



### **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/10985/6739>

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

Jean-Baptiste CROUE, Arnaud DELAMEZIERE, Patrick MARTIN, Sandra ZIMMER-CHEVRET, Laurent LANGLOIS - Contraintes et potentialités du procédé innovant FSW pour la reconception de produit - In: Démarche et innovation dans la conception et la production des systèmes intégrés, France, 2012-03 - Démarche et innovation dans la conception et la production des systèmes intégrés - 2012

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

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



## CONTRAINTES ET POTENTIALITES DU PROCEDE INNOVANT FSW POUR LA RECONCEPTION DE PRODUIT

**Laurent Langlois (1), Jean-Baptiste Croué (1), Arnaud Delamézière (2), Patrick Martin (1),  
Sandra Zimmer-Chevret (3)**

(1) LCFC Arts et Métiers ParisTech, 4 rue Augustin Fresnel 57070 Metz, tél. 03 87 37 54 30, Fax. 03 87 37 54 70, [laurent.langlois@ensam.eu](mailto:laurent.langlois@ensam.eu)

(2) ERMeP, GIP InSIC, 27 rue d'Hellieule 88100 Saint-Dié-des-Vosges, [arnaud.delameziere@insic.fr](mailto:arnaud.delameziere@insic.fr)

(3) Centre FSW, Institut De Soudure, ZA Aéroport de Metz, 2-4 Rue Pilâtre de Rozier 57420 Goin, [s.chevret@institutdesoudure.com](mailto:s.chevret@institutdesoudure.com)

### Résumé:

*Le procédé de soudage FSW est un procédé relativement récent dont le premier brevet date de 1991. Ses principaux avantages proviennent du fait qu'il permet de réaliser des soudures à l'état solide de proche en proche. Ceci lui permet d'assembler des pièces de géométrie complexes dans des alliages difficiles à souder par fusion. Toutefois le principe physique et technologique du procédé est très différent de celui des procédés de soudage par fusion. Notamment, la soudure est obtenue par l'action mécanique d'un outil en interaction avec la matière à souder. Pour évaluer la pertinence et le gain potentiel d'une soudure FSW par rapport à une soudure conventionnelle à l'arc une étape de reconception détaillée des pièces en intégrant les potentialités et les contraintes du FSW est nécessaire. Dans cet article est présentée une première contribution à la mise en place d'un processus de reconception de produit en intégrant le potentiel du FSW. Ce travail, à partir d'une étude de cas s'appuie sur l'identification des contraintes et des potentiels du FSW et leur intégration dans le processus de fabrication de la pièce et l'évaluation des performances et du coût de la pièce.*

**Mots clés: FSW, gamme de fabrication, interaction produit procédé.**

### 1 Contexte de l'étude

Les procédés de fabrication et plus particulièrement les procédés de soudage subissent depuis deux décennies des progrès remarquables dont l'objectif est d'étendre leurs potentialités et d'atténuer voire supprimer tout ou partie de leurs inconvénients. Par exemple, le développement de l'électronique de puissance des générateurs de soudage à l'arc permet d'accroître la productivité en améliorant la pénétration des soudures, en augmentant le taux de dépôt ou encore en diminuant les épaisseurs minimum soudables. Les développements récents concernent également les procédés de soudage à l'état solide comme le soudage par friction ou le soudage par impulsion magnétique. Ces derniers permettent les assemblages hétérogènes (aluminium sur acier, cuivre sur aluminium...) ou d'éviter certains problèmes métallurgiques inhérents aux procédés par fusion. Le travail présenté ici s'intéresse à l'un de ces procédés, le soudage par friction malaxage (FSW) qui permet d'obtenir des soudures à l'état solide de proche en proche [1]. Le fait que la liaison est obtenue en dessous de la température de fusion permet d'envisager l'assemblage des alliages sensibles à la fissuration à chaud ou à la création de soufflures comme les alliages d'aluminium des séries 2000 (Al-Cu) et 7000 (Al-Zn). Il permet également l'assemblage des alliages d'aluminium de fonderie [2]. Ce travail se positionne dans la continuité des travaux de recherche du laboratoire réalisé en collaboration avec l'Institut de Soudure sur l'industrialisation du procédé FSW [3].

Dans ce travail, il est proposé d'étudier la fabrication d'un pivot de direction de véhicule à faible consommation de carburant (voir Figure 1). Le point de départ de cette étude est le cahier des charges fonctionnel initial de la pièce complété par des contraintes imposant au nouveau pivot de pouvoir être monté en lieu et place de l'ancien. Ces nouvelles contraintes définissent un volume enveloppe dans lequel la nouvelle pièce devra s'inscrire (voir figure 2). Une attention particulière sera portée sur le gain de masse de la pièce, le changement de procédé d'assemblage permettant d'envisager les alliages d'aluminium avec les meilleurs rapports entre la limite d'élasticité et la densité.

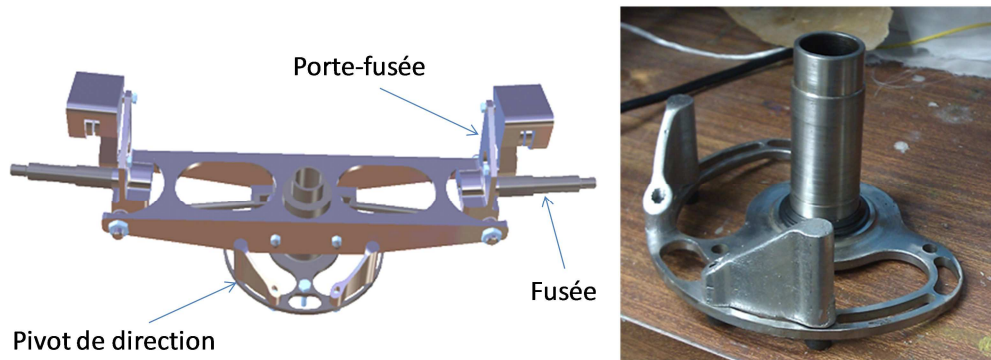


Figure 1. a. Vue 3D de l'ensemble du mécanisme de direction, b. photographie du pivot de direction actuel

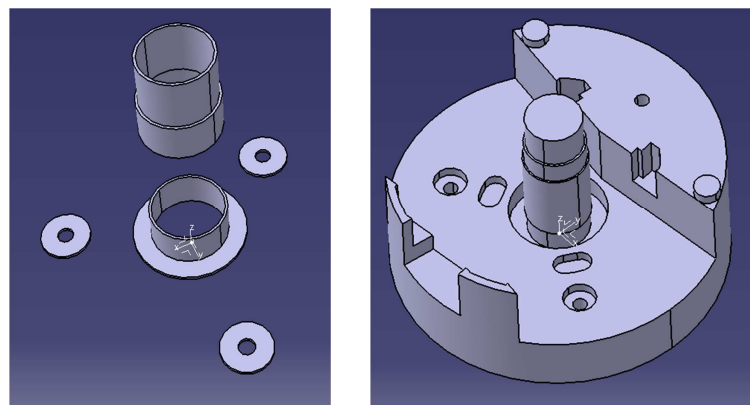


Figure 2. a. Ensemble des surfaces fonctionnelles du pivot de direction, b. volume maximum dans lequel le pivot doit être inscrit

L'étude présentée dans cet article n'est qu'une première contribution à la mise en place d'une démarche de reconception d'une pièce et de son nouveau processus de fabrication. Elle concerne l'identification des contraintes et des potentialités du FSW et leur interaction dans le processus de fabrication et dans l'estimation des performances de la pièce. Pour cela le synoptique de la gamme de fabrication est imposé (voir figure 3). Le pivot est réalisé par l'assemblage d'un axe central obtenu par tournage et d'une plaque obtenue par découpe thermique. Ces choix ont été fortement contraints par les procédés disponibles dans le laboratoire et dans son environnement en vue d'une validation expérimentale.

## 2 Contraintes et potentialités du procédé FSW

Les contraintes du FSW identifiées aujourd'hui sont principalement de nature géométrique et mécanique. Les contraintes liées au matériau se restreignent au choix des alliages soudables. Si on considère le principe physique du procédé, tous les métaux peuvent être soudés par FSW. La température à atteindre autour de l'outil est de l'ordre de celle utilisée en forgeage à chaud. Cette contrainte restreint technologiquement le nombre des alliages soudables à ceux ayant un bas point de

fusion comme les alliages d'aluminium. Pour l'acier, la durée de vie des outils est souvent trop faible pour permettre son industrialisation.

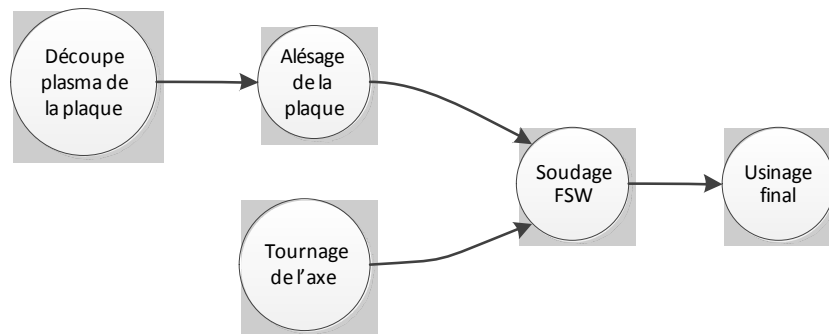


Figure 3. Synoptique de la gamme de fabrication du pivot de direction

Les contraintes géométriques spécifiques au FSW sont décrites sur la figure 4. D'un point de vue physique, l'ensemble de ces contraintes traduit le fait que le métal doit être malaxé dans un volume fermé et compact sur toute l'épaisseur de la soudure. Dans le cas d'une configuration de soudage bout-à-bout avec un outil conventionnel [1], le volume de matière malaxé est confiné entre :

- l'outil
- l'enclume apposée à l'envers de la soudure
- les pièces à assembler

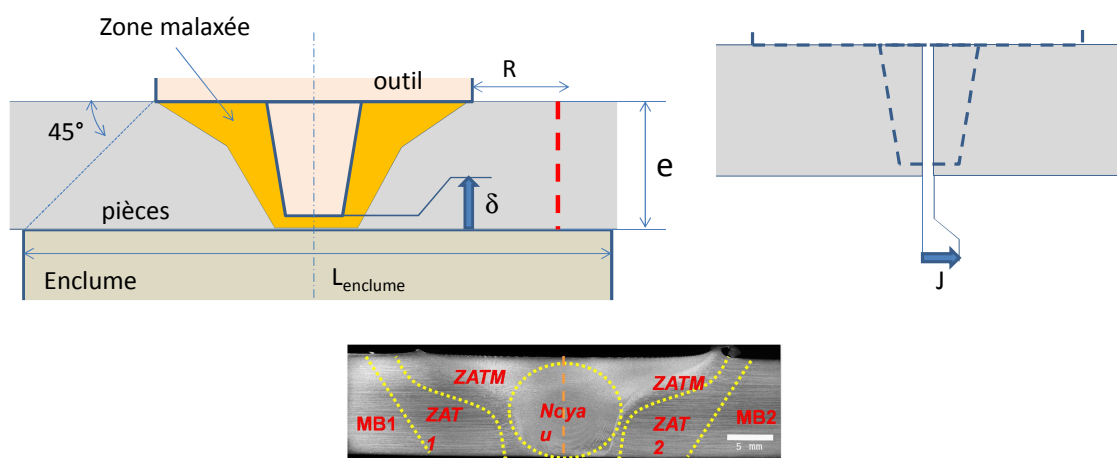


Figure 4. Contrainte géométrique locale autour du joint soudé

Pour écrire les règles géométriques associées à ces contraintes, il est nécessaire dans un premier temps de définir la géométrie de l'outil de soudage. Celle-ci peut être considérée suivant deux aspects, la géométrie enveloppe de l'outil et la géométrie locale. De façon générale, un outil dit conventionnel est constitué d'un épaulement et d'un pion [1]. La forme enveloppe de l'épaulement est soit un plan soit une surface concave de type cône ou calotte sphérique. La forme enveloppe du pion est soit un cylindre de révolution soit un cône. La forme locale sur l'épaulement diffère en fonction de sa forme enveloppe. Elle est lisse pour les épaulements concaves. Elle comporte des rainures en spirale autour de l'axe de l'outil pour les épaulements plans. Les pions peuvent être lisses ou comporter plusieurs filets et/ou des méplats. Pour cette étude, on considère uniquement les dimensions de la forme enveloppe de l'outil. Celle-ci est déterminée essentiellement par l'épaisseur à souder. Les relations reliant les dimensions de la géométrie enveloppe à l'épaisseur  $e$  à souder sont :

$$d = 2.5 * e \quad (1)$$

$$L_{enclume} \geq d + 2 * e \quad (2)$$

$$R \geq 2 * e \quad (3)$$

Où  $D$  est le diamètre extérieur de l'épaulement,  $L_{enclume}$  est la largeur minimale de l'enclume et  $R$  l'épaisseur minimum des pièces autour de la zone malaxée.

La longueur du pion est légèrement plus faible que l'épaisseur. Au cours du soudage l'outil est piloté en effort suivant son axe et non en position [1]. Ceci est nécessaire pour tenir compte des défauts de mise en position des pièces et pour compenser les manques de matière associés au jeu d'accostage ( $J$ ). Il est nécessaire que l'outil puisse se déplacer suivant son axe pour assurer la compacité de la soudure. L'effort de soudage, également appelé effort de forge, a pour rôle d'assurer une pression hydrostatique dans la matière malaxée. Quand celle-ci est insuffisante, il apparaît un défaut typique appelé « défaut tunnel » [1]. Pour que l'effort de forge ne soit pas repris directement par l'enclume, le pion doit avoir une longueur inférieure à l'épaisseur à souder. Le jeu d'accostage doit pouvoir être compensé par une descente de l'épaulement de l'ordre de 0,1mm. Ce critère est issu du savoir-faire en FSW. Par une relation de conservation de volume, on obtient :

$$J \leq 0.1 * \frac{D}{e} \quad (4)$$

En introduisant l'équation (1), on obtient la valeur du jeu d'accostage maximum toléré.

Les équations et inéquations (1), (2), (3) et (4) résultent d'une modélisation très simplifiée du procédé et validée par la pratique. Elles peuvent être en partie affinées, par exemple, par des campagnes expérimentales de caractérisation.

L'opération de soudage se compose de trois parties que sont la phase de pénétration pendant laquelle l'outil est inséré à l'interface entre les pièces en début de cordon, la phase de soudage durant laquelle l'outil parcourt la ligne de joint en réalisant la soudure de proche en proche et la phase de retrait. En fin de cordon de soudure réalisé par un outil conventionnel il demeure un trou correspondant au volume occupé par le pion de l'outil. Lors de la réalisation de soudures circulaires ce défaut est très souvent rédhibitoire. Deux solutions sont possibles, on utilise un outil plus complexe avec un pion rétractable [1] ou on prolonge la ligne de soudure jusqu'à un point appartenant à une zone qui sera enlevée par la suite lors des opérations de parachèvement. Dans le premier cas, il y a un surcoût du fait que l'outil et la machine sont plus complexes. Dans le deuxième cas, l'outil doit pouvoir rejoindre une zone qui sera enlevée, le cycle de soudage est plus long et le volume de matière affecté par la soudure est plus important.

A l'instar des procédés de soudage par fusion, même en l'absence de zone fondue, le FSW affecte les propriétés mécaniques du matériau dans la zone malaxée et dans les zones affectée thermo-mécaniquement et thermiquement [1]. Pour les alliages d'aluminium à durcissement par précipitation comme l'alliage Al-Cu 2024 [4] ou Al-Zn 7075 [5], cela se traduit par un affaiblissement des propriétés mécaniques dans la soudure. Le rapport entre la limite d'élasticité dans la soudure et celle du matériau de base, appelé coefficient de joint, est inférieur à 1. Le dimensionnement de la pièce soudée devra tenir compte de cet abaissement de propriété localisé autour de la ligne de joint. La valeur du coefficient de joint dépend de l'alliage (composition et état initial) [4] et des conditions opératoires du soudage [4-5]. Certains coefficients sont donnés dans la littérature mais le plus souvent ils sont déterminés expérimentalement. De façon générale ce coefficient est compris entre 0,6 et 0,8.

Avant d'aborder la fabrication du pivot de direction, il est important de définir certaines contraintes des procédés constituant le synoptique de la gamme.

La découpe thermique au plasma ne pourra s'appliquer que sur des tôles. Ceci impose que la plaque sera considérée à épaisseur constante. L'aspect thermique de la découpe rend très difficile la réalisation de poches étroites dont la largeur  $\lambda$  serait inférieure à deux fois l'épaisseur  $e$  de la tôle (voir figure 5). La découpe au plasma génère une dépouille, la qualité dimensionnelle obtenue ne permet pas, par exemple, la réalisation directe de la surface d'accostage au niveau du joint de soudage. Cette dernière sera systématiquement usinée après découpe thermique. Enfin, la découpe génère une zone affectée thermiquement ayant des conséquences sur les propriétés du matériau. L'étendue de cette zone et son effet sur la tenue de la pièce sera négligée dans ce travail.

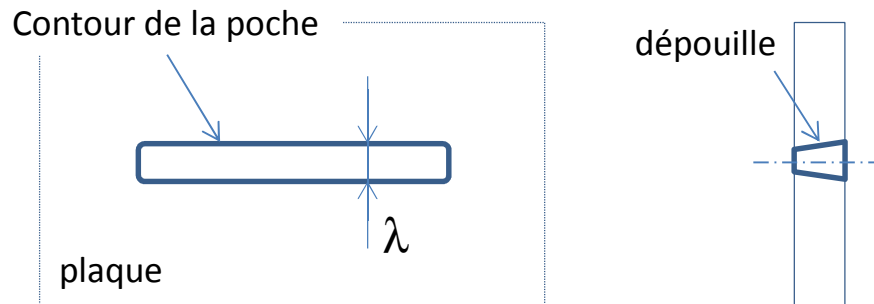


Figure 5 : Contraintes géométriques de la découpe thermique au plasma

L'axe central du pivot sera obtenu par tournage. Ceci impose qu'il soit axi-symétrique. La ligne de joint sera donc considérée circulaire centrée sur l'axe.

Dans cette partie, les contraintes du procédé FSW ont été identifiées et formalisées. La partie suivante est consacrée à l'étude de la fabrication du pivot de direction intégrant les contraintes décrites ci-dessus.

### 3 Etude de fabrication du pivot de direction

L'étude porte sur la fabrication du pivot de direction dont une vue 3D est donnée sur la figure 6. Le matériau choisi est un alliage d'aluminium 7075 à l'état trempé et revenu. La géométrie choisie respecte les contraintes géométriques de la découpe au plasma et du tournage. Dans un premier, à des fins de simplification, l'épaisseur de la plaque est fixée à 6mm. Compte tenu de ces hypothèses, le paramètre majeur de l'étude devient le diamètre  $D$  de la ligne de joint.

Dans ce qui suit, sont présentés la validation du diamètre de soudage par une étude de dimensionnement et la définition de la géométrie des pièces aux différents stades de la fabrication.

#### 3.1 Dimensionnement du pivot de direction

Le cahier des charges décrit le chargement du pivot au cours de son fonctionnement. Son dimensionnement s'effectue en considérant le chargement décrit sur la figure 6.b. Les deux paliers  $S_2$  et  $S_3$  supportent un effort latéral et la surface  $S_1$  supporte un effort axial correspondant au poids du véhicule et de son conducteur. Des conditions limites en déplacement sont imposées au niveau des ancrages du pivot sur la coque du véhicule. L'amplitude des efforts appliqués sur les trois surfaces est majorée en intégrant un coefficient de sécurité.

La validation de la tenue mécanique du pivot se décompose en plusieurs phases :

1. Génération du volume affecté thermo-mécaniquement autour de la ligne de joint par la soudure
2. Par opération booléennes, génération de la partie de l'axe non affectée par la soudure

3. Par opération booléennes, génération de la partie de la plaque non affectée par la soudure
4. Reconstitution du pivot par assemblage et mise en place des conditions limites à l'interface entre les parties
5. Calcul des contraintes en fonctionnement par méthode éléments finis

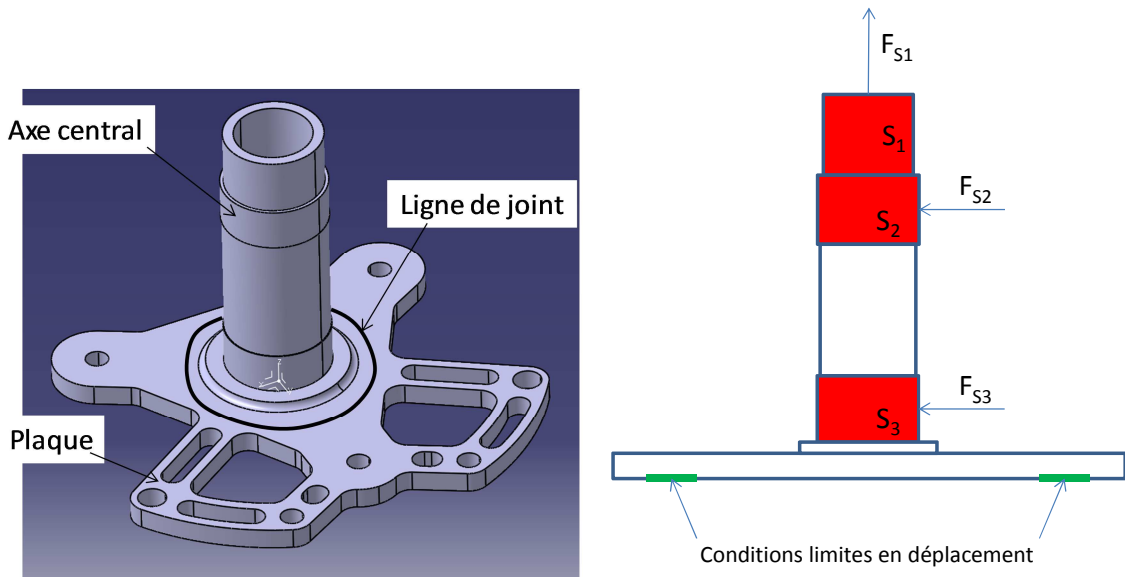


Figure 6. a. Décomposition de l'axe du pivot de direction, b. modélisation du chargement

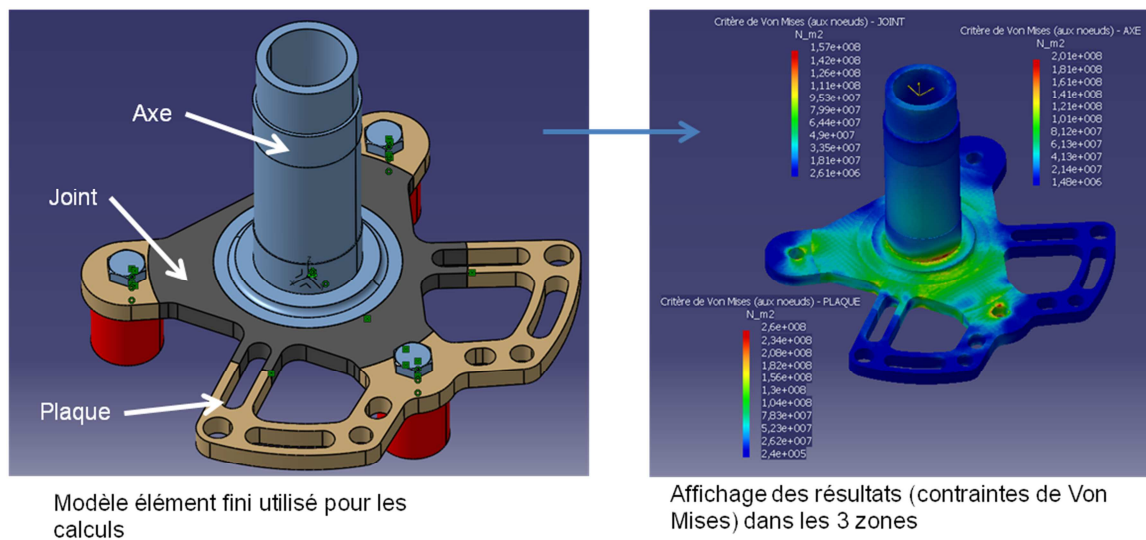


Figure 7. Constitution des sous-domaines et cartographie des contraintes

Le volume affecté thermo-mécaniquement est celui qui verra ses propriétés abaissées par rapport à celles du matériau de base. Le volume considéré sera simplifié sous la forme d'un tore à section rectangulaire dont la largeur est supposée égale à la largeur de l'épaulement. A ce volume sera affecté le coefficient de joint. Les étapes 2 et 3 consistent à obtenir la géométrie des parties non affectées par la soudure. Lors de la phase de reconstitution du pivot, les conditions à l'interface entre les différents volumes de la pièce assurent la continuité du déplacement (aucun glissement relatif ni décollement). A l'étape 5, il s'agit d'un calcul en élasticité linéaire. Le comportement élastique est supposé uniforme sur toute la pièce. On n'intègre donc pas les éventuelles altérations des propriétés élastiques du matériau par la soudure. Ceci n'est pas une hypothèse forte dans la mesure où les alliages considérés



ne voient pas leurs propriétés élastiques changer de façon significative au travers des traitements thermiques usuels de trempe et de revenu. La validation du dimensionnement de la pièce pourrait s'effectuer sans passer par la phase de décomposition du pivot. Ceci rendrait implicite la gestion des conditions limites entre les parties. La décomposition en sous-domaines assemblés permet de faciliter la visualisation du résultat. Sur la figure 7, on peut voir une cartographie des contraintes obtenues dans le pivot affichée par sous-domaines. Les phases de décomposition et de reconstitution du pivot sont des opérations automatiques générées à partir d'un tableau de paramètres contenant le diamètre de soudage et des dimensions de l'outil (définies à partir de l'épaisseur à souder).

### 3.2 Définition de la géométrie de pièce à découper au plasma

La démarche pour la définition géométrique de la plaque est constituée de plusieurs étapes :

1. Suppression de la partie centrale de la pièce, à l'intérieur du diamètre de la ligne de joint
2. Génération du volume de matière nécessaire au bon malaxage
3. Suppression des poches dont la largeur est inférieure à la valeur limite prédéfinie et redéfinition des profils de découpe
4. Ajout d'une surépaisseur d'usinage pour la réalisation de la surface d'accostage (diamètre de soudage)

La deuxième étape consiste à mettre autour de la soudure la matière suffisante pour respecter la contrainte exprimée par l'équation (3). Au cours de la troisième étape des évidements étroits et les trous de la pièce sont systématiquement supprimés. Les deux grands évidements peuvent également être supprimés si le diamètre de soudage est suffisamment grand. La figure 8 illustre les trois étapes de la définition géométrique de la pièce à découper au plasma.

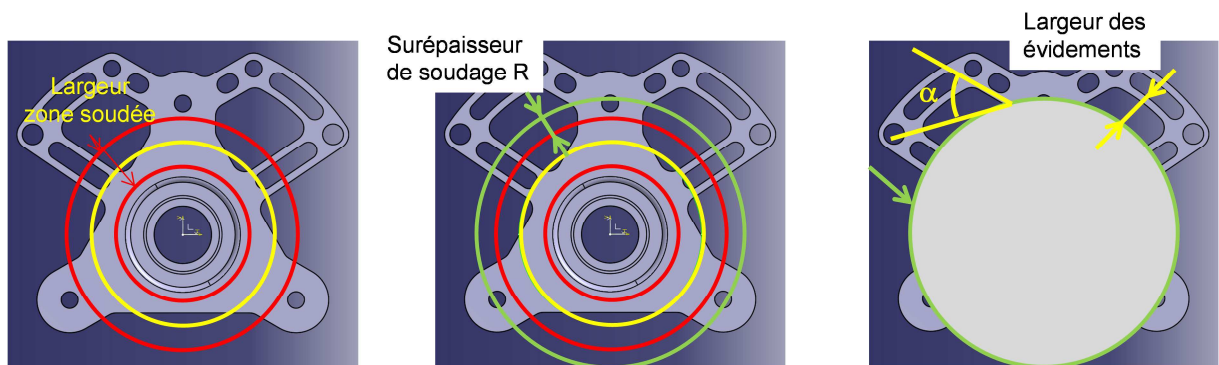


Figure 8. Influence du diamètre de la ligne de joint sur la géométrie de la plaque

La troisième étape est difficile à automatiser. Il s'avère que la géométrie du pivot de direction s'y prête bien dans la mesure où les deux grands évidements prennent la forme d'une gorge lorsque le diamètre de soudage augmente. Pour des formes plus complexes, l'établissement des critères d'aptitude à la découpe sont plus difficiles à établir. Les profils de découpe avec notamment des angles fermés ( $\alpha$  sur la figure 8) peuvent nécessiter d'être redessinés.

La géométrie obtenue à ce stade servira de point de départ pour l'étude du coût lié à la découpe thermique.

### 3.3 Définition de la plaque avant soudage FSW

La définition de la plaque avant l'opération de FSW s'appuie sur la définition de la pièce découpée au plasma avec la définition tolérancée du diamètre de soudage. L'ajustement de la plaque et de l'axe



avant soudage doit être tel que le montage puisse être possible et que le jeu maximal respecte l'inéquation (4). Cette dernière relie le jeu maxi à l'épaisseur de soudage sans relation avec le diamètre de la ligne de joint. De ce fait, une augmentation du diamètre de soudage correspond à une augmentation de la précision de l'ajustement.

Pour une épaisseur de 6mm, le jeu de soudage maximal admissible est de 0,25mm. Si on répartit la valeur de l'ajustement de façon équitable sur la plaque et sur l'axe central, on obtient un intervalle de tolérance sur le diamètre de 0,125mm. La qualité de la surface va dépendre de la valeur nominale du diamètre. Le graphe de la figure 9 donne l'évolution de la qualité dimensionnelle de la surface en fonction de la valeur nominale du diamètre.

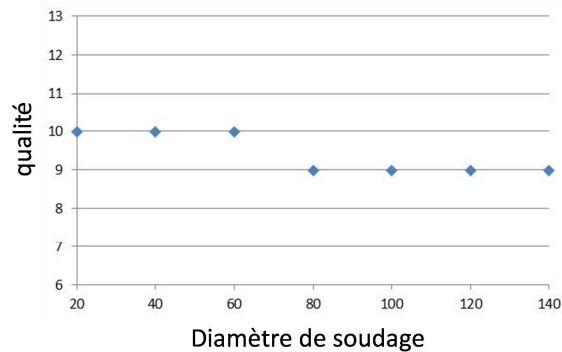


Figure 9 : Evolution de la qualité de la surface d'accostage avec le diamètre de soudage

Dans ce paragraphe, viennent d'être décrits trois aspects de l'étude de fabrication du pivot de direction reconçu intégrant les contraintes du procédé de soudage FSW. Les contraintes géométriques du FSW permettent de générer la géométrie des pièces aux différents stades de la gamme de fabrication. Ici, seule la génération de la plaque (découpée et avant soudage) a été illustrée mais la démarche suivie peut être étendue à l'axe central. L'altération des propriétés mécaniques du matériau au voisinage de la soudure à imposer de mettre en place une phase de validation mécanique de la pièce.

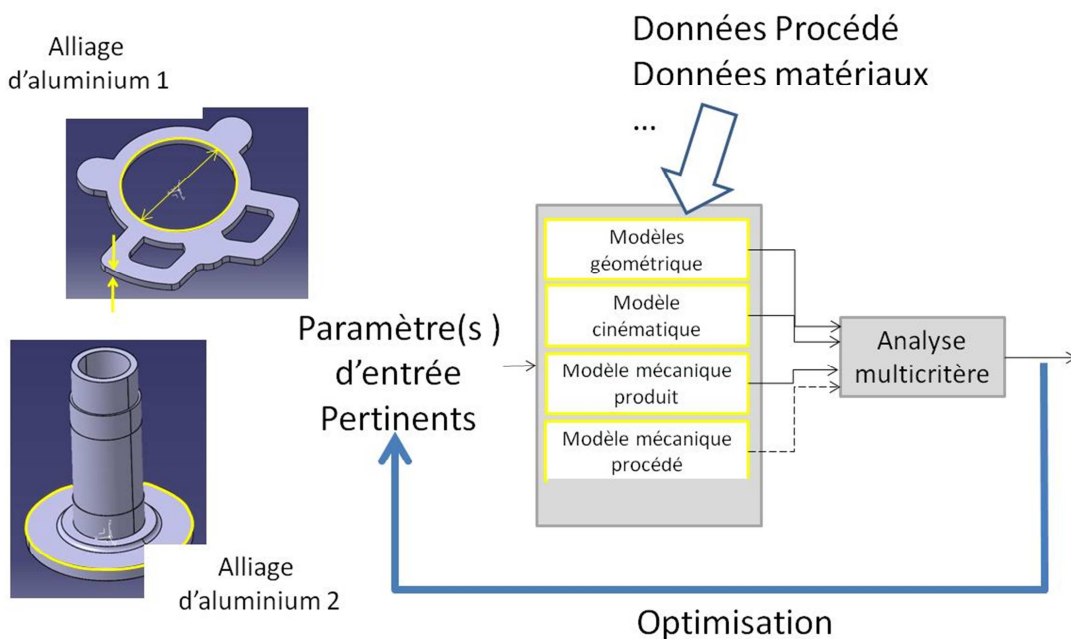


Figure 8. Optimisation de la valeur du diamètre de la ligne de joint

## 4 Conclusion

La démarche proposée fait intervenir des modèles de différentes natures intégrant les contraintes ou les potentialités du FSW. Comme illustré sur la figure 8, le point de départ est l'identification des paramètres d'entrée de l'étude décrivant la surface d'accostage FSW (l'épaisseur à souder, la longueur et la forme de la ligne de joint). Des modèles géométriques permettent de remonter la gamme de fabrication et de générer la géométrie des pièces aux différents stades de celle-ci. Des modèles cinématiques (non présentés ici) permettent de vérifier l'accessibilité de l'outil et du moyen de soudage à la ligne de joint (nombre d'axes nécessaire, encombrement de la broche...). Des modèles mécaniques de la pièce soudée permettent de valider sa tenue en service compte tenu de l'effet du soudage. Des modèles mécaniques associés au procédé permettent de dimensionner les moyens de production (montage, choix de la broche et de la machine). La résultante du torseur des actions mécanique outil pièce en FSW a une composante suivant l'axe de l'outil correspondant à l'effort de forge, une composante d'avance et une composante transverse [1]. Ces deux dernières ont une amplitude de l'ordre de 10% de la valeur de l'effort de forge.

Dans ce travail, il reste à développer l'estimation du coût de la pièce pour un diamètre de soudage donné. On est capable de générer les géométries de pièces aux différents stades de la gamme de fabrication. On est capable de calculer les volumes de matière consommé, les temps de fabrication pour chaque opération, les consommables utilisés... Il reste à mettre en place une analyse multicritères permettant d'évaluer le « coût » de la pièce à partir de la diversité des informations sorties des différents points de vue ou modèle. Cette analyse multicritères devra être intégrée dans une boucle d'optimisation pour la recherche d'une solution optimum.

Le travail présenté ici a été développé dans le cas d'une pièce mono matériau pour laquelle le synoptique de la gamme de fabrication a été fixé. Or les procédés d'assemblage permettent la réalisation de pièce multi-matériaux, c'est-à-dire, de matériaux de nuances différentes issus de procédés d'élaboration différents. Le schéma de reconception devra alors prendre en compte des aspects multi-matériaux.

## 5 Remerciements

Ces travaux ont été menés dans cadre du projet P08 Conception Industrialisation de Produits Innovants du programme MEPP du CPER2007-2013. A ce titre, nous tenons à remercier la Région Lorraine, le MESR ainsi que le FEDER pour leur support financier.

## 6 Références

- [1] R.S. MISHRA, Z.Y. MA, « Friction stir welding and processing », Mater Sci Eng, Vol50, 2005, pp 1-78
- [2] S. ZIMMER, J. LAYE, C. GUYOMARD, L. LANGLOIS, R. BIGOT, P. MARTIN, « FSW : Un procédé de soudage pour les alliages d'aluminium de fonderie », 11<sup>ème</sup> Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne 22-24 avril 2009
- [3] Zimmer S. "Industrialisation du procédé de soudage par friction malaxage (FSW)". Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 8 décembre 2009.
- [4] MAHONEY, C.G. RHODES, J.G. FLINTOFF, R.A. SPURLING, and W.H. BINGEL, " Properties of Friction-Stir-Welded 7075 T651 Aluminum ", Metallurgical and Materials Transactions, volume 29A, 1998, pages 1955-1964
- [5] H. AYDIN, A. BAYRAL, A. UGUZ, K. S. AKAY. " Tensile properties of friction stir welded joints of 2024 aluminum alloys in different heat-treated-state ", Materials and Design, volume 30, 2009, pages 2211-2221.