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/10985/9070

**To cite this version :**

Sandra ZIMMER-CHEVRET, Nejah JEMAL, Laurent LANGLOIS - Modèle de l'influence des variations des conditions de soudage sur les interactions mécaniques outil/matière - 2014

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : scienceouverte@ensam.eu

Projet COROUSSO

# Tâche 2 : Modélisation du procédé FSW

# Livrable 2.2 :

# Modèle de l'influence des variations des conditions de soudage sur les interactions mécaniques outil/matière

Projet ANR-2010-SEGI-003-COROUSSO

Partenaires :

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

| Liste de diffusion | | |
|---|---|---|
| Nom | Organisme | Fonction |
| BOUJDAINE Fatiha | ANR | |
| | HAL | |
| | | |
| | | |

( Logigramme workflow)

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

# SOMMAIRE

1 Introduction ..... 5
2 Identification des paramètres « ecart » ..... 6
2.1 Produit ..... 6
2.2 Les moyens de production ..... 8
2.3 Le processus de fabrication de la pièce soudée ..... 10
2.4 Conclusions ..... 11
3 Etude de l'influence du passage d'une soudure rectiligne à une soudure circulaire dans le plan de la tôle ..... 12
3.1 Campagne expérimentale ..... 12
3.1.1 Conditions de soudage ..... 12
3.1.2 Géométries ..... 13
3.2 Étude des soudures de référence ..... 15
3.2.1 Conditions expérimentales ..... 15
3.2.2 Analyse des efforts liés à la réalisation des soudures de référence ..... 15
3.3 Étude des soudures circulaires fermées ..... 18
3.3.1 Conditions expérimentales ..... 19
3.3.2 Résultats ..... 21
3.4 Essais complémentaires ..... 23
3.4.1 Étude de l'influence de l'échauffement des tôles soudées ..... 23
3.4.2 Étude des soudures à vide ..... 24
3.5 Étude des soudures circulaires en S ..... 24
3.5.1 Conditions expérimentales ..... 24
3.5.2 Résultats ..... 25
4 Etude de l'influence d'une variation des conditions opératoires de soudage ..... 26
4.1 Campagne expérimentale ..... 26
4.2 Résultats expérimentaux ..... 28
4.2.1 Étude de la variation de l'angle α ..... 28
4.2.2 Étude de la variation de l'angle β ..... 29
4.3 Évolution de la pénétration de l'outil au cours des transitions ..... 31
4.4 Conclusions ..... 34
5 Variation de la vitesse d'avance et de l'effort de forge ..... 35
5.1 Étude des effets d'une variation de la vitesse d'avance ..... 35
5.1.1 Procédure expérimentale ..... 35
5.1.2 Analyse des données ..... 36
5.1.3 Conclusion ..... 38
5.2 Étude des effets d'une variation de l'effort de forge ..... 39
5.2.1 Procédure expérimentale ..... 39

5.2.2 Analyse des données ..... 39
5.2.3 Conclusion ..... 44
6 Etude des effets d'une variation géométrique de l'acostage ..... 44
6.1 Influence d'un jeu de soudage ..... 45
6.1.1 Procédure expérimentale ..... 45
6.1.2 Analyse des données ..... 46
6.1.3 Conclusion ..... 51
6.2 Influence d'une dénivellation ..... 52
6.2.1 Procédure expérimentale ..... 52
6.2.2 Analyse des données ..... 53
6.2.3 Interprétation ..... 55
6.2.4 Conclusion ..... 61
7 Etude des effets d'une variation de l'outillage de soudage ..... 62
7.1 Étude de l'influence des enclumes utilisées ..... 62
7.1.1 Procédure expérimentale ..... 63
7.1.2 Résultats ..... 64
7.1.3 Synthèse ..... 74
7.1.4 Conclusion ..... 74
8 Soudure des coupons avec traitement thermique supplémentaire ..... 75
8.1 Procédure expérimentale ..... 75
8.2 Résultats ..... 76
8.3 Conclusion ..... 78
9 Variation de la configuration de soudage ..... 78
9.1 Procédure expérimentale ..... 78
9.2 Résultats ..... 79
9.3 Conclusion ..... 81
10 Conclusion générale ..... 81
Références ..... 83
Annexes ..... 84
Annexe 1 : Machine MTS I-STIR 10 ..... 86
Annexe 2 : Outil FSW utilisé ..... 88

# 1 INTRODUCTION

Les travaux menés dans le cadre de la tâche 2.1 ont permis de caractériser et de modéliser les efforts développés par les interactions entre l'outil et la matière pour une configuration fixée dite nominale. La soudure est rectiligne et le matériau et les épaisseurs des tôles sont supposés constants. L'orientation de l'outil est considérée constante tout au long de la ligne de joint. L'étude paramétrique a porté sur l'influence des trois principaux paramètres de conduite du procédé que sont la vitesse d'avance, la vitesse de rotation de l'outil et l'effort dit de forge correspondant à l'effort appliqué suivant l'axe de l'outil. Ces paramètres de conduite sont les paramètres modifiables « au pied » de la machine, paramètres de réglage de l'opérateur.

La tâche 2.2 est consacrée à l'étude de l'influence de perturbations ou d'écarts entre la configuration nominale et une soudure réelle. Les écarts pouvant avoir une incidence sur les efforts de soudage, dont l'identification fait l'objet de la première partie de ce rapport, sont de différentes natures et concernent le produit, les moyens de production et le processus de fabrication de la pièce soudée.

Le produit : les essais de la tâche 2.1 ont été effectués sur les soudures rectilignes. Or, le robot polyarticulé est un moyen de production envisagé pour ses capacités géométriques, c'est-à-dire, son aptitude à parcourir des trajectoires complexes dans un volume de travail conséquent. Les applications envisagées dépassent donc de très loin les « simples » soudures rectilignes. Des trajectoires plus complexes doivent être envisagées et les interactions mécaniques outil/matière doivent être caractérisées pour des trajectoires complexes.

Le moyen de production : Les robots polyarticulés sont, compte tenu du niveau des efforts appliqués sur l'outil par la matière, des structures dont la déformation élastique ne peut être négligée. Cette dernière va engendrer plusieurs types de défaut : un décalage de l'outil de sa trajectoire, un non-respect de la vitesse d'avance notamment lors de certaines transitions et la désorientation de l'outil par rapport à la pièce. On peut également ajouter ici les défauts géométriques des outils et les dispersions associées. La nature de l'enclume et du contact qu'elle entretient avec les pièces ainsi que les systèmes de bridage vont avoir un rôle thermique potentiellement non négligeable sur la qualité de la soudure et les efforts de soudage.

Le processus de fabrication de la pièce soudée : Le processus de fabrication des pièces brutes avant soudage vont être à l'origine de dispersions à l'endroit de la ligne de joint. Les dispersions concernent à la fois la géométrie et la position relative locales des surfaces d'accostage et le matériau des pièces à souder.

Sur la figure 1 est représenté de façon schématique le système constitué par les pièces, l'outil de soudage et le moyen de production au cours d'une soudure.

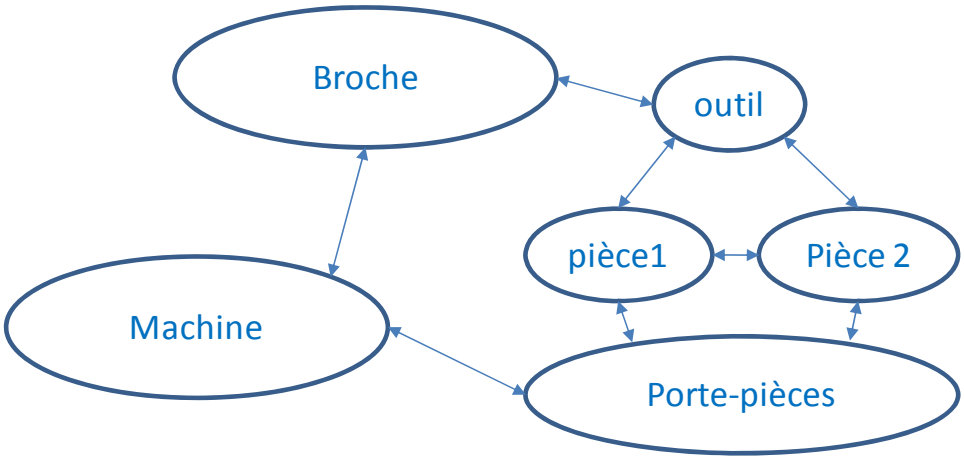


**Figure 1 : Différents éléments constitutifs du système pièces-outil-moyens de production en FSW**

La première partie du travail concerne l'identification des paramètres « écart » entre la configuration nominale (tâche 2.1) et une soudure réelle. Dans un deuxième temps, pour chaque famille de paramètres écart identifiés, un plan d'expériences est construit, conduit et exploité afin de caractériser l'influence de ces paramètres sur les efforts de soudage et la qualité de la soudure. Pour cela, une partie est consacrée à l'étude de l'orientation de l'outil, une autre est consacrée à l'étude des défauts géométriques d'accostage et une dernière étude est consacrée aux variations de paramètres comme la vitesse d'avance ou la nature du contact enclume pièce.

# 2 IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES « ECART »

Dans cette partie, il est proposé de reprendre le classement exposé dans l'introduction en fonction de ce que les écarts proviennent du produit, du moyen de production ou du processus de fabrication de la pièce.

## *2.1 Produit*

La Figure 2 décrit le repère local associé à une ligne de joint dans le cas d'une soudure bout-à-bout. Dans cette configuration, la ligne de joint est l'intersection entre la surface d'accostage des deux pièces et leur surface supérieure qui reçoit l'épaulement de l'outil de FSW. La figure 2 décrit le repère local dans le cas particulier de deux tôles planes soudées bout-à-bout avec une ligne de joint rectiligne.

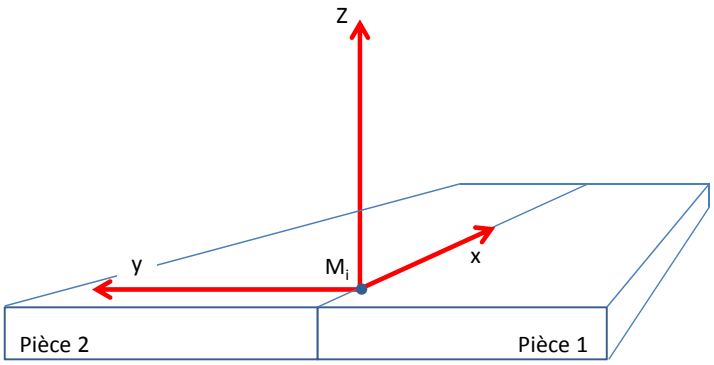


**Figure 2 : Repère local associé à chaque point de la ligne de joint**

De façon générale, le repère local $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ est défini de la façon suivante :

- Z est le vecteur normal à la surface supérieure des pièces à souder, surfaces qui vont accueillir l'épaulement.
- X est le vecteur tangent à la ligne de joint dirigé dans le sens de l'avance. La ligne de joint est définie comme l'intersection entre la surface d'accostage et la surface supérieure des pièces à souder.
- Y est défini pour former un repère orthonormé direct avec les deux premiers vecteurs.

Dans le cas d'une soudure bout-à-bout rectiligne l'orientation du repère local est conservée tout au long de la soudure. Dans le cas d'une forme complexe, l'évolution locale du repère de soudage peut être définie par un vecteur taux de rotation. Ce vecteur se projette dans le repère local en faisant apparaître 3 composantes de vitesse de rotation instantané. En considérant séparément les trois composantes de ce vecteur, on fait apparaître trois formes de soudure particulières :

- De façon générale : la première configuration correspond à la soudure bout-à-bout de tubes. Dans cette configuration, la normale et le vecteur tangent à la ligne de joint tourne autour de l'axe y.
- La deuxième configuration correspond au soudage de deux tôles suivant une ligne de joint non rectiligne, par exemple, une soudure circulaire dans le plan. Dans cette configuration, le vecteur normal à la soudure reste constant. Les vecteurs tangent et transverse tournent autour de la normale.
- La troisième configuration correspond à une soudure pour laquelle la normale et le vecteur transverse tournent autour du vecteur tangent à la ligne de joint. Dans le deuxième cas, il est nécessaire de distinguer deux cas en fonction de la position de l'intérieur de la courbure par rapport au côté avance et retrait de la soudure.

Dans ce document, seule la deuxième configuration est étudiée. Les deux autres configurations feront l'objet de travaux ultérieurs ou sont en cours d'étude.

## 2.2 Les moyens de production

Les robots polyarticulés sont des structures souples face à l'amplitude des efforts outil/matière. Leur déformation et les déviations et désorientations de l'outil occasionnées ne peuvent être négligées. A ces déviations et désorientations peuvent être associées des modifications notables des efforts outil/matière. La position et l'orientation de l'outil résulte finalement d'un couplage entre les efforts entre l'outil et la matière d'un côté et la déformation du moyen de production de l'autre.

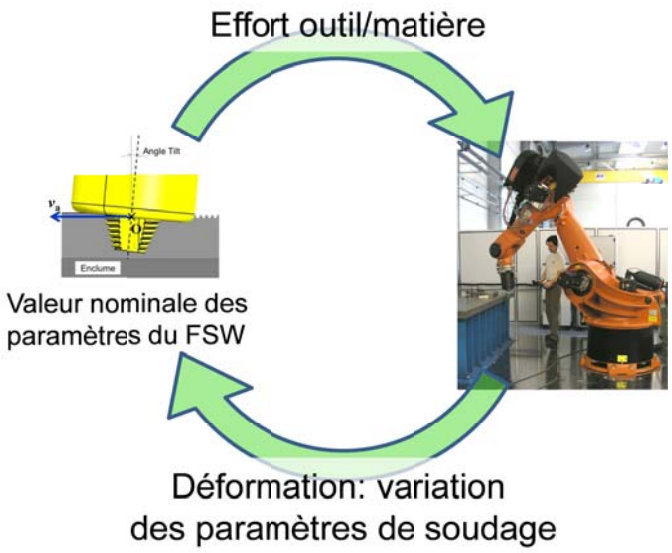


**Figure 3 : Couplage entre les efforts outil matière en FSW et la déformation de la structure robotisée**

Dans le cas d'une soudure bout-à-bout avec une ligne de joint rectiligne, la position dans le repère local peut être déterminée par quatre paramètres (voir Figure 4). Ces paramètres sont :

- Deux angles fixant l'orientation de l'axe de l'outil par rapport à la normale à la surface supérieure des pièces à assembler (α et β).
- Le décalage de l'outil perpendiculairement à la ligne de joint (**b**).
- La position de l'outil suivant son axe. Ce dernier n'est pas un paramètre de conduite, le procédé étant piloté en effort suivant son axe. L'outil FSW étant tournant, la position angulaire de l'outil autour de son axe n'est pas un paramètre.

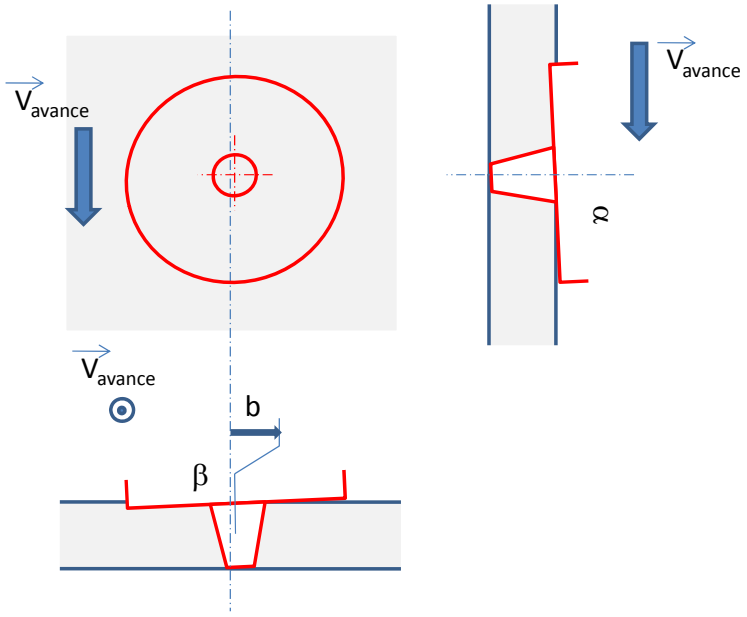


**Figure 4 : Paramètres décrivant la position et l'orientation de l'outil par rapport à la ligne de joint**

L'étude expérimentale est centrée sur l'impact des défauts de suivi de trajectoire et d'application des paramètres de conduite provoqué par l'utilisation du robot poly-articulé. De façon précise, ces derniers sont :

- Les angles α et β fixant l'orientation de l'axe de l'outil par rapport à la normale à la surface supérieure des pièces à assembler
- Le décalage de l'outil perpendiculairement à la ligne de joint
- La vitesse d'avance de l'outil.
- L'effort de forge

Pour les deux derniers paramètres, il s'agit de regarder l'impact d'une variation rapide par rapport à la valeur nominale. L'impact en « statique » de ces paramètres a fait l'objet d'une étude antérieure (rapport 2.1).

Le décalage « statique » de l'outil perpendiculairement à la ligne de joint pourrait engendrer une variation d'effort du fait du décalage de la surface d'accostage par rapport à l'outil. Dans ses travaux de thèse, Sandra Chevret [ZIM09] a montré que les efforts mesurés en FSW en pleine tôle ou en soudure bout-à-bout son équivalents. Il semblerait au regard de ces résultats que la présence de la surface d'accostage n'ait pas d'impact notable sur la valeur des efforts. Le décalage de la surface d'accostage, qui peut avoir un impact sur la qualité de la soudure et les défauts de soudage, n'aurait pas d'effets notables sur les efforts outil/matière. Il a été choisi de ne pas conduire de campagne expérimentale pour caractériser l'effet de ce défaut sur les efforts.

Le montage de soudage, plus particulièrement, l'enclume et le système de bridage, joue un rôle thermique qui peut s'avérer non négligeable. L'évacuation de la chaleur depuis la zone soudée vers le montage peut donc être à l'origine d'apparition de défauts et de modifications de l'amplitude des efforts de soudage.

## 2.3 Le processus de fabrication de la pièce soudée

La variation des dimensions des pièces brutes avant soudage va dépendre des opérations de fabrications antérieures à celle de soudage. La gamme de fabrication complète d'une pièce soudée peut faire intervenir des procédés comme les procédés de mise en forme par déformation plastique (pliage, emboutissage, roulage…), la fonderie ou des procédés de découpe. Les surfaces d'accostage sont souvent obtenues par usinage notamment dans le cas des soudures bout-à-bout de pièces complexes.

Les variations dimensionnelles des pièces brutes vont conduire à des défauts d'accostage qui localement se traduiront par des écarts par rapport à la configuration nominale. Deux défauts principaux ont été identifiés : un jeu entre les deux pièces, *j*, et une différence d'épaisseur, $\Delta e$. Les deux défauts sont illustrés sur la Figure 5.

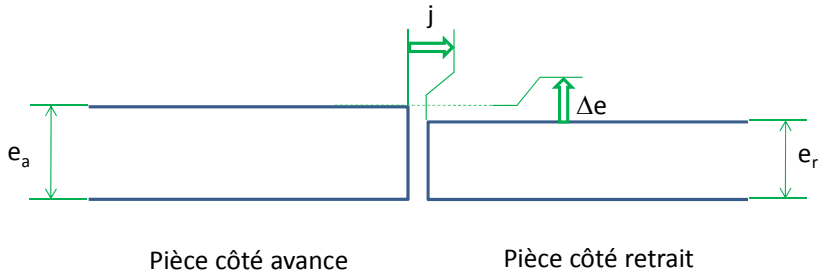


**Figure 5 : Défauts d'accostage**

La présence de l'enclume et du système de bridage devrait assurer un alignement des surfaces inférieures des pièces à souder. La différence d'épaisseur se répercutera exclusivement sur la surface supérieure. Il n'est pas toujours possible de compenser les jeux de soudage en jouant sur le montage de soudage et les systèmes de bridage. Dans le cas de soudures fermées, (voir exemple illustré sur la Figure 6), le jeu nécessaire à la mise en position du pallier sur la cloche sera également un jeu de soudage.

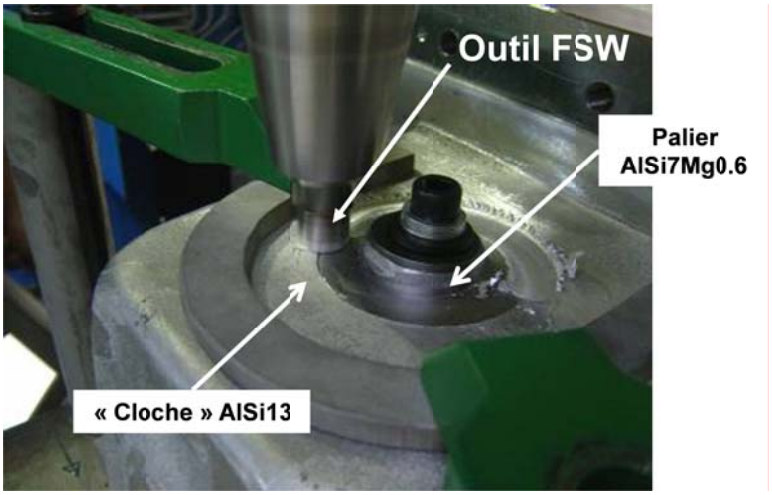


**Figure 6 : Photographie illustrant le cas d'une soudure circulaire d'un palier sur une cloche**

Les opérations de fabrication antérieures à celle de soudage peuvent également engendrer des dispersions en termes de qualité métallurgique. Les deux pièces à assembler peuvent donc être différentes également d'un point de vue métallurgique.

Les efforts de soudage dépendent de la valeur de ces défauts. Il est toutefois nécessaire d'étudier la transition entre des portions de soudure sans défaut et des portions avec défaut. Ceci permet d'étudier l'évolution des efforts au cours du régime transitoire entre les deux configurations.

## *2.4 Conclusions*

L'étude des pièces à souder (types d'applications envisagées), des moyens de production et de la gamme de soudage a permis de mettre en évidence les écarts envisageables entre la configuration nominale (de référence) étudiée précédemment (rapport 2.1) et les configurations réelles qu'il est possible de rencontrer. Certains de ces écarts viennent de la configuration réelle de soudage et donc de la forme des pièces à assembler. D'autres sont issus des défauts de suivi de trajectoire induit par la déformation des moyens de production sous l'action des efforts de soudage et enfin d'autres proviennent des dispersions induites par les opérations de fabrication antérieures au soudage, dispersions qui vont avoir un impact sur la géométrie et la métallurgie locales des bords de soudage.

Il est nécessaire d'étudier l'effet de ces écarts sur les efforts entre l'outil et la matière pour valider et/ou compléter le modèle développé dans les travaux précédents.

L'étude développée ci-dessous concerne donc :

- L'influence du passage d'une soudure rectiligne à une soudure circulaire dans le plan de la tôle. L'influence des deux autres rotations possibles du repère local ne fait pas l'objet de ce rapport.

- L'influence de la désorientation de l'outil, des variations de la vitesse d'avance et de l'effort de forgeage.
- L'influence des défauts d'accostage, à savoir, le jeu de soudage et la différence d'épaisseur entre pièces.
- L'influence d'une variation de qualité métallurgique des pièces.
- L'influence de la nature de l'enclume et plus particulière sa capacité à évacuer la chaleur.

| Provenance de l'écart | Produit | Moyens de production | Processus de fabrication |
|---|---|---|---|
| **Essais à réaliser** | ✓ Différence entre soudure rectiligne et soudure circulaire | ✓ Désorientation de l'outil<br>✓ Variation vitesse<br>✓ Variation effort<br>✓ Nature de l'enclume | ✓ Jeu de soudage<br>✓ Différence d'épaisseur<br>✓ Qualité métallurgique |

**Tableau 1 : Bilan des essais réalisés**

# 3 ETUDE DE L'INFLUENCE DU PASSAGE D'UNE SOUDURE RECTILIGNE À UNE SOUDURE CIRCULAIRE DANS LE PLAN DE LA TÔLE

Objectifs : Dans cette partie du travail, il s'agit de tester la validité de l'extrapolation des efforts mesurés dans le cadre d'une soudure rectiligne pour une soudure circulaire. Entre les deux soudures considérées, la nuance de l'alliage, la géométrie de l'outil et les paramètres de soudage sont conservés. Seule la forme de la ligne de joint évolue (voir Figure 7).

## *3.1 Campagne expérimentale*

### 3.1.1 Conditions de soudage

Les soudures concernent un alliage d'aluminium 6082 T651 en épaisseur 6mm. L'outil utilisé pour cette campagne est présenté dans l'annexe B. Tous les essais ont été réalisés sur la machine de soudage FSW MTS-ISTIR de l'Institut de Soudure (voir annexe A).

Six soudures de référence ont été identifiées. Pour chacune de ces soudures, le matériau et l'outil sont conservés. Les paramètres de soudage que sont la vitesse de rotation, la vitesse d'avance et l'angle de soudage changent. L'effort de forge est conservé à 10kN correspondant à un effort accessible par le robot poly-articulé. Dans le Tableau 2 sont regroupés les paramètres de soudage des cas de référence.

| Essais | Va[mm/min] | N[tr/min] | Fz [daN] | [°]pitch | [°]Roll |
|---|---|---|---|---|---|
| C1-1 | 450 | 1100 | 1000 | 2,5 | 0 |
| C3-1 | 650 | 1100 | 1000 | 2,5 | 0 |
| C4-1 | 450 | 900 | 1000 | 2,5 | 0 |
| C5-1 | 450 | 1100 | 1000 | 3,5 | 0 |
| C7-1 | 650 | 1100 | 1000 | 3,5 | 0 |
| C8-1 | 450 | 900 | 1000 | 3,5 | 0 |

**Tableau 2 : Paramètres des soudures de référence**

### 3.1.2 Géométries

Pour les soudures circulaires, deux paramètres ont été identifiés. Il s'agit du rayon de courbure de la ligne de joint et l'orientation de la vitesse de rotation de l'outil par rapport à la vitesse angulaire de parcours de la ligne de joint. Deux configurations sont possibles illustrées sur la Figure 7.

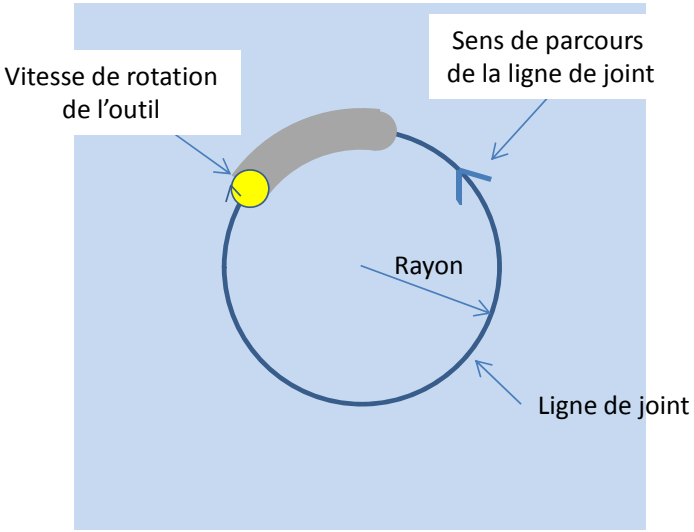


**Figure 7 : Schéma d'une soudure circulaire paramétrée**

Dans ce qui suit, on appelle $\vec{\omega}$ la vitesse de rotation instantanée de l'outil par rapport au repère de la machine et $\vec{\Omega}$ la vitesse angulaire de parcours de la ligne de joint. Le vecteur $\vec{\Omega}$ est défini par la relation suivante :

$$\vec{\Omega} = \frac{V_a}{R}.\vec{n} \qquad (1)$$

Où R est le rayon de la trajectoire et $\vec{n}$ le vecteur normal à la surface supérieure des pièces à souder. Par convention, on supposera que $\vec{\Omega}$ est orienté dans la même sens que $\vec{n}$.

Les deux configurations possibles sont fonction de la valeur du paramètre $\delta_o$ défini de la façon suivante :

$$\delta_o = \frac{\vec{\Omega}.\vec{\omega}}{\|\vec{\Omega}.\vec{\omega}\|} \qquad (2)$$

Si $\delta_o$ est égal à 1, le côté avance de la soudure est à l'extérieur du cercle et la vitesse de rotation de l'outil par rapport à la matière est la somme de la vitesse angulaire de parcours de la ligne de joint et de la vitesse de rotation de l'outil. Si $\delta_o$ est égal à -1, le côté avance est placé à l'intérieur de la trajectoire et la vitesse angulaire se soustrait à la vitesse de rotation.

Dans l'étude qui suit, pour les six jeux de paramètres du Tableau 2, quatre soudures sont réalisées correspondant à deux valeurs de rayons et aux deux valeurs du paramètre $\delta_o$. Le Tableau 3 donne les valeurs des rayons et de $\delta_o$.

| Rayon (mm) | $\delta_0$ |
|---|---|
| 125 | 1 |
| | -1 |
| 75 | 1 |
| | -1 |

**Tableau 3 : paramètres décrivant la soudure circulaire et l'orientation de la vitesse angulaire de parcours de la trajectoire par rapport à la vitesse de rotation de l'outil**

Deux types d'essais circulaires sont réalisés, illustrés sur la Figure 8. Les essais correspondant à des cercles complets et des soudures formées d'un enchaînement d'arcs de cercle.

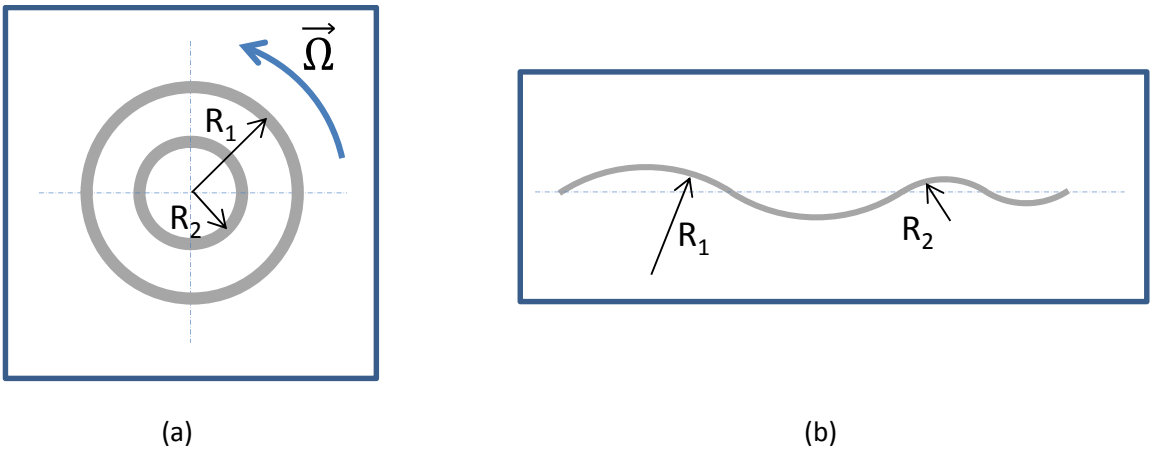


**Figure 8 : Schéma des deux types de soudures circulaires effectuées, (a) soudures circulaires fermées, (b) soudures en S**

Le premier type de soudure correspond à des cas fréquemment rencontrés sur des pièces industrielles. Les soudures sont fermées, il peut donc exister, en fonction de l'énergie de soudage et du rayon de la soudure, des phénomènes d'échauffement des pièces. Dans le deuxième cas, il s'agit d'éviter en partie le phénomène de recouvrement et d'échauffement de la matière et permet également sur un même essai d'enchaîner deux soudures de même rayon mais avec les deux valeurs de $\delta_0$.

Les résultats escomptés sont la mesure des efforts au cours de la phase de soudage. Ces valeurs seront comparées à celles mesurées dans le cas d'une soudure linéaire. La partie qui suit est dédiée aux soudures linéaires dites de référence.

Les essais de soudage circulaire sont réalisés en pleine tôle pour isoler l'effet de l'aspect circulaire de la soudure de l'effet des défauts d'accostage. En effet, il est difficile dans le cas d'une soudure circulaire de s'affranchir d'un jeu de soudage permettant la mise en position initiale des pièces.

## *3.2 Étude des soudures de référence*

### 3.2.1 Conditions expérimentales

Les soudures de références sont celles réalisées avec les paramètres du Tableau 2 dans une configuration de soudure linéaire sur une longueur de 350mm. Les essais de référence sont réalisés en pleine tôle sur des coupons d'une largeur de 100mm. Toutes les soudures de références appartiennent au domaine de soudabilité, c'est-à-dire qu'aucun défaut n'est constaté dans les soudures.

### 3.2.2 Analyse des efforts liés à la réalisation des soudures de référence

Les Figure 9 et Figure 10 illustrent le type de résultat obtenus concernant l'évolution au cours du soudage des composantes du torseur des efforts entre l'outil et la matière. Alors que l'effort de forge et le couple sont réguliers, on note une dispersion assez importante sur les deux autres composantes de la résultante des efforts outil/matière, l'effort d'avance et l'effort transverse. On note notamment des dérives de ces efforts au cours de la soudure. Ceci a déjà été commenté dans le livrable 2.1 et provient sans doute d'une variation des conditions tribologiques entre l'outil et la matière. L'écart maximum entre les valeurs moyennes de deux essais effectués avec les mêmes paramètres est de l'ordre de 0,2kN pour $F_x$ et $F_y$ alors que la dispersion enregistrée au cours d'un même essai peut être de l'ordre de 1kN.

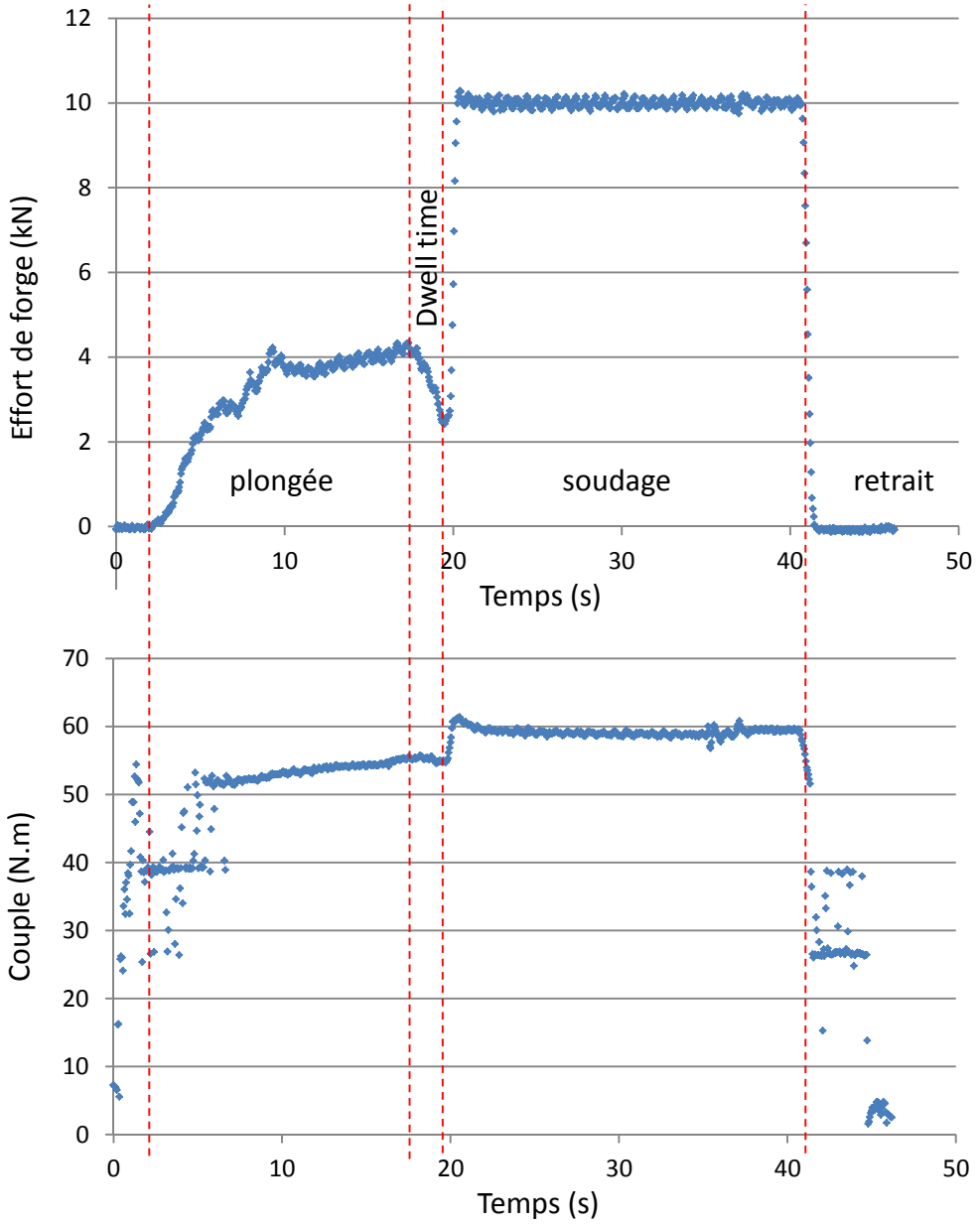


**Figure 9 : Évolution de l'effort de forge et du couple lors d'une soudure rectiligne avec les paramètres (N= 1100 tr/min, Va=450 mm/min et Fz= 10kN)**

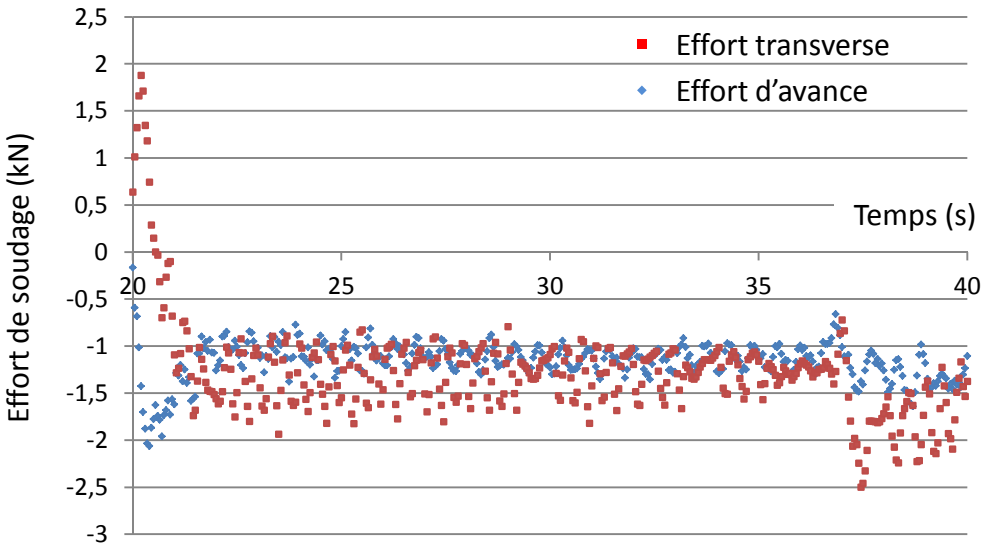


**Figure 10 : Évolution des efforts d'avance et transverse au cours d'une soudure rectiligne avec les paramètres (N= 1100 tr/min, Va=450 mm/min et Fz= 10kN)**

Le Tableau 4 donne les valeurs moyennes des composantes du torseur des efforts outil/matière pour les six essais de référence.

| N[tr/min] | Va[mm/min] | Fz [kN] | [°]tilt | Moyenne Fx | écart type | Moyenne Fy | écart type | Moyenne Couple | écart type |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1100 | 450 | 10 | 2,5 | -1,60 | 0,13 | -1,36 | 0,21 | 58,7 | 0,31 |
| 1100 | 450 | 10 | 2,5 | -1,60 | 0,17 | -1,55 | 0,15 | 59,0 | 0,27 |
| 1100 | 650 | 10 | 2,5 | -2,22 | 0,26 | -1,23 | 0,13 | 58,9 | 0,32 |
| 1100 | 650 | 10 | 2,5 | -2,08 | 0,30 | -1,32 | 0,21 | 58,8 | 0,28 |
| 900 | 450 | 10 | 2,5 | -1,63 | 0,15 | -1,45 | 0,13 | 61,9 | 0,41 |
| 900 | 450 | 10 | 2,5 | -1,62 | 0,15 | -1,49 | 0,12 | 62,0 | 0,47 |
| 1100 | 450 | 10 | 3,5 | -1,31 | 0,18 | -1,06 | 0,14 | 58,2 | 0,21 |
| 1100 | 450 | 10 | 3,5 | -1,35 | 0,20 | -1,27 | 0,16 | 58,5 | 0,24 |
| 1100 | 650 | 10 | 3,5 | -2,35 | 0,22 | -1,08 | 0,11 | 58,6 | 0,21 |
| 1100 | 650 | 10 | 3,5 | -2,22 | 0,22 | -1,08 | 0,10 | 58,5 | 0,20 |
| 900 | 450 | 10 | 3,5 | -1,73 | 0,16 | -0,81 | 0,10 | 61,0 | 0,39 |
| 900 | 450 | 10 | 3,5 | -1,68 | 0,16 | -0,83 | 0,09 | 60,9 | 0,46 |

**Tableau 4 : Composantes du torseur des efforts outil/matière pour les essais de références**

Les résultats du Tableau 4 illustrent le fait que l'effort d'avance croît avec la vitesse d'avance. L'effet de la vitesse de rotation sur l'effort d'avance est moins prononcé. L'effort d'avance croît légèrement avec l'angle de soudage (angle de tilt). On retrouve également l'effet prépondérant de la vitesse de rotation sur la valeur du couple et donc de la puissance de soudage.

L'influence des paramètres de soudage sur l'effort transverse est moins marquée que pour l'effort d'avance et le couple. Ceci va dans le sens des conclusions du livrable 2.1 sur cette composante d'effort. L'influence de l'angle de soudage irait dans le sens d'une diminution de l'effort transverse avec une augmentation de l'angle

de soudage. L'étude de l'influence de cet angle est présentée de façon plus complète et détaillée au chapitre suivant.

## 3.3 Étude des soudures circulaires fermées

Les conditions de l'ensemble des essais de soudage circulaire sont regroupées dans le Tableau 5. La campagne expérimentale est centrée autour des soudures réalisées avec une vitesse de rotation de 1100tr/min, une vitesse d'avance de 650mm/min et un effort de forge de 10kN. Ces paramètres conduisent à des soudures sans défaut avec les angles de soudage de 2.5° et 3.5°.

Des soudures circulaires ont été réalisées avec ces paramètres pour les deux diamètres, les deux angles de soudage et les deux valeurs de $\delta_0$. Des essais ont également été menés avec des valeurs de vitesse d'avance et de vitesse de rotation différentes pour confirmer ou infirmer les tendances observées sur les soudures linéaires.

Les paramètres de sortie de l'étude sont les composantes du torseur des efforts outil/matière au cours de la phase de soudage. Une attention particulière est portée sur la dérive de ces composantes au cours du soudage. En effet, les conditions thermiques de la soudure pourraient évoluer du fait de la fermeture du cordon de soudure.

| Essais | N[tr/min] | Va[mm/min] | Fz [kN] | [°]tilt | Cycles Rayon | $\delta_0$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| D1-1g seul | 1100 | 450 | 10 | 3,5 | 125 | -1 |
| D1-1p seul | 1100 | 450 | 10 | 3,5 | 75 | -1 |
| D2-1g | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 125 | -1 |
| D2-1p | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 75 | -1 |
| D2-2g | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 125 | -1 |
| D2-2p | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 75 | -1 |
| D2-3g | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 125 | -1 |
| D2-3p | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 75 | -1 |
| D3-1g | 900 | 450 | 10 | 3,5 | 125 | -1 |
| D3-1P | 900 | 450 | 10 | 3,5 | 75 | -1 |
| D4-1g | 1100 | 450 | 10 | 2,5 | 125 | -1 |
| D4-1p | 1100 | 450 | 10 | 2,5 | 75 | -1 |
| D5-1g | 1100 | 650 | 10 | 2,5 | 125 | -1 |
| D5-1p | 1100 | 650 | 10 | 2,5 | 75 | -1 |
| D5-2g | 1100 | 650 | 10 | 2,5 | 125 | -1 |
| D5-2p | 1100 | 650 | 10 | 2,5 | 75 | -1 |
| D5-3g | 1100 | 650 | 10 | 2,5 | 125 | -1 |
| D5-3p | 1100 | 650 | 10 | 2,5 | 75 | -1 |
| D6-1g | 900 | 450 | 10 | 2,5 | 125 | -1 |
| D6-1p | 900 | 450 | 10 | 2,5 | 75 | -1 |
| d7-1g | 1100 | 450 | 10 | 3,5 | 125 | 1 |
| d7-1P | 1100 | 450 | 10 | 3,5 | 75 | 1 |
| D8-1g | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 125 | 1 |
| D8-1p | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 75 | 1 |
| D8-2g | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 125 | 1 |
| D8-2p | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 75 | 1 |
| D8-3g | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 125 | 1 |
| D8-3p | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 75 | 1 |
| D9-1g | 900 | 450 | 10 | 3,5 | 125 | 1 |
| D9-1P | 900 | 450 | 10 | 3,5 | 75 | 1 |

**Tableau 5 : Paramètres des essais de soudage circulaires**

Dans un premier temps sont décrites les conditions expérimentales des essais circulaires.

### 3.3.1 Conditions expérimentales

Les essais circulaires sont réalisés dans une plaque carrée de 330mm de côté. L'outil, l'épaisseur et la matière des plaques sont donnés en début de chapitre. Deux soudures sont réalisées par plaque sous la forme de deux cercles concentriques dont les rayons sont donnés dans le Tableau 5. Le montage de soudage assure la mise en

position de la plaque carrée sur la table de soudage. Les deux cercles sont programmés ensemble afin d'assurer leur concentricité et la répétabilité des essais. La photographie de la Figure 11 illustre le montage de soudage et la disposition des soudures lors des essais. La machine a été programmée de telle sorte que le grand cercle est soudé en premier suivi par le petit cercle. Pour certains essais, les soudures sont réalisées dans le sens inverse pour observer l'effet éventuel de l'échauffement dû à la première soudure sur la deuxième soudure.

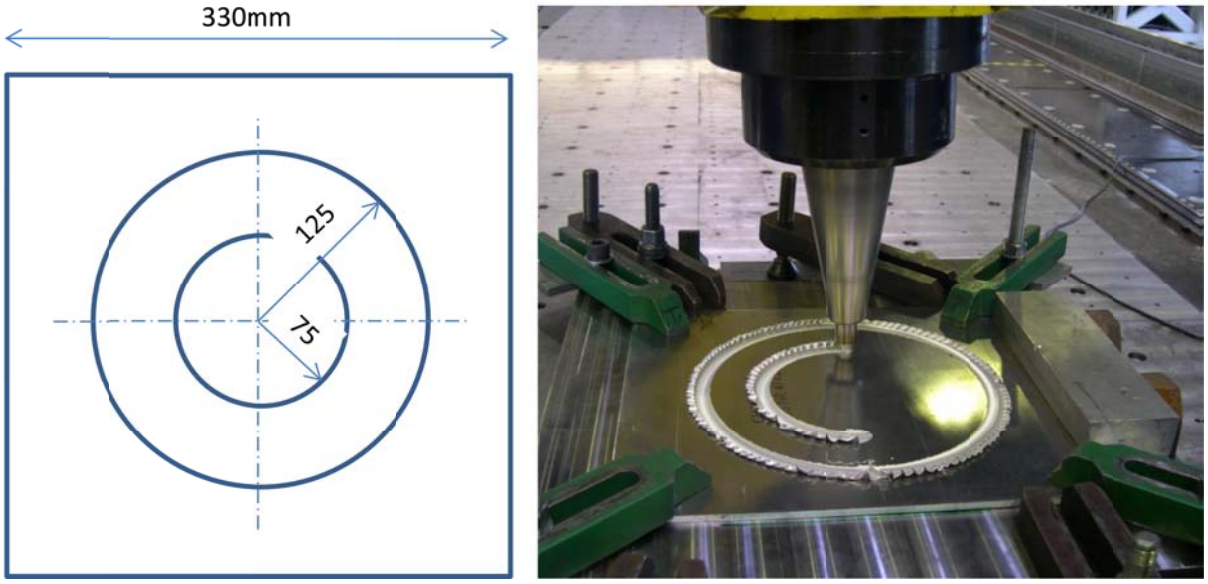


**Figure 11 : Photographie du dispositif expérimental pour les soudures circulaires**

### 3.3.2 Résultats

La Figure 12 illustre l'évolution des composantes de la résultante des efforts outil-matière obtenue pour l'essai D2-1g et D2-1p (voir Tableau 5).

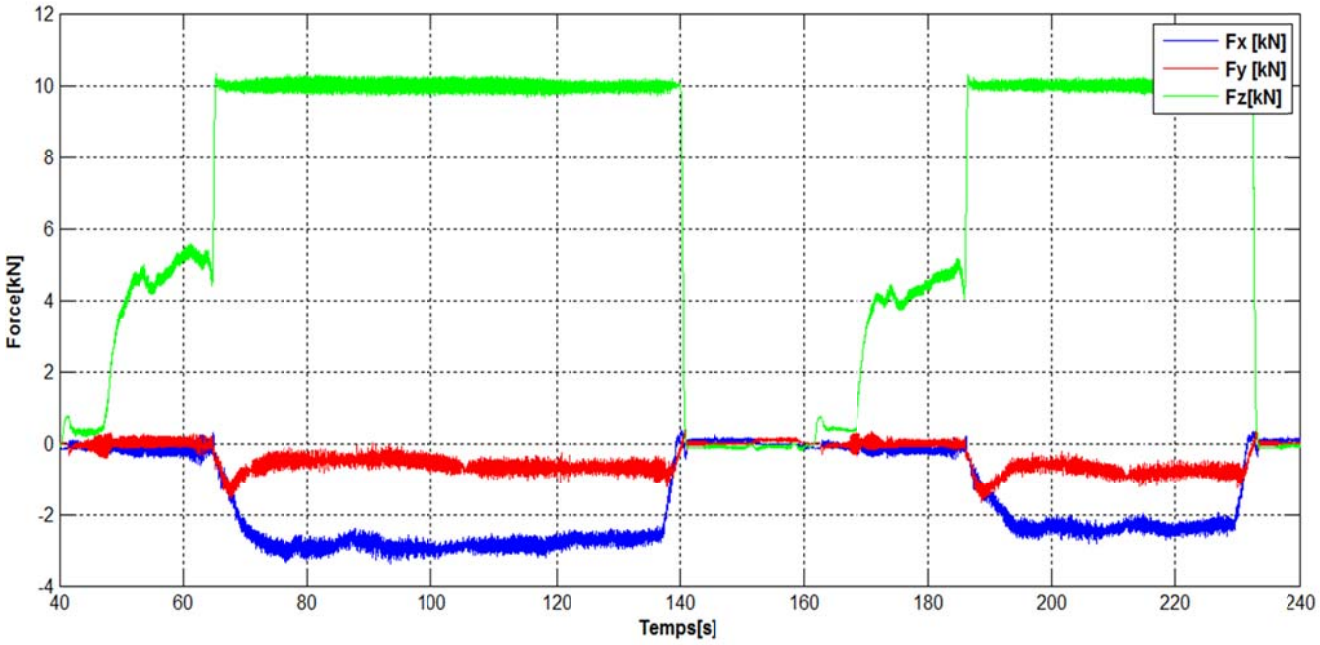


**Figure 12 : Évolution des trois composantes d'effort lors des soudures circulaires fermées D2-1g et D2-1p, soudures réalisées successivement sans temps d'attente**

On peut observer pour les deux soudures circulaires, la phase de pénétration et la phase de soudage. Pour les deux soudures, l'effort d'avance augmente progressivement en début de soudure pour atteindre un plateau. La forme du régime transitoire de la composante transverse de l'effort passe par un maximum avant de redescendre vers sa valeur plateau.

Il est à noter que cette forme transitoire d'évolution des composantes d'avance et transverse de l'effort d'avance s'observe systématiquement dans tous les essais réalisés à 1100 tr/min et 650 mm/min, quelle que soit la valeur de l'angle ou la valeur de $\delta_0$. Par contre, lorsqu'on change la vitesse d'avance ou la vitesse de rotation, les régimes transitoires peuvent prendre d'autres formes. La forme du régime transitoire est probablement liée à la phase de pénétration et notamment à l'effort de forge obtenu en fin de pénétration. Dans notre cas, l'effort atteint en fin de pénétration est de l'ordre de 5kN avec un effort de consigne pour la phase de soudage de 10kN. En début de la phase de soudage, on observe donc une rapide montée de l'effort de forge. Sur la Figure 12, on peut se rendre compte qu'à l'augmentation rapide de l'effort de forge en début de soudage correspond une évolution rapide de la pénétration de l'outil suivie d'une remontée de l'outil vers une valeur en régime établi de la pénétration. L'évolution des efforts de soudage en début de phase de soudage pourrait être en partie atténuée en modifiant les paramètres de la phase de plongée afin d'obtenir en fin de plongée un effort de forge proche de celui de la phase de soudage.

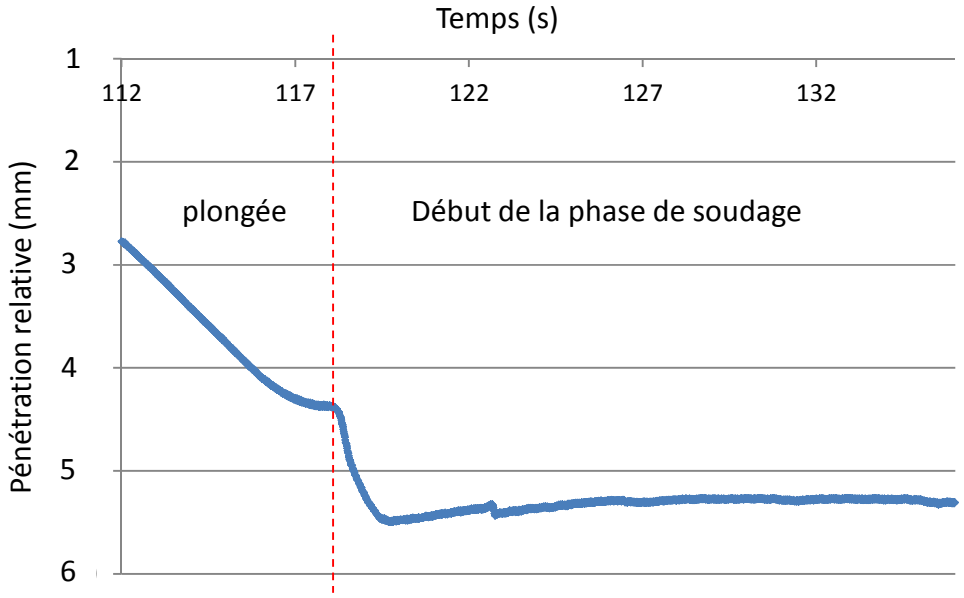


**Figure 13 : Évolution de la pénétration en début de soudure du second cercle**

La dérive des efforts au cours de la phase de soudage va de façon quasi systématique vers une faible chute de l'effort d'avance et une faible augmentation de l'effort transverse. Cette dérive est très faible mais est constatée au cours de tous les essais réalisés.

Entre le premier et le second cercle, on constate un resserrement entre l'effort d'avance et l'effort transverse. Ceci est constaté dans la quasi-totalité des cas. Il est à noter que dans les cas d'étude la soudure du grand cercle et du petit cercle sont réalisées systématiquement dans cet ordre et sans temps d'attente. La valeur des efforts d'avance et transverse pour le petit cercle peut être due à l'échauffement de la tôle associé à la réalisation du grand cercle. Un resserrement entre la valeur de l'effort d'avance et transverse pourra être associée à l'échauffement des tôles soudées dans le cas d'une seule soudure expliquant le phénomène de dérive comme dans le cas d'une soudure multiple.

Le Tableau 6 donne la valeur moyenne des composantes d'effort pour l'ensemble des jeux de paramètres testés.

| Essais | N[tr/min] | Va[mm/min | Fz [kN] | [°]tilt | Cycles Rayor | Sens | Moyenne Fx | écart type | Moyenne Fy | écart type |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| D1-g seul | 1100 | 450 | 10 | 3,5 | 125 | -1 | -1,30 | 0,16 | -1,03 | 0,14 |
| D1-p seul | 1100 | 450 | 10 | 3,5 | 75 | -1 | -1,29 | 0,17 | -0,98 | 0,14 |
| D2-g | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 125 | -1 | -2,76 | 0,21 | -0,62 | 0,18 |
| D2-p | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 75 | -1 | -2,34 | 0,17 | -0,75 | 0,16 |
| D3-g | 900 | 450 | 10 | 3,5 | 125 | -1 | -2,16 | 0,15 | -0,72 | 0,17 |
| D3-P | 900 | 450 | 10 | 3,5 | 75 | -1 | -1,75 | 0,16 | -0,97 | 0,14 |
| D4-g | 1100 | 450 | 10 | 2,5 | 125 | -1 | -1,33 | 0,21 | -1,19 | 0,16 |
| D4-p | 1100 | 450 | 10 | 2,5 | 75 | -1 | -1,26 | 0,20 | -1,13 | 0,16 |
| D5-g | 1100 | 650 | 10 | 2,5 | 125 | -1 | -2,55 | 0,23 | -0,86 | 0,19 |
| D5-p | 1100 | 650 | 10 | 2,5 | 75 | -1 | -2,07 | 0,24 | -1,23 | 0,17 |
| D6-g | 900 | 450 | 10 | 2,5 | 125 | -1 | -1,84 | 0,17 | -1,17 | 0,14 |
| D6-p | 900 | 450 | 10 | 2,5 | 75 | -1 | -1,55 | 0,15 | -1,18 | 0,15 |
| d7-g | 1100 | 450 | 10 | 3,5 | 125 | 1 | -1,28 | 0,15 | -1,22 | 0,14 |
| d7-p | 1100 | 450 | 10 | 3,5 | 75 | 1 | -1,17 | 0,15 | -1,29 | 0,15 |
| D8-g | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 125 | 1 | -2,60 | 0,18 | -1,05 | 0,16 |
| D8-p | 1100 | 650 | 10 | 3,5 | 75 | 1 | -2,06 | 0,16 | -1,32 | 0,16 |
| D9-g | 900 | 450 | 10 | 3,5 | 125 | 1 | -1,96 | 0,11 | -1,09 | 0,14 |
| D9-p | 900 | 450 | 10 | 3,5 | 75 | 1 | -1,65 | 0,12 | -1,29 | 0,13 |

**Tableau 6 : Valeurs moyennes des efforts de soudage au cours des soudures circulaires**

D'après le Tableau 6, on peut constater que le sens de rotation de l'outil par rapport au sens de parcours de la soudure circulaire a une incidence non négligeable sur les efforts. On remarque de façon générale que le fait de mettre le côté avance de la soudure à l'extérieur du cercle tend à baisser l'effort d'avance et à augmenter l'effort transverse. L'effet de la valeur de $\delta_0$ sur la valeur des efforts de soudage est plus important que l'effet de la courbure de la trajectoire (pour les valeurs de courbure étudiées).

## *3.4 Essais complémentaires*

### 3.4.1 Étude de l'influence de l'échauffement des tôles soudées

Dans un premier temps, pour étudier l'éventuel effet de l'échauffement de la tôle au cours de la soudure circulaire, un essai a été conduit avec les conditions opératoires de l'essai D5 (voir Tableau 5) mais en inversant l'ordre de réalisation du grand et du petit cercle et en introduisant un temps de refroidissement entre les deux soudures.

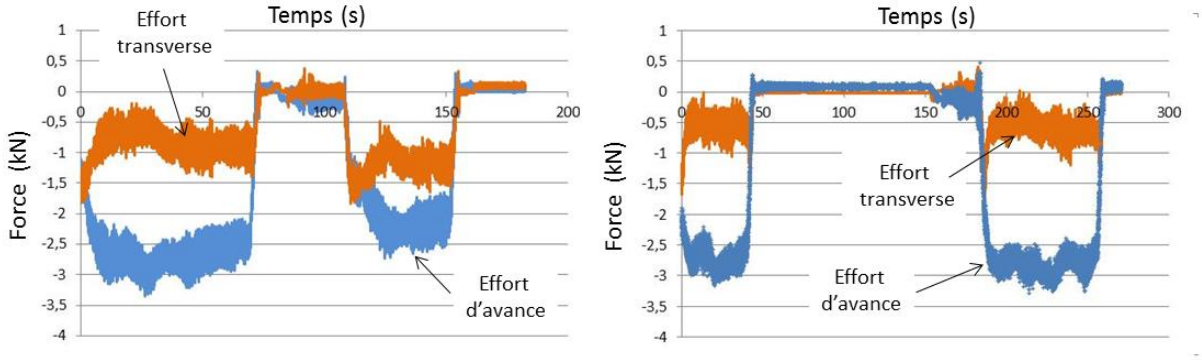


**Figure 14 : Évolution des composantes d'effort d'avance et transverse au cours de soudures circulaires réalisées avec les paramètres D5 du Tableau 5**

Sur la Figure 14, on peut remarquer que le resserrement des courbes lors de la deuxième soudure n'est pas observé lorsqu'un temps de refroidissement est introduit entre les deux soudures. Le niveau d'effort transverse est compris entre 0,5 et 1 kN lorsque la tôle est initialement à la température ambiante. Il semblerait donc que l'effet du rayon de la soudure n'ait pas de rôle majeur direct sur les efforts de soudage. L'influence du rayon de courbure de la trajectoire aurait un effet négligeable devant celui de l'échauffement de la tôle.

### 3.4.2 Étude des soudures à vide

Des essais à vide sans rotation de la broche ont été menés pour estimer l'erreur de mesure des composantes d'effort du fait de la dynamique de la machine. Les efforts d'avance et transverse sont calculés à partir de la mesure des couples aux deux axes till et roll de la machine. Au cours d'une trajectoire circulaire, une partie de ce couple peut provenir de la dynamique de la machine.

Les trajectoires circulaires des cercles de rayon 75mm et 125mm ont été réalisées à vide avec une vitesse d'avance de 650mm/min et une vitesse de rotation de la broche nulle.

On constate une variation des composantes d'effort d'avance et transverse de 0,3 kN.

## *3.5 Étude des soudures circulaires en S*

### 3.5.1 Conditions expérimentales

Les essais en S ont été réalisés avec un seul jeu de paramètres. Les soudures en S sont constituées de deux arcs de cercles de rayon 125mm et de deux arcs de rayon 75mm. L'ordre des arcs de cercles et le sens de parcours des arcs sont les variables de l'étude paramétrique. La forme en S de la trajectoire complète devrait minimiser les effets dus à l'échauffement mis en évidence au paragraphe précédent. Les paramètres de soudage sont donnés dans le Tableau 7.

| Nom Essai | Va[mm/min] | N[tr/min] | Fz [daN] | [°]angle de soudage | Cycles Rayon | $\delta_0$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| S1-1 | **650** | **1100** | **1000** | **2,5** | 125-125-75-75 | -1; 1; -1; 1 |
| S1-2 | **650** | **1100** | **1000** | **2,5** | 125-125-75-75 | 1; -1; 1; -1 |
| S2-1 | **650** | **1100** | **1000** | **2,5** | 75-75-125-125 | -1; 1; -1; 1 |
| S2-2 | **650** | **1100** | **1000** | **2,5** | 75-75-125-125 | 1; -1; 1; -1 |

**Tableau 7 : Paramètres des essais de soudage circulaire en S**

### 3.5.2 Résultats

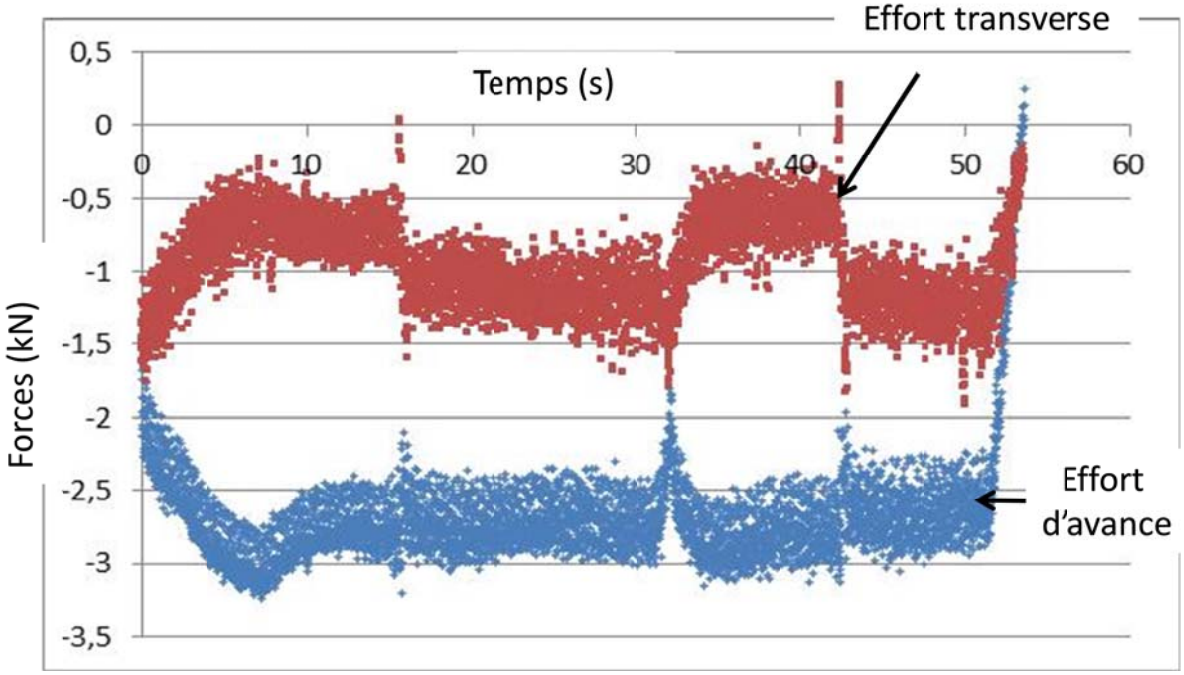


**Figure 15 : Évolution de l'effort d'avance et de l'effort transverse en fonction du temps lors d'une soudure en S (Soudure S1-1).**

Sur la Figure 15, on remarque les quatre arcs de cercles. On note également la phase transitoire en début de soudure correspondant à ce qui est observé pour les cercles fermés. Entre deux arcs de cercles, on note une perturbation des deux composantes d'effort. Ceci provient de la discontinuité de courbure de la trajectoire à ces endroits. Lors de ces transitions, la machine n'est pas capable d'assurer une valeur constante à la vitesse d'avance. La durée de cette transition dépend des capacités dynamiques de la machine d'essai. De même, l'accélération de la machine contribue par des effets dynamiques à une partie du couple mesuré sur les axes tilt et roll de la machine se traduisant par un calcul erroné des composantes d'effort.

Si on observe les mesures d'effort en dehors des périodes transitoires, on note un saut significatif en effort transverse entre deux arcs successifs. On observe donc une différence significative de la valeur de l'effort transverse entre un même arc parcouru avec deux valeurs de $\delta_0$. Ceci vient confirmer les tendances déjà mises en évidence lors des soudures circulaires fermées. L'effort transverse est plus important lorsqu'on place le côté avance de la soudure à l'extérieur de la courbure.

L'effet de la valeur de $\delta_0$ sur la valeur de l'effort d'avance est beaucoup moins net. Les variations d'effort d'avance mesurées semblent faibles par rapport à la valeur moyenne de l'effort d'avance.

# 4 ETUDE DE L'INFLUENCE D'UNE VARIATION DES CONDITIONS OPÉRATOIRES DE SOUDAGE

Objectifs : Dans cette partie du travail, il s'agit d'étudier l'évolution des efforts de soudage lors d'une variation de l'orientation de l'outil se produisant pendant la soudure.

## *4.1 Campagne expérimentale*

Le principe des essais consiste à faire varier de façon linéaire l'orientation de l'outil sur une partie de la course totale de soudage. L'influence de l'évolution des angles pitch et roll est étudiée séparément. Le principe de l'essai est illustré sur la Figure 16.

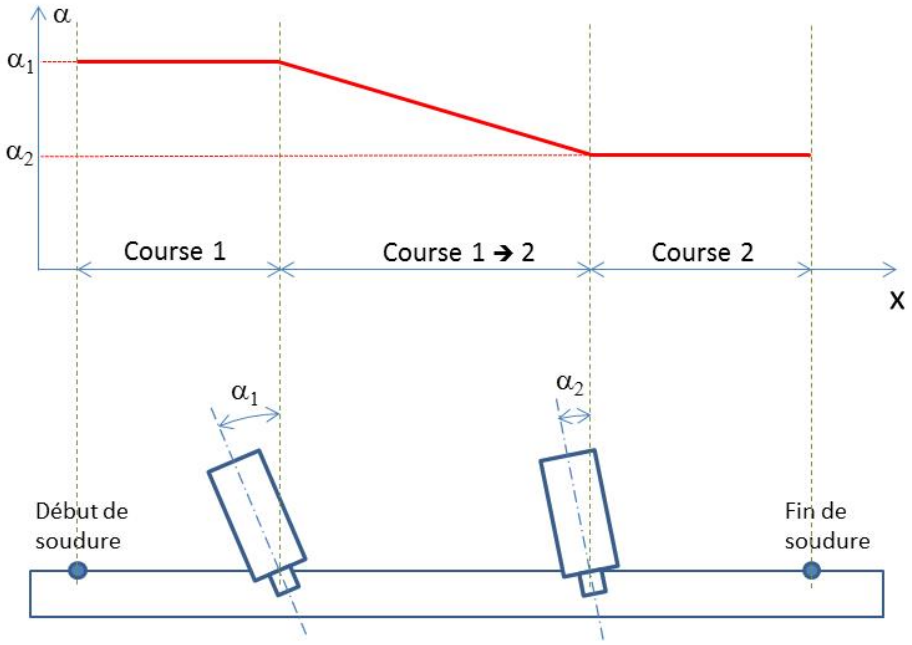


**Figure 16 : Principe des essais pour l'étude de l'évolution de l'orientation de l'outil**

L'essai de soudage comporte donc trois parties :

- Une première course (Course 1) réalisée à orientation constante avec les paramètres de soudage d'un essai de référence (voir Tableau 2)
- Une deuxième course (Course 1→2) réalisée avec les mêmes paramètres de soudage et avec une évolution linéaire de l'orientation de l'outil
- Une troisième course (Course 2) à orientation constante et toujours avec les mêmes paramètres de soudage.

Les paramètres de l'étude sont les angles de début et de fin de soudure ainsi que la longueur de la course 1➔2 (voir Figure 16).

Pour l'étude de l'influence de l'évolution de l'angle $\alpha$, les essais consistent à passer d'une valeur de 2.5° vers un angle de 3.5° (et inversement), ces deux valeurs correspondant à des essais de référence du Tableau 2.

Pour l'étude de l'influence de l'angle $\beta$, les essais consistent à passer d'un angle de 0° à 2°.

Deux longueurs de la course de transition ont été étudiées, 50 et 100mm. Le Tableau 8 regroupe les paramètres de l'ensemble des essais.

| | essais | Va[mm/min] | N[tr/min] | Fz [daN] | angle [°]pitch | angle Roll [°] | cycle angle |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Variation Angle $\alpha$ | C9 | 450 | 1100 | 1000 | 2,5-3,5 | 0 | 125-100-125 |
| | C10 | 450 | 1100 | 1100 | 2,5-3,5 | 0 | 125-100-125 |
| | C11 | 650 | 1100 | 1000 | 2,5-3,5 | 0 | 125-100-125 |
| | C12 | 450 | 900 | 1000 | 2,5-3,5 | 0 | 125-100-125 |
| | C13 | 450 | 1100 | 1000 | 3,5-2,5 | 0 | 125-100-125 |
| | C14 | 650 | 1100 | 1000 | 3,5-2,5 | 0 | 125-100-125 |
| | C15 | 450 | 900 | 1000 | 3,5-2,5 | 0 | 125-100-125 |
| | C16 | 450 | 1100 | 1000 | 2,5-3,5 | 0 | 125-50-175 |
| | C17 | 650 | 1100 | 1000 | 2,5-3,5 | 0 | 125-50-175 |
| | C18 | 450 | 900 | 1000 | 2,5-3,5 | 0 | 125-50-175 |
| | C19 | 450 | 1100 | 1000 | 3,5-2,5 | 0 | 125-50-175 |
| | C20 | 650 | 1100 | 1000 | 3,5-2,5 | 0 | 125-50-175 |
| | C21 | 450 | 900 | 1000 | 3,5-2,5 | 0 | 125-50-175 |
| Variation Angle $\beta$ | C22 | 450 | 1100 | 1000 | 3,5 | 2 | 350 |
| | C23 | 650 | 1100 | 1000 | 3,5 | 2 | 350 |
| | C24 | 450 | 900 | 1000 | 3,5 | 2 | 350 |
| | C25 | 450 | 1100 | 1000 | 3,5 | 0-2 | 125-100-125 |
| | C26 | 650 | 1100 | 1000 | 3,5 | 0-2 | 125-100-125 |
| | C27 | 450 | 900 | 1000 | 3,5 | 0-2 | 125-100-125 |
| | C28 | 450 | 1100 | 1000 | 3,5 | 2-0 | 125-100-125 |
| | C29 | 650 | 1100 | 1000 | 3,5 | 2-0 | 125-100-125 |
| | C30 | 450 | 900 | 1000 | 3,5 | 2-0 | 125-100-125 |
| | C31 | 450 | 1100 | 1000 | 3,5 | 0-2 | 125-50-175 |
| | C32 | 650 | 1100 | 1000 | 3,5 | 0-2 | 125-50-175 |
| | C33 | 450 | 900 | 1000 | 3,5 | 0-2 | 125-50-175 |
| | C34 | 450 | 1100 | 1000 | 3,5 | 2-0 | 125-50-175 |
| | C35 | 650 | 1100 | 1000 | 3,5 | 2-0 | 125-50-175 |
| | C36 | 450 | 900 | 1000 | 3,5 | 2-0 | 125-50-175 |

**Tableau 8 : Paramètres des essais pour l'étude de l'influence de la variation d'orientation de l'outil**

## 4.2 Résultats expérimentaux

### 4.2.1 Étude de la variation de l'angle α

La Figure 17 présente le résultat obtenu pour la mesure d'effort d'avance et transverse pour les conditions de soudage de la ligne C14 du Tableau 8.

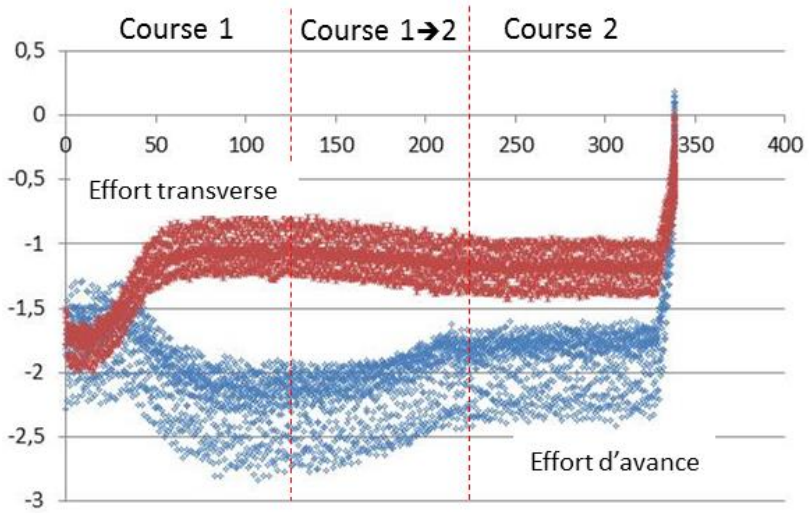


**Figure 17 : Évolution des efforts d'avance et transverse lors de l'essai C14 (voir Tableau 8).**

Sur cette figure, on note au début de la « course 1 » la zone transitoire déjà constatée pour les essais circulaires ou les essais de référence. On note également que la transition des efforts lors de la « couse 1➔2 » est régulière, la valeur moyenne des efforts de la « course 1 » et de la « course 2 » étant de l'ordre de grandeur de celle des essais de référence correspondants.

Sur la Figure 18 est présentée l'évolution des efforts pour les mêmes paramètres de soudage mais une couse 1➔2 de 50mm.

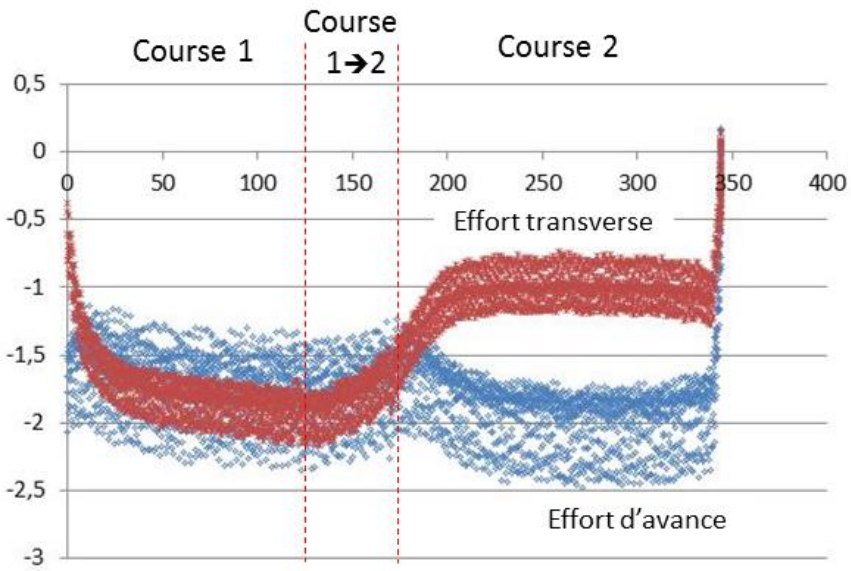


**Figure 18 : Évolution des efforts d'avance et transverse lors de l'essai C17 (voir Tableau 8)**

Sur la Figure 18, on peut remarquer que la transition d'effort se poursuit au-delà de la course 1 ➔2. Alors que l'outil a déjà rejoint son orientation finale, le régime transitoire en effort se poursuit au début de la course 2. Les valeurs limites des efforts transverses et d'avance sont celles mesurées dans le cas des essais de références correspondants.

### 4.2.2 Étude de la variation de l'angle β

La Figure 19 représente l'évolution des efforts de soudage obtenus avec les conditions opératoires de l'essai C25 (Voir Tableau 8).

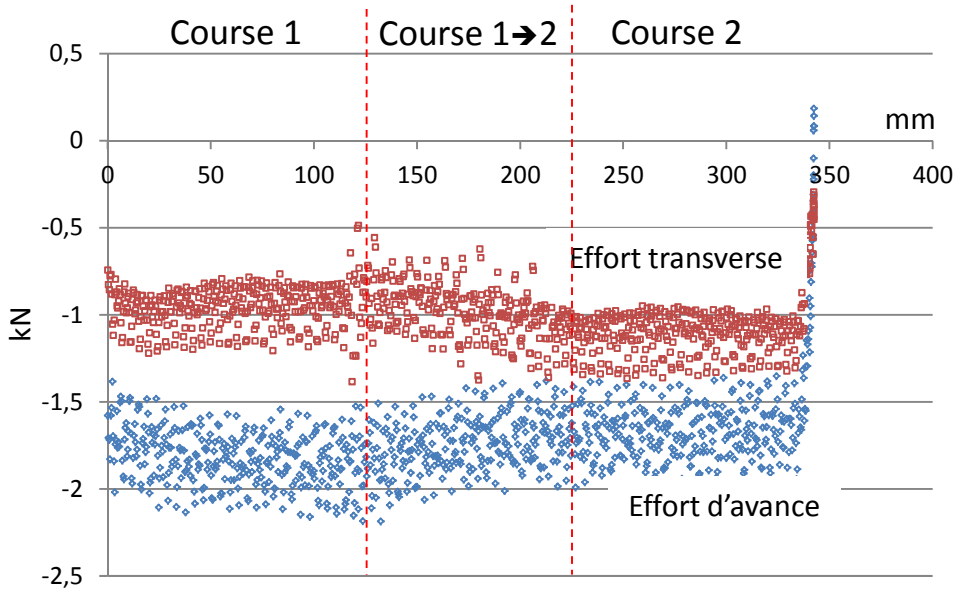


**Figure 19 : Évolution des efforts d'avance et transverse lors de l'essai C25 (voir Tableau 8)**

Comme dans le cas de l'évolution de l'angle de tilt, on note une transition régulière entre deux régimes permanents. Dans le cas d'une course de transition de 50 mm et contrairement au cas de la Figure 18Figure 17, on ne note pas de régime transitoire s'étendant au-delà de la course 1➔2 (voir Figure 20).

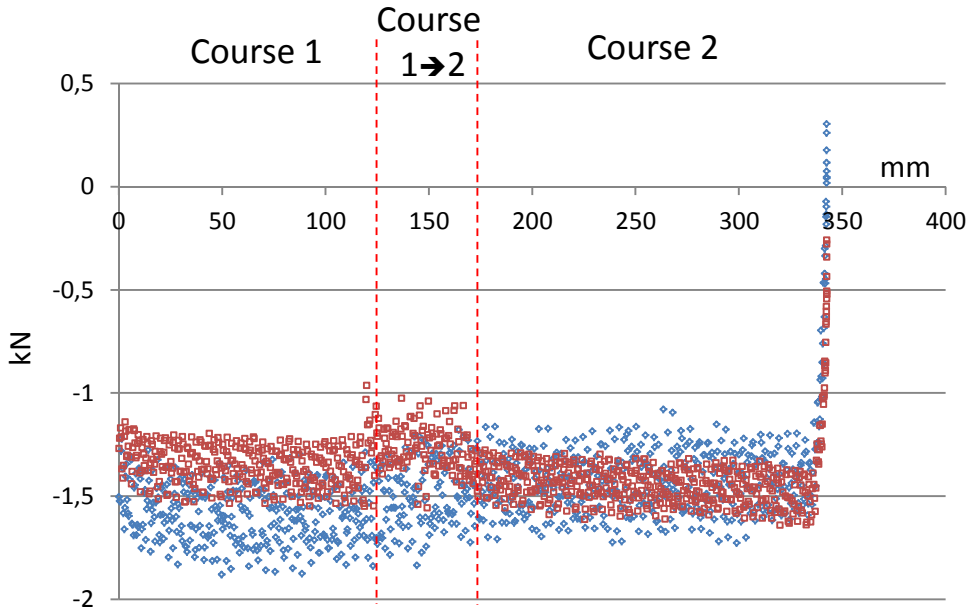


**Figure 20 : Évolution des efforts d'avance et transverse lors de l'essai C31 (Voir Tableau 8)**

## 4.3 Évolution de la pénétration de l'outil au cours des transitions

Sur la Figure 21, sont représentées l'évolution de la pénétration de l'outil au cours de l'opération de soudage avec les paramètres des essais C14 et C17 (essai avec changement de l'angle tilt). Sur les figures sont tracées l'évolution de la pénétration relative représentant la pénétration de l'outil par rapport au maximum de la pénétration mesurée au cours de l'essai.

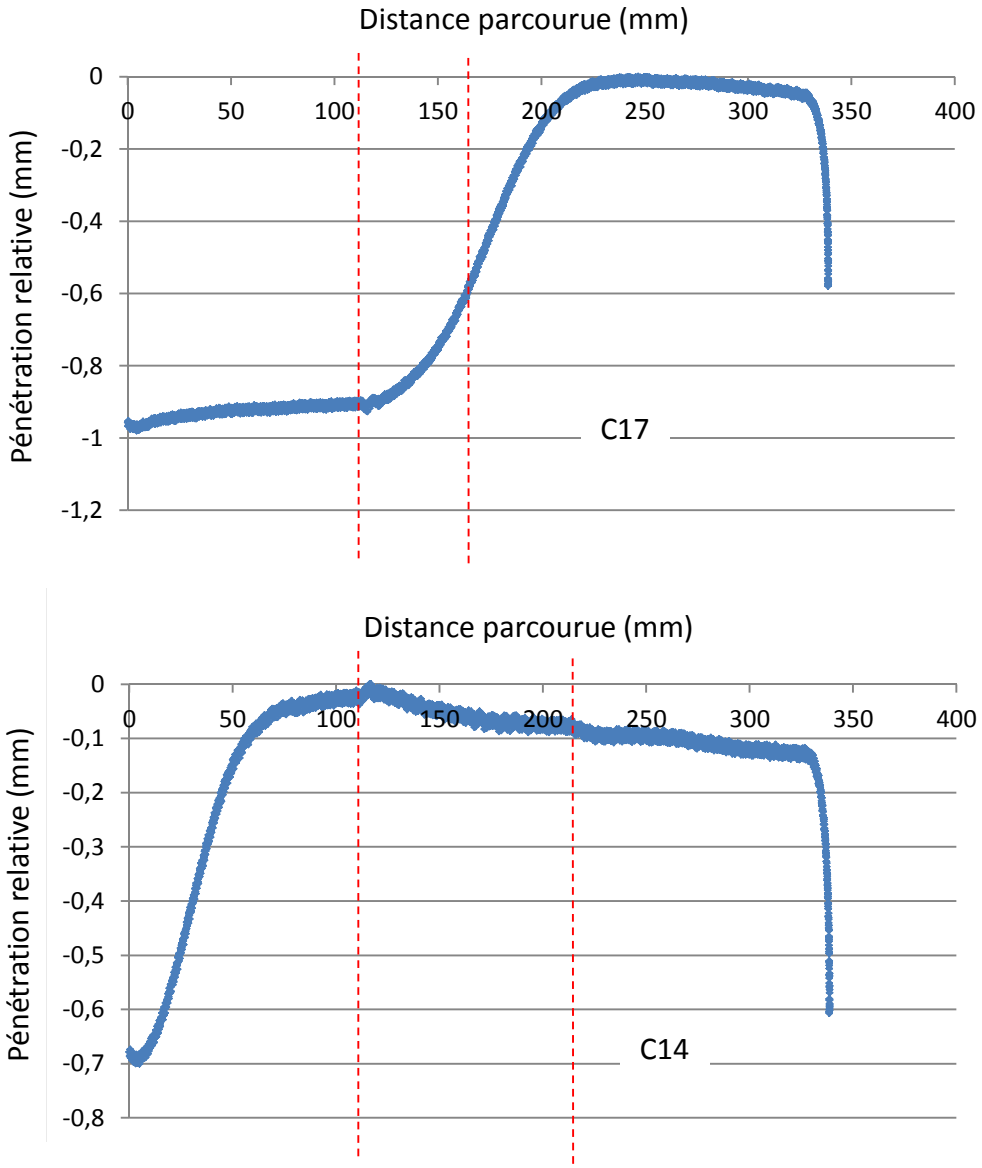


**Figure 21 : Évolution de la pénétration de l'outil pour les soudures réalisées avec les conditions C14 et C17 du Tableau 8**

Entre les deux essais, on peut constater une grande différence dans l'évolution de la pénétration de l'outil. Au cours de l'essai avec une évolution de l'angle sur une distance de 100mm, on remarque une évolution lente et

régulière de la pénétration. Au cours de l'essai avec une évolution sur une distance de 50mm, on remarque une évolution de la pénétration s'étendant au-delà de la période de transition. Les tendances observées sur les composantes d'effort de soudage et transverse peuvent sans doute s'expliquer au travers de l'évolution de la pénétration de l'outil.

Lors de l'évolution lente de l'angle de tilt, la pénétration de l'outil évolue lentement, celle-ci pouvant représenter un équilibre quasi-statique. Lors de l'évolution rapide, l'outil est hors équilibre au cours du changement, celui-ci est atteint après une période transitoire s'étendant après la stabilisation de l'orientation de l'outil.

Si on regarde l'évolution du couple lors du soudage, on peut noter que lors de la première course (Course 1 de la Figure 21) les deux régimes transitoires aboutissent à des valeurs de couple différentes : environ 58N.m pour l'essai C14 et 60N.m pour l'essai C17.

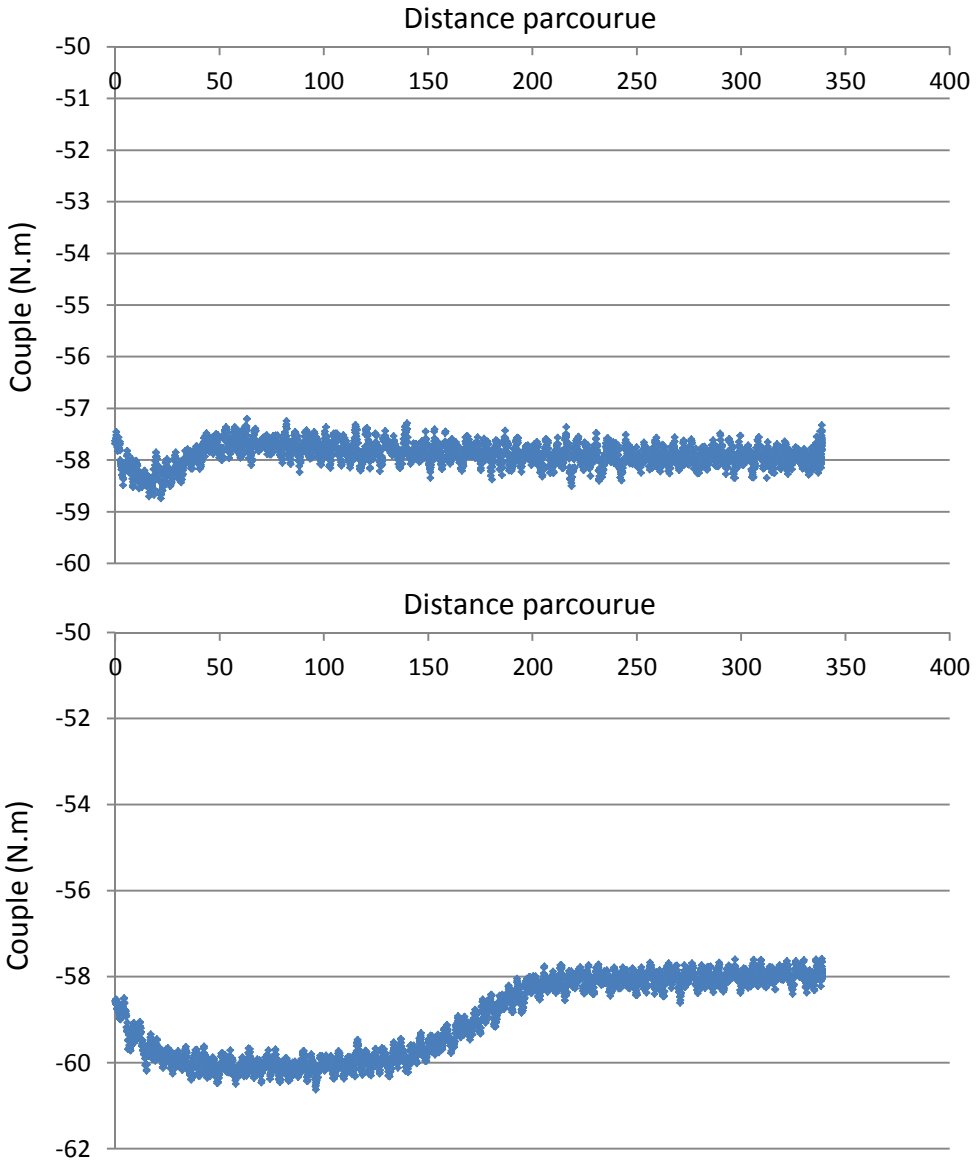


**Figure 22 : Évolution du couple pour les soudures réalisées avec les conditions C14 et C17 du Tableau 8**

La puissance et l'énergie nominale pour les conditions C17 sont donc plus élevées ce qui se traduit par une pénétration plus importante. Après la désorientation de l'outil lors de la course 1➔2, le couple se stabilise à une même valeur de l'ordre de 58N.m, ce qui se traduit par une pénétration proche et des valeurs d'efforts de soudage proche pour les deux essais.

Les différences constatées entre l'essai C14 et C17 ne semblent donc pas dues à la variation de la longueur de la course 1➔2 mais à un état initial atteint lors de la course 1 différent.

## 4.4 Conclusions

Lors de l'évolution de l'orientation de l'outil par rapport à la ligne de joint, les transitions en effort et en couple sont régulières, ne présentant pas de pics ou de chutes brutales. Les composantes d'effort (couple et effort d'avance et transverse) évoluent progressivement entre deux régimes permanents. En fonction de l'écart entre les deux régimes, la durée de la période transitoire peut excéder la durée de la période de désorientation de l'outil.

Les efforts de soudage, à force de forge, vitesse d'avance et fréquence de rotation fixées, semblent corrélés à la pénétration et au couple de soudage. Ce dernier détermine l'énergie de soudage et donc dans une certaine mesure la température atteinte par le matériau malaxé. Le comportement du matériau malaxé, notamment sa viscosité, va dépendre de la température. Ceci pourrait expliquer la différence de pénétration constatée entre les essais. Les essais semblent mettre en évidence le couplage entre la pénétration et le couple au travers des aspects thermiques du procédé.

Enfin, au cours de la course 1➔2, se pose la question de la position du centre du repère de l'outil. Celui-ci est placé sur l'axe de la broche qui en première approximation peut être considéré confondu avec l'axe de l'outil. Par contre, sa position sur cet axe est donnée par un paramètre qui doit être déterminé à partir des dimensions de l'outil. De façon générale, le centre de l'outil est défini comme le point d'intersection entre l'axe de l'outil et le plan tangent à la surface l'épaulement et du côté libre de l'épaulement. La Figure 23, ci-dessous, illustre la définition de la position du centre outil et sa position par rapport à la surface supérieure des pièces à souder en cours de soudage.

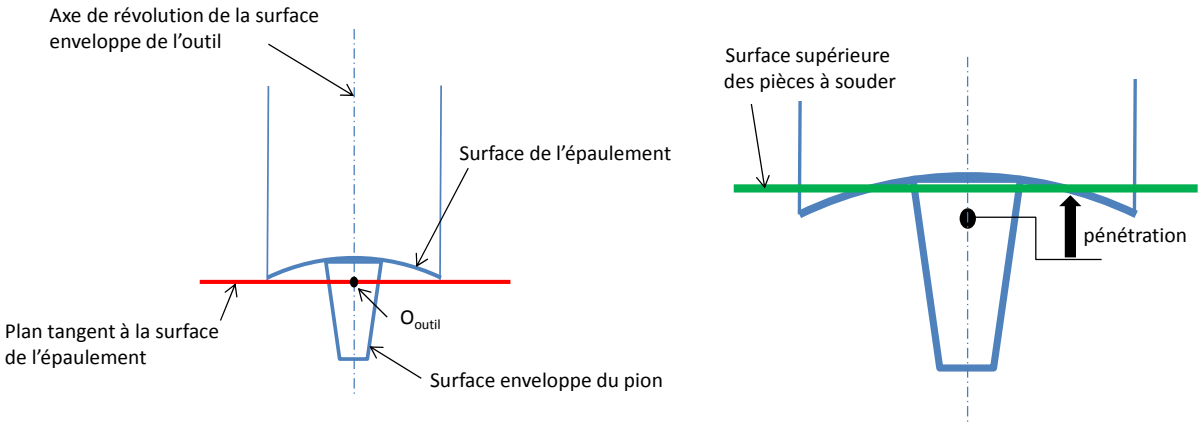


**Figure 23 : Définition géométrique du centre outil et position du centre outil en cours de soudage**

En fonction de la position du centre outil et de la pénétration atteinte à l'issue de la course 1, le mouvement de l'outil dans la matière associé à son changement d'orientation n'est pas équivalent. De plus, au changement d'orientation va s'ajouter l'évolution de la pénétration liée au fait que l'outil est piloté en effort suivant son axe. On peut donc remarquer que l'évolution de la pénétration et donc des efforts et couple de soudage vont fortement dépendre de la pénétration atteinte à l'issue de la course d'approche avant la

désorientation de l'outil. La dispersion des résultats obtenus peut probablement s'expliquer de ce fait. Il reste toutefois à comprendre pourquoi lors de deux essais réalisés avec une course 1 identique, on peut aboutir à deux pénétrations différentes.

# 5 VARIATION DE LA VITESSE D'AVANCE ET DE L'EFFORT DE FORGE

Objectifs : L'objectif de cette partie est d'étudier l'influence d'une variation de la vitesse d'avance et de l'effort de forge au cours de la soudure sur les efforts d'avance et transverse. Les influences de la vitesse d'avance et de l'effort de forge sont étudiées séparément.

## *5.1 Étude des effets d'une variation de la vitesse d'avance*

### 5.1.1 Procédure expérimentale

Les essais de soudage consistent en une soudure rectiligne de 300mm de long avec une variation de la vitesse d'avance en cours de soudage. La variation de vitesse est programmée sur une longueur de 50mm. Sur la Figure 24 est illustré le principe de l'essai.

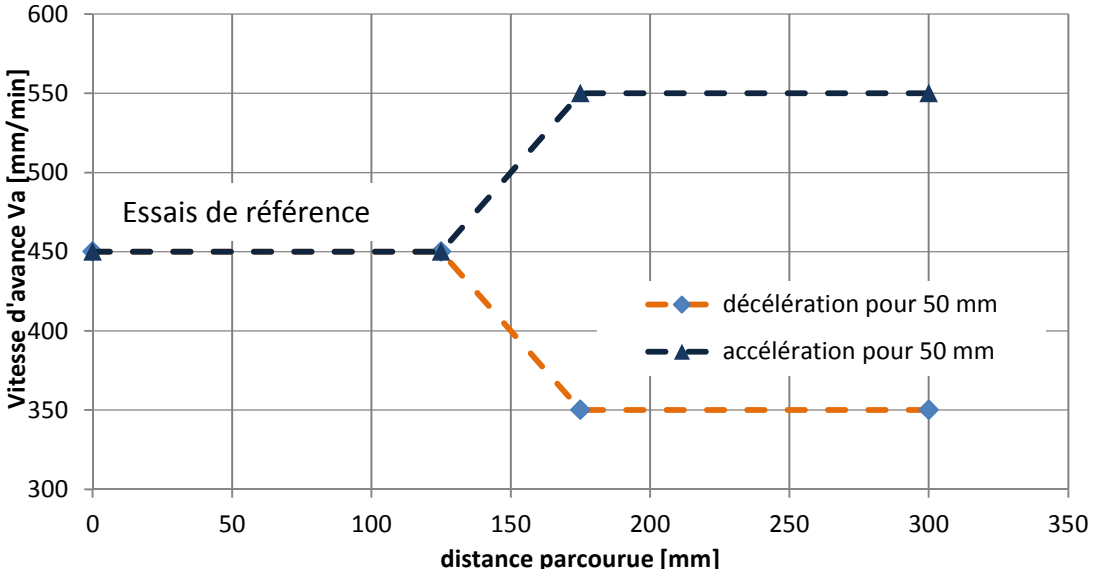


**Figure 24 : Principe de l'essai pour l'étude de l'influence d'une variation de la vitesse d'avance en cours de soudage**

La soudure se décompose en trois parties, comme pour l'étude du changement d'orientation de l'outil. Une première course (course 1) réalisée avec les mêmes paramètres opératoires quel que soit l'essai. Une deuxième course (course 1➔2) de 50mm de long pendant laquelle la vitesse de soudage évolue linéairement

jusqu'à une valeur cible et une troisième course (course 2) réalisée à paramètres opératoires constants avec la vitesse d'avance cible.

Le Tableau 9 donne l'ensemble des paramètres opératoires des essais réalisés. L'essai de référence ainsi que les deux essais cibles ont été réalisés sur des soudures de 300mm à vitesse d 'avance constante. Les valeurs d'effort pour ces essais servent de référence pour le deuxième type d'essais réalisés avec changement de vitesse comme décrit sur la Figure 24.

| Vitesse d'avance | Fréquence de rotation | Effort de forge | Angle Tilt | Courses | Effort d'avance | Ecart type | Effort transverse | Ecart type |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 350 | 1100 | 1000 | 2,5 | 300,000 | -0,872 | 0,231 | -1,160 | 0,15655549 |
| 550 | 1100 | 1000 | 2,5 | 300 | -1,72363974 | 0,23662749 | -1,33746408 | 0,14599793 |
| 450 | 1100 | 1000 | 2,5 | 300 | -1,17305361 | 0,24267268 | -1,35246447 | 0,13996317 |

| | | | | | Course 1 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Vitesse d'avance | Fréquence de rotation | Effort de forge | Angle Tilt | Courses | Effort d'avance | Ecart type | Effort transverse | Ecart type |
| 450-350 | 1100 | 1000 | 2,5 | 125-50-125 | -1,20981386 | 0,24449407 | -1,31633623 | 0,14457448 |
| 450-550 | 1100 | 1000 | 2,5 | 125-50-125 | -1,259 | 0,257 | -1,290 | 0,195 |
| | | | | | Course 2 | | | |
| | | | | | Effort d'avance | Ecart type | Effprt Transverse | Ecart type |
| | | | | | -0,84573667 | 0,22741756 | -1,13201219 | 0,14864153 |
| | | | | | -1,737 | 0,241 | -1,310 | 0,153 |

**Tableau 9 : Efforts d'avance et effort transverse moyens mesurés au cours des courses 1 et 2 des essais de variation de vitesse**

### 5.1.2 Analyse des données

On peut remarquer, que les valeurs moyennes atteintes lors des courses 1 et 2 correspondent aux valeurs obtenues avec les essais sans changement de vitesse correspondant.

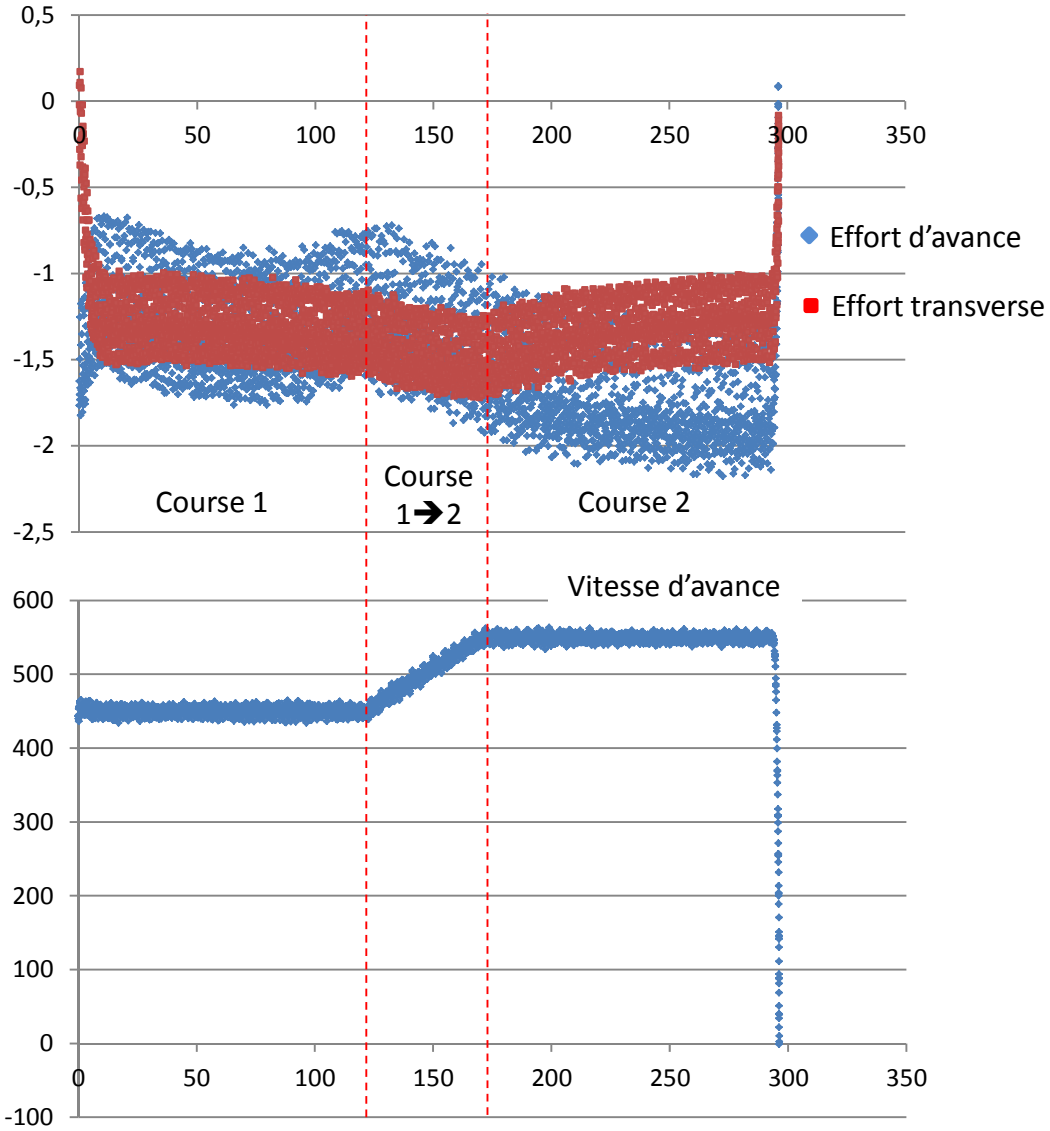


**Figure 25 : Évolution des efforts lors d'un changement de vitesse d'avance**

Lors du changement de vitesse d'avance, la transition entre les deux valeurs limites d'effort d'avance et transverse semble régulière. Quel que soit l'essai, on ne constate pas de pic ou de chute brutale d'effort. La transition en effort commence dès le début de la course 1➔2 mais peut s'étendre au-delà de la course 1➔2.

Si on regarde le couple et la pénétration de soudage au cours de la transition (voir Figure 26), on constate qu'à une augmentation de la vitesse d'avance est associée une remontée de l'outil et une augmentation du couple. À l'augmentation de la vitesse d'avance est associée une baisse de la température du matériau à malaxer. Cette baisse est due principalement à la baisse de l'énergie nominale de soudage. L'augmentation de la vitesse n'étant pas compensée par l'augmentation de couple.

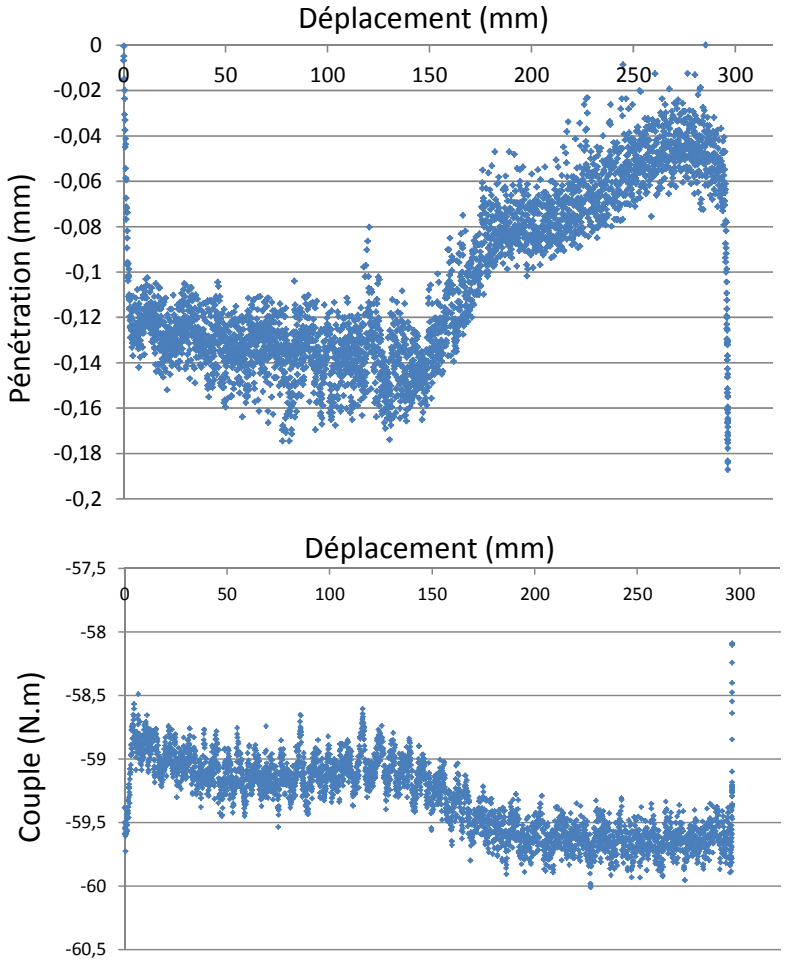


**Figure 26 : Évolution de la pénétration et du couple lors d'une augmentation de la vitesse d'avance**

La remontée du pion vient de l'augmentation de la contrainte d'écoulement du matériau associée à sa baisse en température. À l'augmentation de la contrainte d'écoulement est associée une augmentation de l'effort d'avance. Par contre, la composante de l'effort transverse semble moins sensible à la température de soudage.

De la même façon, on constate une légère plongée du pion et une baisse du couple lors d'une diminution de la vitesse d'avance. L'augmentation de l'énergie nominale de soudage associée à la baisse de la vitesse d'avance provoque une montée en température de la zone malaxée et ainsi une baisse de la contrainte d'écoulement du matériau malaxé. À cette baisse correspond une augmentation de la pénétration et une baisse du couple.

### 5.1.3 Conclusion

La variation de vitesse d'avance étudiée est effectuée sur une distance parcourue de 50mm. Cette course est relativement longue et ne permet pas d'étudier les aspects dynamiques associés à ce type de changement. Comme dans le cas de l'étude des variations d'orientation de l'outil, les évolutions des efforts de soudage et

du couple de soudage sont certainement liés à des effets thermiques transitoires entre les deux régimes établis correspondant aux conditions de soudage maintenues constantes.

## 5.2 Étude des effets d'une variation de l'effort de forge

### 5.2.1 Procédure expérimentale

Le principe des essais consiste en une soudure rectiligne de 300mm de long avec une variation de l'effort de forge en cours de soudage.

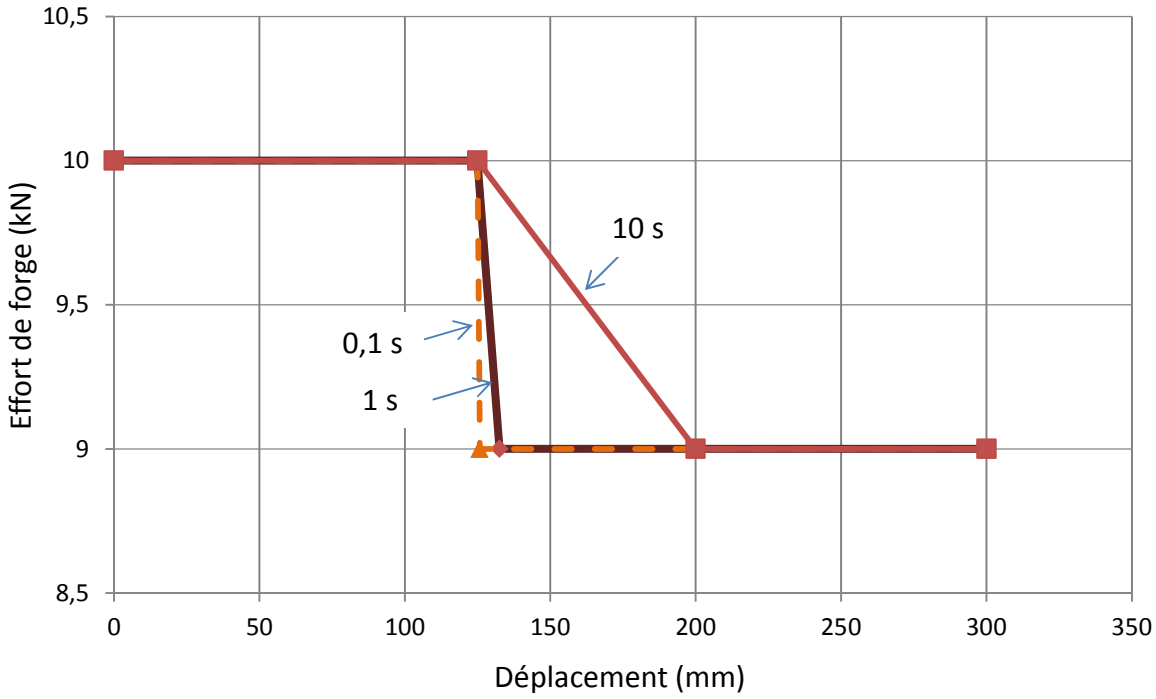


**Figure 27 : Principe de l'essai pour l'étude de l'influence d'une variation de l'effort de forge en cours de soudage**

L'évolution de l'effort de forge est d'une amplitude de 1kN en plus ou en moins par rapport à la valeur de 10kN utilisée nominalement. L'autre paramètre de l'étude est la durée durant laquelle a lieu la variation. Pour observer les effets dynamiques d'une telle variation sur les efforts de soudage, la durée minimum a été fixée à 0,1s. Pour saisir également les effets d'une variation lente, la valeur maximale de la durée de la variation a été fixée à 10s. Une valeur intermédiaire a également été fixée à 1s.

### 5.2.2 Analyse des données

Dans les Tableau 10 et Tableau 11, sont présentés les paramètres de soudage des essais ainsi que la valeur moyenne des efforts de soudage obtenue. Deux types d'essai sont réalisés. Les premiers essais correspondent à des soudures sans changement de conditions opératoires réalisées avec les trois niveaux d'effort de forgeage étudiés. Le deuxième type d'essai correspond aux essais avec changement de l'effort de forgeage au bout de

125mm de course (longueur de la course 1). Pour tous les essais, la course 1 est réalisée avec les mêmes conditions opératoires. Les deux paramètres de la campagne expérimentale sont la variation d'effort (+/- 1kN) et la course pendant laquelle la variation a lieu. Cette dernière dépend de la durée de la variation illustrée par la Figure 27. A la vitesse d'avance de 450mm/min, les distances parcourues sont de 0.75mm pour une durée de 0,1s, de 7,5mm pour la durée de 1s et de 75mm pour la durée de 10s. Il est à noter que chaque essai est reproduit trois fois.

| Va[mm/min] | N[tr/min] | Fz [KN] | angle de soudage [°] | Moyenne Fx | écart type | Moyenne Fy | écart type |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 450 | 1100 | 10 | 2,5 | -1,23 | 0,24 | -1,34 | 0,14 |
| 450 | 1100 | 11 | 2,5 | -1,11 | 0,23 | -1,37 | 0,14 |
| 450 | 1100 | 9 | 2,5 | -1,29 | 0,23 | -1,21 | 0,13 |

**Tableau 10 : Efforts d'avance et transverse pour les trois essais de référence**

| Va [mm/min] | N [tr/min] | Fz [KN] | angle de soudage [°] | cycle | Course 1 | | | | Course 2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Moyenne Fx | écart type | Moyenne Fy | écart type | Moyenne Fx | écart type | Moyenne Fy | écart type |
| 450 | 1100 | 10-11 | 2,5 | 125-0,75-174,25 | -1,16 | 0,24 | -1,35 | 0,14 | -1,08 | 0,23 | -1,36 | 0,13 |
| 450 | 1100 | 10-11 | 2,5 | 125-7,5-167,5 | -1,20 | 0,23 | -1,34 | 0,13 | -1,10 | 0,22 | -1,34 | 0,13 |
| 450 | 1100 | 10-9 | 2,5 | 125-0,75-174,25 | -1,19 | 0,24 | -1,33 | 0,14 | -1,24 | 0,23 | -1,22 | 0,14 |
| 450 | 1100 | 10-9 | 2,5 | 125-7,5-167,5 | -1,16 | 0,23 | -1,36 | 0,13 | -1,22 | 0,24 | -1,25 | 0,15 |
| 450 | 1100 | 10-9 | 2,5 | 125-75-100 | -1,19 | 0,23 | -1,35 | 0,13 | -1,24 | 0,22 | -1,23 | 0,13 |

**Tableau 11 : Efforts d'avance et transverse mesurés au cours des essais avec changement d'effort de forge**

Les résultats des Tableau 10 et Tableau 11 montrent que les valeurs d'efforts d'avance et transverse obtenues lors de la course 1 sont très proches de celles obtenues au cours de l'essai de référence correspondant. On peut noter une légère différence sur la mesure de l'effort d'avance de l'ordre de 0,03kN faible au regard de l'écart sur chaque mesure.

La valeur des efforts d'avance et transverse au cours de la course 2 sont également de l'ordre de celle mesurée lors des essais de référence correspondants. Sur la Figure 28 sont présentées les évolutions de l'effort d'avance et transverse en fonction de la distance parcourue pour les trois valeurs de durée de la course 1➔2 (partie de la courbe entre les deux traits en pointillés rouges sur la Figure 28).

Pour chaque courbe, on remarque une évolution des efforts d'avance et transverse sur la durée de la course 1➔2. Dans le cas d'une évolution de l'effort de forge sur 0,1s, on note une transition de la valeur de ces efforts au-delà de la course 1➔2. Par contre pour chaque essai (répété trois fois) on peut noter une baisse progressive de l'effort transverse et une augmentation progressive de l'effort d'avance au cours de la course 2.

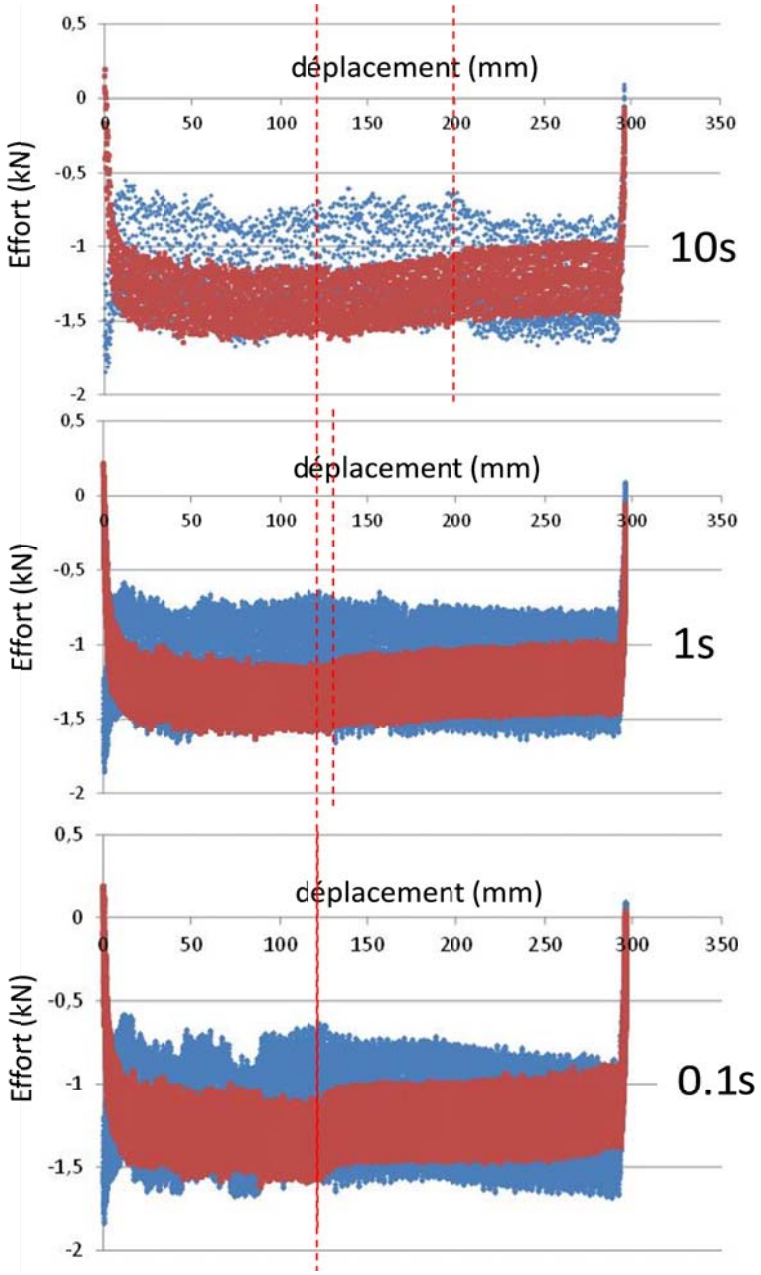


**Figure 28 : Évolution des efforts d'avance et transverse au cours d'une soudure avec changement d'effort de forge**

Sur la Figure 29, sont présentés les efforts et la pénétration mesurée au cours de la course 1➔2 pour l'essai avec changement d'effort de forge sur 0.1s. On peut nettement remarquer que l'évolution de la pénétration et des efforts d'avance et transverse se poursuit bien au-delà des 0.1s de la course 1➔2. On note effectivement une évolution de la pénétration sur 2 à 3s. Les efforts d'avance et transverse ne semblent pas évoluer au cours de la course 1➔2 et ne réagir qu'à partir d'un délai de l'ordre de la seconde. L'évolution de la pénétration, pour les trois essais réalisés avec un relâchement de l'effort de forge sur 0,1s, semble être constituée de deux

étapes. Une remontée rapide de l'outil sur 2 à 3s suivie d'une dérive (remontée lente) sur tout le reste de la soudure (voir Figure 30).

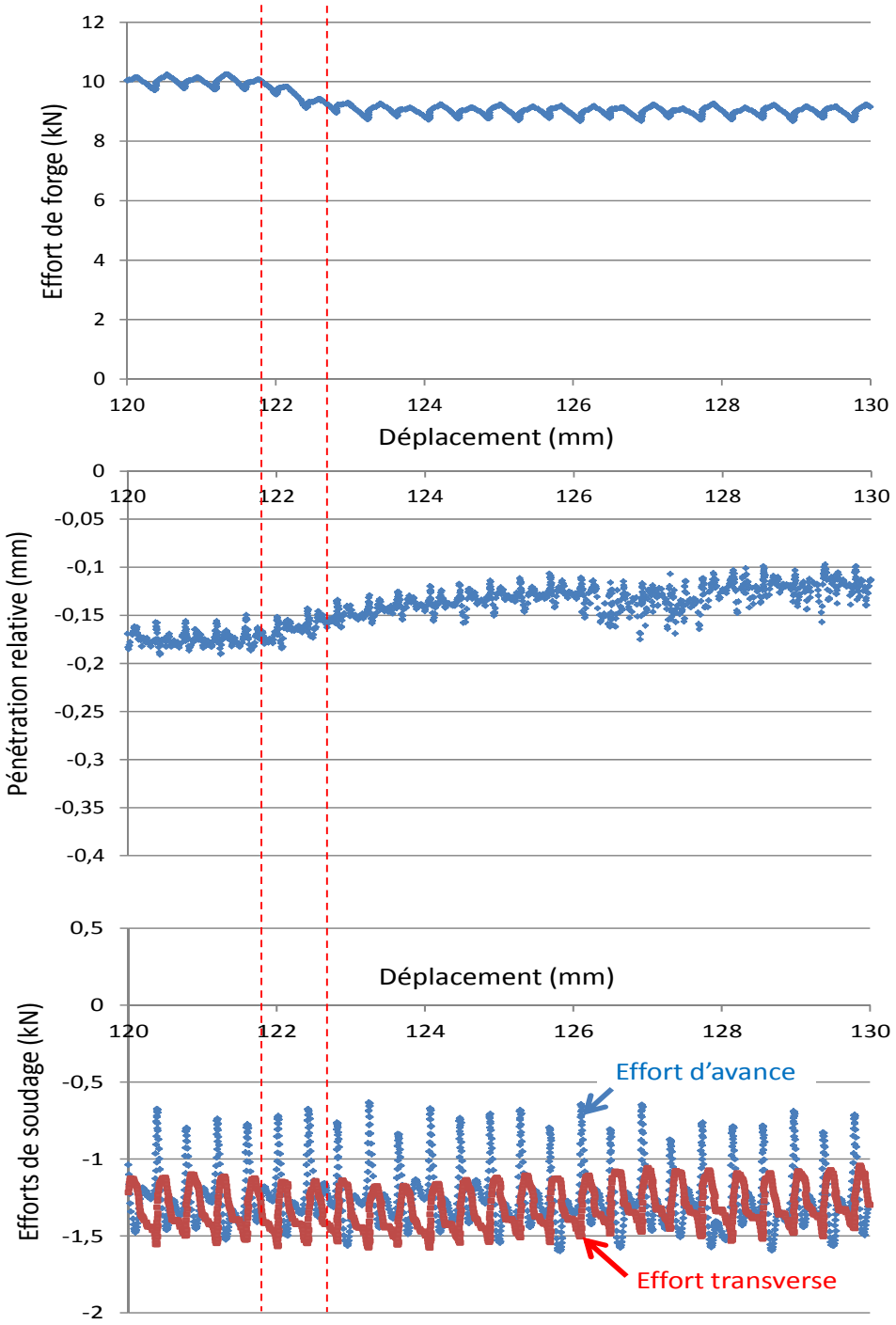


**Figure 29 : Évolution de l'effort de forge, le la pénétration relative et des efforts de soudage au cours de la course 1➔2 d'une durée de 0,1s**

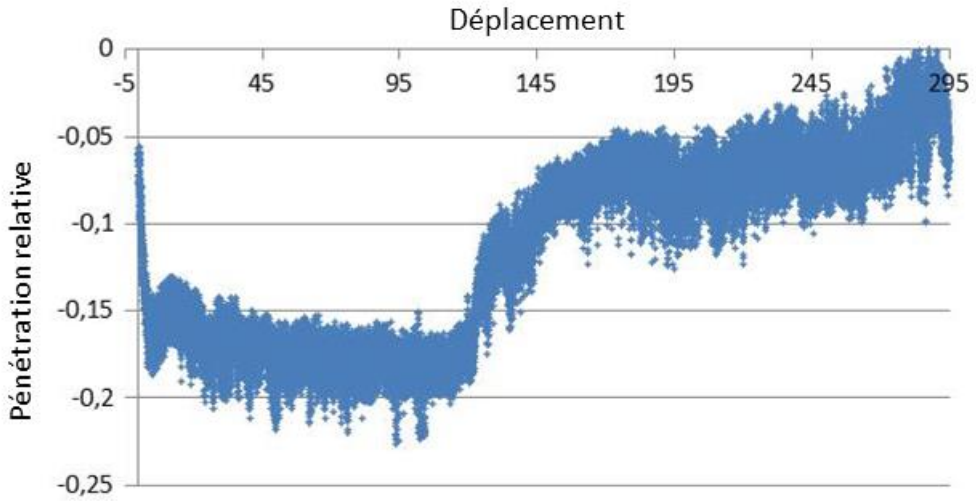


**Figure 30 : Évolution de la pénétration relative au cours d'un essai avec relâchement de l'effort sur 0,1s**

Un parallèle peut être établi entre l'évolution de la pénétration et des efforts d'avance et transverse. En effet, on remarque une dérive de ces composantes d'effort qui se traduit par une baisse lente de l'effort transverse et une augmentation de l'effort d'avance.

La remontée rapide de l'outil est une réponse directe et rapide à la baisse de l'effort de forgeage. Sur la durée de l'évolution rapide de la pénétration, l'état thermomécanique de la matière reste inchangé ; l'outil remonte par un effet direct de la chute de l'effort de forgeage. La remontée lente de l'outil provient certainement d'une évolution lente des conditions thermiques de soudage du fait des changements de conditions opératoires intervenus.

Les essais réalisés avec une augmentation de l'effort de forgeage présentent une plongée de l'outil au moment du changement d'effort. Cette descente se prolonge au-delà de la période de changement d'effort dans le cas d'un changement sur 0,1s. Contrairement au cas d'une décharge, la position de l'outil semble se stabiliser au bout de quelques dizaines de millimètres de course comme l'illustre la Figure 31.

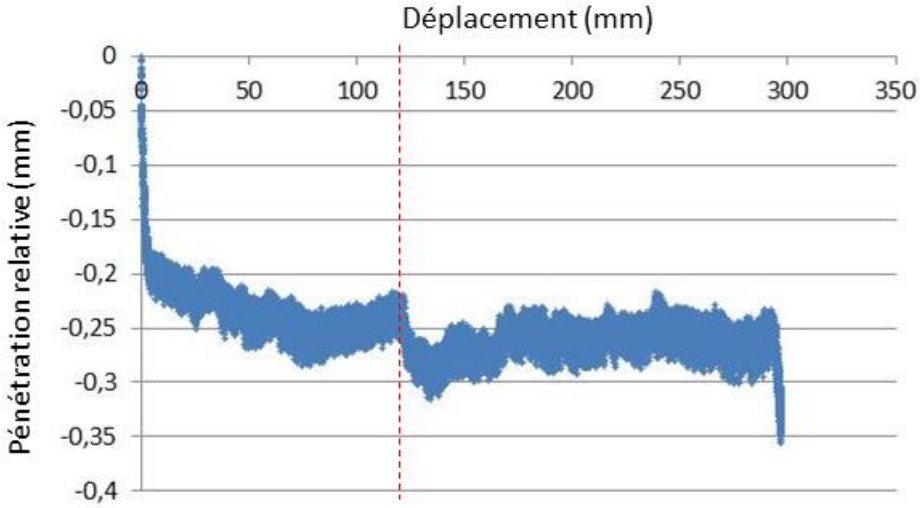


**Figure 31 : Évolution de la pénétration relative au cours d'une soudure avec augmentation de l'effort sur 0,1s**

Plus précisément, on constate une plongée rapide de l'outil lors du changement d'effort puis une remontée progressive pour atteindre une valeur quasi constante. La plongée rapide est la réponse de l'outil à un surcroît d'effort dans la matière à un état thermomécanique issu de la course 1. La remontée de l'outil est la réponse de l'outil aux nouveaux paramètres de soudage qui s'établit après la phase transitoire.

### 5.2.3 Conclusion

Lors d'un changement rapide de conditions opératoires en cours de soudage, la réponse en pénétration de l'outil se fait en deux temps : la réaction de l'outil aux nouvelles conditions opératoires dans de la matière dans un état issu des anciennes conditions opératoires. Puis une évolution transitoire plus lente vers une position de l'outil en équilibre thermomécanique correspondant aux nouvelles conditions opératoires. La réponse de l'outil à « long terme » peut être déterminée par des essais à conditions opératoires constantes.

# 6 ETUDE DES EFFETS D'UNE VARIATION GÉOMÉTRIQUE DE L'ACOSTAGE

Dans cette partie de l'étude on s'intéresse à l'influence d'un défaut d'accostage sur la valeur des efforts de soudage (effort d'avance et effort transverse). Les deux défauts types étudiés sont un jeu entre les pièces et une différence d'épaisseur (voir Figure 32). L'influence des deux défauts a été étudiée séparément.

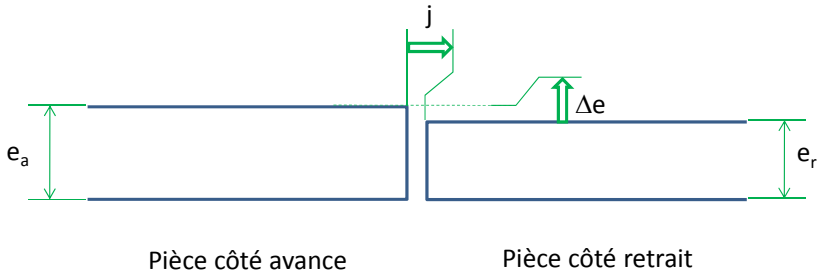


**Figure 32 : Défauts d'accostage.**

## 6.1 *Influence d'un jeu de soudage*

### 6.1.1 Procédure expérimentale

Pour l'étude, le jeu de soudage est caractérisé par trois paramètres qui sont :

- La valeur du jeu ;
- La longueur de la ligne de joint où se trouve le jeu ;
- La position du jeu par rapport à la ligne de joint nominale.

La valeur maximum du jeu admis correspond de façon générale à 1/10$^{ème}$ de l'épaisseur des tôles à souder. Cette valeur est acceptable si le jeu est « ponctuel » et ne court sur une longueur trop importante de la ligne de joint. Il semble donc qu'il y a un lien entre la valeur du jeu acceptable et la longueur sur laquelle il s'étend. La longueur sur laquelle s'étend le jeu de soudage est également un paramètre de l'étude. Comme l'étude s'intéresse à l'évolution des efforts de soudage, il est sans doute important de regarder l'effet de la position du jeu par rapport à la ligne de joint nominale. Le jeu de soudage sera soit centré sur la ligne de joint soit décalé du côté avance ou du côté retrait de la soudure. Le Tableau 12 donne l'ensemble des paramètres de l'étude.

| Va (mm/min) | N (tr/min) | Fz (kN) | Tilt (°) | Longueur | Côté | Valeur J (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 650 | 1100 | 10 | 2,5 | 25 | Retrait | 0,2 |
| | | | | | Avance | 0,2 |
| | | | | | | 0,6 |
| | | | | | | 0,8 |
| | | | | | | 1 |
| | | | | 150 | Retrait | 0,6 |
| | | | | | Avance | 0,6 |
| | | | | | | 0,8 |
| | | | | | | 1 |

**Tableau 12 : Paramètres de l'étude de l'influence d'un jeu de soudage**

### 6.1.2 Analyse des données

Sur la Figure 33 sont présentés les résultats concernant l'essai avec un jeu de 0,6mm sur une longueur de 150 mm. Le jeu est placé du côté retrait de la soudure.

On peut noter que la pénétration de l'outil diminue tout au long de la course d'approche. La zone avec jeu de soudage est atteinte avant la fin du régime transitoire en pénétration. La pénétration augmente à partir de l'entrée de l'outil dans la zone avec jeu. Cette entrée commence un peu avant la course de 100mm au moment où l'avant de l'épaulement s'engage dans la zone avec jeu (voir Figure 34). À partir de ce moment, la pénétration évolue rapidement sur une course correspondant approximativement à la sortie de l'épaulement de la zone sans jeu. L'évolution rapide de la pénétration a lieu sur une distance d'environ 12mm correspondant au diamètre de l'épaulement de l'outil. Après cette transition rapide, la pénétration de l'outil dérive lentement s'adaptant progressivement aux nouvelles conditions de soudage.

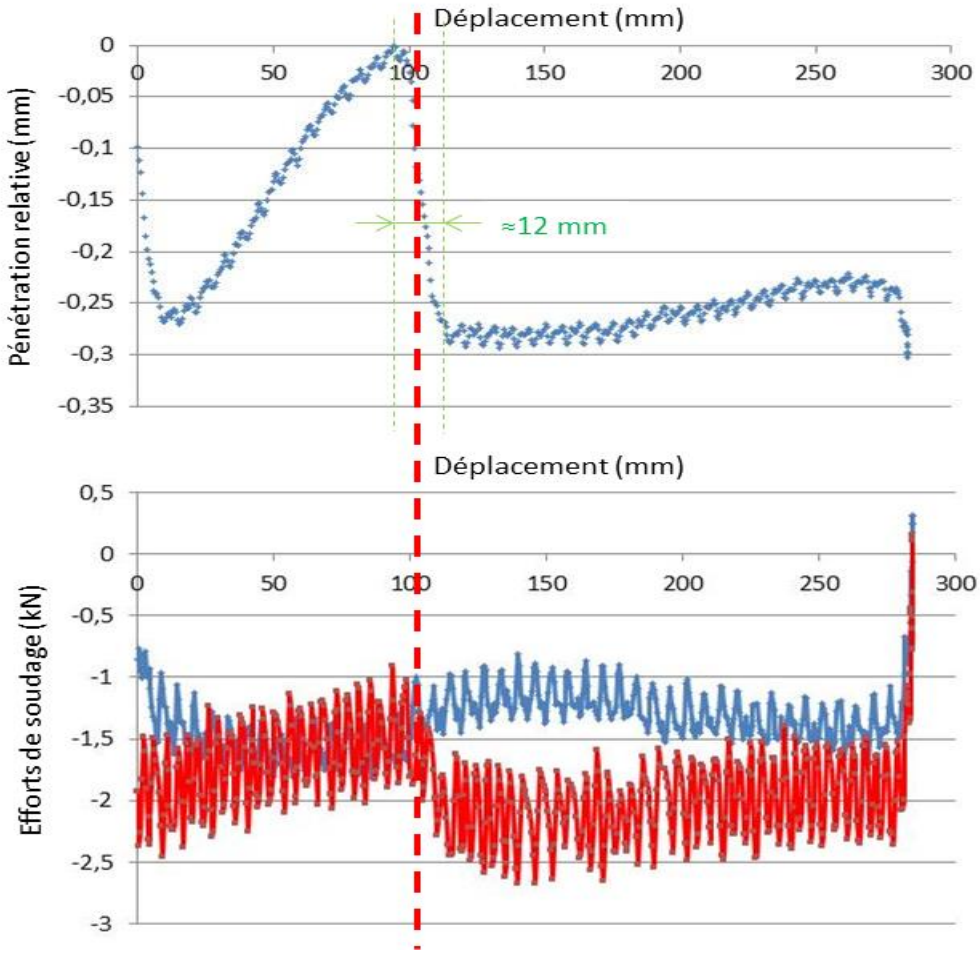


**Figure 33 : Évolution de la pénétration relative et des efforts de soudage lors d'un essai avec un jeu de 0,6mm placé du côté retrait sur une longueur de 150mm.**

L'évolution des efforts de soudage présente les mêmes phases. Une première phase pendant laquelle l'effort d'avance et transverse évolue lentement. La stabilisation de ces composantes d'effort n'est pas atteinte avant l'arrivée sur la zone de soudage avec jeu. Dès l'entrée de l'épaulement dans la zone avec jeu, on constate une évolution rapide des efforts, notamment l'effort transverse. L'évolution rapide des efforts se poursuit au-delà des 12 mm de course correspondant au franchissement par l'outil du début de la zone avec jeu. Après cette zone de transition rapide, les composantes d'effort dérivent lentement avant de se stabiliser. Dans la zone avec jeu, on constate une augmentation de l'effort transverse et une chute de l'effort d'avance.

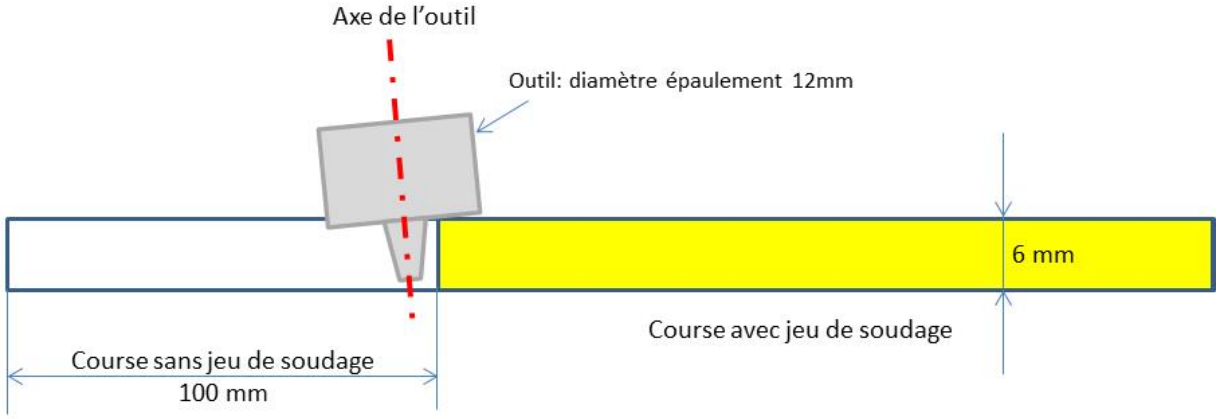


**Figure 34 : Schéma de l'entrée progressive de l'outil dans la zone de soudage avec jeu.**

Dans la zone avec jeu, l'outil piloté en effort va descendre pour compenser le manque de volume à malaxer correspondant au jeu. De façon schématique, le volume balayé par la descente de l'outil doit être égal au volume du manque de matière dû au jeu. Le volume de manque de matière est égal au produit du jeu, de l'épaisseur des tôles à souder et de la longueur de la partie avec jeu. Le volume balayé par la descente de l'outil correspond au produit du diamètre de l'épaulement, de la pénétration (par rapport à la pénétration sur la zone sans jeu) et de la longueur de la soudure avec jeu. On obtient ainsi la relation suivante donnant la valeur de la pénétration :

$$\Delta z = j * \frac{e}{D} \qquad (3)$$

où *j* est le jeu de soudage, *e* l'épaisseur des tôles à souder et *D* le diamètre de l'épaulement de l'outil.

Dans le cas d'un jeu de 0,6mm avec une épaisseur des tôles de 6mm et un diamètre de 12mm, la descente de l'outil correspond à 0,3mm. Sur la Figure 33, on note que la valeur de la pénétration relative atteinte dans la zone avec jeu est de l'ordre de grandeur de cette valeur.

Sur la Figure 35 sont présentés les résultats concernant la même valeur et la même position du jeu mais avec une longueur de 25mm. On peut remarquer la première partie des courbes est identique à celle de la Figure 33. Lorsque l'outil arrive sur le jeu de soudage, on constate une plongée rapide de l'outil d'une valeur de

0,3mm environ. La plongée de l'outil commence environ au moment où l'épaulement aborde le jeu de soudage.

Pour l'essai avec une longueur de la ligne de joint avec jeu de 25 mm, on constate une remontée du pion débutant aux alentours d'une course de 120mm. Cette course correspond au début de la sortie de l'épaulement de la zone avec jeu. La remontée du pion est beaucoup plus lente et progressive que sa plongée en début de défaut.

Pour ce qui est des efforts de soudage, on constate la même évolution des efforts pour la première partie de l'essai que lors de l'essai de la Figure 33. À l'abord du jeu de soudage, l'effort transverse augmente rapidement et l'effort d'avance diminue. Quand l'outil aborde la deuxième partie sans jeu les composantes d'effort évoluent en sens inverse mais plus lentement à l'instar de la pénétration. Il semblerait au vu de ces résultats que la plongée de l'outil en réponse à la présence d'un défaut se fait plus rapidement que sa remontée.

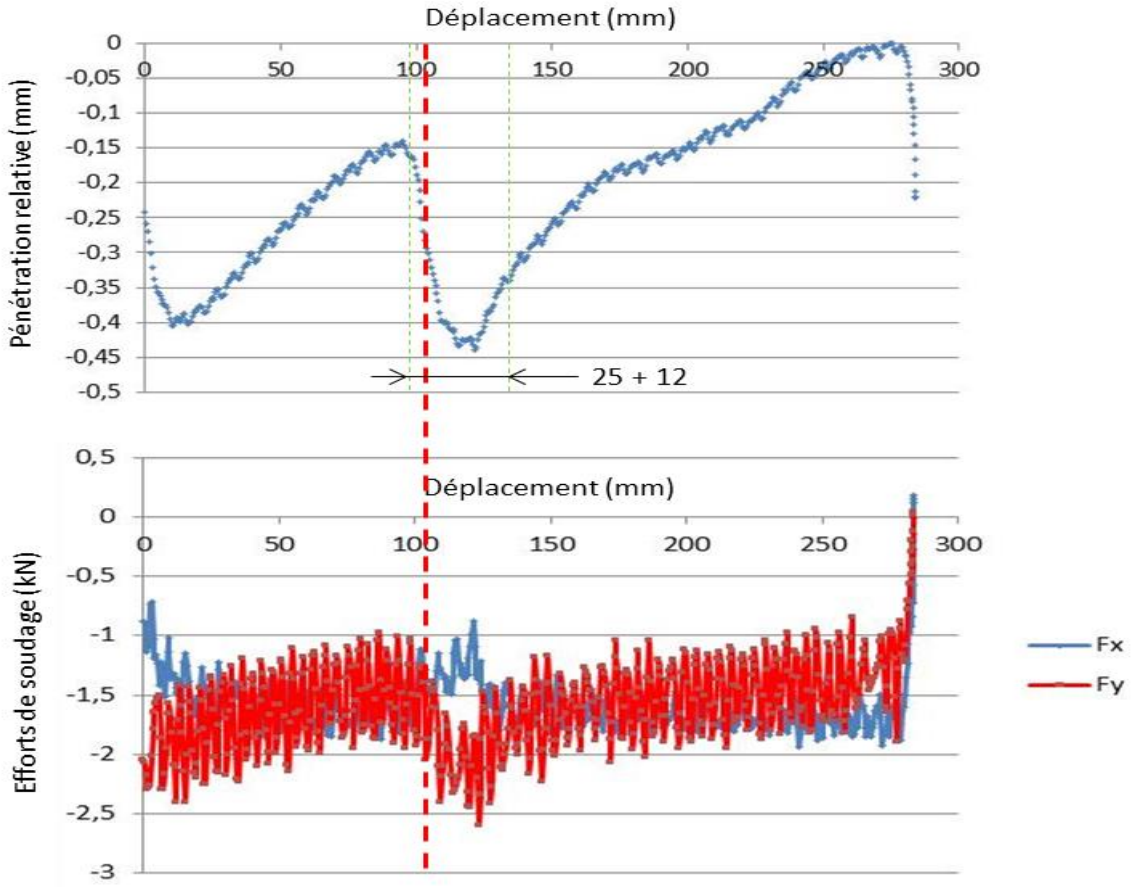


**Figure 35 : Évolution de la pénétration relative et des efforts de soudage pour un jeu de 0,6mm placé du côté avance sur une longueur de 25mm.**

Au cours des différents essais, il n'a pas été constaté d'influence notoire de la position du jeu de soudage (côté avance ou côté retrait) sur l'évolution de la pénétration et sur l'évolution des composantes d'avance et transverse des efforts de soudage.

Sur la Figure 36, ont été tracées les évolutions de la pénétration relative de l'outil pour deux essais réalisés avec un jeu de soudage côté avance sur une longueur de 25 mm, le premier avec un jeu de 0,6 mm et le second avec un jeu de 0,2mm. Pour la soudure avec un jeu de 0,2mm, on constate les mêmes stades que pour le jeu de 0,6mm. L'outil plonge rapidement lorsqu'il aborde la partie avec jeu avant d'amorcer une remontée plus lente lorsqu'il sort de la partie avec jeu. Entre les deux valeurs de jeu, on constate que la plongée est plus rapide avec une valeur de jeu de 0,6mm. Il est à noter que la valeur de la plongée pour une valeur de jeu de 0,2 mm donnée par l'équation (5) est de l'ordre de 0,1mm alors que celle constatée ici et quasiment le double. Quelle que soit la valeur du jeu ou la position du jeu, la remontée de l'outil se produit sur un temps beaucoup plus long que sa plongée lorsqu'il aborde la partie de la soudure avec jeu. Pour ce qui est efforts de soudage, on constate la même tendance que pour un jeu de 0,6mm à savoir une augmentation de l'effort transverse et une chute de l'effort d'avance. Ces évolutions sont toutefois d'une moindre ampleur dans le cas du jeu de 0,2mm que dans celui d'un jeu de 0,6mm.

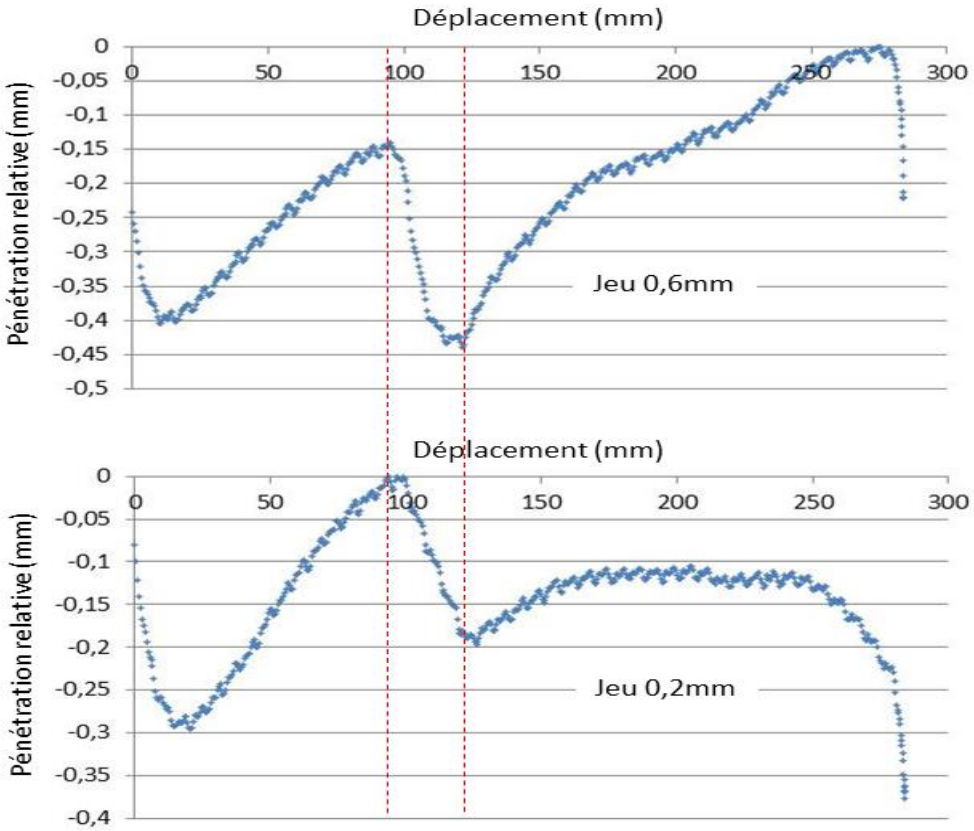


**Figure 36 : Évolution de la pénétration pour deux soudures avec un jeu côté avance sur une longueur de 25mm et de valeur 0,6 et 0,2mm**

Sur la Figure 37 sont présentées les évolutions des efforts d'avance et transverse dans le cas d'une soudure avec un jeu de 0,8mm placé du côté avance sur une longueur de 25mm. Pour cette largeur de jeu, on constate, contrairement à ce que l'on pourrait attendre que la plongée du pion ne se fasse que sur 0,1mm, valeur plus faible que celle mesurée pour les jeux de 0,2 et 0,6mm. La remontée du pion après avoir franchi les 25mm de soudure avec jeu se fait rapidement avec une vitesse de l'ordre de celle de la plongée.

La rapidité de la remontée du pion provient très certainement du fait que la plongée n'a eu lieu que sur 0,1mm. La faible valeur de la plongée peut provenir de la chute de couple constatée au cours de la soudure avec jeu. On constate en effet une diminution du couple de l'ordre de 1,5N.m qui peut contribuer de façon significative à une diminution de la température de soudage. À cette température correspond une augmentation de la contrainte d'écoulement du matériau et donc pour un même effort de forgeage à une pénétration de l'outil plus faible. À cette augmentation de la contrainte d'écoulement du matériau malaxé peut également correspondre la variation des efforts de soudage constatés.

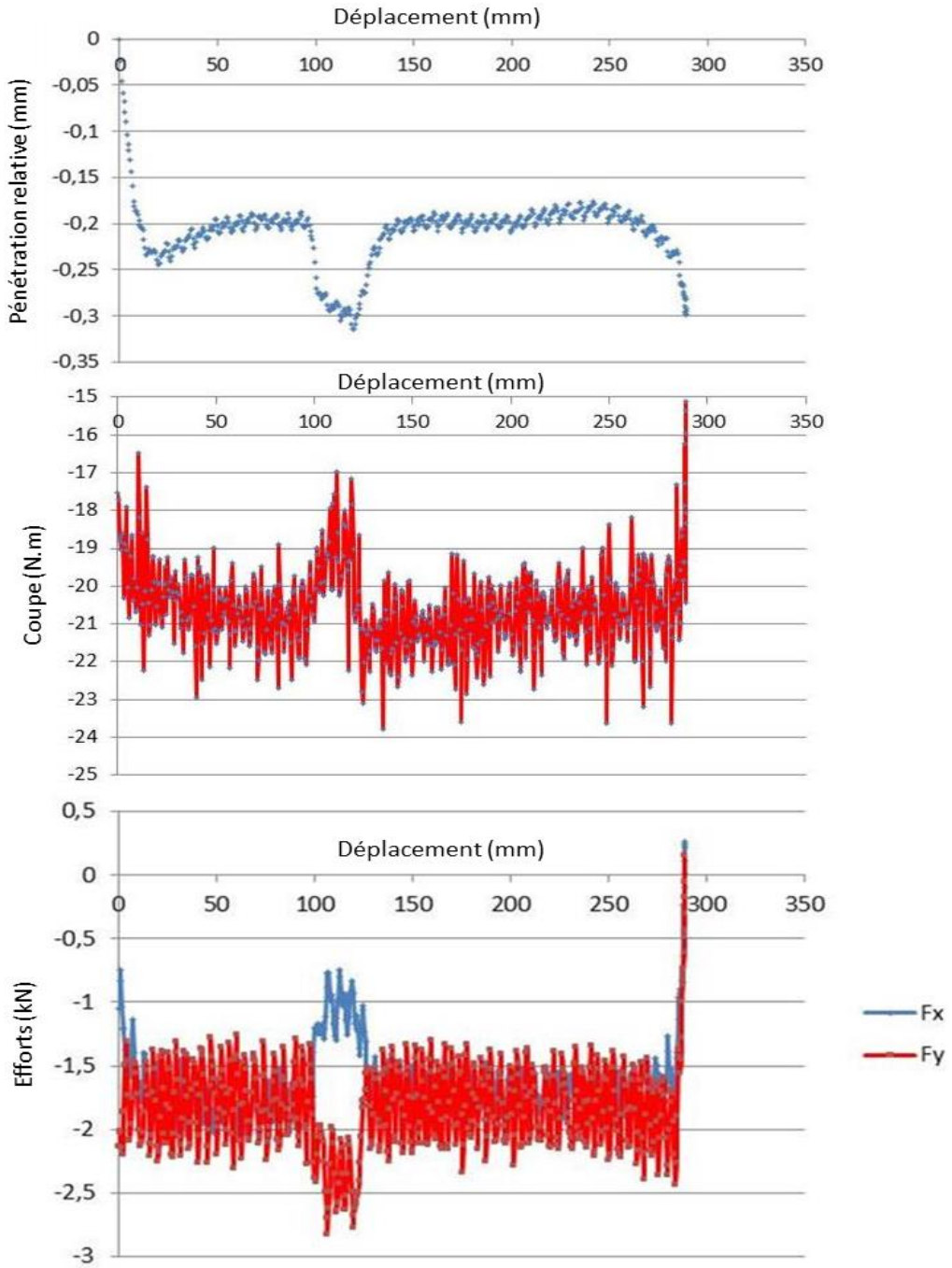


**Figure 37 : Pénétration relative, couple et efforts de soudage lors d'un essai de soudage avec un jeu de 0,8mm sur 25 mm.**

Il est à noter que l'évolution du couple n'a été observée que pour une valeur du jeu de 0,8mm.

### 6.1.3 Conclusion

Les essais réalisés sur l'étude de jeu ont montré la sensibilité du procédé vis-à-vis de ce type de déviation.

En effet, la valeur du jeu est perçue au niveau de la pénétration relative. Lorsque les conditions de contact outil/matière sont semblables à la configuration nominale (jeu nul), ce jeu sera compensé par une pénétration de l'outil. Selon l'amplitude du jeu, les efforts évoluent d'une façon transitoire rapide ou lente pour atteindre un régime établi. Au-delà d'une certaine valeur de jeu (ici 0,8mm), les conditions de contact outil/matière change ainsi les conditions thermiques de soudage ne sont plus similaires à la configuration nominale. Dans ce cas de figure, on peut assister à une remontée de l'outil.

## 6.2 Influence d'une dénivellation

### 6.2.1 Procédure expérimentale

Pour l'étude de l'influence d'une dénivellation, les paramètres étudiés sont :

- L'amplitude de la dénivellation, celle-ci pouvant être positive ou négative
- La position de la partie à épaisseur différente par rapport à la ligne de joint (côté avance ou côté retrait)
- La longueur de la zone de la ligne de joint sur laquelle se situe la dénivellation

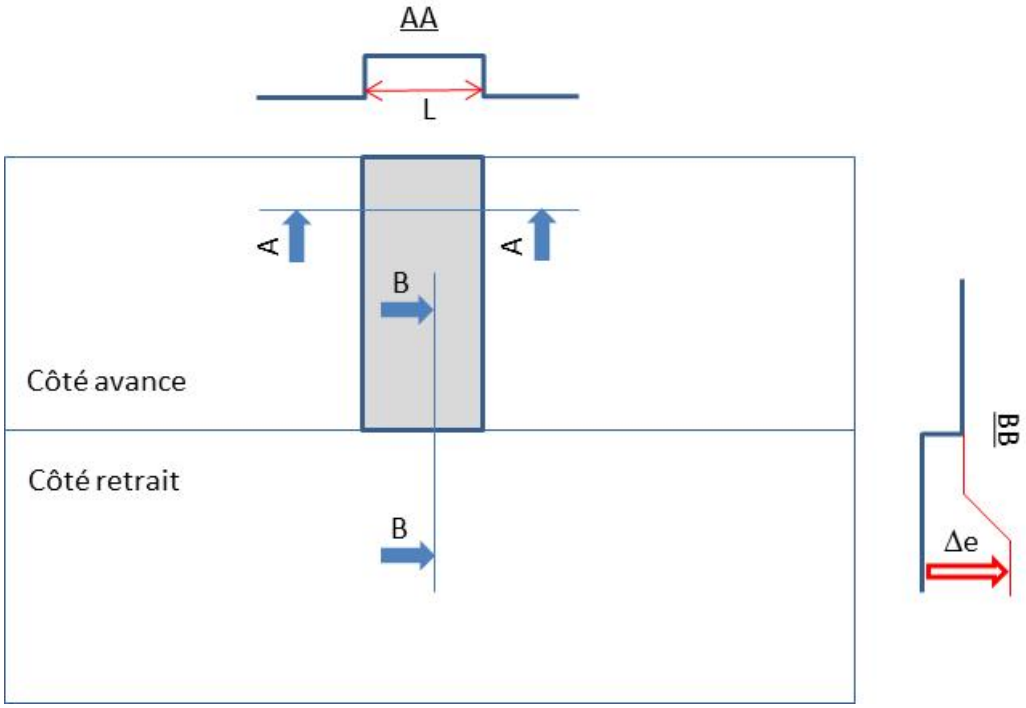


**Figure 38 : Schéma d'une soudure avec dénivellation**

Le Tableau 13 donne l'ensemble des paramètres testés. Toutes les soudures sont réalisées avec une fréquence de rotation de 1100 tr/min, une vitesse d'avance de 650 mm/min, un effort de forge de 10kN et un angle de tilt de 2.5°.

Les éprouvettes avant soudage ayant des variations d'épaisseur sont obtenues par fraisage. Les dénivellations positives ($\Delta e > 0$) sont usinées dans une tôle d'épaisseur 7mm. Le type d'usinage adopté (fraisage en bout) permet d'obtenir des dénivellations qui apparaissent de façon brutale sous la forme d'une marche. L'apparition progressive de la dénivellation n'est pas étudiée.

Deux longueurs de dénivellations sont étudiées pour observer l'entrée et la sortie de l'outil d'une zone avec dénivellation. La longueur de 150 mm doit permettre d'atteindre un régime établi et donc d'évaluer une valeur limite des efforts de soudage transverse et d'avance.

L'amplitude de la dénivellation ($\Delta e$) est limitée en valeur basse à –0.2mm pour éviter le contact entre l'extrémité du pion et l'enclume au cours de la soudure. Par valeur positive, les valeurs testées ont été limitées arbitrairement à 0,4mm. La position du jeu positif de 0,4mm a été testée côté avance et côté retrait sur les deux longueurs 25 et 100mm.

| Va (mm/min) | N(tr/min) | Fz(kN) | Tilt (°) | Longueur (mm) | Valeur Δe(mm) | Côté |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 650 | 1100 | 10 | 2,5 | 150 | -0,2 | Avance |
| | | | | | 0,1 | |
| | | | | | 0,2 | |
| | | | | | 0,4 | |
| | | | | 25 | -0,2 | |
| | | | | | 0,1 | |
| | | | | | 0,2 | |
| | | | | | 0,4 | |
| | | | | 150 | -0,2 | Retrait |
| | | | | | 0,2 | |
| | | | | 25 | -02 | |
| | | | | | 0,2 | |

**Tableau 13 : paramètres opératoires et paramètres géométrique des essais avec dénivellation.**

### 6.2.2 Analyse des données

Sur la Figure 39 sont présentés les résultats pour l'essai réalisé avec une dénivellation de +0,4mm du côté avance sur une longueur de 150mm. On constate une remontée de l'outil sur 25mm environ suivie d'une stabilisation de sa position. Sa remontée correspond environ à 0,12mm. En termes d'effort de soudage, on note un saut de l'effort transverse. L'effort d'avance semble insensible à l'apparition du défaut. Sur la Figure 40 sont présentés les mêmes résultats mais avec une valeur de dénivellation de 0,2mm. On constate une remontée de l'outil d'une même valeur aux alentours de 0,12mm. Par contre on constate que le saut en effort transverse est plus faible. Sur l'effort d'avance, on peut remarquer une légère chute en début de dénivellation sur quelques millimètres.

On peut donc constater qu'une dénivellation positive placée sur le côté avance de la soudure provoque surtout une remontée de l'outil de soudage et un saut de l'effort transverse. L'effet de la dénivellation sur l'effort d'avance semble soit très ponctuel soit négligeable.

Sur la Figure 41, sont présentés les résultats en pénétration et en effort de soudage pour une soudure avec une dénivellation de +0,2mm placée du côté retrait et sur une longueur de 150mm. Pour cet essai on constate une remontée de l'outil beaucoup plus modérée, de l'ordre de 0,03mm. On constate le même effet sur l'effort transverse que pour les essais précédents. Une autre différence provient de la chute de l'effort d'avance.

La Figure 40 présente les résultats obtenus pour la pénétration relative et les efforts de soudage dans le cas d'une soudure avec une dénivellation de –0,2mm placée du côté avance. On remarque une plongée de l'outil lors du passage dans la zone avec dénivellation. On note une augmentation de l'effort transverse mais celle-ci est moins brutale que celle enregistrée pour les dénivellations positives. L'effort d'avance semble subir une légère chute mais celle-ci à l'instar des autres essais semble moins marquée que pour l'effort transverse.

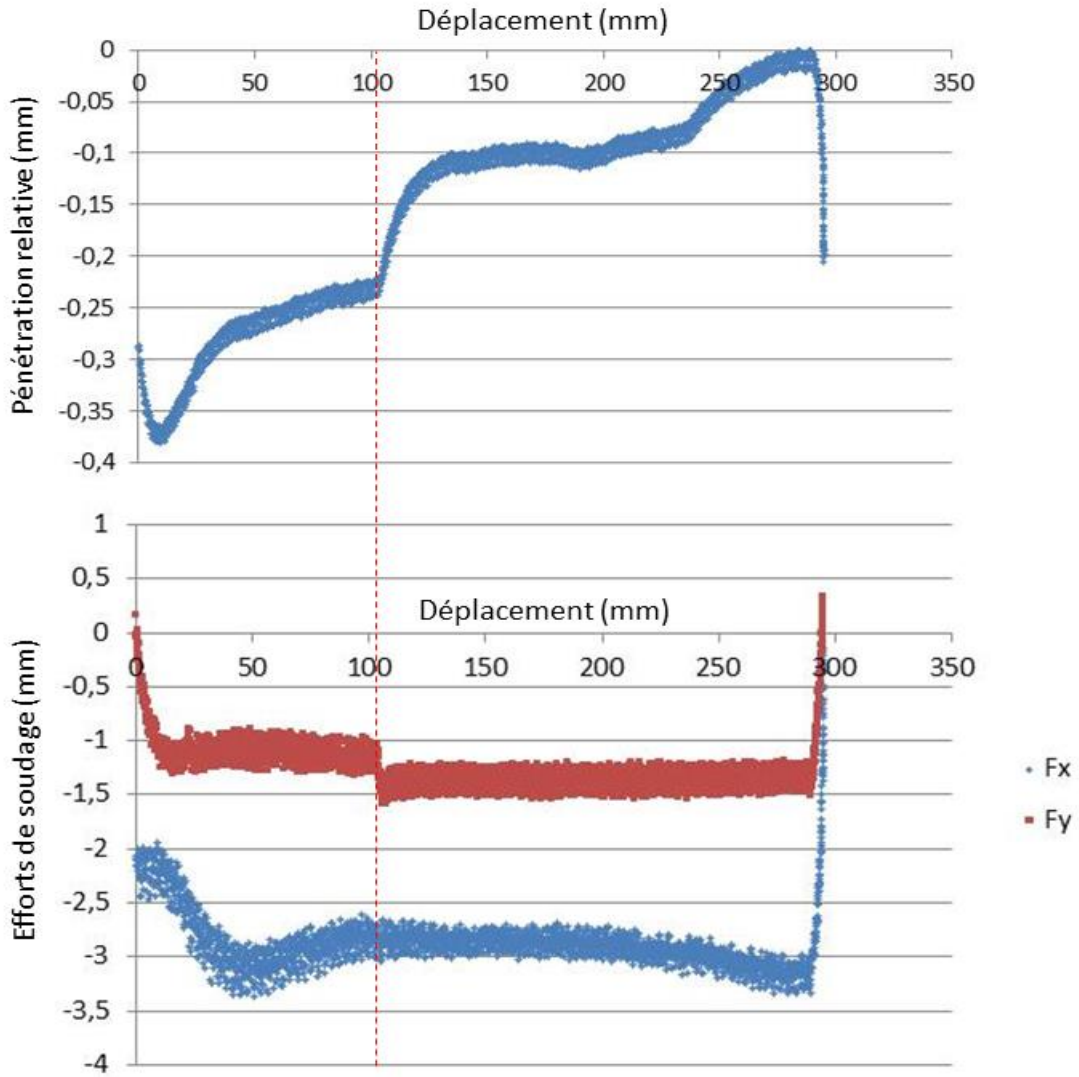


**Figure 39 : Évolution de la pénétration relative et des efforts de soudage lors d'un essai avec une dénivellation de 0,4mm du côté avance sur une longueur de 150mm.**

### 6.2.3 Interprétation

Si on suppose que le vecteur contrainte tangentielle en un point M de l'épaulement est porté par le vecteur de la vitesse relative de M appartenant à l'épaulement et les pièces à souder, on obtient l'expression de la contribution de l'épaulement aux efforts d'avance et transverse suivante :

$$F_{x,épaulement} = -\int_{R_{pion}}^{R_{épaulement}} \int_0^{2\pi} \tau \frac{(v_a - r\omega sin\theta)}{\left[(v_a - r\omega sin\theta)^2 + (r\omega cos\theta)^2\right]^{\frac{1}{2}}} r.d\theta.dr \qquad (4)$$

$$F_{y,épaulement} = -\int_{R_{pion}}^{R_{épaulement}} \int_0^{2\pi} \tau \frac{r\omega cos\theta}{\left[(v_a - r\omega sin\theta)^2 + (r\omega cos\theta)^2\right]^{\frac{1}{2}}} r.d\theta.dr \qquad (5)$$

Dans ces expressions, $\tau$ est la contrainte tangentielle. Elle n'est pas uniforme autour de l'outil et dépend des conditions thermomécaniques telles que la température ou la vitesse de déformation.

L'équation 7 fait apparaître qu'un déséquilibre (une dissymétrie) de la contrainte tangentielle entre l'avant et l'arrière du pion contribue à l'effort transverse. Lors de l'entrée du pion dans la zone avec une dénivellation positive, il apparaît géométriquement une zone d'attaque de la surépaisseur sur l'avant de l'épaulement. Cette zone d'attaque accentuerait le déséquilibre entre l'avant et l'arrière du pion contribuant ainsi à l'augmentation brutale de l'effort transverse. Sur la Figure 39, on observe pour une dénivellation positive de 0,4mm une remontée de l'outil de 0,15mm environ. L'épaulement demeure sous la surface de la pièce la plus épaisse. Ceci explique que le niveau d'effort transverse reste quasi constant une fois la marche franchie.

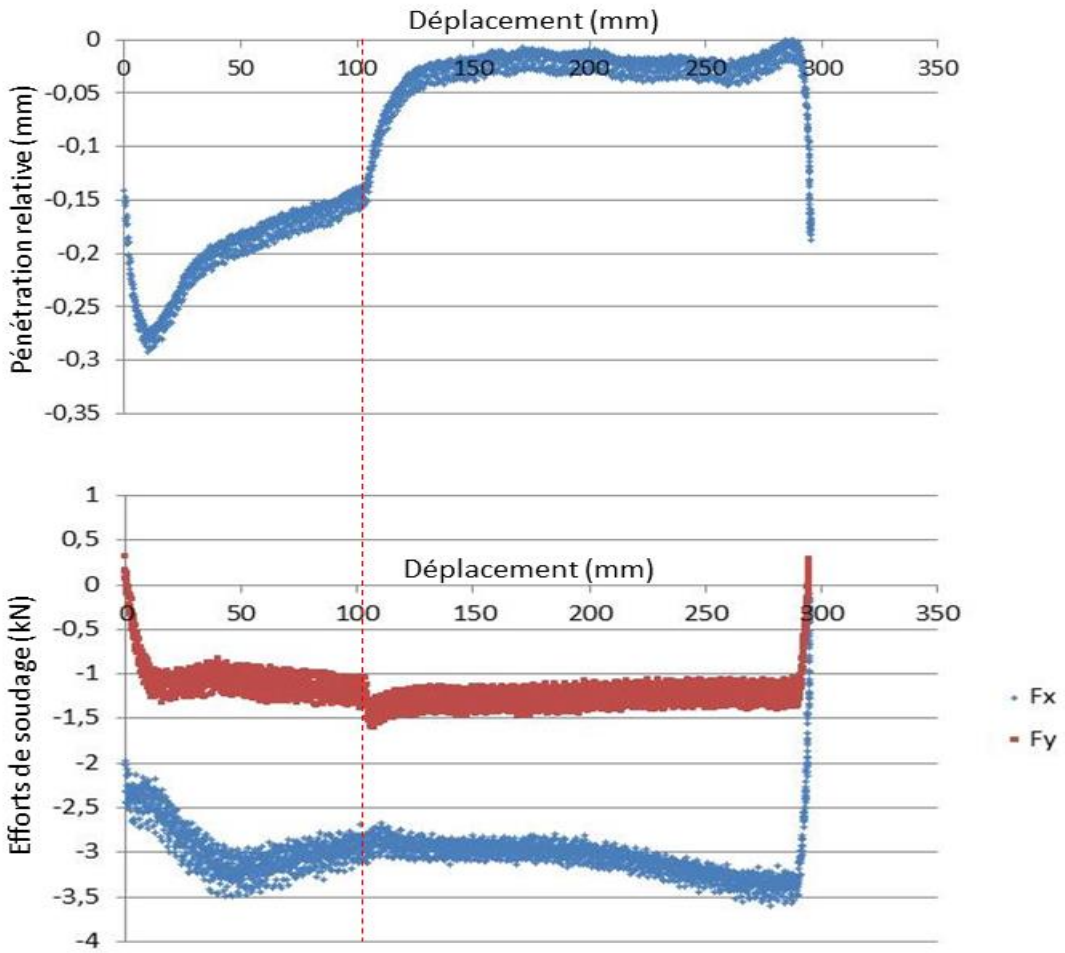


**Figure 40 : Évolution de la pénétration relative et des efforts de soudage lors d'un essai avec une dénivellation de 0,2mm du côté avance sur une longueur de 150mm.**

Pour une dénivellation positive de 0,2mm, on constate un saut d'effort transverse suivi d'une chute progressive. Le saut correspond à l'entrée de l'épaulement dans la zone avec surépaisseur et donc à l'influence de la zone d'attaque de l'épaulement. Avec la remontée progressive de l'outil, cette zone d'attaque agit sur une épaisseur de plus en plus faible ce qui expliquerait la descente progressive de l'effort transverse une fois la marche franchie. On peut remarquer que le saut d'effort transverse est aussi observable sur l'essai avec une dénivellation de 0,4mm de la Figure 39. On peut remarquer que l'amplitude du saut d'effort transverse augmente avec la valeur de la dénivellation.

D'après l'équation 6, on remarque que la valeur de l'effort d'avance est fonction du déséquilibre des contraintes tangentielles entre le côté avance et le côté retrait sous l'épaulement. La dénivellation étant placée du côté avance, la matière malaxée passe au-devant du pion du côté avance vers le côté retrait. Ceci ne générerait pas un déséquilibre suffisant pour provoquer une modification significative de la valeur de l'effort d'avance.

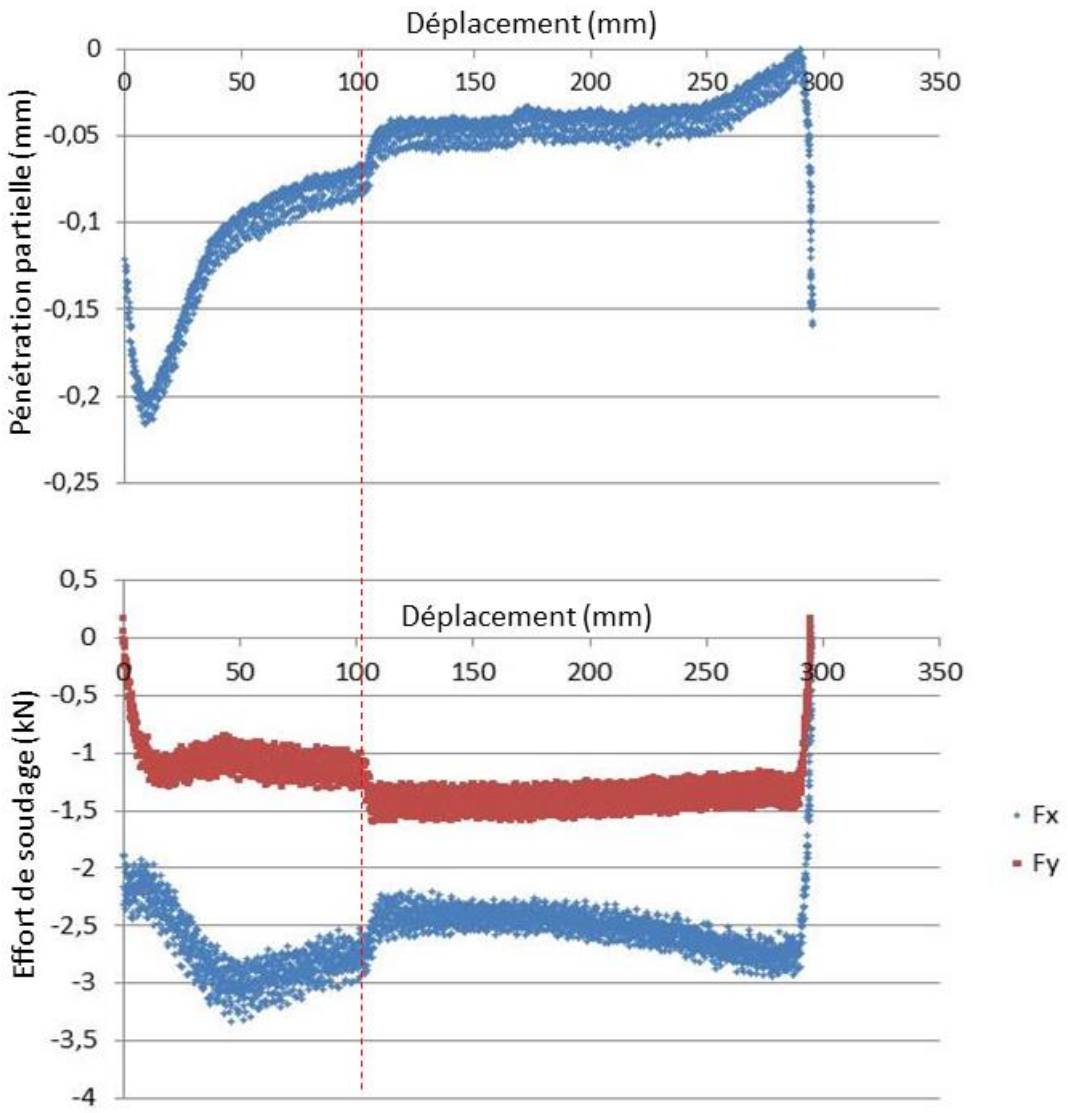


**Figure 41 : Évolution de la pénétration relative et des efforts de soudage lors d'un essai avec une dénivellation de 0,2mm du côté retrait sur une longueur de 150mm.**

Lorsque la dénivellation est placée du côté retrait, on constate un saut de l'effort transverse et de l'effort d'avance. Par rapport à la position de la dénivellation du côté avance, la grande différence vient de la sensibilité de l'effort d'avance. Lorsque la dénivellation est placée du côté retrait, on constate que l'outil remonte moins, l'excès de matière se retrouve en grande partie sous la forme de flash. Le bord d'attaque de l'outil se retrouve à l'avant de l'outil et du côté retrait contribuant ainsi au déséquilibre des contraintes tangentielles entre les côtés avance et retrait et entre l'avant et l'arrière de l'épaulement (voir Figure 42). Ceci explique l'effet du défaut sur les deux composantes d'effort. La plus faible amplitude du saut en effort transverse dans le cas où la dénivellation est placée du côté avance provient certainement du fait que l'outil remonte d'avantage dans cette configuration.

La différence d'amplitude de remontée de l'outil entre une dénivellation placée du côté avance et retrait peut s'expliquer par le flux de matière sous l'épaulement. Dans le cas d'une dénivellation du côté avance, la matière de la dénivellation passe du côté avance vers le côté retrait à l'avant de l'épaulement. Ceci provoque un surplus de matière à malaxé à l'avant de l'outil et « équilibré » entre le côté avance et retrait. Par contre lorsque que la dénivellation est placée du côté retrait, le surplus de matière de la dénivellation passe du côté retrait à l'avant de l'outil vers le côté retrait à l'arrière de l'outil. Le côté avance à l'avant de l'outil ne voit pas le surplus de matière en premier lieu. La pression s'exerçant sur l'avant de l'outil est plus faible que dans le cas d'un défaut placé du côté avance ; l'outil remonterait moins.

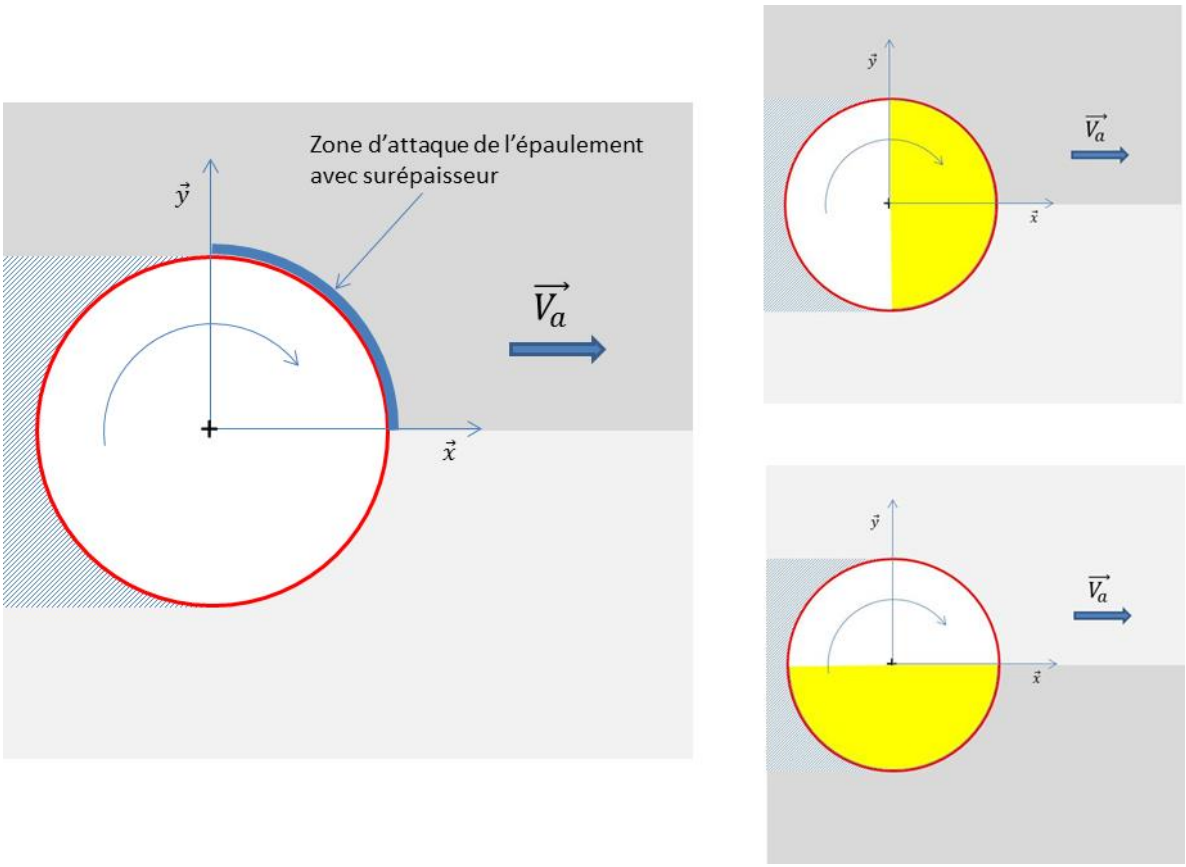


**Figure 42 : Schéma de l'engagement de l'épaulement dans la zone de surépaisseur**

Sur la Figure 43, sont présentés les résultats concernant un essai avec une dénivellation négative de -0.2mm placée du côté avance sur une longueur de 150mm. On peut noter que conformément à ce qu'on pouvait attendre, l'outil plonge lors du passage dans la zone avec la dénivellation négative. La vitesse de plongée de l'outil est du même ordre de grandeur que celle observée pour la dénivellation positive. Par contre, l'effet sur les efforts de soudage est plus progressif et a lieu sur les deux composantes d'effort. En fait, après la plongée de l'outil, la soudure a lieu avec une surépaisseur du côté retrait. Ceci se traduit donc par un surcroît de l'effort transverse et une diminution de l'effort d'avance.

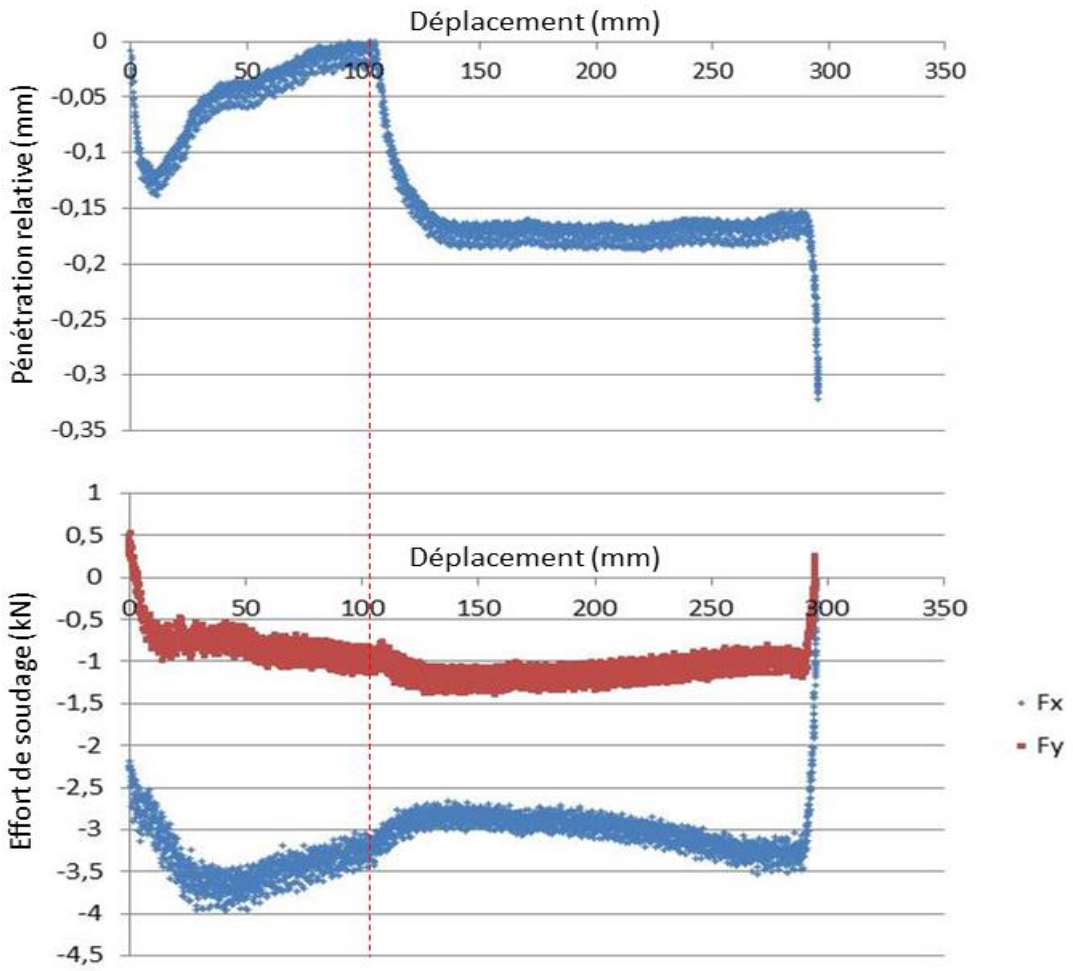


**Figure 43 : Évolution de la pénétration relative et des efforts de soudage lors d'un essai avec une dénivellation de –0,2mm du côté avance sur une longueur de 150mm.**

La Figure 44 illustre les résultats obtenus pour une dénivellation positive de 0,4mm placée du côté avance sur une longueur de 25mm. On remarque que l'accostage de la zone avec la dénivellation est identique à celle des essais avec une longueur de défaut de 150mm. On note notamment une plongée rapide de l'outil, un saut de l'effort transverse et quasiment aucun effet sur l'effort d'avance. Lors de la sortie de la zone avec la dénivellation positive, l'outil plonge rapidement pour retrouver sa pénétration initiale. Pour ce qui est de l'effort transverse, celui-ci subit une chute très rapide jusqu'à une valeur inférieure à celle atteinte dans la zone sans dénivellation. La valeur de l'effort transverse reprend ensuite progressivement sa valeur initiale. L'effort d'avance subit une impulsion en sortie de la zone avec défaut avant là aussi de reprendre progressivement sa valeur initiale.

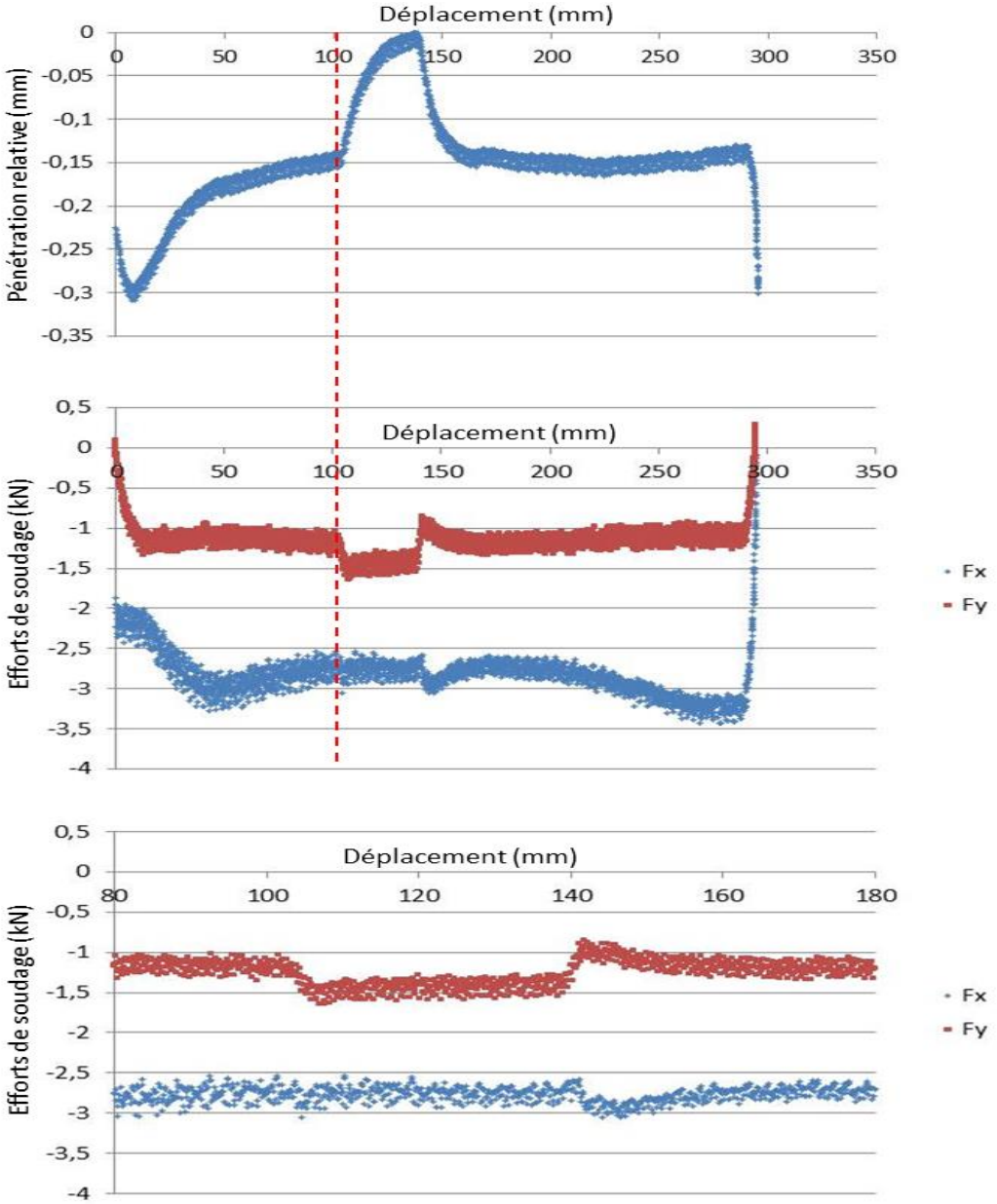


**Figure 44 : Évolution de la pénétration relative et des efforts d'avance et transverse au cours d'une soudure avec une dénivellation de 0,4mm sur 25 mm placée du côté avance**

Sur la Figure 45, sont présentés les résultats obtenus pour deux essais avec une dénivellation de 0,2mm sur une longueur de 25mm, le premier placé du côté avance et le second placé du côté retrait.

On peut noter que l'accostage de la zone avec dénivellation est conforme à ce qui a été observé pour les dénivellations sur 150mm. La remontée de l'outil dans le cas d'une dénivellation du côté retrait est moins

marquée que dans le cas opposé. On constate dans les deux cas un saut de l'effort transverse et un saut de l'effort d'avance uniquement dans le deuxième cas.

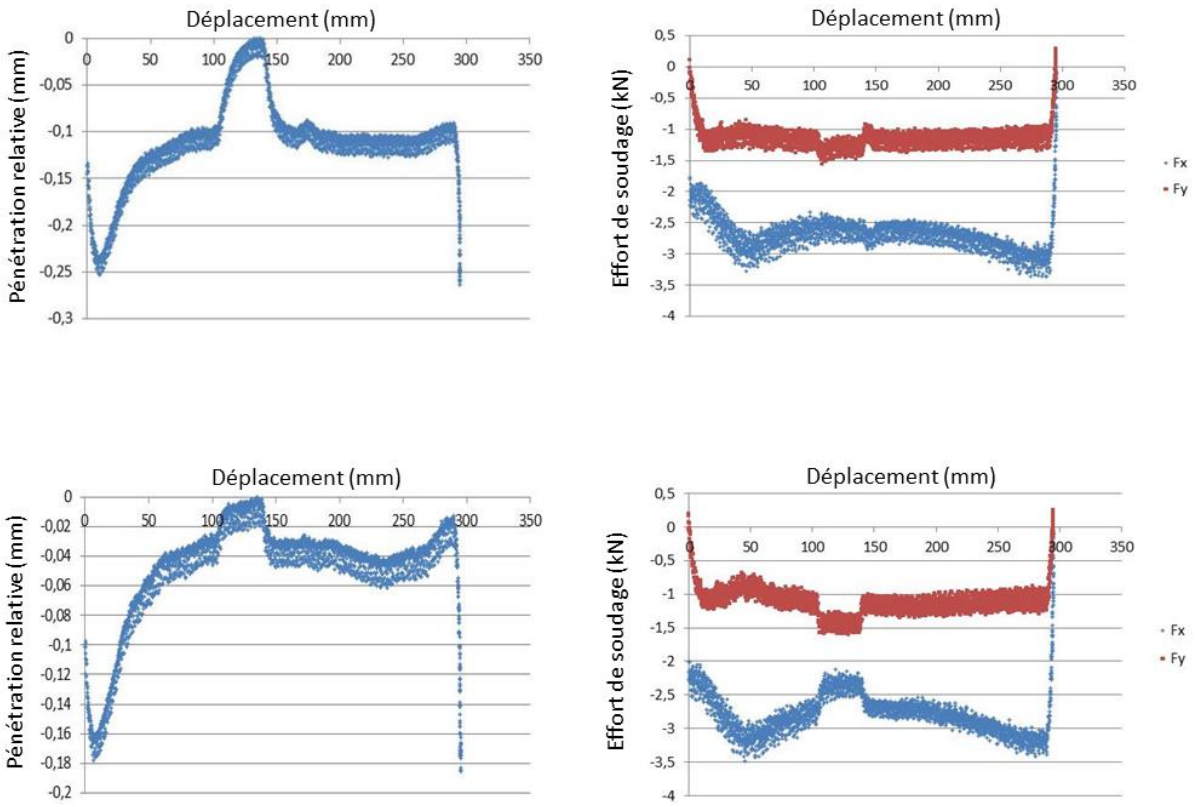


**Figure 45 : Comparaison entre deux essais avec une dénivellation de 0,2mm sur une longueur de 25mm, (en haut) placé du côté avance, (en bas) placé du côté retrait.**

Lors de la sortie de l'outil de la zone avec la dénivellation placée du côté retrait, la pénétration de l'outil et les efforts de soudage reprennent leur valeur initiale rapidement sans présenter de pic ou de chute. Dans le cas d'une dénivellation placée du côté retrait, la plongée de l'outil étant plus faible, il est plus facile pour l'outil de revenir dans sa position initiale après le passage du défaut. Le pic d'effort d'avance et la chute de l'effort transverse dans le cas d'une dénivellation du côté avance pouvant être attribuée à la plongée de l'outil.

### 6.2.4 Conclusion

A la présence d'une dénivellation, l'outil piloté en effort plonge ou remonte selon la valeur de cette dernière. L'outil remonte lors du passage d'une dénivellation positive et plonge si elle est négative. A ces constatations sous forme d'évidences, il est important de noter que la rapidité avec laquelle l'outil réagit dépend de la position de la dénivellation par rapport aux côtés avance et retrait de la soudure. Ceci peut s'expliquer en considérant le flux de matière. Lorsque qu'une surépaisseur est placée du côté avance, l'excès de matière est déplacé à l'avant de l'outil du côté retrait. L'excès de matière est donc réparti à l'avant de l'outil et provoque ainsi une remontée « rapide de l'outil ». Lorsque cette même surépaisseur est placée du côté avance, l'excès

de matière est déplacé vers l'arrière de l'outil. Cette différence de flux de matière va être à l'origine d'une différence d'effort de soudage. En effet, comme présenté dans le livrable 2.1, les efforts d'avance et transverse sont liés au déséquilibre des flux de matière autour de l'outil et particulièrement sous son épaulement.

# 7 ETUDE DES EFFETS D'UNE VARIATION DE L'OUTILLAGE DE SOUDAGE

Dans cette partie, on s'intéresse à mettre en évidence l'influence de la nature de l'outillage utilisé pendant le soudage par friction malaxage. Il existe différente déviation reliée à l'outillage utilisé pour le FSW qui peut influencer le FSW. Exemple : la nature des brides (matériaux, serrage), la nature de l'outillage (matériaux, accostages). Pour cette étude, on s'intéresse à l'étude de la variation des enclumes et ce qui suit comme condition thermique lors de la réalisation de l'opération de soudage FSW.

Un cordon de soudure effectué dans des conditions opératoires identiques sera réalisé sur trois enclumes différentes.

## *7.1 Étude de l'influence des enclumes utilisées*

Dans cette partie, on se propose d'étudier l'influence de la variation des enclumes sur notre configuration de base. Le principe de cette étude est de reprendre les essais de référence avec différentes enclumes.
Les matériaux des enclumes utilisés sont les suivants :

- Enclume en acier non allié (C45 E (XC48))
- Enclume en acier inoxydable (X6CrNiMoTi17-12-2 (316Ti))
- Enclume en cuivre

Leurs caractéristiques thermiques de ces matériaux sont présentées dans le tableau ci-dessous :

| **Matériaux** | **Conductivité thermique à 20°C** [$W.m^{-1}.K^{-1}$] | **Capacité thermique massique à 20°C** [$J.kg^{-1}.K^{-1}$] | **Coefficient de dilatation linéique à 20°C** [$10^{-6}.K^{-1}$] | **Diffusivité Thermique** [$m^2/s$] |
|---|---|---|---|---|
| Cuivre | 380 | 401 | 16,6 | $1,1 * 10^{-4}$ |
| Acier non allié | 50 | 500 | 11,5 | $1,17 * 10^{-5}$ |
| Acier inoxydable | 26 | 470 | 16,5 | $3,35 * 10^{-6}$ |

**Tableau 14 : Caractéristiques thermiques des enclumes utilisées**

Il peut être noté que la capacité thermique des différents matériaux choisis varie afin de pouvoir voir l'influence de la variation des conditions thermiques lors du soudage par FSW.

D'après les valeurs de conductivité thermique, le cuivre est le matériau conduisant le mieux la chaleur (8 fois mieux que l'acier et 15 fois mieux que l'acier inoxydable). De ce fait, il peut être supposé que cette enclume dissipe plus efficacement la chaleur produite par l'opération de soudage et génère des comportements en soudage différents.

### 7.1.1 Procédure expérimentale

Les soudures sont réalisées sur un alliage d'aluminium 6082-T651 d'épaisseur 6mm. Tous les essais ont été réalisés sur la machine de soudage FSW MTS-ISTIR 10 de l'Institut de Soudure (voir annexe A).

Les soudures réalisées sont des soudures pleine tôle d'une longueur de 300mm. Les éprouvettes sont bridées latéralement par serrage comme le montre la Figure 46.

Les paramètres de soudage sont donnés dans le Tableau 15. Pour cette soudure, réalisée sur une enclume en XC48 (soudure de référence), la soudure ne présente pas de manque de compacité interne et ni de manque de pénétration. Ceci a été vérifié par contrôle macrographie en début, milieu et fin de cordon. Lors des essais réalisés, le matériau et l'outil sont identiques à l'essai de référence Tableau 2. Seule l'enclume utilisée change.

| **Va** (mm.min$^{-1}$) | **N** (tr.min$^{-1}$) | **Fz** (kN) | **Angle de soudage** (°) |
|---|---|---|---|
| 650 | 1100 | 10 | 2,5 |

**Tableau 15 : Paramètres de soudage utilisés pour les essais d'enclumes**

Pour chaque enclume testée, les essais sont effectués trois fois afin d'évaluer la répétabilité des résultats. De plus les essais sont réalisés dans un ordre aléatoire.

Pour chaque soudure, une prise de température est effectuée sur l'enclume, de plus les efforts mis en œuvre sont enregistrés. Ces valeurs seront par la suite utilisées pour être comparées entre elles afin de déterminer l'influence des enclumes sur ces dernières. Ces mesures de températures sont données à titre indicatif.

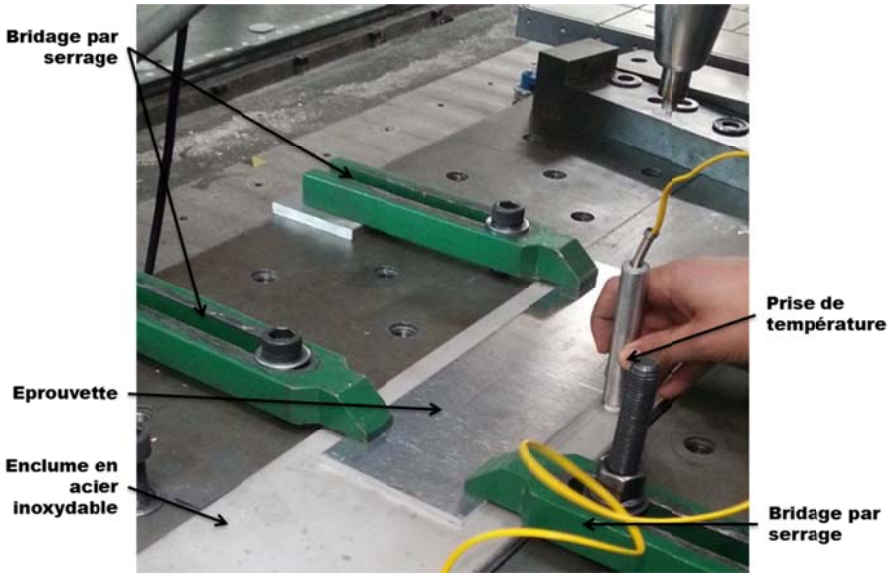


**Figure 46 : Dispositif expérimental dans le cas de l'enclume en acier inoxydable**

### 7.1.2 Résultats

#### 7.1.2.1 Aspect visuel des cordons

La Figure 47 présente les cordons de soudure obtenus. Les cordons (a) et (c) ont été réalisés respectivement sur les enclumes en acier non allié et en acier inoxydable. Ces deux cordons présentes un flash constant sur tout le cordon de soudure. Le cordon de soudure (b) effectué sur une enclume en cuivre ne présente pas le même flash, seul un léger flash est observable en milieu de cordon. Ceci témoigne d'une différence de profondeur de pénétration de l'outil au sein de la matière. Elle serait moins importante lors du soudage sur une enclume en cuivre que sur une enclume base acier.

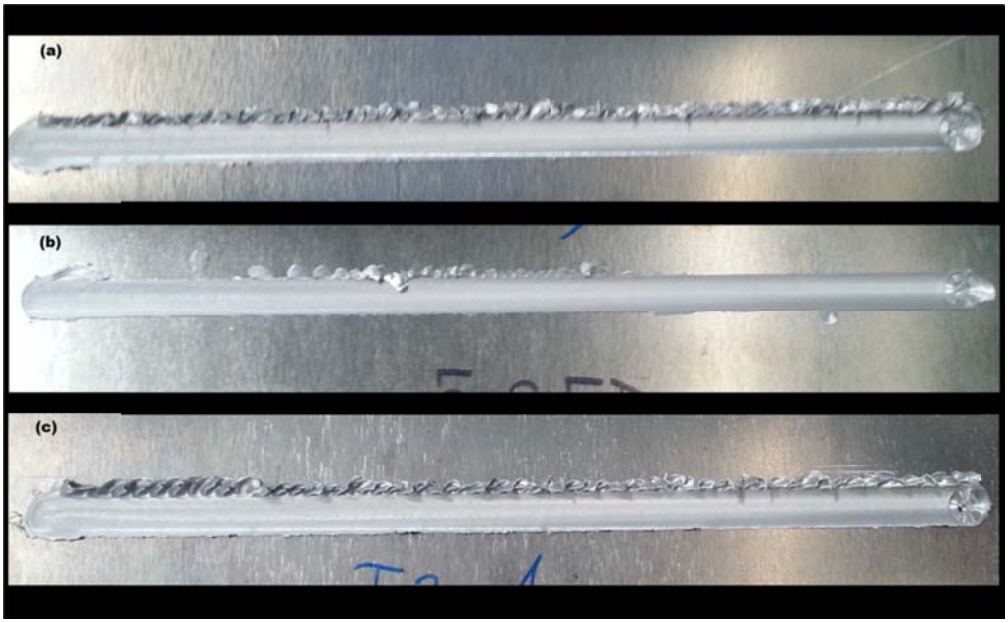


**Figure 47 : Cordons de soudure obtenus : (a) enclume en acier non allié, (b) enclume en cuivre, (c) enclume en acier inoxydable**

La Figure 48 présente les macrographies des cordons obtenus. Les cordons (a) et (c) ont été réalisés respectivement sur les enclumes en acier non allié et en acier inoxydable. Ils ne présentent ni manque de pénétration ni défaut de compacité. Le cordon (b), réalisé sur le cuivre présente quant à lui, un manque de pénétration en racine et un défaut tunnel (côté avance). D'après Abegast [ARB08], le défaut tunnel apparait lors d'un malaxage insuffisant de la matière lors de conditions thermiques dites « froides ».

Selon Zimmer [ZIM09] la position relative de l'outil est dû à l'équilibre entre $F_{Matière/Outil}$ et $F_{Machine\ /Outil}$, lors d'un pilotage de l'opération en effort. Le manque de pénétration en racine est selon [ZIM09] dû à une différence entre l'effort appliqué par la machine sur l'outil et celui renvoyé par la matière sur l'outil. Cette différence de profondeur de pénétration a pour origine des conditions de soudage plus froide avec une enclume en cuivre qu'avec une enclume en acier (XC38 ou inoxydable). Ainsi, à énergie nominale constante (énergie apportée par l'action de l'outil sur la matière), l'enclume en cuivre conduit à des conditions de soudage plus froides entraînant un effort appliqué par la matière sur l'outil plus important. La conséquence est une modification de la position de l'outil par rapport à sa position nominale. L'outil possède une profondeur de pénétration moins importante générant l'apparition du manque de pénétration en racine.

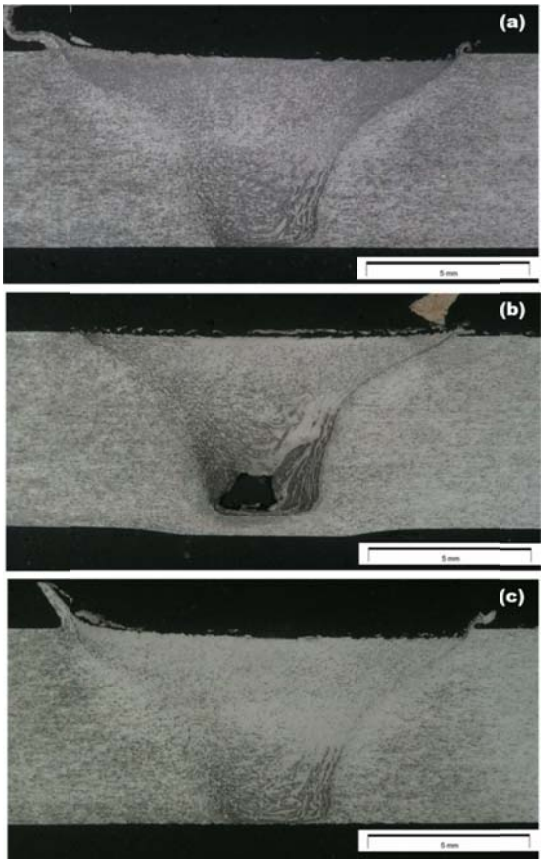


**Figure 48 : Macrographies en milieu de cordon : (a) enclume en acier non allié, (b) enclume en cuivre, (c) enclume en acier inoxydable**

### 7.1.2.2 Températures atteintes

La température est relevée sur l'enclume au niveau où la soudure est réalisée. Ce relevé est effectué avant bridage et une fois l'éprouvette soudée débridée. Les données récupérées correspondent à $T°_{initiale}$ et $T°_{finale}$. Afin de se trouver dans les mêmes conditions thermiques à chaque essai, la température initiale est fixée à 20°C±2°C. Un refroidissement à l'air est donc réalisé avant chaque bridage afin de respecter cette tolérance.

De plus, au cours du soudage, une autre prise de température est réalisée. Il s'agit cette fois-ci du maximum atteint lors du soudage. Cette prise est située sur l'enclume à côté de l'éprouvette en cours de soudage et à mi-parcours. Cette donnée correspond à $T°_{max\ soudage}$.

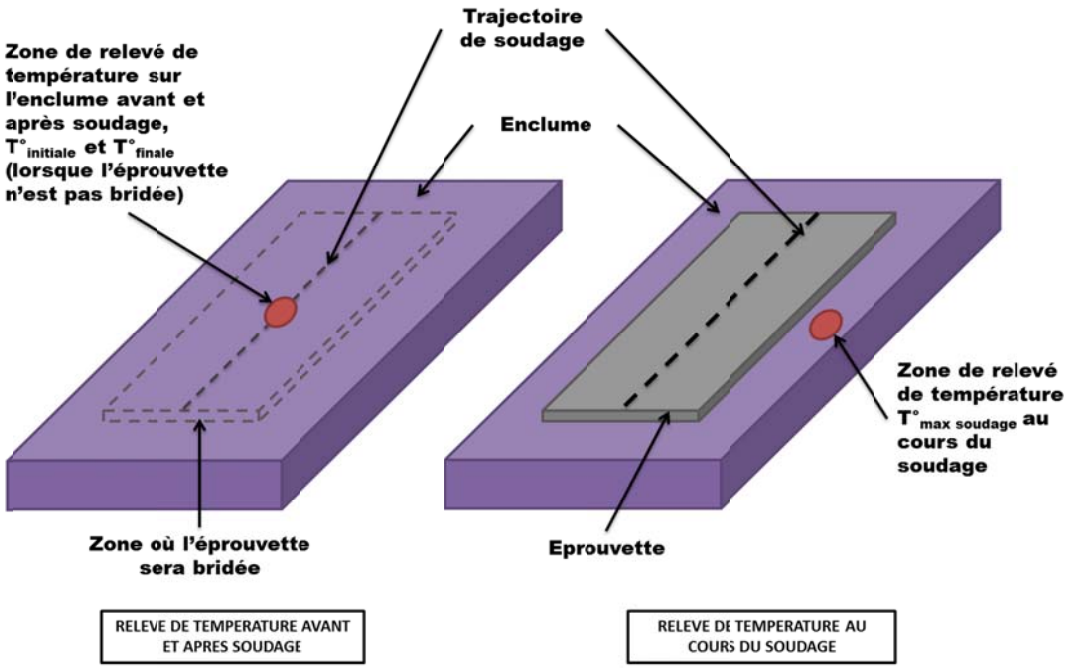


**Figure 49 : Schémas des zones de prise de température sur les enclumes**

Le Tableau 16 présente les températures relevées. Les températures initiales, avant bridage, sont identiques. Par contre, après soudage et la température maximale enregistrée en soudage présente une différence de température. Ceci peut être interprété comme l'enclume de cuivre qui absorbe et dissipe plus d'énergie de soudage que les deux autres enclumes en acier. Cela conduit à une température de l'enclume en cours de soudage plus élevée et à une température de la pièce moins élevée à cause d'une dissipation thermique plus importante.

### 7.1.2.3 Analyse du couple et de l'énergie de soudage

a) Analyse du couple et de l'énergie nominale de soudage

Ainsi, les différences d'aspect esthétique de la soudure et la présence d'un défaut tunnel au sein de la soudure obtenue avec une enclume en cuivre témoigne de conditions de soudage différentes. Il est nécessaire d'étudier la quantité de chaleur transmise par l'outil à la matière afin de pouvoir statuer que l'évolution des conditions de soudage est bien dues au matériau de l'enclume.

En FSW, l'énergie de soudage n'est pas directement gouvernée par les paramètres opératoires comme cela peut l'être en soudage à l'arc. L'énergie de soudage est quantifiée par la relation :

$$E_n = \frac{Puissance}{Vitesse\ d'avance} = \frac{C_z \times w_z}{v_a} \approx \frac{f(w_z) \times w_z}{v_a} \qquad (6)$$

| Essais | $T°_{initiale}$ [°C] | $T°_{finale}$[°C] | $T°_{max\ soudage}$[°C] |
|---|---|---|---|
| Enclume Cuivre 1 | 19°C | 32°C | 37°C |
| Enclume Cuivre 2 | 20°C | 35°C | 39°C |
| Enclume Cuivre 3 | 21°C | 32°C | 37°C |
| Enclume Acier non allié 1 | 21°C | 33°C | 21,5°C |
| Enclume Acier non allié 2 | 20°C | 35°C | 20,6°C |
| Enclume Acier non allié 3 | 21°C | 36°C | 21,5°C |
| Enclume Acier inoxydable 1 | 20°C | 36°C | 21,5°C |
| Enclume Acier inoxydable 2 | 21,4°C | 38°C | 22,7°C |
| Enclume Acier inoxydable 3 | 20°C | 34°C | 21°C |

**Tableau 16 : Relevé des températures des essais**

L'énergie nominale dépendant du couple, il est nécessaire d'analyser l'évolution du couple en fonction de l'enclume.

La Figure 50 présente les valeurs moyennes de couple en fonction des enclumes. La variation des intensités mesurées est de 1,33% pour chacune des configurations. Il peut être conclu qu'aucune modification du couple n'est notifiée.

| | $C_{z\ moyen}$ | $C_{z\ max}$ | $C_{z\ min}$ | $C_{z\ max}$ - $C_{z\ min}$ |
|---|---|---|---|---|
| **Type d'enclume** | Nm | Nm | Nm | Nm |
| Eclume Acier | 60.2 | 60.9 | 59.5 | 1.4 |
| Enclume Cuivre | 60.3 | 61 | 59.6 | 1.4 |
| Enclume Acier Inox | 60.1 | 60.8 | 59.1 | 1.7 |

**Figure 50 : Évolution du couple à la broche pour chaque essai et par configuration**

Ainsi, en considérant l'énergie nominale $E_n$ définie dans l'équation (8), à couple identique et paramètres opératoires identique ($\omega_z$ et $v_a$), il peut être conclu que l'énergie de soudage apportée par l'opération de soudage est identique.

D'après l'étude faite par Fehrenbacher [FEH10], le couple augmente lorsqu'on passe d'une enclume en titane (faible conduction thermique) à une enclume en cuivre. Le mode de pilotage choisi par auteur était le contrôle en position de l'outil. C'est-à-dire que pour les deux essais, la pénétration de l'outil est identique. Dans notre étude, l'outil est piloté en effort suivant son axe. A une baisse de la température de la matière malaxée, l'outil peut réagir par une remontée. Cette dernière peut compenser par un moindre engagement de l'outil l'augmentation de la limite d'écoulement du matériau.

b) Évolution des efforts

La Figure 51 présente les efforts d'avance et la Figure 52 les efforts latéraux pour trois essais réalisés sur les trois enclumes différentes. Ces valeurs correspondent à l'effort d'avance moyen mesuré sur la phase de soudage Il peut être noté que les valeurs moyennes des efforts mesurés sont répétables d'un essai à l'autre. L'effort moyen pour les enclumes de type acier (XC48 et inoxydable) sont du même ordre de grandeur. Lors du soudage sur une enclume en cuivre, l'effort résistif à l'avance du pion augmente de manière non négligeable (l'effort augmente de 140% par rapport à l'enclume XC48). D'après Sheiki [SHE05] l'intensité de l'effort d'avance dépend de taille plastifiée à l'avant du pion. Dans ces expérimentations, il a fait varier les paramètres opératoires et par conséquent l'énergie de soudage. Il en a conclu, que plus l'énergie de soudage est grande, moins le matériau exerce une résistance à l'avance de l'outil. Dans notre cas de figure, l'énergie nominale de soudage est la même pour tous les essais. Ainsi, cette augmentation pourrait être attribuée à une diminution de la zone plastifiée à l'avant du pion. Cette diminution serait due à des conditions de soudage plus « froide » à cause d'une dissipation de chaleur accrue avec une enclume en cuivre.

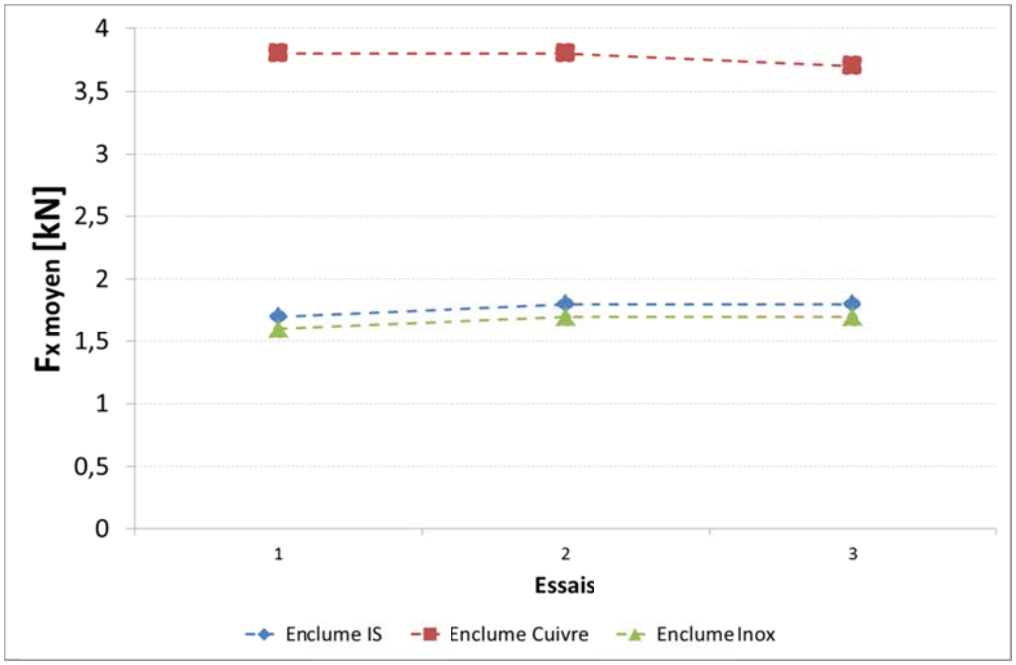


**Figure 51: Évolution des efforts d'avance pour chaque essai et par configuration**

La Figure 52 présente le comportement de l'effort transversal. Il peut être noté que contrairement à l'effort d'avance, lorsque l'on soude sur une enclume en cuivre, l'effort transverse diminue.

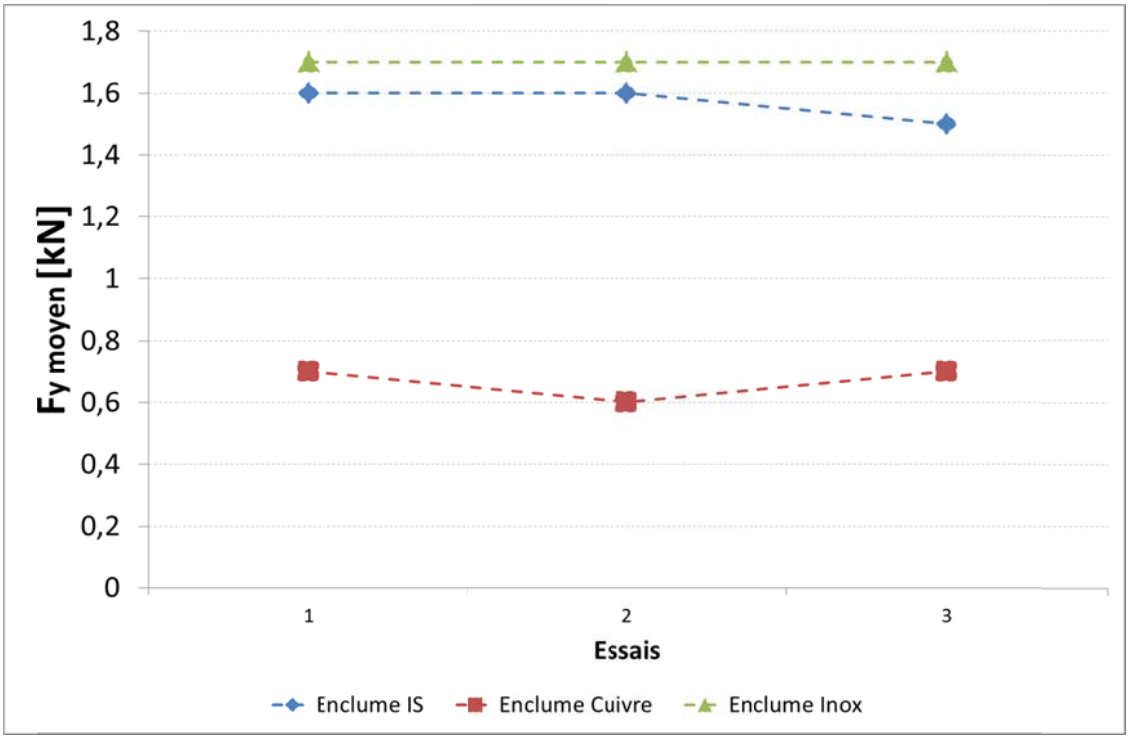


**Figure 52: Évolution des efforts latéraux pour chaque essai et par configuration**

D'après Balasubramanian [BAL09], les efforts dans le plan (x, y) de l'outil sont générés par la différence entre les pressions appliquées par la matière sur l'outil entre l'avant du pion et à l'arrière du pion. D'après cet auteur [BAL09], l'effort résultant dans le plan (x, y) permettrait également de déterminer la présence de défauts internes de type « tunnel ». Le Tableau 17 présente l'effort résultant, $F_R$, des composants $F_x$ et $F_y$ de l'effort. L'effort $F_R$ est pour les soudures ne présentant pas de défaut interne de l'ordre de 2,4kN (soudures sur enclume en acier et inox) et de l'ordre de 3,8kN lorsque la soudure présente un défaut tunnel (soudures sur enclume en cuivre).

| | acier | cuivre | inox |
|---|---|---|---|
| Effort résultant [kN] | 2.37 | 3.83 | 2.39 |

**Tableau 17 : Effort résultant, $F_R$, dans le plan (x,y)**

De même, l'orientation de l'effort évolue, comme le montre la Figure 53. Comme l'on souligné Balasubramanian [BAL09] et Jene [JEN08] les efforts Fx et Fy sont intimement liés au flux de matière. Une modification des efforts, amplitude et direction, témoigne d'une modification du flux de matière autour de l'outil. Cela rejoint les constatations réalisées au préalable. Les conditions thermiques lors du soudage sur une enclume en cuivre conduisent à des conditions opératoires plus « froides », entrainant à la réduction de matière malaxée par l'outil. Cela a pour conséquence une augmentation de l'effort résultant. Ceci est en accord avec les constatations de Balasubramanian [BAL09].

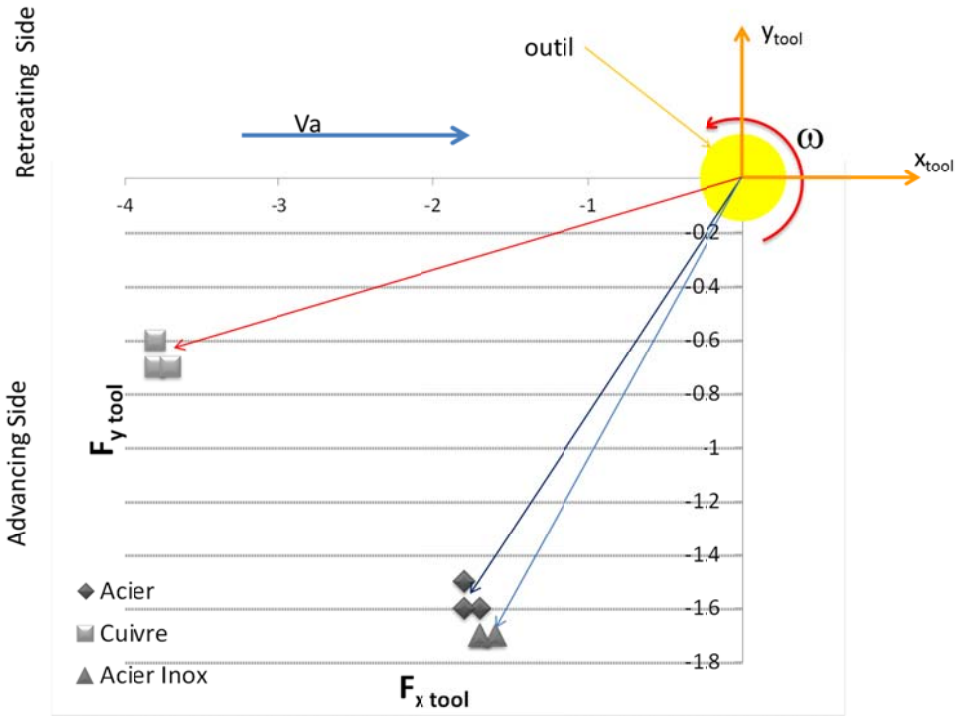


**Figure 53: Direction de l'effort normal, $F_R$, lors du soudage**

c) Évolution de la profondeur de pénétration

La Figure 48 présente les macrographies des cordons de soudure. Leur observation avait conduit à l'observation d'un défaut tunnel et à une modification de la profondeur de pénétration lors du soudage sur une enclume en cuivre (Figure 48, b). Cette modification se mesure avec une variation de la profondeur de pénétration (Figure 54). Lorsque l'on soude à iso paramètre et configuration, la profondeur de pénétration de l'outil par rapport à la surface des pièces est moins importante. Cela entrainerait, lors du soudage bout à bout, l'apparition d'un manque de pénétration en racine en pied de cordon.

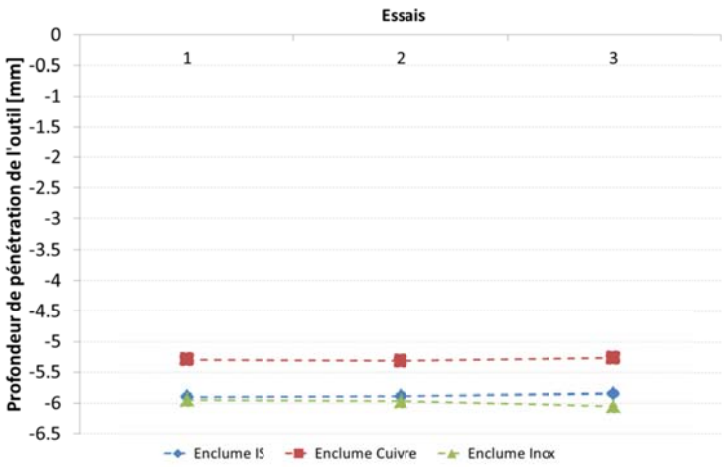


**Figure 54 : Évolution de la profondeur de pénétration, Δz, pour chaque essai et par configuration**

La position de l'outil dépend de l'équilibre entre l'effort appliqué par la machine sur l'outil $F_{machine/outil}$ et celui renvoyé par la matière sur l'outil $F_{matière/outil}$. La Figure 55 présente les forces appliquées sur l'outil. Lors du soudage sur une enclume en cuivre, les conditions thermiques évoluant trop fortement, l'équilibre des efforts appliqués sur l'outil n'est alors plus respecté par rapport à sa position originale. Si l'outil remonte légèrement, le malaxage sous le pion devient alors insuffisant, conduisant à l'apparition du défaut de pénétration partielle (constaté sur la Figure 48, b). De même, l'outil remontant, une petite zone de vide se crée entre la partie avant de l'épaulement et la surface des pièces (Figure 55). Ce manque de matière peut également être à l'origine de l'apparition d'un défaut tunnel interne (Figure 48, b). L'épaulement ne drainant plus suffisamment de matière.

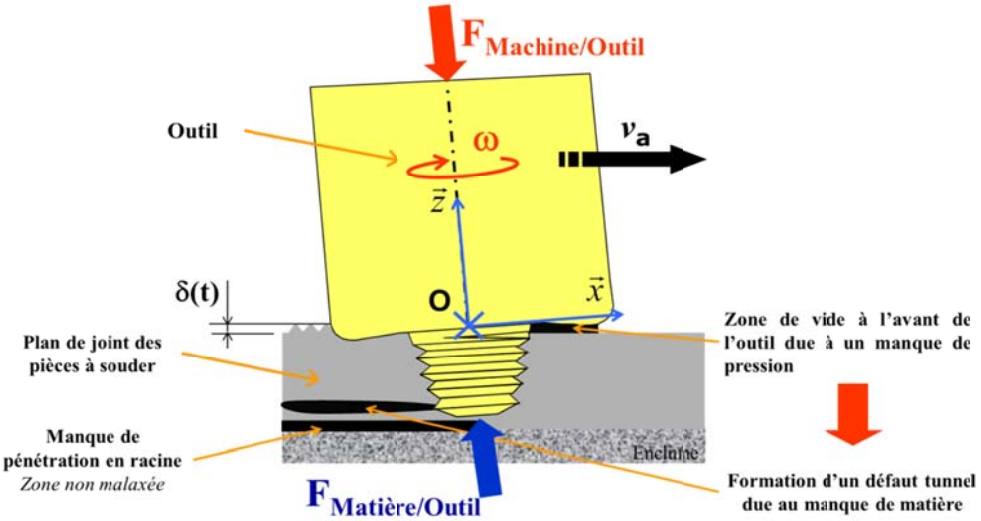


**Figure 55 : Schématisation de la position de l'outil et des défauts générés**

### 7.1.3 Synthèse

La Figure 56 présente une synthèse de l'évolution des différentes grandeurs étudiées par rapport à l'essai de référence réalisé sur une enclume en acier. À cela s'ajoute la présence des défauts de type tunnel et de manque de pénétration en racine présents lors du soudage sur une enclume en cuivre.

| Enclume | $E_{nominale}$ | $C_{z\ moyen}$ | $F_{x\ moyen}$ | $F_{y\ moyen}$ | $F_{R\ moyen}$ | $D_z$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Acier Inoxydable | — | — | — | — | — | — |

| Enclume | $E_{nominale}$ | $C_{z\ moyen}$ | $F_{x\ moyen}$ | $F_{y\ moyen}$ | $F_{R\ moyen}$ | $D_z$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cuivre | — | — | ↗ | ↘ | ↗ | ↘ |

**Figure 56 : Évolution des efforts, couple et profondeur de pénétration en fonction du type d'enclume, par rapport à l'essai de référence réalisé sur une enclume en acier**

A iso configuration de soudage (même paramètres opératoires, même outil et même épaisseur et alliage soudée), le couple ne connaît pas d'évolution quelle que soit la nature de l'enclume. Par conséquent, l'énergie nominale de soudage reste la même donc l'apport d'énergie apportée à la matière par l'outil. L'évolution de l'effort d'avance ($F_x$) et de la profondeur de pénétration ainsi que la présence des défauts internes témoignent des conditions de soudage plus froides lors du soudage sur une enclume en cuivre. Ainsi, la meilleure diffusivité thermique du cuivre par rapport aux enclumes en acier et acier inoxydable serait à l'origine d'une plus grande absorption d'énergie de la zone soudée. Cela conduit à des conditions de soudage plus froides générant les défauts. D'autre part, lors du soudage avec une enclume en acier inoxydable, aucune modification notable n'a pu être décelée. Ainsi, malgré lorsque la modification de diffusivité thermique est faible, cela n'entraine pas de variation de condition de soudage.

### 7.1.4 Conclusion

Des essais ont été menés à iso paramètres opératoires, configuration de soudage et outil de soudage sur 3 matériaux d'enclumes différents. Ils montrent que lors du soudage avec une enclume en cuivre, les conditions thermiques évoluent conduisant à une modification de l'amplitude et de la direction des efforts de soudage. Lors du soudage de pièces complexes avec un robot polyarticulé, lorsque les conditions thermiques seront modifiées par le bridage et/ou la géométrie des pièces, il sera nécessaire d'anticiper la modification d'efforts générés. Il sera possible également de jouer sur la matière le l'enclume pour maîtriser les conditions thermiques du soudage.

# 8 SOUDURE DES COUPONS AVEC TRAITEMENT THERMIQUE SUPPLÉMENTAIRE

Dans cette partie, on se propose de souder deux tôles dans un même alliage mais ayant une structure métallurgique initiale différente. Dans notre étude la variation de structure va être obtenue par traitement thermique de recuit.

## *8.1 Procédure expérimentale*

Les essais de référence ont été réalisés avec des tôles en alliage 6082 avec un état métallurgique initial correspondant à l'état de livraison T651. Un premier lot de coupons a conservé cet état initial tandis qu'un deuxième a subi un traitement thermique de sur-revenu consistant en un maintien à 200°C pendant 6h suivi d'un refroidissement à l'air. Les duretés des deux types de tôles sont mesurées afin d'identifier et de valider l'influence de ce traitement. La figure suivante présente les duretés des deux types de coupon. Ce graphique montre que la dureté des coupons traités avec un sur-revenu est inférieure à celle des tôles à l'état de réception.

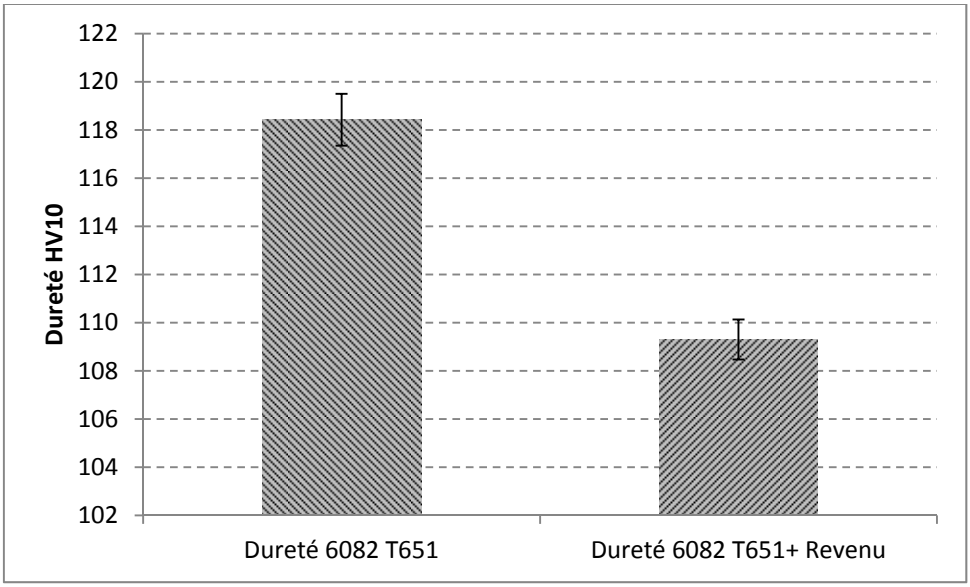


**Figure 57 : Dureté moyenne des coupons à souder.**

Les paramètres de soudage utilisés ont été sélectionnés à partir du domaine de soudabilité de l'outil COR-12-6. Les paramètres de soudage pour cette étude sont : une vitesse de soudage égale à 650mm/min, une vitesse de rotation égale à 1100 tr/min et une force de forgeage égale à 10kN.

Dans cette étude, plusieurs configurations de soudage ont été réalisées. Le tableau suivant reporte les différentes configurations testées.

| Essai | Type | Configuration des coupons |
|---|---|---|
| TTh1-1 | pleine tôle | sans Traitement Thermique Supplémentaire |
| TTh2-1 | pleine tôle | avec TTS |
| TTh3-1 | bout-à-bout | Coupons avec TTS |
| TTh4-1 | bout-à-bout | Coupon avec TTS placé côté avance |
| TTh5-1 | bout-à-bout | Coupon avec TTS placé côté Recul |
| TTh6-1 | bout-à-bout | Coupons sans TTS |

**Tableau 18. Soudage FSW sur tôles avec différents traitements thermique**

Les deux paramètres de l'étude sont la structure initiale des tôles ainsi que la position (côté avance ou côté retrait) des tôles ayant subi le traitement de sur-revenu.

## *8.2 Résultats*

La Figure 58 présente les valeurs moyennes de l'effort d'avance et transverse en phase de soudage avec l'illustration des différentes configurations de soudage.

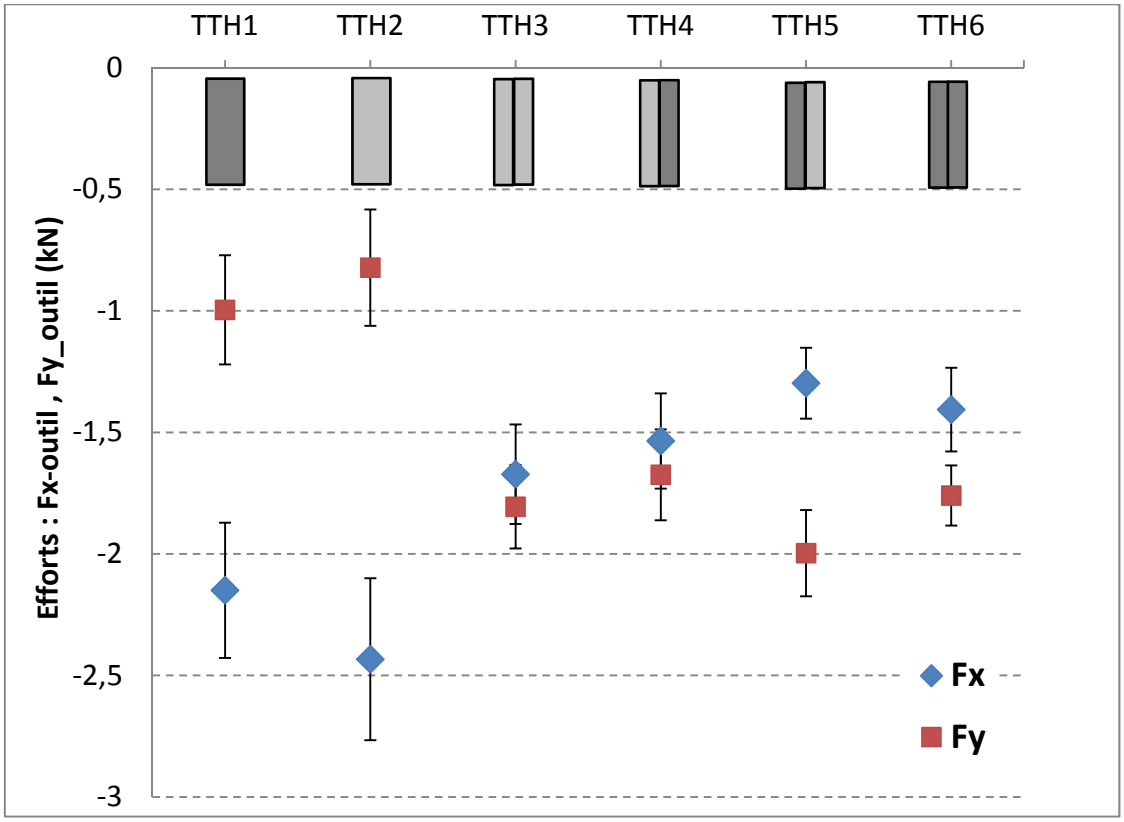


**Figure 58 : Représentation des efforts moyens de Fx_outil et Fy_outil pour les différentes configurations effectuées.**

La figure ci-dessus montre que les efforts moyens Fx_outil et Fy_outil représentatifs de l'essai effectué avec des coupons traités thermiquement supplémentaire ne sont pas identiques à ceux réalisés sur des coupons qui n'ont pas subi ce traitement.

On constate que le traitement thermique supplémentaire provoque une augmentation de l'effort Fx_outil et une légère diminution de Fy_outil dans le cas du soudage en pleine tôle. Ceci reste valable pour l'effort Fx_outil pour une configuration bord à bord mais pas pour l'effort Fy_outil qui lui reste quasiment invariable.

Les efforts Fx_outil et Fy_outil évoluent différemment selon le placement du coupon traité avec un traitement thermique supplémentaire dans la configuration de soudage. Un coupon traité placé du côté avance (TTH4-1) favorise l'augmentation de l'effort Fx_outil et la diminution Fy_outil. Un effet inverse est observé lorsque le coupon traité est placé du côté recul (TTH5-1).

La Figure 58 montre une différence entre les efforts dans une configuration pleine tôle et celle en bord à bord. Ceci peut s'expliquer par un mauvais accostage entre les bords des coupons à souder. En effet, ces bords présentent des faciès bruts de découpe déconseillés en FSW.

### 8.3 Conclusion

Cette étude nous a permis de mettre l'action sur l'effet des variations et des dérivés du traitement thermique sur les efforts générés au cours du soudage. Il est donc important de prendre en considération les effets thermiques qui peuvent survenir au cours de l'achèvement des structures soudées.

# 9 VARIATION DE LA CONFIGURATION DE SOUDAGE

Il existe plusieurs configurations de soudage en FSW. On peut citer par exemple la soudure bord à bord, la soudure en T, la soudure à clin, la soudure par transparence, etc...). Généralement, les paramètres de soudage sont liés à une configuration bien déterminée. Le passage d'une configuration de soudage à une autre nécessite une validation expérimentale du point de fonctionnement choisi.

Dans cette partie, on vérifie la validité des paramètres de soudage d'un point appartenant au DSO d'une soudure linéaire en pleine tôle lorsqu'on passe à une configuration de soudage par recouvrement.

### 9.1 Procédure expérimentale

Les essais avec variation de la configuration de soudage consistent à réaliser des soudures en recouvrement avec les paramètres d'un point de fonctionnement du DSO de la configuration dites de références (rectiligne pleine tôle).

On note que des travaux antérieurs ont montré qu'il existe peu ou pas de différence entre une configuration de soudage pleine tôle et une configuration bord à bord, Ceci sous-entendant qu'on procède avec un accostage exigeant des bords à souder.

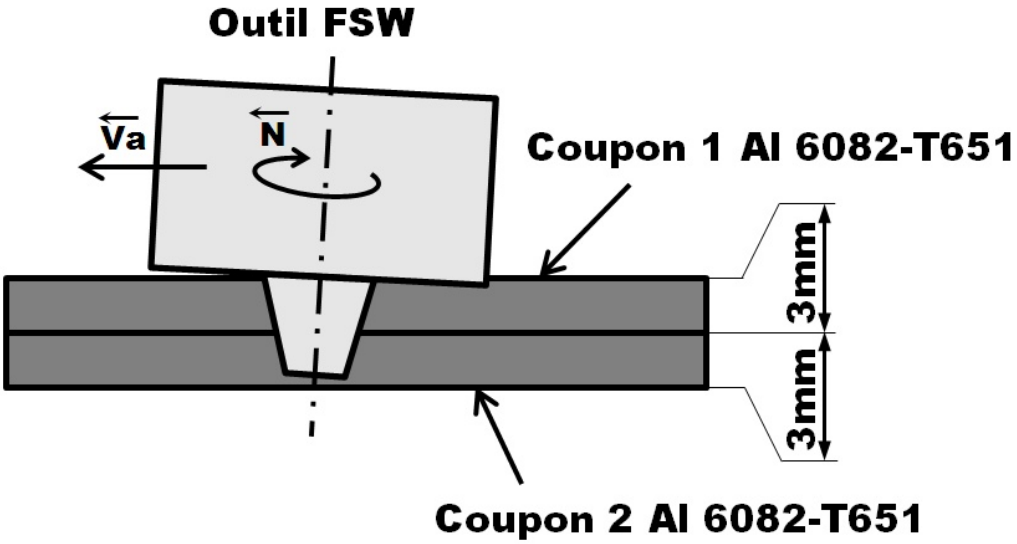


**Figure 59 : Configuration de FSW par recouvrement.**

La Figure 59 présente le principe du soudage par recouvrement. Cette configuration est plus proche d'une soudure pleine tôle. Dans ce cas, la pénétration de l'outil à travers les deux pièces à souder peut être partielle ou totale et le défaut de manque de pénétration ne se présente pas. Le Tableau 19 reporte les paramètres ainsi que la configuration utilisée pour chaque essai.

| Essai | Va [mm/min] | N [tr/min] | Fz_outil [kN] | angle de soudage [°] | Configuration de soudage |
|---|---|---|---|---|---|
| REC1-i | 650 | 1100 | 10 | 2,5 | Pleine tôle |
| REC2-i | 650 | 1100 | 10 | 2,5 | Recouvrement |

**Tableau 19. Essais de configuration de soudage**

Les coupons de 3mm d'épaisseur utilisés pour l'essai par recouvrement sont obtenus par usinage sur des coupons de 6mm. Les surfaces usinées ont permis un bon accostage entre les surfaces des coupons à souder. Chaque configuration de soudage présentée dans le Tableau 19 a été réalisée trois fois afin d'évaluer la répétabilité des résultats.

## *9.2 Résultats*

La Figure 60 présente les moyennes des efforts d'avance (Fx_outil) et transverse (Fy_outil) développées au cours du soudage avec les deux configurations de soudage adoptées. Les essais réalisés ont montré que l'évolution comme la moyenne de ces efforts restent insensibles à cette modification de configuration. Ceci est également valable sur l'évolution du couple Cz_outil.

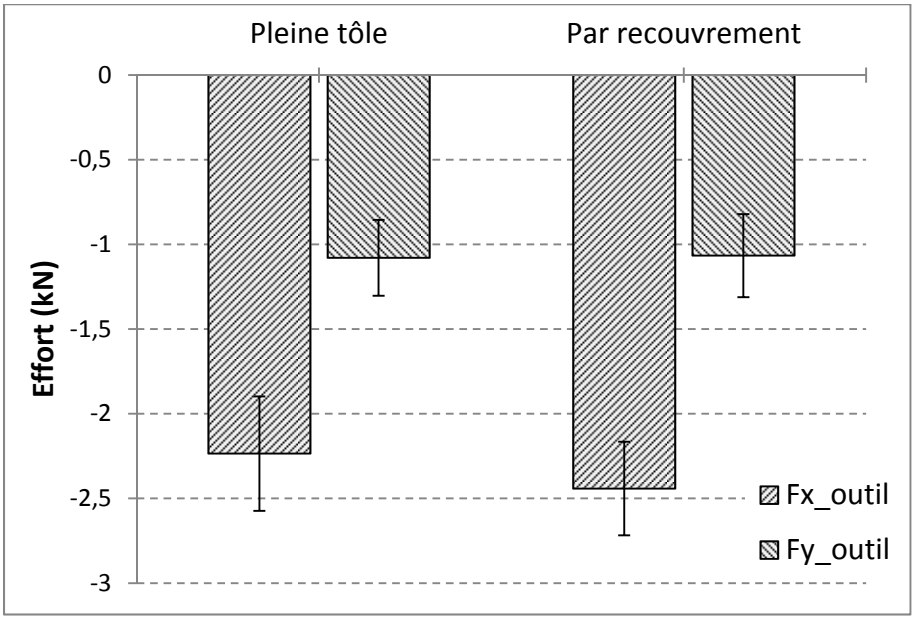


**Figure 60. Représentation des Moyennes des Efforts Fx_outil et Fy_outil pour les deux configurations.**

La Figure 61 illustre une macrographique réalisée au milieu de la soudure par recouvrement correspondante à l'essai REC 2-1.

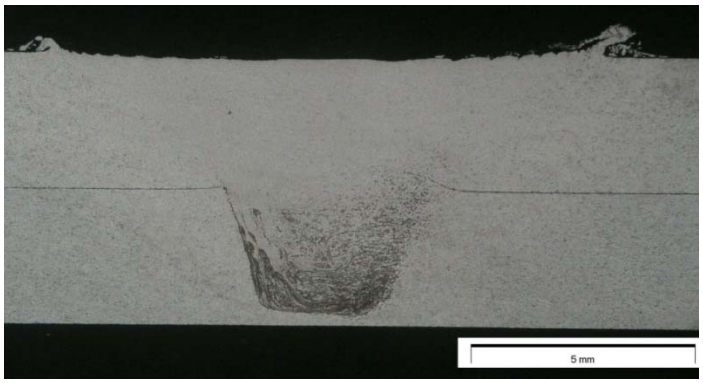


**Figure 61 : Macrographie d'une coupe transversale du soudage FSW par recouvrement (essai REC 2-1).**

La macrographie du cordon ne présente pas de défauts internes significatifs. Cependant, on observe une légère remonte de matière du côté recul donc une épaisseur soudée de coupon supérieur inférieure à son épaisseur initiale. Ce type d'observation est connu sous le nom de « *plate thinning* ».

### 9.3 Conclusion

Les essais réalisés pour les deux configurations proposées ne présentent pas de différences notables aux niveaux des efforts et défauts internes. La valeur des efforts obtenus grâce à des essais en pleine tôle peut être extrapolée à une configuration par recouvrement.

# 10 CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans les travaux antérieurs ayant fait l'objet du livrable 2.1, les efforts de soudage sont évalués à partir de campagnes expérimentales de soudure sur des coupons. L'objectif des travaux dont les résultats sont présentés dans le présent livrable est d'évaluer dans quelle mesure il est possible d'extrapoler les résultats sur coupons vers un cas réel.

L'étude présentée dans ce rapport a consisté dans un premier temps à identifier les écarts entre une configuration de soudage réelle et la configuration d'essai sur coupon. L'objet du travail a consisté ensuite à évaluer l'influence de ces écarts sur les efforts de soudage.

Les écarts ont été classés suivant trois catégories en fonction qu'ils concernent la pièce soudée, du processus de fabrication ou les moyens de soudage. Les écarts identifiés et étudiés sont :

- La forme de la ligne de joint (soudure circulaire).
- L'orientation de l'outil, la variation de la vitesse d'avance et de l'effort de forge ainsi que la nature de l'enclume.
- Les jeux de soudage, la différence d'épaisseur et d'état métallurgique initial des pièces à souder.

L'étude de l'influence de la courbure de la trajectoire a montré dans un premier temps le rôle majeur à jouer par les conditions thermiques de la soudure. L'influence majeure de la forme de la trajectoire n'est ainsi pas directe. Lors des soudures fermées, par exemple, l'échauffement progressif des pièces à souder est à l'origine d'une dérive continue des efforts d'avance et transverse.

Lors de la soudure de trajectoire courbe, la position du côté avance et retrait de la soudure par rapport à la courbure a une influence sur l'amplitude l'effort transverse et dans une moindre mesure sur l'effort d'avance. Il semblerait donc que le sens de rotation de l'outil par rapport au sens de parcours de la courbure soit un facteur non négligeable agissant sur l'amplitude des efforts.

L'étude sur l'influence d'une variation au cours de la soudure de l'orientation de l'outil, de l'effort d'avance et de l'effort de forge a montré une réponse en deux temps : une réponse instantanée (court terme) et à long terme. À court terme, l'outil réagit aux nouvelles conditions opératoires dans un matériau dont la température et l'état métallurgique sont issus des conditions opératoires initiales. La température de soudage est le résultat d'un processus à long terme. La réponse en température à une variation rapide des conditions opératoire ne peut se faire que progressivement. À long terme, les nouvelles conditions opératoires vont conduire à l'établissement progressif de nouvelles conditions thermomécaniques de soudage. La soudure va atteindre un nouveau régime établi. Les efforts de soudage vont évoluer de façon rapide en début de

perturbation pour ensuite dériver jusqu'à leur nouvelle valeur en régime établi correspondant aux nouvelles conditions de soudage.

L'étude de l'influence de l'apparition d'un jeu d'accostage lors de la soudure a mis en évidence un comportement relativement similaire à celui d'une variation rapide des conditions de soudage. L'outil plonge rapidement dès l'apparition du jeu pour combler le manque de matière et dérive ensuite lentement vers une valeur de la pénétration stable. La remontée de l'outil lors de la disparition du jeu ne présente pas le même type de comportement. L'outil remonte beaucoup plus lentement, la pénétration excessive se traduisant par la formation de bavures. Les efforts d'avance et transverse sont influencés par l'évolution de la pénétration de l'outil.

Lorsque l'outil franchit une zone avec une dénivellation, les comportements diffèrent en fonction de la position de la dénivellation. On constate effectivement une vitesse d'évolution de la pénétration de l'outil et de l'évolution des efforts de soudage en fonction que la dénivellation est du côté avance ou du côté retrait. La perturbation des flux de matière liés à la présence de cette dénivellation sont probablement à l'origine des effets constatés sur les efforts de soudage.

Les essais effectués pour évaluer l'influence de la nature de l'enclume sur la qualité des soudures et les efforts de forge ont montré le rôle prépondérant joué par les aspects thermiques du soudage. A l'instar des essais de soudage circulaire, il est apparu que les conditions thermiques de soudage ont une influence primordiale sur la pénétration de l'outil et sur la valeur des efforts de soudage. La nature de l'enclume peut amener à modifier totalement la position du domaine de soudabilité opératoire. Ces constatations amènent aussi à pouvoir considérer la nature de l'enclume comme un paramètre d'optimisation de la soudure. Le choix d'une enclume en cuivre permettant, par exemple, d'éviter d'être en conditions de soudage trop « chaudes » dans les zones de soudage à fort échauffement (soudure circulaire, soudure en bord de pièce…).

Au cours des essais, et notamment, au cours de la réalisation des essais de références avant chaque campagne, il a été noté des dispersions parfois significatives de la valeur des efforts de soudage. Il est apparu que le niveau d'usure de l'outil et probablement l'impact qu'a celui-ci avec l'écoulement de la matière joue un rôle très important sur la valeur des efforts. Ce facteur va avoir une influence progressive sous forme d'une dérive des efforts. L'influence de l'usure de l'outil sur les efforts et la qualité des soudures devra faire l'objet d'études ultérieures.

Le travail présenté dans ce livrable montre l'influence souvent prépondérante de paramètres écart entre la configuration d'essai sur coupon et les soudures réelles. L'extrapolation des résultats des campagnes d'essais de caractérisation des efforts de soudage sur coupon à des cas industriels réels peut donc s'avérer délicate. L'extension des modèles statistiques du type de ceux développés dans le livrable 2.1 aux paramètres écarts nécessiterait des campagnes expérimentales très lourdes industriellement non envisageables. Les outils de simulation du procédé FSW ne permettent pas aujourd'hui d'apporter de solutions pour alléger ces campagnes expérimentales de caractérisation. Il n'est donc pas possible en l'état de nos connaissances sur le procédé de développer un modèle prédisant les efforts de soudage et exploitable par la commande du robot. Ceci est constat déterminant pour le choix du type de stratégie de commande du robot.

# Références

[ARB08] W. Arbegast, Modeling friction stir joining as a metal working process, hot deformation of aluminum alloys III, TMS, San Diego, pp 313-327,2003.

[BAL09] N. Balasubramanian, B. Gattu, R. S. Mishra, 2009, Process forces during friction stir welding of aluminium alloys, Science and Technology of Welding and Joining 2009, VOL 14-NO 2 p.: 141 – 145.

[FEH10] A. Fehrenbacher, N. A. Duffie, N.J. Ferrier, M. R. Zinn, F. E. Pfefferkorn, Temperature measurement and closed-loop control in friction stir welding, 2010, 8th International Friction Stir Welding Symposium, Germany.

[JEN08] T. Jene, G. Dobmann, G. Wagner, D. Eifler, 2008, MonStir – Monitoring of the Friction Stir Welding Process, 7th FSW Symposium, Japan.

[SHE05] S. Sheikhi, Herstellung und Bewertung der Umformbarkeit von reibrührgeschweissten Tailored Blanks aus Aluminiumlegierungen, 2005, Thèse de doctorat de l'Université de Duisburg-Essen.

[ZIM09] S. Zimmer, Contribution à l'Industrialisation du procédé FSW, 2009, Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers, France.

# Annexes

# Annexe 1 : Machine MTS I-STIR 10

**Machine MTS**

- Constructeur : MTS
- Modèle : I-STIR10

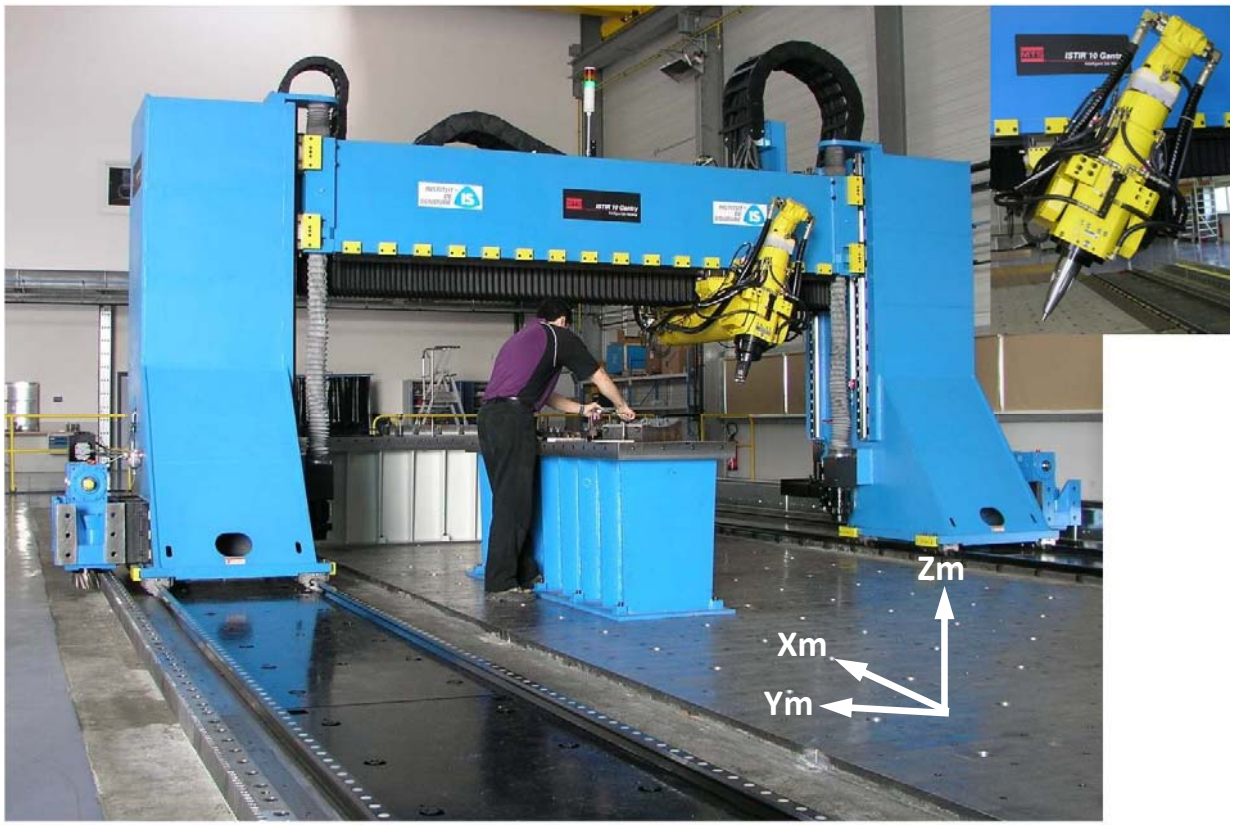


**Figure 62 : Machine MTS et tête de soudage FSW**

- Courses maximales :
  - Axe X : 19000mm
  - Axe Y : 3000mm
  - Axe Z : 1200mm
  - Roll : ±13° (rotation autour de l'axe Y)
  - Pitch : ± 33° (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

# Annexe 2 : Outil FSW utilisé

**Figure 63 : Photo de l'outil FSW utilisé (COR-12-6).**