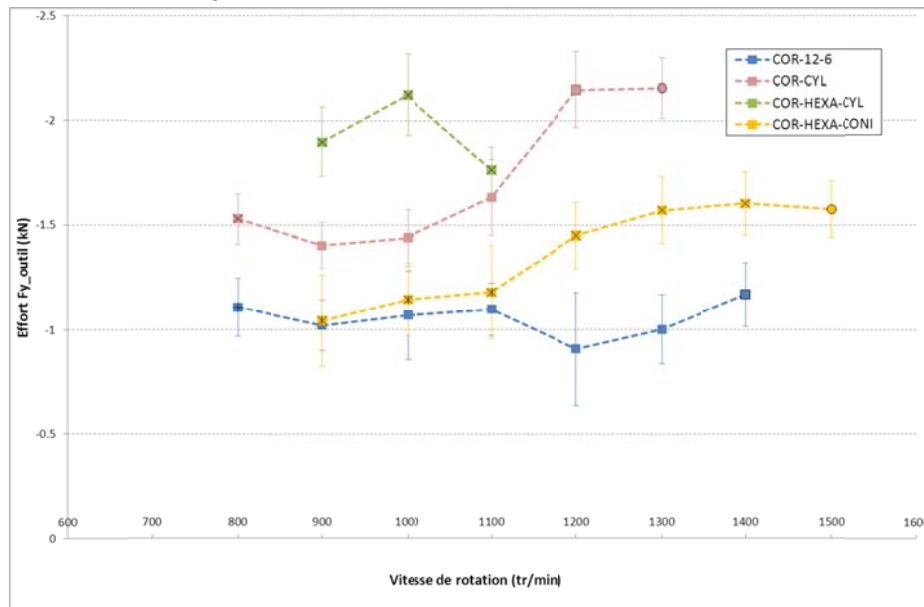


Figure 43. Évolution de l'effort F_{y_outil} en fonction de la vitesse de rotation pour différents géométries du pion FSW.

L'outil COR-12-6 se comporte mieux du point de vue de l'effort transverse. Il possède le minimum de l'effort quelle que soit la vitesse de rotation.

5.2.3.3 Influence sur le couple Cz_{outil}

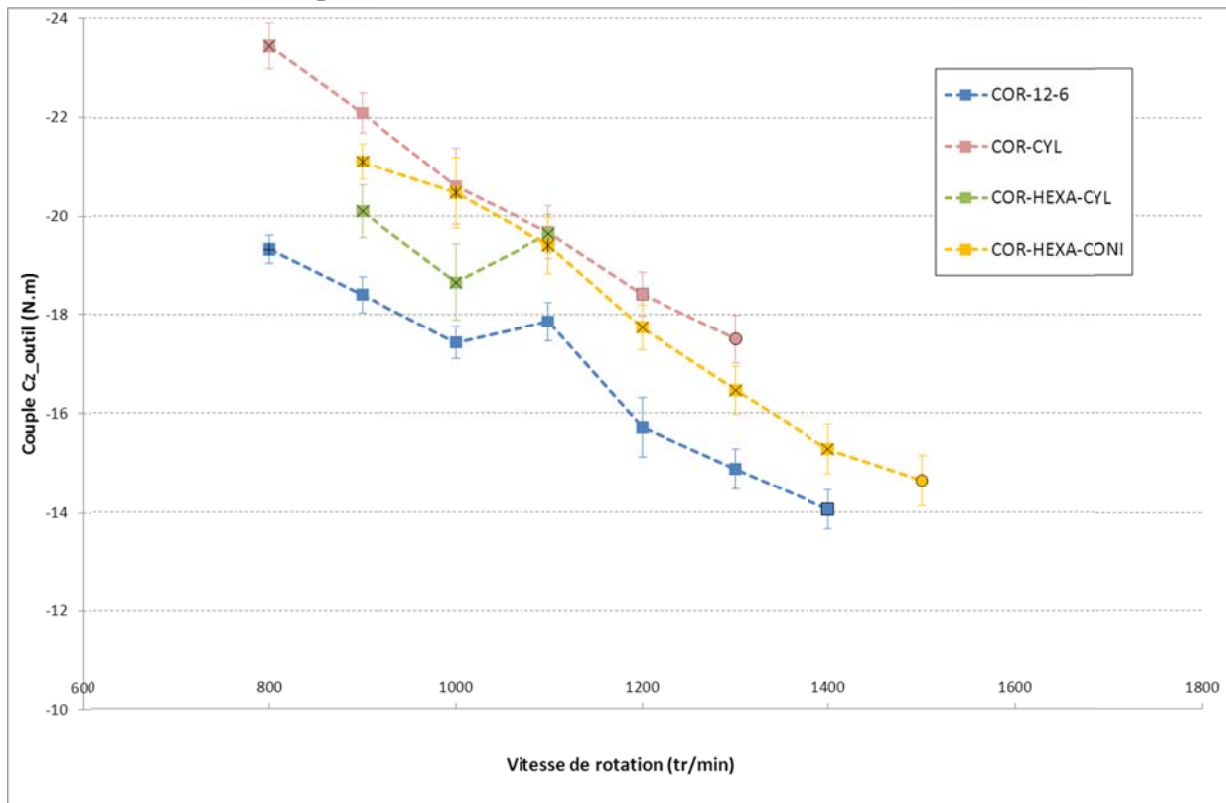


Figure 44. Évolution du couple Cz_{outil} en fonction de la vitesse de rotation.

L'augmentation de la vitesse de rotation permet d'apporter plus de quantité de chaleur à la soudure FSW. Cette quantité de chaleur ramène la matière à un état semi-solide ce qui facilite la déformation plastique de la matière autour de l'outil. En effet, la contrainte d'écoulement de la matière chute lorsque la température augmente ce qui demande moins de couple pour déformer la matière.

L'outil à pion cylindrique présente le couple le plus important pour les vitesses de rotation testées.

Par rapport à la géométrie conique du pion, la géométrie cylindrique provoque une augmentation de l'effort transversal et du couple Cz_{outil} . Ceci est lié au volume entraîné et déformé plus conséquent de ce type de pion.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 50/80

6 COMPARAISON DES OUTILS FSW D'UN POINT DE VUE RENDEMENT ENERGETIQUE ET MALAXAGE

D'un point de vue procédé, nous avons étudié dans la première partie l'impact de la géométrie de l'outil FSW sur les actions mécaniques au cours de différentes phases de soudage.

Dans cette partie, on s'intéresse à étudier l'effet de la géométrie de l'outil sur le produit donc le cordon FSW. Ce dernier est généralement qualifié par sa tenue mécanique qui dépend à la fois de l'aspect microstructural et de la morphologie du cordon.

Ces aspects caractéristiques du cordon FSW sont principalement liés à :

- L'évolution de la température dans le cordon : en effet, l'aspect microstructural du cordon reflète les conditions thermiques du soudage principalement la température maximale atteinte dans les différentes zones du cordon.

- L'écoulement de la matière autour de l'outil : Il s'agit des déformations subies par la matière qui détermine la morphologie et la texture du cordon FSW. La géométrie de l'outil joue le rôle principal dans la définition de la morphologie du cordon principalement le volume malaxé.

L'objectif de cette partie est de comparer les outils testés selon des critères thermiques (énergétique) et des critères morphologiques des cordons obtenus.

6.1 Effet de la géométrie de l'outil sur l'écoulement

6.1.1 Comparaison de la morphologie des cordons FSW

L'outil FSW a une influence directe sur l'aspect macro et microstructural du cordon. En effet, il est à la fois responsable de la déformation et de l'élévation de température dans la zone soudée. Il est parfois facile d'identifier la signature ou l'empreinte (quelques aspects géométriques) de l'outil à partir de la morphologie du cordon obtenue tel que le diamètre de l'épaulement.

Liés aux caractéristiques microstructuraux, la morphologie du cordon FSW est responsable de sa tenue mécanique. D'où la présence de plusieurs travaux traitant l'impact de la géométrie de l'outil sur sa tenue mécanique du cordon (D. Venkateswarlu et al [5]). Le cordon FSW possède une morphologie différente par rapport aux cordons obtenus par les procédés de soudage classiques. Outre ces différentes zones, le cordon FSW présente une morphologie complexe avec plusieurs paramètres géométriques. L'aspect asymétrique du cordon complique le paramétrage de cette morphologie.

A première vue, il est clair que la morphologie des cordons FSW porte bien l'empreinte géométrique de l'outil utilisé particulièrement le diamètre de son épaulement.

Afin de comparer la morphologie du cordon, on s'intéresse dans cette étude à six paramètres géométriques du cordon que nous jugeons pertinents :

- Ae : aire moyenne de la soudure, il représente l'enveloppe de la zone affectée thermo mécaniquement (ZATM) dans une coupe transversale de la soudure. En effet, la déformation de la

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 51/80

matière en FSW génère un contraste visuellement distinguable entre la zone affectée thermiquement (ZAT) et la ZATM.

- Ad : représente l'aire du défaut interne dans un cordon.
- αA , αR : Angles au niveau de l'épaule. Ce sont les angles représentatifs de la déformation de la matière par l'effet combiné de l'épaule et du pion. La différence entre les valeurs de ces angles représente un indicateur de l'asymétrie du cordon.
- dr : est représentatif du manque de pénétration. Ce défaut critique de la soudure est mieux identifiable dans le cas du soudage en bout à bout par des coupes macrographique ou des essais de pliage envers. Il faut préciser que Jm ne correspond pas à la valeur du manque de pénétration, il est plutôt caractéristique d'une épaisseur visuellement non malaxée au-dessous du pion.
- Lm : largeur à mi- épaisseur du cordon : elle est directement liée au diamètre du pion à mi- épaisseur et définit la zone déformée autour du pion.

La figure 45 présente une macrographie typique d'un cordon FSW avec l'illustration des différents paramètres géométriques.

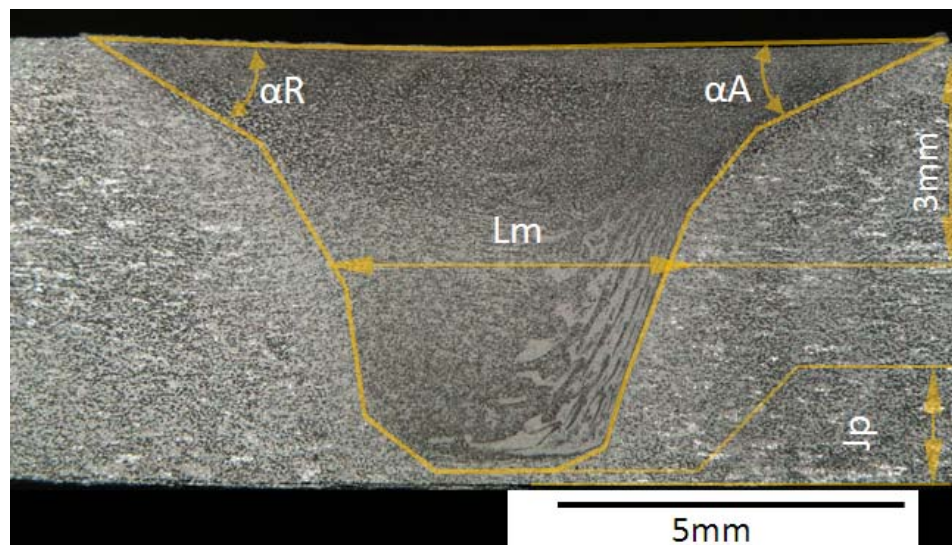


Figure 45. Paramètres géométriques et Morphologie du cordon FSW dans une section transversale.

Le tableau 4 représente les différents paramètres géométriques des cordons obtenus avec les différents outils utilisés pour l'essai de référence (450 mm/min, 1100 tr/min et 10 kN). L'étude de ces paramètres restera préliminaire puisqu'on ne possède pas d'élément permettant de connaître les erreurs liées à la mesure. Les outils existants dans le logiciel de traitement d'image « ImageJ » ont permis de mesurer les paramètres géométriques après calibration de chaque macrographie.

Tableau 3. Identification des paramètres géométriques du cordon FSW.

Référence Outil	Ae [mm ²]	Ad [mm ²]	αA [°]	αR [°]	dr [mm]	Lm [mm]
COR-12-6	33	0	24,03	32,8	0,1	4,82
COR-LISS	30,28	0,06	25,26	33,87	-	4,52
COR-SM	30,9	0	24,2	31,58	-	4,33
COR-SF	34,87	0,2	22,87	35,18	-	4,56
COR-CYL	46,76	0	24,18	44,44	-	6,96
HEX-CONI	33,36	0,938	25,87	39,54	0,19	4,82
HEX-CYL	43,29	0,172	35,76	35,31	-	6,99
COR-11-6	32,56	0	30,98	37,87	-	4,88
COR-13-6	29,78	0	18,33	22,45	0,244	4,51
COR-12-6-B7	38,94	0	25,84	36,29	-	5,94

Le tableau 3 montre que l'aire de l'enveloppe du cordon FSW avec les mêmes dimensions géométriques de base (COR-12-6, COR-LISS, COR-SM, HEXA-CONI, COR-11-6, COR-13-6) sont quasiment identiques. Néanmoins, on remarque que les méplats et le filet permet un malaxage d'une enveloppe plus étendue. Ce résultat est en accord avec les mesures de largeur à mi- épaisseur du cordon. En effet, la présence de ces formes sur le pion entraîne plus de matière en déformation.

D'autre part, on constate que la présence des méplats accentue la dissymétrie du cordon. Contrairement à celui de l'outil HEXA-CYL, L'outil COR-CYL possède un cordon le plus asymétrique d'un point de vu angles au niveau de l'épaulement.

Dans un travail de perspective, il est important de relier la qualité mécanique de la soudure avec ces paramètres géométriques. Cette démarche est primordiale pour le choix de la géométrie de l'outil. D'autres paramètres géométriques du cordon FSW peuvent être pris en compte dans cette démarche telle que l'indentation de l'épaulement.

6.1.2 Comparaison des indicateurs d'écoulement autour du pion

Afin de comparer le rendement de malaxage des différentes géométries du pion, On s'appuie sur les travaux de K.Elangovan et al [7] qui représentent deux indicateurs sur le malaxage de la matière en FSW.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 53/80

Un premier indicateur évoque le volume de la matière déformée pendant un tour. Il représente le rapport (Volume statique/Volume dynamique). C'est le rapport du volume occupé par le pion au repos sur le volume occupé pendant sa rotation. Il est donc représentatif de la portion de matière déplacée pendant un tour. Dans notre cas, l'élément représentatif présente la section du pion à mi-hauteur (3mm).

L'indicateur de malaxage est exprimé par :

$$Id_{malax} = \frac{Aire\ dynamique}{Aire\ Statique}$$

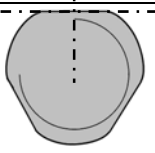
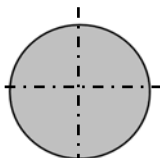
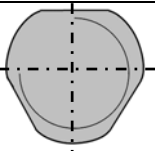
Le deuxième indicateur est représentatif du nombre des surfaces planes (exemple : les méplats) que présente le pion. Ces surfaces permettent des pulsations supplémentaires autres que celle obtenue par l'avance par tour.

$$Id_{agitation} = Nombre\ des\ surfaces\ planes$$

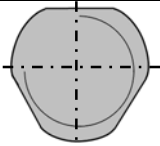
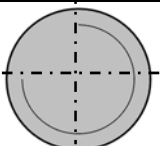
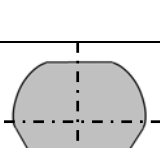
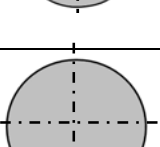
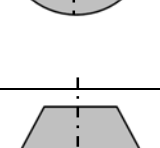
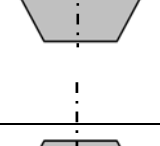
Dans ces travaux Gratcap [6] a montré par visualisation que le nombre de lobes refoulés par le pion est directement lié au nombre de surface plane présente sur le pion.

Il a été conclu que les formes sur le pion ont un effet d'agitation dans l'écoulement de la matière autour du pion. Cette agitation provoque ainsi un raffinement de grain au niveau du noyau du cordon FSW [5][7].

Tableau 4. Tableau des indicateurs d'écoulement autour du pion

OUTIL FSW	Elément représentatif en Statique	Aire Statique [mm²]	Elément représentatif en Dynamique	Aire Dynamique	Indicateur de malaxage	Indicateur d'Agitation
COR-12-6		14.01		14.89	1.06	3
COR-12-B7		19.69		22.66	1.15	3

 ANR COROUSSO	Projet COROUSSO Livraison n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 54/80

COR-CYL		24.98		28.27	1.13	3
COR-SM		14.57		14.89	1.02	0
COR-SF		14.14		14.89	1.05	3
COR-LISS		14.89		14.89	1	0
COR- HEXA- CONI		11.55		13.90	1.2	6
COR- HEXA- CYL		22.96		28.27	1.23	6

La présence de deux formes ou plus sur le pion FSW a un effet combiné sur le malaxage de la zone soudée. Cet effet conduit à complexifier la nature de l'écoulement de matière autour de l'outil. Généralement, l'ajout des méplats contribue à un meilleur malaxage donc un affinement des grains au niveau du noyau de la soudure. Néanmoins les arêtes vives peuvent produire des défauts de type tunnel.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 55/80

6.2 Effet de la géométrie sur la température de soudage

6.2.1 Introduction

En soudage par friction malaxage, la génération de chaleur est un phénomène complexe qui dépend de plusieurs facteurs opératoires et autres auxiliaires. Cette chaleur nécessaire pour le soudage est dans sa majorité introduite par l'action mécanique de l'outil sur la matière. Les travaux de Bastier [8] ont montré que l'apport énergétique intrinsèque dû aux déformations plastiques peut être négligé. L'apport énergétique fourni mécaniquement permet d'avoir un indicateur sur la quantité de chaleur ainsi la température de soudage. Cette dernière prend son importance du fait de son influence sur la tenue mécanique de la zone soudée.

Dans cette partie, on se propose de comparer les outils utilisés d'un point de vue énergétique et thermique. N'ayant pas la possibilité d'avoir une mesure directe de la température de soudage pour chaque outil utilisé, nous relierons la température de soudage à l'énergie nominale apportée au cours du soudage.

Pour comparer l'efficacité (ou rendement) des différents outils d'un point de vue énergétique, on s'intéresse dans cette étude à l'énergie développée au cours du soudage. Dans notre cas, cette comparaison est significative et permettra de classer les outils selon leur efficacité énergétique.

L'efficacité énergétique des outils FSW étudiés se mesure selon le critère de l'obtention d'un cordon sans défaut visible macroscopiquement (ordre du centième). Cette étude peut être améliorée par l'adoption d'un critère plus qualitatif du cordon FSW (exemple : la limite élastique, l'allongement etc. ...)

D'autre part, cette comparaison peut aussi utiliser comme indicateur de l'efficacité thermique des outils puisqu'on considère que l'environnement expérimental est identique pour tous les essais. Cet indicateur thermique reste discutable car il existe d'autres sources de chaleur principalement la déformation plastique. En effet, la déformation de la matière change d'un outil à un autre (paragraphe précédente). Les conditions thermiques peuvent aussi changer d'un outil à un autre telle que l'expression du flux de chaleur de convection.

Dans la littérature, il existe plusieurs formulations permettant d'avoir une indication sur la température de soudage.

Argabest et al [10] définissent le rapport w^2/v_a comme étant un pseudo indicateur de température :

$$\frac{T}{T_m} = K \left(\frac{\omega^2}{v \times 10^4} \right)^\alpha$$

6.2.2 Comparaison de l'énergie développée au cours du soudage

A l'heure actuelle, Il est encore difficile d'identifier l'énergie réelle transmise à la soudure. En effet, l'énergie développée au cours du soudage est dissipée sous plusieurs formes entre l'environnement, l'outillage, l'outil et le cordon à réaliser.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 56/80

L'énergie de soudage est définie comme la quantité d'énergie transférée par unité de longueur de soudure tout au long du déplacement de la source de chaleur exprimée en joules par millimètre. L'énergie de soudage par friction malaxage est exprimée par l'équation suivante :

$$E = \frac{C. \omega + F_x. V_a}{V_a}$$

La figure 46 suivante présente l'énergie développée au cours de soudage pour les différents outils utilisés.

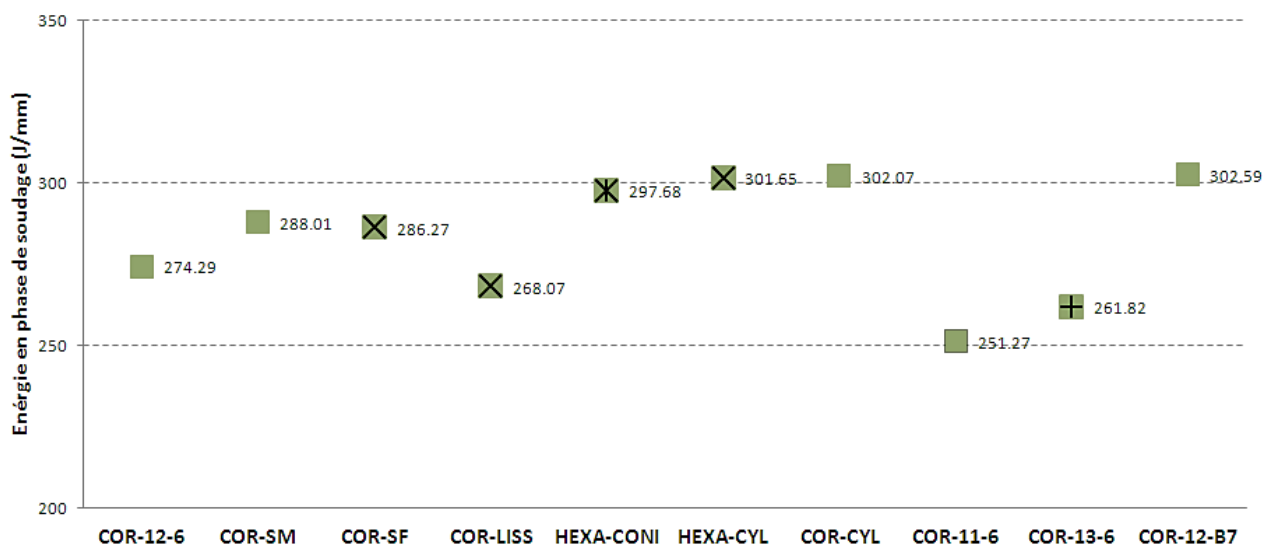


Figure 46. Energie développée au cours du soudage des outils utilisés

Si on suppose que les échanges thermiques outil/matière et que l'énergie thermique développée par la déformation plastiques sont similaires pour tous les outils utilisés. Les constations décrites précédemment peuvent être reportées pour la description de la température de soudage puisque le matériau soudé est le même pour tous les essais.

7 CONCLUSION

Cette étude a montré la sensibilité des efforts générés au cours du soudage envers les variations géométriques de l'outil FSW. Il sera donc difficile d'avoir un modèle des efforts applicable sur toutes géométries d'outil FSW. La correction off ligne de la trajectoire d'un robot soudeur FSW semble être très compliquée à mettre en œuvre.

En comparant les efforts générés en FSW pour les différents outils utilisés, nous avons constaté l'effet des différents paramètres géométriques.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 57/80

La présence d'un filetage sur le pion d'un outil FSW a permis d'augmenter l'effort d'avance et réduire l'effort transversal. En ce qui concerne la présence des méplats, nous avons observé une diminution de l'effort d'avance. Néanmoins, nous n'avons pas pu conclure sur leurs effets sur l'effort transversal.

Nous avons pu conclure sur l'utilité du filetage pour obtenir un cordon acceptable. Les soudures obtenues avec filet présentent des cordons plus compacts.

La présence des méplats est elle aussi capitale. Leur présence assure une soudure plus froide en assurant des agitations supplémentaires de la matière au sein du cordon. Ces méplats permettent aussi d'éviter l'effondrement de l'outil et ainsi d'élargir la marge de manœuvre en effort de forgeage.

Concernant les dimensions de l'outil FSW, il est clair que le diamètre de l'outil joue un rôle important dans l'apport de chaleur nécessaire pour malaxer la matière. A paramètres de soudage égaux, l'augmentation du diamètre de l'épaulement semble réduire l'effort d'avance. En effet, cette augmentation permet une élévation de la température à l'avant et facilite ainsi l'avance de l'outil. Elle permet aussi d'avoir un couple résistant plus élevé. Pour l'outil à base de pion augmenté, l'effort d'avance semble être peut sensible à cette variation. Par contre, on remarque une augmentation de l'effort transversal et du couple ceci est lié au volume important de la matière déformé et plastifié par cet outil.

En inspectant les macrographies des soudures avec variation des dimensions, nous avons constaté que l'augmentation du diamètre de l'épaulement a contribué à un défaut de manque de pénétration pour des mêmes conditions opératoires. Pour éviter ce défaut, il existe plusieurs solutions telles que l'augmentation de l'effort de forgeage. Par contre, la diminution du diamètre de l'épaulement a engendré un défaut d'effondrement. Notons aussi que l'outil à base de pion égale à 7 mm génère plus de flash car la matière refoulée par ce pion ne peut pas être totalement retenue en-dessous de l'épaulement.

Une géométrie cylindrique du pion a permis de diminuer sommairement l'effort d'avance. Par contre cette géométrie présente un effort transversal supérieur à celui développé par un pion conique.

Les campagnes d'essais réalisées ont permis aussi de mettre en avant l'influence de conditions thermiques initiales sur la qualité de la soudure ainsi que sur les efforts générés. Une soudure réalisée sur une plaque ou/et avec un outil déjà chaud peut présenter des caractéristiques différentes par rapport à celle obtenue par une configuration nominale de soudage.

De même, le nombre élevé de paramètres intervenants durant le soudage par friction malaxage rend nécessaire la prise en compte de tous les déviations possibles et de s'assurer de la robustesse du point de fonctionnement.

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 58/80

Bibliographie

- [1] Y.N. Zhang, X. Cao, S. Larose and P. Wanjara, Review of tools for friction stir welding and Processing, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol.51, 2012.
- [2] H. Schmidt, J. Hattel and J. Wert, An analytical model for the heat generation in friction stir welding, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 12 (2004) 143–157
- [3] J. Schneider, A. Nunes, M. Brendel. The Influence of Friction Stir Weld Tool Form and Welding Parameters on Weld Structure and Properties: Nugget Bulge in Self- Reacting Friction Stir Welds. 8th International Symposium on Friction Stir Welding, Germany.
- [4] R. S. Mishra and M. W. Mahoney: Friction stir welding and processing; 2007, Materials Park, OH, ASM International.
- [5] D. Venkateswarlu, N.M. mandal, M. M. Mahapatra, and S. P. Harsh, tool design effects for fsw of aa7039. Welding journal.
- [6] F. Gratecap, Contributions au procédé de soudage par frottement et malaxage FSW. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes, 2007, France.
- [7] K. Elangovan, V. Balasubramanian Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy.
- [8] A. Bastier. Modélisation du soudage d'alliages d'aluminium par friction et malaxage. 2006.
- [9] J P Martin, C Stanhope and S Gascoyne. Novel techniques for corner joints using friction stir welding. Friction Stir Welding and Processing VI.TMS-2011.
- [10] W.Arbegast, Modeling friction stir joining as a metal working process, hot deformation of aluminum alloys III, TMS, San Diego, pp 313-327, 2003.
- [11] ZIMMER, Sandra ; CHAPEAU, Willie ; DA COSTA, Béatrice ; STASSART, Xavier ; BEN SLIMA AYADI, Nadia ; LANGLOIS, Laurent ; GOUSSAIN, Jean-Claude ; DE MEESTER, Bruno ; D'ALVISE, Laurent. 2006, "Manuel Pédagogique, Le soudage par friction malaxage, friction stir welding", ISBN 978-2-900781-67-8

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 59/80

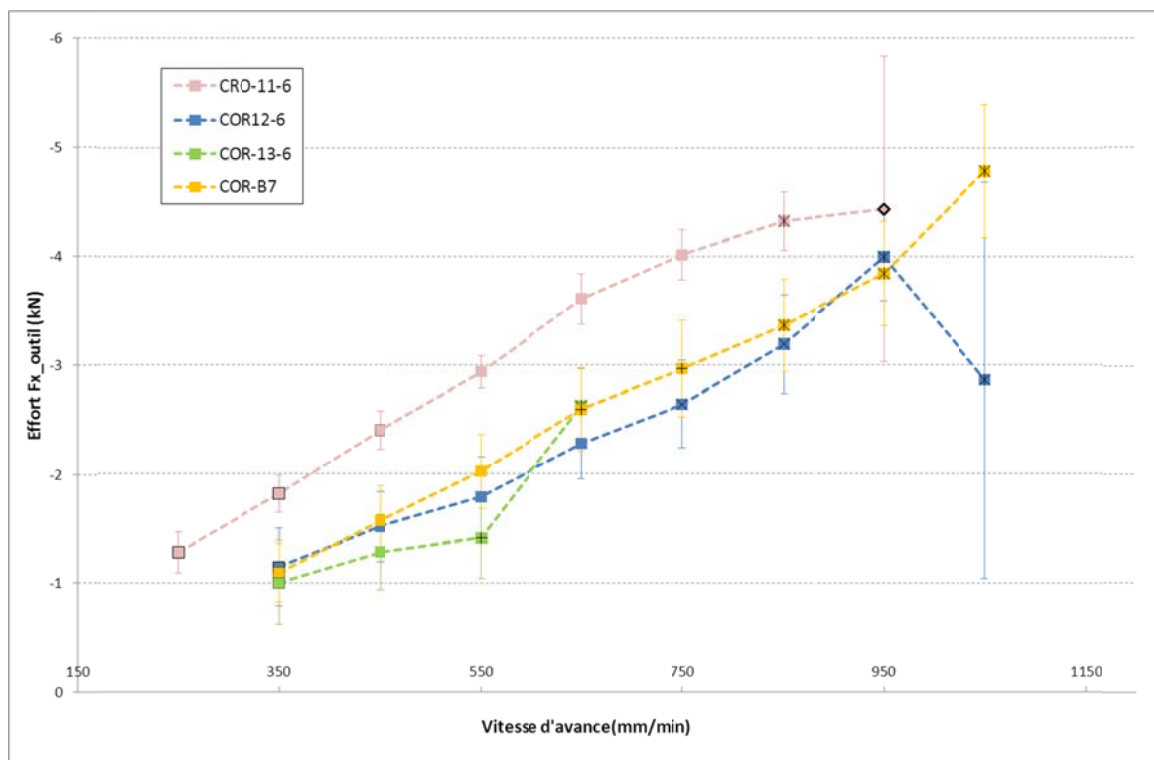
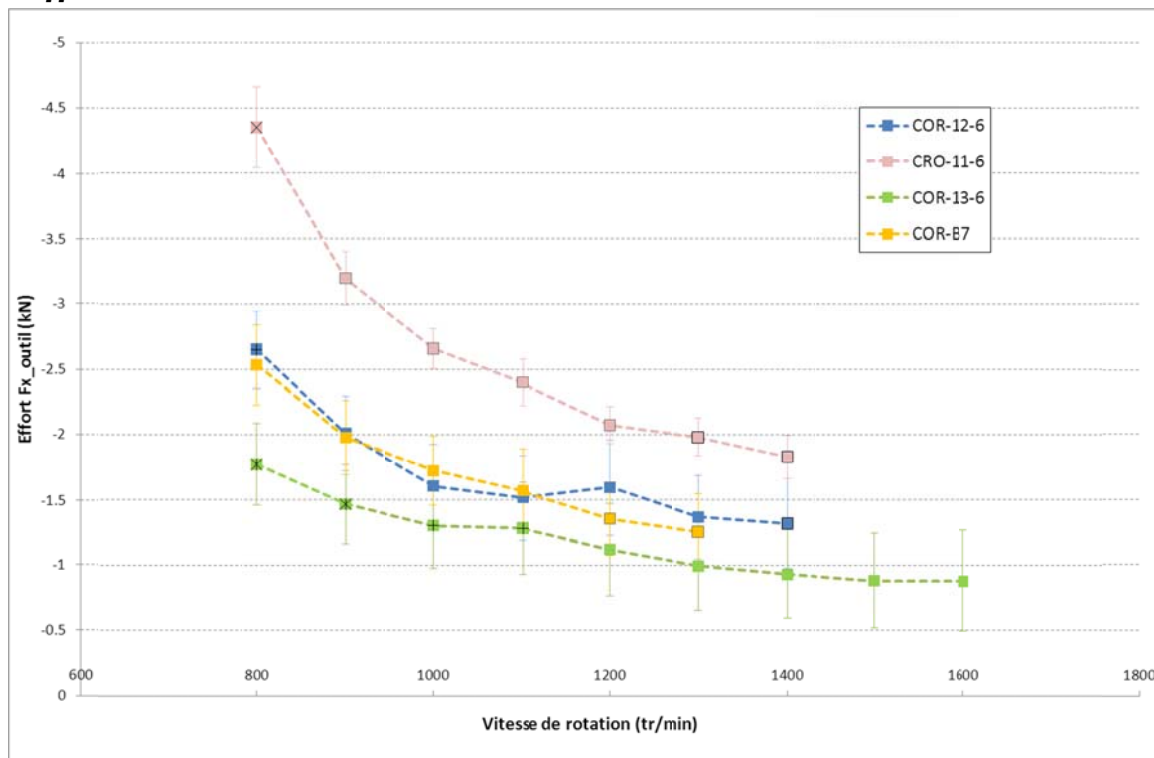
Annexes

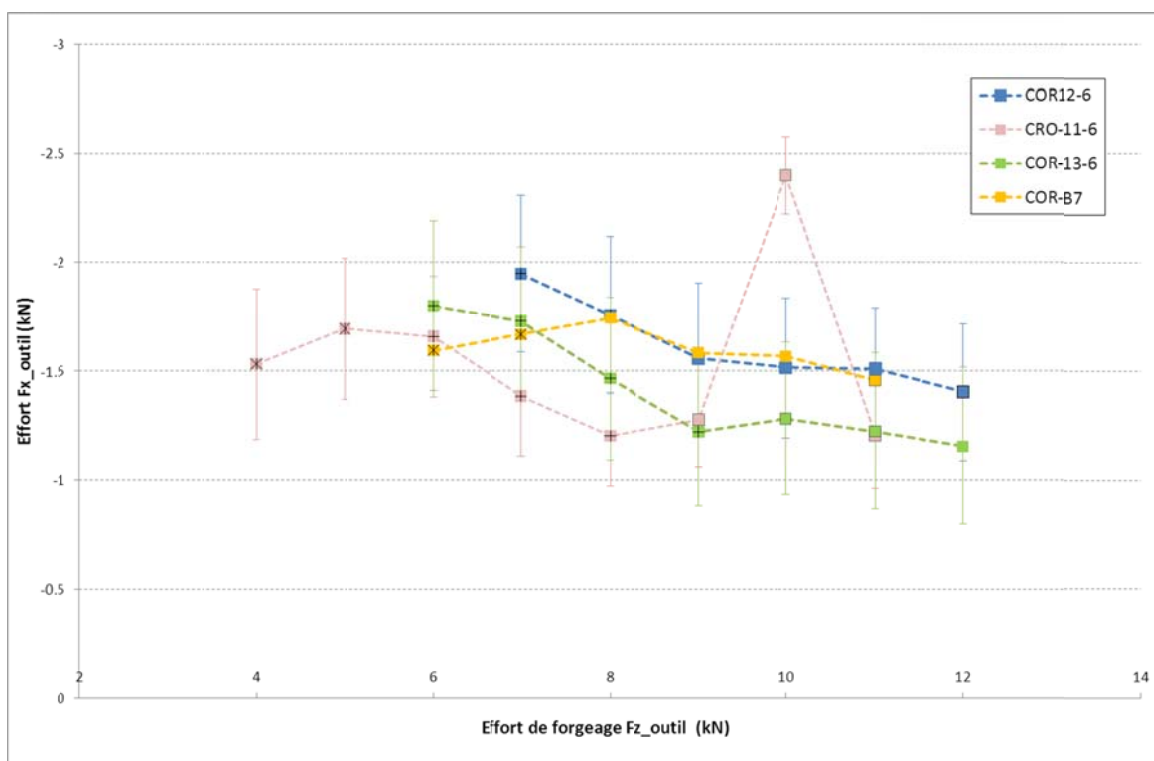
	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 60/80

	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 61/80

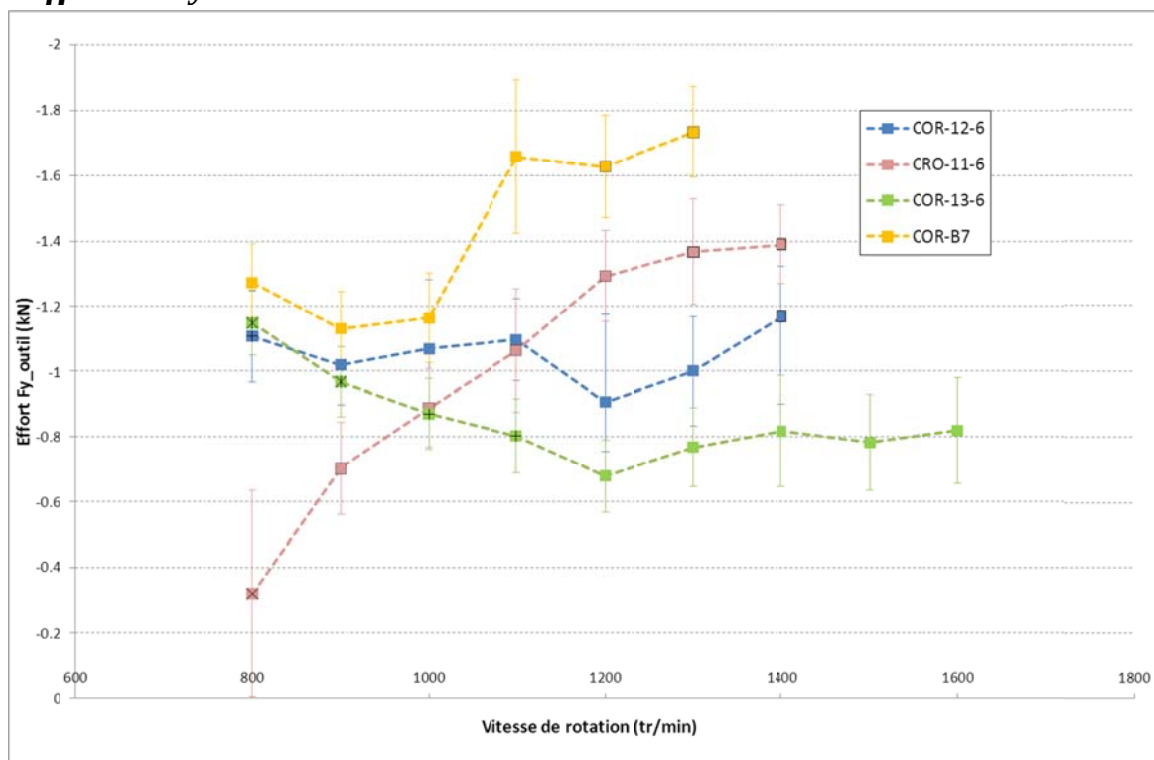
Annexe 1 : Variation des dimensions de l'outil FSW

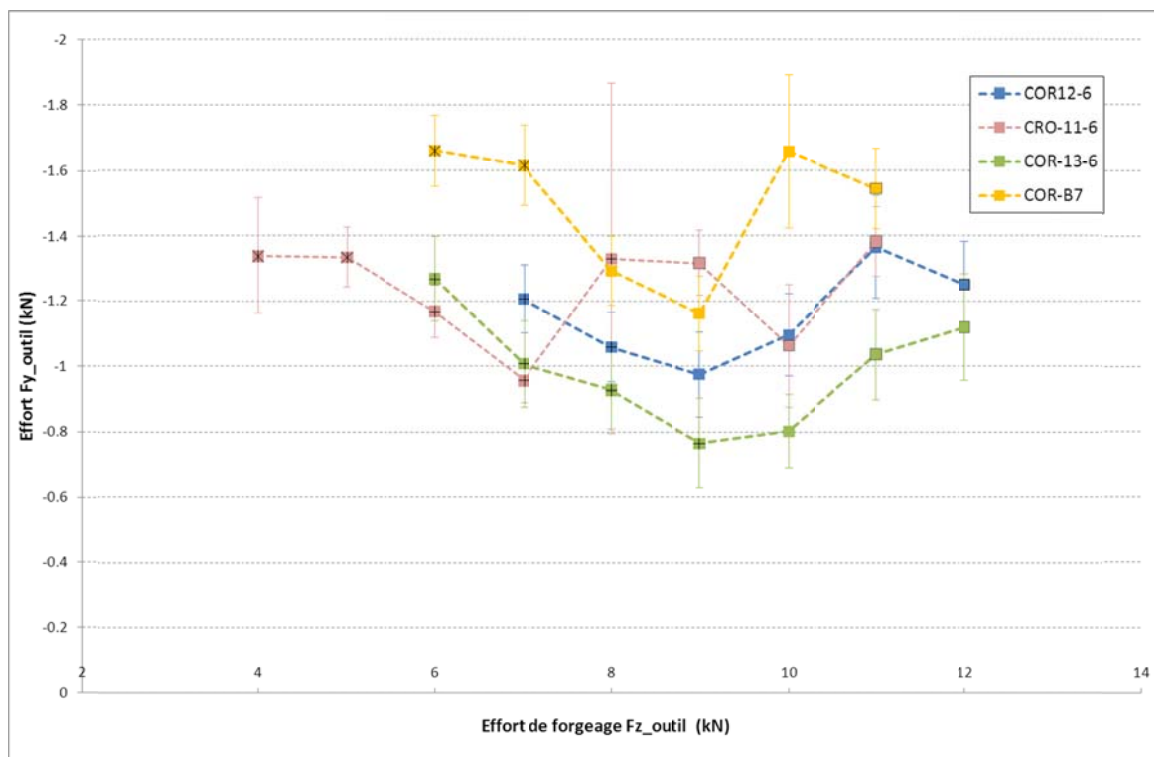
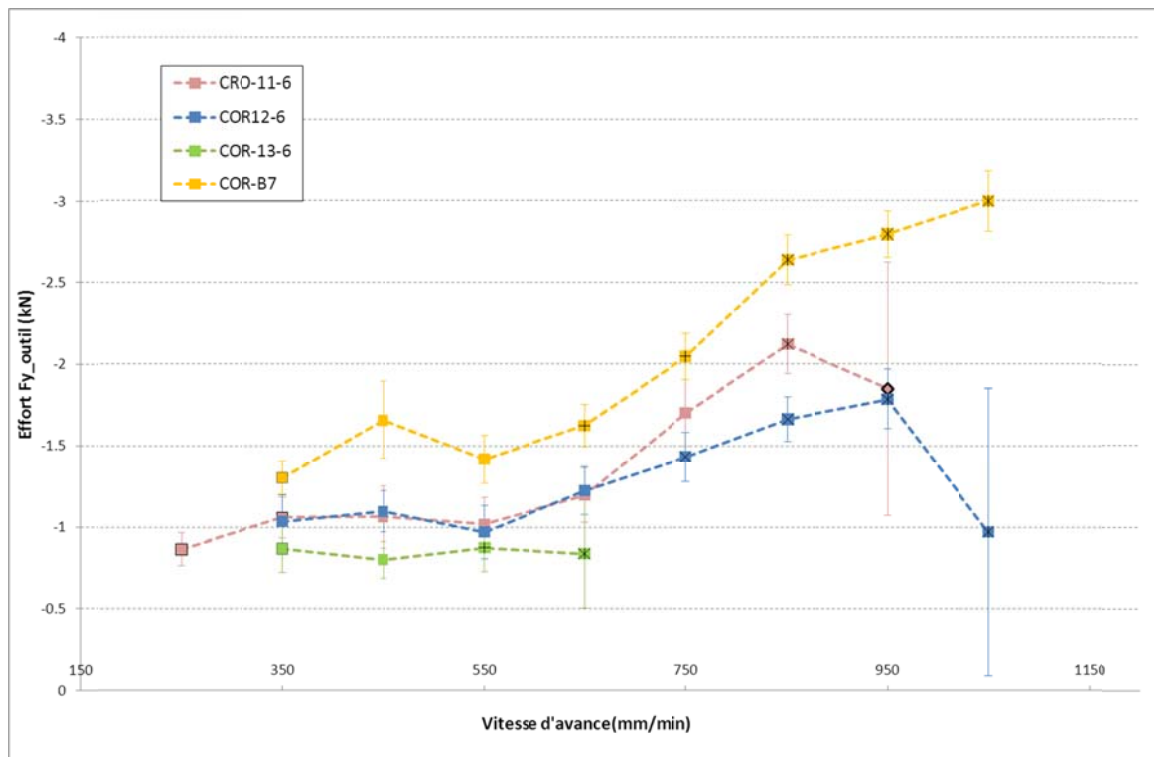
1. Effet sur F_x



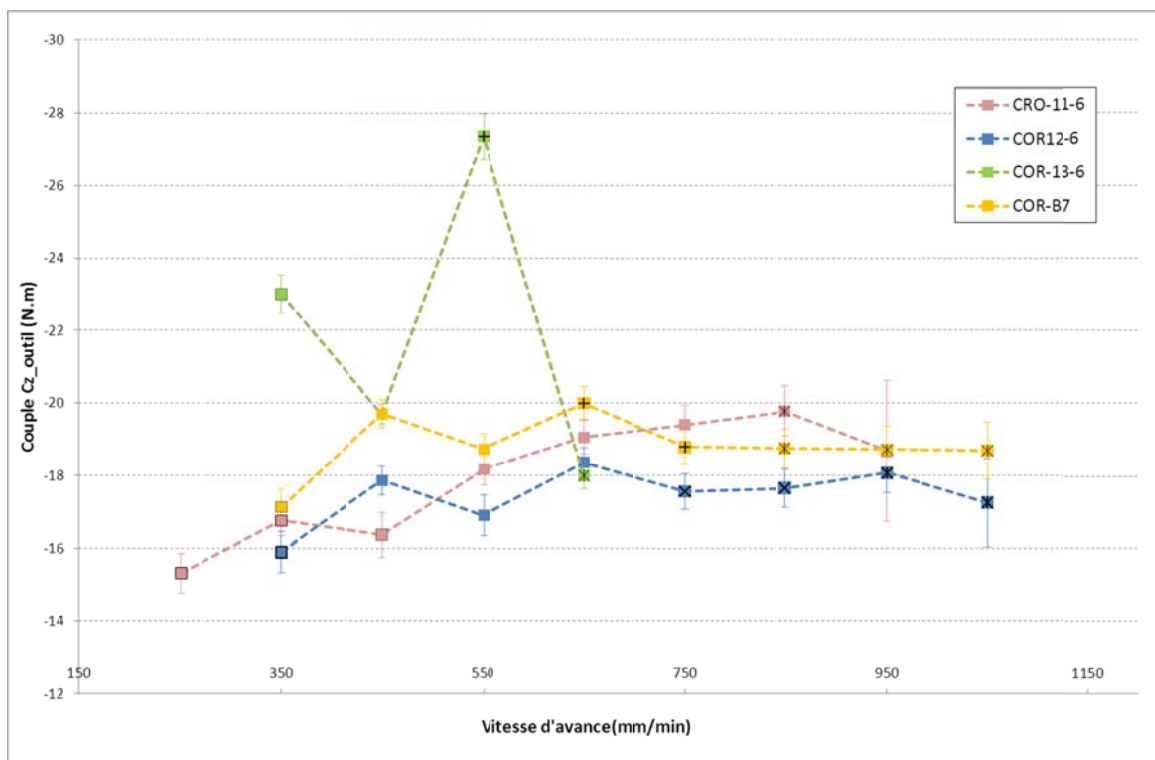
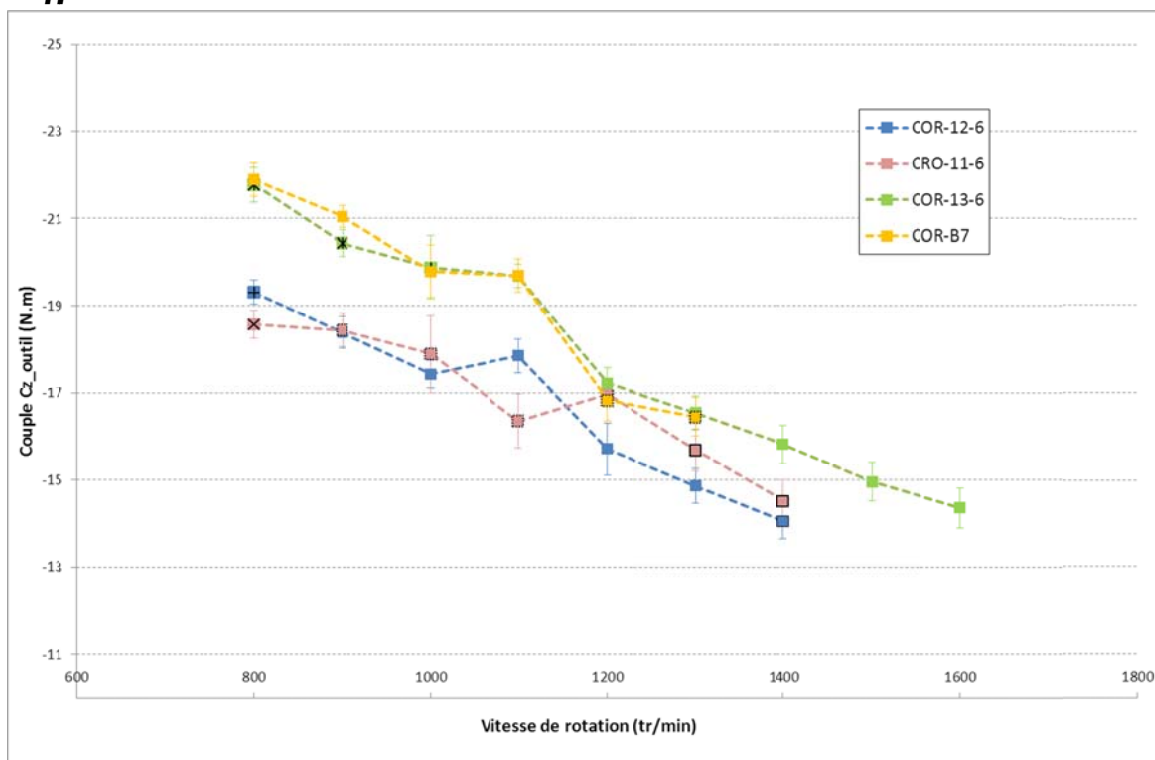


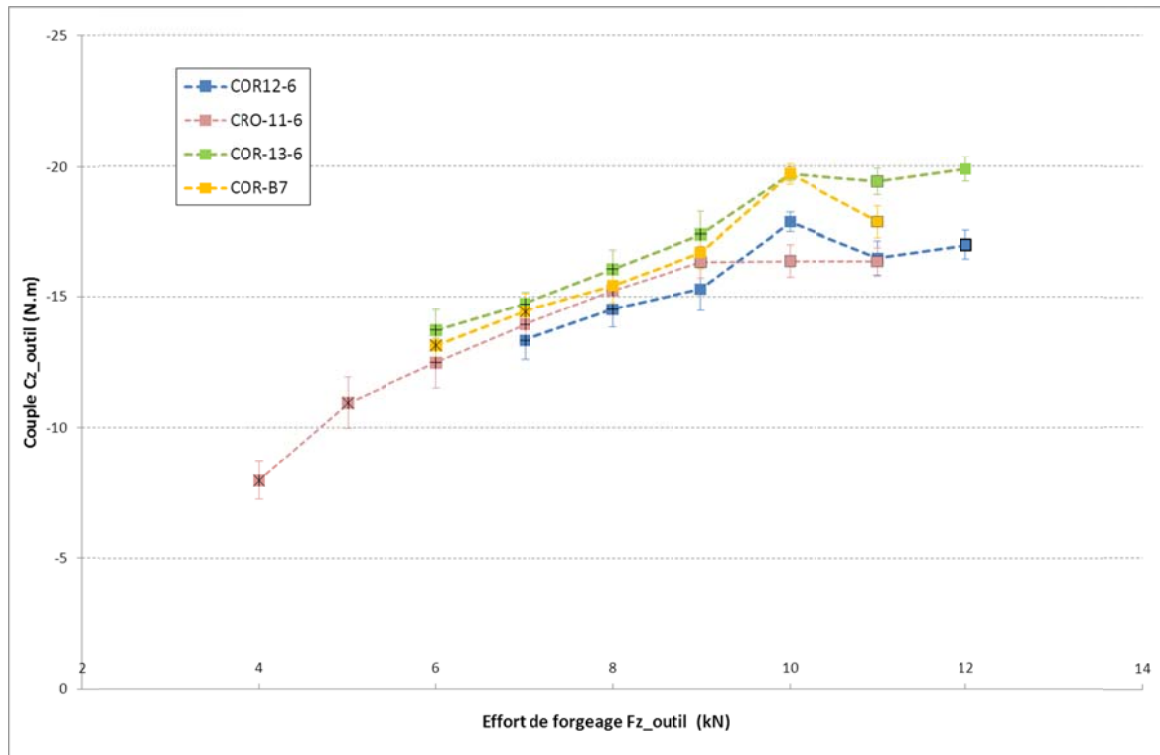
2. Effet sur F_y





3. Effet sur Cz

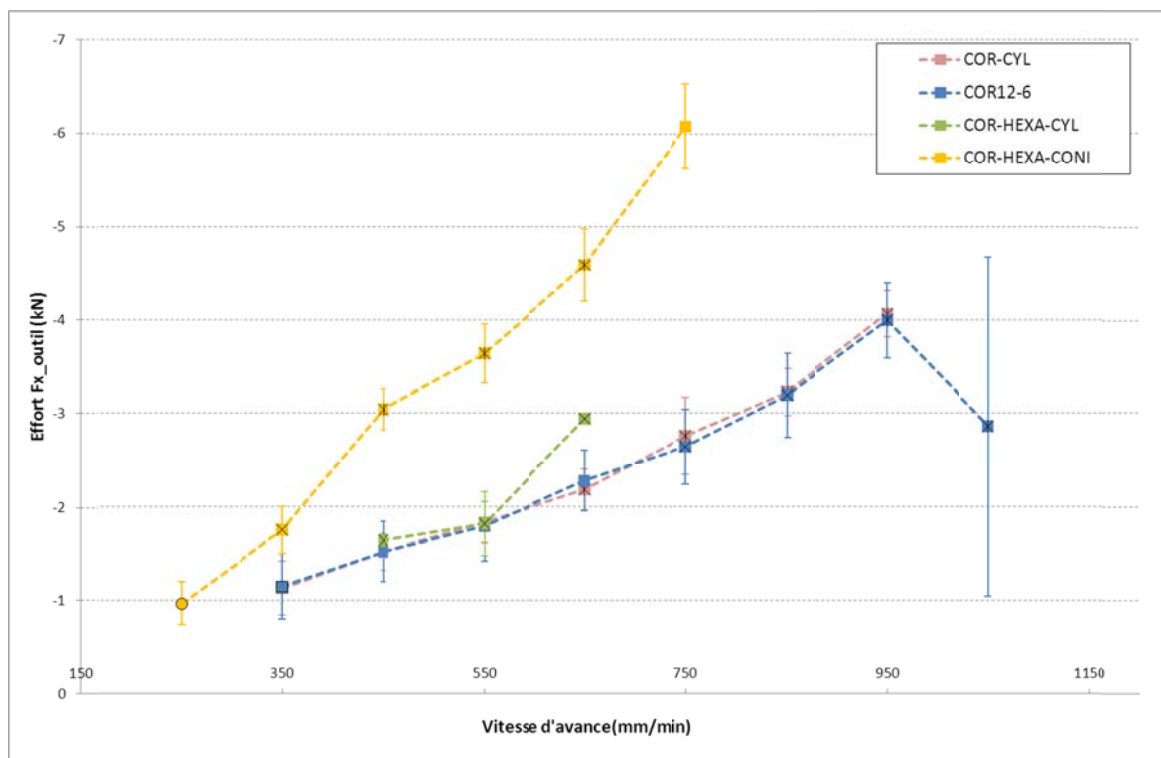
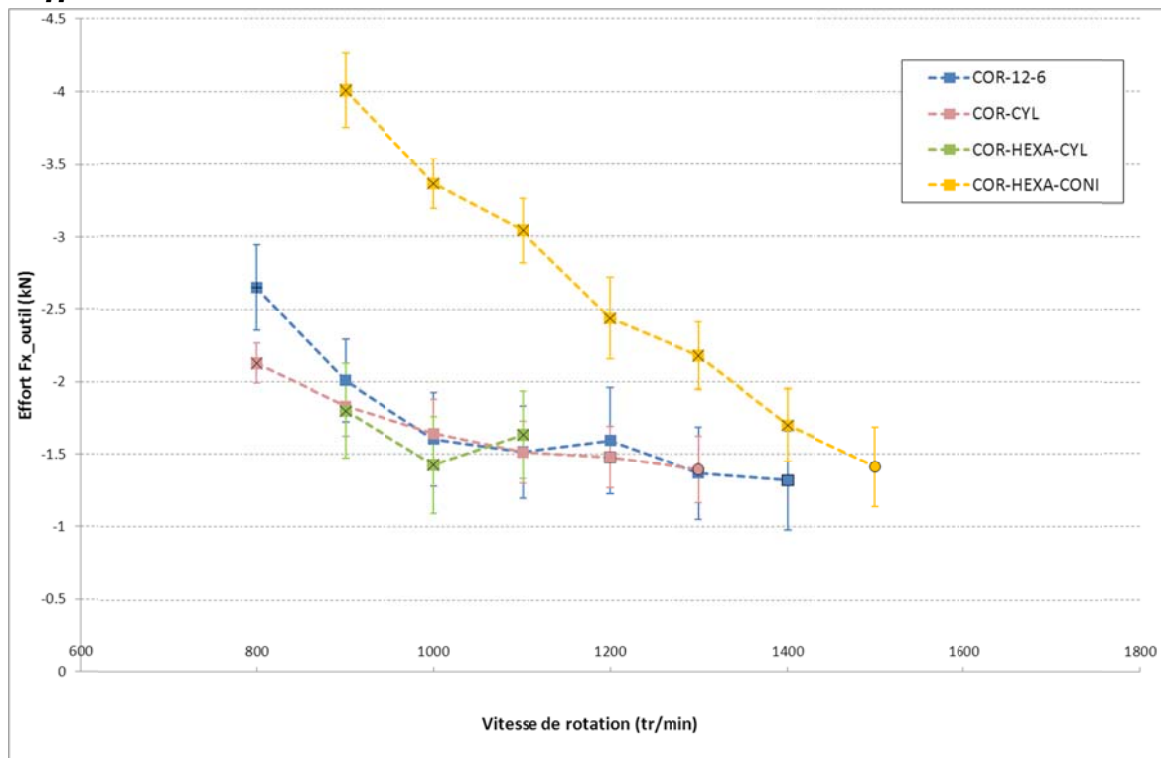


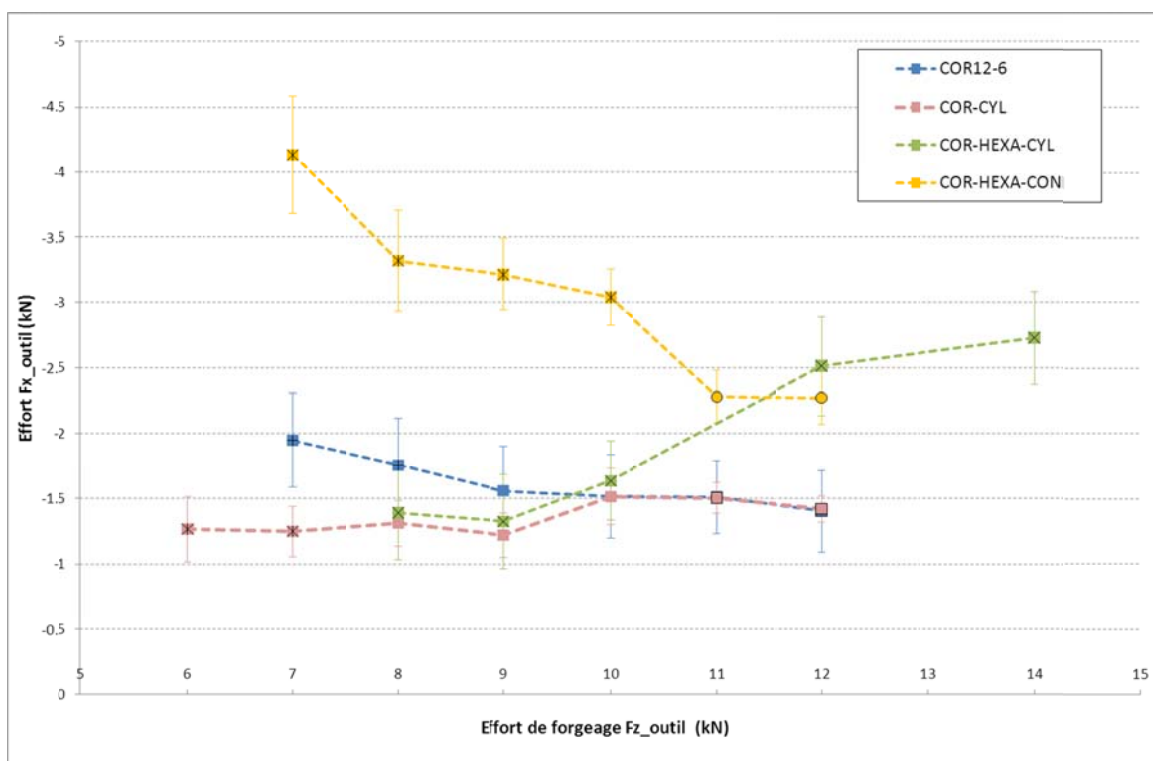


	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 67/80

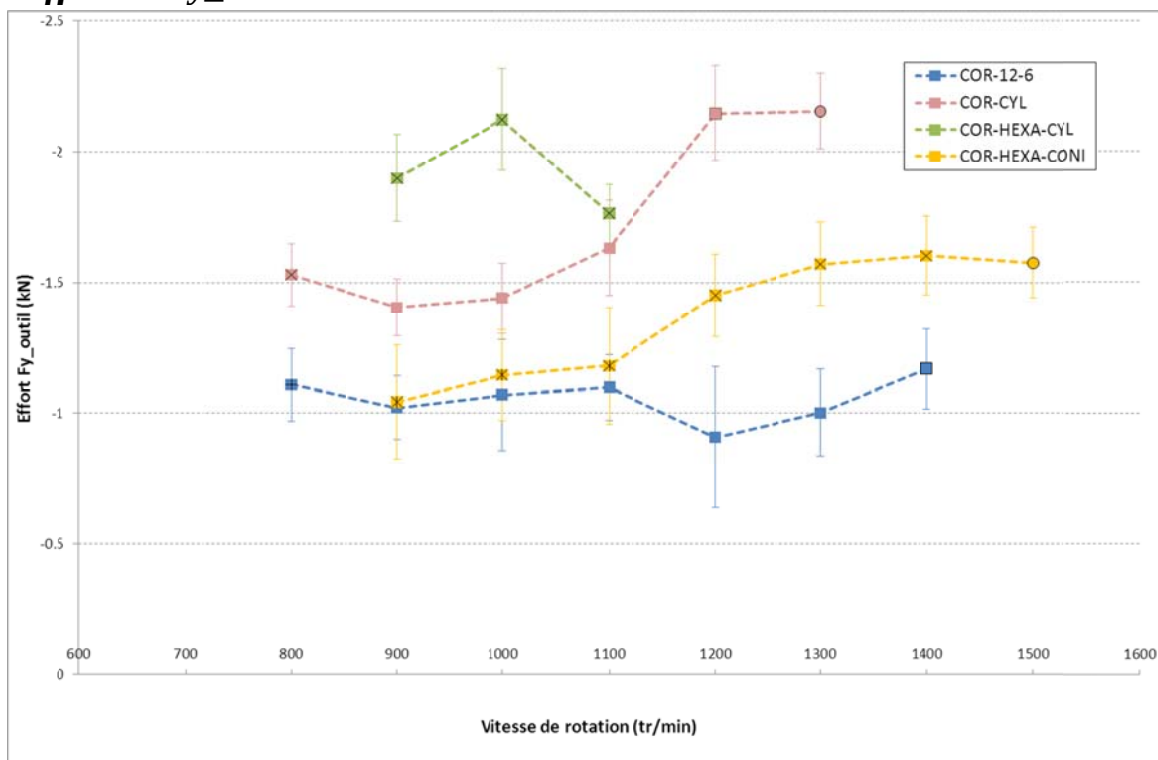
Annexe 2 : Variation de la géométrie du pion

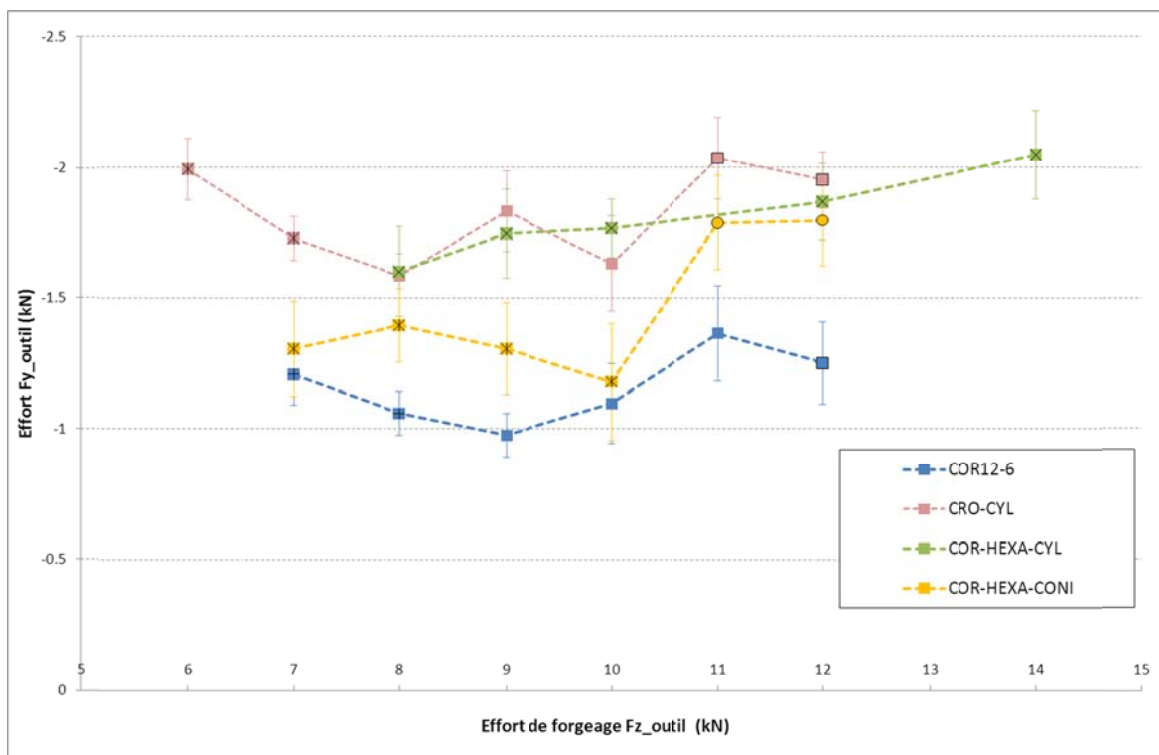
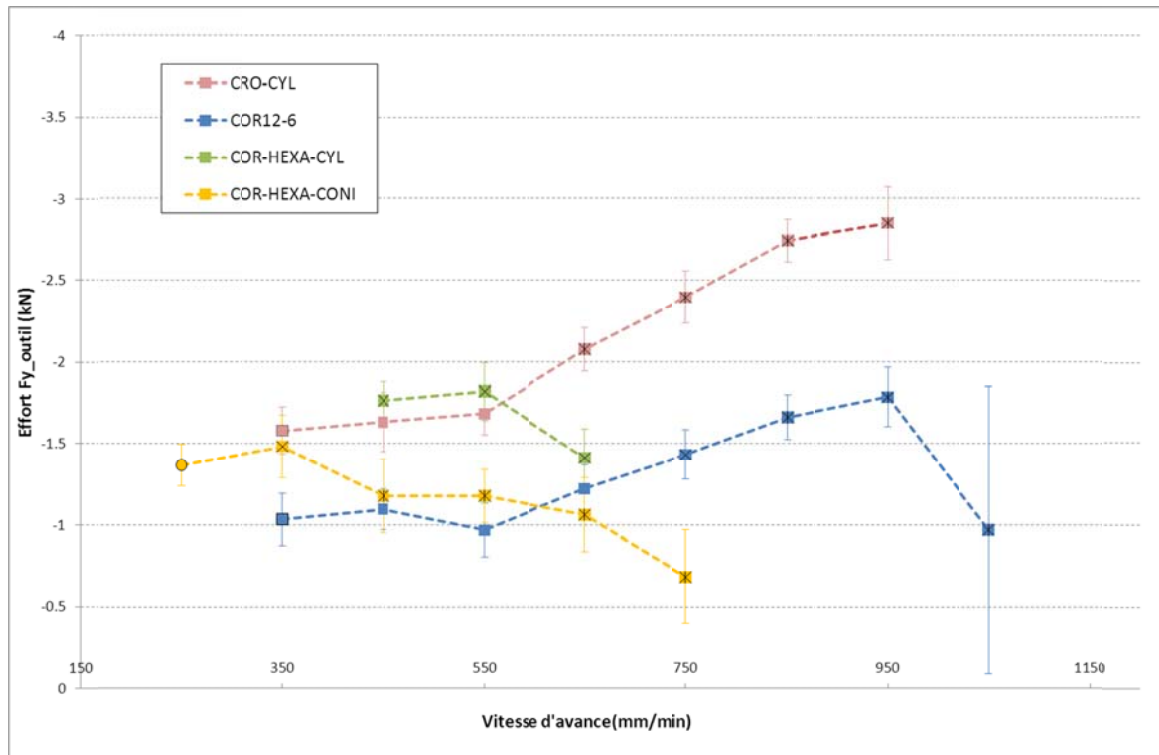
1. Effet sur F_{x_outil}



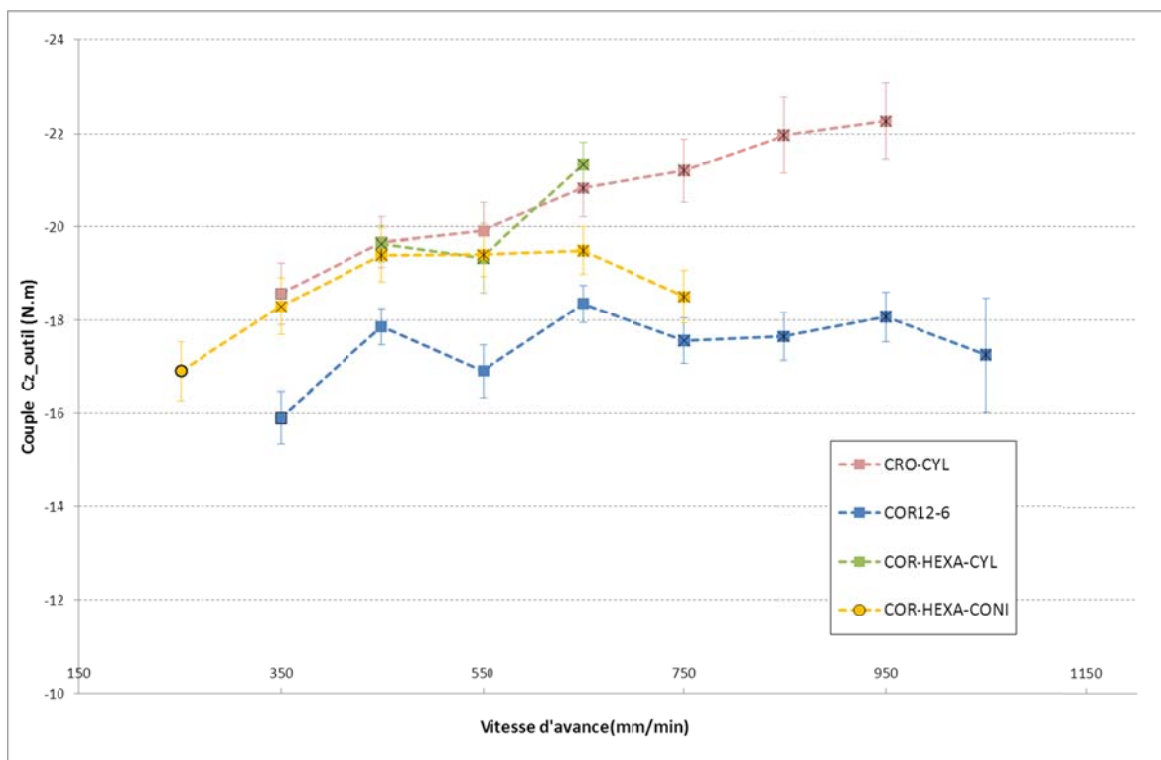
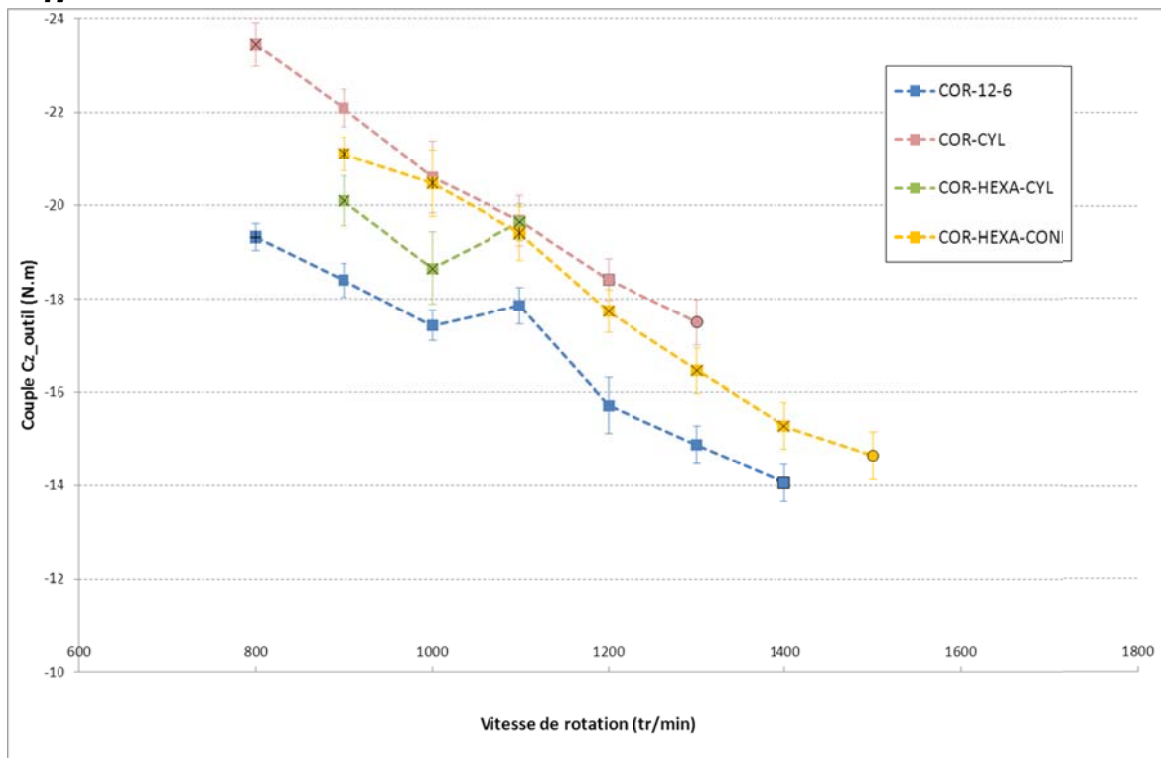


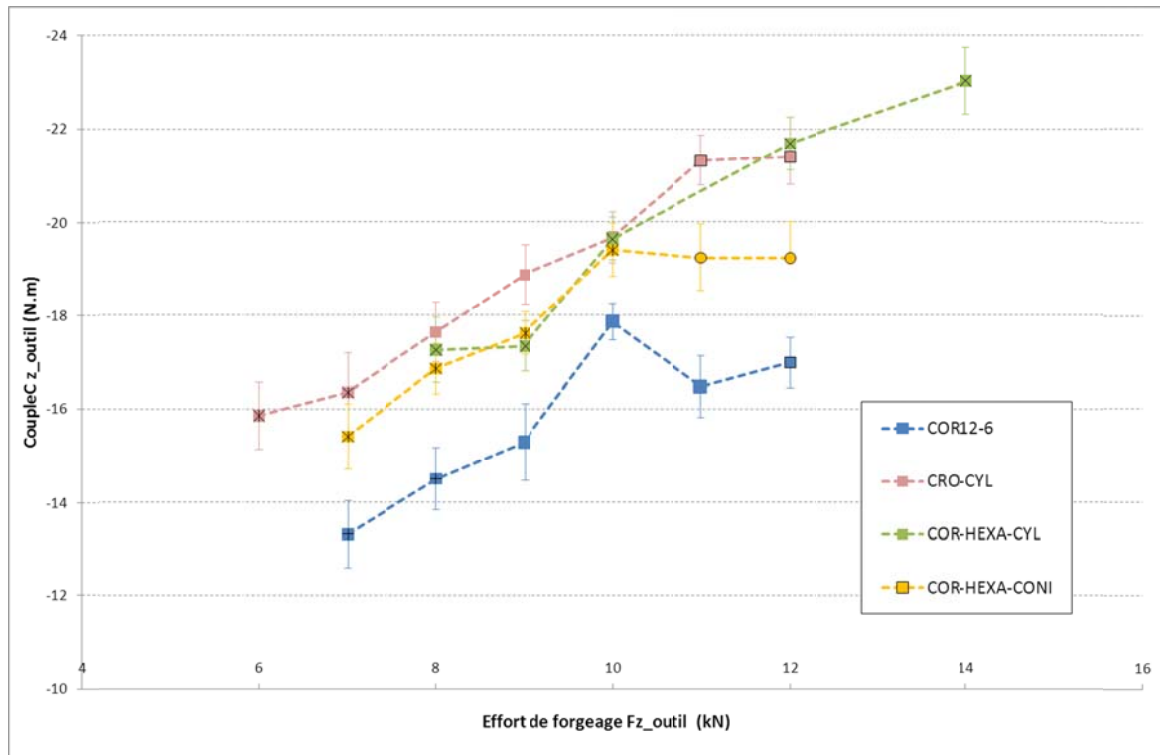
2. Effet sur F_{y_outil}





3. Effet sur Cz_outil

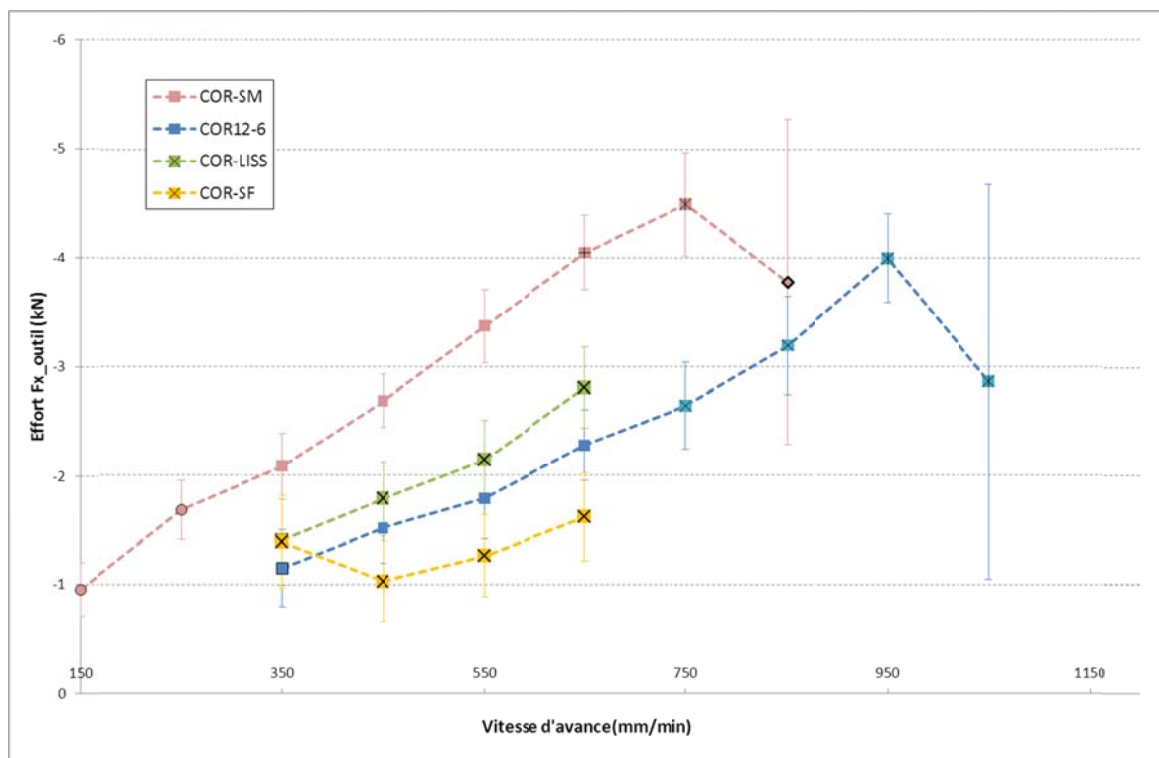
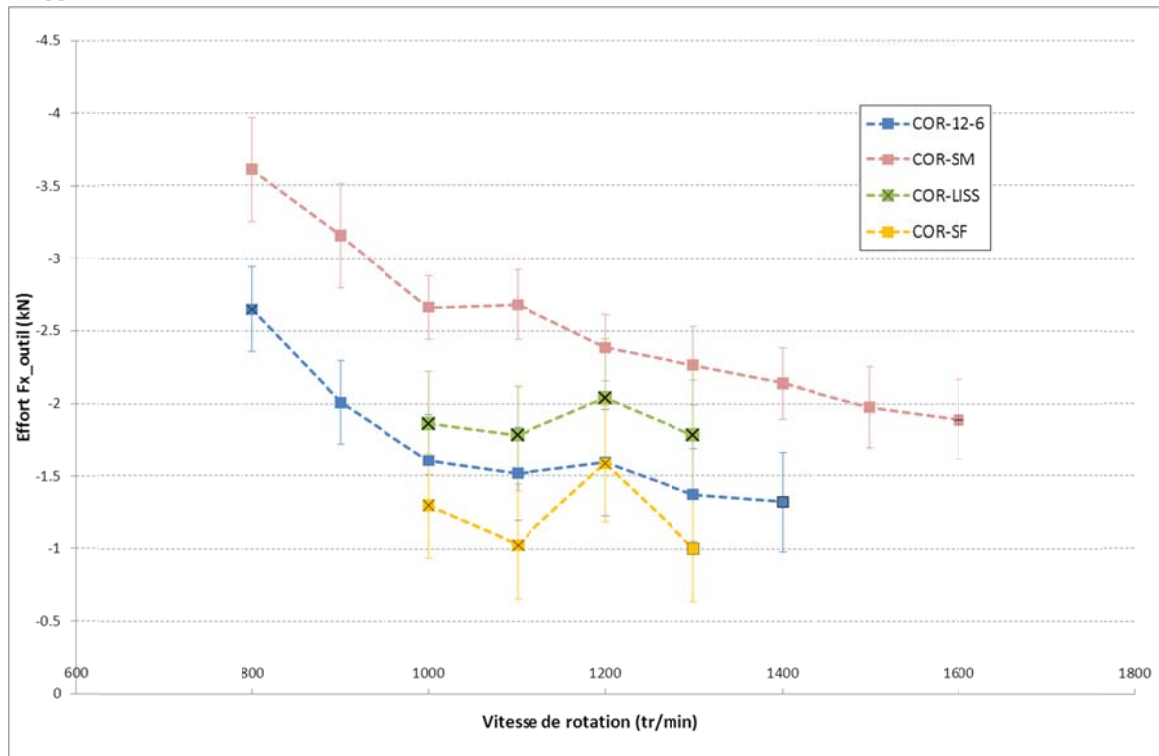


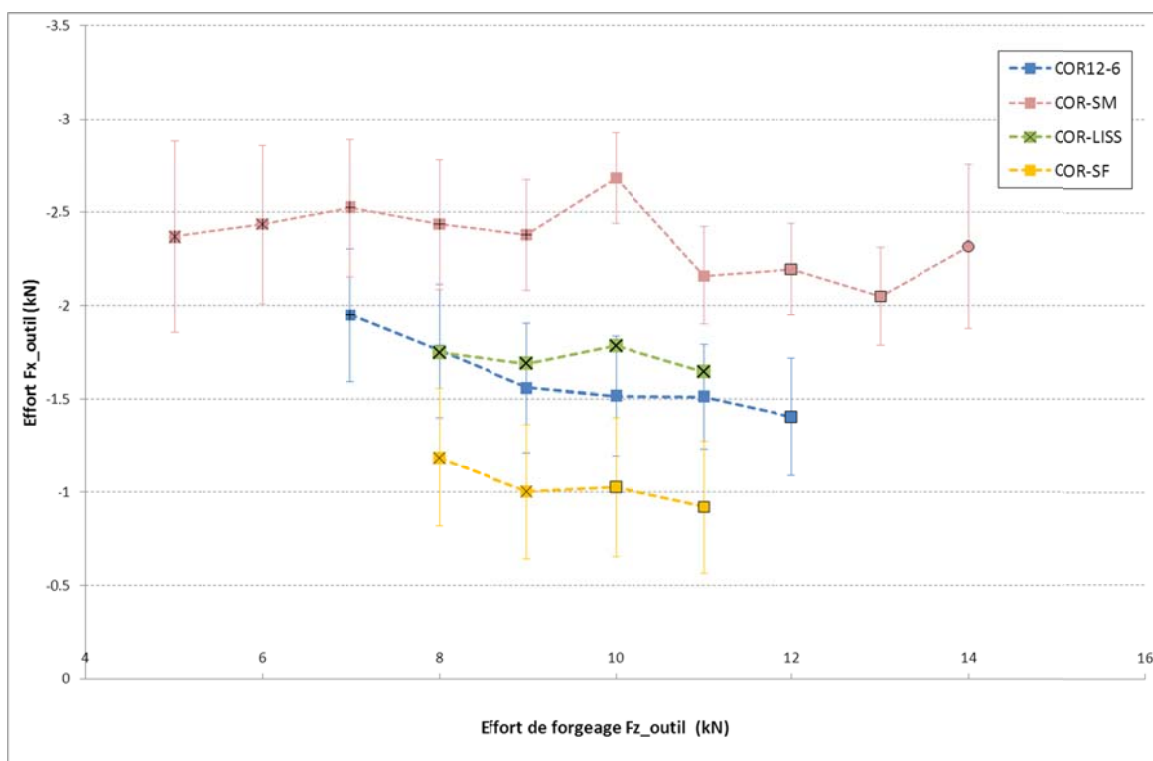


	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 73/80

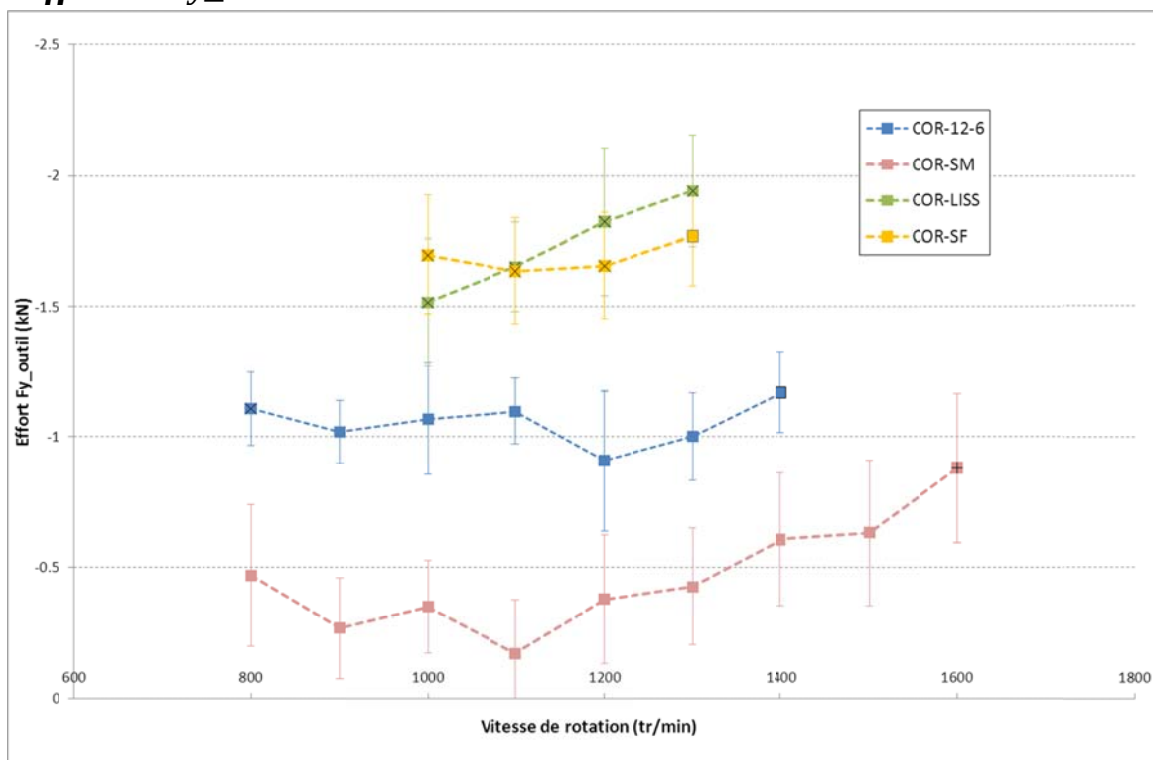
Annexe 3 : Variation des éléments géométriques sur le pion

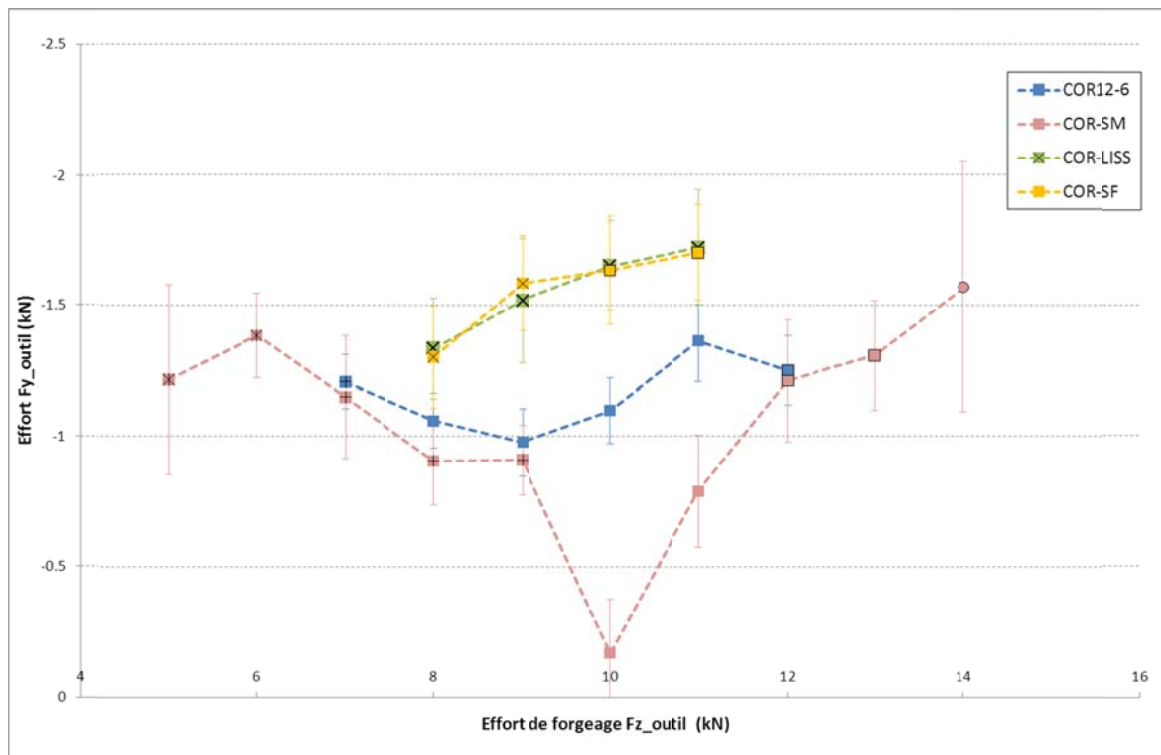
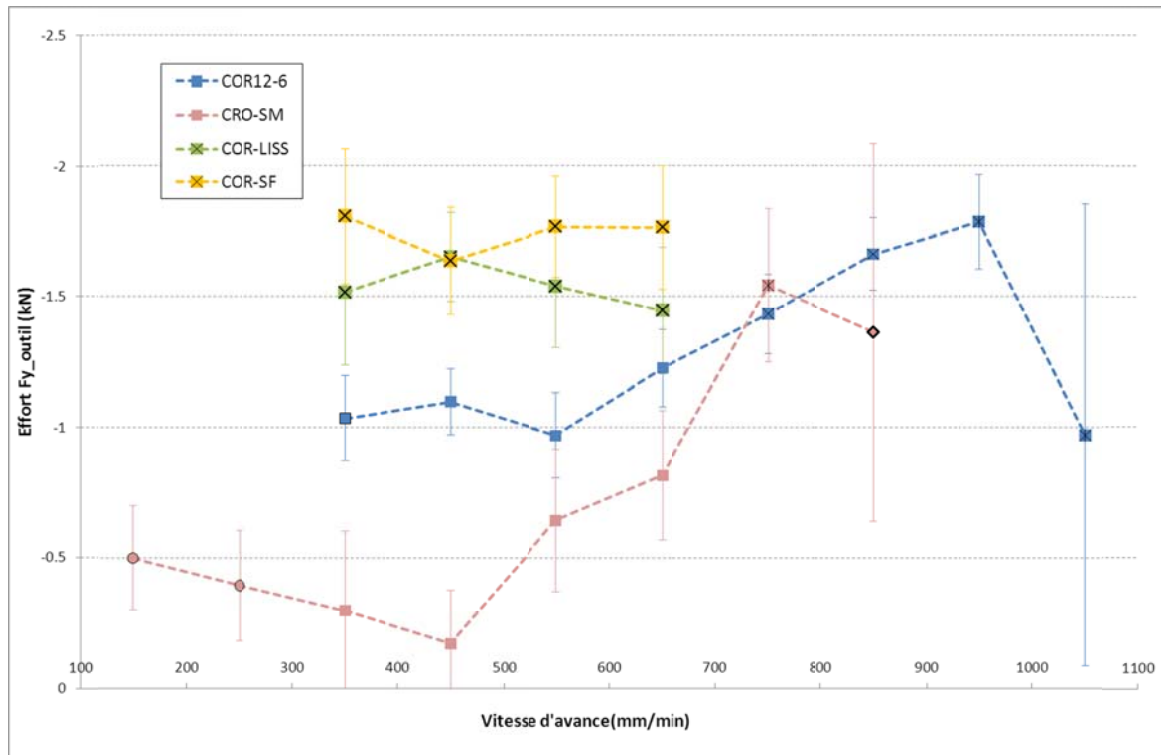
1. Effet sur F_{x_outil}



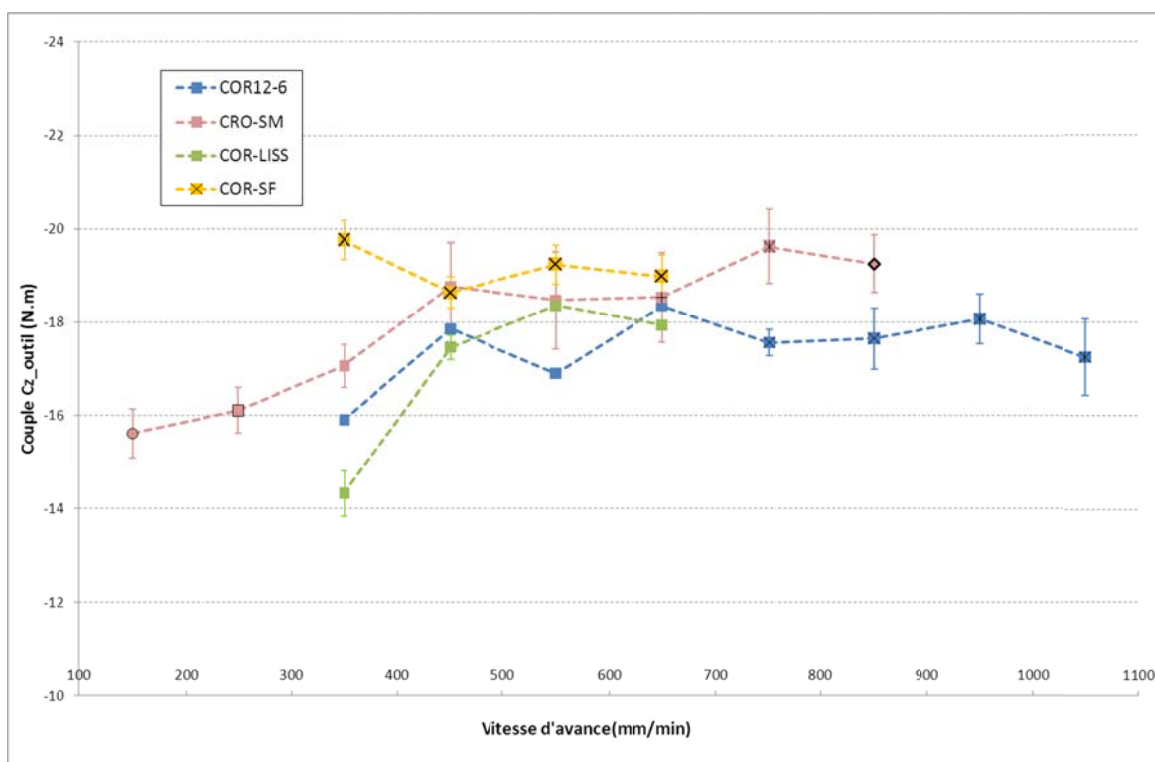
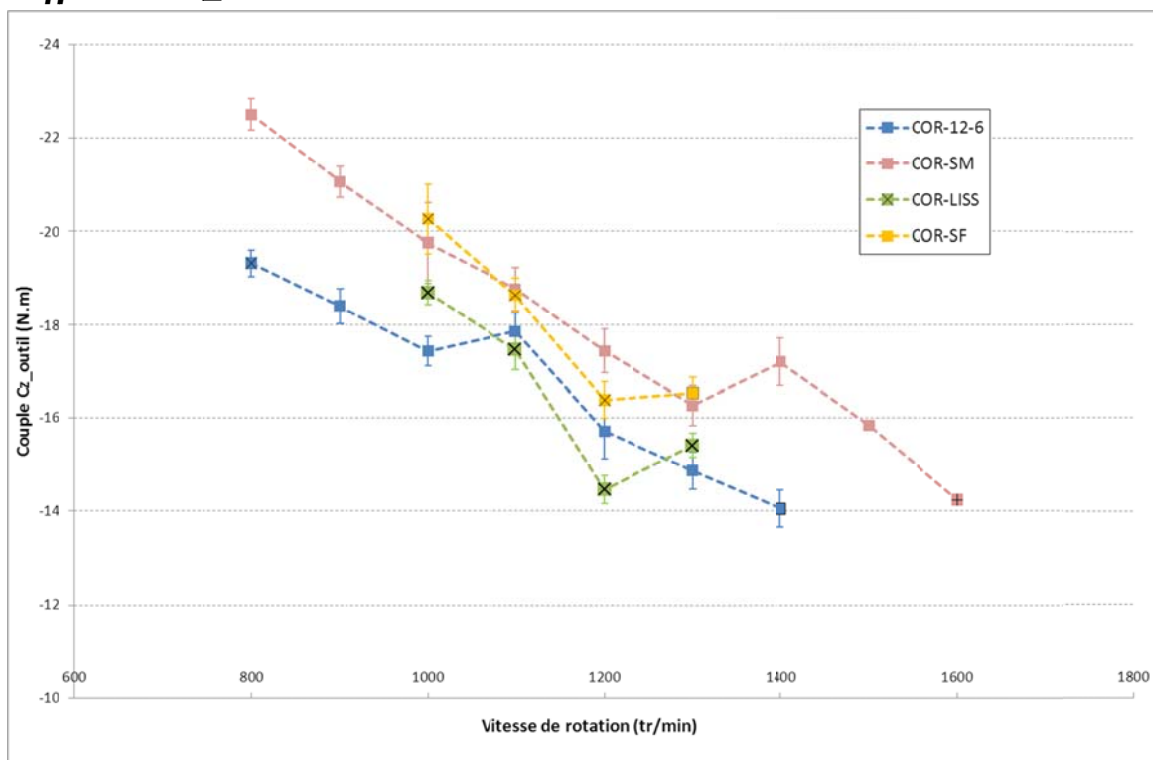


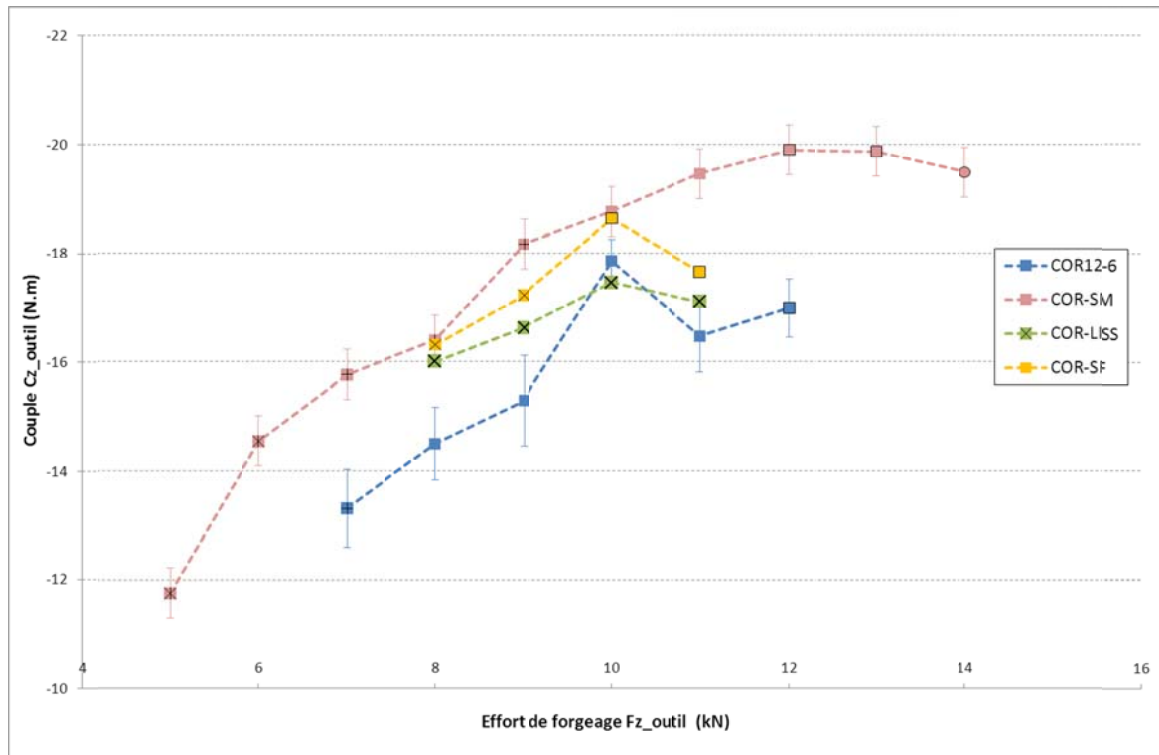
2. Effet sur F_{y_outil}





3. Effet sur Cz_{outil}





	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 79/80

Annexe 4 : Machine MTS I-STIR 10

 AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR <i>COROUSSO</i>	Projet COROUSSO Livrable n°2.4 Influence de la géométrie de l'outil sur la robustesse du FSW robotisé	ANR-10-SEGI-003-LI2.4
		29/09/2014
		indice A
		Page 80/80

Machine MTS

- Constructeur : MTS
- Modèle : I-STIR10

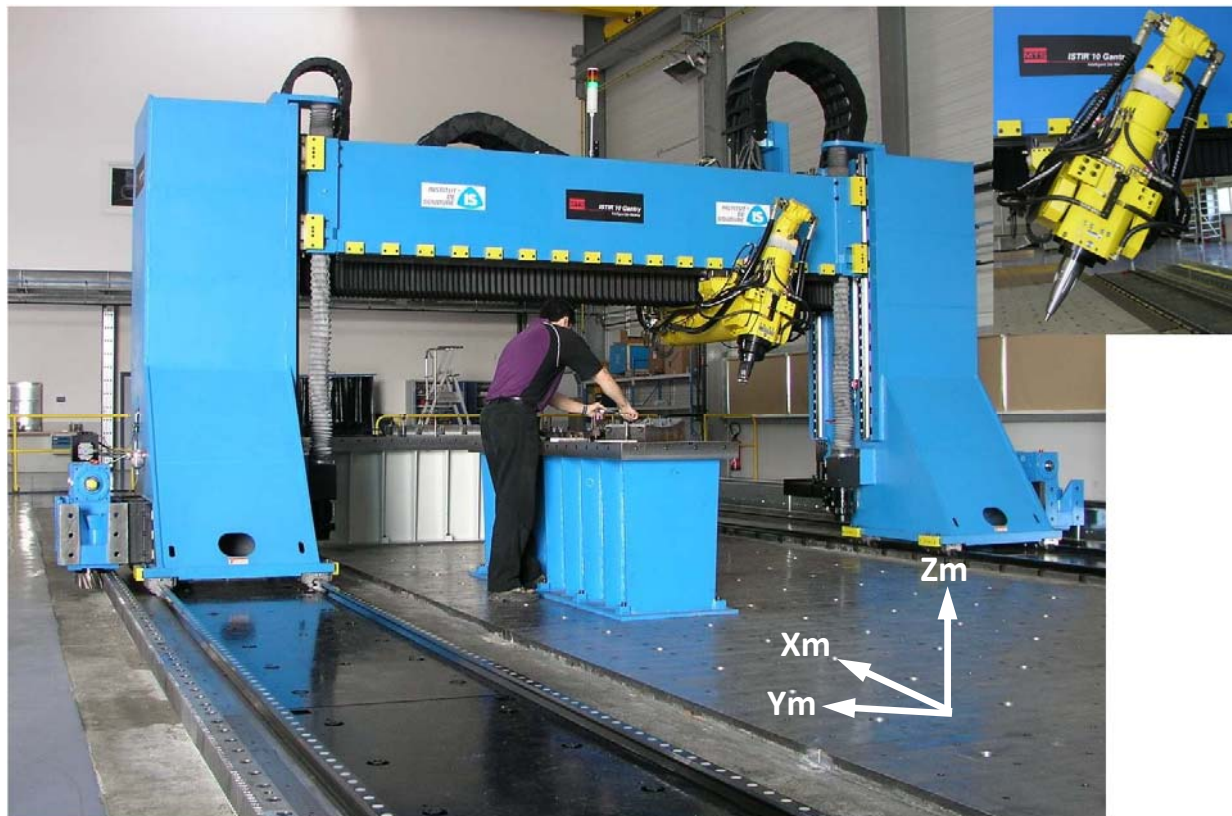


Figure 47 : machine MTS et tête de soudage FSW

- Courses maximales :
 - o Axe X : 19000 mm
 - o Axe Y : 3000 mm
 - o Axe Z : 1200 mm
 - o Roll : $\pm 13^\circ$ (rotation autour de l'axe Y)
 - o Pitch : $\pm 33^\circ$ (rotation autour de l'axe X)
- Vitesse maximale d'avance en soudage : 2 000 mm/min
- Vitesse maximale de rotation de la broche : 2 000 tr/min
- Force maximale de l'axe outil développée : 89 kN