HAL
open science

Contribution a l'industrialisation du soudage par friction malaxage

Sandra Zimmer

To cite this version:

Sandra Zimmer. Contribution a l'industrialisation du soudage par friction malaxage. Sciences de l'ingénieur [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2009. Français. NNT : 2009ENAM0035 . pastel-00005619

HAL Id: pastel-00005619

https://pastel.hal.science/pastel-00005619

Submitted on 2 Apr 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N°: 2009-ENAM-0035

Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

T H È S E

pour obtenir le grade de

Docteur

de

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité "Mécanique"

présentée et soutenue publiquement

par

Sandra ZIMMER

le 8 décembre 2009

CONTRIBUTION A L'INDUSTRIALISATION DU SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE

Directeur de thèse : ***Régis BIGOT***

Co-encadrements de la thèse : ***Laurent LANGLOIS***

Jury :

M. Daniel DUDZINSKI, Professeur, LPMM, Université Nancy Henri Poincarré ..... Examinateur
M. Lionel FOURMENT, Chargé de Recherche, CEMEF, MINES ParisTech, Sophia Antipolis... Examinateur
M. Julien LAYE, Ingénieur, Institut de Soudure ..... Invité
M. Henri PARIS, Professeur, Laboratoire G-SCOP, Université Joseph Fourier de Grenoble ..... Rapporteur
M. Guillaume RACINEUX, Professeur, GEM, Ecole Centrale de Nantes ..... Rapporteur
M. Roland TAILLARD, Professeur, LMPGM, Université des sciences et technologies de Lille .. Président
M. Régis BIGOT, Professeur, LCFC, Arts et Métiers ParisTech, Metz ..... Examinateur
M. Laurent LANGLOIS, Maître de Conférences, LCFC, Arts et Métiers ParisTech, Metz ..... Examinateur

Laboratoire de Conception Fabrication Commande
Arts et Métiers ParisTech, centre de Metz

Arts et Métiers ParisTech (Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers) est un Grand Etablissement dépendant du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, composé de huit centres :
AIX-EN-PROVENCE ANGERS BORDEAUX CHÂLONS-EN-CHAMPAGNE CLUNY LILLE METZ PARIS

A ma Mère,

Remerciements

Je voudrais remercier de nombreuses personnes sans qui cette thèse n'aurait pas pu aboutir. Leur soutien, quel qu'en soit la nature, m'a beaucoup aidée tout au long de ces trois années. Ces personnes se reconnaîtront et c'est pourquoi je souhaite leur dire tout simplement MERCI.

J'adresse mes remerciements à MM. Paris et Racineux pour avoir accepté de rapporter ce mémoire. La rigueur et l'application avec lesquelles ils ont examiné ce manuscrit montrent le grand intérêt qu'ils ont porté à mes travaux. Merci pour leur investissement important qui transparaît dans la qualité de leurs rapports. Je souhaite également remercier MM. Dudzinski, Taillard et Fourment qui ont accepté de faire parti de mon jury de thèse. Merci à tous pour leurs discussions qui m'ouvrent de nouvelles pistes de recherche afin d'améliorer mes travaux.

Je remercie particulièrement Laurent Langlois qui m'a fait confiance le jour où il m'a proposé ce sujet de thèse. Son encadrement, sa disponibilité et les nombreuses discussions scientifiques que nous avons eues au cours de ces trois années m'ont permis de progresser dans mes travaux de recherche. Ce travail et ce mémoire n'auraient pu aboutir sans son aide. Je le remercie également pour sa patience lors des corrections de mes nombreuses fautes d'orthographe ! J'adresse également mes remerciements envers Régis Bigot et Patrick Martin pour leur présence, leur soutien et leurs points de vue constructifs sur mes travaux de thèse.

Ce travail a été réalisé au sein de l'établissement Arts et Métiers ParisTech, centre de Metz, dans le Laboratoire de Conception Fabrication Commande (LCFC). Je tiens à remercier l'ensemble des membres du personnel de l'établissement pour m'avoir offert un cadre et une atmosphère de travail agréable. Je souhaite remercier en particulier les techniciens de forge et de soudage, principalement Sylvio De Paolis qui a effectué les découpes et le polissage de mes éprouvettes. Cela m'a fait gagner un temps très précieux. Je garderai également en mémoire les nombreuses heures de Travaux Pratiques de soudage prodiguées ensemble.

Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec l'Institut de Soudure. C'est pourquoi, je remercie vivement Julien Laye, Jean-Claude Goussain et Daniel Strina pour leur soutien et les nombreuses discussions scientifiques au cours de ces trois années. Ils ont su me faire partager leurs connaissances métiers pour faire progresser mes connaissances et compétences. Je me souviendrai des nombreuses heures passées au pied de la machine, lors des essais, avec Daniel. Merci à lui pour sa patience.

Je remercie l'ensemble des financeurs du projet FSLor, projet dans lequel cette thèse s'inscrit. Elle a été financée par l'Institut de Soudure, la Région Lorraine, le conseil général de la Moselle et la Préfecture de la Moselle.

Pour terminer, merci à ma famille, qui s'est intéressée à mes études et à mes travaux de thèse. Merci également à mes parents, qui m'ont toujours soutenue tout au long de ma scolarité. Sans eux, je n'aurais probablement pas pu arriver à ce niveau d'étude. Enfin, merci à ma tendre moitié, François, qui m'a soutenu pendant cette dernière année de thèse et en particulier pendant la rédaction du mémoire. Tu as su être compréhensif pendant les nombreuses heures de rédaction et de travail pendant les week-ends et lors de la préparation de la soutenance. De plus, bien que nos domaines d'activité soient différents, tu as su montrer de l'intérêt pour mes travaux et je t'en remercie.

Table des Matières

REMERCIEMENTS **5**

TABLE DES MATIERES **7**

INDEX DES NOTATIONS 11
INTRODUCTION GENERALE 17

CHAPITRE 1 : CONTEXTE DE L'ETUDE ET POSITIONNEMENT **19**

1. INTRODUCTION 21
2. LE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE, DESCRIPTION DU PROCEDE 22
2.1. Principe général du procédé *22*
2.1.1. Les paramètres de soudage 25
2.1.2. Côté avance et côté retrait 26
2.1.3. Les configurations de soudage offertes 27
2.2. Les outils utilisés *28*
2.2.1. Généralité 28
2.2.2. Les technologies d'outil 29
2.2.3. Le matériau de l'outil 30
2.3. La formation du cordon de soudure *30*
2.3.1. Les cordons de soudure obtenus 32
2.4. Les propriétés des joints soudés *33*
2.4.1. Alliages à durcissement structural 33
2.4.2. Les alliages à durcissement par écrouissage 34
2.4.3. Coefficient d'efficacité du joint soudé FSW 34
2.5. Industrialisation du procédé FSW et positionnement *35*
3. DEFAUTS ET DOMAINES DE SOUDABILITE OPERATOIRE 38
3.1. Les défauts générés par le malaxage *39*
3.1.1. Les défauts liés au flux de matière 39
3.1.2. Les défauts dits « géométriques » 42
3.1.3. Autres défauts 45
3.2. Relation entre défauts et paramètres opératoires *45*
3.3. Contrôle de soudure FSW *46*
4. EFFORTS EN SOUDAGE FSW 48
4.1. Etude de l'interaction Outil / Matière *48*
4.2. Les efforts en phase de plongée *49*
4.2.1. Présentation générale 49
4.2.2. Les efforts et les couples mis en jeu 50
4.3. Les efforts en phase de soudage *52*
4.3.1. Compréhension des phénomènes mis en jeu 53
4.3.2. Détection des défauts à l'aide de l'analyse des efforts 57
4.3.3. Influence des paramètres opératoires sur les efforts et le couple de soudage 59
4.4. Conséquences des efforts générés *63*
5. MACHINES DE SOUDAGE FSW 64
5.1. Les fraiseuses modifiées *64*
5.2. Les machines FSW dédiées *65*
5.3. Les robots à architecture parallèle (Tricepts) *66*
5.4. Les robots polyarticulés *67*
5.4.1. Présentation générale 67
5.5. Comparaison de la qualité des soudures obtenues avec divers moyen de production *69*

5.6. Bilan des moyens de production *71*
6. CONCLUSION 71

CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE POUR QUALIFIER UN MOYEN DE PRODUCTION..... 75

1. INTRODUCTION 77
2. EXTRAIRE LES PARAMETRES CARACTERISTIQUES 83
2.1. Analyse des interactions Outil / Pièces *84*
2.1.1. Définition du repère outil utilisé 85
2.1.2. Définition de la géométrie des pièces soudées 86
2.1.3. Définition de la trajectoire de l'outil 89
2.2. Analyse des interactions Outil / Matière *92*
2.2.1. Définir la cinématique de l'outil 94
2.2.2. Définir les actions mécaniques appliquées sur l'outil 94
3. ANALYSE DE L'OPERATION DE SOUDAGE FSW 95
3.1. Présentation des installations expérimentales utilisées *95*
3.1.1. Présentation de la machine utilisée 95
3.1.2. Mesure de la cinématique de l'outil 96
3.1.3. La mesure des efforts et des couples 97
3.1.4. Convention des efforts mesurés 98
3.2. Identification des phases opératoires en soudage *99*
3.3. Analyse détaillées de l'opération de soudage *103*
3.3.1. La phase de plongée 103
3.3.2. Phase de temps de maintien 105
3.3.3. La phase de soudage 106
3.3.4. Généralisation des résultats 115
4. IDENTIFICATION DES PHASES CARACTERISTIQUES POUR LE DIMENSIONNEMENT 117
4.1. Etude de l'effort F_z appliqué *118*
4.2. Etude du couple C_z sur l'ensemble de la phase de soudage *119*
4.3. Etude des efforts F_x et F_y sur l'ensemble de la phase de soudage *120*
4.4. Etude des efforts F_x et F_y avec l'effort F_z sur l'ensemble de la phase de soudage *122*
4.5. Etude de la puissance consommée *122*
5. CONCLUSION 123

CHAPITRE 3 : ETUDE DES ACTIONS MECANIQUES APPLIQUEES SUR L'OUTIL 125

1. INTRODUCTION 127
2. MISE EN PLACE DES PLAGES DE FONCTIONNEMENT 128
2.1. Méthodologie *128*
2.2. Procédure expérimentale mise en place *131*
2.2.1. Présentation de l'alliage utilisé 131
2.2.2. Outil et machine utilisés 132
2.2.3. Phase de plongée 132
2.2.4. Phase de soudage 136
3. ANALYSE DE LA PHASE DE PLONGEE 146
3.1. Analyse des courbes du couple C_z et de l'effort F_z *146*
3.2. Détermination de l'énergie dissipée en phase de plongée *148*
3.3. Etude de l'influence des paramètres opératoires *149*
3.3.1. Influence sur l'évolution de C_z et de F_z 149
3.3.2. Etude de l'influence des paramètres opératoires sur les grandeurs de sortie 152
3.3.3. Evolution des actions mécaniques à paramètres opératoires identiques 156
3.4. Influence de la profondeur de plongée sur $F_{z\,max}$ et $C_{z\,max}$ *158*

3.5. Diagramme d'effort et de couple en fonction des paramètres opératoires ... 160
4. ANALYSE DE LA PHASE DE SOUDAGE ... 161
4.1. Détermination du domaine expérimental étudié ... 162
4.2. Analyse de la génération des défauts en fonction des paramètres opératoires ... 162
4.2.1. Présentation des défauts rencontrés ... 162
4.2.2. Localisation des défauts ... 167
4.2.3. Analyse des défauts au sein de la plage de fonctionnement ... 170
4.2.4. Comparaison entre les essais pleines tôles et bout à bout ... 172
4.2.5. Identification du défaut de pénétration partielle ... 173
4.3. Etude de l'influence des paramètres opératoires sur les actions mécaniques appliquées sur l'outil 175
4.3.1. Analyse de l'évolution de F_x, F_y et C_z en fonction de F_z pour N et v_a constants ... 175
4.3.2. L'étude de l'évolution de F_x, F_y et C_z en fonction N et de v_a variant de manière indépendante pour un effort F_z constant ... 178
4.3.3. Etude de l'évolution de F_x, F_y, C_z et E_n en fonction de N, v_a et F_z ... 182
4.3.4. Etude dynamique des efforts ... 184
4.3.5. Analyse de la répétabilité des intensités du couple et des efforts mesurés ... 185
4.3.6. Comparaison des efforts et couples mesurés lors des essais en pleine tôle et bout à bout ... 187
4.4. Domaine de soudabilité opératoire et plages d'efforts ... 189
4.5. Transition entre ces deux phases opératoires ... 190
4.6. Choisir son point de fonctionnement ... 192
5. CONCLUSION ... 193

CHAPITRE 4 : QUALIFIER UN MOYEN DE PRODUCTION FSW ... 195

1. INTRODUCTION ... 197
2. VALIDER LE MOYEN DE PRODUCTION CHOISI ... 201
2.1. Présentation du système ... 201
2.1.1. Le moyen de production ... 202
2.1.2. Description de l'espace tâche à réalisée ... 204
2.1.3. Modélisation de l'ensemble du système ... 205
2.2. Modélisation du moyen de production ... 207
2.2.1. Modélisation de l'espace tâche ... 210
2.2.2. Détermination de la trajectoire de l'outil ... 213
2.3. Valider le moyen de production FSW choisi : un robot polyarticulé six axes ... 213
2.3.1. Calculer et vérifier si la trajectoire peut être suivie ... 214
2.3.2. Calculer des actions mécaniques appliquées par chaque actionneur ... 214
2.3.3. Comparer les actions mécaniques calculer avec celles admissibles ... 215
2.3.4. Qualifier le moyen de production ... 215
3. APPLICATIONS ... 216
3.1. Détermination d'une relation entre C_z, F_x et F_y et les paramètres de conduite ... 216
3.1.1. La phase de plongée ... 217
3.1.2. La phase de soudage à vitesses constantes ... 221
3.2. Deux configurations de soudage ... 225
3.2.1. Soudage par points ... 225
3.2.2. Soudage linéaire 300 mm ... 230
4. LES DEFAUTS RENCONTRES LORS DE L'UTILISATION D'UN MOYEN POLYARTICULE ... 237

CONCLUSIONS ... 239

PERSPECTIVES ... 243

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ... 246

Index des notations

Convention utilisée :

$\underline{a}$ ou $\vec{a}$		Vecteur a
$\underline{F}$ ou $\vec{F}$	[kN]	Vecteur relatif à l'effort appliqué sur l'outil

Définition de la ligne de joint :

$\mathcal{L}$		Ligne de joint
M_i		Point « mobile » d'abscisse curviligne s_i appartenant à $\mathcal{L}$.

Définition des repères :

R_O (O, $\underline{x}$, $\underline{y}$, $\underline{z}$)		Repère orthonormé direct lié à l'outil
R_P (P, $\underline{x}_p$, $\underline{y}_p$, $\underline{z}_p$)		Repère orthonormé direct lié à la pièce
R_{Mi} (M_i, $\underline{x}_{Mi}$, $\underline{y}_{Mi}$, $\underline{z}_{Mi}$)		Repère orthonormé direct lié à la ligne de joint $\mathcal{L}$ associé au point M_i d'abscisse curviligne s_i

Paramètres de conduites

v_a	[mm/min]	Vitesse de soudage de l'outil suivant l'axe (O, $\underline{x}_{Mi}$)
v_p	[mm/min]	Vitesse de plongée de l'outil suivant l'axe (O, $\underline{z}$)
v_r	[mm/min]	Vitesse de retrait du pion suivant (O, $\underline{z}$)
$a_{z\ retrait}$	[mm/ s²]	Accélération de l'outil lors du retrait du pion suivant (O, $\underline{z}$)
a_p	[mm/ s²]	Accélération de l'outil en phase de plongée suivant l'axe (O, $\underline{z}$)
a_s	[mm/ s²]	Accélération de l'outil suivant l'axe (O, $\underline{x}_{Mi}$)
d_p	[mm/s²]	Décélération de l'outil suivant l'axe (O, $\underline{z}$)
$d_{parcourue}$	[mm]	La distance parcourue par l'outil suivant l'axe (O, $\underline{z}$) pendant l'accélération et la décélération de la phase de plongée
N	[tr/min]	Fréquence de rotation de l'outil pendant le soudage
ω	[rad/s]	Vitesse de rotation de l'outil en phase de soudage
N_p	[tr/min]	Fréquence de rotation de l'outil lors de la plongée
ω_p	[rad/s]	Vitesse de rotation de l'outil en phase de plongée
d_a	[mm/min-s]	Décélération de l'outil à la fin de la soudure
d_{force}	[kN/min-s]	Taux de diminution de l'effort F_z

F_z	[kN]	Effort de consigne appliqué suivant (O, $\underline{z}$). Il sera dénommé effort axial
a_{force}	[kN/min-s]	Taux d'accroissement de l'effort lors de l'application de F_z,
$F_{z\ seuil}$	[kN]	Effort seuil, effort maximal à ne pas dépasser. Cette consigne est une protection des systèmes de la machine
F_R	[kN]	Effort résultant dans le plan (O, X, Y). Cet effort est donné par l'expression : $\underline{F}_R = \underline{F}_x + \underline{F}_y$
$\underline{F}_{Outil/Matière}$		Effort appliqué par l'outil sur la matières pendant le soudage
$\underline{F}_{Matière/Outil}$		Effort appliqué par la matière sur l'outil pendant le soudage
$\delta(t)$	[mm]	Evolution de la position verticale de l'outil en fonction du temps au cours du soudage
$\underline{\delta}_{outil}$	[mm/s²]	Accélération verticale de l'outil
i	[°]	Angle de déplacement ou « tilt angle », inclinaison de l'outil suivant (O, $\underline{y}_{Mi}$)
v_{force}	[kN/min]	Vitesse d'application de l'effort F_z,
v_{force_d}	[kN/min]	Vitesse de réduction de l'effort
$\frac{d\varpi}{dt}$	[rad/s²]	Décélération de la broche
ω_p	[rad/s]	Vitesse de rotation de l'outil en phase de plongée
ω	[rad/s]	Vitesse de rotation de l'outil en phase de soudage
Δ_z	[mm]	Profondeur de plongée de l'outil à atteindre en fin de plongée
$\Delta_{z\ retrait}$	[mm]	Hauteur de dégagement de l'outil
Δt	[s]	Temps de préchauffage en début de soudure ou « dwell time »
$L_{soudée}$	[mm]	Distance de soudage à parcourir par l'outil

$\vartheta(\underline{x}, \underline{y})$	Plan perpendiculaire à l'axe de rotation de l'outil (O, $\underline{z}$) et tangent à la surface de l'épaulement.

Définition d'un point de fonctionnement connu et appartenant au domaine de soudabilité pour une configuration donnée :

$F_{z_réf}$	[kN]	Force verticale du point de fonctionnement initial (de référence)
$v_{a_réf}$	[mm/min]	Vitesse d'avance du point de fonctionnement initial (de référence)
$N_{réf}$	[tr/min]	Fréquence de rotation du point de fonctionnement initial (de référence)

Valeurs frontières du domaine de soudabilité utilisées pour définir l'étude paramétrique :

$F_{z\ lim\ sup}$	[kN]	Effort vertical maximal délimitant la borne supérieure de la DSO
$F_{z\ lim\ inf}$	[kN]	Effort vertical minimal délimitant la borne inférieure de la DSO
$v_{a\ lim\ sup}$	[mm/min]	Vitesse d'avance maximale délimitant la borne supérieure de la DSO
$v_{a\ lim\ inf}$	[mm/min]	Vitesse d'avance minimale délimitant la borne inférieure de la DSO
$N_{lim\ sup}$	[tr/min]	Fréquence de rotation minimale délimitant la borne supérieure de la DSO
$N_{lim\ inf}$	[tr/min]	Fréquence de rotation minimale délimitant la borne inférieure de la DSO
d	[à définir]	incrément de la variable fixé avant l'expérimentation
e	[à définir]	Nouvel incrément

Paramètres relatifs à la tête de soudage

L_{Pitch}	[mm]	Longueur entre l'axe de l'outil et le capteur mesurant le couple suivant (O, $\underline{x}$)
L_{Roll}	[mm]	Longueur entre l'axe de l'outil et le capteur mesurant le couple suivant (O, $\underline{y}$)
C_P	[Nm]	Couple suivant (O, $\underline{x}$) mesuré sur la tête de la machine MTS
C_R	[Nm]	Couple suivant (O, $\underline{y}$) mesuré sur la tête de la machine MTS
$L_{Tête}$	[m]	Distance entre l'axe de rotation de la tête de soudage et l'origine outil

Puissance et énergie nominale :

P	[W]	Puissance consommée à la broche
E_n	[J/mm]	Energie Nominale de soudage
$E_{dissipée}$	[J]	Energie dissipée au cours de la phase de plongée.
R	[tr/mm]	Rapport des vitesses. R est défini ainsi :

$$R = \frac{N\ [\text{tr/min}]}{v_a\ [\text{mm/min}]} \quad [\text{tr/mm}] \qquad (1)$$

ép.	[mm]	Epaisseur soudée
L_P	[mm]	Longueur du pion

Robot Polyarticulé :

S_j		Solide S_j composant le robot polyarticulé
$C_{j-1\ j\ admissble}$	[Nm]	Couple admissible sur le moteur de l'articulation entre les solides S_{j-1} et S_j
$C_{j-1\ j}$	[Nm]	Couple sur le moteur de l'articulation entre les solides S_{j-1} et S_j
O_j		Origine du repère lié solide S_j
$\theta_{j-1\ j}$	[°]	Mobilité angulaire entre les solides S_{j-1} et S_j. Les plages valeurs
$\underline{d}_{j-1\ j}$		Le vecteur directeur de l'axe du pivot entre S_{j-1} et S_j.

$F_{z\ max\ broche}$	[kN]	Effort maximal admissible à la broche
$C_{z\ max\ broche}$	[Nm]	Couple maximal admissible à la broche

$M_{R_O}^{R_0}$ La matrice de passage du repère R_0 au repère R_O. C'est une fonction des angles (θ_{01}, θ_{12}, θ_{23}, θ_{34}, θ_{45}, θ_{56}).

$m_{Tête\ de\ soudage}$	[kg]	Masse de la tête de soudage
m_j	[kg]	Masse du solide j
$G_{tête}$		Centre de masse de la broche
G_j		Centre de masse du solide j

Abréviations:

FSW	Friction Stir Welding
DSO	Domaine de Soudabilité Opératoire
DMOS	Description et qualification des Modes Opératoires de Soudage
Soudure OK	Soudure respectant le critère de compacité fixée, c.à.d. sans défaut tunnel interne, sans rainure en surface
Soudure NOK	Soudure ne respectant pas le critère de compacité fixée.
TWI	The Welding Institut
ZATM	Zones affectées thermomécaniquement.
ZAT	Zones affectées thermiquement

Introduction générale

Les travaux de cette thèse sont le fruit d'une collaboration entre le LCFC (Laboratoire de Conception Fabrication Commande) et l'Institut de Soudure, dans le cadre du projet FSLor. Celui-ci contient deux volets, un premier sur la simulation numérique du FSW et le second (objet de cette thèse) sur la robotisation du procédé.

Le principe du FSW consiste à apporter une énergie d'origine mécanique par l'action d'un outil à l'interface entre les pièces à souder. La liaison se crée de proche en proche à l'état solide. L'intérêt est d'éviter certains problèmes métallurgiques rencontrés en soudage « classique » par fusion, lors du soudage des aluminiums par exemple, comme la fissuration à chaud ou la formation de soufflures. C'est pour ces raisons que le procédé FSW a été mis en œuvre, en premier lieu, dans les industries du transport, qui ont recours à l'aluminium pour alléger les structures mécaniques. Cependant, il existe encore des freins à l'implantation du FSW dans l'industrie [ARB07a] : non-standardisation des règles de conception des pièces soudées, des outils, des machines, le manque de connaissances en termes de paramètres opératoires et coût d'investissement élevé. L'utilisation d'un moyen de production standard, adapté aux exigences de fonctionnement du FSW et permettant le soudage de formes complexes, pourrait vaincre ces freins à l'investissement [SMI00]. La piste privilégiée est celle des robots polyarticulés de forte charge [SMI00, STR00, VOE07].

Afin d'encourager l'utilisation de ce procédé dans l'industrie, il est nécessaire de mettre en place une méthodologie pour qualifier les moyens de production, appliquée au soudage FSW. Ces travaux de thèse s'inscrivent dans une démarche de contribution à l'industrialisation du procédé de soudage FSW. La thématique de recherche se centre sur le niveau du choix des ressources et des conditions de mise en œuvre. La démarche proposée a pour objectifs l'identification de critères de performances permettant le choix du moyen de production le plus adéquat au FSW et la détermination des paramètres opératoires optimaux. L'originalité de cette démarche est d'associer au Domaine de Soudabilité Opératoire (DSO) les actions mécaniques appliquées sur l'outil de soudage et les limites technologiques du moyen de production. Au final, une zone restreinte du domaine de soudabilité, compatible avec le cahier des charges du produit et les capacités des moyens de production, sera identifiée.

Dans ce mémoire de thèse, le **chapitre 1** introduit d'une manière générale le procédé de soudage FSW. L'étude bibliographique s'est ensuite focalisée sur la définition d'un DSO en y associant les actions mécaniques générées sur l'outil. Pour terminer, elle présente un état des lieux des machines utilisées pour réaliser le soudage FSW.

La démarche de qualification d'un moyen de production adapté au soudage par friction malaxage fait l'objet du **chapitre 2**. L'analyse de la phase de soudage permet d'identifier et de quantifier les paramètres opératoires caractéristiques pour réaliser, de façon optimale, une

soudure FSW. L’étude des actions mécaniques en présence met en exergue les phases critiques pour le dimensionnement d’une machine adaptée au FSW.

Au chapitre 3, pour une application donnée, les plages de fonctionnement ont été déterminées ainsi que les actions mécaniques outil / matière associées. Ce travail expérimental a permis d’obtenir l’influence des paramètres de conduite sur les actions mécaniques générées. Elle aboutit à l’identification de plages de fonctionnement optimales en termes d’actions mécaniques et de qualité de soudure.

Les résultats obtenus précédemment sont utilisés, au **chapitre 4**, pour dimensionner un moyen de production largement présent dans l’industrie, à savoir un robot polyarticulé. Les critères technologiques du robot ont été ajoutés aux plages de fonctionnement définies afin d’en qualifier les limites. Les défauts de soudage susceptibles d’apparaître suite à la déformation de la structure mécanique du robot sous charge sont présentés et la qualité de la soudure est analysée.

CHAPITRE 1 : CONTEXTE DE L'ETUDE ET POSITIONNEMENT

Ce premier chapitre présente le procédé de soudage FSW afin d'en cerner les contraintes et les avantages. L'objectif est d'identifier les informations nécessaires pour construire le processus d'industrialisation que nous présenterons aux chapitres 2 et 3. Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés tout particulièrement aux défauts de soudage et aux actions mécaniques outil / matière. Les données ainsi recueillies vont permettre de caractériser l'application FSW et son moyen de production. C'est pourquoi, nous présenterons également les machines actuellement disponibles dans l'industrie.

Sommaire

1. INTRODUCTION 21

2. LE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE, DESCRIPTION DU PROCEDE 22

3. DEFAUTS ET DOMAINES DE SOUDABILITE OPERATOIRE 35

4. EFFORTS EN SOUDAGE FSW 48

5. MACHINES DE SOUDAGE FSW 64

6. CONCLUSION 71

1. Introduction

D'après le dictionnaire Larousse, le soudage est défini, comme étant une « opération consistant à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base. » [LAR**].

Les premières pièces soudées sont apparues vers 3000 av JC avec le travail des métaux. Des pièces en bronze sont alors soudées à la poche, puis des pièces en fer sont soudées à la forge. Il faudra attendre la fin du 19ème siècle pour voir l'apparition des procédés de soudage oxyacétylénique, aluminothermique, à l'arc électrique et le soudage par résistance [OTU**]. La mise au point de ces technologies a donné une alternative à l'assemblage mécanique tel que le rivetage et a permis d'assurer un gain de temps de production. Les procédés de soudage sont aujourd'hui prépondérants en matière d'assemblage et ont une incidence considérable sur le coût de fabrication et la qualité des produits. De ce fait, tout au long du 20ème siècle, de nouvelles technologies de soudage sont apparues répondant aux besoins industriels. Comme le montre la Figure 1, une grande variété de procédés de soudage a été développée à ce jour. Ainsi, selon l'application il est nécessaire de sélectionner le plus performant en termes de coût et de respect du cahier des charges.

	Date d'apparition	Apparition des procédés	Type de procédé
1880	1886	Soudage par résistance	électrique
	1895	Aluminothermie	chimique
1900	1902	Soudage au chalumeau oxyacétylénique	flamme
	1907	Soudage à l'électrode enrobée	électrique
	1924	Soudage TIG	électrique
	1930	Soudage à arc sous flux submergé	électrique
	1943	Soudage MIG	électrique
1950	1955	Soudage MAG	électrique
	1956	Soudage par faisceaux d'électrons	faisceau à haute énergie
	1956	Soudage par friction rotative	mécanique
	1957	Soudage par explosion	chimique
1960	1965	Soudage Laser	faisceau à haute énergie
1990	1991	Soudage par friction malaxage	mécanique

Liste non exhaustive d'apparition des procédés de soudage

Figure 1: Année d'apparition des principaux procédés de soudage

L'un des derniers procédés mis au point est le soudage par friction-malaxage. Ce procédé, breveté en 1991 par le TWI, est une variante du soudage par friction [WAY91]. Le soudage par friction-malaxage est plus communément appelé Friction Stir Welding, FSW. Contrairement au procédé de soudage par friction « classique », les pièces à assembler n'ont pas de mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Ceci lui offre un plus large choix de configurations de joints soudables. Ce procédé, innovant, permet de souder à l'état « solide »,

c'est-à-dire sans atteindre la température de fusion. Ceci lui permet, en théorie, de souder tous les métaux, même ceux réputés difficilement soudables par fusion à cause de problèmes de fissurations à chaud, de soufflures, ou d'abattement trop important des propriétés mécaniques. Ses caractéristiques offrent à ce procédé de réels potentiels de développements industriels, surtout pour les métaux malléables à chauds et à bas point de fusion tels que l'aluminium ou le cuivre.

2. Le soudage par friction malaxage, description du procédé

2.1. Principe général du procédé

Le principe de ce procédé est de réaliser une soudure de proche en proche en malaxant localement la matière des deux pièces à assembler. La liaison métallurgique est obtenue à chaud, mais en dessous de la température de fusion des matériaux. Comme la plupart de ces procédés (soudage par friction, soudage par explosion…), le FSW a deux avantages essentiels :

- il ne génère pas de soufflure ni de fissure à chaud,
- il permet de réaliser des soudures hétérogènes.

Pour réaliser une opération de soudage par friction-malaxage, les pièces à assembler sont mises en position sans jeu, généralement sur une enclume, et bridées afin d'éviter tout mouvement relatif de celles-ci au cours du soudage. Pour illustrer l'opération de FSW, prenons la configuration la plus simple à savoir le soudage bout à bout de deux tôles, Figure 2-A et B.

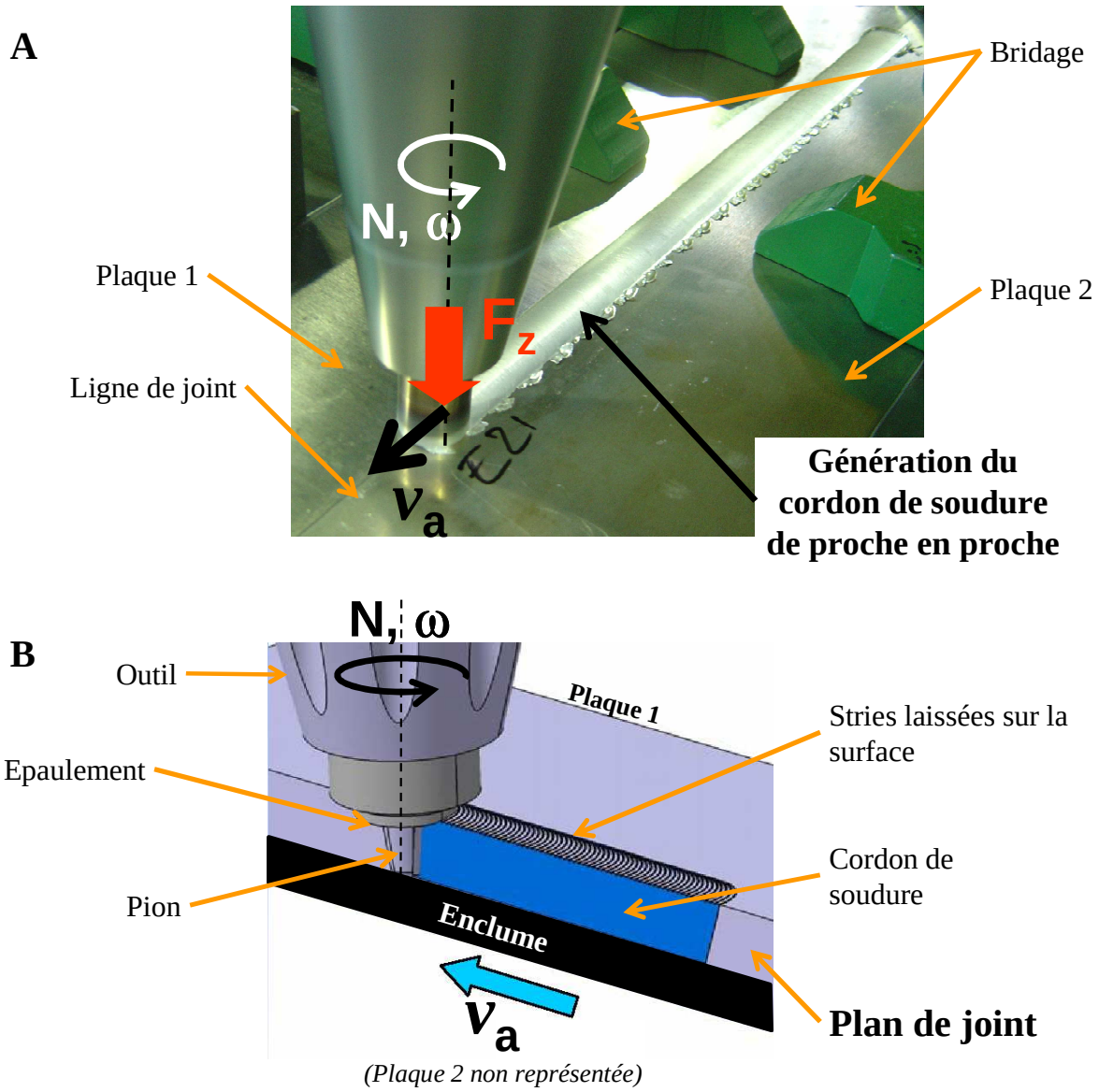


Figure 2: Présentation du soudage par friction malaxage. A-Soudure rectiligne de deux plaques mises bout à bout. B-Visualisation du plan de joint lors de la phase de soudure.

Afin de procéder au soudage, un outil, généralement axisymétrique, composé d'un pion et d'un épaulement est utilisé, comme schématisé sur la Figure 2-B. Il est amené au contact du plan de joint et est mis en rotation. L'échauffement provoqué par le frottement de l'outil sur les pièces entraîne un « ramollissement » de la matière facilitant la pénétration progressive de l'outil dans le plan de joint. Cette phase est communément appelée la *phase de plongée*. Une fois l'épaulement de l'outil en contact avec la surface des pièces à assembler, celui-ci est animé d'un mouvement d'avance. La *phase de soudage* proprement dite débute alors. Le frottement entre l'épaulement et la surface des pièces ainsi que la déformation plastique engendrée par la combinaison du mouvement de rotation et d'avance, entraînent une élévation de température des matériaux à souder autour de l'outil et génère un malaxage de la matière. Ainsi, le matériau passe dans un état plastique (« pâteux ») facilitant le déplacement de l'outil le long du joint à souder. L'ensemble des phénomènes mis en jeu conduit à la formation du cordon de soudure. Une fois l'opération de soudage terminée, l'outil est sorti de la matière.

Cela constitue la dernière phase de soudage, la *phase de retrait* de l'outil. Ces trois principales phases opératoires sont schématisées sur la Figure 3.

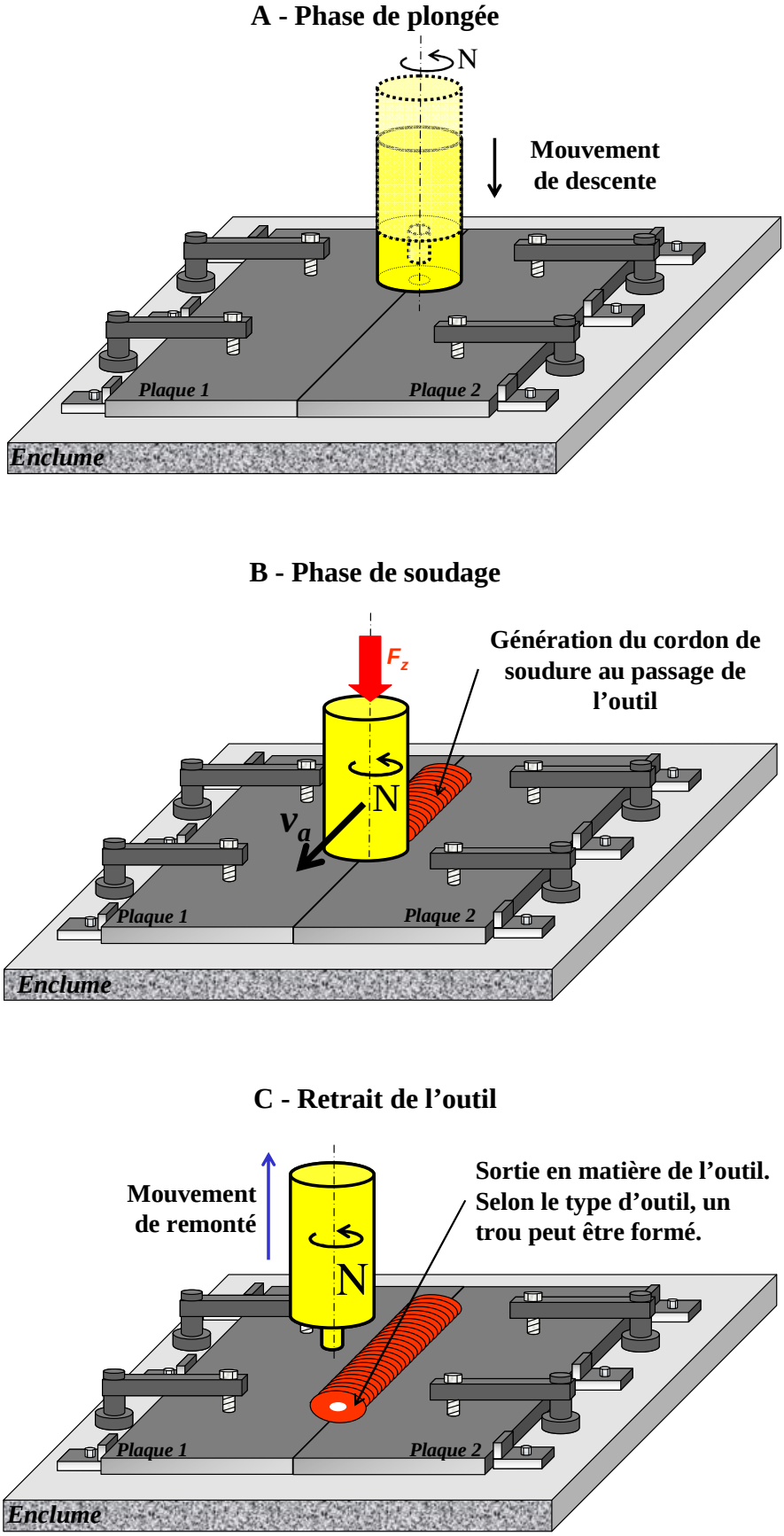


Figure 3: Schématisation des phases opératoires en FSW

2.1.1. Les paramètres de soudage

Les paramètres principaux de conduite de la phase de soudage sont :

- la vitesse d'avance de l'outil ou vitesse d'avance v_a,
- l'effort axial F_z appliqué sur l'outil suivant son axe de rotation, afin de compenser la pression formée dans la zone de soudure [COO03],
- la fréquence de rotation N,
- l'angle d'inclinaison de l'outil dénommé angle de déplacement *i*.

Ces paramètres sont à régler selon les matériaux, l'épaisseur soudée et la géométrie de l'outil. L'ensemble conditionne l'apport d'énergie, le flux de matière, la formation du cordon, les propriétés mécaniques de l'assemblage et les efforts générés [MIS05]. Le choix de ces paramètres est donc primordial.

Il peut être noté que l'application d'un effort axial, F_z, suivant l'axe de l'outil a pour but :

- de maintenir l'épaulement en contact avec la surface des pièces afin :
  - d'assurer un apport de chaleur par frottement [MIS07a],
  - de contenir le matériau malaxé sous l'outil et d'assurer ainsi la compacité du joint [BAL09],
- d'assurer la profondeur de pénétration de l'outil [MIS07a].

Aujourd'hui deux modes de pilotage existent pour remplir ces fonctions :

- le *contrôle de l'outil en position*. La position relative de l'outil par rapport à la surface des pièces est définie par une valeur maintenue constante. Ainsi, l'outil suit simplement des coordonnées préprogrammées [HAY06] (Figure 4-C). D'après Haynie et al. [HAY06], ce mode de contrôle ne permet pas de compenser les défauts de tolérance de fabrication, d'alignement et de mise en position des pièces soudées. Ceci est schématisé sur la Figure 4-C. Non compensés, ils peuvent générer des défauts au sein du cordon, tels que le manque de pénétration en racine. Ainsi, selon Smith [SMI07], lors du soudage bout à bout de deux tôles, il est possible de choisir ce mode de pilotage lorsqu'il y a peu de variation de l'épaisseur de soudage et des jeux entre les deux pièces.
- le *contrôle de l'outil en effort*. Dans ce dernier cas, la position de l'outil résulte de l'équilibre entre l'effort axial F_z appliqué par la machine et la réaction de la matière soudée. Ce mode de pilotage permet de s'adapter au défaut d'accostage et de mise en position des pièces à assembler (jeu entre les pièces) [CAM00, SMI07].

La Figure 4-B présente une schématisation de la régulation de la position avec le contrôle en effort lorsqu'un jeu entre les pièces apparaît.

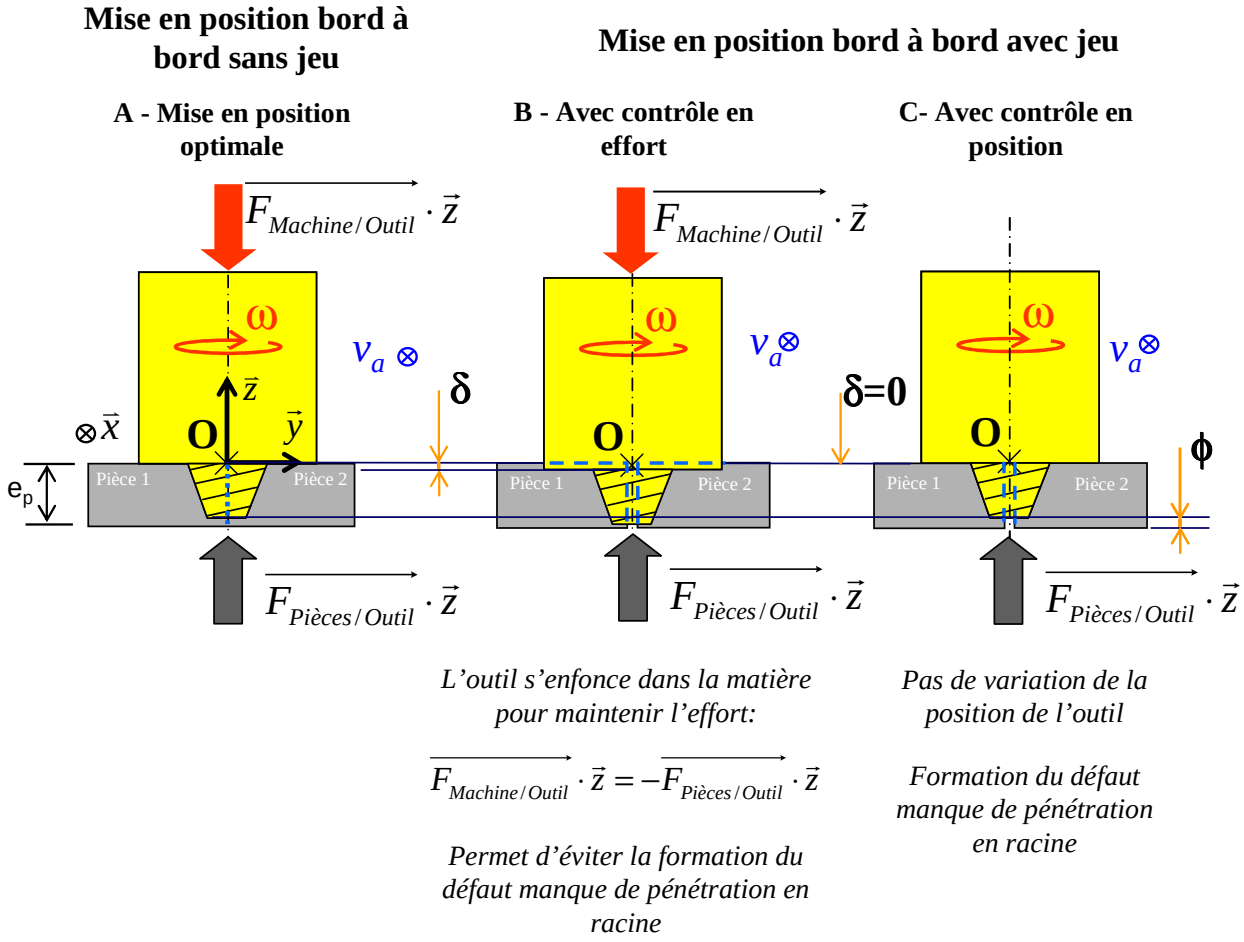


Figure 4: Influence des modes de contrôle en présence d'un jeu entre les deux pièces.

A- Schématisation d'une mise en position idéale. B - Schématisation du contrôle en effort, lorsqu'un défaut de mise en position des pièces apparaît. C - Schématisation du contrôle en position, lorsqu'un défaut de mise en position des pièces apparaît

Le choix du mode de pilotage influence les caractéristiques techniques de la machine [SMI07].

2.1.2. Côté avance et côté retrait

Le cordon de soudage réalisé n'est pas symétrique par rapport à la ligne de joint [GEN04]. Cette asymétrie est due aux différences de vitesse relative entre l'outil et la pièce à souder [ZIM07]. Ainsi, selon la position de la pièce et la cinématique de l'outil, on distingue un côté avance et un côté recul. Ils sont définis par la norme ISO/DIS 25239-3 comme étant :

- *côté avance* : côté de la soudure où le sens de rotation de l'outil coïncide avec le sens du soudage [NOR07]
- *côté recul* : côté de la soudure où le sens de rotation de l'outil est opposé au sens du soudage [NOR07]

La Figure 5 présente le côté avance et recul lors du soudage FSW.

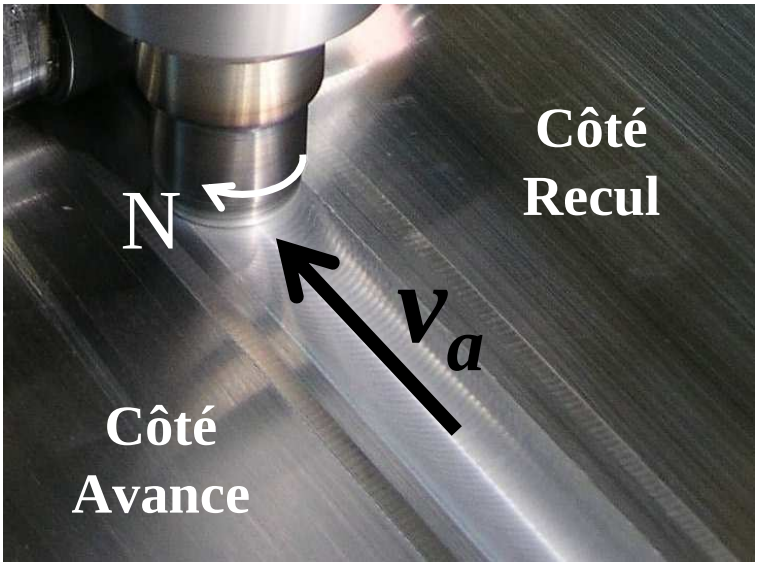


Figure 5:Présentation de la dénomination côté avance et côté recul

Cette différence de vitesse relative entre l'outil et les pièces à souder engendre une différence dans le flux de matière autour de l'outil. Ceci se retrouve dans l'analyse macrographique des cordons [GEN04].

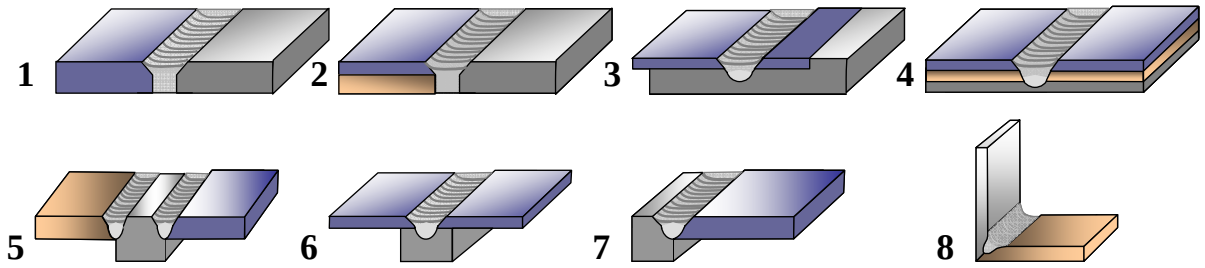
La notion de vitesse relative de l'outil par rapport aux pièces se retrouve également en fraisage. En effet, on parle d'une opération de fraisage en avalant ou en opposition correspondant au côté avance ou recul utilisée en FSW.

2.1.3. Les configurations de soudage offertes

Le soudage FSW impose quelques contraintes. Les configurations de soudage doivent permettre :

- le bridage des pièces [MIS07a] pour éviter tout mouvement relatif de celles-ci sous l'action des efforts générés,
- d'assurer l'accessibilité au plan de joint par l'outil et d'accueillir l'épaulement afin d'assurer le contact de ce dernier avec la surface des pièces [MIS07a],
- de placer, si nécessaire, une enclume à l'envers des pièces pour récupérer l'effort appliqué par l'outil et contenir la matière,

Ces contraintes limitent les configurations de joint possibles, représentées sur la Figure 6. Elles permettent tout de même de réaliser de nombreuses applications.



1) Soudage bout à bout

2) Soudage bout à bout, avec deux plaques superposées

3) Soudage par recouvrement

4) Soudage par recouvrement multicouches

5) 6) Soudure en T

7) 8) Soudure en angle

Figure 6: Configurations de joint de soudure FSW [ZIM07, MIS07a]

2.2. Les outils utilisés

2.2.1. Généralité

L'outil FSW a une forme enveloppe relativement simple. Il est schématisé sur la Figure 7. Il a trois fonctions principales [MIS07a] :

- *chauffer les pièces* par frottement et par déformation plastique [MIS07a, FUL07],
- *malaxer les matériaux* pour former le joint [MIS07a],
- *contenir le flux de matière* sous l'épaulement et autour du pion [MIS07a].

Selon Fuller [FUL07], pour assurer ces fonctions l'outil doit être *non consommable*. L'épaulement a pour rôle d'amener de la chaleur par frottement et de confiner la matière malaxée sous l'outil [MIS05, NAN08]. Le pion, lui, a pour fonction de malaxer le matériau [FUL07]. Toutefois, c'est l'action combinée de ces deux éléments qui assure l'apport de chaleur et le flux de matière nécessaire à la formation du joint. La Figure 7 présente différentes géométries d'outils. Les formes du pion et de l'épaulement ainsi que la présence de filets, de gorges, de rainures, etc. conditionnent le flux de matière et la génération de température [NAN08, MISH05]. L'ensemble influence la microstructure du cordon formé [MISH05] et donc ses propriétés mécaniques. C'est pourquoi, la géométrie de l'outil a fait l'objet de différents développements.

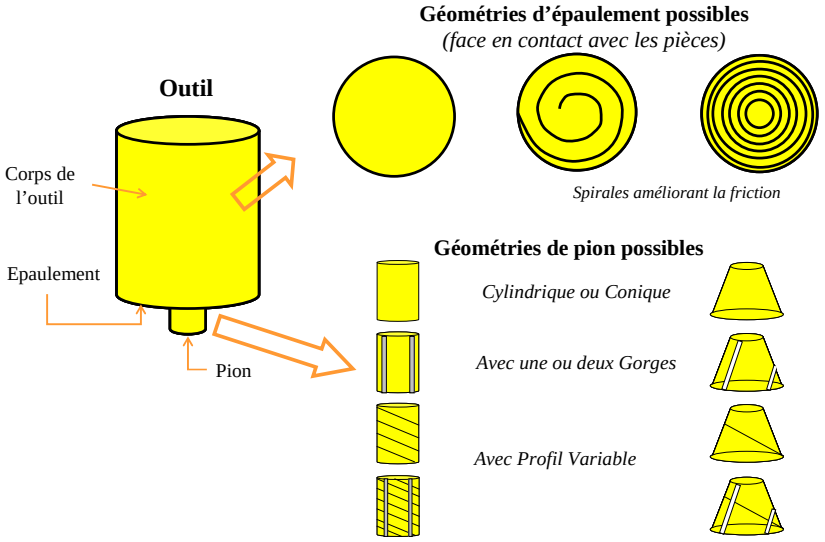


Figure 7: Schématisation de l'outil FSW et de quelques géométries de pions et d'épaulements [MIS05]

2.2.2. Les technologies d'outil

Les outils peuvent être classés dans trois catégories :

- Outil à pion fixe, Figure 8-A. Comme son nom l'indique, l'épaulement et le pion sont fixes l'un par rapport à l'autre.
- Outil à pion ajustable, Figure 8-B. Contrairement à l'outil à pion fixe, cet outil possède un pion de longueur variable [NOR07, WYK97]. L'intérêt est de pouvoir rentrer le pion progressivement dans l'épaulement en fin de soudage et d'obtenir ainsi des soudures sans trou en fin de cordon. Il permet également de souder des pièces avec une profondeur de pénétration variable.

Ces deux technologies d'outil nécessitent l'utilisation d'une enclume à l'envers des pièces pour reprendre l'effort axial F_z appliqué par l'outil sur la surface des pièces.

- Outil à double épaulement, Figure 8-C. L'outil est composé de deux épaulements reliés par un pion dont la longueur peut être ajustée au cours du soudage [NOR07]. Les deux épaulements viennent pincer les pièces à souder, afin de contenir la matière malaxée [ARB07a] et apportent de la chaleur par frottement de manière symétrique [MAR08]. Le cordon obtenu est symétrique par rapport à la demi-épaisseur des pièces, limitant ainsi leur déformation [MAR08]. Cet outil est avantageux lorsqu'il est impossible de mettre une enclume à l'envers des pièces. De plus, à épaisseur identique, les efforts de soudage sont plus faibles que ceux nécessaires pour les deux autres technologies d'outil [MAR08]. Une pénétration totale est toujours assurée avec cet outil [MAR08].

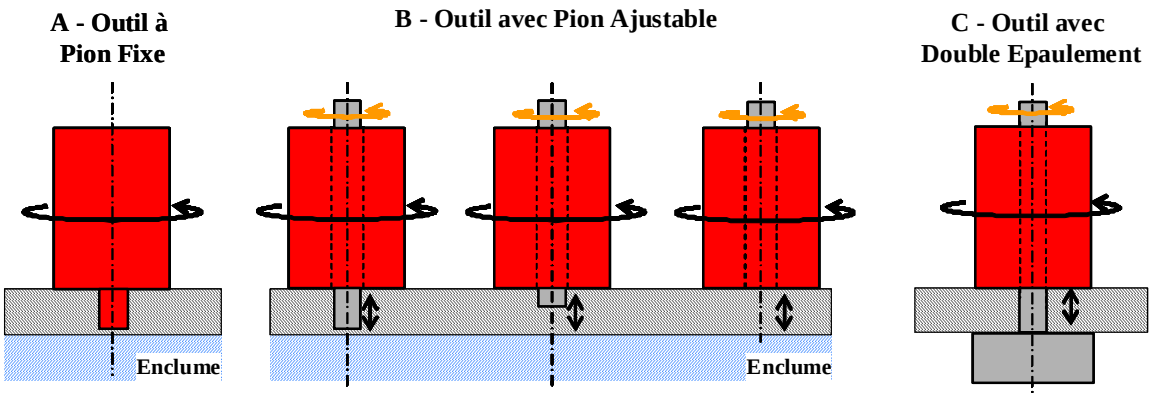


Figure 8: Les différentes technologies d'outil existant [Normes, ARB07a]

Pour pouvoir utiliser un outil à pion ajustable ou à double épaulement, la tête de soudage doit permettre le contrôle de l'épaulement et du pion de manière distincte [WYK97].

2.2.3. Le matériau de l'outil

Le matériau de l'outil doit résister aux contraintes et aux températures générées lors du soudage FSW [FUL07]. D'autres critères rentrent également en ligne de compte, tels que la résistance à l'usure, la non diffusivité vers le matériau soudé, ses capacités à être usiné, etc. [FUL07]. Ainsi, le matériau de l'outil sera choisi d'après le matériau et l'épaisseur soudée, comme présenté sur le Tableau 1.

Alliage	Epaisseur	Matériau Outil
Alliages d'aluminium	< 12 mm	Acier à outil, WC-Co
	< 26 mm	MP159
Alliage de Magnésium	< 6 mm	Acier à outil, WC
Cuivre et ses alliages	< 50 mm	Alliage de nickel, PCBN*, alliage de tungstène
	< 11 mm	Acier à outil
Alliage de titane	< 6 mm	Alliage de tungstène
Acier Inoxydable	< 6 mm	PCBN*, alliage de tungstène
Acier faiblement allié	< 10 mm	WC, PCBN*
Alliage de Nickel	< 6 mm	PCBN*, alliage de tungstène

**PCBN: Polycrystalline cubic boron nitride*

Tableau 1: Synthèse des différents matériaux d'outil couramment utilisés [FUL07]

2.3. La formation du cordon de soudure

De nombreux travaux de recherche ont été menés sur la formation du cordon de soudure. Les actions mécaniques mises en jeu vont amener la matière dans un état « plastique » générant un mouvement local complexe de la matière autour du pion [MIS05, NAN08]. Les efforts et les couples générés en FSW ainsi que la formation des défauts sont directement liés au flux de matière.

Reynolds et al. [REY99] ont analysé le flux de matière à l'aide de marqueurs métalliques insérés dans le matériau de base. Ils suggèrent que l'origine du flux de matière provient d'un phénomène d'extrusion de la matière autour du pion. La matière chauffée, ayant atteint un état viscoplastique, est mise en mouvement par la cinématique de l'outil. Elle se retrouve alors confinée entre l'épaulement, l'enclume, l'outil et le matériau de base, le flux de matière est alors confiné dans un volume restreint. L'ensemble forme une « matrice mobile » dans laquelle la matière est extrudée. Cette théorie de la matière extrudée va être reprise par Cui et al, Arbegast et Heurtier et al. [HEU06, CUI08, ARB08].

A partir de l'étude de macrographies, Cui et al [CUI08] ont décomposé le flux de matière en trois zones. Celles-ci sont présentées sur la Figure 9. Leurs interprétations sont principalement basées sur l'analyse cinématique de l'outil et son action sur la matière. Ils définissent une première zone (I) située juste sous l'épaulement, Figure 9-c. Ce mouvement de matière résulte du frottement de l'épaulement sur la surface des pièces. Cette zone est généralement nommée « flow arm zone ». Cui et al [CUI08] définissent ensuite une deuxième zone (II) comme étant un flux de matière essentiellement lié à la cinématique du pion, Figure 9-c. Arbegast [ARB08] qualifie cette zone de « zone d'extrusion ». Dans cette zone, à l'avant du pion, la matière est entraînée du côté recul vers le côté avance de la soudure [ARB08]. La troisième zone (III), Figure 9-c, est celle où le flux de matière résulte de l'action combinée du pion et de l'épaulement. Il faut ajouter à cela un quatrième flux de matière entre le pion et l'enclume [ARB08]. Celui-ci est important car il permet d'assurer une pénétration totale du cordon de soudure.

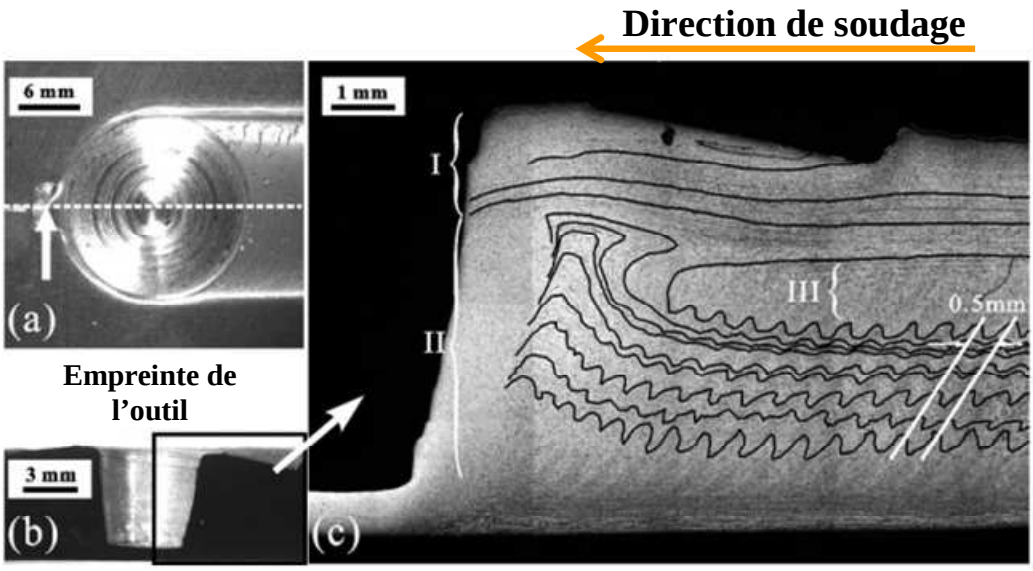


Figure 9: Analyse du flux de matière réalisée par Cui et al. [CUI08]

La combinaison de l'ensemble de ces mouvements permet de ramener la matière de l'avant vers l'arrière du pion afin de consolider le vide laissé par celui-ci [ARB07a]. Le cordon se crée alors de proche en proche par une liaison métal / métal [GEN04]. Le joint ainsi constitué est composé uniquement des métaux de base des pièces assemblées et ne nécessite

pas d'apport de métal. Il subsiste cependant, à la fin du cordon, un trou correspondant à l'emplacement de l'outil (Figure 9-b).

2.3.1. Les cordons de soudure obtenus

Aspect esthétique

Le passage de l'épaulement sur la surface des pièces laisse des stries, comme présenté sur la Figure 10. De façon générale, une légère bavure peut se former de chaque côté du cordon.

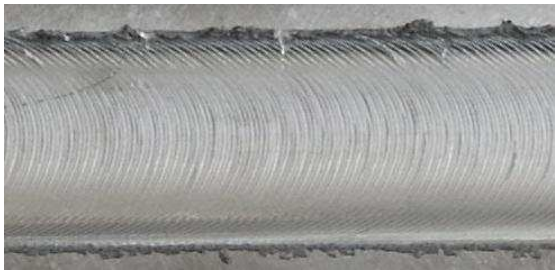


Figure 10: Stries laissées à la surface des pièces

Macrographie des joints soudés

Au passage de l'outil, la matière subit un cycle thermomécanique. Quatre zones distinctes peuvent être identifiées sur une coupe transversale d'un cordon, comme présentées sur la Figure 11. La différenciation en quatre zones se fait par une analyse des microstructures [BIA99]. Une section du cordon FSW sera composée :

- Du métal de base (MB), non déformé où les élévations de température n'entraînent pas de modifications de la microstructure et des propriétés mécaniques [MIS07a].
- D'un *Noyau*, le cœur de la soudure, siège des déformations plastiques les plus importantes et des températures les plus élevées [BIA99]. C'est la zone de malaxage de la matière [BIA99].
- De zones affectées thermomécaniquement (ZATM) encadrant le noyau de la soudure. Dans ces zones, la microstructure est affectée par une déformation plastique « modérée » et l'élévation de température [MIS07a].
- De zones affectées thermiquement (ZAT). Les propriétés du matériau sont affectées uniquement par l'élévation de température [MIS07a].

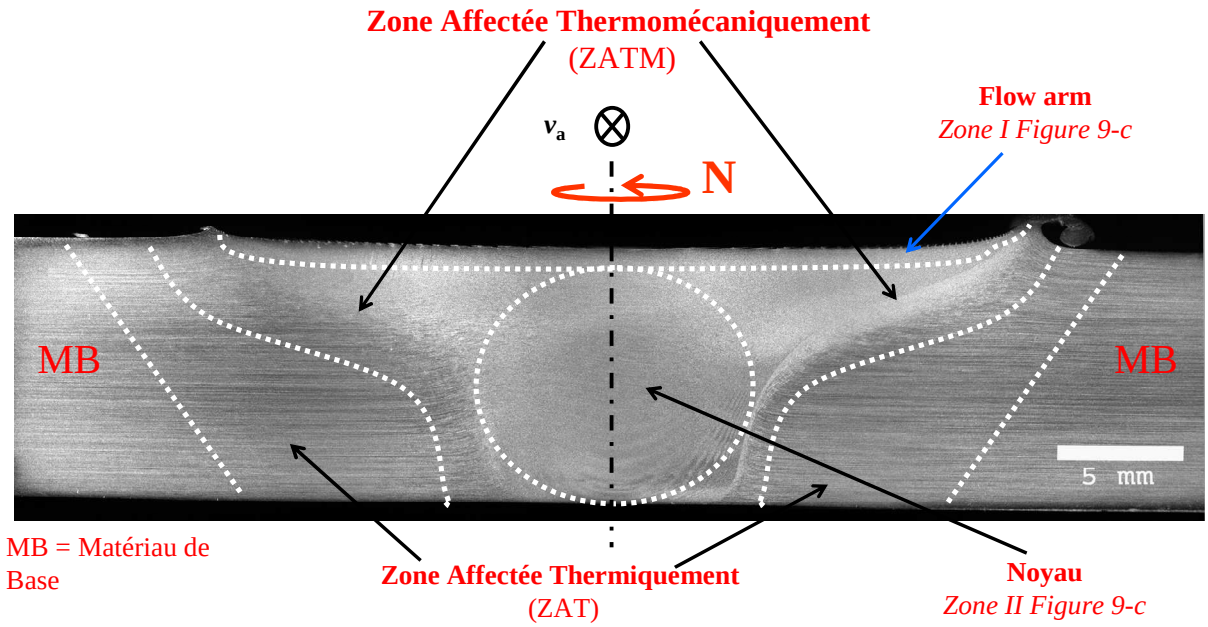


Figure 11: Macrographie d'un cordon de soudure FSW lors du soudage bout à bout de deux plaques d'aluminium [ZIM07]

2.4. Les propriétés des joints soudés

Nous nous sommes intéressés aux propriétés des cordons obtenus lors du soudage des alliages d'aluminium. Les propriétés du joint soudé dépendront d'une manière générale, de l'état initial du matériau, du cycle thermomécanique subi et de son comportement face aux traitements thermomécaniques. L'influence du cycle thermomécanique sera différente selon la nature de cet alliage, alliage trempant (séries 2000, 6000 et 7000) ou à durcissement par écrouissage (séries 1000, 3000, 4000, 5000,) [MIS05].

2.4.1. Alliages à durcissement structural

Suite au cycle thermomécanique subi, les alliages à durcissement structural connaîtront une diminution des propriétés mécaniques suite à la remise en solution des précipités durcissant [MIS05]. C'est pourquoi, une chute de dureté est constatée au sein du cordon, comme présentée sur la Figure 12 [SWE99, GEN04, MIS05, MAH07].

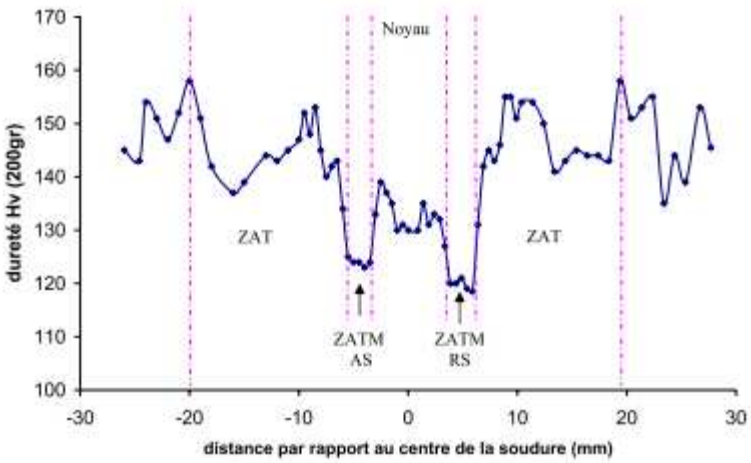


Figure 12: Profil de dureté d'un alliage d'aluminium à durcissement structural, 2024-T3 [GEN04]

2.4.2. Les alliages à durcissement par écrouissage

Pour ces alliages, l'abattement des propriétés dépend du taux d'écrouissage du métal de base. La Figure 13 présente une schématisation de l'aspect des profils de dureté suivant ce taux. Ainsi, à l'état recuit O, il n'y a pas de perte de propriétés mécaniques [SVE91, GEN04, MAH07] suite à l'affinement de la microstructure au passage de l'outil dans la ZAT, la ZATM et du noyau [GEN04]. Le coefficient de joint est alors de l'ordre de 1.

Par contre, lorsque ces alliages sont durcis par écrouissage (état H), l'abattement des propriétés mécaniques au niveau du cordon est dû à la modification de la microstructure écrouie.

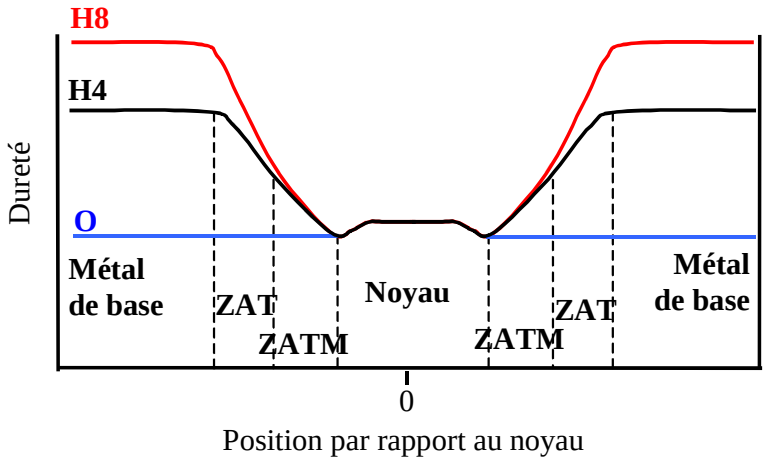


Figure 13: Schématisation des profils de dureté suivant le taux d'écrouissage du métal de base [ZIM07]

2.4.3. Coefficient d'efficacité du joint soudé FSW

En général, toute opération de soudage diminue les propriétés mécaniques du matériau de base. On définit le coefficient d'« efficacité du joint » comme le rapport entre les caractéristiques mécaniques de l'assemblage et les caractéristiques mécaniques du métal de base (équation (2)).

$$\text{coefficient de joint} = \frac{R_e \text{du joint soudé}}{R_e \text{ du matériau de base}} [\%] \qquad (2)$$

Où R_e du joint soudé est la résistance élastique à la traction de l'éprouvette soudée

Ce coefficient permet d'estimer l'abattement de la résistance mécanique suite à l'opération de soudage. Pour les alliages d'aluminium, le coefficient de joint soudé par FSW est de l'ordre de 0.6 à 1 [NOR07]. La norme ISO/DIS 25239-4 [NOR07] définit la valeur minimale du coefficient d'efficacité du joint que doit satisfaire l'assemblage soudé par FSW. Le Tableau 2 présente ces valeurs pour différentes classes d'alliage d'aluminium à divers états métallurgiques.

Type de matériau	Etat métallurgique du métal de base avant soudage	Etat après soudage	Coefficient d'efficacité du joint
Aluminium pur	Tous les états	Brut de soudage	**1**
Alliages sans traitement thermique	Tous les états	Brut de soudage	**1**
Alliages à traitement thermique	T4	Vieillissement naturel	**0.7**
	T4	Vieillissement artificiel	**0.7**
	T5 et T6	Vieillissement naturel	**0.6**
	T5 et T6	Vieillissement artificiel	**0.7**

Tableau 2: Efficacité pour la résistance à la traction des assemblages bout à bout définie par la norme ISO/DIS 25239-4 [NOR07]

2.5. Industrialisation du procédé FSW et positionnement

Une des étapes de l'industrialisation d'un produit concerne les choix des moyens de production et les conditions de mises en œuvre. Le schéma d'intégration produit / procédé / ressources est présenté à la Figure 14. Il sera utilisé comme support pour identifier les paramètres caractéristiques nécessaires à la qualification de machine FSW à partir des interactions entre ces trois entités. Cette démarche générique consiste à étudier le procédé et à analyser les interactions procédé / ressources pour qualifier ou concevoir un moyen de production FSW. Cette étude se fera à travers la mise en place du domaine de soudabilité opératoire.

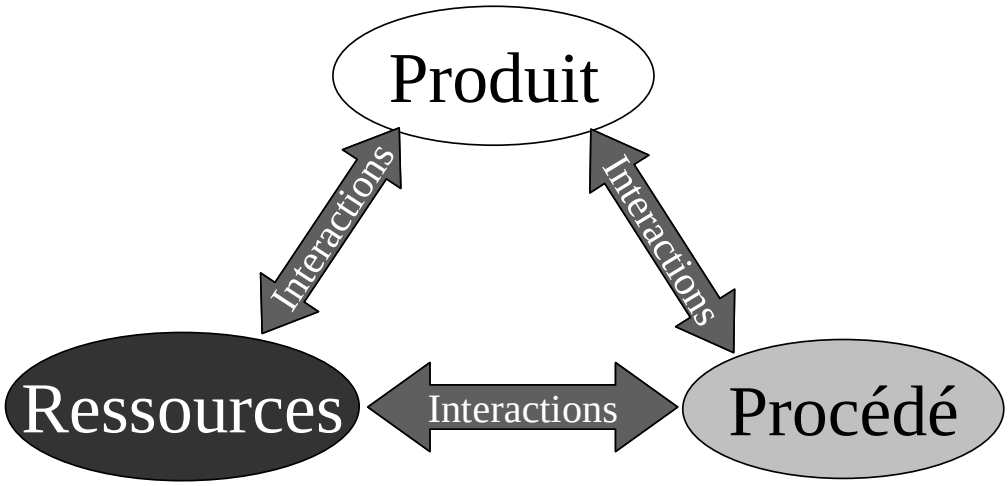


Figure 14: Diagramme de référence intégration Produit / Procédé / Ressources

La démarche mise en place pour déterminer un domaine de soudabilité s'apparente à une démarche basée sur l'étude du Couple Outil Matière utilisée en usinage. Le principe est de définir un domaine de fonctionnement d'un outil pour une application donnée à l'aide de critères. En usinage, on va retrouver des critères de qualité, de durée de vie de l'outil, etc. Dans notre cas d'étude, ils seront relatifs aux cordons de soudure obtenus.

Le domaine de soudabilité opératoire (DSO) correspond à l'ensemble des conditions opératoires conduisant à une soudure respectant le cahier des charges. Le DSO est borné par les limites physiques du procédé. En dehors de ces limites, divers défauts de soudage sont générés. Pour le définir, deux étapes sont nécessaires (étapes 1 et 2 de la Figure 15) : la définition du domaine de l'ensemble des soudures compactes et l'identification des soudures respectant le cahier des charges. Ces essais de soudage sont généralement menés sur une machine instrumentée de forte capacité. Une troisième étape, étape 3 de la Figure 15, consiste à déterminer la partie du DSO atteignable par la machine FSW choisie. Les actions mécaniques générées en soudage dépendent des paramètres de conduite et sont transmises à la machine. Ainsi, ***on ajoute au DSO une considération technologique liée aux capacités du moyen choisi***. D'autres limites peuvent être ajoutées, comme par exemple l'aptitude de la machine à suivre la trajectoire définie. Ces informations définissent les critères que doit avoir la machine pour atteindre le DSO et permettre l'écriture du cahier des charges technique du moyen de production requis.

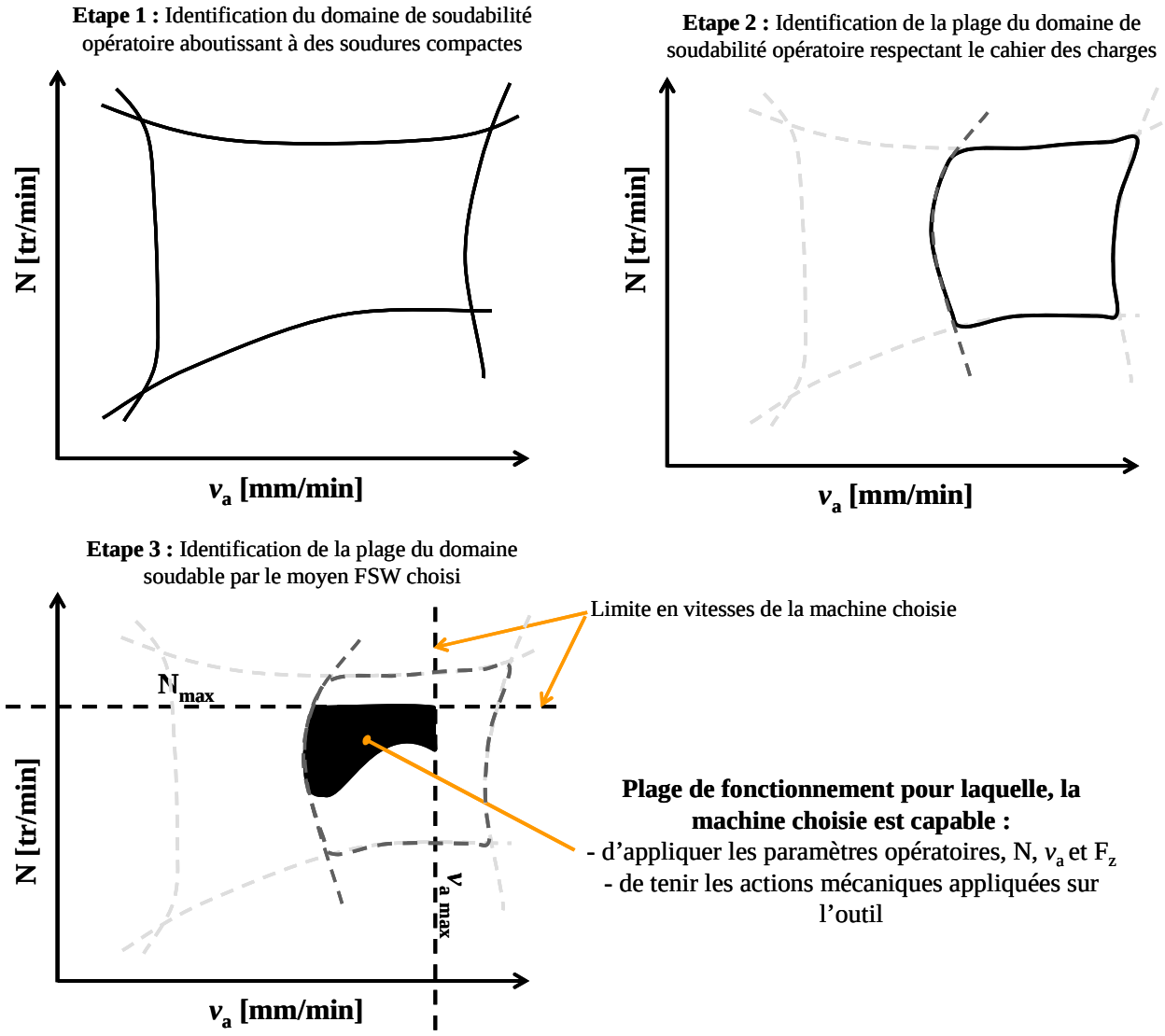


Figure 15: Démarche d'industrialisation d'un moyen de production FSW

Ainsi, dans le cadre de nos travaux il est nécessaire d'étudier plus en détails les actions appliquées sur l'outil, les domaines de soudabilité opératoire et l'identification des phénomènes limites permettant de le définir. Cette identification est réalisée à travers l'étude des défauts de soudage FSW.

D'autre part, il paraît nécessaire de faire un bilan des moyens de production FSW aujourd'hui utilisés.

Le FSW est un procédé de soudage à l'état solide, de proche en proche. La liaison est obtenue par l'action locale d'un outil rotatif qui échauffe et malaxe la matière des pièces à assembler. Les principaux paramètres opératoires sont la vitesse de rotation de l'outil N, la vitesse d'avance v_a, et l'effort axial F_z. Le potentiel de ce procédé tient principalement du fait qu'il permet d'éviter les défauts liés à la solidification et semble conférer aux soudures des propriétés mécaniques meilleures qu'en soudage par fusion.

Nous nous intéressons maintenant aux plages de fonctionnement des paramètres opératoires de soudage. Celles-ci vont être limitées par des défauts types, propres au FSW. Nous nous intéresserons également aux efforts outil /matière générés en cours de soudage.

3. Défauts et domaines de soudabilité opératoire

La démarche mise en place pour déterminer un domaine de soudabilité s'apparente à l'étude du couple Outil / Matière utilisée en usinage. Le principe est de définir un domaine de fonctionnement d'un outil et d'une application donnée à l'aide de critères. En usinage, on va retrouver des critères de qualité, de durée de vie de l'outil, etc. Les critères, en soudage, seront relatifs aux cordons de soudure obtenus. Domaine de soudabilité opératoire (DSO)

En FSW, les domaines de soudabilité opératoire présentés se limitent à la phase de soudage et à l'étude des paramètres principaux F_z, v_a et N [KIM06, ARB08, COM08, YU09]. Communément, pour définir un DSO en FSW, le premier critère est l'absence de défaut [KIM06, ARB08]. Cela dessine une première frontière du domaine. Il peut être réduit en incluant des critères spécifiques au cahier des charges de la soudure comme la tenue en fatigue, la résistance mécanique, la résistance à la corrosion, etc.

La Figure 16 représente les domaines de soudabilité d'un alliage de magnésium et d'un alliage d'aluminium. Sur la Figure 16-A, certaines frontières du DSO, délimitées par l'apparition de défauts, de porosité, de fissure ou de bavures peuvent être observées. Quant à la Figure 16-B, elle présente le domaine de soudabilité borné par les phénomènes limites : condition opératoire « trop chaude » ou « trop froide » ou un malaxage anormal.

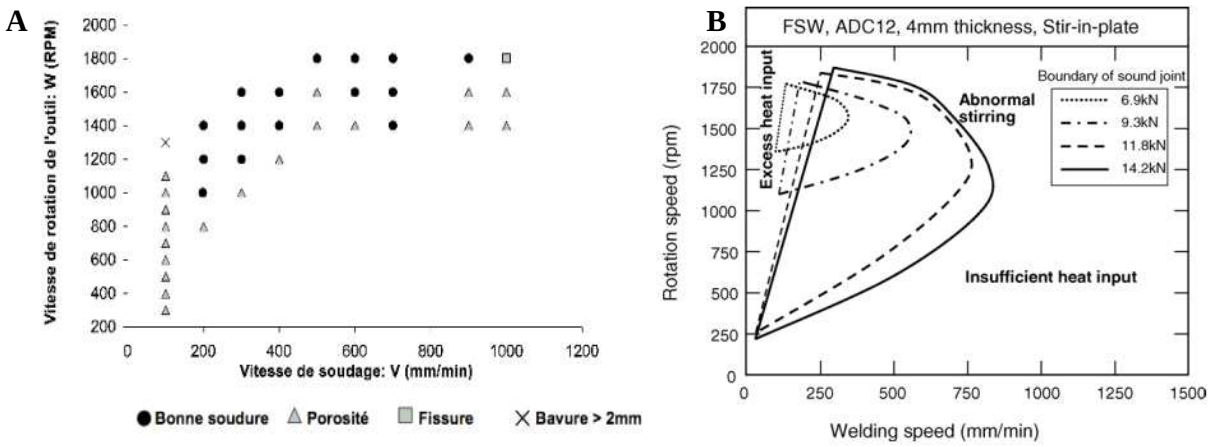


Figure 16: Présentation de domaine de soudabilité opératoire. A-Pour un alliage de Magnésium AZ31 d'épaisseur 4mm [COM08] et B- pour un alliage d'aluminium ADC 12 d'épaisseur 4mm [KIM06]

Kim et al. [KIM06] soulignent que plus l'effort appliqué est grand, plus le domaine opératoire est grand.

3.1. Les défauts générés par le malaxage

Etant donné la particularité de la formation du cordon de soudure FSW, des défauts spécifiques au procédé vont être identifiés [CHE06]. Elle relève des interactions entre les propriétés du matériau, la géométrie du pion et les paramètres opératoires [ARB07a]. Arbegast a étudié la formation des défauts à travers l'étude du flux de matière [ARB07a, ARB07b, ARB08]. D'après lui, les défauts rencontrés en FSW peuvent être classés en deux catégories : les défauts dits « géométriques » et les défauts induits par le flux de matière [ARB08]. Nous allons utiliser cette classification.

3.1.1. Les défauts liés au flux de matière

Ils sont apparentés à un mauvais malaxage ou à des conditions opératoires thermiquement inadaptées, c.à.d. « trop chaudes » ou « trop froides » [ARB08].

- *Bavures excessives (« Ribbon flash »)* au niveau du bord de la soudure. Ce défaut est un excès de métal le long du cordon de soudure [NOR07]. Il provient d'un flux de matière trop important sous l'épaulement entraînant l'expulsion de la matière sur les bords du cordon [ARB08]. Kim et al [KIM06] attribuent ce défaut à une température trop élevée du matériau. Ils précisent que dans ces conditions, l'outil peut entrer en contact avec l'enclume [KIM06]. La présence de ce défaut est généralement corrélée avec un outil qui s'enfonce au sein du cordon de soudure et donc à un amincissement des tôles.

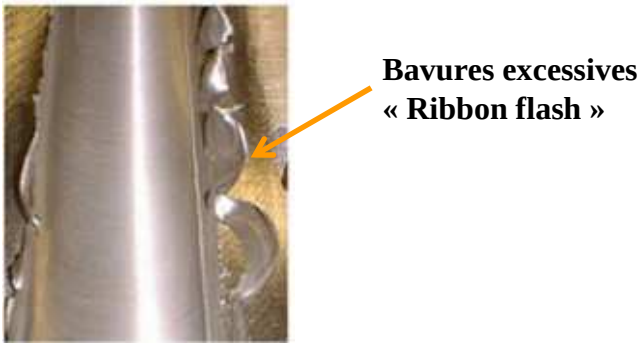


Figure 17: Bavures excessives le long du joint (« Ribbon flash ») [ARB07b]

- *Défaut en surface* tel que la formation d'éraillures ou écailles présentées à la Figure 18.

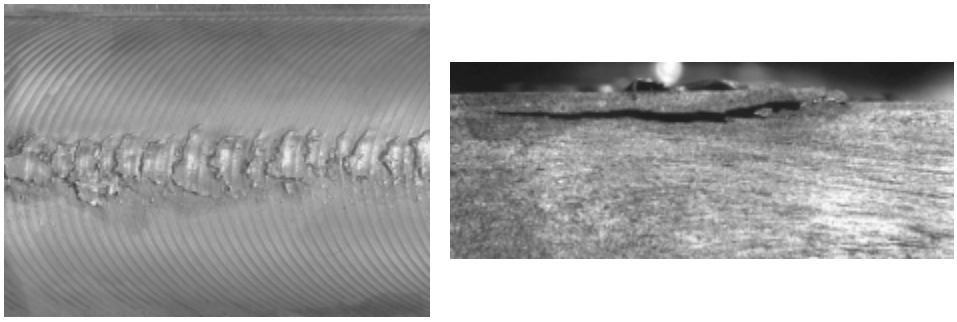


Figure 18: Présence de défauts de surface de type éraillures ou d'écailles laissées par le passage de l'épaulement [BJO02]

- *Effondrement du noyau.* Il est dû à un flux de matière excessif sous l'épaulement. Ainsi, un surplus de matière se retrouve au sein du noyau dont une macrographie est présentée à la Figure 19.

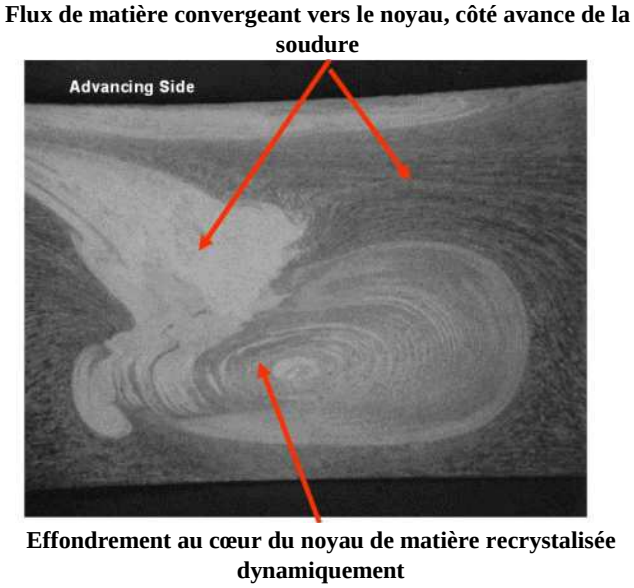


Figure 19: Macrographie d'un cordon présentant l'effondrement du noyau [ARB07b]

D'après Arbegast [ARB08] ces trois défauts surviennent lorsque les conditions opératoires sont « trop chaudes » ce qui implique un flux de matière trop important. Il souligne également que des conditions opératoires « trop chaudes » induisent un abaissement important des propriétés mécaniques dans les zones affectées thermiquement et thermo-mécaniquement [ARB07a].

- *Défaut à la racine du cordon (« root flow »)* situé sur la surface des pièces en contact avec l'enclume et apparaissant lorsque l'outil pénètre trop au sein des pièces [ARB07b]. La Figure 20 présente un agrandissement de ce défaut.

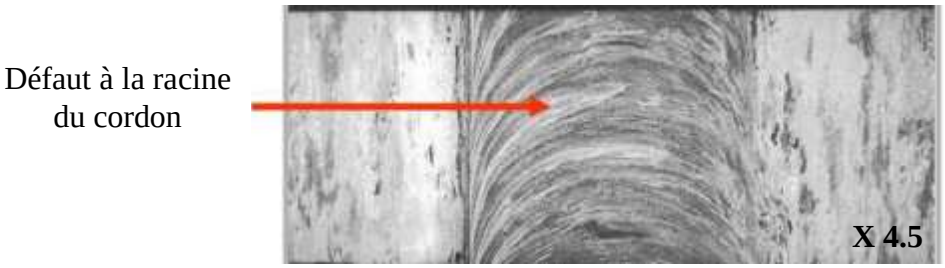
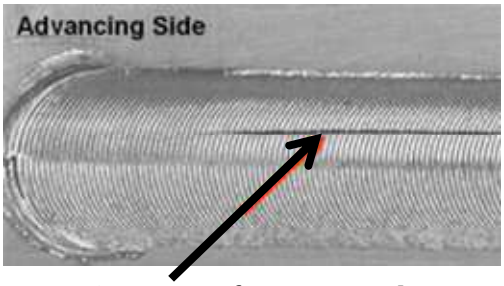


Figure 20: Défaut à la racine du cordon, sur la surface des pièces en contact avec l'enclume [ARB07b]

- *Rainure à la surface* du cordon de soudure. Elle est due au manque de consolidation de la matière, voir Figure 21. D'après Chen et al. [CHE06] ce défaut est généré du côté avance lorsque la profondeur de pénétration est trop faible. Il peut être résorbé en appliquant un effort de forgeage plus élevé [ARB07b].



Rainure en surface, manque de consolidation de matière

Figure 21: Manque de consolidation de la matière en surface ou rainure [ARB07b]

- *Un défaut de consolidation de la matière en surface dénommé « scalloping ».* Selon Arbegast [ARB08], c'est un défaut volumétrique dépendant de l'effort F_z appliqué.

- *Défaut tunnel interne* présenté sur la Figure 22. C'est un défaut caractéristique du FSW. Il est généralement situé du côté avance du cordon de soudure. Ce défaut provient d'un manque de consolidation de la matière malaxée à l'arrière du joint dû à un flux de matière insuffisant [CAR07, ARB08]. Kumar et al. [KUM07] ont montré l'interaction entre l'effort axial F_z appliqué et la formation de ce défaut. En augmentant F_z, la taille du défaut tunnel au sein du cordon s'est vue réduite et disparaître pour un effort donné. L'augmentation de l'effort contribue, en effet, à une meilleure interaction entre l'outil et la matière, augmentant l'apport de chaleur par friction et la pression au sein du noyau [KUM07].

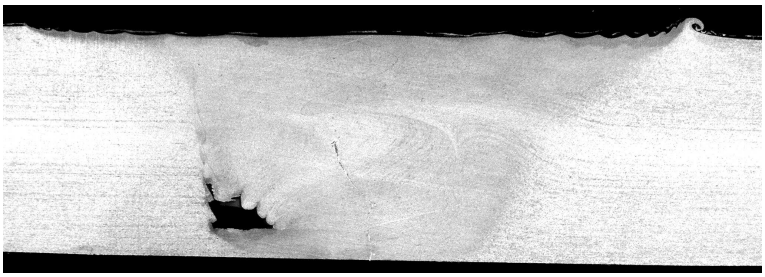


Figure 22: Soudure comportant un défaut tunnel interne [ZIM07]

Remarque : D'après Arbegast, le défaut tunnel et la rainure en surface surviennent lorsque les conditions opératoires sont trop « froides » [ARB08] impliquant un malaxage insuffisant de la matière. D'autre part Caravaca [CAR07] précise que les défauts tunnels internes peuvent également survenir lorsque la mise en position des pièces, en soudure bout à bout, comporte du jeu ou lorsque le bridage est insuffisant et permet une mobilité de ces dernières. Kim et al. [KIM06] ont également mis en évidence la formation de défauts tunnels lorsque le malaxage est « anormal ». En raison de géométries de noyau différentes, il fait une différence entre les défauts tunnels survenant à cause d'un manque d'apport d'énergie et les défauts tunnels dus à un malaxage anormal [KIM06].

3.1.2. Les défauts dits « géométriques »

Ces défauts sont indépendants du malaxage. Ils peuvent être définis comme étant des défauts relatifs au positionnement de l'outil. Les défauts associés à cette catégorie sont :

- *La pénétration partielle (*Figure 23*)* lorsque les deux pièces ne sont pas soudées sur toute l'épaisseur [NOR07].

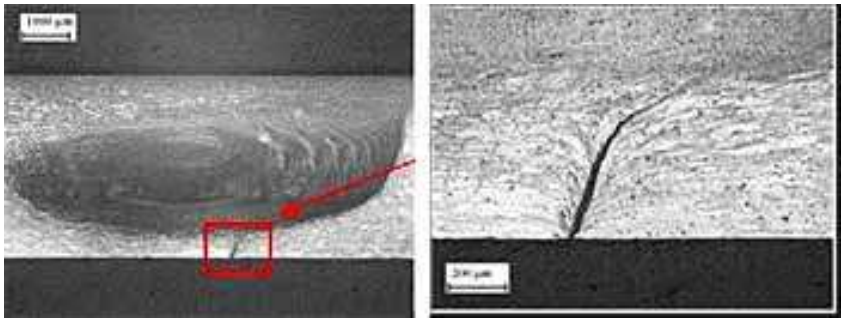


Figure 23: Soudure comportant un défaut de pénétration partielle [CAR07]

Cela peut provenir :

- d'une profondeur de pénétration du pion trop faible, occasionné par une longueur de pion inadaptée ou par un mauvais contrôle de la position de l'outil par rapport à la surface des pièces [ARB08, CAR07CAR07].
- d'une mauvaise position et/ou orientation de l'outil par rapport à la ligne de joint [HOR99, CAR07, ARB08, SYL**]. Ce défaut apparaît :

- lors d'une mauvaise mise en position de pièces dans l'espace de travail.
- lorsque l'outil dévie de la ligne de joint. Ce type de défauts peut apparaître lorsque les actions mécaniques appliquées sur l'outil entraînent des déformations de l'ensemble outil, porte outil et machine [VOE06, VOE07]. Le manque de rigidité de la structure des machines peut entraîner sa déflexion [STR00] et engendrer des problèmes liés au suivi de joint [VOE06].
- lors de mauvaises préparations de bords entrainant des défauts d'accostage locaux des pièces,

Dans la littérature, peu d'études traitent de ces défauts. Hori et al. [HOR99] ont étudié l'influence du décalage outil par rapport au plan de joint, de la présence de jeu à l'accostage des pièces et l'association des deux. D'autre part, Sylvanus [SYL**] a étudié leurs générations lorsque la mise en position comporte un jeu à l'accostage des pièces, des défauts d'épaisseurs soudées et l'association des deux.

Hori et al. [HOR99] ont étudié pour un alliage d'aluminium, d'épaisseur 3.5 et 5mm, l'apparition des défauts lorsque l'outil est décalé par rapport au plan de joint. Cette mauvaise mise en position entraîne, comme présenté sur la Figure 24, un décalage de la zone malaxée par rapport au plan de joint. Lorsque celui-ci est trop important, un défaut de type « pénétration partielle » apparait (Figure 24). Ils constatent que la déviation admissible dépend de la taille de la zone malaxée [HOR99], et sera donc fonction de la géométrie de l'outil.

Jeu [mm] / Axe de l'outil / Pièce 1 / Pièce 2 / Plan de joint	**Décalage de l'outil par rapport au plan de joint** Jeu entre l'axe de rotation de l'outil et le plan de joint [mm]			
Epaisseur soudée	0 mm	1 mm	2 mm	3 mm
3.5mm	Sans défaut	Sans défaut	Sans défaut	**AVEC DEFAUT**
5mm	Sans défaut	Sans défaut	Sans défaut	**AVEC DEFAUT**

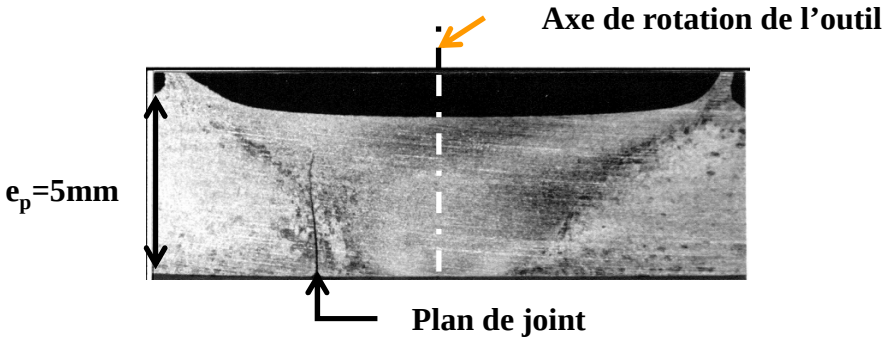


Figure 24: Apparition de défaut lorsqu'un jeu trop important se trouve entre l'axe de rotation de l'outil et le plan de joint [HOR99]

Sylvanus [SYL**] ainsi que Hori et al. [HOR99] ont étudié l'influence d'un jeu entre deux pièces sur l'apparition de défauts. Le Tableau 3 synthétise leurs résultats.

A partir d'un certain jeu :

- des défauts tunnels en surface liés à un manque de matière peuvent apparaitre [HOR99],
- l'outil peut pénétrer trop profondément dans la matière, entraînant alors une collision entre le pion et l'enclume [SYL**].

Hori et al. [HOR99] remarquent que plus l'épaisseur est élevée, plus la tolérance au jeu entre les pièces diminue. Ceci serait dû à l'augmentation, avec l'épaisseur, du volume de manque de matière entre les pièces.

épaisseur / Jeu [mm]	Défaut d'accostage des pièces **Jeu entre les deux pièces [mm]**					
Epaisseur soudée	0	0.5	1	1.5	2	2.5
3.5mm *[HOR99]*	Sans défaut	Non testé	Sans défaut	Non testé	Sans défaut	**AVEC DEFAUT**
5mm *[HOR99]*	Sans défaut	Sans défaut	**AVEC DEFAUT**	**AVEC DEFAUT**	Non testé	Non testé
4mm *[SYL**]*	Sans défaut	Sans défaut	Sans défaut	**AVEC DEFAUT**	Non testé	Non testé

Tableau 3: Apparition de défauts lorsqu'un jeu s'intercale entre les deux pièces [HOR99, SYL**]

L'analyse de ces défauts et leurs apparitions sont importantes. Entre autres, cela intervient non seulement sur la génération de défauts mais également sur l'ensemble des tolérances de fabrications à imposer sur les bruts de soudage. L'ensemble a un impact sur la qualité et le coût de fabrication des pièces FSW. De plus, dans un contexte d'étude de la robotisation du procédé, l'étude des défauts de la position et de l'orientation de l'axe de rotation par rapport au plan de joint semble être également capitale.

3.1.3. Autres défauts

- *Inclusion dans la ligne de joint*, présenté sur la Figure 25. La couche superficielle d'alumine n'étant pas suffisamment broyée, elle est emprisonnée dans le cordon de soudure sous la forme d'un film discontinu [NOR07]. D'après Chen et al. [CHE06], ce film d'oxyde fragilise le cordon de soudure. La gravité de ce défaut dépend de son étendue et de la proximité des particules d'oxydes adjacentes [NOR07].

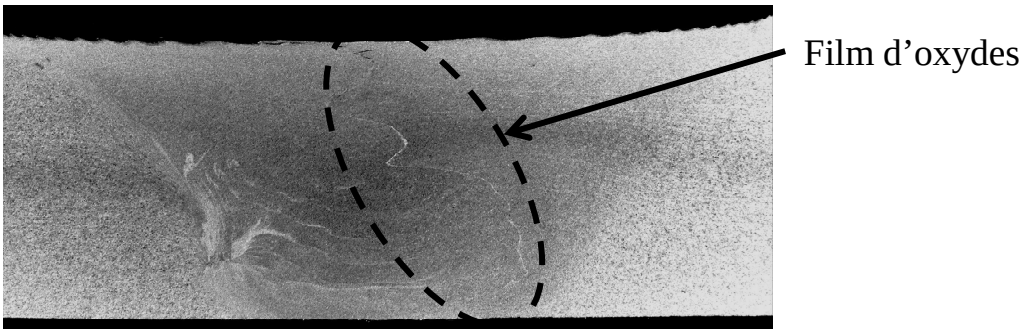


Figure 25: Soudure contenant un film d'oxyde [ZIM07]

3.2. Relation entre défauts et paramètres opératoires

Dans ce paragraphe nous allons regarder où se situent ces défauts aux frontières du domaine de soudabilité. Arbegast [ARB07b, ARB08] a étudié l'apparition des défauts en fonction des paramètres opératoires : la fréquence de rotation et la vitesse d'avance (en contrôle en position). La Figure 26 présente ses résultats. Il identifie un point et une plage de fonctionnement entraînant la formation du joint sans défaut. Autour de cette plage, il constate la formation de défauts dus à des conditions opératoires non appropriées, c.à.d. « trop chaudes » ou « trop froides » [ARB08, SYL**]. De même, Gratecap et al. [GRA08] parlent de températures idéales comprises entre 0.7 et 0.8 fois la température de fusion. En dessous ou au-dessus de ces limites, ils constatent que les cordons n'étaient pas de qualité satisfaisante.

D'après la Figure 26 Arbegast [ARB08] identifie :

- Des conditions opératoires « trop froides » lorsque la fréquence de rotation est faible et la vitesse d'avance élevée. L'apport d'énergie est alors insuffisant et les

défauts apparaissant sont : le défaut tunnel et un défaut de consolidation dénommé 'scalloping'.

- Des conditions opératoires « trop chaudes » lorsque la fréquence de rotation est élevée et la vitesse d'avance faible. L'apport d'énergie est alors important et les défauts apparaissant sont : le flash excessif, l'enfoncement de l'outil, l'effondrement du noyau, les éraillures ou une rainure en surfaces, etc.

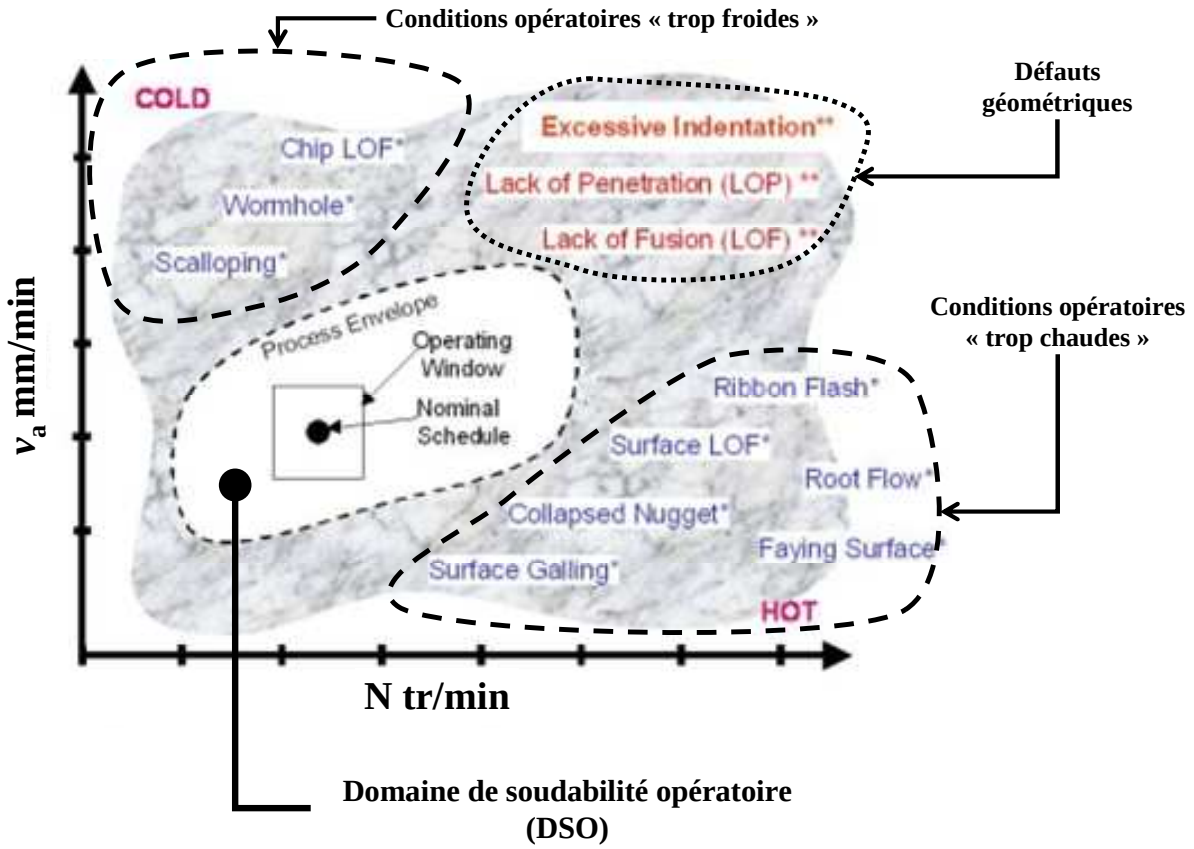


Figure 26: Présentation d'un domaine de soudabilité opératoire borné par l'apparition de défauts [ARB07b]

Le choix des paramètres opératoires et le mode de soudage doivent donc faire l'objet d'une étude approfondie. Il est donc nécessaire de définir les exigences de qualité d'une soudure FSW. La norme ISO/DIS 25239-3 définit les caractéristiques que doivent respecter les cordons de soudure afin de valider le choix des paramètres de conduite et l'ensemble du mode opératoire de soudage.

3.3. Contrôle de soudure FSW

Dans le cadre de la norme ISO/DIS 25239-3, trois niveaux de contrôle sont prévus :

- *Contrôle visuel de la soudure [NOR07]*

Les soudures doivent être examinées sur les faces endroit et envers, de même que l'indentation et le trou laissés par l'outil en sortie de matière. A ce titre, il sera nécessaire d'étudier :

- la surface brute de soudage. Celle-ci doit être sans fissure ou cavité et sans défaut de surface,

- le diamètre de l'indentation. Il doit être complet au moins égale à 80% de la surface de l'épaulement,

- le trou de sortie. Il doit avoir un aspect lisse, être symétrique et être exempt de toute fissure ou cavité,

- la largeur de soudure. Elle ne doit présenter aucune variation due à une pression insuffisante de l'outil.

➢ *Essai de pliage [NOR07]*

Mettre en évidence un éventuel défaut de manque de pénétration. Si une pleine pénétration est recherchée, ce défaut ne doit pas être présent.

➢ *Contrôle non destructif [NOR07]*

La soudure ne doit présenter aucun défaut de compacité.

La Tableau 4 présente une liste de défauts et les moyens de contrôle non destructifs appropriés qui leur sont associés.

	Modes d'inspection				
Défauts	**Contrôle visuel**	**Courants de Foucault**	**Ressuage**	**Ultrasons**	**Radiographie**
La pénétration partielle	■	+++	+++	+++	++
Bavure excessive	+++	■	■	■	■
Eraillures en surface	+++	■	■	+++	■
Effondrement du noyau	■	■	■	++	■
Rainure à la surface	+++	+++	+++	+++	++
Défaut tunnel interne	■	■	■	+++	+++
Inclusion dans la ligne de joint	■	■	■	++	■
Porosités au sein du joint	■	■	■	++	+++

Légende:

■	Mode de contrôle non approprié
+++	Sensibilité de détection forte
++	Sensibilité de détection moyenne
+	Sensibilité de détection faible

Tableau 4: Procédé de contrôle non destructif des soudures et défauts identifiés [MTA09]

La norme définit ainsi une base de critères à respecter et les moyens de contrôle associés pour qualifier une soudure. Il est alors possible de s'appuyer sur la connaissance des défauts et des critères à respecter pour définir les premières bases d'un domaine de soudabilité opératoire en FSW.

Les principaux défauts identifiés en FSW, répertoriés dans la littérature, sont les défauts tunnel, l'excès ou le manque de pénétration, les éraillures et les rainures en surface. Ils peuvent être classés dans deux grandes familles selon les conditions thermiques de soudage : « chaud » ou « froid ». Les conditions « chaudes » apparaissent pour une vitesse d'avance faible et une fréquence de rotation élevée, les conditions « froides » correspondant à l'inverse. Les défauts « froids » sont le défaut tunnel, les rainures en surface et le manque de pénétration. Les défauts « chauds » sont l'excès de pénétration et les éraillures en surface.

4. Efforts en soudage FSW

Comme cela vient d'être présenté, lors d'une opération de FSW *des interactions thermomécaniques fortes interagissent entre l'outil et la matière*. Pour assurer la formation du cordon de soudage, des efforts et couples sont imposés par l'outil sur la matière. Dans un contexte d'industrialisation, il est nécessaire de les étudier. En effet, ils vont limiter le domaine de soudabilité opératoire initial par des contraintes d'accessibilité machine.

4.1. Etude de l'interaction Outil / Matière

Le FSW est un procédé « mécanique » d'assemblage dans lequel l'outil est mis en contact avec les pièces à souder. L'interaction mécanique entre l'outil et la matière génère l'apport d'énergie nécessaire à la formation du joint. Elle se traduit par l'application d'un torseur des actions mécaniques sur l'outil. La Figure 27 présente une schématisation des efforts et des couples appliqués sur l'outil en cours de soudage [BAL09]. Ceci permet de déduire le torseur des actions mécaniques appliquées sur l'outil, équation (3).

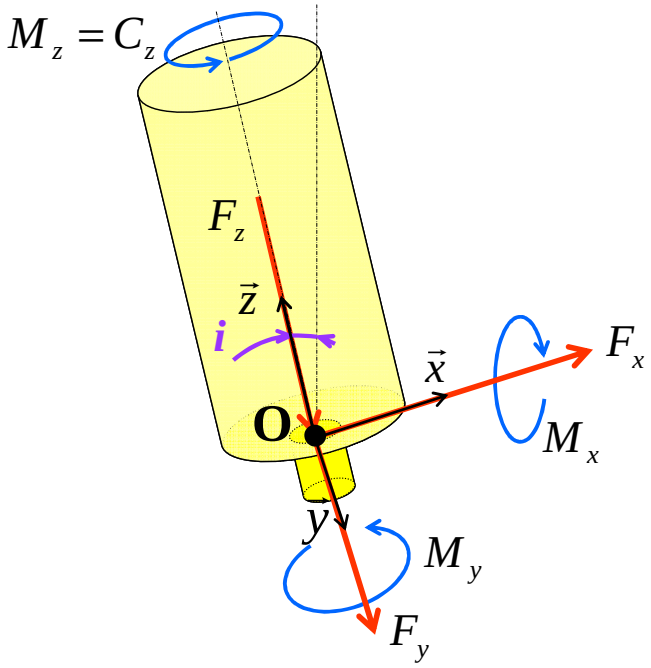


Figure 27: Efforts sur l'outil pendant l'opération de FSW [BAL09]

$$\left\{\mathcal{T}_{Outil/Pièce}\right\} = \begin{Bmatrix} F_x & M_x \\ F_y & M_y \\ F_z & C_z \end{Bmatrix}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \tag{3}$$

D'après Sheiki et Zaeh et al. [SHE05, ZAE04] l'opération de soudage peut se décomposer en deux phases distinctes, une phase de plongée et une phase de soudage dont les phases opératoires sont présentées Figure 28. Selon Zaeh et al. [ZAE04], la phase de pénétration est caractérisée par un bref pic de l'effort suivant z, lorsque l'épaulement entre en contact avec la surface des pièces. L'amplitude de ce pic est fonction de la vitesse de pénétration [SIM06]. Une fois l'outil animé d'un mouvement d'avance, l'effort selon z atteint une valeur constante lorsque l'opération est pilotée en position [ZAE04]. Il est à noter que ces deux phases se distinguent par la cinématique et par les efforts appliqués.

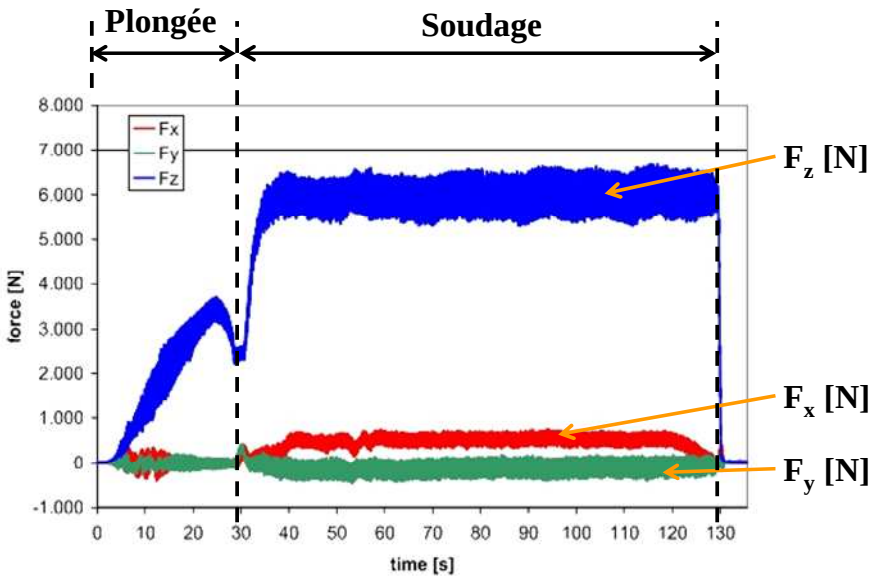


Figure 28: Courbes caractéristiques des efforts. Direction de soudage : axe x. Soudure réalisée par un robot polyarticulé piloté en effort [VOE06]

4.2. Les efforts en phase de plongée

4.2.1. Présentation générale

Dans cette première phase opératoire, l'outil est mis en rotation et est inséré progressivement dans le plan de joint comme schématisée à la Figure 29. Pour permettre à l'outil de progresser dans l'interface des pièces, un effort ou un mouvement axial lui est imposé. Les déformations plastiques et les frottements mis en jeu entre le pion et les pièces provoquent une montée progressive en température du matériau [GER07, MAN08]. Sous l'action de l'effort axial et grâce au changement de comportement du matériau avec la température, le pion va s'enfoncer progressivement entre les deux pièces en extrudant la

matière malaxée. Il pénètre dans la matière jusqu'à ce que l'épaulement soit en contact avec la surface des pièces à souder.

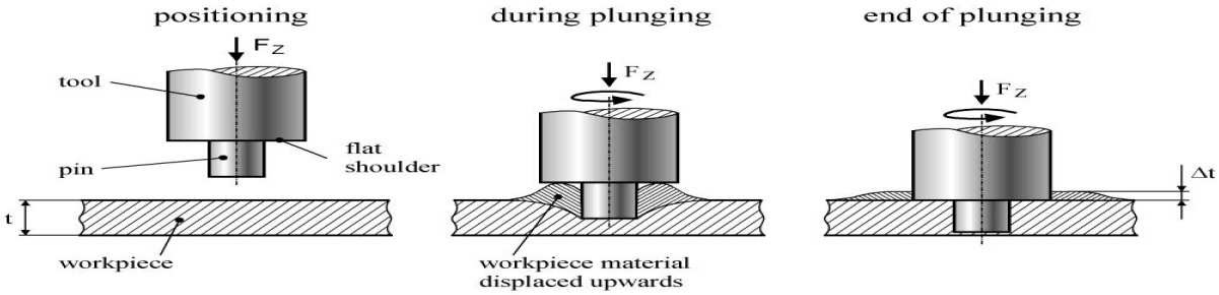


Figure 29: Schématisation de la phase de plongée [ZAE04]

Comme souligné par Gerlich et al. [GER05] cette phase opératoire est peu étudiée dans la littérature. Pourtant, elle initie les conditions thermomécaniques dans lesquelles l'opération de soudage va débuter [MAN08, GER07].

4.2.2. Les efforts et les couples mis en jeu

Gerlich et al. [GER05] ont étudié l'évolution des courbes d'effort et de couple générées lors de la phase de plongée, voir Figure 30. Ils identifient deux pics d'effort distincts. Le premier pic, F_1, correspond à l'amorçage de l'insertion du pion au sein du matériau froid [LIE03, GER05]. L'éjection de petits débris de matière peut être visualisée, Figure 31-A. D'après Gelrich et al [GER05], le contact entre l'outil et les pièces génère le cisaillement de la matière, entraînant la formation et la propagation de fissures. En atteignant la surface des pièces, elles conduisent à la formation des débris visualisés.

L'immersion progressive du pion génère des déformations plastiques et des frottements provoquant un échauffement de la matière. Les températures les plus élevées se situent sous le pion, comme montré par Gerdoux [GUE07] à l'aide de la simulation numérique. Ceci facilite la progression du pion au sein de matière et se traduit par une chute de l'effort axial. L'adoucissement de la matière et la cinématique du pion entraînent la formation de matière extrudée qui remonte le long du pion [ZAE04, GER05], voir Figure 31-B. Le volume de matière déplacée équivaut, selon Zaeh et al. [ZAE04], au volume du pion immergé. Lorsque l'épaulement entre en contact avec le matériau extrudé, Figure 31-C, l'intensité de l'effort axial connaît un nouvel accroissement. La matière extrudée se retrouve alors emprisonnée entre l'épaulement et la surface des pièces [GER05]. La matière est ainsi forgée et déformée plastiquement puis refoulée sous l'épaulement à la fin de la plongée [GER05]. Un second pic d'effort F_2 apparaît lorsque l'épaulement est parfaitement en contact avec la surface des pièces [ZAE04].

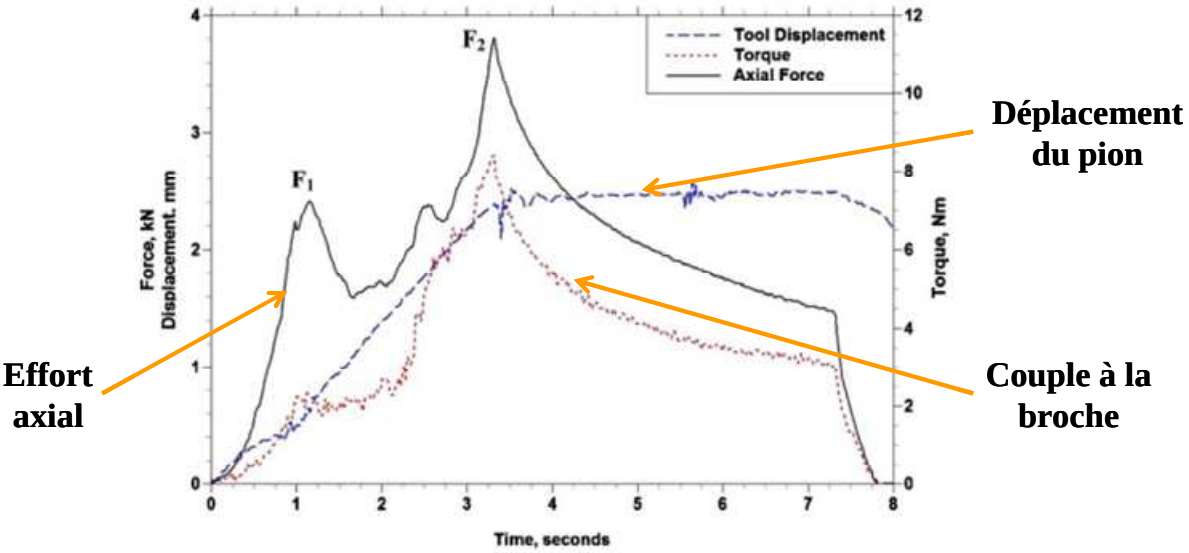


Figure 30: Force axiale et couple à la broche lorsque l'outil entre dans la matière [GER05]

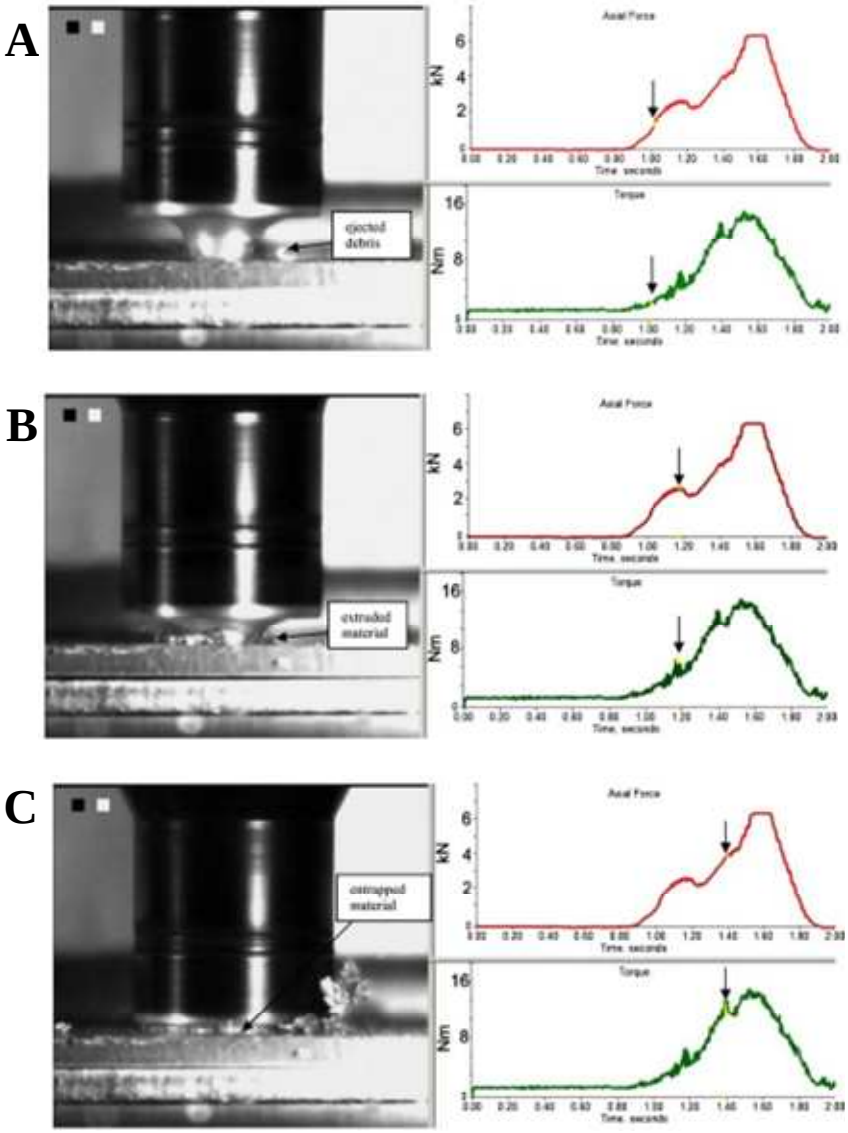


Figure 31: Correspondance entre les efforts et couples générés par rapport à la position de l'outil [GER05]

Zaeh et al. [ZAE04] montrent que l'usinage d'un pré-trou permet de réduire les efforts appliqués en fin de pénétration. La Figure 32 présente l'effort axial maximal obtenu avec et sans pré-trou. Les efforts les plus faibles sont obtenus pour le pré-trou réalisé avec le plus grand diamètre. Le pré-trou réduit le volume de matière extrudée, remontant le long du pion. Ainsi, l'effort nécessaire pour écraser la matière extrudée, se trouvant entre l'épaulement et la surface des pièces, est plus faible.

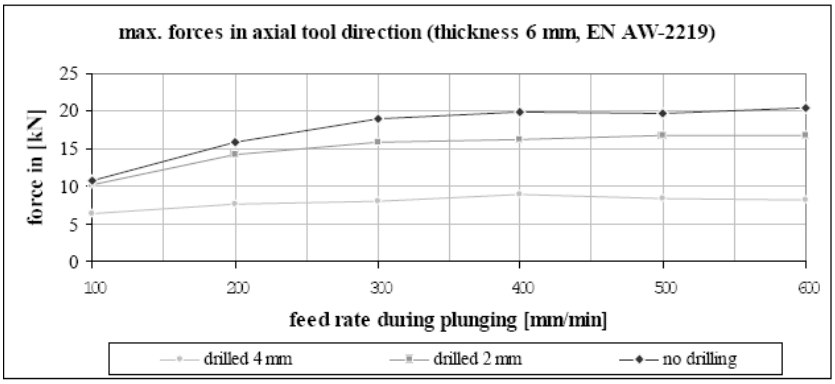


Figure 32: Comparaison des efforts de plongée avec et sans pré-trou [ZAE04]

4.3. Les efforts en phase de soudage

La génération du cordon de soudure FSW s'effectue grâce au flux de matière résultant de l'application des paramètres de conduite sur l'outil. Le torseur des actions mécaniques est fonction du matériau soudé et des paramètres de conduite appliqués [JOH01]. La phase de plongée présentée précédemment est généralement suivie du dwell time, ou temps de maintien, pour permettre à la matière située autour de l'outil d'atteindre l'état visco-plastique adapté pour démarrer l'opération de soudage [JOH01]. La durée de cette phase a été étudiée expérimentalement par Johnson [JOH01]. Il constate au cours de celle-ci une chute du couple et de l'effort F_z. La Figure 33 présente les efforts F_z et F_x ainsi que le couple C_z pendant les phases de temps de maintien et en soudage.

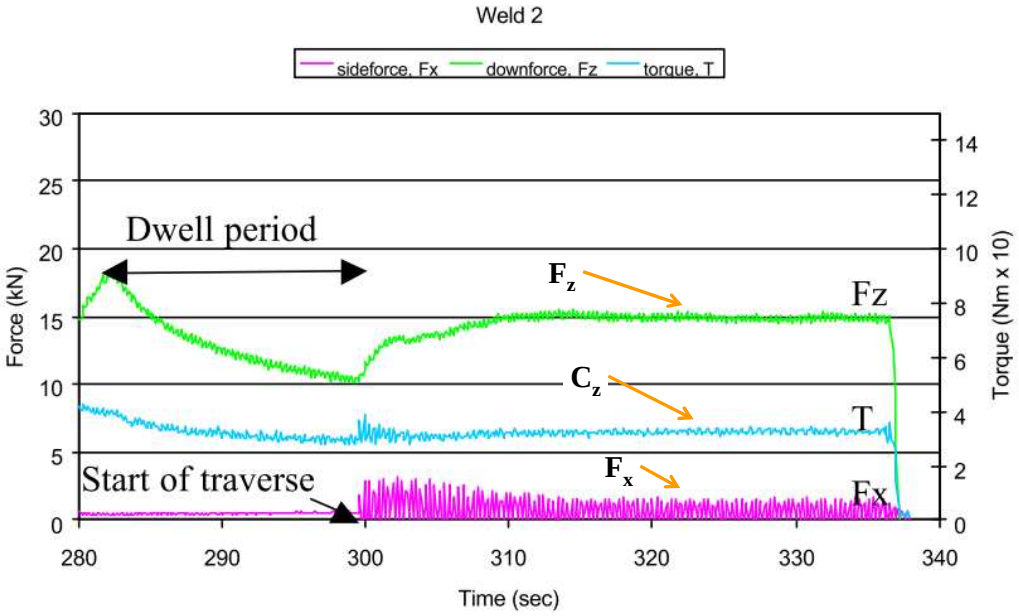


Figure 33: Efforts générés lors du soudage avec un contrôle en position de la hauteur de l'outil [JOH01]

4.3.1. Compréhension des phénomènes mis en jeu

- L'effort axial, F_z

La formation du cordon de soudure requiert d'avoir l'épaulement de l'outil dans une position donnée par rapport à la surface afin d'assurer l'apport d'énergie par frottement et de contenir le matériau malaxé [JOH01]. Comme présenté précédemment, une mauvaise position de l'outil peut entraîner la formation de défauts [KUM07, ZHA07]. Elle peut se contrôler de deux manières, soit par le pilotage de la position verticale de l'outil, soit par le contrôle de l'effort F_z appliqué. Cet effort reste déterminant pour obtenir une qualité de joint [ZHA07, KUM07]. Zhang et al, [ZHA07a] à travers la simulation numérique, ont montré qu'une pression trop faible appliquée sur l'outil entraînait la formation d'un défaut tunnel à l'arrière du pion, dû à une déformation plastique du matériau insuffisante. A contrario, une pression sur l'outil trop grande implique un enfoncement de l'outil au sein de la matière, dû à une déformation plastique et à une température du matériau trop importantes [ZHA07a].

- La composante d'efforts suivant la direction d'avance et latérale

Deux autres composantes de l'effort s'appliquent également sur l'outil comme présenté sur la Figure 34. L'effort d'avance F_x est orienté dans la direction de soudure [FUL07, JOH01]. L'effort transverse F_y est d'après Muthukumaran et al. [MUT08], perpendiculaire à F_x et appliqué par l'outil vers le côté recul de la soudure (Figure 34).

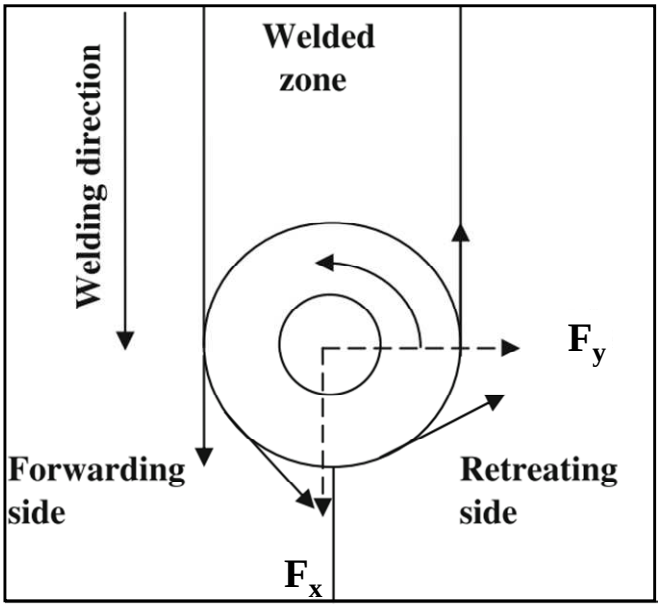


Figure 34: Schématisation des efforts suivant l'avance et latérale appliqués par l'outil sur les pièces à souder pendant le soudage FSW [MUT08]

D'après Balasubramanian et al. et Muthukumaran et al. [BAL09, MUT08], les efforts latéraux et d'avance résultent du flux de matière généré autour de l'outil. D'après Balasubramanian et al. [BAL09] l'origine de ces efforts serait due à des conditions thermomécaniques, de viscosité et de température différentes à l'avant et à l'arrière du pion. Les efforts F_x et F_y résultent de la résistance appliquée sur le pion par le matériau pré-chauffé et non malaxé situé à l'avant du pion et de l'effort appliqué sur le cordon juste formé à l'arrière du pion [BAL09]. Ils définissent alors l'amplitude de cet effort résultant, équation (4), et son orientation par rapport à l'axe x (équation (5)) [BAL09].

$$F_r = \sqrt{\left(F_x^2 + F_y^2\right)} \tag{4}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) \tag{5}$$

Sur la Figure 35, ces efforts connaissent une variation d'amplitude au cours d'une révolution de l'outil. Celle-ci d'amplitude est également présentée par Jene et al. et Balasubramanian et al. [JEN08, BAL09]. D'après Muthukumaran et al. [MUT08] des changements de conditions thermomécaniques entraînent une variation des conditions de contact entre l'outil et le matériau faisant évoluer la contrainte de cisaillement. Au cours d'une révolution, il y a passage d'un contact collant « stick condition », à un contact glissant « slip condition » [MUT08]. Ils sont à l'origine d'une variation de la pression de contact appliquée sur l'outil au cours d'une révolution [MUT08]. Ces phénomènes mis en jeu sont directement liés au métal transféré par l'outil et génèrent la variation d'amplitude des efforts [MUT08].

D'autre part, l'excentricité de l'outil par rapport à l'axe de rotation de la broche contribue, dans une certaine mesure, au mouvement de matière et à la variation d'amplitude des efforts [MUT08, BAL09]. Cette idée a également été proposée par Gratecap [GRA07].

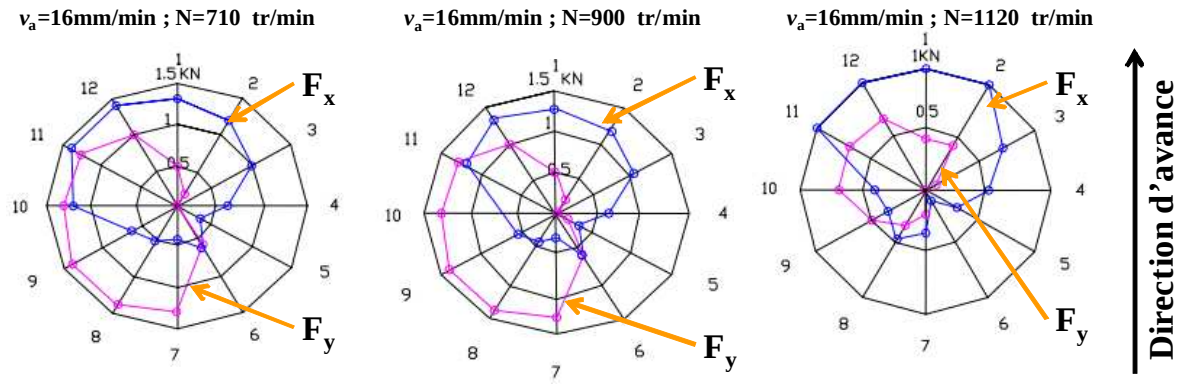


Figure 35: Directions des efforts F_x et F_y lorsque l'outil réalise une révolution [MUT08]

D'après Zaeh et al. [ZAE04], l'effort principal reste F_z. Toutefois les amplitudes de F_x et F_y sont non-négligeables car F_x peut avoir une amplitude allant jusque 20 à 25% de l'effort F_z appliqué [ZAE04], alors que F_y peut avoir une amplitude de l'ordre de 5 à 10% de F_z [ZAE04, BAL09, MUT 08].

Comme ces efforts sont liés au flux de matière [BAL09, MUT 08], leurs amplitudes pourront donc être influencées par les paramètres opératoires.

- Le couple C_z

Au cours du soudage, l'épaulement est en contact avec la surface soudée et le pion est intégralement immergé au sein de la matière. Celle-ci applique donc sur l'outil une résistance à la rotation, se traduisant par un couple à la broche. Ce couple, tout comme les efforts, est fonction du matériau et des paramètres opératoires. Arora et al. [ARO09] calculent le couple appliqué sur l'outil avec l'équation (6). Ils obtiennent une bonne concordance entre les calculs numériques et les résultats expérimentaux.

$$Q = \oint_A \vec{r}_A \times (\vec{\tau}_t d_A) \qquad (6)$$

où : r_A est la position du vecteur surface, d'un élément, par rapport à l'axe de rotation

τ_t est la contrainte totale de cisaillement à l'interface outil / matière

La contrainte de cisaillement est un paramètre fonction du matériau et de son état visco-plastique. Ces derniers sont fonctions des paramètres opératoires. Dans diverses études, [JOH01, PEE03, ARO09], il est démontré que les paramètres opératoires et tout particulièrement la fréquence de rotation influencent fortement la valeur du couple.

La puissance totale est définie d'une manière générale par le co-moment des torseurs des actions mécaniques et cinématique (équation (7)).

$$P_{totale} = \left\{ \mathcal{T}_{pion/pièce} \right\} \otimes \left\{ \mathcal{T}_{pion/pièce} \right\} \quad (7)$$

Comme la puissance liée à l'avance de l'outil (effort d'avance•vitesse d'avance) est négligée, car elle ne représente que 0.1% de la puissance totale [PEE06], le calcul de la puissance se limite à l'équation (8).

$$P[W] = C_z\,[Nm] \times \omega\,[rad/s] \quad \text{[MIS05, PEE06, ARO09]} \quad (8)$$

L'énergie nominale de soudage, c.à.d. l'énergie dissipée par unité de longueur [PEE06], est définie comme le rapport entre la puissance de soudage et la vitesse d'avance (équation (9)). Il est à noter que l'énergie dissipée n'est pas uniquement contrôlée par les paramètres opératoires, comme cela peut l'être en soudage à l'arc. En FSW, il ne sera donc pas possible de contrôler de manière directe l'apport d'énergie, car c'est une fonction des paramètres d'entrée et du comportement du matériau. Ceci est une particularité des procédés de soudage par friction.

$$E_n = \frac{Puissance}{v_a} = \frac{C_z \times \omega}{v_a}[J/mm] \quad \text{[PEE06]} \quad (9)$$

L'équation (9) montre que le couple C_z est la seule composante du torseur des intéractions outil / matière intervenant dans l'expression de l'énergie nominale. La Figure 36 présente l'évolution des maxima de température enregistrés par des thermocouples au sein de la pièce et de l'énergie nominale en fonction des paramètres opératoires. Les tendances des courbes et des amplitudes enregistrées sont les mêmes. Ceci montre qu'il y a une corrélation entre énergie nominale et température lors du soudage. De plus, l'expérimentation permet de mettre en évidence que la température atteinte et l'énergie nominale sont plus sensibles aux variations de la vitesse d'avance qu'à la fréquence de rotation [PEE06].

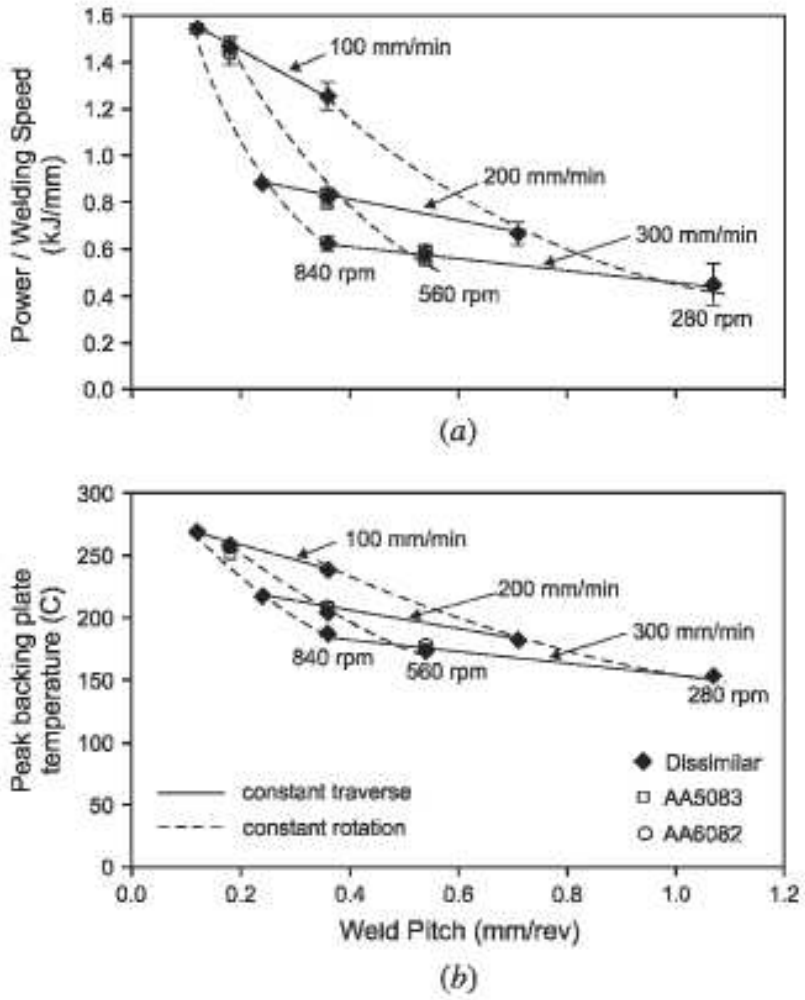


Figure 36: Evolution, en fonction de N et de v_a, de l'énergie nominale (a) et du pic de température enregistré en cours de soudure (b) [PEE06]

4.3.2. Détection des défauts à l'aide de l'analyse des efforts

Balasubramanian et al. ainsi que Jene et al. [BAL09, JEN08] partent de la constatation que les amplitudes des efforts F_x et F_y sont intimement liés au flux de matière. Ils sont partis du principe qu'un défaut tunnel interne, signe d'un malaxage impliquant un manque de matière, génère des modifications au niveau des efforts F_x et F_y, par rapport à une soudure sans défaut. Pour ce faire, Balasubramanian et al. [BAL09] ont analysé l'orientation de l'effort résultant tandis que Jene et al. [JEN08] ont étudié l'amplitude de F_x et F_y ainsi que les phénomènes oscillatoires au travers d'une analyse de Fourier (FFT).

Balasubramanian et al. [BAL09] ont étudié l'amplitude et l'orientation de l'effort résultant F_R au cours d'une révolution de l'outil. L'étude, présentée sur la Figure 37, montre que lorsque la soudure comporte un défaut tunnel interne, l'orientation de cet effort change. Lorsque la soudure ne comporte pas défaut interne (Figure 37-A) alors l'orientation de l'effort F_R appliqué par l'outil sur la pièce est située entre le talon de l'outil (« trailing edge ») et le côté avance, c.à.d entre 180°, 270° et 0° du diagramme polaire. Par contre, ils constatent que

lorsque la soudure comporte un défaut interne, l'orientation de l'effort F_R appliqué par l'outil sur la pièce se décale vers le côté recul de la soudure, c.à.d entre 90°, 180° et 270° du diagramme polaire (Figure 37 –B) [BAL09]. Ils attribuent ce décalage de l'effort à l'insuffisance de matière autour du pion, qui est à l'origine du défaut tunnel.

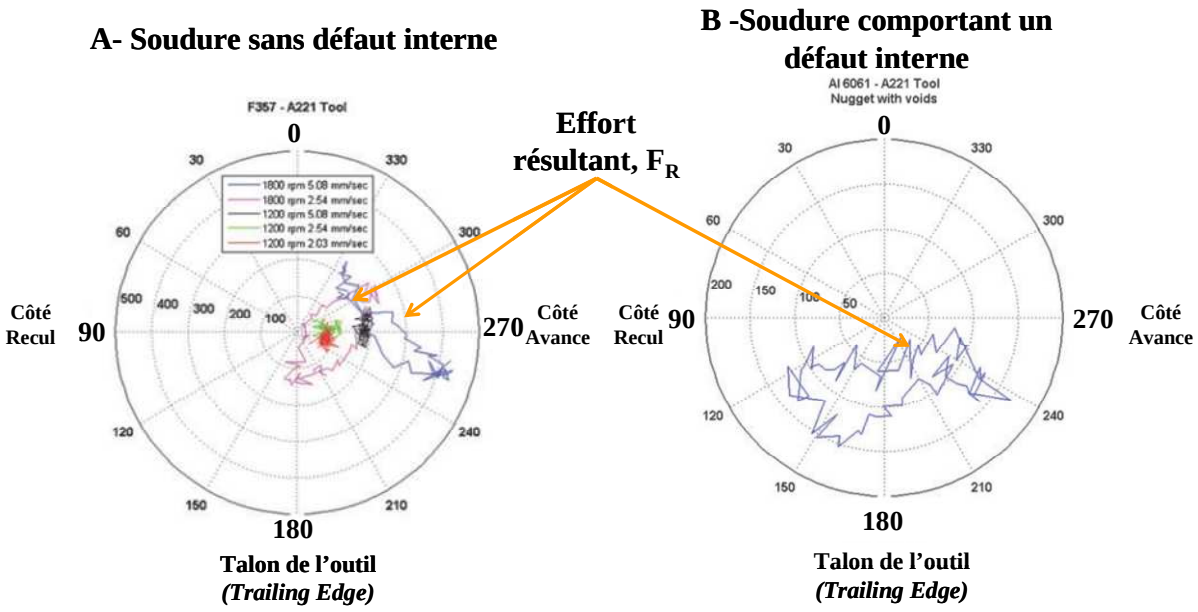


Figure 37: Etude de la direction de l'effort résultant F_R au cours d'une révolution de l'outil, pour une soudure sans défaut (A) et avec un défaut (B) [BAL09]

Jene et al. [JEN08] ont également étudié les efforts F_x et F_y mais cette fois-ci, au travers de l'amplitude [JEN08]. Ils constatent que lorsqu'un défaut tunnel est présent, l'amplitude de F_x, F_y et F_z augmente, comme présenté sur la Figure 38 (avec un contrôle en position). Ils attribuent cette augmentation à l'instabilité du pion pendant le soudage, résultant d'un manque de matière malaxée autour de celui-ci [JEN08].

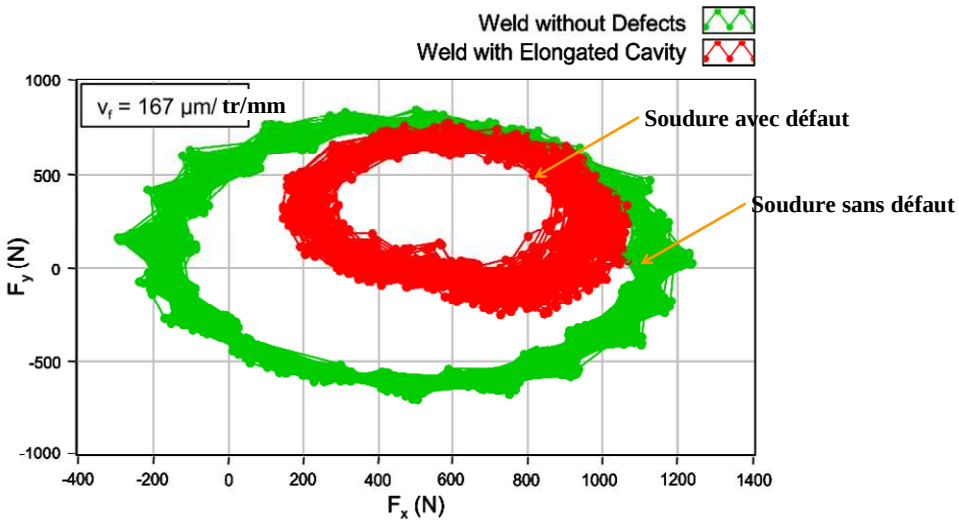


Figure 38: Amplitude des efforts F_x et F_y mesurés par Jene et al. [JEN08] pendant 2s de soudure à une fréquence d'acquisition de 400Hz

Ils ont analysé le phénomène oscillatoire visualisé sur les courbes d'efforts. La Figure 39 présente les oscillations sur les efforts F_x, F_y et F_z. Ils réalisent sur ces efforts mesurés en

cours du soudage une analyse de Fourier (Short Time Fourier Transform). L'analyse des résultats leur permet de savoir à partir de quel instant un défaut tunnel s'est créé dans le cordon. La précision de cette analyse permettrait de déceler la présence des défauts internes de la taille de 100µm [JEN08] et de réaliser des actions de contrôles pendant la phase de soudage [JEN08].

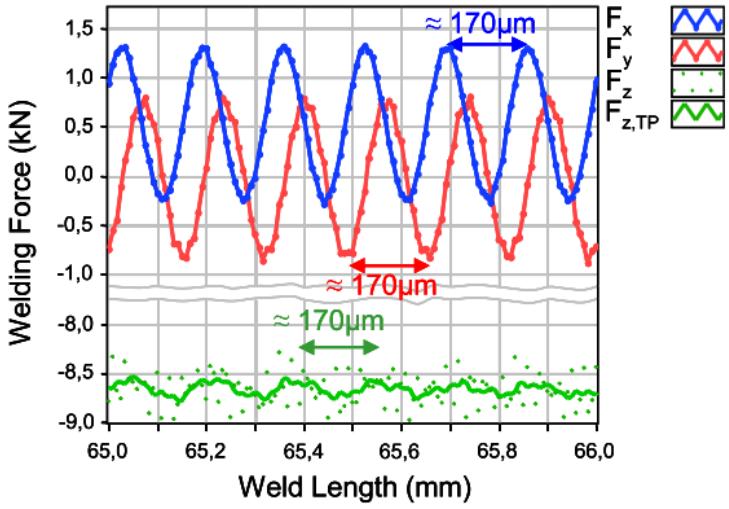


Figure 39: Visualisation des oscillations présentes dans la mesure des efforts F_x, F_y et F_z en soudage FSW [JEN08]

- Les Moments M_x et M_y

Dans la Figure 27 Balasubramanian et al. [BAL09] montrent que sur l'outil s'applique également des moments suivant (O, x) et (O, y), respectivement dénommés M_x et M_y. A ma connaissance ces deux moments ne sont pas évoqués dans la littérature. Sont-ils négligeables ?

4.3.3. Influence des paramètres opératoires sur les efforts et le couple de soudage

Les paramètres opératoires et la géométrie de l'outil ont un impact sur les forces et les couples s'exerçant sur l'outil. En effet, ils génèrent le flux de matière et conditionnent l'état thermomécanique du matériau [BAL09]. Ainsi, selon Sheiki ou Balasubramanian et al. [SHE05, BAL09] des paramètres de conduite entrainant des conditions thermiques plus élevées permettront d'augmenter le volume de matériau plastifié à l'avant du pion. Cela permet la réduction des efforts F_x et F_y.

- Influence de la vitesse d'avance

Beaucoup d'auteurs [JOH01, ZAE04, BAL09, MUT08] démontrent qu'à fréquence de rotation constante, l'amplitude des composantes F_x et F_y augmentent avec la vitesse d'avance. La Figure 40 présente ces résultats. D'après Muthukumaran et al. [MUT08], l'augmentation de l'effort transverse F_y est due à une augmentation du flux de matière.

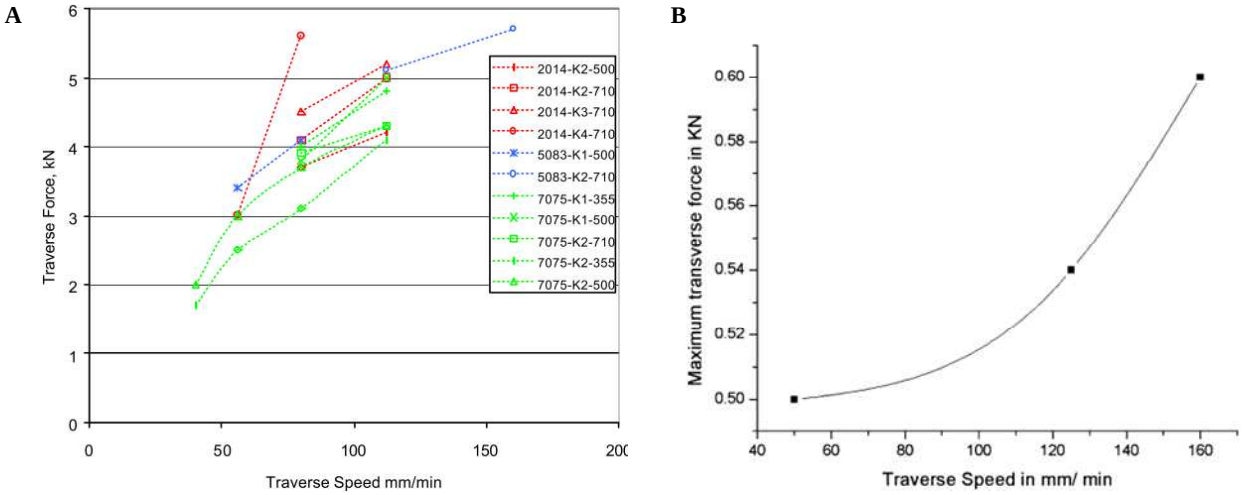


Figure 40: A- Evolution de l'effort d'avance F_x en fonction de la vitesse d'avance, à vitesse de rotation constante, pour trois alliages d'aluminium 2014-T6, 5083-H111 et 7075-T351 [JOH01]. B- Evolution de l'effort transverse F_y en fonction de la vitesse d'avance, à vitesse de rotation constante [MUT08]

Les expérimentations montrent également que le couple C_z est peu sensible à une variation de la vitesse d'avance [JOH01, PEE06, ARO09].

Lorsque l'opération de soudage est contrôlée en position, l'effort axial F_z est une réponse de la matière. Zaeh et al. Et Crawford et al. [ZAE04, CRA06] ont montré que l'effort axial augmentait avec un accroissement de la vitesse d'avance v_a. Ce résultat peut sans doute être relié à la diminution de l'énergie nominale avec la vitesse d'avance.

- Influence de la vitesse de rotation

A vitesse d'avance constante, la fréquence de rotation semble influencer les efforts F_x et F_y ainsi que le couple C_z. Un accroissement de la vitesse de rotation engendre une augmentation de l'énergie nominale E_n [PEE06], comme présentée sur la Figure 36. Une énergie nominale plus élevée témoigne des températures de soudage plus grandes [PEE06] conduisant à une augmentation du volume plastifié de la matière se situant à l'avant du pion [SHE05, BAL09]. Ceci entraine une diminution de F_x et F_y [MUT08] et du couple C_z [PEE06, JOH01, ARO09]. La Figure 41 présente l'évolution du couple et de la puissance en fonction des paramètres opératoires. On peut remarquer que le couple connaît une forte influence des variations de la fréquence de rotation [ARO09, PEE06].

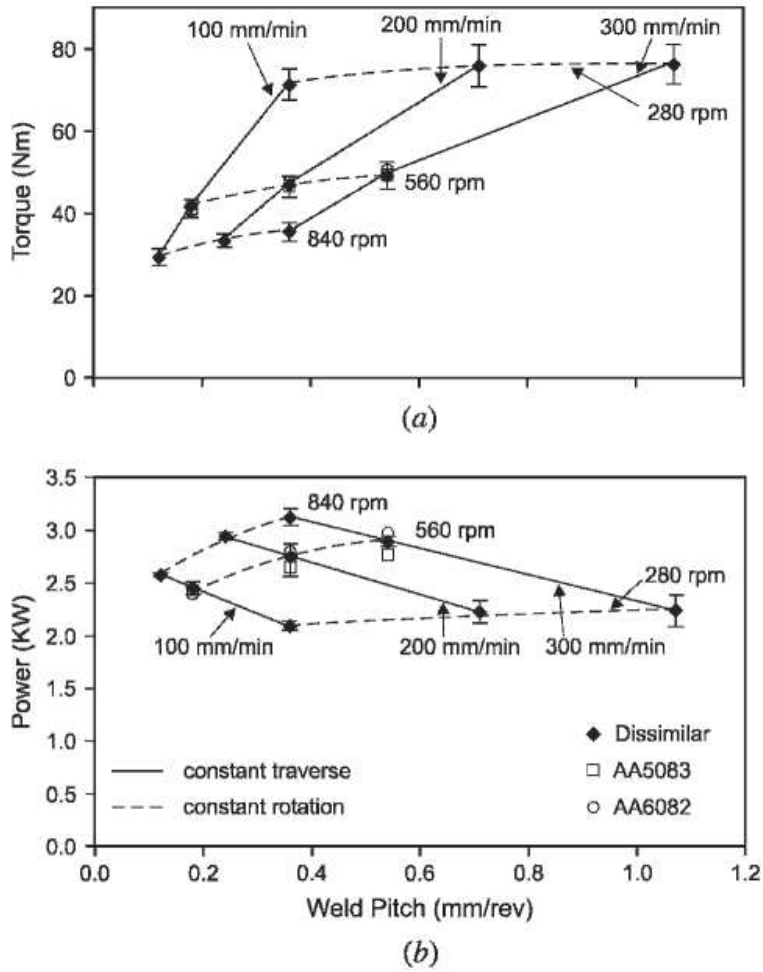


Figure 41: Evolution du couple et de la puissance à la broche en fonction des paramètres opératoires [PEE06]

- Influence de la profondeur de pénétration

Johnson et al. [JOH01] ont augmenté progressivement la profondeur de plongée, Δ_z, au cours du soudage piloté en position. Ils enregistrent une élévation des efforts F_x et F_z et du couple C_z. Il est important d'avoir une profondeur de pénétration suffisante, c.à.d. d'assurer la consolidation de la matière et ainsi éviter la formation de défaut tunnel [JOH01]. Ceci doit être le critère de calibration de la valeur de Δ_z.

Si la profondeur de plongée, Δ_z, est trop faible un défaut de pénétration partielle apparaîtra également. Ainsi, il ne semble pas intéressant, sous peine de former des défauts internes, d'utiliser ce paramètre pour influencer les actions mécaniques appliquées sur l'outil.

- Influence de la géométrie de l'outil

La géométrie de l'outil par ses formes et les diamètres de l'épaulement et du pion ainsi que la présence de filets et de méplats influencent directement le flux de matière[BAL09, MUT08]. Par conséquent, ils impactent les actions mécaniques appliquées sur l'outil [BAL09, MUT08].

Johnson a étudié l'influence de quatre outils, présentés sur la Tableau 5, sur le couple C_z, l'effort F_z (contrôle en position) et sur F_x [JOH01]. La géométrie de ces outils est identique, car seuls les diamètres d'épaulement et de pion varient. Lorsque l'épaulement passe de 20 à 25mm, la surface de l'outil augmente de 170mm^2. Par contre, la variation globale de surface de l'outil, due à la modification de la géométrie du pion, est négligeable comparée à celle engendrée par la variation de l'épaulement [JOH01]. Ainsi Johnson ne constatera pas par l'expérimentation de variation notable des efforts et du couple entre les outils K1 et K2 ainsi qu'entre K3 et K4.

Tool	Shoulder Diameter, mm	Centre Pin Diameter, mm	Pin Length, mm
K1	25	10	6.1
K2	25	8	5.8
K3	20	8	5.6
K4	20	9	6.15

Tableau 5: Désignation et géométrie des outils utilisés par Johnson [JOH01]

Le Tableau 6 présente les résultats expérimentaux obtenus par Johnson [JOH01] pour deux matériaux donnés. Il constate que le diamètre de l'épaulement a une influence sur le couple C_z et l'effort axial F_z. La réduction du diamètre de l'épaulement permet de réduire le couple à la broche C_z et l'effort axial F_z [JOH01]. Ces diminutions sont significatives et semblent être un des leviers d'action pour favoriser l'utilisation de moyens de production FSW à capacité en effort limitée.

Alliage	Outil	N [tr/min]	v_a [mm/min]	F_x [kN]	F_z [kN]	C_z [Nm]
6082-T6	K1 *(Ø25)*	500	80	0.6	14.5	56
	K2 *(Ø25)*	500	80	1.4	13.5	56
	K3 *(Ø20)*	500	80	1.2	11	41
	K4 *(Ø20)*	500	80	1.3	10.5	41
2014-T6	K1 *(Ø25)*	500	80	4.9	20	42
	K2 *(Ø25)*	500	80	3.7	22.5	41
	K3 *(Ø20)*	500	80	4.2	17.5	32
	K4 *(Ø20)*	500	80	1.9	14.5	31

Tableau 6: Evolution des efforts et du couple enregistrés pour différentes géométries d'outil [JOH01]

Cette variation des efforts et du couple semble donc être simplement liée à une différence de géométrie de l'outil, c.à.d de la surface de contact à l'interface outil/matière et par conséquent, au volume malaxé par l'outil. A paramètres opératoires identiques, pour ces deux types d'épaulements, on obtiendra une différence d'énergie nominale apportée au soudage, donc probablement de température. Ceci montre bien l'influence de l'épaulement dans l'apport de chaleur.

Ainsi, pour faire évoluer les efforts et les couples agissant sur l'outil, au cours d'une opération de soudage FSW, deux points semblent être pertinents, la géométrie de l'outil et les paramètres de conduite.

Tout comme cela est le cas pour les procédés d'usinage, l'étude des efforts est un point incontournable pour les développements de :

- la détermination de la géométrie d'outil,
- l'étude du malaxage du matériau,
- l'analyse des interactions outil / matière
- l'étude de la qualité de la soudure.

Regardons quelles sont les conséquences des efforts générés.

4.4. Conséquences des efforts générés

L'étude des efforts montre que ceux-ci vont influencer les choix technologiques. Ils vont avoir un impact sur :

- *le choix du système de mise et maintien en position.* L'application de l'effort axial nécessite la mise en place d'une enclume à l'envers des pièces (sauf lors de l'utilisation d'un outil à double épaulement). D'autre part, l'application de la composante d'avance et latérale des efforts nécessite de brider les pièces latéralement et horizontalement, pour éviter tout mouvement relatif de celles-ci au cours du soudage [MUT08].
- *le choix de la machine de production*. Ces efforts vont se répercuter sur l'ossature de la machine, les systèmes de guidage, la broche et le système de contrôle [THO00].
- *La position de l'outil par rapport au plan de joint au cours du soudage.* L'effort résultant F_R tend à faire dévier l'outil du plan de joint. Ceci peut entraîner des défauts tels qu'une pénétration partielle, comme présentée sur la Figure 24 [HOR99]. Certains moyens de production vont être plus sensible à ce phénomène que d'autres.
- *La durée de vie de l'outil FSW.* Les efforts appliqués sur l'outil vont directement affecter sa tenue en fatigue et donc sa durée de vie.

Ainsi, le choix du moyen de production dépendra des efforts et couples appliqués sur l'outil. Regardons quels sont les moyens de production disponibles à l'heure actuelle pour réaliser du soudage FSW.

En termes d'effort, l'opération de soudage est principalement caractérisée par la phase de plongée et de soudage. Sur ces deux phases, l'action mécanique outil/matière peut être représentée par un effort axial F_z, un effort d'avance et transverse F_x et F_y et le couple à la broche C_z. L'amplitude de ces efforts peut être influencée de façon significative en agissant sur les paramètres de conduite. Ainsi, une augmentation de la fréquence de rotation induit une diminution du couple. Une augmentation de la vitesse d'avance est associée à une augmentation des efforts F_x et F_y, le couple ne connaissant pas de variation notoire.

La présence de défaut tunnel interne engendre un accroissement des efforts F_x et F_y.

Une composante dynamique des efforts est constatée. Celle-ci doit être considérée.

5. Machines de soudage FSW

Smith et Eireiner [SMI07, EIR06] proposent une synthèse complète des moyens couramment utilisés, industriellement ou expérimentalement, pour réaliser du FSW. Aujourd'hui, les principales machines utilisées sont les suivantes :

- les fraiseuses modifiées,
- les machines dédiées FSW,
- les robots à architecture parallèles (tricept),
- les robots à architecture série ou robots polyarticulés.

Chacune de ces machines possèdent des avantages et des inconvénients.

Nous proposons de regarder chacune des machines disponible à travers leurs capacités en effort, leur rigidité, leur volume de travail, etc.

5.1. Les fraiseuses modifiées

Ces machines sont largement utilisées pour les opérations d'usinage dans l'industrie. Ce sont les premières machines utilisées pour réaliser du FSW. La Figure 42 présente une fraiseuse modifiée. Elles possèdent les caractéristiques nécessaires, d'un point de vue cinématique, pour souder par FSW [PON05].

Une large gamme de machines existe, de 2 à 5 axes, permettant de réaliser des soudures en 2 ou 3 dimensions. Selon les modèles, elles peuvent appliquer jusqu'à 20kN d'effort axial, ce qui permet de souder des plaques de certains alliages d'aluminium jusqu'à 15mm d'épaisseur [ZAE04]. De même, elles disposent généralement d'une ossature rigide assurant une bonne précision du suivi de joint [EIR06].

Le principal avantage de cette machine est d'être standard. Toutefois, ces machines ne sont pas conçues pour souder par FSW. Seul le soudage avec un outil conventionnel est possible. De plus ces machines ne peuvent contrôler l'opération en effort [ZAE04, COO03]. Avec un contrôle en position, l'outil reste alors fixe par rapport à la surface des pièces tout au long du soudage, ne permettant pas de pallier à d'éventuels défauts de mise en position des pièces.

Toutefois, des systèmes ont été développés pour permettre le soudage en effort avec une fraiseuse. Gebhard et al. [GEB08] proposent ainsi d'ajouter un capteur d'effort dans la broche et de modifier le contrôleur de commande numérique de la fraiseuse. L'objectif est de générer une variation de position de l'outil, afin de maintenir constant l'effort axial appliqué [GEB08]. D'autre part, Haynie et al. [HAY06] ont breveté une broche destinée à remplacer

celle de la fraiseuse, permettant ainsi le contrôle de l'effort appliqué en adaptant la position de l'outil au cours du soudage.

Figure 42: Présentation d'une fraiseuse utilisée pour réalisér du FSW [BHA**]

5.2. Les machines FSW dédiées

Ces machines sont développées spécifiquement pour réaliser du FSW. Elles ressemblent fortement à des machines d'usinage comme le montre la Figure 43-A.

Ces machines permettent de souder en 2 ou 3 dimensions. Elles peuvent appliqués des efforts axiaux pouvant aller jusque 90kN. Leur rigidité globale assure une bonne précision du suivi de joint. De même, ses actionneurs et systèmes de guidage sont conçus pour accuser des efforts importants. Ceci leur permet de souder une large gamme de matériaux et d'épaisseurs. La Figure 43-A présente une machine permettant de souder en 2 dimensions. La Figure 43-B présente une machine de type portique cinq axes. L'avantage principal de ce type de machine est son espace de travail, l'inconvénient majeur réside dans le coût d'investissement élevé et l'accessibilité de l'outil au plan de joint [SOR07].

Etant dédiée au FSW, elles permettent de souder avec un contrôle en effort ou en position. De même, selon la machine choisie, elles offrent la possibilité d'utiliser les trois technologies d'outil FSW. Certaines d'entre elles sont mêmes munies d'un dispositif de bridage intégré (comme la machine présentée sur la Figure 43-A).

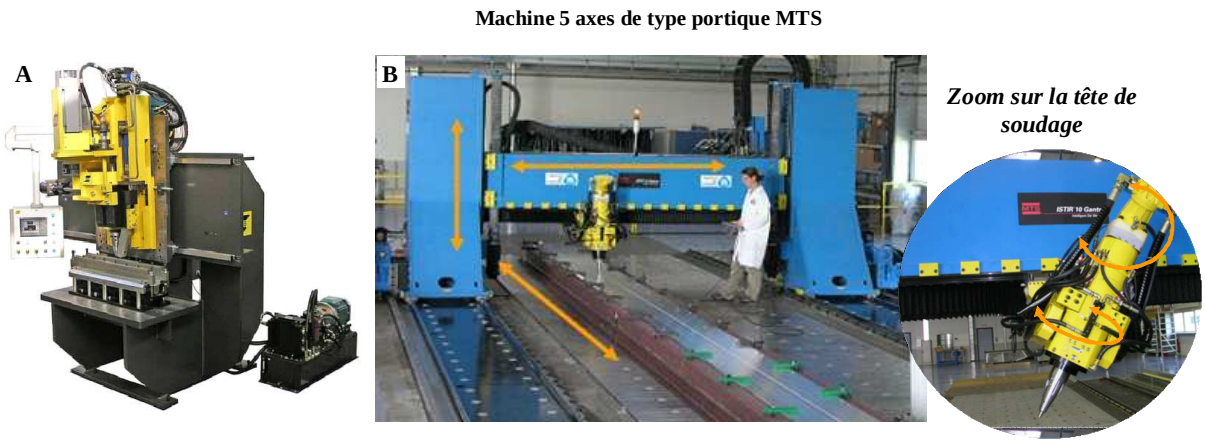


Figure 43: Exemple de machine dédiée au FSW. A- Machine ESAB Legio permettant de réaliser des soudures dans le plan (x,y). B- Machine de type portique cinq axes MTS

Généralement, on associe aux machines dédiées FSW un coût d'investissement élevé et une faible productivité [SMI00]. Par conséquent, d'autres types de machines ont été étudiés afin de permettre la réalisation de soudure en trois dimensions, d'accroître la productivité et de réduire les coûts d'investissement.

5.3. Les robots à architecture parallèle (Tricepts)

Les tricepts sont des machines d'usinage possédant une excellente précision, de l'ordre de 50µm [PKM**], de part leur grande rigidité. Cette précision est bien supérieure à celle nécessaire pour les applications de FSW. Ce type de machines est utilisé pour les applications de fraisage à grande vitesse [ZET04]. La Figure 44 présente un robot tricept T805.

Des applications FSW ont été développées sur le Tricept 805 par un centre de recherche allemand. Les tricepts permettent de souder en 2 ou 3 dimensions dans un volume de travail restreint en raison de sa conception [SOR07]. Ces robots permettent l'application d'un effort axial de 45kN tout en assurant une bonne précision dans le suivi de joint [STR00]. Le soudage FSW est réalisable uniquement avec un outil conventionnel inséré au sein du porte outil. Par contre, un système de contrôle de l'effort axial peut être ajouté [STR00].

Les tricepts semblent être un bon moyen de production pour effectuer des soudures FSW. Malheureusement, ce type d'équipement possède un coût d'investissement élevé et un espace de travail réduit [STR00, SOR07]. Ces deux caractéristiques sont des freins à son utilisation industrielle.

A

B

Effort Vertical	Effort Latéral	Puissance à la broche [kW]	Vitesse de rotation à la broche *10^3 [rpm]	Rép. [mm]	accélération [m/s²]	Vitesse max [m/min]
45kN	10kN	30kW	30	±10	20	90

Figure 44: Présentation d'un robot Tricept soudant par FSW

A- Robot Tricept 805 en cours de soudage (http://195.67.110.7/neos/pages/pg5-2_eng.htm, consulté le 20 avril 2006). B- Caractéristiques technologiques du Tricept T805 [STR00]

5.4. Les robots polyarticulés

5.4.1. Présentation générale

Les robots polyarticulés sont des machines amplement utilisées dans divers secteurs de l'industrie. On les retrouve dans la réalisation d'opérations de soudage par fusion, de palettisation, de peinture, etc. Selon Smith et al. ou Voellner et al. [SMI00, VOE07] ce type de machine pourrait contribuer à l'essor du FSW car il permettrait de réduire les coûts d'investissement comparés à ceux nécessaires à l'achat de machines dédiées FSW ou de tricepts [SMI00, VOE07, SOR08]. La Figure 45 présente un robot polyarticulé soudant une forme complexe nécessitant l'utilisation d'une machine cinq axes [VOE06]. Les robots polyarticulés utilisés pour réaliser du FSW sont des robots de forte capacité de charge, pouvant transporter 500kg au bout de leur poignet [SMI00]. Ils sont généralement utilisés pour assurer des opérations de palettisation. Des travaux réalisés par Smith [SMI00] montrent les difficultés rencontrées à souder avec des robots ayant une charge utile inférieure à 500kg.

Les robots polyarticulés offrent la possibilité de souder des formes complexes (à deux ou trois dimensions) grâce à leur flexibilité et à leur accessibilité dans un volume de travail assez vaste, jusque 120m^3 [COO03, VOE07, SMI00, SOR07]. Par contre, ils sont limités en termes de force applicable de par la capacité des motoréducteurs et la rigidité de la structure [SMI00, VOE07]. L'effort axial maximal estimé est de 13 à 15kN [SOR08, VOE06]. Cette gamme d'effort leurs permettraient le soudage de différentes géométries pour des épaisseurs pouvant aller jusqu'à 5 ou 8mm selon l'alliage soudé, comme le montre le Tableau 7. Ce dernier présente une synthèse des applications soudées par les robots IRB7600-500 et KUKA

KR500 équipés d'une tête de soudage FSW. Il permet d'estimer le potentiel de ces systèmes, en termes d'applications concernant le soudage de faible épaisseur ne nécessitant pas d'effort supérieur à 15kN.

Robot ABB IRB7600-500(2)	
Alliage soudé	épaisseur
2024-T6	2mm(2)
2050-T3	2mm(2)
7020-T6	3mm(2)
7075	5mm(2)

Robot KUKA KR500(2)(3)	
Alliage soudé	épaisseur
2024-T3	de 0.3 à 2.2mm(1)
2195	5mm(1)
2219	5mm(1)
5083-H11	1 à 6mm(1) (3)
6056-T6	jusque 5mm(1)
6060-T66	de 1 à 8 mm(3)
6080-T66	de 2 à 8mm(1)
6061-T6	1.8mm(1)
AlSi9Cu3	4mm(1)

Sources
(1) Site Internet de l'iwb (Institute for Machine Tools and Industrial Management) consulté le 10/06/09
http://www.iwb.tum.de/en/Research/Joining+Technologies/Bonding+and+FSW/RoboFSW.html
(2) [SOR08] (3) [VOE08]

Tableau 7: Exemples d'applications réalisées avec des robots polyarticulés munis d'une tête de soudage FSW

Pour assurer une grande flexibilité, la conception de l'ossature des robots ne dispose pas d'une rigidité importante. Ainsi, les articulations du robot se déformeront sous l'action des efforts appliqués sur l'outil [STR00]. Cette déformation sera fonction de l'effort appliqué et de la position du robot. Ceci tendra à dévier l'outil de sa trajectoire programmée [STR00] pouvant entrainer des défauts au sein de la soudure comme par exemple, le défaut de pénétration partielle.

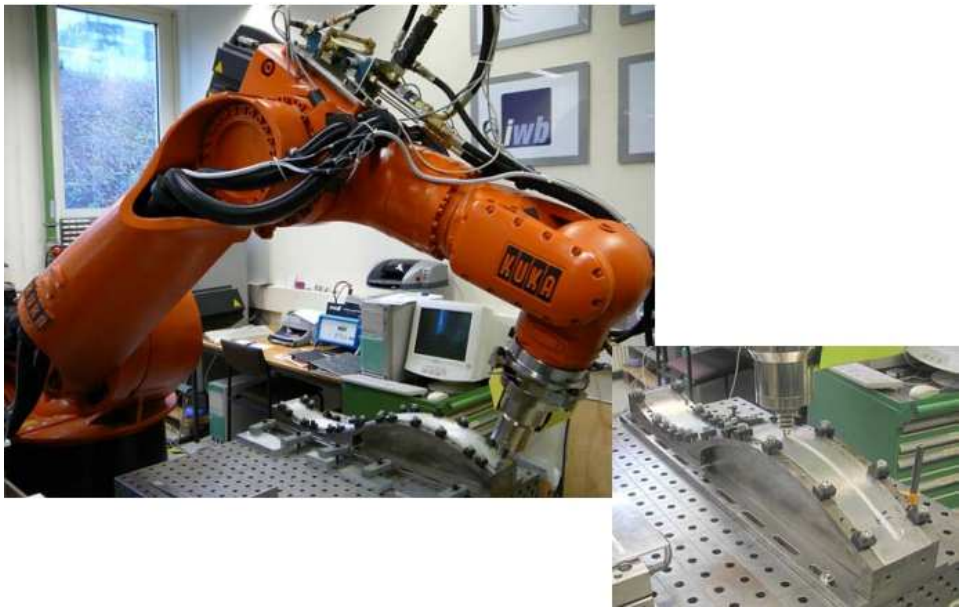
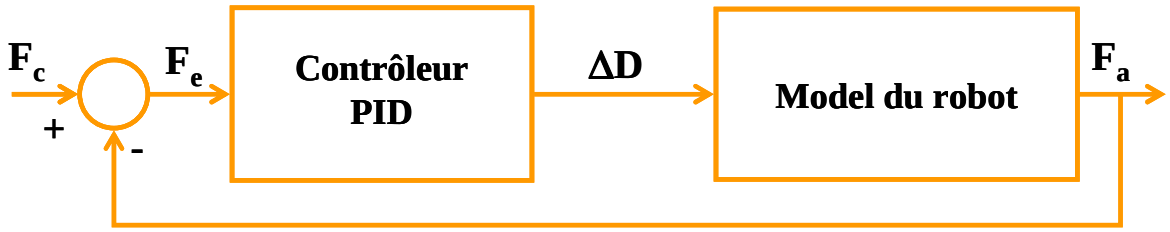


Figure 45: Robot polyarticulé soudant une pièce possédant des surfaces concaves et convexes [VOE07]

Les systèmes robotisés FSW aujourd'hui utilisés permettent de souder avec un outil conventionnel en utilisant un contrôle en effort ou en position. Toutefois, les travaux de

recherche démontrent qu'il est nécessaire de contrôler l'opération en effort afin de réaliser des soudures de qualité [SMI00, COO03]. Contrairement à un contrôle en position, le contrôle en effort permet d'assurer le contact nécessaire entre l'épaulement et la surface des pièces. Selon Cook et al. [COO03], il existe deux possibilités de mise en œuvre du contrôle en effort : programmer une boucle de régulation permettant de maintenir constante la distance outil / pièce ou contrôler directement l'effort appliqué [COO03]. Il préconise ce dernier mode de contrôle car il n'interfère pas avec la commande déjà existante du robot [COO03]. D'autre part, Smith [SMI00] a développé un système de contrôle en effort basé sur la mesure des couples aux axes du robot [SMI00]. La boucle de contrôle est ajoutée au système de commande. Elle est présentée sur la Figure 46. D'autres auteurs préconisent également l'utilisation du contrôle en effort lors de l'utilisation d'un robot polyarticulé pour souder par FSW [SMI00, CRA06, VOE08, SOR07].



F_c Effort de commande
F_e Erreur entre l'effort mesuré et de l'effort de commande
F_a Effort actuel, calculé à partir des couples moteurs mesurés
ΔD Modification de la position cartésienne de l'outil

Figure 46: Modélisation de la boucle ajoutée au système de commande pour assurer le contrôle en effort de l'opération de soudage [SMI00]

5.5. Comparaison de la qualité des soudures obtenues avec divers moyen de production

Voellner et al. [VOE08] ont fait une étude comparant les soudures bout à bout de longueur 270mm obtenues par trois types de machines, une fraiseuse modifiée, une machine dédiée au FSW et un robot polyarticulé. Les conditions opératoires (paramètres de conduite, bridage, etc..) étaient autant que possible identiques pour chacun des essais. Le Tableau 8 présente les différentes configurations testées. Au total, ils ont réalisé 96 essais et les ont contrôlé [VOE08]. Cette vaste expérimentation leur a permis de conclure que les soudures obtenues sont de même qualité quelle que soit la machine utilisée [VOE08].

	force Fz [kN]	tool rotation speed [rpm]	travel speed [mm/min]
AC-46000 – 4 mm	4.5	1400	400
AW-5083 – 1 mm	3.0*	1300	400
AW-5083 – 4 mm	8.0	1600	300
AW-5083 – 6 mm	8.0	2000	300
AW-6060 – 2 mm	3.5	1500	600
AW-6060 – 4 mm	4.5	1500	600
AW-6060 – 6 mm	5.0	1800	600
AW-6060 – 8 mm	5.0	1800	600

*) FSW machine: 3.5 kN

Tableau 8: Configurations de soudage testées su les trois types de machine par Voellner et al. [VOE08]

Par contre, les expérimentations réalisées par Soron [SOR08] et Voellner et al. [VOE06, VOE07] montrent que les robots polyarticulés rencontrent des problèmes en FSW liés au manque de rigidité, tels que :

- Une adaptation de la profondeur de plongée [SOR08]. L'effort appliqué lors de la plongée de l'outil provoque une déformation de l'ensemble du robot. Cette déformation engendre des variations entre la position réelle de l'outil et la position calculée par la commande. Lors de l'expérimentation, Soron [SOR08] montre qu'il est obligé de surestimer la profondeur de pénétration de plusieurs millimètres afin d'assurer une pleine pénétration à la fin de l'opération de plongée.
- Une déviation de l'outil en cours de soudage par rapport au plan de joint [VOE06, VOE07]. Voellner et al. [VOE07] ont montré que l'outil pouvait se décaler de 2mm lorsque l'effort appliqué est de 9kN. Ils précisent que l'amplitude de cette déviation dépend de la direction d'application de l'effort et de la position du robot dans son espace de travail [VOE07]. Ce défaut a été présenté précédemment et les études avaient montré qu'à partir d'un certain décalage, un défaut de type « pénétration partielle » pouvait survenir [HOR99, SYL**].

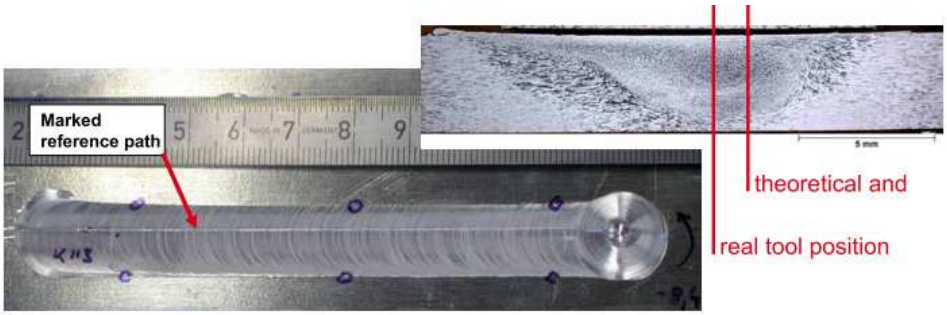


Figure 47: Réalisation d'une soudure avec un robot polyarticulé. L'effort appliqué est de 6kN et la déviation mesurée de l'outil par rapport au plan de joint est de 1mm [VOE06]

D'autres défauts apparaissent également avec ce type de machine, tels que des défauts d'orientation de l'outil par rapport au plan de joint. Ils entrainent sans doute également des abattements de propriétés mécaniques de la soudure obtenues.

Les robots polyarticulés présentés dans la littérature semblent avoir de réels potentiels industriels. Ils peuvent sans doute, comme le pensent Smith et al. [SMI03] jouer un rôle dans le développement de produits soudés par FSW. Toutefois, étant limités en termes d'effort, des travaux de qualification de ces systèmes doivent encore être réalisés afin de mieux cerner les capacités de soudage dans l'espace de travail et de quantifier les défauts liés à leur manque de rigidité.

5.6. Bilan des moyens de production

Chacune de ces machines possède des niveaux d'intelligence, de capacités en efforts, de rigidités et des volumes de travail différents. Elles possèdent également des coûts d'investissement distincts. Selon leurs applications et le contexte industriel le choix d'une machine devra être fait. Dans un premier temps, en analysant la géométrie et la configuration du joint soudé, le nombre d'axes machine requis pour suivre la trajectoire peut être déterminé ainsi que l'espace de travail [SMI07, YAV04]. Ceci permettra de cerner le type de machines à utiliser. Toutefois, ces caractéristiques ne permettent pas de définir l'ensemble du cahier des charges techniques d'une machine FSW. L'étape d'identification des paramètres caractéristiques pour le dimensionnement d'un moyen de production FSW représente une étape essentielle dans l'industrialisation de ce procédé. Ceci constitue la pierre angulaire de nos travaux de recherche présentés dans ce mémoire. Dans les chapitres suivants, nous présenterons la méthodologie proposée pour dimensionner un moyen de production, à travers l'analyse de l'interaction produit / procédé / ressources.

Quatre familles de machines sont aujourd'hui utilisées, les fraiseuses, les machines dédiées, les robots polyarticulés et les robots à structure parallèle (tricepts). Chacune d'entres elles se distinguent par leurs capacités géométriques, leur raideur et les efforts qu'elles sont capables d'appliquer / subir.

Les machines dédiées permettent d'appliquer une grande gamme d'efforts, mais disposent d'une aptitude géométrique limitée pour la réalisation de soudure de forme complexe. Au contraire, les robots polyarticulés ont une bonne accessibilité au joint mais ne peuvent pas développer d'efforts importants, sont « souples » et nécessitent une modification de leur commande pour assurer le contrôle en effort de la soudure.

6. Conclusion

Au travers de ce premier chapitre, le procédé FSW a été présenté d'une manière générale, permettant d'en comprendre les phénomènes physiques. L'étude bibliographique montre que la génération du cordon de soudage est réalisée grâce au flux de matière généré

par les actions mécaniques appliquées par l'outil sur la matière. Ces dernières conditionnent les choix technologiques comme par exemple le choix d'une machine FSW. Chacune d'elles possèdent des avantages et des inconvénients. Il est donc nécessaire de choisir quelle machine convient le mieux pour une application donnée.

Cette étude a permis de positionner les travaux de cette thèse. Le FSW semble être un procédé de soudage à fort potentiel. Néanmoins, les moyens de production FSW semblent être un des points problématiques à l'utilisation de ce procédé auprès des industriels. Par conséquent, l'objectif est d'étudier l'industrialisation du procédé de FSW en s'attachant à la définition du cahier des charges des ressources nécessaires et des conditions de mise en œuvre. Pour y arriver, nous nous appuierons sur l'étude des interactions entre les entités produit / procédé / ressources. Ainsi, dans le cadre de nos travaux de recherche, nous nous concentrerons sur la qualification des moyens de soudage FSW et appliqueront nos résultats au robot polyarticulé. Cette ressource est considérée comme permettant la réduction des coûts d'investissement machine. Les personnes ayant développé ces systèmes estiment qu'ils permettront l'essor du FSW dans les industries, autres que celles des transports. Par contre, ce moyen possède des capacités restreintes. De même, la bibliographie à travers l'étude des efforts et de la déviation de l'outil par rapport au plan de joint montre bien l'importance de l'étude des efforts et des couples appliqués sur l'outil. Leur maîtrise permettra de favoriser l'utilisation de moyen de production flexible et standard tel qu'un robot polyarticulé. Avant cela, une question se pose, ***comment qualifier les moyens de production FSW ?*** La bibliographie réalisée ne permet pas de répondre directement à cette question. C'est pourquoi, une méthodologie a été mise en place pour essayer de répondre à cette question.

La Figure 48 présente le schéma d'intégration produit / procédé / ressources utilisé pour mettre en place la démarche d'industrialisation. Sur cette figure, le texte écrit en noir et en gras correspond aux points étudiés dans cette thèse. Le point de départ de l'étude est le produit. Il correspond dans notre cas aux pièces à assembler par FSW. Au travers ce mémoire nous définirons une méthodologie pour mettre en place les ressources nécessaires à sa réalisation. Ce travail s'articule autour de trois grandes parties :

- L'étude de l'interaction produit / procédé. Elle correspond à l'analyse outil / matière et outil / pièces. L'objectif est de définir ce qui doit être imposé à l'outil pour réaliser une opération de soudage par friction malaxage avec succès. Ce travail est présenté dans le chapitre 2.
- La caractérisation du procédé FSW à travers l'étude des actions mécaniques générées dans le domaine de soudabilité opératoire. Cette étude expérimentale est présentée dans le chapitre 3.
- La qualification d'une ressource à partir des données collectées dans le chapitre 2 et 3. Le moyen de soudage support est un robot polyarticulé. Ce travail est présenté dans le chapitre 4.

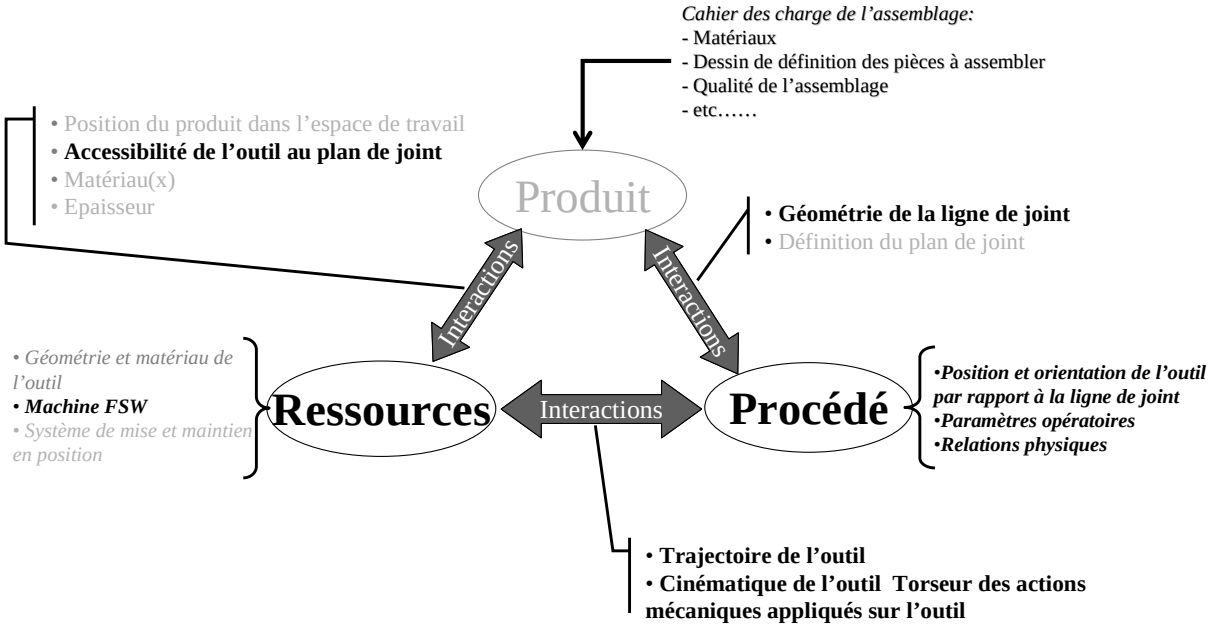


Figure 48: Schéma d'intégration produit / procédé / ressources support de la démarche mise en place. Le texte en gras présente les données traitées dans cette thèse

CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE POUR QUALIFIER UN MOYEN DE PRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est d'extraire les paramètres caractéristiques pour qualifier ou concevoir les moyens de production FSW. La méthodologie mise en place est basée sur l'étude des interactions produit / procédé / ressources. La première étape consistera à extraire de l'opération de soudage les paramètres pour la mise en œuvre du soudage FSW. Puis, suite à l'analyse de l'opération de soudage, nous identifierons les paramètres caractéristiques pour le dimensionnement des moyens associés.

Sommaire

1. INTRODUCTION 77

2. EXTRAIRE LES PARAMETRES CARACTERISTIQUES 83

3. ANALYSE DE L'OPERATION DE SOUDAGE FSW 95

4. IDENTIFICATION DES PHASES CARACTERISTIQUES POUR LE DIMENSIONNEMENT 117

5. CONCLUSION 123

L'étude bibliographique présentée dans le chapitre 1 a mis en évidence les bénéfices du FSW pour le soudage des alliages d'aluminium. Cependant le coût d'acquisition d'un moyen de production FSW semble être un des points problématiques pour l'utilisation du procédé par les industriels [ARB07a, SMITH00, THO00]. Ce coût élevé est dû à la production en petites série, des machines dédiées au soudage FSW. Par conséquent le premier verrou « technologique » à soulever est le coût du moyen de production afin d'industrialiser le procédé. C'est pourquoi les travaux de thèse ont concerné la formalisation d'une démarche permettant de mettre en place un cahier des charges pour la conception d'une machine FSW ou l'adaptation d'une structure existante dans l'industrie. Cette démarche repose sur l'étude physique du procédé à travers l'identification des paramètres de conduite et l'influence de ces derniers sur les efforts outils / matière. Un des objectifs est de qualifier des moyens standards de production, tels que des robots polyarticulés (limités en termes de capacité [SMI00, VOE07, SOR08], possédant des coûts d'investissement moins élevés [SMI00, SOR07] et offrant une gamme importante de géométries de joints soudables). Ainsi, pour favoriser son utilisation, il est nécessaire de définir la partie du DSO accessible par ce type de machine et permettant de respecter le cahier des charges.

1. Introduction

Peu de travaux traitent du dimensionnement d'une machine FSW. Ceci est sans doute laissé au soin des concepteurs de machine. Or, dans l'optique d'utiliser une machine standard modifiée pour réaliser du FSW, il apparaît nécessaire d'identifier quels sont les critères pour le dimensionnement.

D'après Strombeck et al. [ST00], les caractéristiques prépondérantes d'un moyen de production FSW sont de pouvoir développer des efforts importants et d'avoir une rigidité élevée.

Ainsi, d'une manière générale les critères de dimensionnement d'une machine FSW sont :

- ***assurer l'application des paramètres de conduite,***
- ***assurer les positions et orientations de l'outil requises pendant le soudage.***

Lors du soudage FSW, des interactions entre l'outil et le matériau génèrent des efforts et des couples qui sont transmis au moyen de production : la ressource. De plus, l'étude bibliographique montre que les efforts et les couples générés sont importants, indiquant qu'ils sont prépondérants pour le dimensionnement. Ainsi, nos travaux se sont focalisés sur l'étude des efforts et des couples et de l'influence des paramètres opératoires sur ces derniers. L'objectif étant d'extraire de l'analyse du procédé, les données nécessaires à la caractérisation du moyen de soudage.

L'objet de l'étude présentée est de formaliser une démarche permettant d'identifier les critères de performance pour la conception d'un moyen de soudage FSW ou l'adaptation d'un

moyen existant dans l'industrie. La démarche doit s'appliquer à tout type de formes, de matériaux et pour n'importe quels moyens de production. La méthodologie mise en place s'appuie sur l'analyse des interactions générées entre le produit, le procédé et les ressources comme schématisé sur la Figure 49. Pour ce faire, nous allons plus particulièrement nous intéresser aux ***interactions produit / procédé*** et ***procédé / ressources***. L'objectif est d'identifier les paramètres pertinents et les conditions de mise en œuvre pour réaliser un assemblage soudé par FSW.

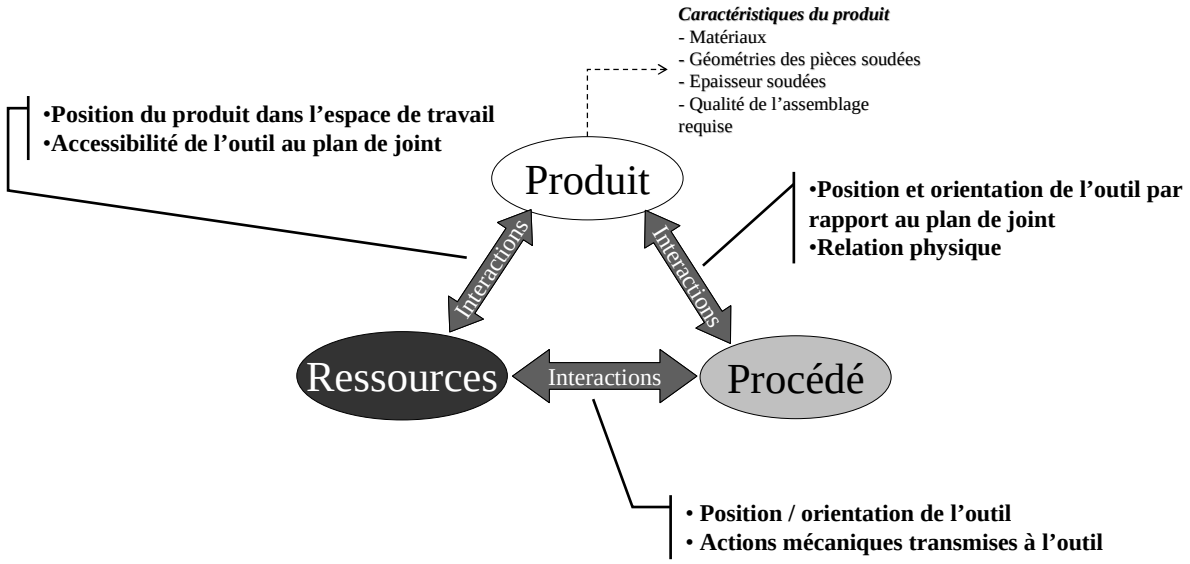


Figure 49: Schématisation des interactions entre le produit, le procédé et les ressources

Le produit est notre point de départ, contenant un assemblage à souder par FSW. Cet assemblage possède les caractéristiques suivantes : la forme, un matériau, une épaisseur, une qualité requise. Ces données constituent notre point d'entrée de la définition de la méthodologie mise en place. Nous nous placerons dans le cas d'étude suivant : soudage bout à bout de deux pièces. Mais cette démarche peu s'appliquer à tout type de pièces. La méthodologie se basera sur :

- **L'analyse du produit.** La première étape sera de définir à partir du dessin de définition des pièces la géométrie de la ligne de joint $\mathcal{L}$. De cette analyse, en prenant en considération le matériau à souder, le choix de l'outil peut être effectué et les préparations de bords peuvent être définies.

Remarque : Dans notre étude, l'outil sera considéré comme une donnée d'entrée. Par hypothèse, celui-ci est adapté au travail à réaliser.

- **L'analyse des interactions produit / procédés**. C'est l'étude des interactions Outil / Pièces et Outil / Matière. Cela consiste à définir les positions et les orientations de l'outil par rapport au plan de joint ainsi que l'étude cinématique de l'outil et les actions mécaniques à appliquer sur celui-ci pour générés la soudure respectant les critères imposés.

- **L'analyse des interactions procédé / ressources.** L'objectif est d'extraire de cette analyse les données caractéristiques à la qualification des ressources. Ceci

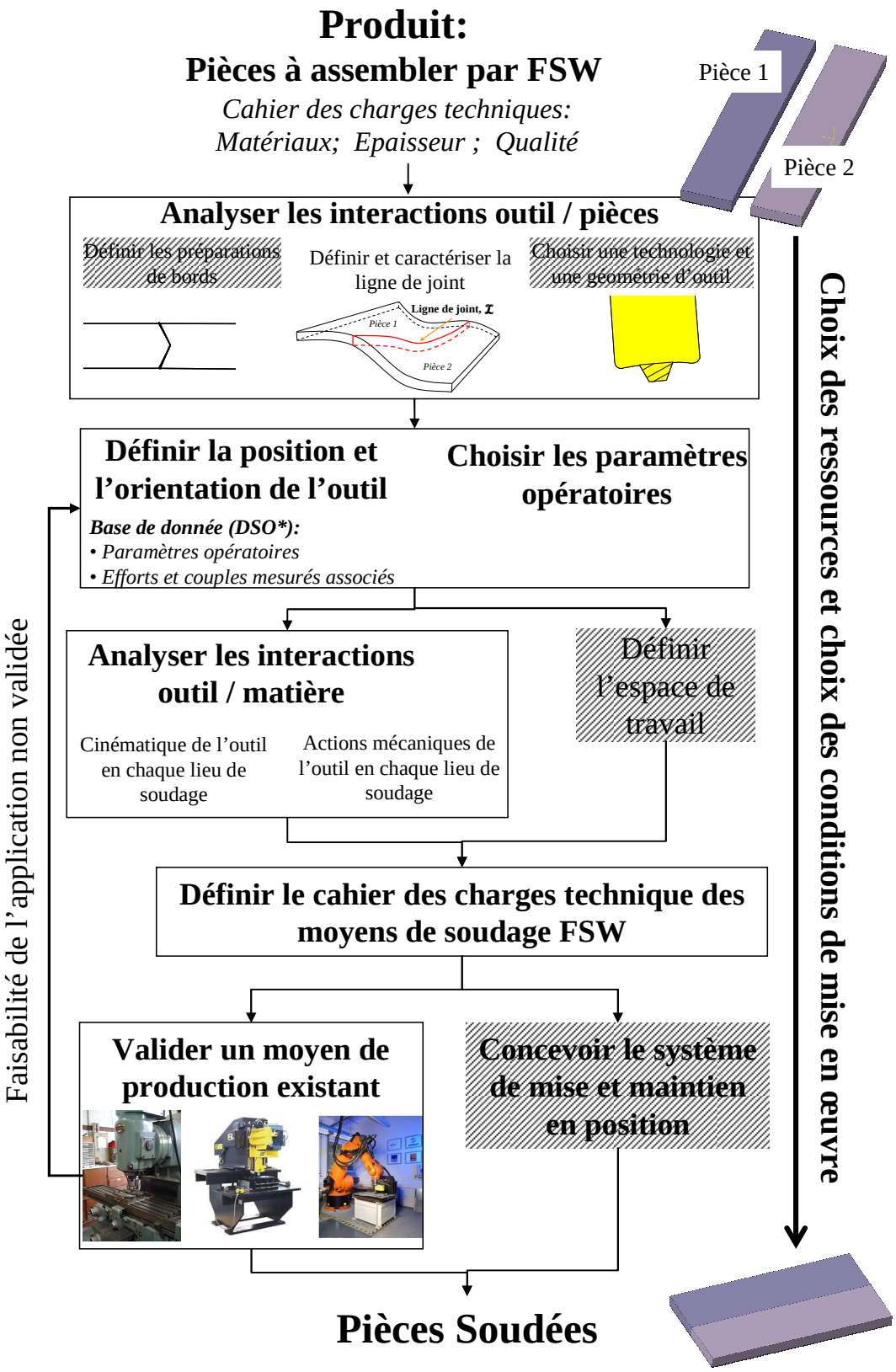
s’effectuera à travers l’analyse des actions mécaniques transmises par l’outil aux moyens de soudage sur l’ensemble de la trajectoire, ainsi que sa cinématique.

- **L’analyse des interactions ressources / produit.** Les informations relatives à la position et à l’orientation des pièces dans l’espace de travail sont transmises.

La Figure 50 schématise la démarche proposée conduisant à la définition des spécifications techniques d'une machine FSW. Elle s’appuie sur le soudage bout à bout de deux pièces soudées. Cette démarche est générale et peut être appliquée à tout type de pièces.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux cas suivantes :

- Analyser les interactions outil / pièces
- Analyser les interactions outil / matière



* DSO: domaine de soudabilité opératoire

Eléments non traités dans cette thèse

Figure 50: Schéma global décrivant la méthodologie mise en place pour valider ou concevoir un moyen de production FSW. Les cases grisées correspondent à des actions non étudiées

La première étape de la méthodologie consiste à ***analyser le produit*** et à étudier les ***interactions entre le produit et le procédé***. Dans la suite du document, le formalisme IDEF-0 sera utilisé pour décrire de manière plus approfondie les différentes actions à mener. La Figure 51, présentée sous la forme d'un diagramme IDEF-0, représente la ***vue globale d'un processus de qualification d'un moyen de production FSW***. Dans les paragraphes à venir, nous allons présenter la méthodologie en détaillant les différents niveaux de ce diagramme.

Voici le point de départ de notre étude. Les données ci-dessous sont connues ou ont été déterminées à travers une campagne expérimentale dite « de développement » sur une machine instrumentée :

- L'application soudée (matériaux, épaisseurs, configuration des pièces, cahier des charges).
- La géométrie et le type d'outil utilisé.
- Un point ou l'ensemble des paramètres de conduite permettant d'obtenir une soudure respectant le cahier des charges (DSO). A ces points, les actions mécaniques appliquées sur l'outil associées sont connus.

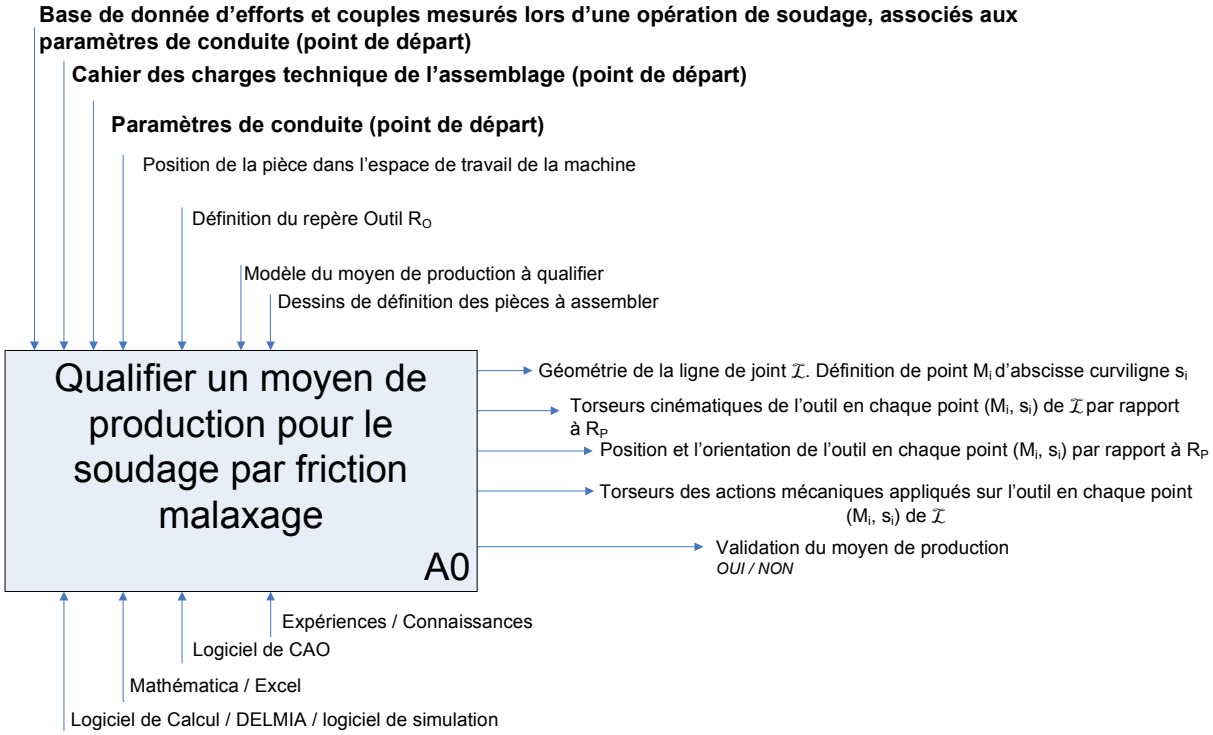


Figure 51: Diagramme IDEF-0, niveau A0 de la démarche de qualification d'un moyen de production FSW

Cette action générale peut être divisée en deux étapes successives, comme présenté sur la Figure 52, à savoir :

- ***A1 - Extraire de l'opération de soudage les paramètres caractéristiques*** nécessaires à la qualification d'un moyen de production**.** C'est la première étape de la démarche. Elle consiste à analyser le procédé de soudage afin d'essayer d'extraire les paramètres de conduite permettant l'assemblage de pièces par

friction malaxage. La méthode doit être applicable à tout type de configurations (formes gauches, soudage hétérogène, etc.). Les résultats obtenus permettront de poser le cahier des charges techniques du moyen de production. Les données recueillies serviront également à valider le moyen de production, comme le montre le diagramme IDE-0 de la Figure 52.

- ***A2 - Valider le moyen de production choisi,*** c.à.d. le qualifier. Il s'agit de vérifier si la machine possède les performances requises pour souder dans son espace de travail en générant la qualité désirée.

Remarque : Si l'on souhaite uniquement écrire le cahier des charges techniques des moyens de production FSW l'analyse s'arrêtera à l'étape A 1.

Dans les paragraphes qui vont suivre nous détaillerons l'action A1. Elle constitue la pierre angulaire de la méthodologue développée. L'action A2 sera détaillée dans le chapitre 4 dans le cas du soudage FSW robotisé.

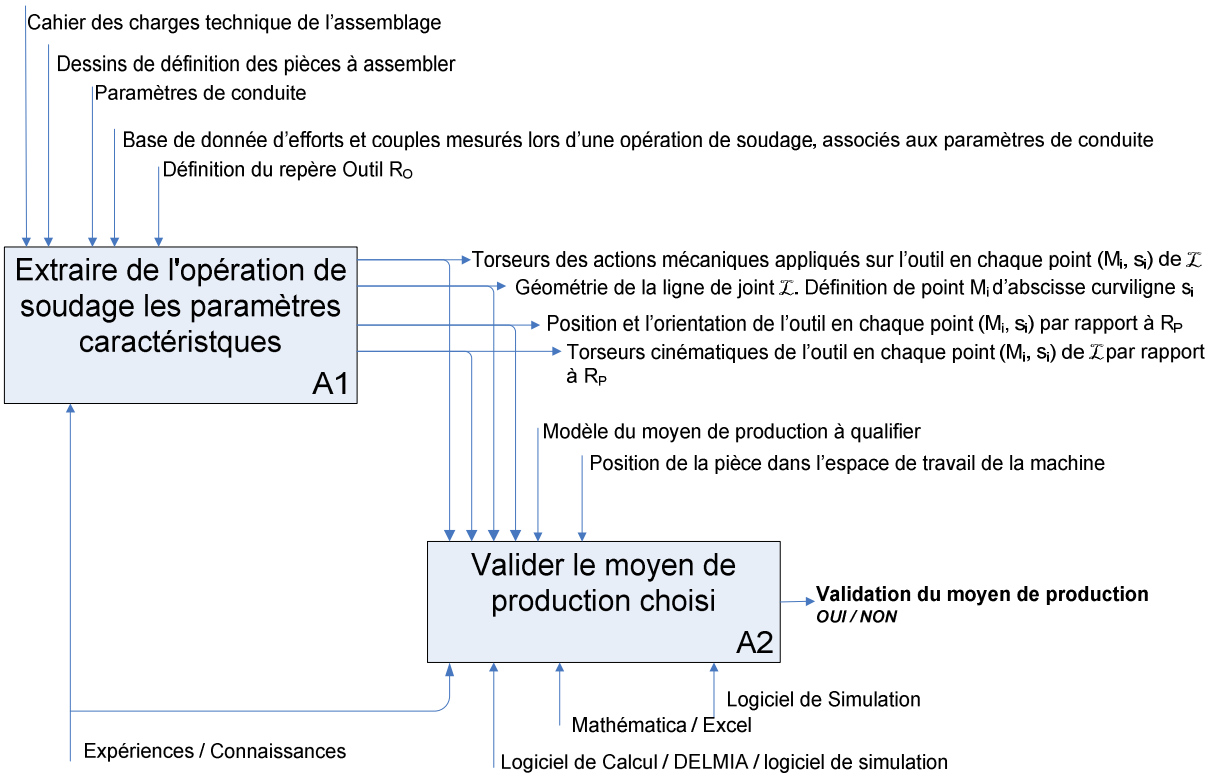


Figure 52: Diagramme IDEF-0, démarche de qualification d'un moyen de production FSW. Activité A0 : Qualifier un moyen de production FSW

Les actions A1 et A2 permettant de qualifier un moyen de production FSW s'inscrivent comme illustré sur la Figure 53 dans le schéma d'intégration produit / procédé / ressources.

L'action A1 s'intéresse à l'étude des interactions produit / procédé ainsi qu'à l'étude du procédé.

L'action A2 consiste à étudier les interactions procédé / ressources et produit / ressources.

Au final, l'ensemble de ces analyses permettront de rassembler les informations nécessaires pour qualifier les moyens de production FSW.

Nous étudierons les interactions entre le produit et le procédé (action A1) conduisant à la caractérisation du procédé FSW. Par la suite nous analyserons les interactions entre le procédé et les ressources afin d'extraire les paramètres caractéristiques pour leurs dimensionnements. Les interactions étudiées dans ce chapitre sont symbolisées par des flèches en pointillées sur le schéma de la Figure 53.

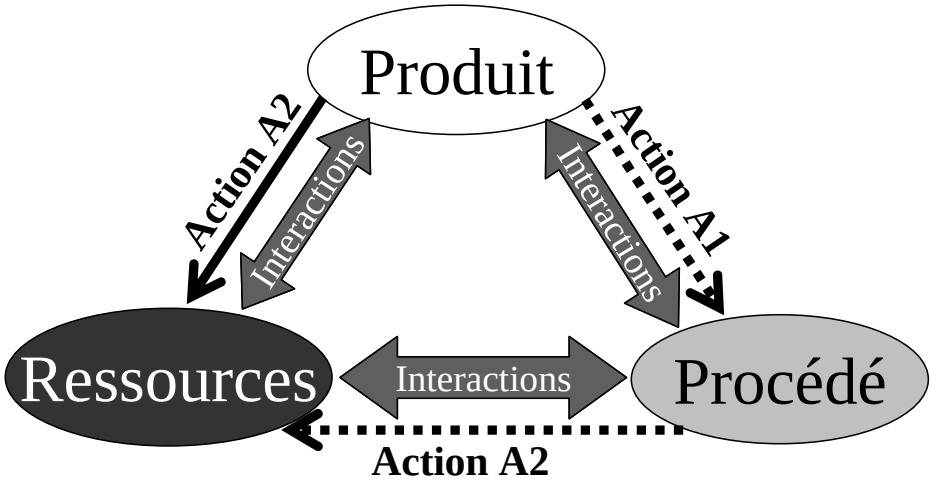


Figure 53: Positionnement des actions A1 et A2 au sein du diagramme produit / procédé /ressources. Les flèches en pointillées correspondent aux actions étudiées dans ce chapitre.

2. Extraire les paramètres caractéristiques

Afin d'extraire les données nécessaires à la caractérisation du moyen de soudage, la démarche proposée se focalise sur l'étude des interactions mécaniques Outil / Pièce (aspect global) Outil / Matière (aspect local). Ainsi, l'action A1 se décompose en deux actions comme présenté sur la Figure 54.

- ***A11 – Analyser les interactions Outil / Pièce*** correspondant à une étude géométrique globale. Elle consiste à analyser la géométrie des pièces soudées ainsi que la position et l'orientation de l'outil en chaque lieu de soudage.
- ***A12 – Analyser les interactions Outil / matière*** correspondant à l'analyse cinématique et des interactions mécaniques locales entre l'outil et la matière. A travers, cette étude l'ensemble des paramètres de conduite vont être déterminés. Il s'agit de définir ce qui doit être imposé au niveau des surfaces actives de l'outil pour réaliser l'opération de soudage.

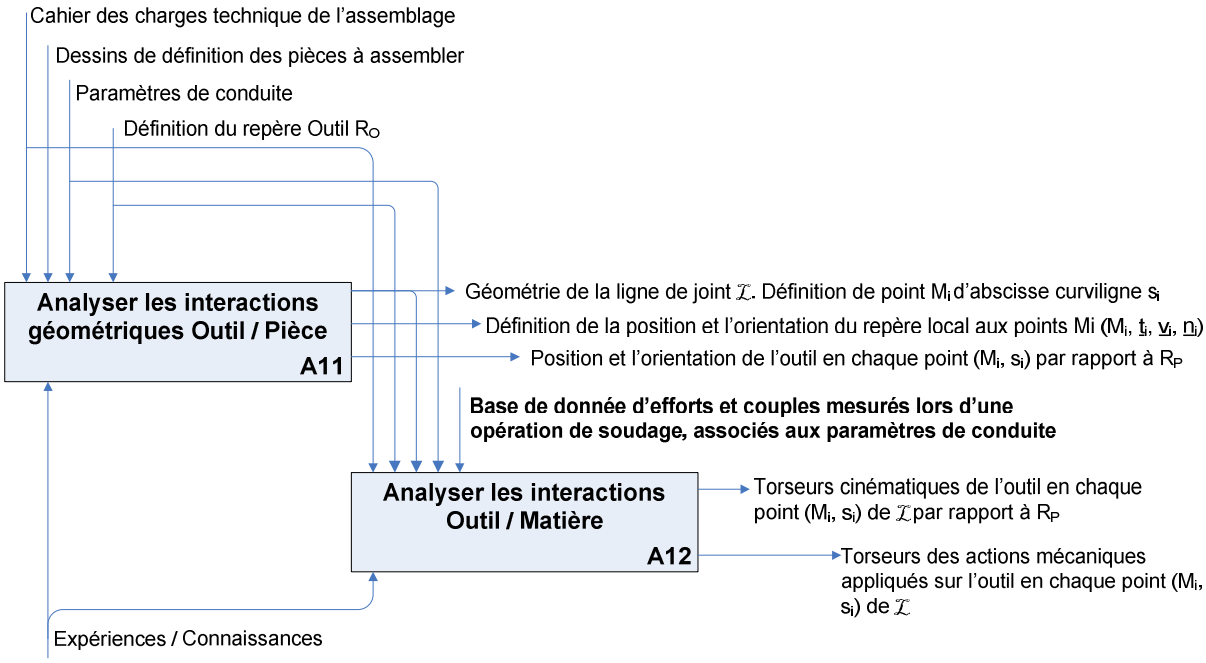


Figure 54: Diagramme IDEF-0, démarche de qualification d'un moyen de production FSW. Activité A1: Extraire de l'opération de soudage les paramètres caractéristiques

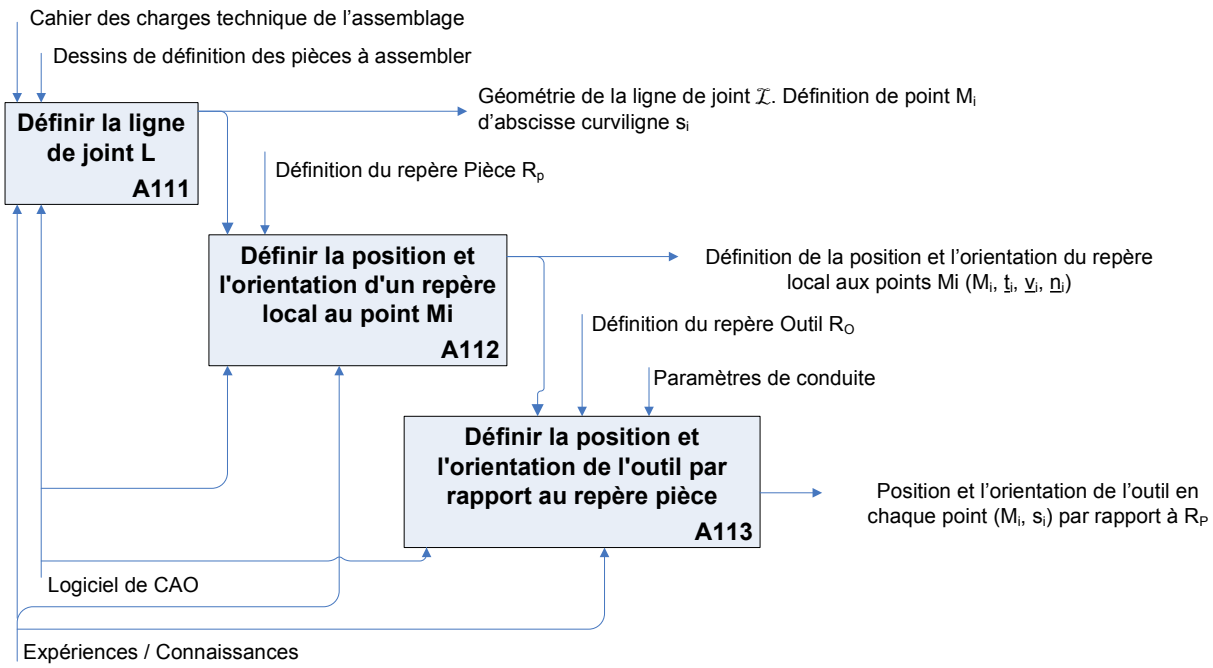


Figure 55: Diagramme IDEF-0, démarche de qualification d'un moyen de production FSW. Activité A11: Analyser les interactions Outil / Pièces

2.1. Analyse des interactions Outil / Pièces

Il s'agit d'étudier dans un premier temps localement puis sur l'ensemble du cordon de soudure les positions et les orientations de l'outil. Cela définit la trajectoire de celui-ci par rapport au repère pièce, le volume de travail et l'accessibilité requise pour l'opération de soudage. Pour parvenir à ce résultat deux points doivent être abordés :

- Définir le repère de l'outil. C'est un des paramètres de contrôle de l'action A111, Figure 55.
- Caractériser la ligne de joint, correspondant aux actions A111 et A112 de la Figure 55.

2.1.1. Définition du repère outil utilisé

Pour un outil conventionnel de géométrie quelconque, on définit un repère orthonormé direct lié à l'outil. On suppose que la géométrie de l'outil ainsi que sa rotation au cours du soudage au sein de la broche sont parfaites. Ceci permet de définir l'axe de rotation de l'outil comme étant confondu avec l'axe de symétrie du corps de l'outil comme présenté sur la Figure 56.

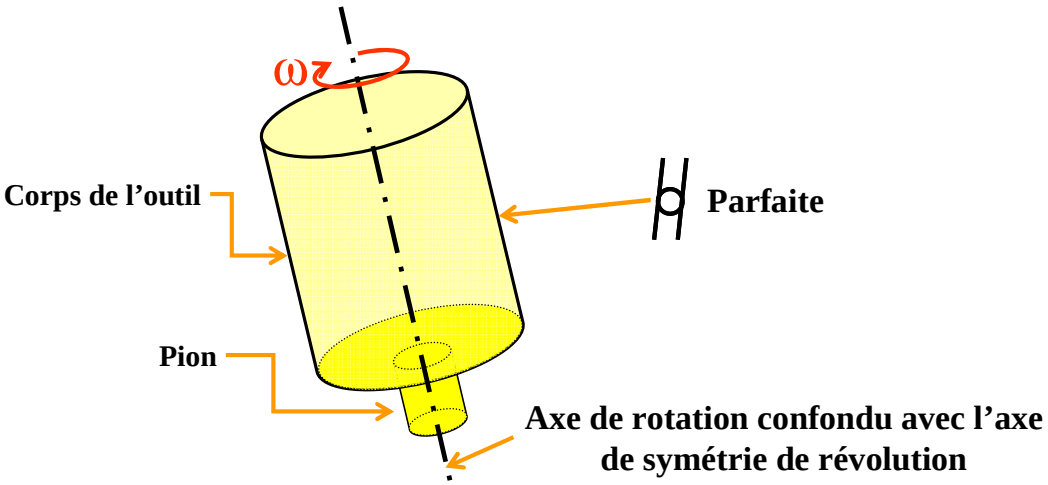


Figure 56: Présentation de la définition de l'axe de rotation de l'outil

Soit $\vartheta(\underline{x}, \underline{y})$ le plan perpendiculaire à l'axe de rotation de l'outil et tangent à la surface de l'épaulement. L'origine de l'outil O est défini comme étant l'intersection entre l'axe de rotation de l'outil est ce plan ϑ. On définit par $(O, \underline{z})$ vecteur passant par O l'axe de rotation de l'outil. On définit par R_O $(O, \underline{x}, \underline{y}, \underline{z})$ un repère orthonormé direct avec :

$$\vec{y} = \frac{\vec{z} \otimes \vec{v}_a}{\left\| \vec{z} \otimes \vec{v}_a \right\|} \qquad \vec{x} = \vec{y} \otimes \vec{z} \tag{10}$$

Avec : v_a la vitesse d'avance de l'outil

Remarque : Ce repère ne tourne pas avec l'outil. Il est associé à l'outil et à la vitesse d'avance qui elle sera liée à la ligne de joint.

Cette définition peut également servir de point de départ pour déterminer de la longueur du pion de l'outil, L_p. Par exemple, elle peut être explicitée comme étant la distance entre le plan $\vartheta(\underline{x}, \underline{y})$ et la surface inférieure du pion.

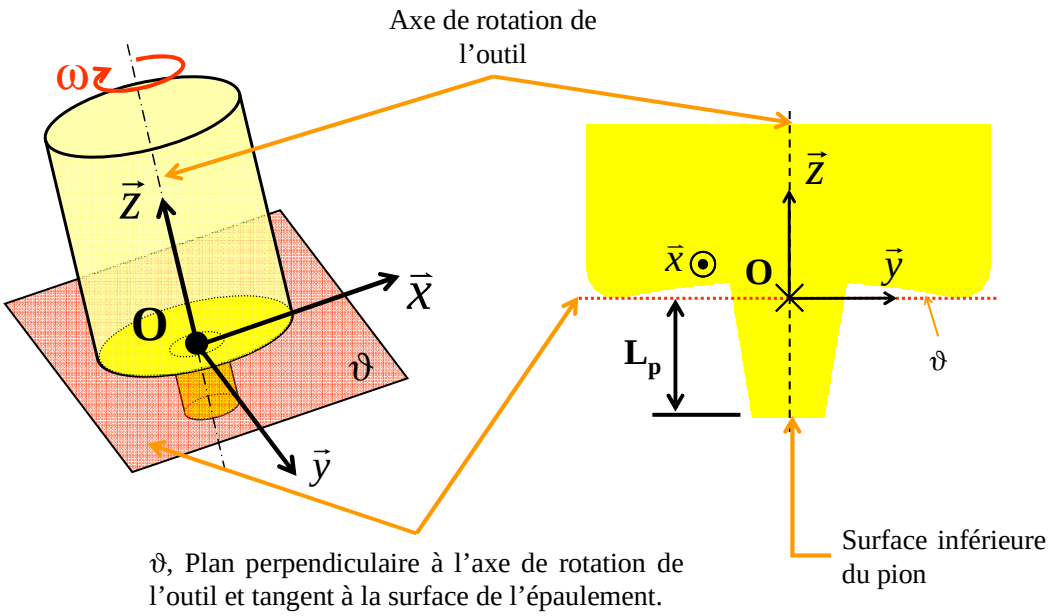


Figure 57: Schématisation de la construction du repère outil

2.1.2. Définition de la géométrie des pièces soudées

Soit deux pièces à assembler bout à bout comme illustrées sur la Figure 58. Un repère pièce R_P (P, $\underline{x}_p$, $\underline{y}_p$, $\underline{z}_p$) est associé à une des deux pièces. L'intersection entre la surface d'accostage et la surface supérieure des pièces définit la ligne de joint $\mathcal{L}$. Elle peut être de courbure quelconque. La surface supérieure des pièces est définie comme étant la surface recevant l'épaulement de l'outil dans le cas d'un outil conventionnel. Un point M_i appartenant à $\mathcal{L}$ est défini par son abscisse curviligne s_i.

Par hypothèse, nous considèrerons $\mathcal{L}$ comme ayant une courbure continue en tout point d'abscisse s_i. Si la courbure contient des points d'angles il est alors nécessaire de la morceler en « tronçons » continues.

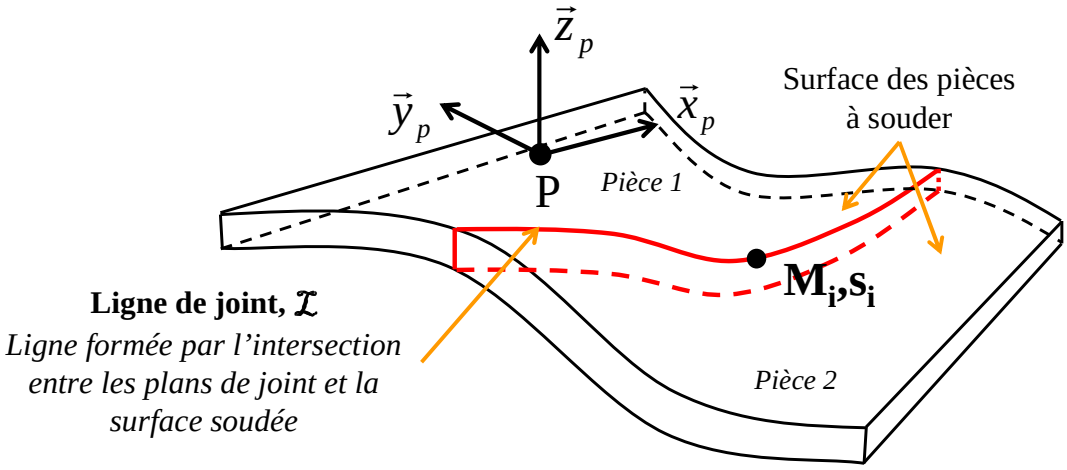


Figure 58: Définition de la ligne de joint $\mathcal{L}$, du point M_i "mobile" et du repère pièce R_P

Pour définir la géométrie de la ligne de joint à souder, on associe à chaque point M_i un repère R_{Mi} formé par les vecteurs :

- $\underline{x}_{Mi}$ vecteur tangent à $\mathcal{L}$ et orienté dans la direction de soudage (par hypothèse, la direction de soudage est définie dans les paramètres de conduite)
- $\underline{z}_{Mi}$ vecteur normal perpendiculaire à $\underline{t}_i$ et aux plans tangents aux surfaces des pièces en M_i.
- $\underline{y}_{Mi}$ vecteur choisi afin de former un repère orthonormé direct (M_i, $\underline{x}_{Mi}$, $\underline{y}_{Mi}$, $\underline{z}_{Mi}$), tel que $\underline{y}_{Mi} = \underline{z}_{Mi} \wedge \underline{x}_{Mi}$

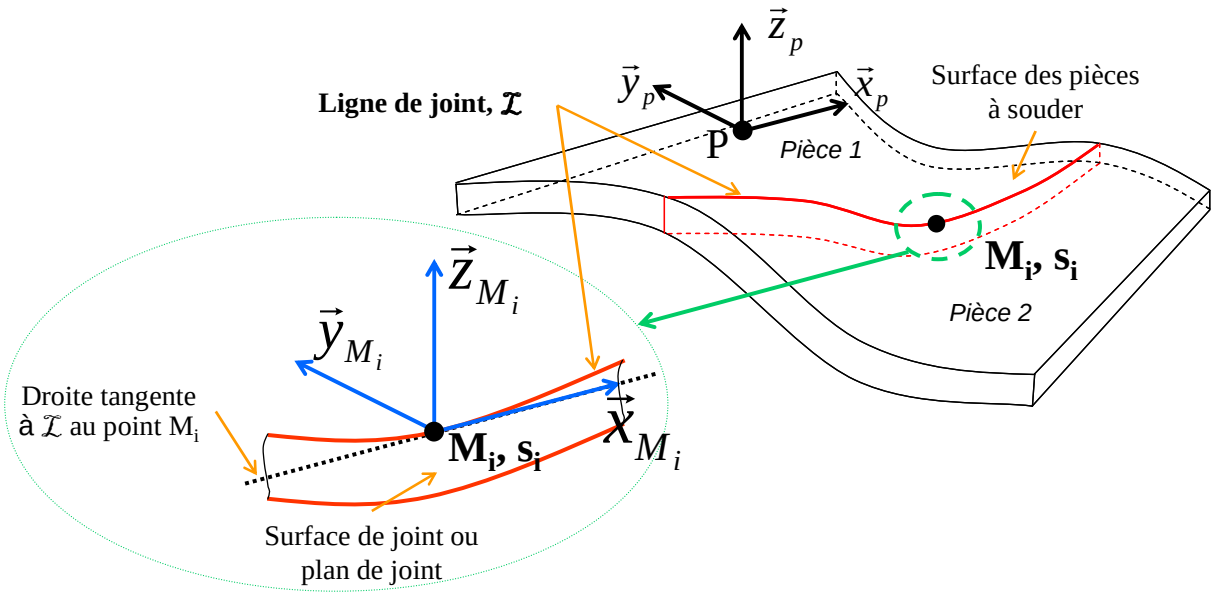


Figure 59: Définition du repère local R_{Mi} (M_i, $\underline{x}_{Mi}$, $\underline{y}_{Mi}$, $\underline{z}_{Mi}$) associé à la ligne de joint $\mathcal{L}$

Lorsque les plans tangents aux pièces soudées sont différents, c.à.d. qu'ils possèdent des vecteurs normaux non colinéaires, alors le vecteur $\underline{z}_{Mi}$ sera défini comme le vecteur bissecteur (voir Figure 60). Son équation mathématique est donnée par l'équation (11).

$$\vec{z}_{M_i} = \frac{\vec{n}_1 + \vec{n}_2}{\left\| \vec{n}_1 + \vec{n}_2 \right\|} \tag{11}$$

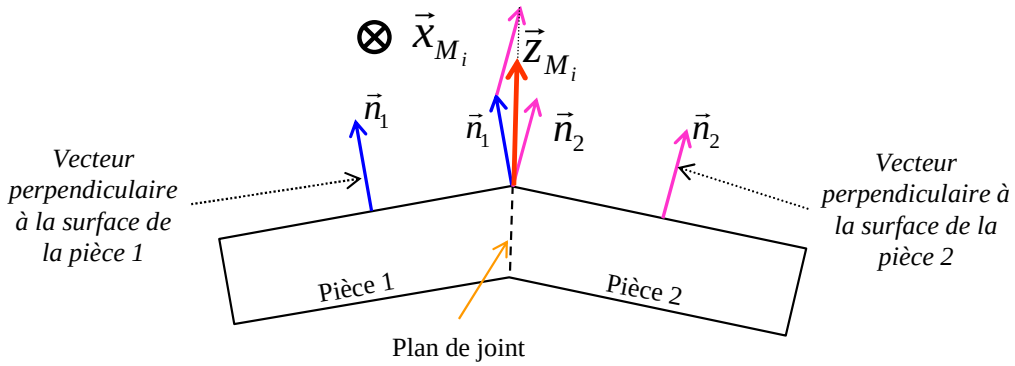


Figure 60: Illustration de la détermination du vecteur bissecteur $\underline{z}_{Mi}$ lorsque les deux surfaces sont non colinéaires

Remarque : L'angle formé entre les surfaces d'accueil ($\underline{n}_1$, $\underline{n}_2$) est limité par les contraintes du procédé. En effet, le FSW impose d'avoir un épaulement parfaitement en contact avec la surface des pièces. Ceci afin de garantir l'apport de chaleur par frottement et de pouvoir contenir le matériau. Ainsi, si l'angle formé est trop important ces caractéristiques ne peuvent être assurées et l'opération de soudage est alors impossible.

La position et l'orientation successive des repères R_{Mi} par rapport à R_p peuvent être décrites par :

- Le vecteur $\underline{PM}_i$:

$$\overrightarrow{PM}_i = X_{Mi} \cdot \vec{x}_p + Y_{Mi} \cdot \vec{y}_p + Z_{Mi} \cdot \vec{z}_p \qquad (12)$$

- Les angles de Bryant, ψ, φ, ϕ qui sont schématisés sur la Figure 61. Ils permettent de décrire l'orientation de R_{Mi} par rapport à R_P. Ils expriment la rotation comme étant la succession de trois rotations élémentaires par rapport à trois axes distincts. Ces trois angles portent généralement le nom de roulis, tangage et lacet.

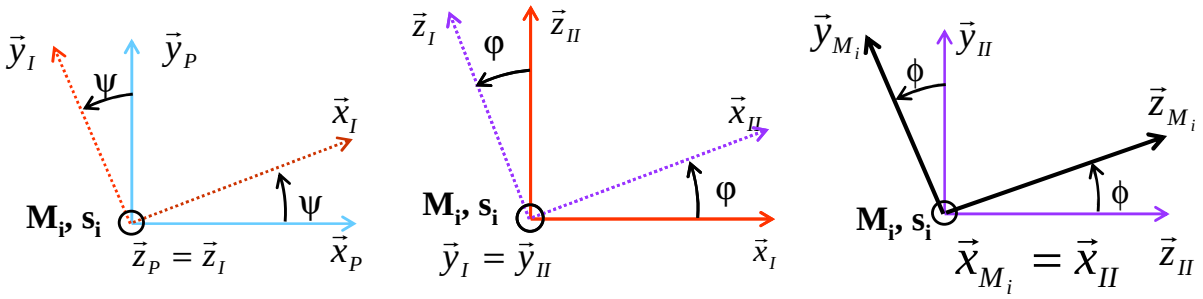


Figure 61: Angles de Bryant permettant de définir l'orientation du repère R_O par rapport à R_P

2.1.3. Définition de la trajectoire de l'outil

Au cours de l'opération de soudage, pour assurer l'obtention d'un cordon de soudure sans défaut, l'outil doit avoir une position et une orientation par rapport à la ligne de joint. La position de l'outil par rapport au repère pièce dépend de deux facteurs :

- La géométrie de la pièce à souder. Celle-ci est définie par les vecteurs $\underline{x}_{Mi}$, $\underline{y}_{Mi}$ et $\underline{z}_{Mi}$ en chaque point M_i de $\mathcal{L}$.
- La géométrie de l'outil. Dans certaines configurations de soudure comme, par exemple, avec un outil à épaulement concave, l'outil est incliné par rapport à la surface des pièces. Une rotation de l'outil d'un angle *i*, appelé angle de déplacement, et d'axe (O, $\underline{y}_{Mi}$) est alors réalisée. Nous considérons cet angle comme un paramètre de conduite du procédé. Il est par conséquent connu faisant partie de nos données d'entrée (Figure 54).

Ces données nous permettent de placer l'outil dans la configuration de soudage souhaitée. Pour ce faire, il faut positionner et orienter, pour chaque point M_i de $\mathcal{L}$ le repère R_O par rapport au repère R_{Mi}. A nouveau, les positions et les orientations successives peuvent être décrites par :

- Le vecteur $\underline{M_iO}$ définit :

$$\overrightarrow{M_iO} = X_O \cdot \vec{x}_{M_i} + Y_O \cdot \vec{y}_{M_i} + Z_O \cdot \vec{z}_{M_i} \qquad (13)$$

Avec :

- La composante X_O est égale à zéro. On définit le point M_i et le repère R_{Mi} de référence pour la position de l'outil, à un instant donné, par l'intersection entre le centre de l'outil et le plan formé par (M_i, $\underline{x}_{Mi}$, $\underline{z}_{Mi}$). Ceci est schématisé sur la Figure 62, où la position de l'outil par rapport au repère R_{Mi} « de référence » est représenté. Ainsi, la distance $X_0\,\underline{x}_{Mi}$ est nulle. Dans le cas présenté, nous considèrerons que l'outil est en train de souder le point (M_{i+k}, s_{i+k}) car le point O est dans le plan (M_i, $\underline{x}_{Mi}$, $\underline{z}_{Mi}$).

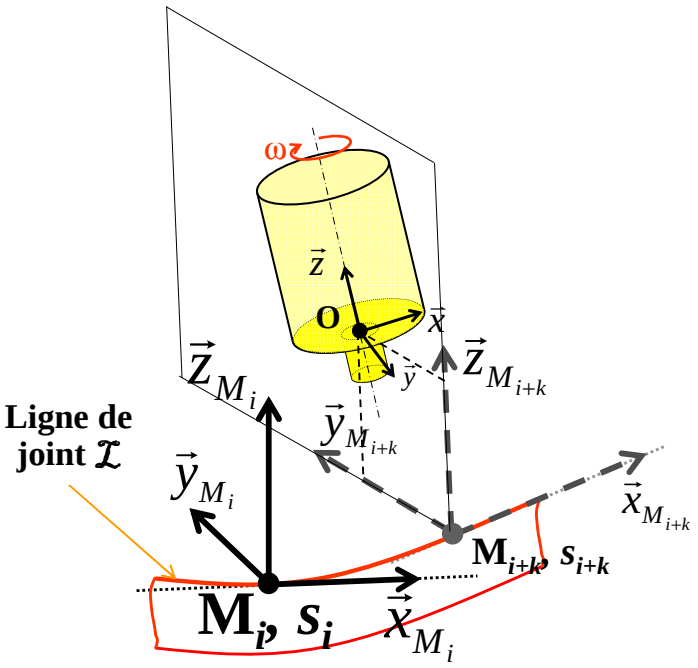


Figure 62: Position du repère outil par rapport au repère R_{Mi}

- La composante Y_O correspond à un décalage par rapport au plan de joint. Ce paramètre est souvent utilisé dans le cadre d'assemblage hétérogène, comme par exemple lors du soudage aluminium / cuivre. Il peut être également utilisé pour des configurations de joint spécifiques, comme présenté sur la Figure 63. C'est un paramètre de conduite à part entière, car lié aux autres paramètres F_z, N, v_a et i.

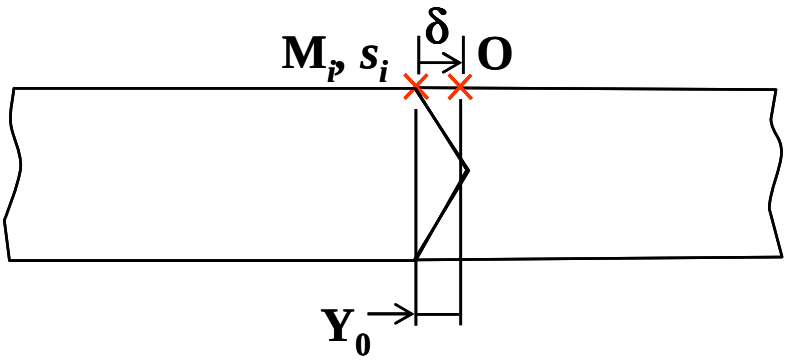


Figure 63: Configurations nécessitant un décalage Y_0. Décalage dû à la préparation des bords.

- La composante Z_O représente la position de l'outil par rapport à la surface supérieure des pièces. Lorsque l'opération est contrôlée en position, cette valeur est un paramètre de conduite et influence la profondeur de pénétration de l'outil. Lorsque l'opération est pilotée en effort, la valeur Z_O résulte de l'équilibre entre l'effort appliqué par la machine et la réaction de la matière sur l'outil.

➢ Les angles de Bryant α, β et γ, présentés sur la Figure 64, définissent l'orientation de R_O par rapport au repère R_{Mi} [COI92]. Cette paramétrisation

permet d'orienter facilement l'outil par rapport au repère R_O. Par exemple, l'angle de déplacement *i* correspond à l'angle β et lorsque des configurations de soudage nécessitent une inclinaison suivant l'axe (O, $\underline{x}_{Mi}$), cela correspond à l'angle α. Le troisième angle γ n'est pas nécessaire dans la définition de l'orientation de l'outil, car on oriente une droite, l'axe de l'outil.

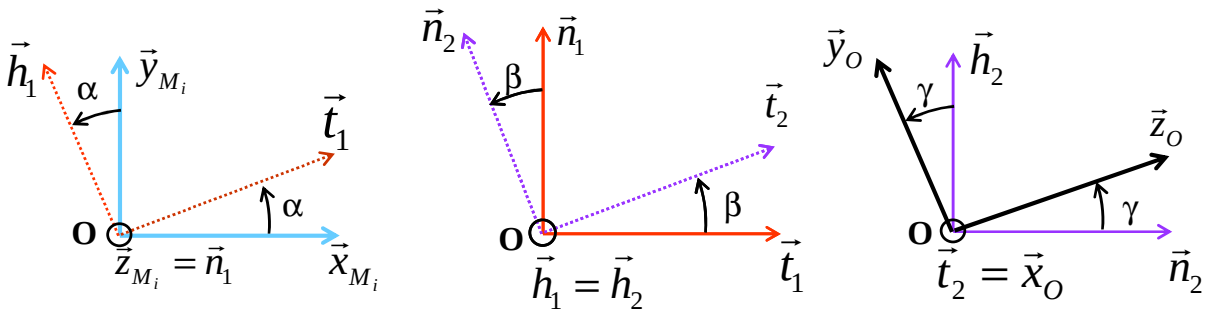


Figure 64: Angle de Bryant définissant l'orientation du repère R_O par rapport au répère R_{Mi}

Ainsi, on peut définir l'ensemble des positions et des orientations de l'outil par rapport aux pièces en chaque lieu de soudure, c.à.d. en chaque point (M_i, s_i) appartenant à $\mathcal{L}$. L'espace de travail, la trajectoire de l'outil et l'accessibilité au plan de joint requis, pour l'opération de soudage sont alors définis. Ces données constituent les premiers éléments des spécifications requises pour le moyen de soudage.

Remarque : Dans les travaux proposés dans ce manuscrit, nous considèrerons l'accessibilité de l'outil uniquement d'un point de vue position et orientation de son axe par rapport à la surface de la pièce.

La Figure 65 illustre l'ensemble de la démarche présentée ci-dessus. Elle est basée sur l'étude géométrique de la ligne de joint afin de définir l'orientation du repère R_{Mi} en chaque lieu de soudage. Puis, la position et l'orientation de l'outil sont définies par rapport au repère R_{Mi} en chaque lieu de soudage à partir des critères relatifs au procédé. On obtient ainsi la position et l'orientation de l'outil dans le repère pièce.

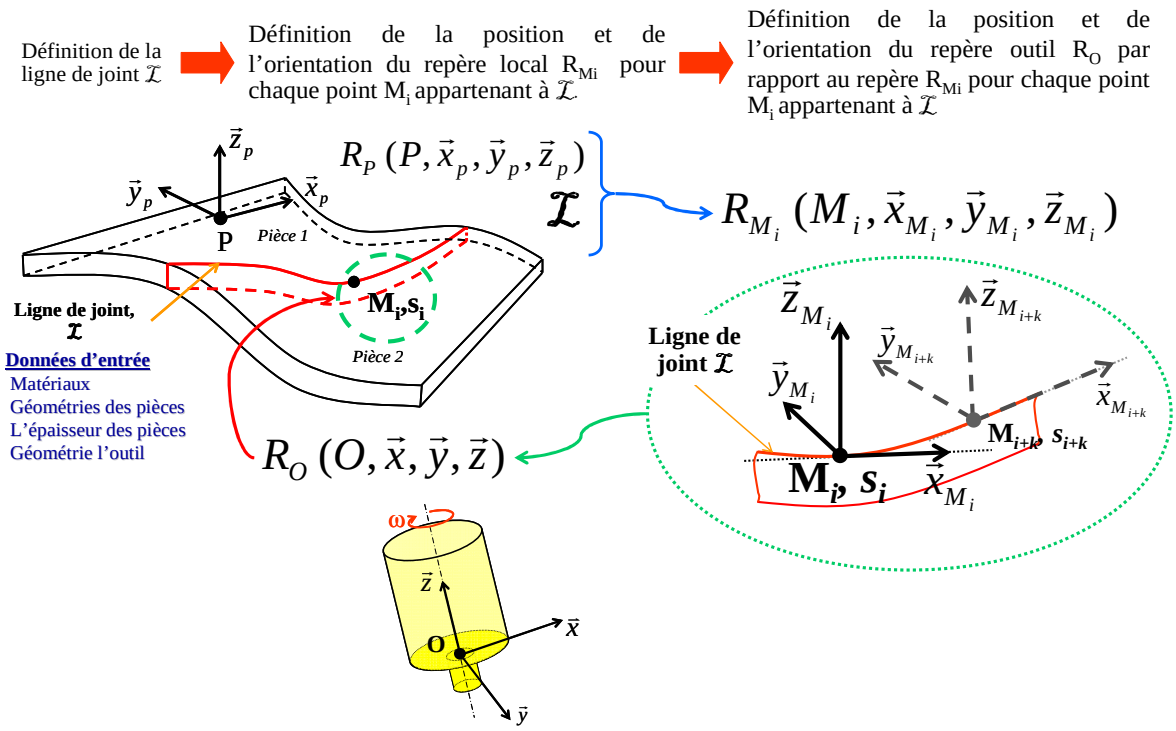


Figure 65: Illustration de l'analyse de l'interaction outil / pièce mise en place

Nous venons de proposer une analyse géométrique des pièces à souder et de l'outil. Elle permet de définir les positions et les orientations de l'outil en chaque lieu de soudage. La trajectoire de l'outil, l'espace de travail et le nombre d'axes requis pour suivre cette trajectoire constituent les premières informations nécessaires à la qualification d'un moyen de production. Toutefois, cette étude doit être complétée par l'analyse des interactions outil / matière, car les efforts et couples importants [SMI00] générés en FSW vont également imposé d'autres critères au moyen de production.

2.2. Analyse des interactions Outil / Matière

Cette analyse correspond à l'action A12 du diagramme IDEF-0 de démarche de qualification d'un moyen de production FSW (Action A1: Extraire de l'opération de soudage les paramètres caractéristiques).

L'étude de l'interaction Outil / Matière a pour but d'extraire à partir de l'analyse du procédé l'ensemble des paramètres de conduite. Il s'agit de déterminer ce qui doit être imposé au niveau des surfaces actives de l'outil pour réaliser l'opération de soudage. Pour la réalisation d'un cordon de soudure, il est nécessaire d'assurer :

- ***les positions et les orientations de l'outil*** qui ont été définies par l'analyse des interactions outil / pièces en chaque point (M_i, S_i). Elles sont retranscrites par les matrices de passage reliant le repère R_{Mi} au repère pièce R_P, en passant par R_{Mi}. Ceci sera illustré dans le chapitre 4.
- ***la cinématique de l'outil***. Elle peut-être décomposée en deux points :

- Evolution de la position permettant de maintenir et de suivre la trajectoire de soudage en chaque lieu de soudure.
- Rôle actif du procédé. Combinaison des vitesses de rotation et d'avance permettant d'apporter l'énergie et le malaxage nécessaires au soudage.

➢ ***l'application des actions mécaniques en soudage :***

- Efforts nécessaires pour imposer les vitesses et maintenir la trajectoire de l'outil en interaction avec la matière.
- Exercer les pressions nécessaires pour avoir un apport d'énergie par frottement et un confinement de la matière corrects.
- le couple permettant d'assurer la rotation de l'outil et le malaxage de la matière.

Afin de déterminer les paramètres caractéristiques permettant d'atteindre ces objectifs, nous allons étudier la cinématique de l'outil et les actions mécaniques associées. Ceci est présenté dans le diagramme IDEF-0 présentant la décomposition de l'action A12 – Analyse des interactions Outil / Matière à la Figure 66. La première étape consiste ainsi à étudier la cinématique de l'outil.

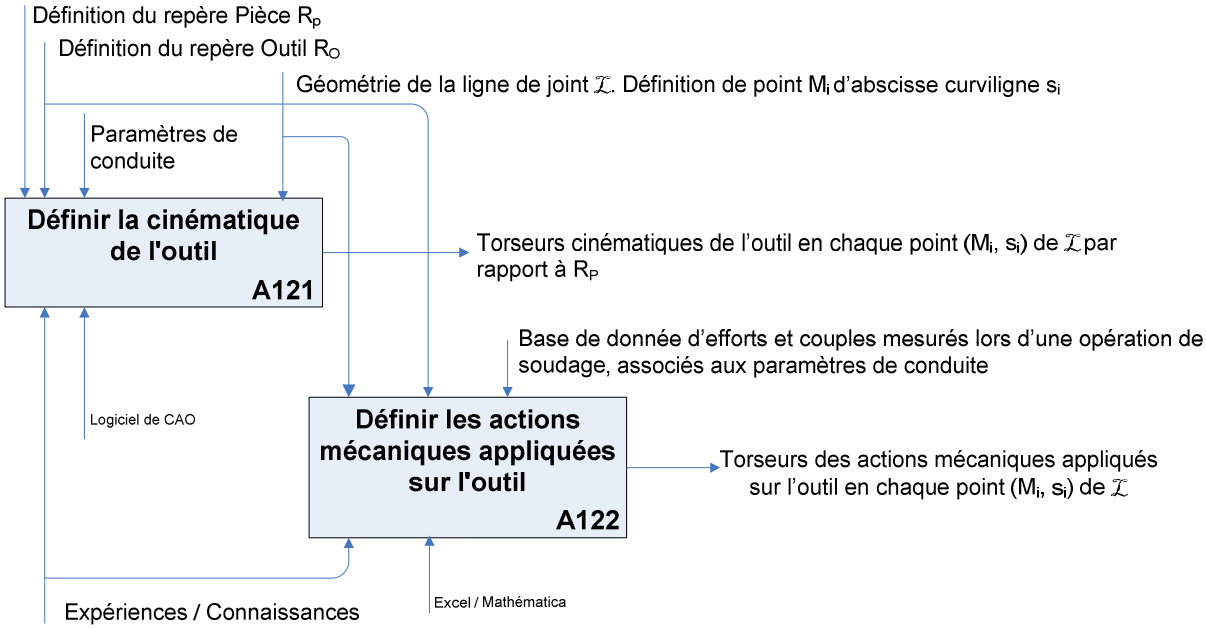


Figure 66: Diagramme IDEF-0, démarche de qualification d'un moyen de production FSW. Activité A12: Analyser les interactions Outil / Matière

Ces deux actions, A121 et A122, vont être analysées avec ***les torseurs cinématiques et les actions mécaniques***. Les différentes composantes des deux torseurs vont être étudiées afin de leur faire correspondre un phénomène mécanique lié aux interactions outil / matière générés lors du soudage FSW. Dans leurs composantes, nous avons distingué :

- les paramètres de conduite du procédé qui sont directement liés au soudage FSW,
- les paramètres liés à l'orientation et à la position de l'outil en chaque lieu de soudure. Ils sont liés au suivi de la ligne de joint $\mathcal{L}$.

2.2.1. Définir la cinématique de l'outil

Pour suivre la surface de joint $\mathcal{L}$, comme cela a été présenté précédemment plusieurs axes peuvent être requis. Ainsi, il peut être nécessaire de décomposer la cinématique globale en deux parties, la cinématique de l'outil par rapport au bâti de la machine et la cinématique du porte-pièces par rapport à la machine. Ceci fait figure de choix technologiques. L'équation (14) présente cette décomposition. Dans notre cadre de recherche nous nous placerons dans l'hypothèse que toutes les mobilités proviennent de la machine. Le porte-pièces est alors considéré fixe par rapport au bâti de la machine.

$$\underbrace{\left\{C_{\text{Outil/Pièces}}\right\}}_{\substack{\text{Suivie de la surface}\\ \text{de joint } \mathcal{L}}} = \underbrace{\left\{C_{\text{Outil/Machine}}\right\}}_{\substack{\text{Cinématique de}\\ \text{l'outil / à la machine}}} + \underbrace{\left\{C_{\text{Machine/Pièces}}\right\}}_{\substack{\text{Cinématique du porte}\\ \text{pièce / à la machine}}} \tag{14}$$

Nous exprimerons les éléments de réduction du torseur cinématique outil / pièces au point O. Certaines vitesses seront exprimées dans le repère R_{Mi}, repère local lié à la ligne de joint $\mathcal{L}$. En effet, il est cohérent d'exprimer les vitesses linéaires liées à l'avance de l'outil dans ce repère, car les vecteurs vitesses sont tangents à la trajectoire suivies. L'équation (15) présente la formalisation du torseur cinématique appliqué à l'outil lors du soudage FSW. Les paramètres de conduite du procédé, en phase de soudage, sont encadrés.

Il est à noter qu'une composante de vitesse linéaire suivant $\underline{z}_O$ peut apparaître lorsque l'opération de soudage est contrôlée en effort.

Vitesse de rotation de l'outil — **Vitesse liée au contrôle en effort de l'opération de soudage**

$$\left\{C_{\text{Outil/Pièces}}\right\} = \left\{\boxed{\varpi}\cdot\vec{z}_O + \vec{\Omega}_{\text{Suivi de joint}} \;\middle|\; \boxed{V_a}\cdot\vec{x}_{M_i} + V_z\cdot\vec{z}\right\}_O \tag{15}$$

Vitesse de rotation liée au suivi de la trajectoire — **Vitesse d'avance de l'outil. Vecteur colinéaire à $\underline{x}_{Mi}$**

2.2.2. Définir les actions mécaniques appliquées sur l'outil

Comme présenté dans la littérature, au cours du soudage FSW une interaction mécanique forte entre l'outil et la matière conduit à l'application d'efforts et de couple sur l'outil [BAL09, MUT08, SMI00, JOH00]. L'équation (16) illustre la formalisation du torseur

des actions mécaniques en phase de soudage. Ces composantes correspondent à la réaction de la matière lors de l'application de la cinématique de l'outil. F_z est la seule composante du torseur qui soit un paramètre de conduite. Les valeurs des autres paramètres ne sont donc pas contrôlées.

$$\left\{ \mathcal{T}_{\text{Outil/Matière}} \right\} = \left\{ \boxed{F_z} \cdot \vec{z} + \vec{R}_{Outil\ /\ Pièce} \;\middle|\; C_z \cdot \vec{z} + \vec{M}_{Outil\ /\ Pièce} \right\}_O \qquad (16)$$

Effort axial, F_z — **Couple lié à la rotation de l'outil** — **Moments liés au suivi de trajectoire de l'outil**

De l'analyse de la géométrie des pièces à souder, nous avons défini la ligne de joint $\mathcal{L}$ et le repère local associé à chaque point de $\mathcal{L}$. Nous avons défini un repère outil. Quatre paramètres de conduite ont ensuite été identifiés décrivant la position et l'orientation du repère outil par rapport au repère local. Ceci définit la trajectoire de l'outil.

Nous avons défini également les torseurs cinématiques et des actions mécaniques entre l'outil et les pièces à souder. Nous retrouvons la forme décrites au chapitre 1.

3. Analyse de l'opération de soudage FSW

Dans ce paragraphe nous allons étudier la phase de soudage en détail. Pour ce faire, nous identifierons les paramètres de conduite, les torseurs cinématiques et les actions mécaniques appliqués dans chaque phase de soudage. Ce travail va approfondir l'étude de l'analyse des interactions Outil / Matière, présentée ci-dessus.

Ce travail va s'effectuer à partir de l'analyse des données expérimentales mesurées lors d'une opération de soudage d'un alliage d'aluminium de la série 6000. Dans un premier temps, nous analyserons la cinématique de l'outil. Cette étude permettra d'identifier les phases cinématiquement indépendantes qui composent l'opération de soudage FSW. Pour chacune de ces phases, nous étudierons les actions mécaniques associées au travers l'analyse des efforts et des couples mesurés. L'analyse de ces données, extraites pour différents matériaux et épaisseurs permettront d'identifier quelle(s) phase(s) de l'opération de soudage est (sont) prépondérante(s) pour le dimensionnement ou la qualification d'un moyen de production FSW.

Tout d'abord, nous présenterons les installations expérimentales utilisées.

3.1. Présentation des installations expérimentales utilisées

3.1.1. Présentation de la machine utilisée

Toutes les expérimentations présentées dans ce manuscrit ont été réalisées sur une machine MTS I-Stir 10. C'est une machine dédiée au FSW de type portique, présentée sur la Figure 67-A. Elle est composée de trois axes cartésiens et d'une tête de soudage disposant de

deux axes de rotations. La Figure 67-B présente la tête de soudage et ses mobilités qui sont assurées par des moteurs hydrauliques. Hormis ces grandes capacités d'efforts (90kN) et de couple (400Nm), elle dispose d'une tête de soudage instrumentée permettant de mesurer la cinématique de l'outil, les efforts et le couple à la broche appliqués sur l'outil. Cette machine est donc idéale pour réaliser des campagnes expérimentales.

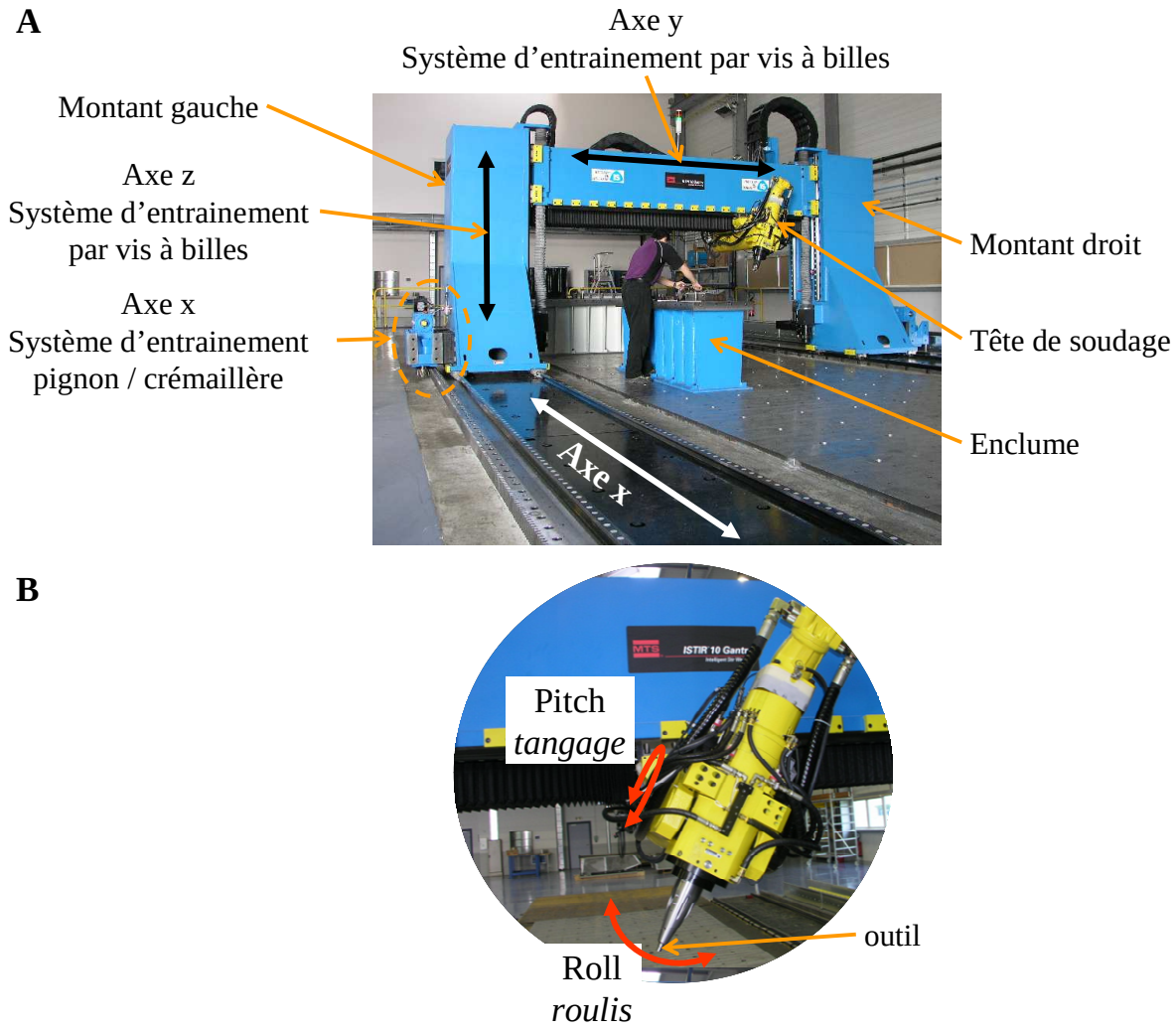


Figure 67: Présentation de la machine MTS I-Stir 10 utilisée pour réaliser l'ensemble des essais. A – Présentation générale de la machine. B- Présentation de la tête de soudage et de ses mobilités

3.1.2. Mesure de la cinématique de l'outil

La cinématique de l'outil, par rapport à l'enclume, est directement mesurée au niveau des axes de la machine, aux axes x, y et z présentés sur la Figure 67. La précision obtenue n'est pas nécessairement optimale mais est suffisante pour une étude qualitative.

La fréquence de rotation de la broche est quant à elle mesurée à partir du débit hydraulique à l'entrée de la broche. Ceci permet d'obtenir des données expérimentales fiables.

Ces mesures, mêmes imprécises permettent d'avoir les vitesses d'avance et de rotation en fonction du temps ou en fonction de la ligne de joint $\mathcal{L}$. Ces données sont nécessaires à la mise en place de la méthodologie.

3.1.3. La mesure des efforts et des couples

Les mesures des efforts, F_x, F_y et F_z et du couple C_z sont prises au niveau des capteurs de pression au sein de la tête de soudage, comme présenté sur la Figure 68.

La cellule de mesure de pression permettant de mesurer F_z lors de l'opération de soudage est située juste au-dessus du piston appliquant l'effort. Ceci assure une bonne précision des valeurs mesurées. L'erreur de mesure du capteur est estimée par MTS à 0.9kN sur la gamme d'effort : 0 à 90kN. De même, le couple C_z est directement calculé à partir du flux hydraulique entrant au sein de la broche, assurant également une mesure précise.

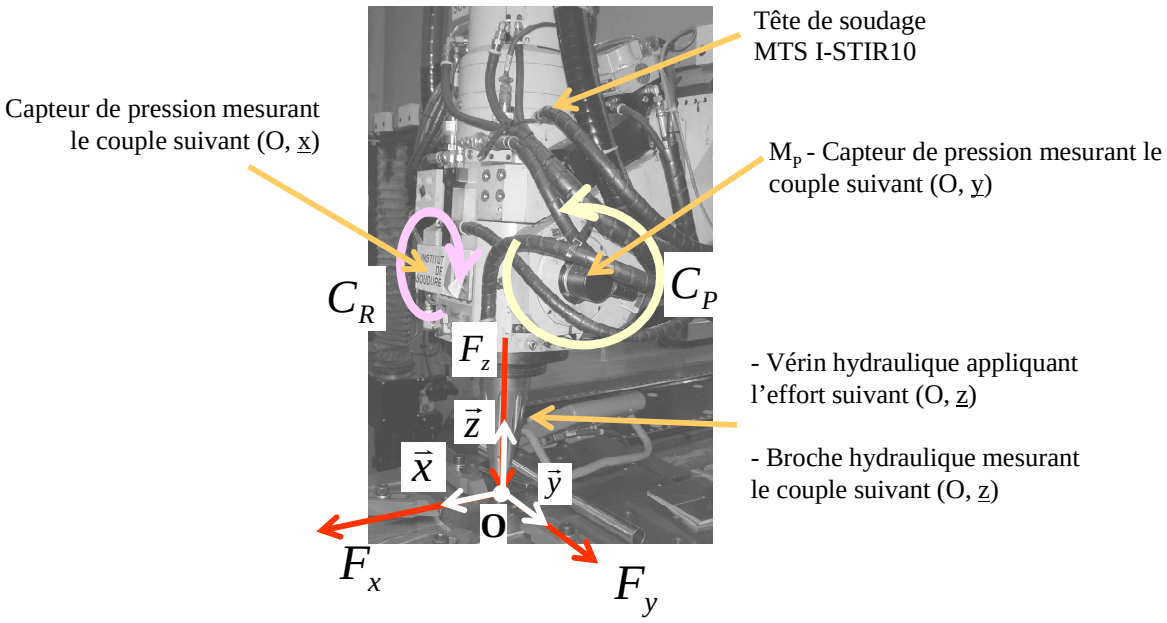


Figure 68: Présentation de la tête de soudage utilisée et de l'origine des mesures des couples et des efforts présentés ci-après (le couple à la broche C_z n'est pas représenté)

Comme présenté sur la Figure 68 il n'y a pas de capteur d'effort mesurant de manière directe les efforts F_x et F_y appliqués sur l'outil. Ils sont déterminés à partir de la mesure des couples C_P et C_R. Les valeurs des efforts F_x et F_y transmises par la machine correspondent à une combinaison linéaire entre les efforts effectifs et les couples non mesurés de $M_{Outil/Matière}$. Ainsi, nous considèrerons la composante $M_{Outil/Matière}$, de l'équation (16), comme nulle car intervenant dans le calcul de la composante $R_{outil/pièce}$ (équation (16)).

Ainsi, F_x et F_y, qui vont être analysés, sont une combinaison entre les efforts effectifs au niveau de l'outil et des couples non mesurés. L'erreur estimée par MTS sur la mesure de ces efforts est de 0.4kN sur une gamme de 40kN. De part l'erreur due au re-calcul des efforts F_x et F_y à partir de la mesure de couple et l'erreur du capteur, l'analyse des efforts F_x et F_y devront être considérés avec beaucoup plus de précaution. Cela tout particulièrement pour des efforts de faibles amplitudes dont les valeurs seront plus sensibles aux erreurs de mesure.

La machine utilisée permet ainsi de collecter les données expérimentales relatives à la cinématique et des actions mécaniques appliquées sur l'outil en fonction du temps ou de la

position de celui-ci le long de la ligne de joint $\mathcal{L}$. Ces données sont nécessaires à la mise en place de la méthodologie pour qualifier un moyen de production. Elles représentent des sorties des actions A11 – Analyser des actions Outil / Pièce et A12 – Analyser les interactions Outil / Matière du diagramme IDEF-0 de la Figure 54.

3.1.4. Convention des efforts mesurés

La mesure des efforts et des couples présentés dans ce rapport correspond à la ***réaction de la matière appliquée sur l'outil***. Les actions mécaniques mesurées par la machine sont présentées par l'équation (16) et schématisées sur la Figure 69. Ainsi, d'après l'orientation des repères R_{MI} et R_O, définie précédemment, l'effort F_x sera toujours négatif car opposé à la direction d'avance (O, $\underline{x}_{Mi}$). De même, l'effort F_z sera toujours positif car c'est la réaction du matériau sur l'outil, donc appliqué suivant l'axe (O, $\underline{z}$) du repère R_O. Par contre, les signes de F_y et C_z dépendent de la cinématique de l'outil. En effet, comme suggéré par Muthukumaran et al. [MUT08], F_y est appliqué par l'outil vers le côté recul de la soudure. Soit, d'après nos conventions, F_y sera orienté vers le côté avance. C_z est la réaction de la matière à la rotation de l'outil, ainsi son signe dépendra du sens de rotation de l'outil.

$$\left\{\mathcal{T}_{\text{Matière / Outil}}\right\} = \left\{\begin{array}{c|c} -F_x & 0 \\ \pm F_y & 0 \\ F_z & \pm C_z \end{array}\right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \tag{17}$$

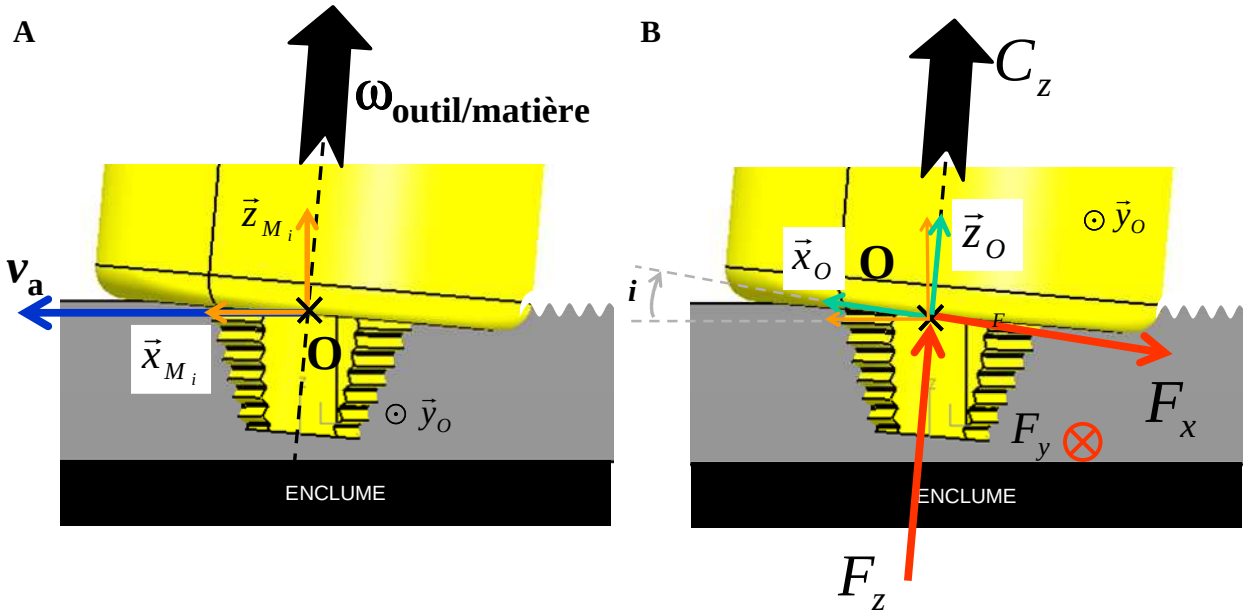


Figure 69: Cinématique et actions mécaniques appliquées sur l'outil. A- Cinématique. B- Présentation de l'orientation des efforts et du couple mesurés par la machine MTS I-Stir 10

Les efforts F_x, F_y et F_z sont les efforts mesurés dans le repère R_O lié à l'outil. Comme présenté dans l'analyse géométrique, ce repère est orienté et positionné par rapport au repère

R_{Mi} associé à la ligne de joint. Ainsi lorsque l'outil est incliné d'un angle de déplacement, *i*, l'effort F_x suivant (O, $\underline{x}_O$) ne correspond plus à l'effort d'avance. L'équation (18) présente le calcul de l'effort d'avance, où F_x et F_z sont des composantes de cet effort.

$$F_{avance} = -\left[F_x \times \cos\left(i\right) + F_z \times \sin\left(i\right)\right] \tag{18}$$

Dans notre étude, nous avons analysé les efforts F_x, F_y et F_z qui sont appliqués sur l'outil et exprimés dans le repère R_O. Ce sont ces efforts qui sont transmis par l'outil sur la machine FSW.

Le paragraphe suivant s'intéresse à **l'étude du procédé FSW** à travers l'analyse des données expérimentales (efforts, couples, cinématique de l'outil). Ceci permettra de comprendre les actions mécaniques entre l'outil et la matière et par conséquent les actions mécaniques transmises à la machine.

3.2. Identification des phases opératoires en soudage

Dans la littérature, deux phases de soudage sont généralement évoquées, la phase de plongée et la phase de soudage. Nous allons étudier de manière plus exhaustive l'opération de soudage dans sa globalité.

Pour identifier les phases opératoires de soudage, la cinématique de l'outil va être décomposée. La première étape que nous avons identifiée est la mise en contact de l'outil avec la surface supérieure des pièces. Nous considérerons à cet instant le démarrage de la phase de soudage et son étude cinématique. Pour ce faire, nous avons étudié :

- La cinématique de l'outil suivant l'axe (O, $\underline{z}$), permettant d'identifier les sous phases de plongée et de retrait de l'outil (Figure 70).
- La cinématique de l'outil suivant l'axe (O, $\underline{x}_{Mi}$), permettant d'identifier les sous-phases de soudage.
- La vitesse de rotation de la broche.

L'analyse des données expérimentales ont permis de schématiser l'ensemble de la cinématique de l'outil au cours d'une opération de soudage FSW, comme présenté sur la Figure 70. Ainsi, chacune des phases de soudage sera décomposées en sous phases cinématiquement indépendantes.

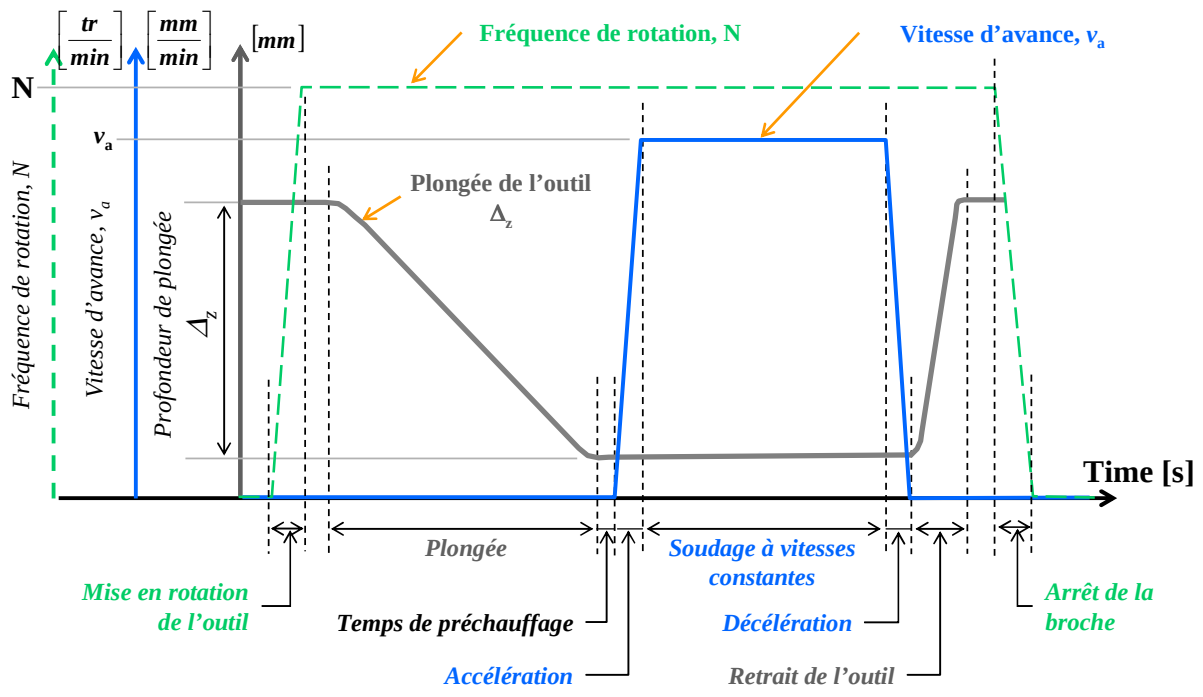


Figure 70: Visualisation de la cinématique d'une opération de soudage en fonction du temps

La phase de soudage s'articulera ainsi :

La phase de plongée :

- Mise en position de l'outil à la surface des pièces.
- La ***mise en rotation de l'outil***.
- Une fois la vitesse de rotation ω atteinte, l'outil entame un mouvement suivant l'axe (O, $\underline{z}_O$). Lorsque la profondeur de plongée est atteinte (Δ_z), l'outil stoppe alors son mouvement de descente.

La phase de temps de maintien :

- L'outil tourne sur lui-même un temps donné. C'est la ***phase de préchauffage en début de soudure***. Selon le jeu de paramètre opératoire imposé, ce temps peut être plus ou moins long, voire nul.

La phase de soudage :

- Une fois ce temps écoulé, l'outil est animé d'un mouvement d'avance suivant (O, $\underline{x}_{Mi}$). L'outil entame alors une ***phase d'accélération*** où sa vitesse linéaire augmente progressivement pour atteindre la vitesse d'avance paramétrée v_a.

- Une fois cette vitesse v_a atteinte, débute une phase que nous avons nommée la ***phase de soudage à vitesses constantes***. Vitesses constantes, car à partir de cet instant, la vitesse de rotation et d'avance sont constantes.
- Lorsque l'outil arrive à la fin de la ligne de joint $\mathcal{L}$, l'outil entame une ***phase de décélération*** afin de s'immobiliser. L'outil est toujours en rotation.
- L'outil est alors retiré du plan de joint (***retrait de l'outil***).
- Pour terminer l'opération, la rotation de la broche est arrêtée (***arrêt de la broche***).

Sur l'ensemble de ces sous-phases identifiées, la mise en position de la broche, le temps de maintien, le retrait de l'outil et l'arrêt de la broche n'ont pas été étudiées suite à l'analyse des courbes d'efforts et de couples. Ces phases sont non caractéristiques pour le dimensionnement d'un moyen de production FSW. C'est pourquoi elles ont été négligées. L'objectif est d'étudier séparément chaque sous-phase afin de déterminer les paramètres définissant une machine FSW.

L'étude des courbes d'efforts et de couple, présentées sur les Figure 71 et Figure 72, montrent que leurs évolutions est fonction de la phase opératoire. Ceci est dû à une cinématique de l'outil différente au cours du soudage, entrainant des interactions Outil / Matière différentes. Dans l'analyse proposée, les ***paramètres de conduites*** constituent un des paramètres de contrôle de l'action A12 - Analyser les interactions Outil / Matière. Le terme paramètres de conduite regroupe l'ensemble des paramètres appliqués sur l'outil au cours d'une opération de soudage. Il semble nécessaire de les énumérer de manière exhaustive.

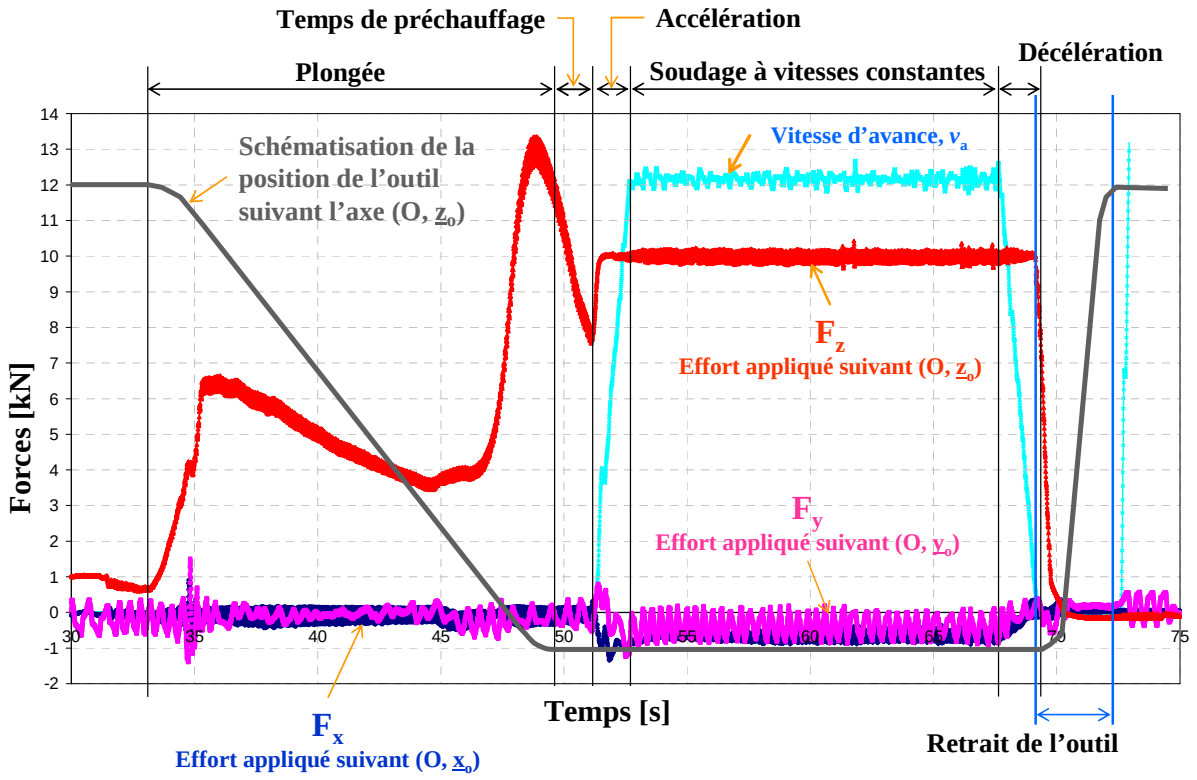


Figure 71: Evolution des efforts mesurés au cours d'une opération de soudage en fonction du temps. Assemblage d'un alliage d'aluminium de la série 6000 d'épaisseur 6mm. L'opération est contrôlée en effort

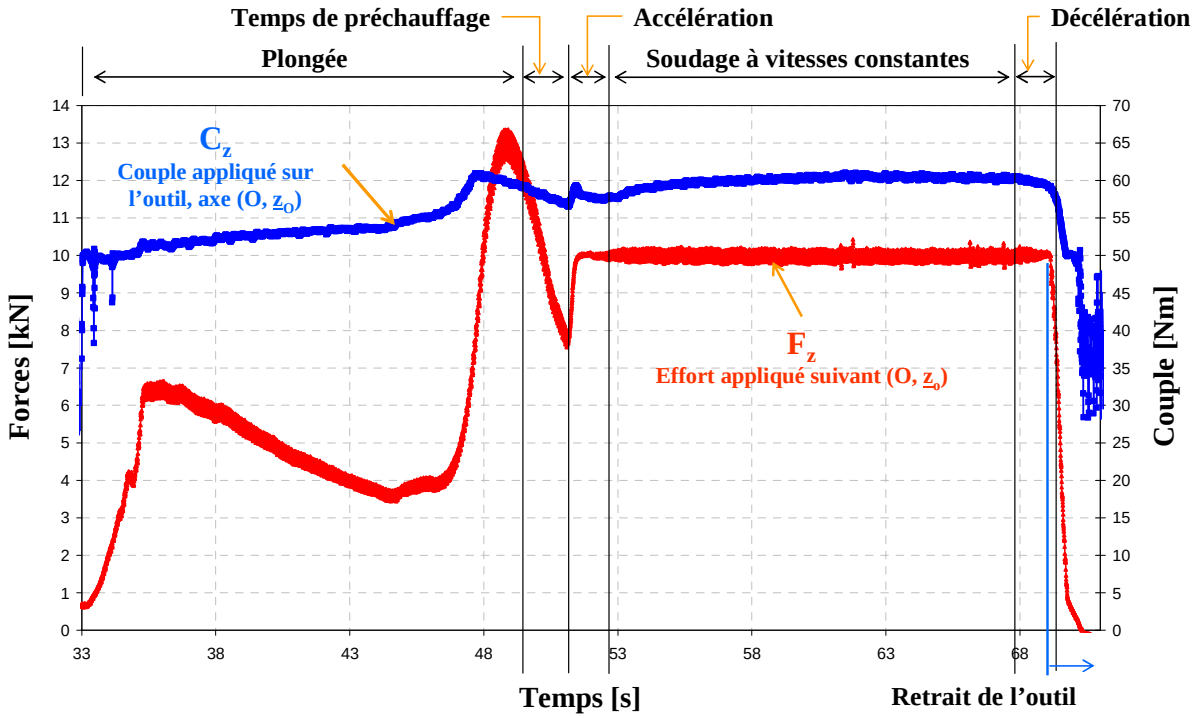


Figure 72: Evolution de l'effort F_z et du couple C_z lors d'une opération de soudage en fonction du temps. Assemblage d'un alliage d'aluminium de la série 6000 d'épaisseur 6mm. L'opération est contrôlée en effort

3.3. Analyse détaillées de l'opération de soudage

3.3.1. La phase de plongée

Cette phase correspond à l'insertion de l'outil au sein du matériau initialement à température ambiante [ZAE04]. Cela génère des déformations plastiques importantes autour de l'outil [MAN08] ainsi qu'une montée en température du matériau générant des interactions fortes entre l'outil et la matière. Elles peuvent être visualisées sur Figure 74. Cette phase est importante car elle va conditionner l'état thermomécanique du matériau en début de soudage [MAN08].

- Les paramètres de conduites

Dans notre étude, la phase de plongée est pilotée en position, c.à.d. en contrôlant le déplacement de l'outil au cours du temps. Les paramètres de conduite associés à cette phase et schématisés sur la Figure 73 sont :

Δ_z [mm] Profondeur de plongée. Elle est généralement inférieure à l'épaisseur soudée et dépend de la longueur du pion de l'outil.

N_p [tr/min] Fréquence de rotation de l'outil lors de la plongée

v_p [mm/min] Vitesse de plongée de l'outil suivant l'axe (O, z)

a_p [mm/s²] Accélération de l'outil suivant l'axe (O, z)

d_p [mm/s²] Décélération de l'outil suivant l'axe (O, z)

$F_{z\ seuil}$ [kN] Effort seuil, effort maximal à ne pas dépasser. Cette consigne est une protection des systèmes de la machine

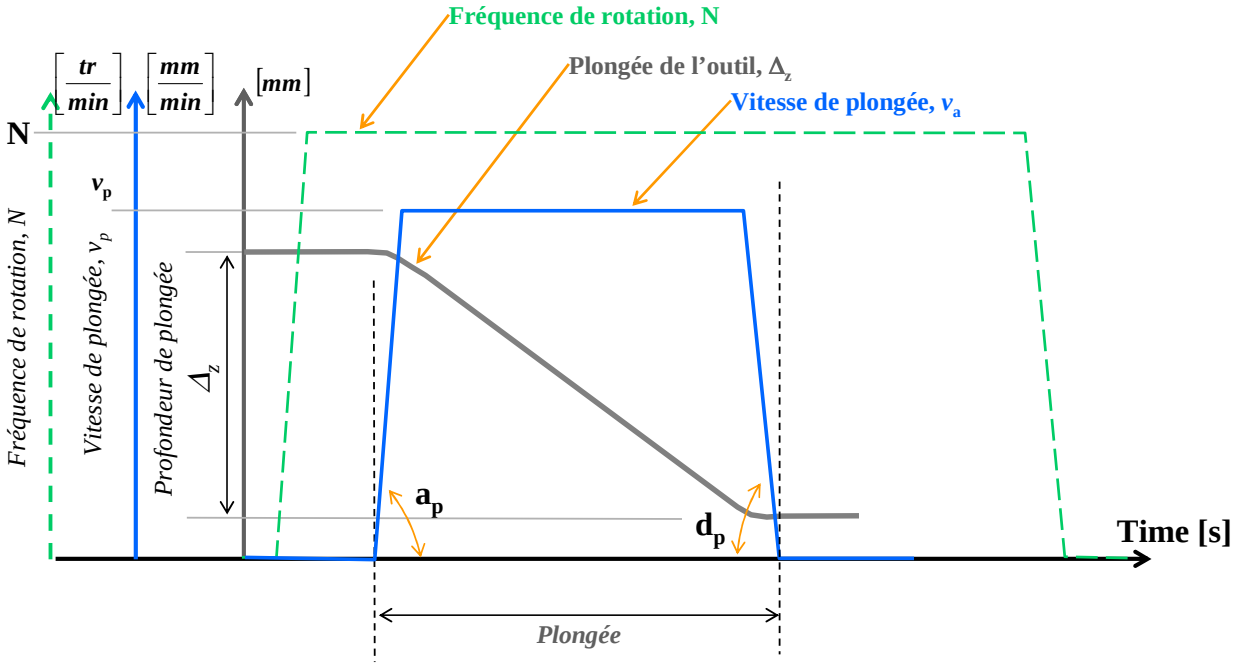


Figure 73: Schématisation des paramètres de conduite appliqués sur l'outil pendant la phase de plongée

➢ Evolution des efforts et des couples

Généralement, la phase de plongée est caractérisée par un pic d'efforts F_z et de couple C_z en fin de plongée [ZAE04, SIM06]. Sur la Figure 74 ces deux pics peuvent être visualisés. Les courbes obtenues correspondent bien à celle décrite par Gerlich et al. [GUE07]. Etant donné que cette phase a été longuement décrite dans l'étude bibliographique et qu'elle a fait l'objet d'une étude expérimentale particulière présentée dans le chapitre 3, nous ne nous attarderons pas sur l'analyse des courbes de plongée dans ce chapitre.

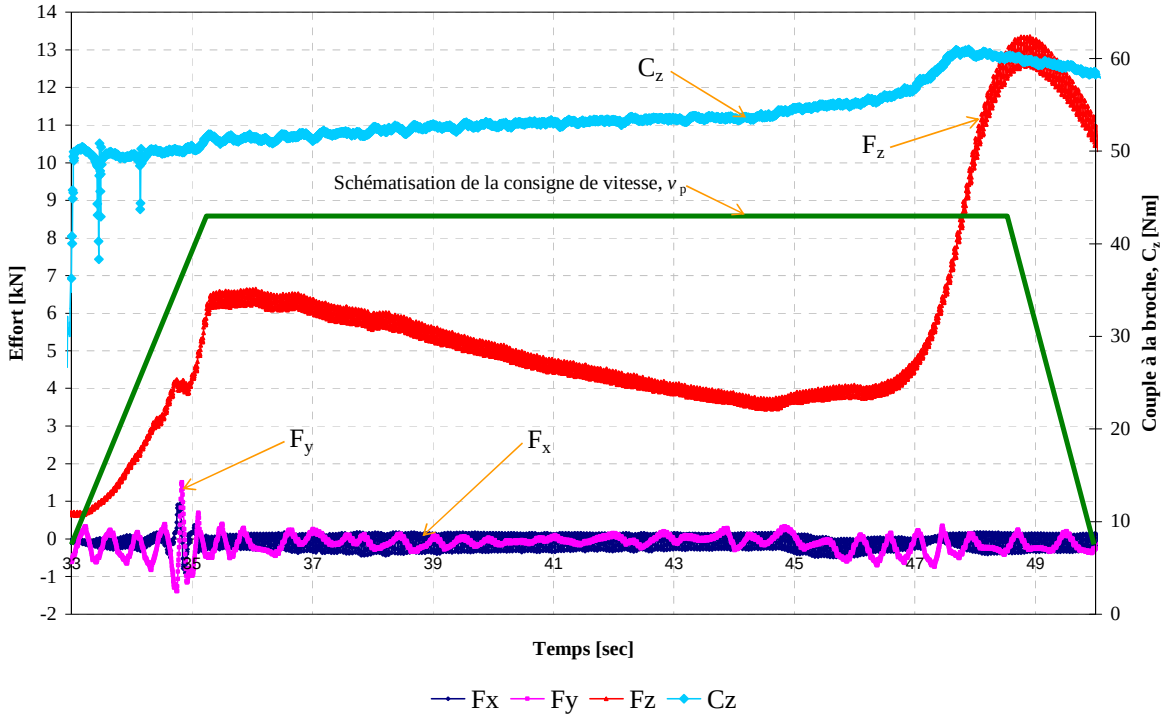


Figure 74: Efforts et couple générés en phase de plongée

➢ Torseur cinématique de l'outil par rapport à la pièce (équation (19))

$$\left\{ C_{\text{Outil/Pièces}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \boxed{\varpi_p} & \boxed{-v_p} \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \qquad (19)$$

Remarque : Les paramètres encadrés correspondent aux paramètres de conduite de cette phase.

➢ Torseurs des actions mécaniques appliquées sur l'outil (équation (20))

$$\left\{ \mathcal{T}_{\text{Matière / Outil}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} -F_x & 0 \\ \pm F_y & 0 \\ F_z & \pm C_z \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \tag{20}$$

Avec ce mode de contrôle en position, le torseur des actions mécaniques est une conséquence des paramètres opératoires appliqués sur l'outil.

Remarque : Les composantes M_x et M_y sont supposées négligeables, c'est pourquoi on les retrouve dans le torseur des actions mécanique avec la valeur zéro.

- Puissance consommée à la broche (équation (21))

$$P = C_z \cdot \omega_z + F_z \cdot v_p \approx C_z \cdot \omega_z \tag{21}$$

3.3.2. Phase de temps de maintien

Cette phase débute lorsque la vitesse de plongée est nulle, c.à.d. lorsque la profondeur de pénétration paramétrée est atteinte. Ainsi, la position de l'outil n'évolue plus par rapport au repère pièce R_p, car les vitesses linéaires de l'outil sont nulles.

- Paramètres de conduite :

N	[tr/min]	Fréquence de rotation de l'outil
Δt	[s]	Temps de maintien

Cette phase peut être considérée comme une phase « tampon ». Au cours de cette phase, la température du matériau augmente progressivement [GUE07], par frottement et déformation plastique autour de l'outil. L'objectif est d'amener le matériau, autour de l'outil, à des conditions thermomécaniques permettant la transition entre un outil stationnaire et un outil mobile sans défaut. Ce temps dépendra du matériau soudé, de l'épaisseur et des conditions thermomécaniques en fin de plongée.

- Evolution des efforts et du couple

La Figure 75 présente l'évolution des efforts et du couple en fonction du temps. L'augmentation de la température adoucit le matériau autour de l'outil entrainant une chute du couple C_z et de l'effort F_z.

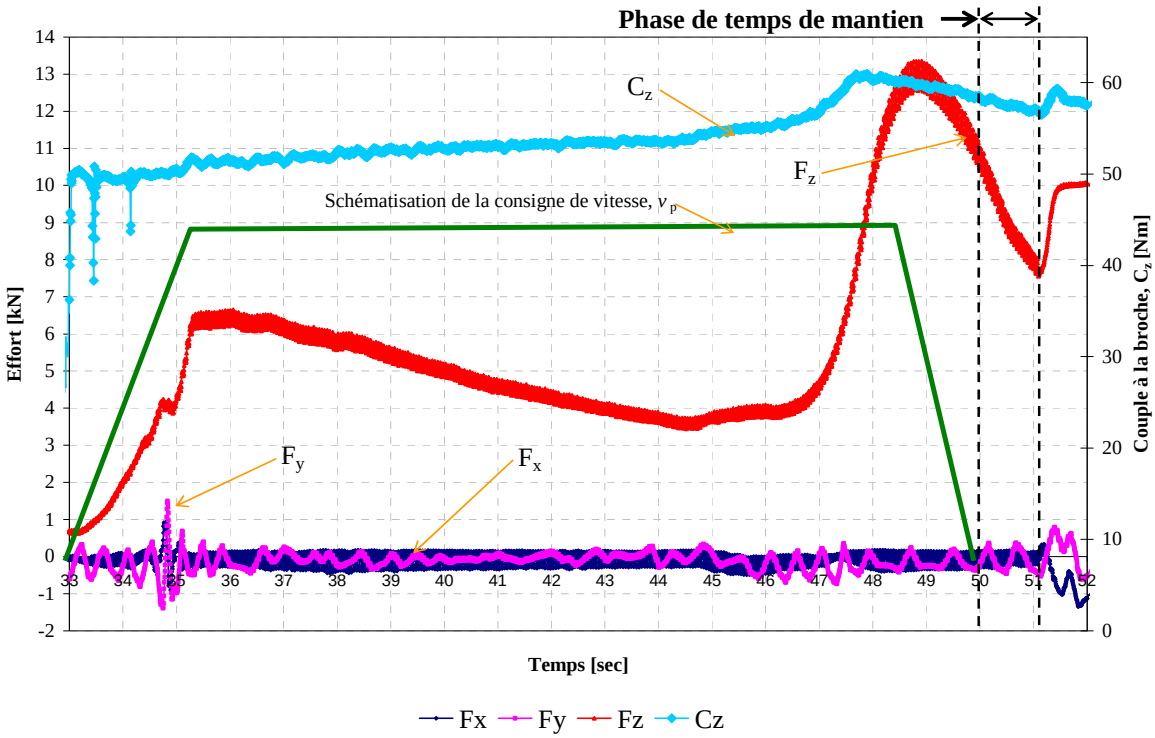


Figure 75: Efforts et couple générés en phase de temps de maintien

- Torseur cinématique imposé sur l'outil (équation (22))

$$\left\{ C_{\text{Outil/Pièces}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \boxed{\varpi_p} & 0 \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \tag{22}$$

- Torseurs des actions mécaniques appliquées sur l'outil (équation (23))

$$\left\{ \mathcal{T}_{\text{Matière / Outil}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} -F_x & 0 \\ \pm F_y & 0 \\ F_z & \pm C_z \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \tag{23}$$

- Puissance consommée à la broche (équation (24))

$$P = \varpi_z \cdot C_z \tag{24}$$

3.3.3. La phase de soudage

La sous-phase d'accélération

L'outil est animé d'un mouvement d'avance. A partir de cette phase, l'outil est piloté en effort. Le paramètre d'asservissement sera l'effort appliqué par l'outil sur les pièces. La

régulation permettra d'obtenir un effort « constant » tout au long de l'opération de soudage. Les avantages de ce mode de pilotage ont été présentés dans le chapitre 1.

- Paramètres de conduite :

Paramètres liés à la cinématique de l'outil :

N	[tr/min]	Fréquence de rotation de l'outil lors de soudage
$\frac{d\varpi}{dt}$	[rad/s]	Accélération angulaire de la broche si la fréquence de rotation en phase de plongée et de soudage sont différentes.
v_a	[mm/min]	Vitesse de soudage de l'outil suivant l'axe (O, $\underline{x}_{Mi}$)
a_s	[mm/s²]	Accélération de l'outil suivant l'axe (O, $\underline{x}_{Mi}$)

Ces deux derniers paramètres sont liés au mouvement d'avance, l'outil passe d'une vitesse nulle à la vitesse de soudage.

Paramètres relatifs à l'asservissement en effort de l'opération :

F_z	[kN]	Effort de consigne appliqué suivant (O, $\underline{z}$)
v_{force}	[kN/s]	« Vitesse » d'application de l'effort F_z,
a_{force}	[kN/s²]	Taux d'accroissement de l'application de F_z,

Remarque : au cours de cette phase, le mode de pilotage change. On passe d'un contrôle en position de l'outil vers un contrôle en effort. La position de l'outil n'est alors plus pilotée.

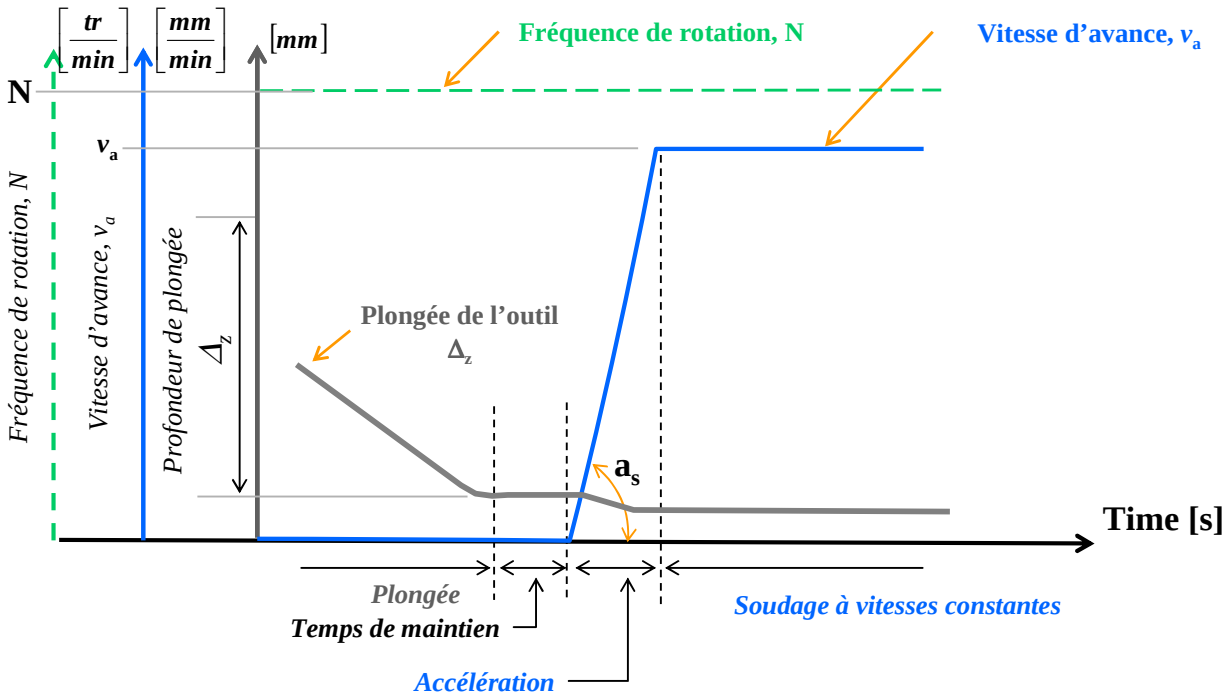


Figure 76: Schématisation des paramètres de conduite relatif à la cinématique de l'outil lors de la phase de plongée

➢ Evolution des efforts et des couples

La Figure 77 présente l'évolution des efforts et du couple au cours de la phase d'accélération. Le passage d'un mode de contrôle en position vers un contrôle en effort est identifiable sur la courbe d'effort F_z grâce à une petite rampe d'effort permettant de passer de l'effort appliqué en fin de temps de maintien ($F_{z\ initial}$) vers l'effort de soudage paramétré. L'application des paramètres de conduite entraine une augmentation du couple à la broche C_z et une augmentation des efforts F_x et F_y. Cette augmentation observée est une conséquence du mouvement d'avance et de l'application de l'effort F_z. L'amplitude des efforts et couple générés dépendent des paramètres opératoires, mais également des conditions thermomécaniques du matériau en fin de temps de maintien. Le comportement des efforts F_x et F_y ainsi que C_z dépendent également de l'évolution de F_z pendant cette phase. En effet, deux cas de figures s'offrent à nous, lorsque $F_{z\ initial}$ est inférieur à F_z ou lorsqu'il est supérieur comme le montre la Figure 78.

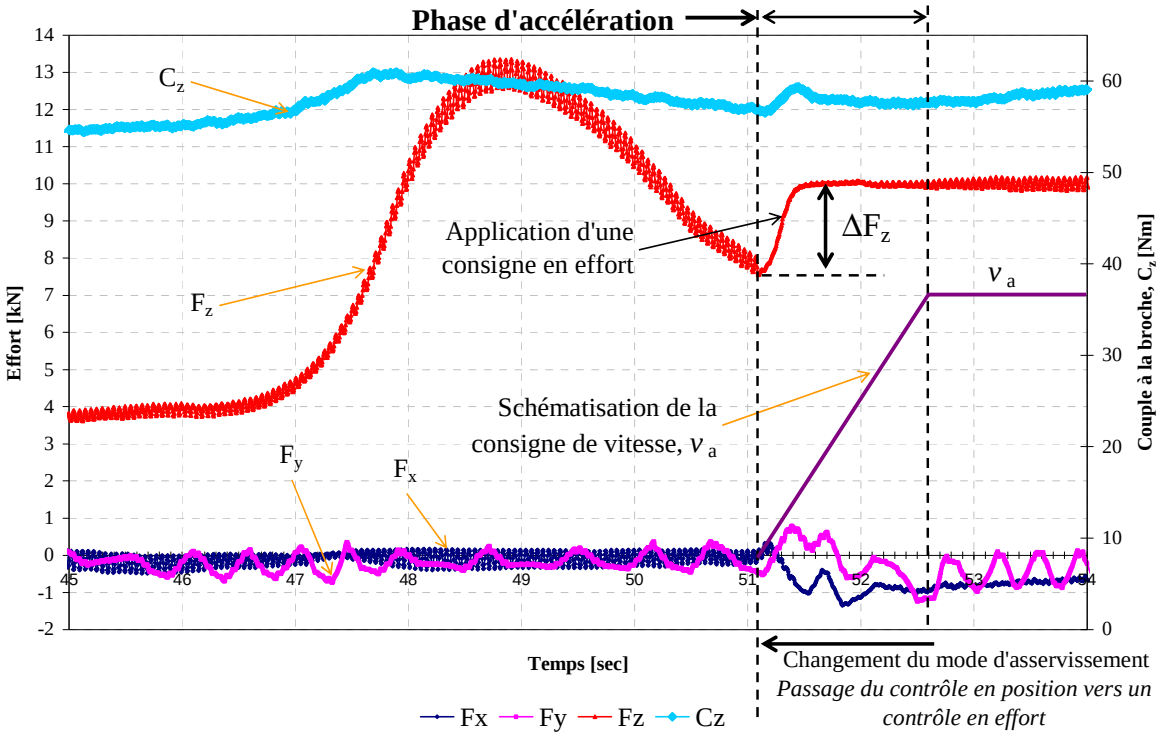


Figure 77: Efforts et couple générés en phase d'accélération

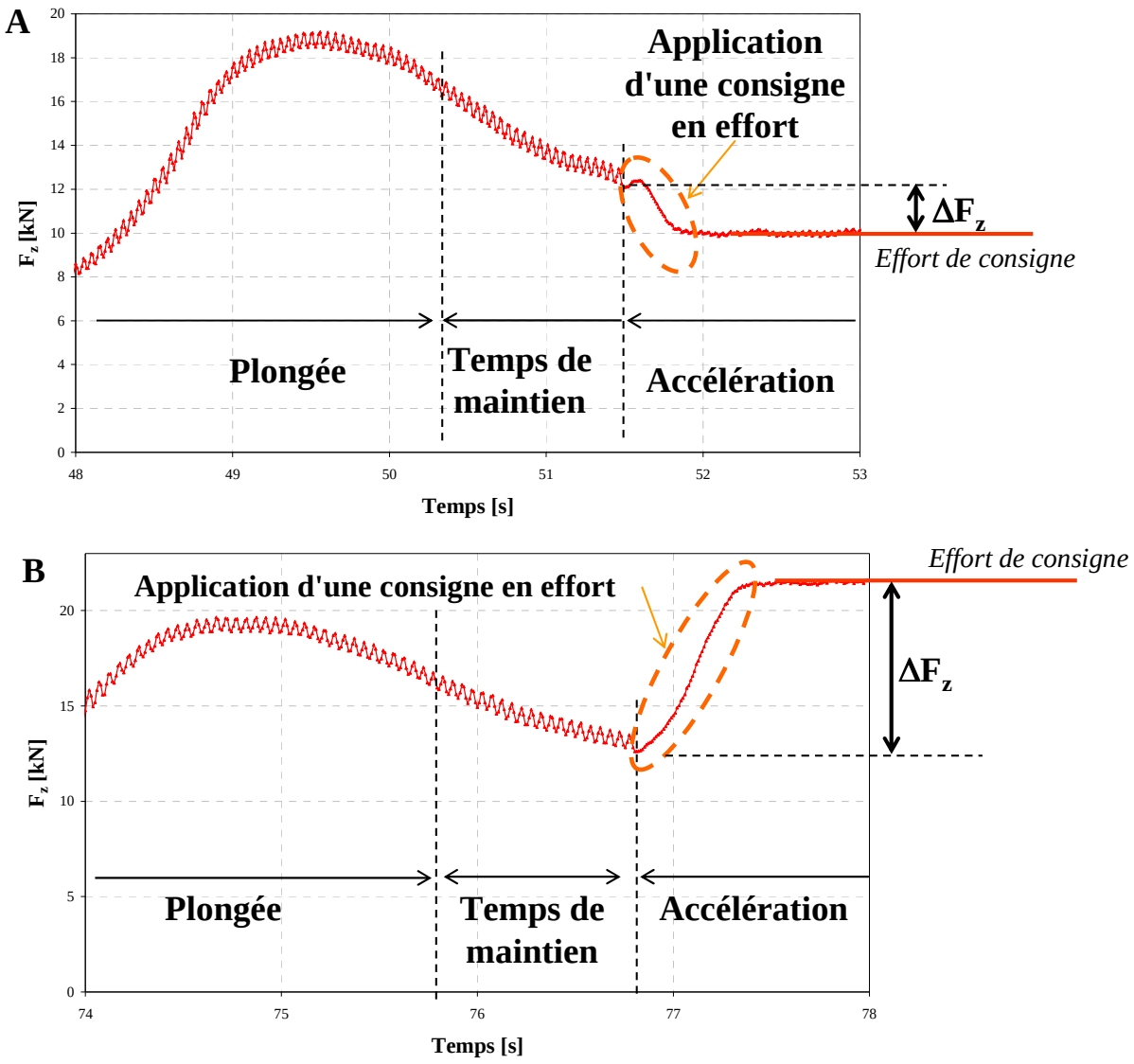


Figure 78: A- Taux d'accroissement de l'effort F_z négatif, car $F_{z\ initial}$ est supérieur à F_z paramétré en soudage. B - A- Taux d'accroissement de l'effort F_z positif car $F_{z\ initial}$ est inférieur à F_z paramétré en soudage

Remarque : le temps d'application de l'effort dépend des paramètres de conduite v_{force} et a_{force} et de la différence entre l'effort de consigne et celui à la fin du temps de maintien.

Par hypothèse, la phase d'accélération est considérée comme achevée dès que la vitesse d'avance paramétrée v_a est atteinte. Il est alors supposé qu'à partir de ce point, la machine régule la vitesse d'avance et que la phase de soudage à vitesses constantes débute.

- Torseur cinématique imposé sur l'outil (équation (25)) dans le cas d'une soudure rectiligne à plat

$$\left\{ C_{\text{Outil/Pièces}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \boxed{\varpi} & v_z \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} + \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & \boxed{[0 \rightarrow v_a]_{\Delta t}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right\}_{(O,\vec{x}_{M_i},\vec{y}_{M_i},\vec{z}_{M_i})} \tag{25}$$

La composante v_z apparaît dans le torseur cinématique car la position de l'outil suivant (O, $\underline{z}$) n'est pas un paramètre de conduite mais résulte de l'équilibre entre l'application des paramètres opératoires et la réaction de la matière. Toutefois cette vitesse est probablement de faible amplitude par rapport à la vitesse d'avance de l'outil.

- Torseurs des actions mécaniques appliquées sur l'outil (équation (26))

$$\left\{ \mathcal{T}_{\text{Matière / Outil}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} -F_x & 0 \\ \pm F_y & 0 \\ \boxed{[F_{z\,initial} \rightarrow F_z]} & \pm C_z \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \tag{26}$$

- Puissance consommée à la broche (équation (27))

$$P = C_z \cdot \varpi + F_{avance} \cdot v_a \tag{27}$$

Le calcul de l'effort d'avance est donné par l'équation (18).

Etude de la sous-phase : soudage à vitesses constantes

La phase d'accélération est suivie d'une phase où les vitesses de soudage et de rotation et la force F_z sont maintenus constants.

- Paramètres de conduite :

N	[tr/min]	La fréquence de rotation
v_a	[mm/min]	La vitesse d'avance
F_z	[kN]	L'effort axial appliqué sur l'outil

On retrouve les paramètres de conduite généralement associés au FSW.

- Evolution des efforts et des couples

La Figure 79 présente l'évolution des forces et du couple. Les efforts F_x, F_y et le couple semblent se stabiliser. Celle du couple laisse présager l'apparition d'un régime permanent dû à un apport de chaleur constant.

Un phénomène oscillatoire sur les mesures de l'effort F_y peut être identifié, rejoignant les constations effectuées par Balasubramanian et al. ou Muthukumaran et al. [MUT08, BAL09].

Cette phase a fait l'objet d'une étude plus approfondie dont les résultats sont exposés dans le chapitre 3.

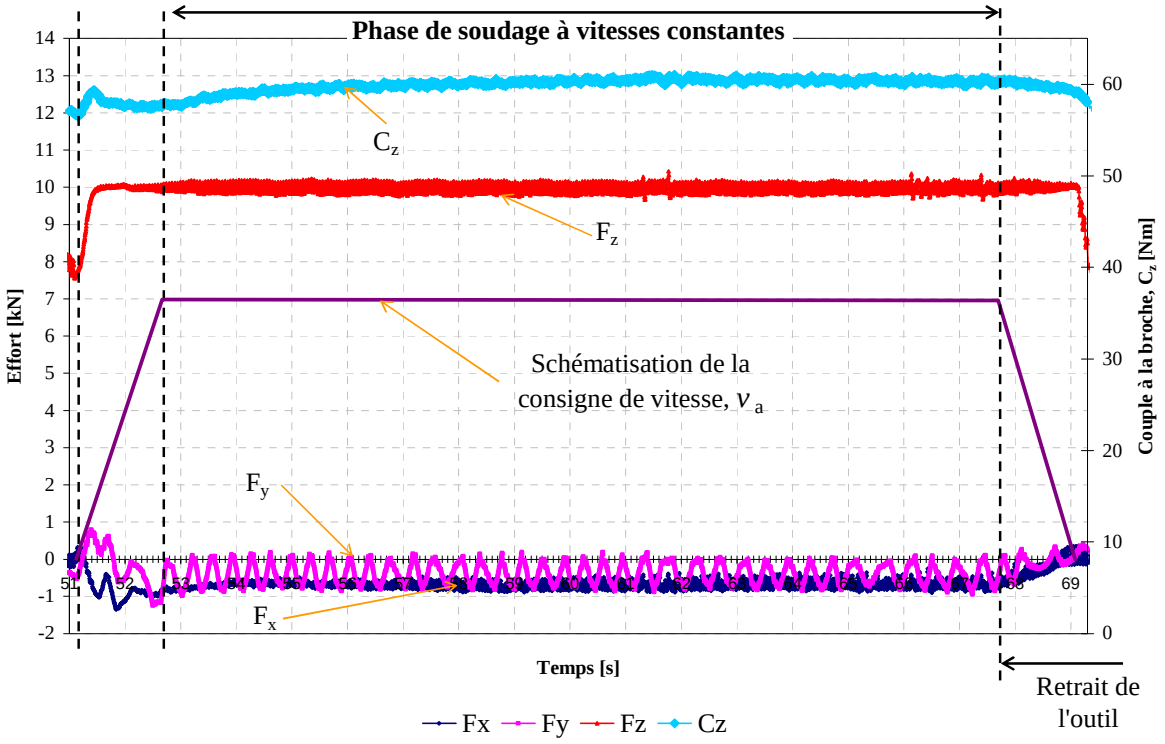


Figure 79: Evolution des efforts et du couple en fonction du temps lors de la phase de soudage à vitesses constantes

- Torseur cinématique imposé sur l'outil (équation (28)) dans le cas d'une soudure rectiligne à plat :

$$\left\{ C_{\text{Outil/Pièces}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \boxed{\varpi} & v_z \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} + \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & \boxed{v_a} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right\}_{(O,\vec{x}_{M_i},\vec{y}_{M_i},\vec{z}_{M_i})} \tag{28}$$

- Torseurs des actions mécaniques appliquées sur l'outil (équation (29))

$$\left\{ \mathcal{T}_{\text{Matière / Outil}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} -F_x & 0 \\ \pm F_y & 0 \\ \boxed{F_z} & \pm C_z \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \tag{29}$$

- Puissance consommée à la broche (équation (30)

$$P = C_z \cdot \varpi + F_{avance} \cdot v_a + F_z \cdot v_z \tag{30}$$

Etude de la phase de décélération

➢ Paramètres de conduite :

Lorsque l'outil a presque parcouru la distance $L_{soudée}$ paramétrée, il débute une phase de décélération jusqu'à son arrêt complet. Les paramètres de conduite de cette phase sont présentés ci-dessous :

Paramètres relatifs à la cinématique de l'outil:

N	[tr/min]	La fréquence de rotation,
d_a	[mm/s²]	La décélération de l'outil,

➢ Evolution des efforts et du couple

La Figure 81 présente l'évolution des efforts et du couple en fonction du temps. La réduction progressive de la vitesse d'avance entraine une réduction des efforts F_x, F_y et du couple C_z.

Le contrôle en effort F_z est encore appliqué sur presque la quasi-totalité de la phase de décélération (sur environ 95% de la phase).

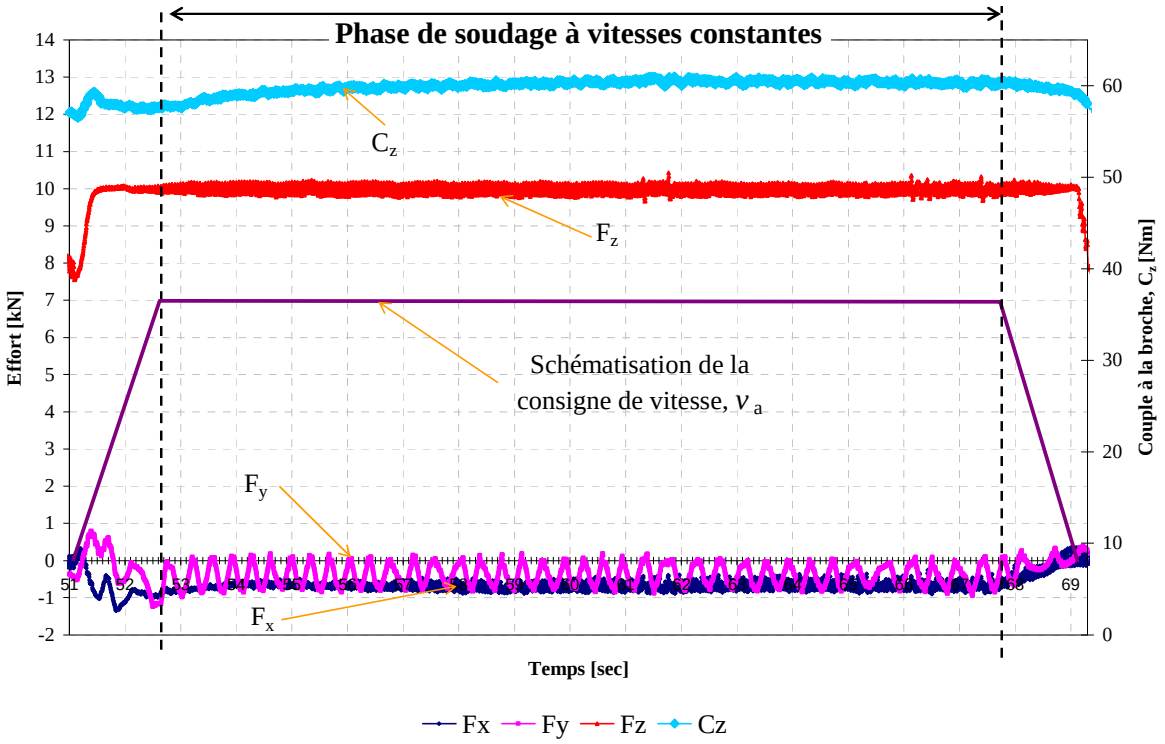


Figure 80: Efforts et couple en phase de décélération en fonction du temps

- Torseur cinématique imposé sur l'outil dans le cas du soudage rectiligne à plat (équation (31)) :

$$\left\{ C_{\text{Outil/Pièces}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \boxed{\varpi} & v_z \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} + \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & \boxed{[v_a \rightarrow 0]_{\Delta t}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right\}_{(O,\vec{x}_{M_i},\vec{y}_{M_i},\vec{z}_{M_i})} \tag{31}$$

- Torseurs des actions mécaniques appliquées sur l'outil (équations (32))

Sur environ 95% de la phase de décélération:

$$\left\{ \mathcal{T}_{\text{Matière / Outil}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} -F_x & 0 \\ \pm F_y & 0 \\ \boxed{F_z} & \pm C_z \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$$

Sur environ les dernier 05% de la phase de décélération: (32)

$$\left\{ \mathcal{T}_{\text{Matière / Outil}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} -F_x & 0 \\ \pm F_y & 0 \\ \boxed{[F_z \rightarrow 0]_{\Delta t}} & \pm C_z \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})}$$

- Puissance consommée à la broche (équation (33)) :

$$P = C_z \cdot \varpi + F_{avance} \cdot v_a \tag{33}$$

A la fin de la phase de décélération, la machine entame la phase de retrait de l'outil.

Etude du retrait de l'outil

La phase de retrait de l'outil commence avant son arrêt complet, c.à.d. à la fin de la phase de décélération. L'outil entame alors son retrait du cordon de soudure, laissant son empreinte dans les pièces assemblées. Dans cette phase, la chute du couple et des efforts F_x et F_y se poursuit.

- Paramètres de conduite :

Paramètres opératoires relatifs au retrait du pion :

N	[tr/min]	La fréquence de rotation,
$\Delta_{z\ retrait}$	[mm]	Hauteur de dégagement de l'outil
v_r	[mm/min]	Vitesse de retrait du pion suivant l'axe (O, z)
$a_{z\ retrait}$	[mm/s²]	Accélération du retrait du pion suivant l'axe (O, z)

➢ Evolution des efforts et du couple

Cette phase débute à la fin de la phase de décélération lorsque l'outil n'est pas encore totalement arrêté. Ceci évite que l'outil ne s'enfonce au sein de matière à la fin du cordon.

L'effort F_z est relâché progressivement tant que l'épaulement est en contact avec la surface de pièces. Le changement de pente de cet effort, visualisée sur la courbe, indique qu'à partir de ce point, l'épaulement n'est plus en contact avec la surface des pièces. De plus, à cet instant le couple connaît des variations d'amplitudes plus grandes, que pendant la phase de soudage. Ceci est lié à la non présence de matière autour de l'outil.

L'arrêt de la broche démarre à la fin de la phase de retrait. Une fois la broche arrêtée et l'outil dans sa position de dégagement, l'opération de FSW est terminée.

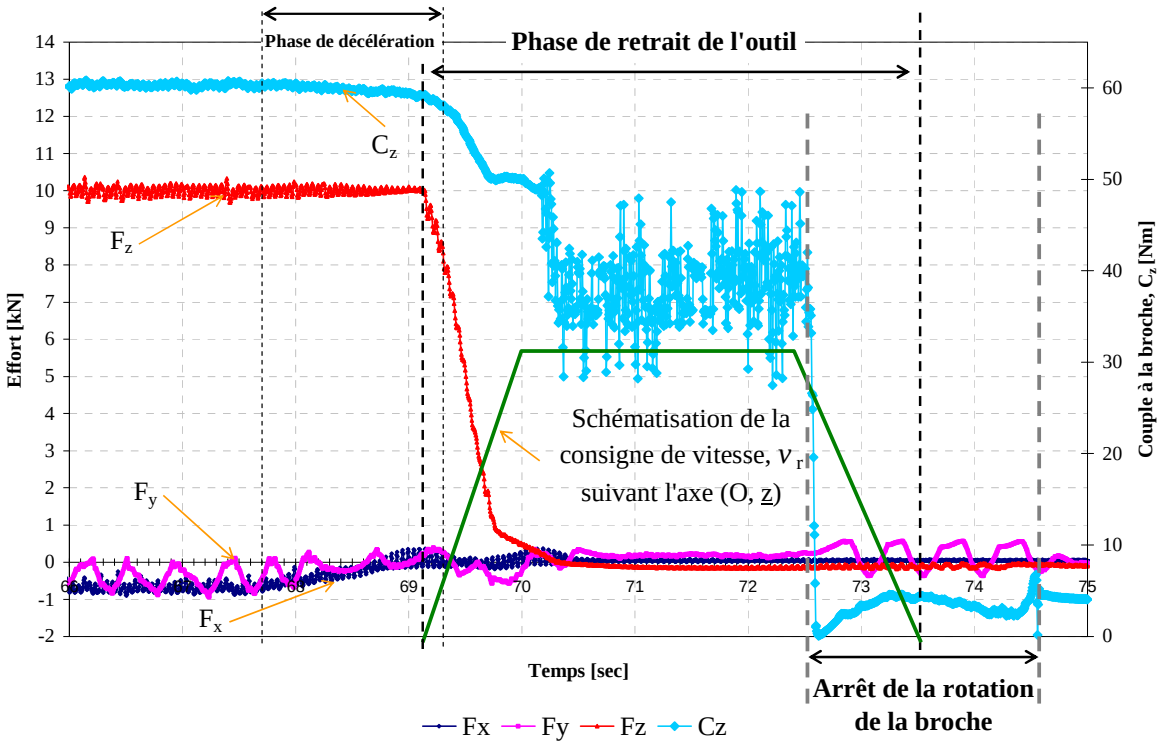


Figure 81: Efforts et couple en fonction du temps en phase de retrait de l'outil des pièces soudées

➢ Torseurs cinématiques imposé sur l'outil lors d'une soudure rectiligne à plats (équations (34), (35) et (36))

Ces trois torseurs décrivent la cinématique de l'outil pendant la remontée de la broche. En prenant en compte l'évolution de la vitesse de l'outil suivant (O, z), cette phase peut se décomposer en trois torseurs cinématiques distincts.

$$\left\{ C_{\text{Outil/Pièces}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \boxed{\varpi} & \boxed{[0 \rightarrow v_r]_{\Delta t}} \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \tag{34}$$

$$\left\{ C_{\text{Outil/Pièces}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \boxed{\varpi} & \boxed{v_r} \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \tag{35}$$

$$\left\{ C_{\text{Outil/Pièces}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \boxed{[\varpi \rightarrow 0]_{\Delta t}} & \boxed{[v_r \rightarrow 0]_{\Delta t}} \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \tag{36}$$

- Torseurs des actions mécaniques appliquées sur l'outil (équation (37))

$$\left\{ \mathcal{T}_{\text{Matière / Outil}} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} -F_x & 0 \\ \pm F_y & 0 \\ \boxed{[F_z \rightarrow 0]_{\Delta t}} & \pm C_z \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \tag{37}$$

- Puissance consommée à la broche (équation (38))

$$P = C_z \cdot \varpi + F_z \cdot v_r \tag{38}$$

3.3.4. Généralisation des résultats

Cette description des efforts et du couple présentés ci-dessus correspond aux courbes généralement obtenues lors du soudage des alliages d'aluminium. L'évolution des courbes peuvent légèrement différer selon l'alliage, l'outil et les paramètres de conduite. La Figure 82 présente deux types de courbes obtenues lors du soudage de deux matériaux distincts. D'une manière générale, la phase de pénétration se caractérise par un pic de couple C_z et d'effort F_z en fin de pénétration, la phase d'accélération par une augmentation de F_x, F_y et C_z qui se stabilisent pendant la phase de soudage à vitesses constantes. L'effort F_z à la fin du temps de maintien peut être supérieur ou inférieur à l'effort F_z appliqué en soudage.

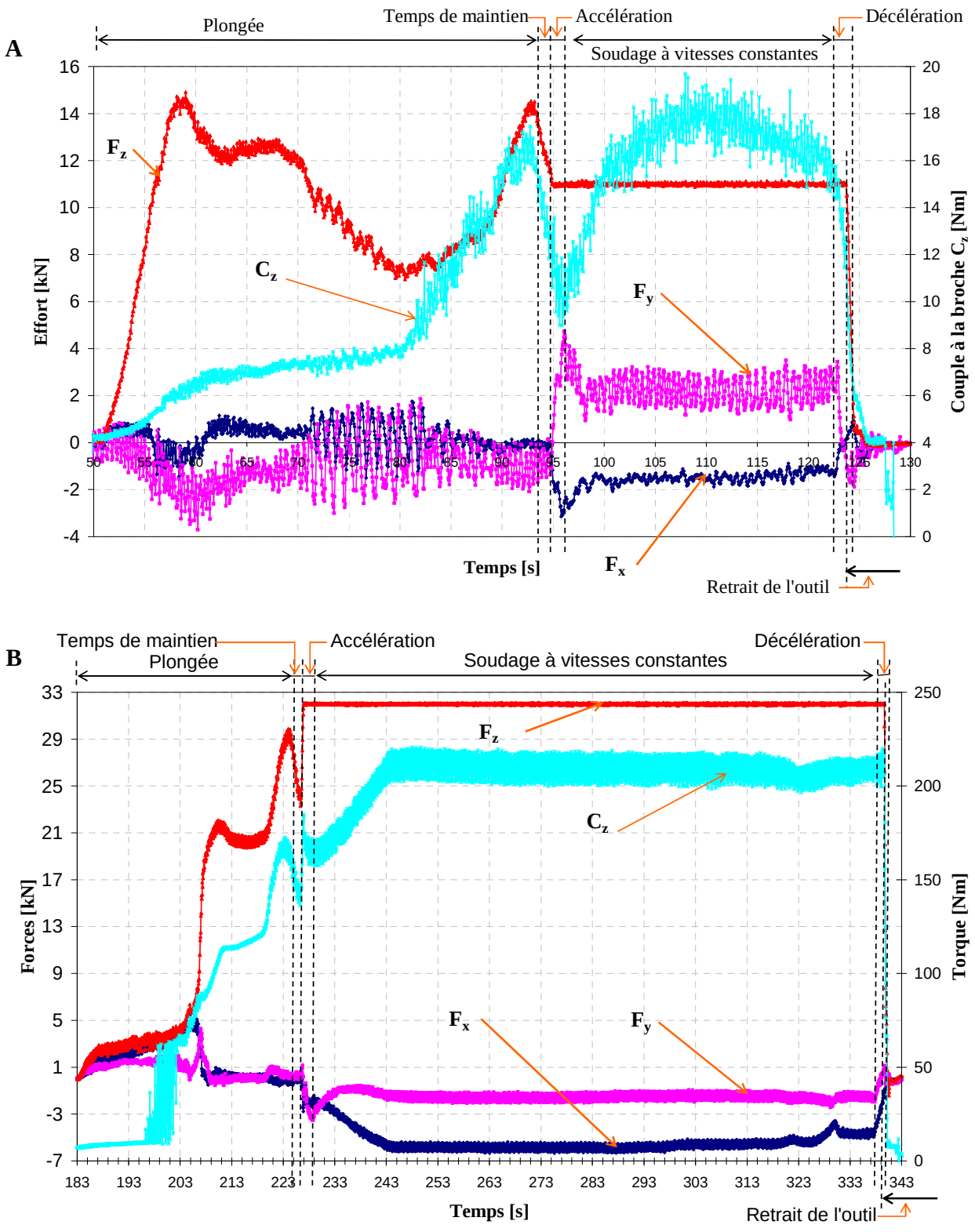


Figure 82: Courbes d'efforts et de couple obtenues A – lors du soudage bout à bout de l'alliage AlSi07Mg d'épaisseur 4mm et B - lors du soudage bout à bout de l'alliage 7020 en épaisseur 20mm

A partir de la cinématique de l'outil, quatre phases ont pu être identifiées, la plongée, le temps de maintien, le soudage et le retrait de l'outil. Les phases de plongée et de soudage peuvent être décomposées en trois sous-phases, une accélération, vitesses constantes et une décélération. Pour chaque phase, les paramètres opératoires ont été listés d'une manière exhaustive. L'évolution des efforts et la cinématique de l'outil par rapport à la pièce ont été décrites de façon générique.

Les torseurs des actions mécaniques et cinématiques ont été présentés pour toute la phase de soudage. Les résultats de cette étude montrent, conformément à ce qui a été décrit dans le chapitre 1, que dans chacune des phases opératoires, les efforts F_x, F_y et F_z et le couple à la broche décrivent l'interaction mécanique outil / pièce. L'objectif est d'identifier parmi l'ensemble des paramètres ceux qui seront pertinents pour le dimensionnement d'un moyen de production. Cela consiste à étudier ***les interactions entre le procédé et les ressources*** *(Action A2 présentée sur la Figure 83). Pour ce faire, il est nécessaire de comparer les efforts et les couples pour plusieurs essais, avec des matériaux, des épaisseurs et des paramètres opératoires différents.*

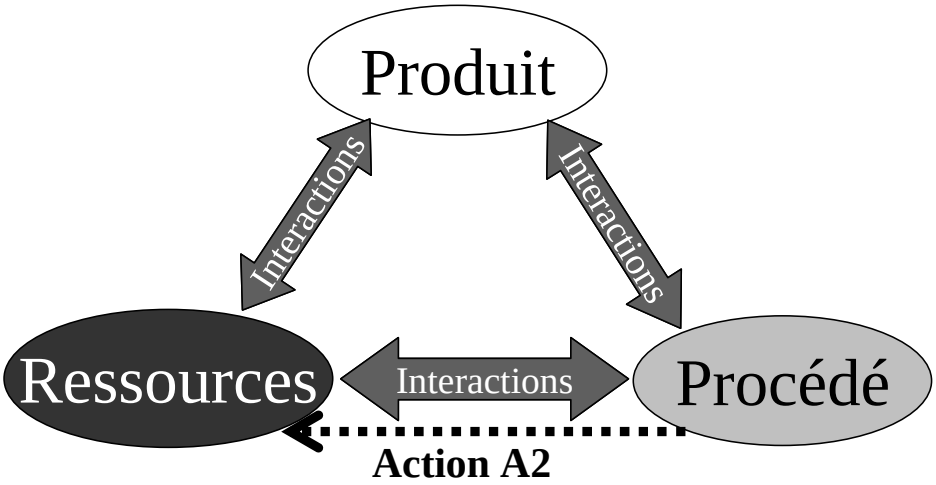


Figure 83: Identifier les phases dimensionnantes des moyens de production. Analyse des interactions procédé / ressources.

4. Identification des phases caractéristiques pour le dimensionnement

L'analyse mise en place dans les travaux de thèse se base sur l'étude des actions mécaniques engendrées afin de dimensionner une machine. Les torseurs cinématiques et des actions mécaniques ont été relevés pour les différentes phases opératoires identifiées et cela pour divers matériaux et épaisseurs. Cela nous permet de comparer les efforts et les couples générés phase par phase pour différentes configurations. L'objectif est d'identifier le(s) phase(s) dimensionnante(s) d'une opération de soudage par friction malaxage. Ces informations nous permettront de cibler les phases de soudage sur lesquelles les paramètres

opératoires doivent être « travaillés » pour réduire les actions mécaniques appliquées sur l'outil.

L'étude a porté sur les quatre phases suivantes :

- plongée de l'outil,
- accélération,
- soudage à vitesses constantes,
- décélération.

Les phases de temps de maintien et de retrait du pion ont été écartées de l'étude. L'analyse des courbes montrent que sur ces phases les efforts et les couples diminuent et ne seront donc pas dimensionnant en comparaison avec les quatre autres phases.

Les phases de plongée dans les plaques de 20mm d'épaisseurs ont été effectuées avec un pré-trou. Ainsi, cette information doit être prise en compte lors de l'analyse des efforts et des couples obtenus dans cette phase. Tous les résultats des essais présentés dans cette étude ont été réalisés avec le même type de géométrie d'outil, c.à.d. que d'une épaisseur à l'autre une homothétie de la géométrie de l'outil est effectuée. Les soudures obtenues sont sans défaut interne ou externe, c.à.d. que les paramètres de conduite appartiennent au domaine de soudabilité opératoire de la configuration testée.

Remarque : l'ensemble de ces soudures ont été réalisées à l'Institut de Soudure. Les données présentées correspondent à la moyenne des valeurs maximales d'essais réalisés au minimum deux fois. La même étude a été réalisée avec les valeurs moyennes. Les tendances visualisées sont identiques pour les valeurs moyennes et maximales. Ceci permet de conforter les analyses présentées ci-après. Dans un contexte de dimensionnement, nous nous sommes intéressés dans un premier temps aux valeurs maximales. C'est pourquoi, celles-ci sont présentées dans cette étude.
Etude de l'effort F_z sur l'ensemble de la phase de soudage

Les modes de contrôle utilisés sont le contrôle en position (ou vitesse) pendant la phase de plongée et en effort sur la phase de soudage.

4.1. Etude de l'effort F_z appliqué

L'étude révèle que, pour la plupart des cas, l'effort obtenu en fin de plongée, $F_{z\ max}$, est plus important que l'effort de soudage, comme présenté sur la Figure 84. Le pic d'effort en fin de pénétration peut être réduit en diminuant la vitesse de plongée, v_p [SIM06] ou par l'ajout d'un pré-trou [ZAE05]. Ainsi, même si le pic d'intensité est de courte durée, il est nécessaire de le prendre en considération pour la qualification de la machine, tout comme l'effort de soudage. Les résultats de cette analyse sont conformes à ceux qui peuvent être trouvés dans la littérature [SOU05, ZAE05] et aux études de courbes précédemment réalisées.

Remarque : les paramètres opératoires de la phase de plongée doivent certainement influencer la valeur maximale $F_{z\ max}$ mesurée en fin de plongée. Dans ces essais, les paramètres de conduites étaient toujours paramétrés de manières identiques.

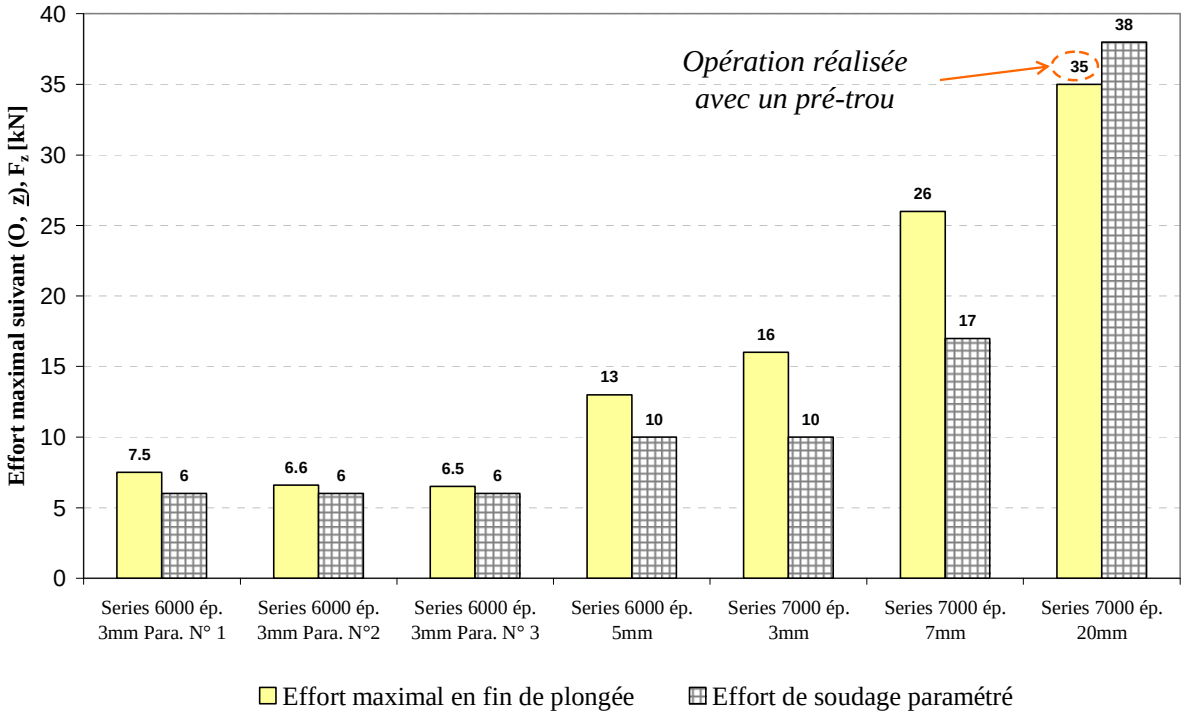


Figure 84: Comparaison du pic d'effort obtenu en fin de plongée et de l'effort appliqué pendant de soudage

4.2. Etude du couple C_z sur l'ensemble de la phase de soudage

La Figure 85 présente les couples maximums atteints lors des quatre phases opératoires. A travers ce graphique, deux tendances semblent se profiler. Le couple varie peut d'une phase à l'autre sur l'opération de soudage réalisée dans des tôles d'aluminium de la série 6000. D'autre part, pour les essais réalisés dans la série 7000, le couple évolue au cours de l'opération de soudage et est légèrement prédominant sur la phase de plongée (sauf pour les essais réalisés avec un pré-trou).

Toutefois, au regard des faibles écarts de valeurs du couple entre chacune des phases opératoires, son analyse ne permet de faire ressortir de phase caractéristique. Ainsi, l'ensemble des phases doivent être prises en compte.

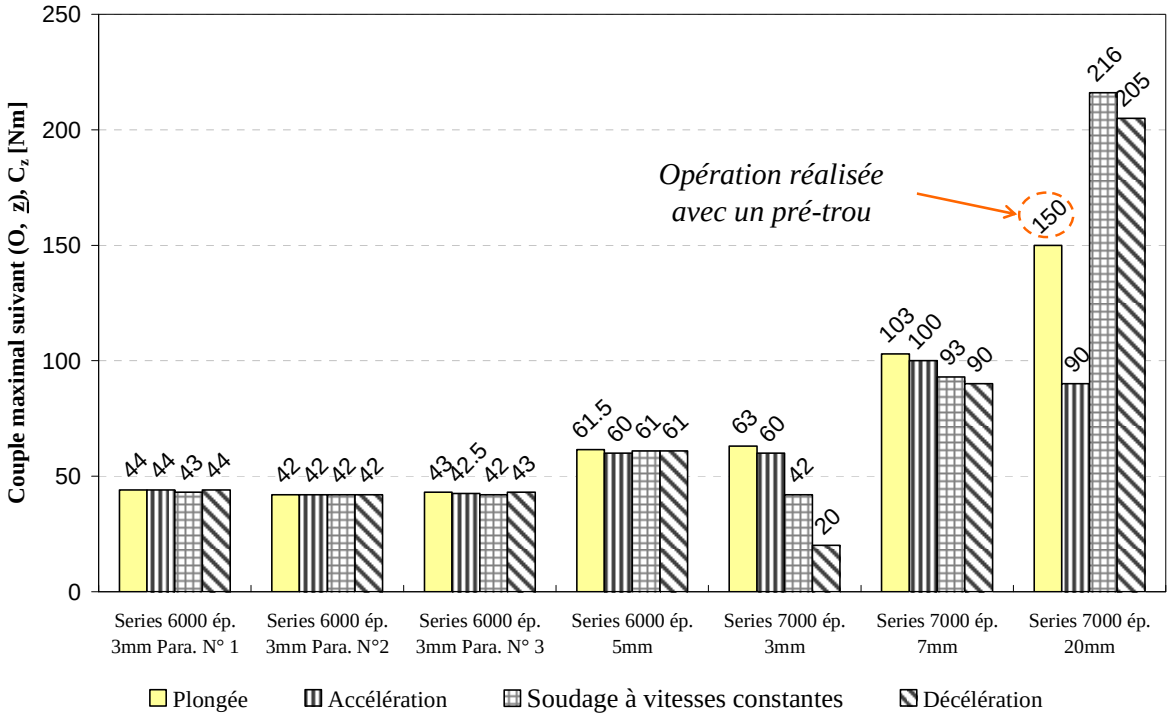


Figure 85: Comparaison de l'évolution des valeurs maximales du couple C_z obtenues tout au long de l'opération de soudage

4.3. Etude des efforts F_x et F_y sur l'ensemble de la phase de soudage

Les Figure 86 et Figure 87 présentent les efforts maximaux F_x et F_y appliqués sur l'outil au cours du soudage pour les quatre phases opératoires étudiées.

L'effort F_x correspond à la résistance à l'avance de l'outil au sein de la matière lors des phases d'accélération, de soudage à vitesses constantes et de décélération. Il peut être remarqué que l'effort F_x est prédominant sur la phase de soudage à vitesses constantes, surtout lors du soudage de forte épaisseur (7 et 20mm). Pour les faibles épaisseurs, 3, 5 et 7mm les valeurs mesurées sont faibles, inférieures à 1kN. En prenant en considération l'erreur de mesure, ces essais ne permettent pas d'identifier de phases prépondérantes. Toutefois, un surcroît d'effort a été mesuré en phase de soudage, rejoignant les constatations émises pour des épaisseurs plus importantes.

Dans le cadre des essais réalisés dans l'alliage d'aluminium de la série 6000 d'épaisseur 3 et 5mm, l'intensité maximale est enregistrée en phase de plongée pour l'effort F_y. Toutefois, comme le montre le soudage de plus forte épaisseur (7 et 20mm) cet effort ne peut être négligé pour la phase de soudage à vitesses constantes.

Sur la phase de soudage à vitesses constantes, l'effort F_x semble être prédominant par rapport à F_y, surtout pour les alliages de la série 7000 et les fortes épaisseurs. Ces résultats correspondent aux différentes courbes d'efforts présentées dans la littérature, comme par exemple celles des thèses de Mlle Simar [SIM06] et de M Sheiki [SHE05].

Ainsi, les efforts F_x et F_y sembleraient être prédominant sur les phases de plongée et de soudage à vitesses constantes. Ils connaissent une diminution de leurs intensités pendant la phase de décélération.

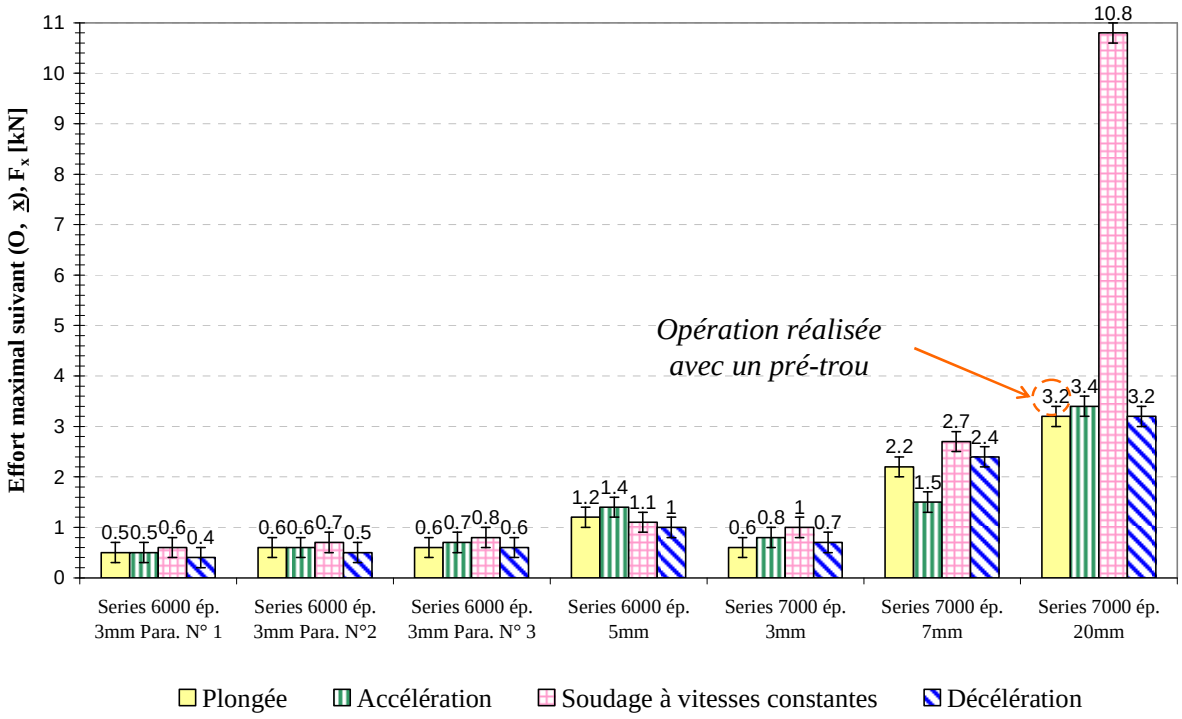


Figure 86: Comparaison de l'effort F_x maximal obtenu au cours de l'opération de soudage FSW. La barre d'erreur correspond à l'erreur de mesure du capteur d'amplitude de 0.4kN.

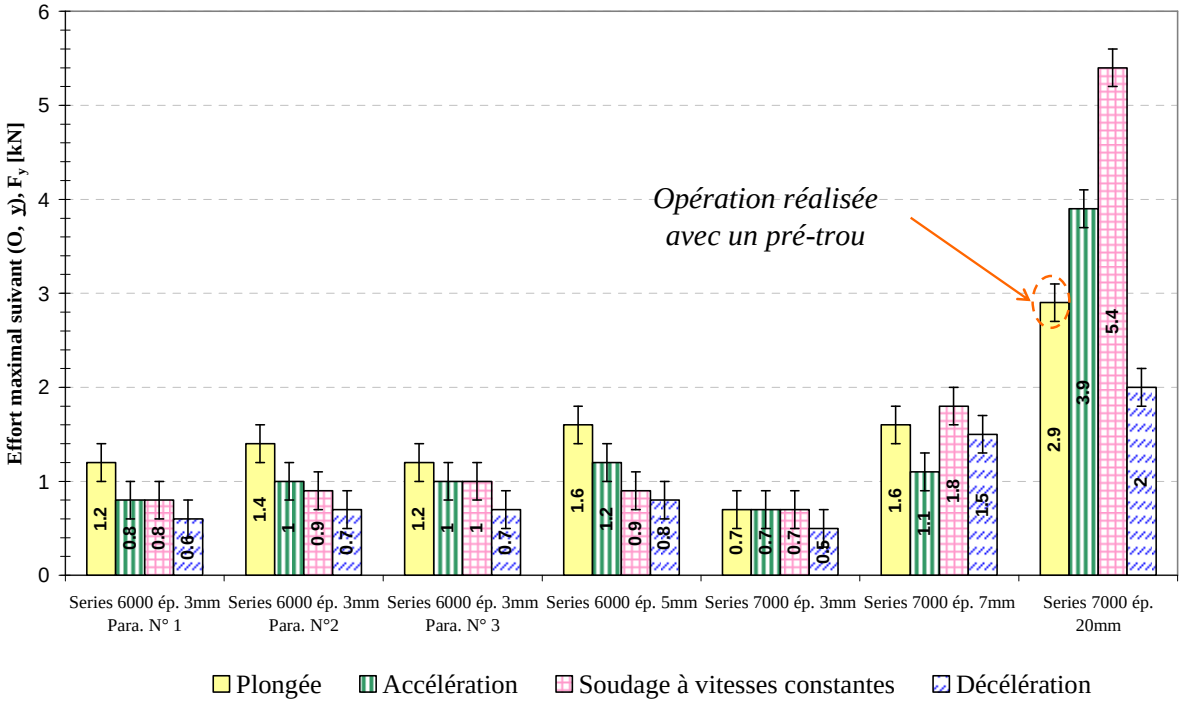


Figure 87: Comparaison de l'effort F_y maximal obtenu au cours de l'opération de soudage FSW. La barre d'erreur correspond à l'erreur de mesure du capteur d'amplitude de 0.4kN.

Remarque : dans les essais présentés ci-après, l'accélération a été paramétrée à $v_a/2$. Les efforts F_x et F_y enregistrés en phase d'accélération dépendent de ce paramétrage. D'une manière générale, l'ensemble de ces conclusions dépendent du choix des paramètres de conduite appliqués à chacune des phases opératoires. Ces résultats doivent donc être relativisés.

4.4. Etude des efforts F_x et F_y avec l'effort F_z sur l'ensemble de la phase de soudage

Il est intéressant de comparer les efforts F_x, F_y avec F_z au cours d'une opération de soudage, comme présenté sur la Figure 88. L'intérêt est de savoir, si pour un dimensionnement purement statique d'une machine, il est nécessaire de les prendre en compte. Etant donné, que leur intensité représente entre 10 et 20% de l'effort F_z, ils ne sont donc pas négligeables.

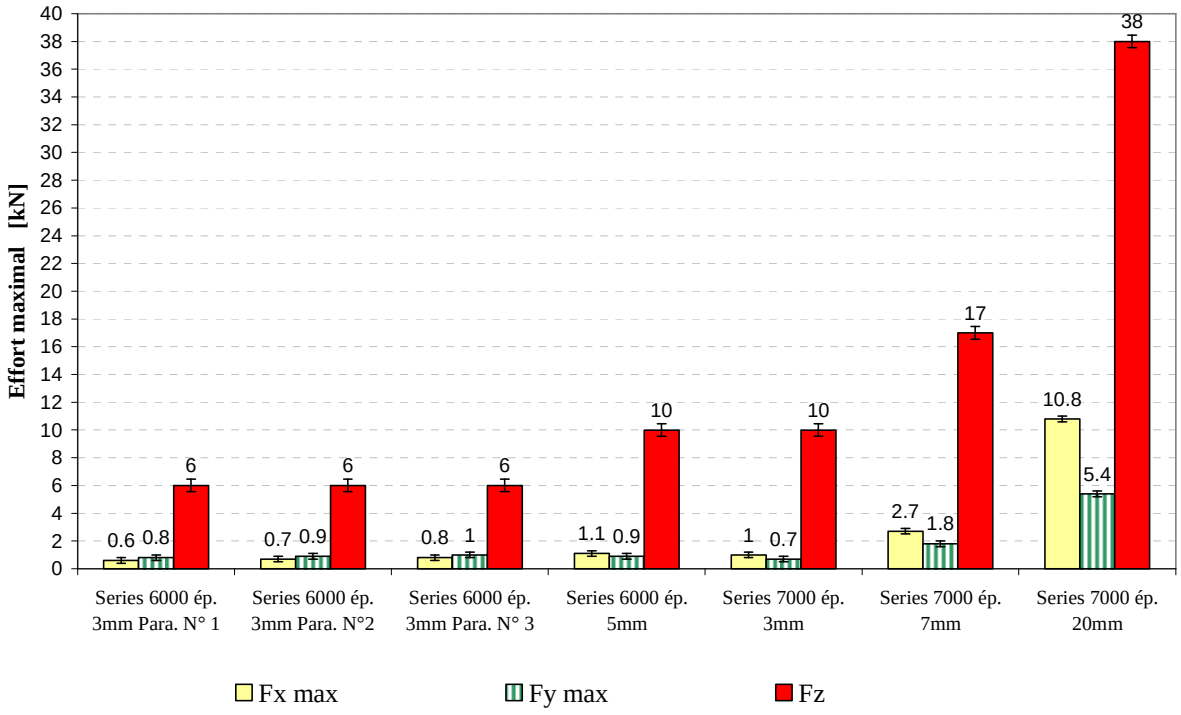


Figure 88: Comparaison entre les efforts F_x et F_y avec F_z sur une opération de soudage. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur de mesure des différents capteurs (0.4kN pour F_x et F_y et 0.9kN pour F_z).

4.5. Etude de la puissance consommée

Pour chacune des phases, le calcul de la puissance consommée totale a montré que celle liée au mouvement d'avance était de l'ordre de 0.1 à 0.3 % de la puissance totale. Ainsi, lors de son calcul, la composante liée à l'avance peut être négligée. Simar [SIM06] l'a démontré en la phase de soudage et cela quelque soit la vitesse d'avance de l'outil. Ceci indique que l'ensemble de la puissance requise provient du malaxage du matériau. Ainsi, son calcul pourra être réduit à l'équation (39).

$$P = C_z \cdot \varpi \tag{39}$$

La restriction de l'étude des efforts aux phases de plongée et de soudage à vitesses constantes semblent suffisantes pour qualifier un moyen de production. Dans un premier temps, les paramètres à étudier sont ceux décrivant la phase de plongée et les principaux paramètres de conduite de la phase de soudage, F_z, v_a et N.

L'étude montre également que le calcul de la puissance de soudage peut se résumer à la puissance à la broche.

5. Conclusion

L'étude analytique proposée permet de décrire l'opération de soudage par friction malaxage. La démarche proposée consiste à étudier les interactions entre l'outil et la pièce et entre l'outil et la matière. L'objectif est d'identifier les paramètres caractéristiques permettant de poser un cahier des charges technique d'une machine ou de qualifier un moyen existant pour réaliser l'opération du soudage par FSW. Les informations recueillies à travers l'étude de ces interactions nous permettent de définir la trajectoire de l'outil, l'accessibilité requise par l'outil par rapport au plan de joint, le volume de travail de la machine, les actions mécaniques qui doivent être appliquées ainsi que la cinématique de l'outil. Ceci est applicable pour n'importe quelle configuration de joint.

D'autre part, l'analyse de l'ensemble des actions mécaniques appliquées sur l'outil nous a permis d'identifier les efforts et les couples prépondérants au cours d'une opération de soudage FSW. Ainsi, afin de favoriser l'utilisation d'une machine standard et flexible, deux phases vont faire l'objet d'une étude paramétrique, les phases de plongée et de soudage à vitesses constantes qui semblent être suffisante pour qualifier un moyen de production. Une question se pose, est-il possible de réduire ces efforts et ces couples en modifiants simplement les paramètres de conduites ? De quelles manières évoluent-ils ? Pour répondre à ces questions, pour ces deux phases, nous avons déterminé leurs plages de fonctionnements en y associant les actions mécaniques générées. Ainsi, au sein de ces domaines, nous étudierons l'influence des paramètres de conduites sur les efforts et couples générés. Ce travail expérimental est présenté dans le chapitre 3. Cela correspond à la ***caractérisation du procédé*** de soudage FSW.

CHAPITRE 3 : ETUDE DES ACTIONS MECANIQUES APPLIQUEES SUR L'OUTIL

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la caractérisation du procédé de soudage FSW. Nous allons mettre en place les plages de fonctionnement en plongée et en soudage. Les interactions mécaniques outil / matière vont être étudiées sur l'ensemble du domaine de soudabilité exploré.

Sommaire

1. INTRODUCTION 127

2. MISE EN PLACE DES PLAGES DE FONCTIONNEMENT 128

3. ANALYSE DE LA PHASE DE PLONGEE 146

4. ANALYSE DE LA PHASE DE SOUDAGE 161

5. CONCLUSION 193

1. Introduction

Dans le chapitre 2, nous avons défini une démarche de qualification d'un moyen de production FSW synthétisée à travers les différents diagrammes IDEF-0. La Figure 89 présente l'activité A0. Les données de contrôle de l'action A1sont :

- les paramètres de conduite
- une base de données d'efforts et de couples associés à ces paramètres.

Cette base de donnée peut être un point de fonctionnement ou une partie du domaine de soudabilité opératoire. De ces données de mesures sont extraits :

- le torseur cinématiques de l'outil,
- le torseur des actions mécaniques appliqués sur l'outil en chaque point (M_i, s_i) de $\mathcal{L}$.

Ces derniers sont transmis par l'outil au moyen de production et influenceront directement ses choix technologiques.

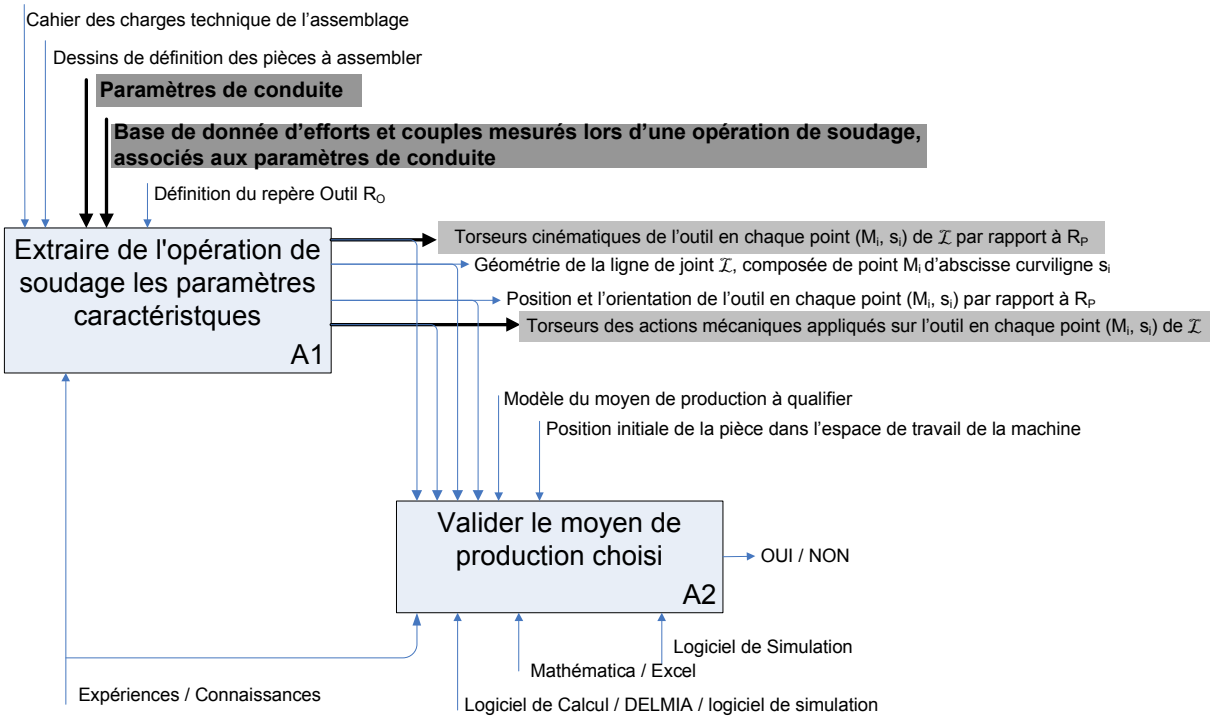


Figure 89: Diagramme IDEF-0, activité A0: Qualifier un moyen de production FSW. Le texte surligné concerne les aspects traités dans ce chapitre

Quels critères doivent respecter les moyens de production pour valider l'action A2 – ***Valider les moyens de production choisis ?***

- le moyen de soudage doit permettre d'assurer l'ensemble des positions et des orientations de l'outil requises en chaque point (M_i, s_i) appartenant à $\mathcal{L}$ et cela de manière continue (critère géométrique),

- le moyen de soudage doit pouvoir appliquer les actions mécaniques sur l'outil nécessaires pour réaliser la soudure en respectant le cahier des charges (critère technologique).

En prenant l'hypothèse que la machine est capable d'assurer l'ensemble des positions et des orientations de l'outil, comment agir sur les actions mécaniques appliquées sur celui-ci ? L'étude bibliographique nous donne quelques éléments de réponses pour les influencer :

- en travaillant sur la géométrie de l'outil, le diamètre de l'épaulement et la présence de filet influencent l'effort F_z et le couple C_z [JOH01, SMI07],
- en modulant la position de l'outil par rapport à la surface des pièces, lorsque l'opération est pilotée en position. Cela permet de modifier l'intensité de F_z [ZAE04]. Par contre, ces variations de position d'outil peuvent entraîner un défaut de pénétration partielle. Ainsi, ce paramètre doit être modifié avec précaution,
- en travaillant sur les jeux de paramètres opératoires, comme montré pour F_z et C_z [KIM06, PEE06].

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous avons focalisé nos études sur ce dernier point. Nous avons mis en place le domaine de soudabilité opératoire des phases de plongée et de soudage à vitesses constantes. Cela correspond à la base de données d'efforts et de couples mesurés associés aux paramètres opératoires (Figure 89). A travers la mise en place du domaine de soudabilité opératoire, une étude paramétrique permettra de regarder de quelle manière les paramètres de conduite peuvent influencer les actions mécaniques.

2. Mise en place des plages de fonctionnement

2.1. Méthodologie

Une donnée de contrôle de l'action ***A12 – Analyser les interactions Outil / Matière,*** du diagramme IDEF-0 présenté au chapitre 2, est la « Base de donnée d'efforts et couples mesurés lors d'une opération de soudage, associés aux paramètres de conduite ». Dans cette base de données se retrouvent les actions mécaniques appliquées sur l'outil ainsi que sa cinématique. Elle peut être issue :

- de données issues de la simulation numérique,
- de données expérimentales. Cela peut être un point de fonctionnement comme une plage de fonctionnement.

Les modèles de simulations numériques ne permettent pas de prédire de manière suffisamment précise les actions mécaniques appliquées sur l'outil. C'est pourquoi, l'étude proposée ici se base sur une étude expérimentale. Lorsque le point de fonctionnement connu

ne permet pas de réaliser l'opération de soudage FSW avec les moyens choisis, la connaissance de plages de fonctionnement peut aider à la détermination d'une autre combinaison de paramètres de conduite conduisant à la faisabilité de l'opération sur le moyen choisi. Il faut ainsi cerner la partie du domaine de soudabilité opératoire qui respecte le cahier des charges produit et qui soit accessible par les moyens de production. Pour ce faire, il faut mettre en place les DSO en leurs associant les actions mécaniques générées, pour chaque point des domaines, pour pouvoir définir la zone accessible par la machine. C'est pourquoi, afin de compléter la démarche proposée au chapitre 2, nous avons mis en place une démarche pour déterminer les plages de fonctionnement de l'opération de soudage FSW comme présenté sur Figure 90.

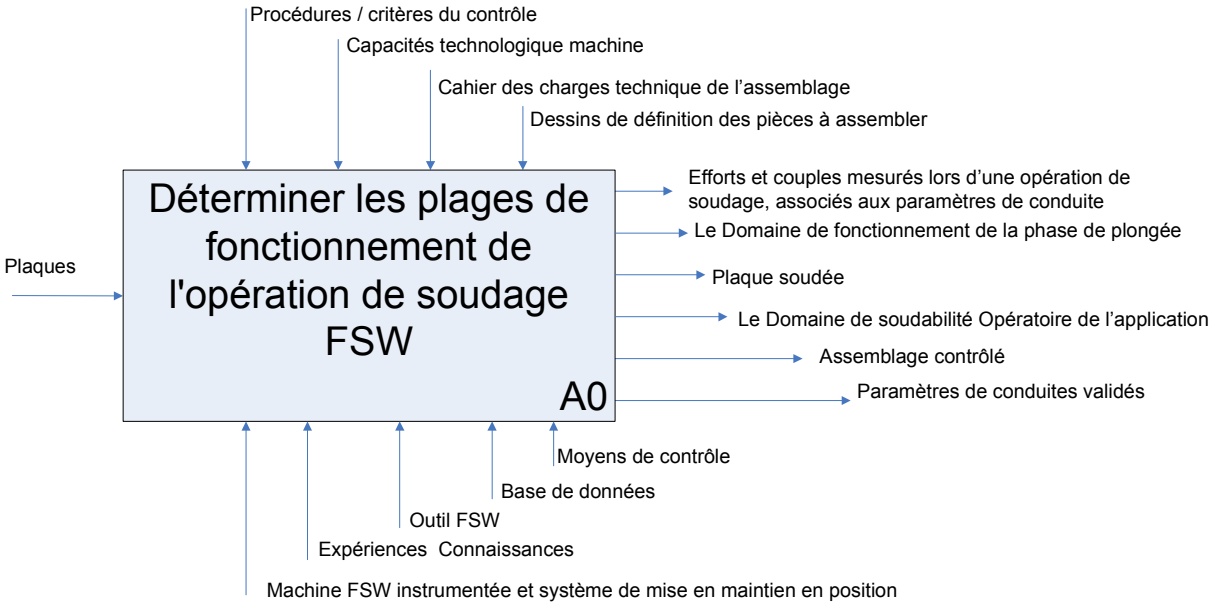


Figure 90: Diagramme IDEF-0, niveau A0 de la démarche de définition des plages de fonctionnement pour une application de FSW donnée

L'étude « déterminer les plages de fonctionnement de l'opération de soudage FSW » permet de recueillir :

- les paramètres de conduite « validés », (le terme « validé » sera défini plus loin)
- les efforts et couples mesurés lors d'une opération de soudage, associés aux paramètres de conduite,

Cette action globale se décompose en trois sous-actions (Figure 91) :

- ***Trouver un point de fonctionnement***. Pour déterminer la première combinaison de paramètres opératoires, l'utilisateur pourra s'aider d'une base de données existante ou il devra la déterminer expérimentalement,
- ***Définir la plage de fonctionnement de la phase de plongée,***
- ***Déterminer le domaine de soudabilité opératoire en soudage,***

Dans un premier temps, nous avons étudié séparément la phase de plongée et la phase de soudage à vitesses constantes.

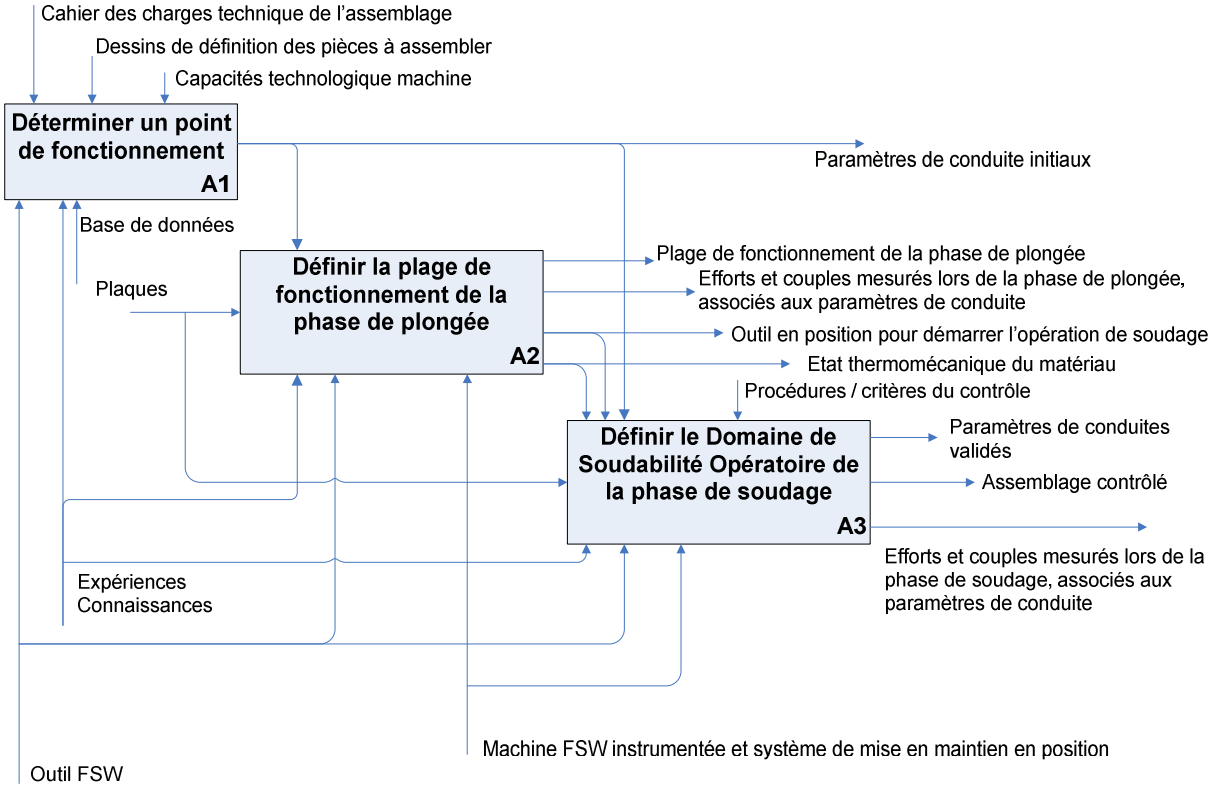


Figure 91: Diagramme IDEF-0, démarche de définition des plages de fonctionnement pour une application de FSW donnée. Activité A0 : Définir les plages de fonctionnement de l'opération de soudage

Dans un premier temps, nous avons étudié séparément la phase de plongée et de soudage à vitesses constantes. L'étude expérimentale mise en place et les résultats sont présentés dans ce chapitre.

L'étude des actions mécaniques appliquées sur l'outil à travers la mise en place des plages de fonctionnement de soudage concernent l'étude du procédé et des interactions transmises par l'outil aux ressources. Les données collectées permettront d'associer aux paramètres de conduite, appartenant à cette plage, les torseurs des actions mécaniques et cinématique en chaque lieu de la soudure.

La Figure 92 présente le diagramme des interactions entre le produit, le procédé et les ressources sur lequel est schématisé le positionnement des travaux présentés dans ce chapitre.

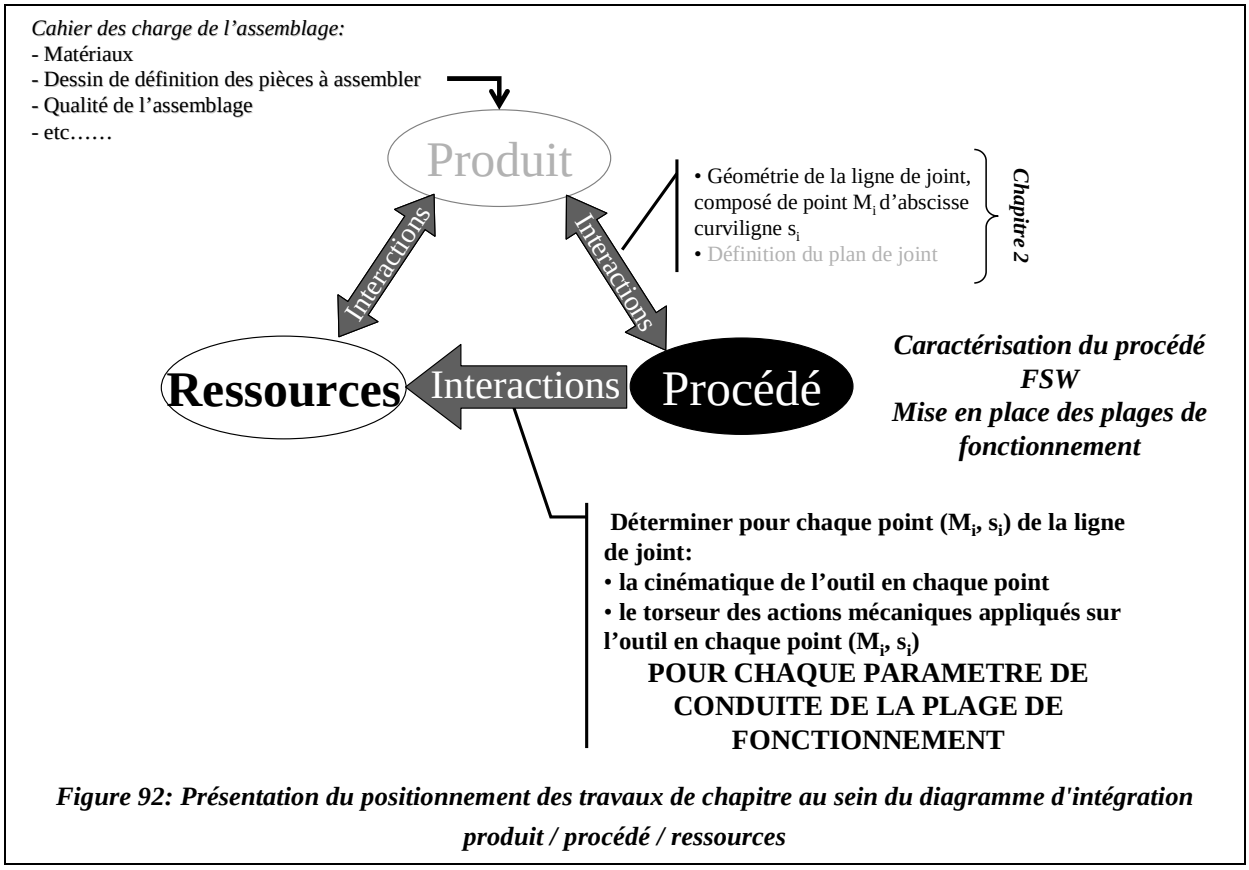


Figure 92: Présentation du positionnement des travaux de chapitre au sein du diagramme d'intégration produit / procédé / ressources

2.2. Procédure expérimentale mise en place

2.2.1. Présentation de l'alliage utilisé

L'alliage utilisé pour notre étude expérimentale est le 6082 (AW-AlSi1MgMn) à l'état T651, sous la forme de tôles d'épaisseur 6mm. C'est un alliage à durcissement structural généralement associé à une résistance mécanique élevée [ERI00]. Les plaques de 1m par 2m commercialement vendues sont obtenues par laminage. L'état T651 correspond à une trempe suivie d'un revenu et d'un détentionnement par traction sans aucun redressage complémentaire [EUR**b]. Il est couramment utilisé pour des pièces mécaniques, des pièces de machine mécano-soudées, dans la menuiserie métallique, dans l'industrie textile, dans des articles ménagers, etc.

Le Tableau 9 présente la composition de cet alliage et le Tableau 10 ses propriétés mécaniques. Sa teneur en magnésium lui assure une bonne ductilité [MAH07]. Il peut être soudé à l'arc électrique mais subira localement un fort abattement de ses propriétés mécaniques [MAH07]. C'est pourquoi il semble intéressant de le souder par FSW, afin de limiter la diminution de ses propriétés mécaniques lors de l'opération de soudage.

Dans des tôles de 1m par 2m et d'épaisseur 6mm des coupons ont été prélevés afin de procéder aux différentes campagnes expérimentales.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Autres		Al
								Chaque	Total	
0.7-1.3	0.5	0.1	0.4-1.0	0.6-1.2	0.25	0.2	0.1	0.05	0.15	Reste

Tableau 9: Composition chimique nominale en pourcent (selon norme EN 573-1) [EUR**a]

Etat	Epaisseur [mm]	Rm mini [Mpa]	Rp0.2 [Mpa]	A mini [%]	Dureté HBS
T651	6	310	255	9	91

Tableau 10: Caractéristique mécanique de l'alliage 6082-T651 [EUR**a]

D'après Ereiner [EIR06] l'alliage 6082 est un très bon candidat au FSW étant donné que cet alliage est réputé pour être facile à mettre en forme à chaud. En effet, des applications industrielles de soudage FSW de cet alliage sont déjà connues dans l'industrie navale [ERI00] et dans l'industrie ferroviaire [KAW04].

2.2.2. Outil et machine utilisés

L'outil utilisé est un outil conventionnel composé d'un épaulement concave et d'un pion conique fileté. Il est en acier et couramment utilisé pour souder des alliages d'aluminium d'épaisseur 6mm. Lors du soudage, il est généralement incliné d'un angle de déplacement, *i*, de 2.5°. Tous les essais ont été réalisés sur la machine MTS I-Stir 10, présentée dans le chapitre 2.

Les efforts et les couples ont été mesurés à une fréquence d'échantillonnage de 102Hz. Celle-ci est supérieure au double de la fréquence contenue dans le signal mesuré, correspondant à la fréquence de rotation de la broche. La fréquence de rotation maximale de la machine est de 2000tr/min, soit 33.3Hz.

2.2.3. Phase de plongée

Objectifs

L'étude des efforts et des couples sur l'ensemble de la phase de soudage a montré qu'ils étaient, en fin de plongée, caractéristiques pour un dimensionnement statique des moyens de soudage. Ainsi, une étude paramétrique semble nécessaire pour mieux comprendre l'influence des paramètres opératoires sur $F_{z\,max}$ et $C_{z\,max}$.

Le mode de contrôle et les paramètres opératoires

Le mode de contrôle généralement utilisé en phase de plongée est un contrôle en position. La position de l'outil est alors pilotée à travers la vitesse et l'accélération imposées par la machine sur celui-ci. Ainsi, la fréquence de rotation N_p n'intervient pas sur sa position. Par contre, elle a un effet sur les conditions thermomécaniques appliquées sur l'outil. Les paramètres opératoires de cette phase ont été énumérés dans le chapitre 2 et sont schématisés

sur la Figure 93. Dans cette figure, l'effort seuil $F_{z\ seuil}$ n'apparaît pas car nous considérons la machine utilisée capable de tenir l'effort axial engendré.

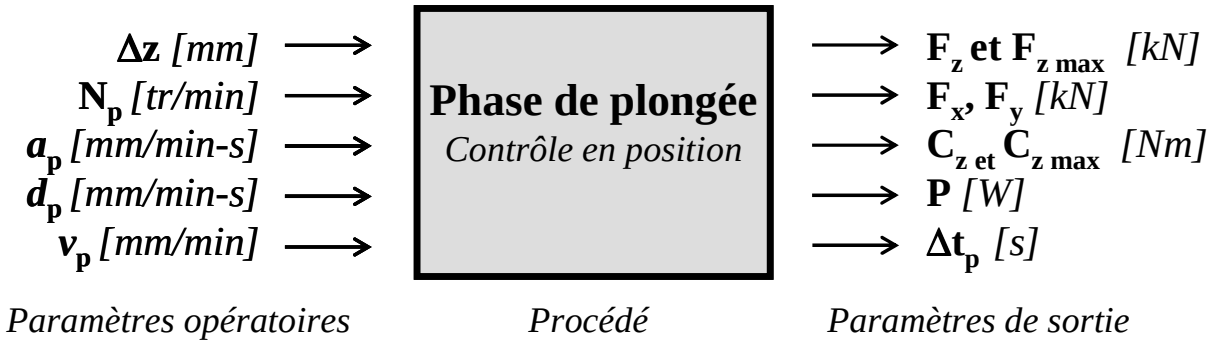


Figure 93: Schématisation des paramètres de conduite et de sortie de l'étude de l'opération de plongée

La Figure 94 présente la schématisation des paramètres opératoires et l'effort axial résultant lors d'une opération de plongée.

Nous n'étudierons que l'influence de v_p et de N_p sur les grandeurs de sorties car par hypothèse ce sont les deux paramètres qui semblent les plus caractéristiques. Puis, comme Zaeh et al. [ZAE05] nous étudierons l'influence de la profondeur de plongée sur l'effort F_z et le couple C_z, mais cette fois en phase de plongée.

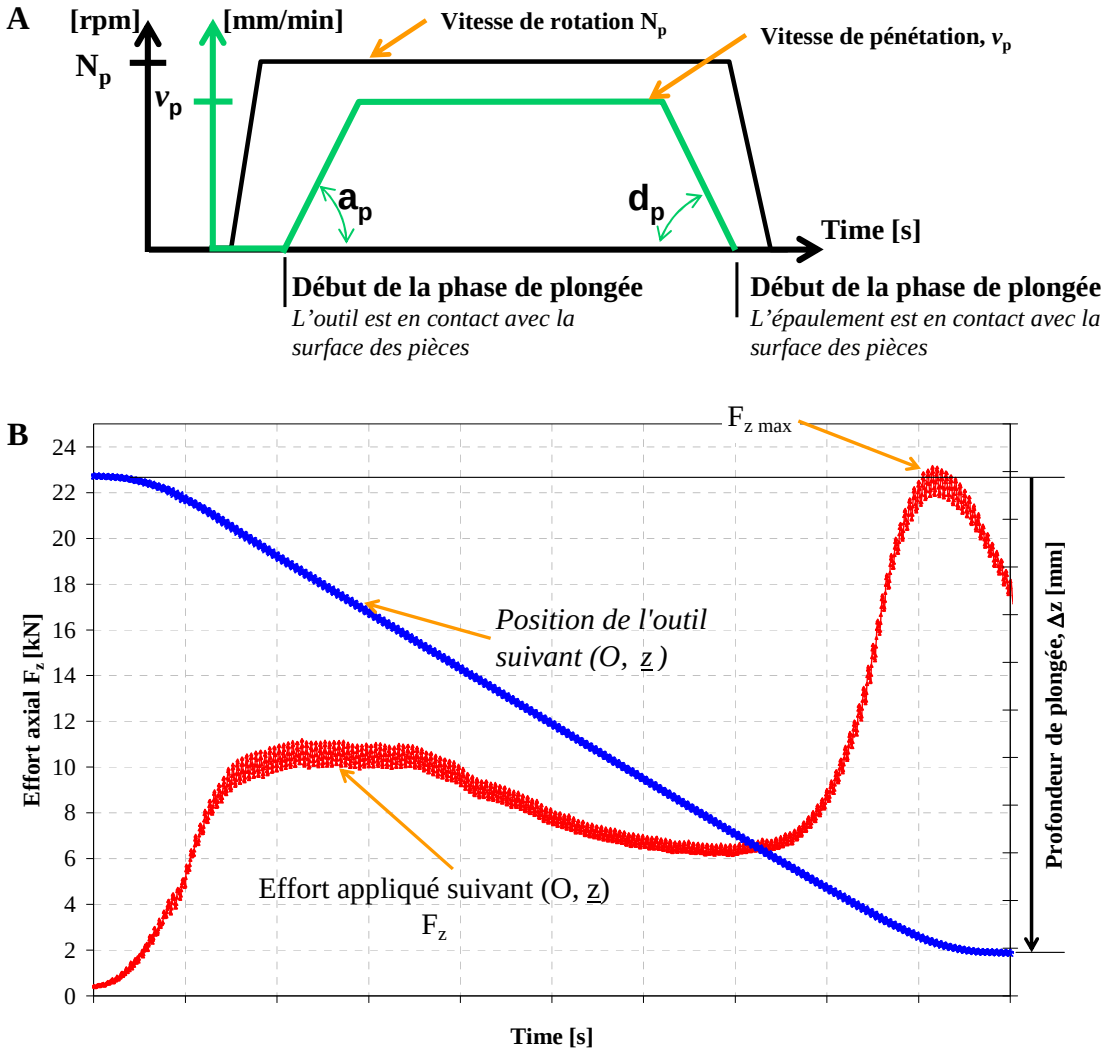


Figure 94: Schématisation des consignes appliquées sur l'outil et l'évolution de l'effort axial au cours d'une opération de plongée

Mise en place du plan d'expérience

Pour déterminer la plage de fonctionnement en plongée, il est nécessaire de définir un point de fonctionnement « initial ». Ceci correspond à l'action A1 du diagramme IDEF-0 de la Figure 91. Ce point, que nous appellerons : point de référence ($N_{p\text{-}0}$, $v_{p\text{-}0}$, $a_{p\text{-}0}$, $d_{p\text{-}0}$ et $\Delta_{z\text{-}0}$), correspond aux paramètres utilisés par l'Institut de Soudure pour l'opération de plongée au sein du 6082-T651 épaisseur 6mm.

Pour définir la plage de fonctionnement, des critères de contrôle ou de qualité sont nécessaires. Quels sont les critères d'acceptabilité pour définir la plage de fonctionnement en plongée ? Sur la phase de plongée, aucun critère relatif à la qualité n'est défini aussi bien dans le cahier des charges que dans la littérature. Seul des critères de limite machine ou d'apport d'énergie sur l'ensemble de la phase de plongée peuvent être mis en place. C'est pourquoi, ayant pour seul critère une fréquence de rotation maximale de 2000tr/min pour 600Nm, la procédure expérimentale a été construite en faisant varier les valeurs de $N_{p\text{-}0}$ et de $v_{p\text{-}0}$ de plus

ou moins 33% et 66%. Une variation de 66% nous amène à la fréquence de rotation maximale admissible par la machine. La profondeur de plongée Δ_z est identique pour chaque essai. Le plan d'expérience est présenté sur la Figure 95.

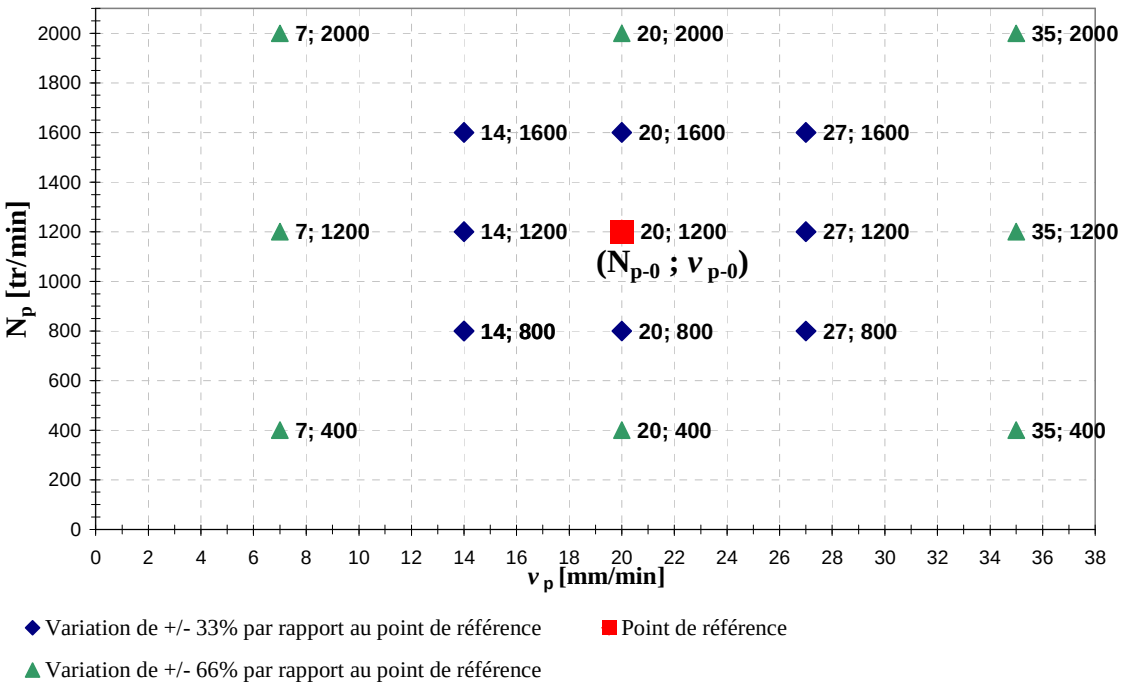


Figure 95: Présentation du plan d'expérience mis en place

Dans un premier temps, nous ne souhaitons pas évaluer l'impact de l'accélération et de la décélération sur les paramètres de sortie. Elles seront calibrées de telle sorte que la distance d'accélération et de décélération soit la même pour chaque essais. L'objectif étant de limiter les effets de la décélération sur les valeurs mesurées de $F_{z\,max}$ et $C_{z\,max}$. De plus, à paramétrage identique, cela permettra de mieux pouvoir comparer les résultats obtenus. La Figure 96 présente une schématisation du paramétrage de l'accélération.

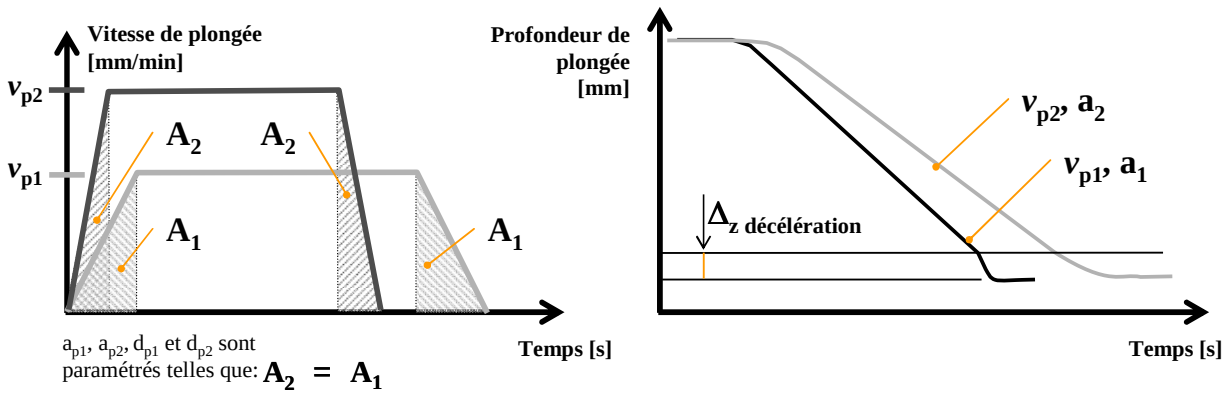


Figure 96: Schématisation de la paramétrisation de l'accélération et de la décélération de l'outil pour chaque opération de plongée

Ainsi, les paramètres d'accélération sont calibrés en fonction de la vitesse de pénétration. Pour calculer cette valeur, nous avons supposé l'accélération et la décélération de

l'outil comme un mouvement rectiligne uniformément accéléré. L'équation (40) présente le calcul des valeurs paramétrées pour l'accélération et la décélération de l'outil

$$a_p = d_p = \frac{1}{2} \times \frac{v_p^{\ 2}}{d_{parcourue}} \tag{40}$$

Avec la distance parcourue, $d_{parcourue}$, par l'outil pendant la phase de décélération et l'accélération. Elle a été calculée à partir des paramètres opératoires ($N_{p\text{-}0}$, $v_{p\text{-}0}$, $a_{p\text{-}0}$, $d_{p\text{-}0}$, $\Delta_{z\text{-}0}$).

Description des tests de plongée

Tous les essais ont été réalisés en pleine matière, dans une plaque de dimension de 30x50mm. Chaque essai a été réalisé trois fois dans des conditions thermiques similaires.

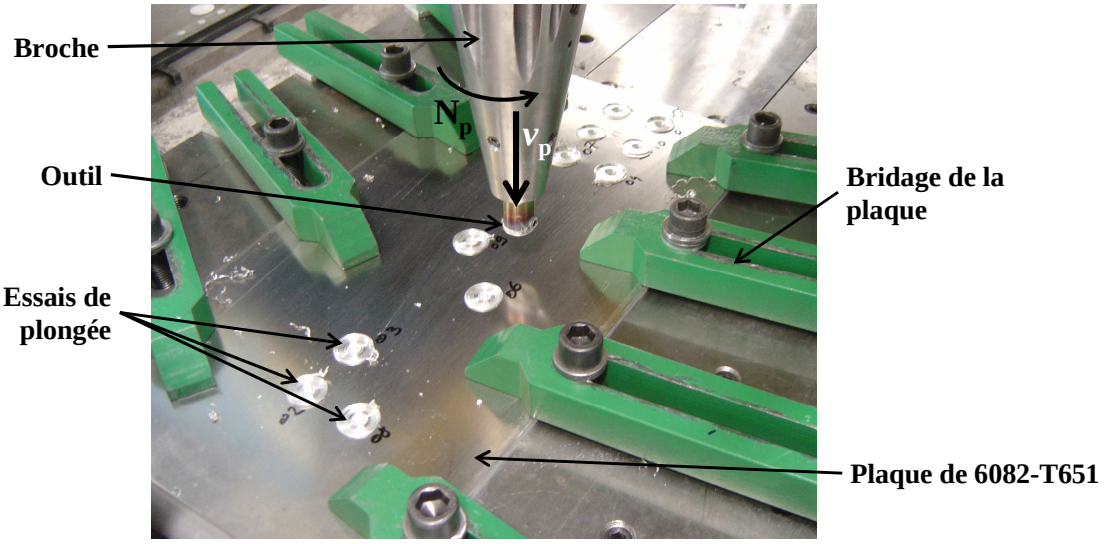


Figure 97: Présentation du dispositif expérimental

Pour chaque essai, la même procédure expérimentale a été suivie. L'outil est incliné d'un angle de 2,5° et est placé en contact avec la surface des pièces. Un effort suivant l'axe (O, z) de 6kN est appliqué sur l'outil. Il est alors mis en rotation. Une fois la fréquence de rotation N_p atteinte, il est animé d'un mouvement de descente v_p suivant (O, z) jusqu'à ce qu'il ait atteint la profondeur de plongée paramétrée, Δ_z. L'épaulement est alors en contact avec la surface des pièces. L'opération de plongée est alors terminée. Après un temps de maintien de 1 seconde l'outil est retiré de la plaque.

2.2.4. Phase de soudage

Objectifs

La phase de soudage à vitesses constantes est prépondérante pour la formation du cordon de soudure et les actions mécaniques appliquées sur l'outil, durant cette phase, sont dimensionnant pour la machine FSW. Pour mettre en place la DSO, le critère de qualité choisi

est la compacité de la soudure obtenue. Ceci nous permettra de mettre en place le DSO du 6082-T651 d'épaisseur 6mm. A ce DSO, nous associerons pour chaque combinaison de paramètres de conduite les actions mécaniques appliquées sur l'outil. Ces données permettront d'étudier l'évolution des actions mécaniques appliquées sur l'outil au sein du DSO. La Figure 98 schématise les grandeurs d'entrées et de sorties de la phase étudiée. Du domaine de soudabilité opératoire nous sortirons deux éléments, la ***qualité de la soudure obtenue*** et les ***torseurs des actions mécaniques et cinématique***.

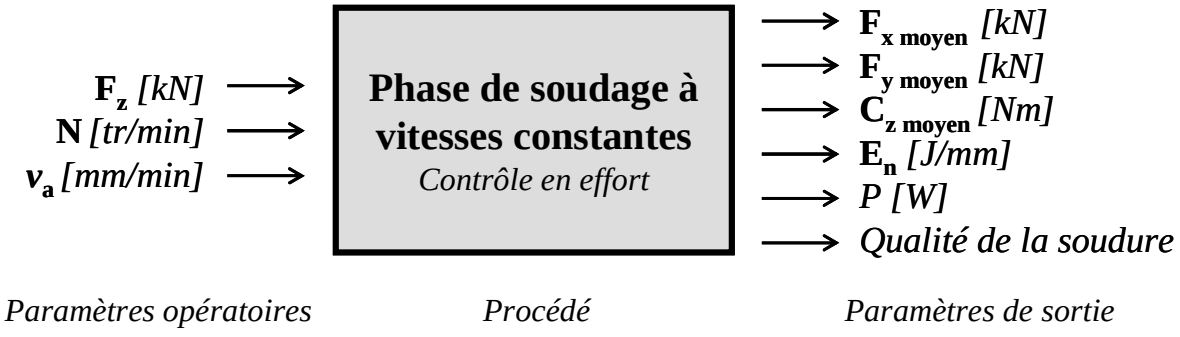


Figure 98: Schématisation des paramètres de conduite et de sortie de l'opération de soudage à vitesses constantes

Mise en place d'un domaine de soudabilité opératoire (DSO)

Comment mettre en place un domaine de soudabilité opératoire pour une application de soudage par friction malaxage ?

Bien souvent, pour une configuration donnée (alliage, outil, géométrie de joint et épaisseur) un à deux points de fonctionnement sont connus. Ainsi, à partir d'***un point de fonctionnement connu*** (nommé « paramètres de conduites initiaux » sur la Figure 99), une méthodologie a été mise en place afin de déterminer le domaine de soudabilité opératoire. Le diagramme IDEF-0, Figure 99, détaille l'activité A3 « définir le domaine de soudabilité opératoire de la phase de soudage ». Ce diagramme présente une démarche générale de mise en place. Nous allons le détaillé ci-après. Ceci explicitera la démarche expérimentale mise en place.

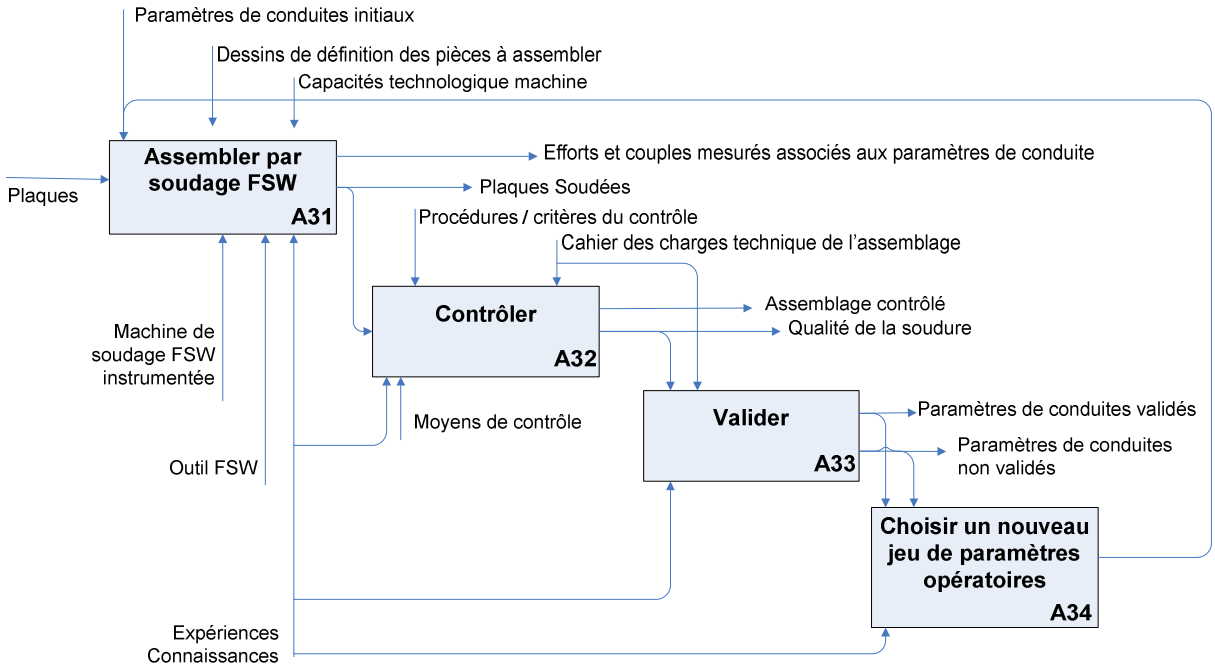


Figure 99: Diagramme IDEF-0, démarche de définition des plages de fonctionnement pour une application de FSW donnée. Action A3: Définir le domaine de soudabilité opératoire de la phase de soudage

Paramètres de conduite de cette phase

Les paramètres de conduite identifiés pour cette phase dans le chapitre 2 étaient :

N	[tr/min]	La fréquence de rotation
v_a	[mm/min]	La vitesse d'avance
F_z	[kN]	L'effort axial appliqué sur l'outil

Nous avons travaillé avec un contrôle en effort de l'opération de soudage. L'angle de déplacement, *i*, vaut 2,5° pour chaque essai. Nous considérons ce paramètre comme étant fixé de manière optimale d'après la configuration de soudage et l'outil utilisé. Ainsi dans le cadre de notre étude, nous déterminerons un domaine de fonctionnement pour :

- l'alliage 6082-T651 d'épaisseur 6mm,
- en configuration de soudage bout à bout,
- avec l'outil choisi.

Mise en place du plan d'expériences

A partir d'un point de fonctionnement ou paramètres de conduite initiaux (Figure 99) les « frontières » du domaine de soudabilité doivent être déterminées. Ce point de fonctionnement est connu et appartient au domaine de soudabilité. Il est dénommé $F_{z_réf}$, $v_{a_réf}$, $N_{réf}$. Ce point est issu soit d'une base de données soit d'une campagne expérimentale.

La méthodologie consiste à faire varier un seul paramètre opératoire en l'augmentant puis en le diminuant progressivement jusqu'à ce que les soudures obtenues ne remplissent plus les critères de validation. Les deux autres paramètres opératoires restent fixés à la valeur de référence. La Figure 100 présente la démarche expérimentale mise en place, en prenant pour exemple la détermination des valeurs minimales et maximales du paramètre de conduite F_z.

Remarque 1 : Un contrôle visuel des soudures pendant l'expérimentation a permis une première validation.

Remarque 2 : Le paramètre de conduite est incrémenté jusqu'à l'apparition d'un défaut visuel ou l'atteinte d'une limite machine. Ces limites sont indépendantes des frontières du domaine de soudabilité qui ne peuvent alors être déterminées.

Comme schématisé dans la Figure 100, la question « Ce point appartient-il aux domaines de soudabilité opératoire » regroupe en fait les actions A31, A32 et A33 de l'activité A3: « Définir le domaine de soudabilité opératoire de la phase de soudage » (Figure 99). Elles regroupent l'opération expérimentale de soudage et l'opération de contrôle. L'opération de contrôle A32 a été effectuée via deux actions non simultanées :

- ***Un contrôle visuel***. Ce contrôle s'est effectué en s'appuyant sur la définition d'une soudure « bonne » décrite par la norme ISO/DIS 25239-3A et en se basant sur les défauts répertoriés dans la littérature présentés dans le chapitre 1.
- ***Un contrôle au rayon X***. Nous nous sommes fixés comme critère la compacité du cordon obtenu. On définit un cordon comme étant compacte lorsque celui-ci ne possède pas de défaut tunnel interne. D'autres critères imposés par le cahier des charges techniques de l'assemblage pourraient être ajoutés, comme par exemple des critères relatifs aux caractéristiques mécaniques, à la résistance, à la corrosion, etc.

Ces deux contrôles nous ont permis de valider les points de fonctionnement tout au long de la démarche expérimentale.

Remarque : l'incrément d de la Figure 100 a été adapté pour chaque paramètre de conduite.

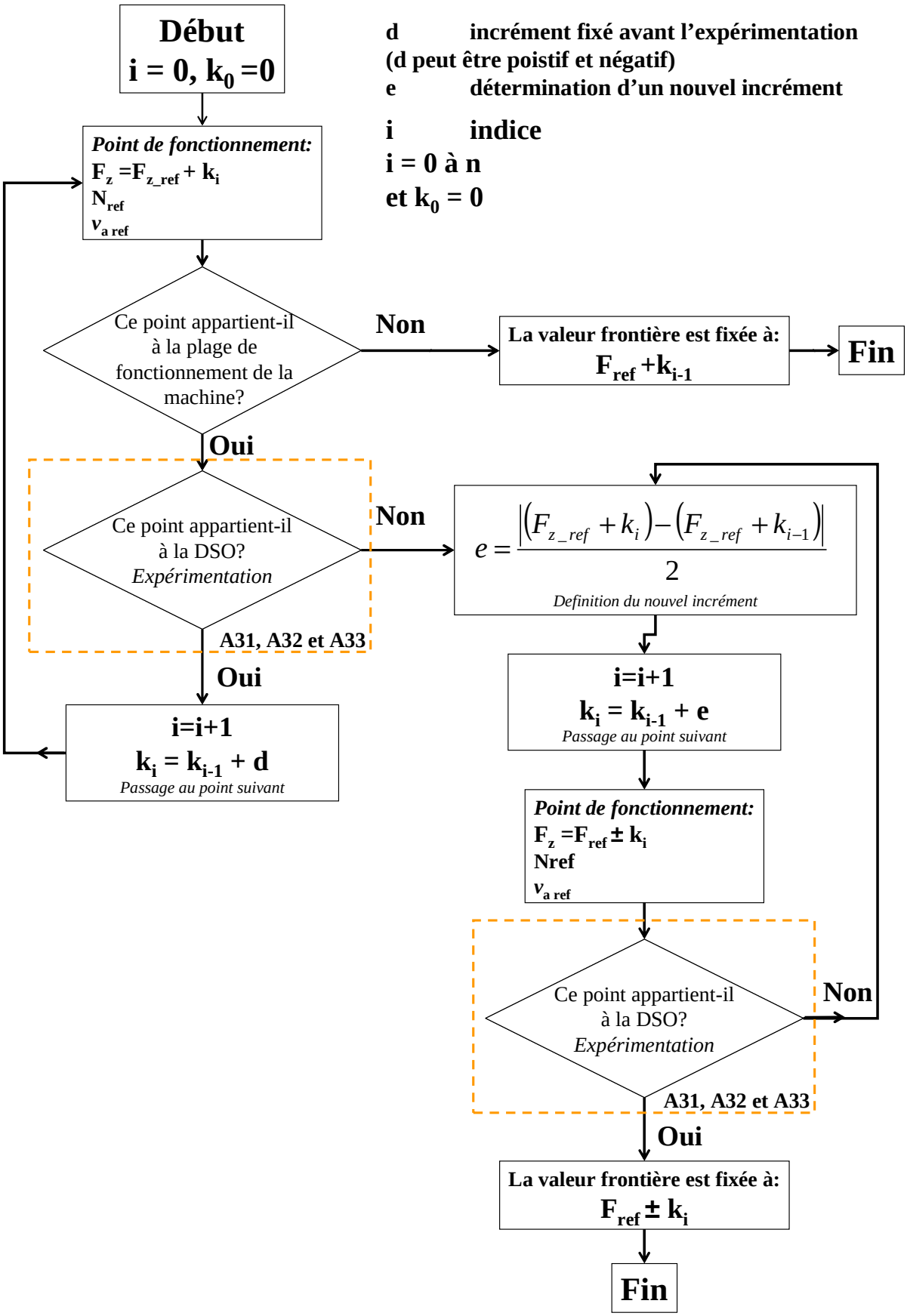


Figure 100: Exemple proposé pour le paramètre F_z de la démarche mise en place pour déterminer les valeurs minimales et maximales admissibles pour chacun des paramètres de conduite

En appliquant la démarche schématisée sur la Figure 100 aux trois paramètres de conduite, F_z, v_a et N, on obtient des valeurs minimales et maximales pour chacun des trois paramètres, à un intervalle de tolérance près. Ces valeurs seront dénommées :

- Pour le paramètre F_z : $F_{z\ lim\ inf}$ et $F_{z\ lim\ sup}$,
- Pour le paramètre N : $N_{lim\ inf}$ et $N_{lim\ sup}$,
- Pour le paramètre v_a : $v_{a\ lim\ inf}$ et $v_{a\ lim\ sup}$,

Remarque : Ces valeurs ne correspondent pas aux valeurs frontières du domaine de soudabilité opératoire, mais elles les approximent. Dans notre cas d'étude elles représenteront les limites du domaine étudié.

Ces valeurs vont nous permettre de mettre en place le plan d'expériences. Il est composé de trois paramètres (N, v_a et F_z) avec trois points expérimentaux, à savoir :

- $F_{z\ lim\ inf}$, $F_{z\ lim\ sup}$ et $(F_{z\ lim\ sup} - F_{z\ lim\ inf})/2$
- $N_{lim\ inf}$, $N_{lim\ sup}$ et $(N_{lim\ inf} - N_{lim\ sup})/2$
- $v_{a\ lim\ inf}$, $v_{a\ lim\ sup}$ et $(v_{a\ lim\ inf} - v_{a\ lim\ sup})/2$

Ces trois points nous permettent d'avoir les valeurs des grandeurs de sortie aux extrémités du domaine exploré ainsi que les tendances au cœur du domaine. Au total 27 essais sont nécessaires. La Figure 101 présente la représentation en trois dimensions du plan d'expériences réalisé.

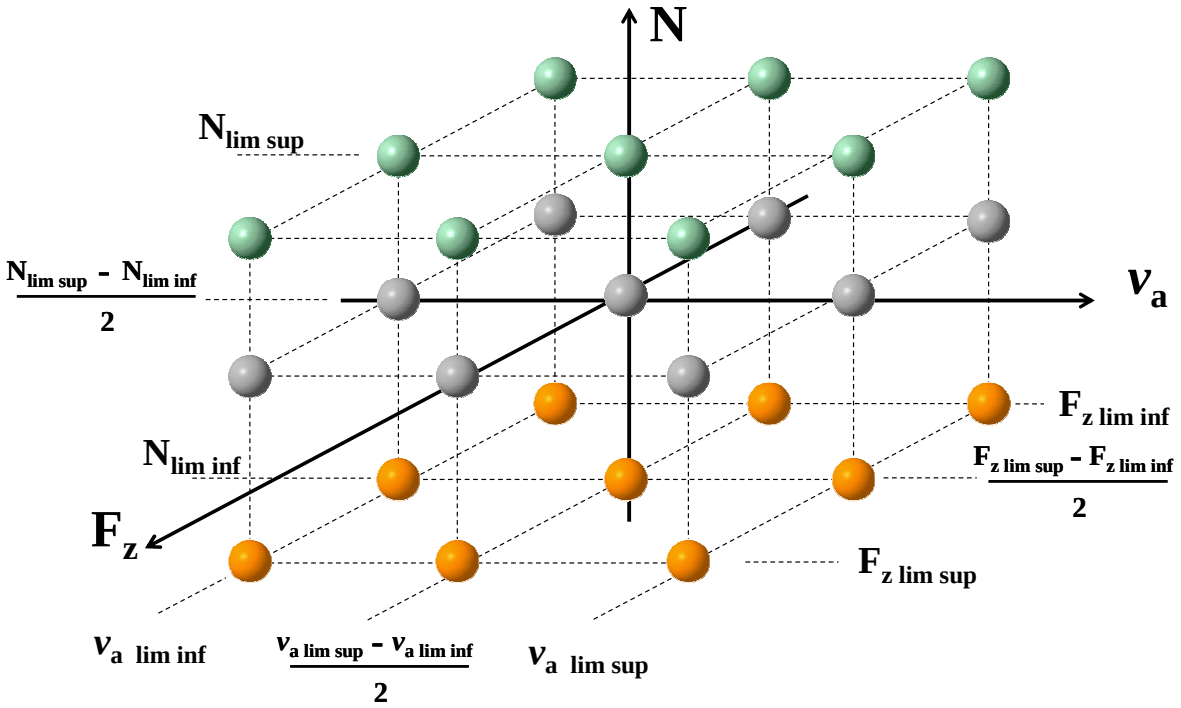


Figure 101: Représentation dans l'espace du plan d'expériences réalisé

Remarque : Une partie du domaine de soudabilité opératoire sera alors connue pour notre application. En effet, nous ne savons pas où se situe nos points expérimentaux

par rapport au domaine de soudabilité opératoire. Ceci est schématisé sur la Figure 102. Au final, nous aurons des points exclus et des points appartenant au DSO. Pour connaître les frontières réelles du DSO, cette expérimentation doit être approfondie. Ceci n'est pas l'objectif de cette thèse, c'est pourquoi nous nous arrêterons au plan expérimental présenté ci-dessus.

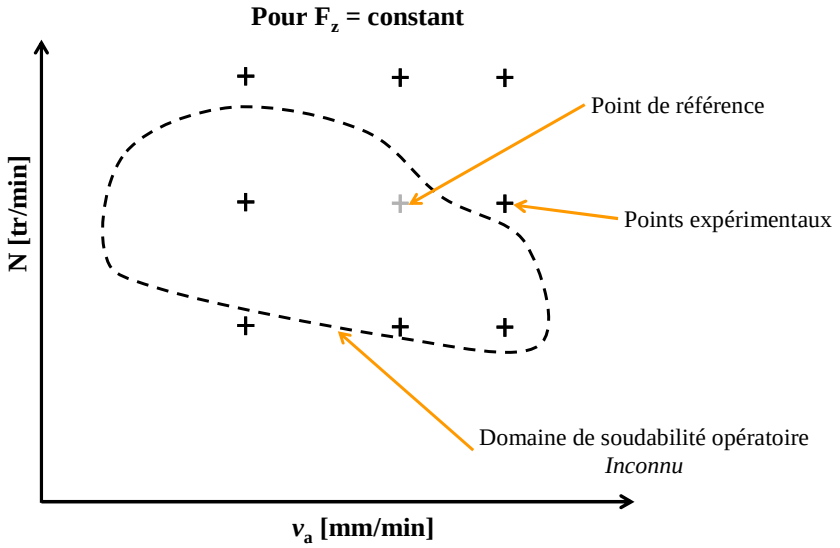


Figure 102: Schématisation de l'intersection éventuelle entre le domaine de soudabilité opératoire et le domaine exploré dans cette thèse

Au final, pour mettre en place le domaine exploré, trois campagnes expérimentales distinctes ont été réalisées :

- La détermination des valeurs $F_{z\ lim\ inf}$, $F_{z\ lim\ sup}$, $N_{lim\ inf}$, $N_{lim\ sup}$, $v_{a\ lim\ inf}$ et $v_{a\ lim\ sup}$. Ces essais ont été réalisés en pleine tôle une seule fois.
- Une deuxième campagne expérimentale réalisée en combinant les valeurs minimales, maximales et moyennes pour chacun des trois paramètres. Chaque combinaison de paramètres opératoires a été effectuée trois fois, en pleine tôle, afin d'analyser la répétabilité des efforts, des couples et l'apparition des défauts. La Figure 103 présente le dispositif expérimental.

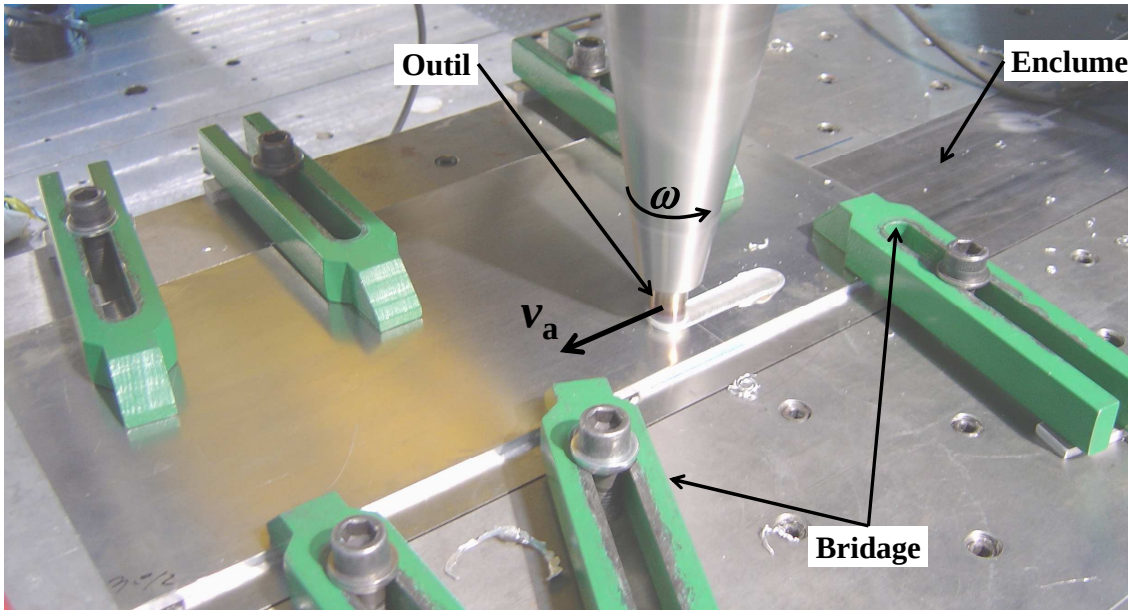


Figure 103: Dispositif expérimental mis en place pour les essais réalisés en pleine tôle

- Une troisième campagne a été réalisée pour valider en soudage bout à bout les essais ayant conduit à la formation de soudures compactes. Chaque essai a été réalisé trois fois. La Figure 104 présente le dispositif expérimental mis en place. Nous avons veillé à reproduire la même mise et maintien en position pour chaque essai.

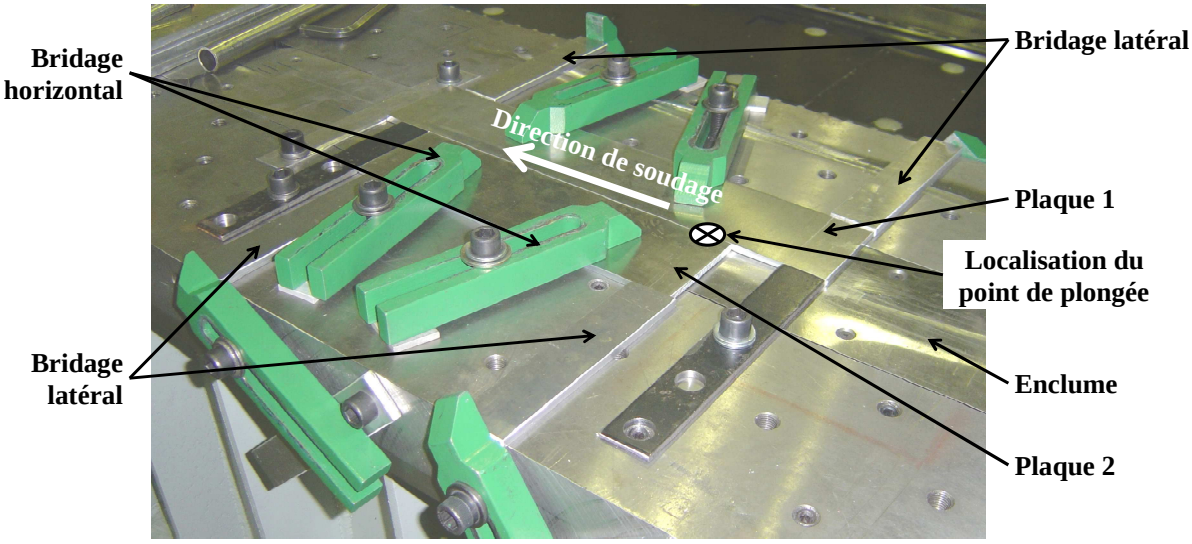


Figure 104: Présentation du dispositif expérimental mis en place lors du soudage bout à bout de deux tôles

Pour toute la phase expérimentale relative à l'étude de la phase de soudage, les paramètres de conduite des phases de plongée, de temps de maintien et d'accélération étaient identiques pour chaque essai. Ceci permet de démarrer la phase de soudage dans des conditions initiales quasi identiques pour chaque essai.

Présentation des efforts étudiés

La Figure 105 présente la plage d'étude des efforts et des couples. Elle correspond au soudage à vitesses constantes pour laquelle N et v_a sont à leurs valeurs de consigne et restent constants au cours du temps. Nous analyserons les couples et les efforts moyens afin d'évaluer leurs tendances en fonction des paramètres opératoires afin de s'affranchir des phénomènes oscillatoires.

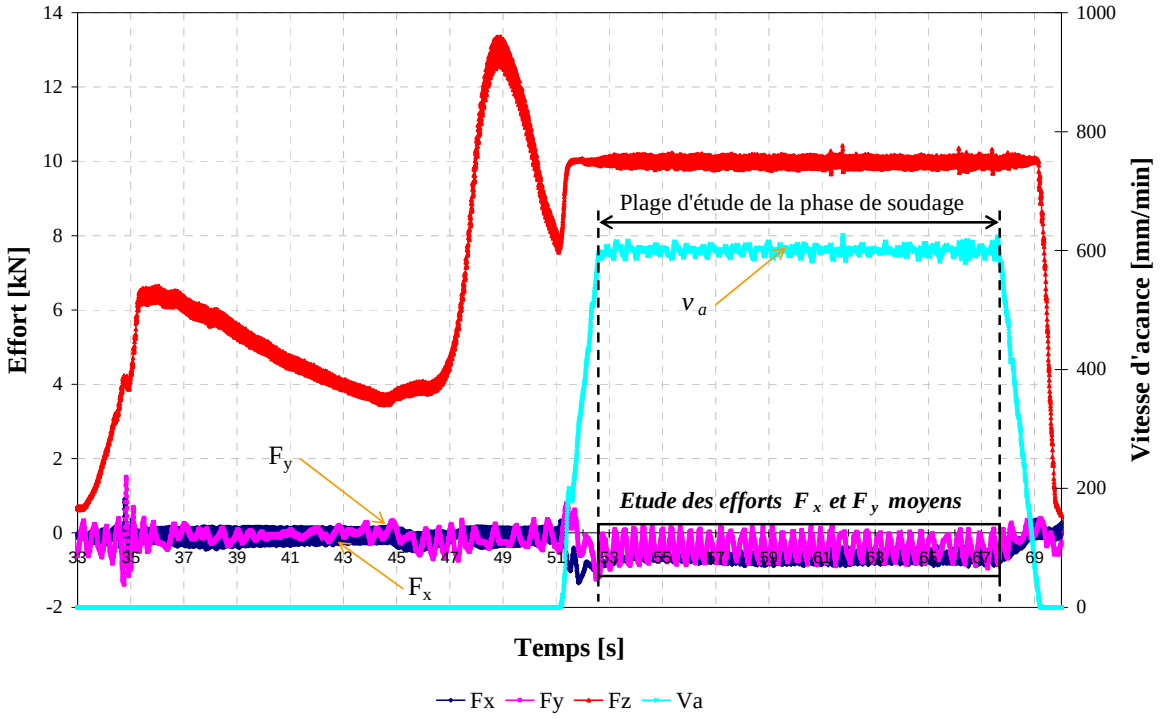


Figure 105: Présentation de la plage d'étude des efforts et des couples pendant l'opération de soudage

L'application est le soudage bout à bout de l'alliage 6082-T651 en épaisseur 6mm. Pour la phase de soudage, à partir d'un point de fonctionnement, issu de la base de données de l'Institut de Soudure, les plages variations de chacun des paramètres pris séparément vont être déterminées. Un plan d'expérience complet sera ensuite mis en place. Ces essais seront réalisés en pleine tôle et comparés à ceux d'une campagne de soudage bout à bout.

La Figure 106 situe les travaux présentés ci-après au sein du diagramme du schéma global décrivant la méthodologie mise en place au chapitre 2 pour valider ou concevoir un moyen de production FSW.

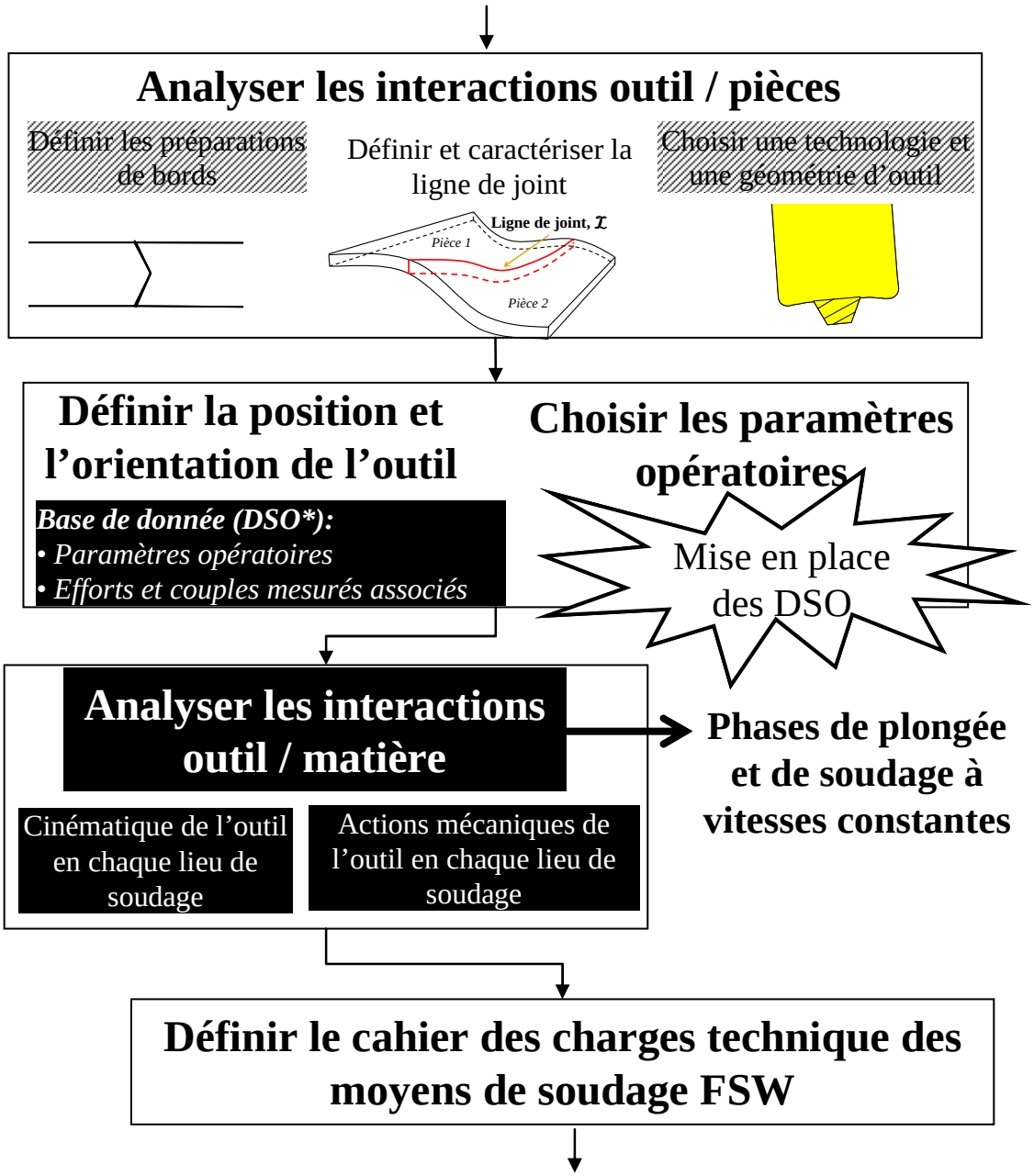


Figure 106: Focalisation du travail réalisé dans ce chapitre au sein du schéma global décrivant la méthodologie mise en place pour valider ou concevoir un moyen de production FSW

3. Analyse de la phase de plongée

Comme présenté précédemment, l'objectif de la campagne est d'étudier l'influence de v_p et de N_p sur les efforts F_x, F_y et F_z ainsi que sur le couple C_z. Nous analyserons de manière globale la phase de plongée à travers l'étude des courbes d'effort F_z et de couple C_z en fonction de la profondeur de pénétration. Puis, nous étudierons l'influence des paramètres opératoires sur l'évolution des courbes et des valeurs de F_x, F_y, $F_{z\ max}$, $C_{z\ max}$ et de E_n. Les résultats de cette analyse permettront de dessiner les efforts et les couples maximums obtenus dans la plage de fonctionnement étudiée. Ce type de diagramme pourra être utilisé pour choisir les paramètres opératoires.

Une courbe de couple non caractéristique, à faible fréquence de rotation, sera identifiée. L'étude menée permettra de conclure que ceci est dû à une puissance dissipée trop faible en début de phase de plongée.

3.1. Analyse des courbes du couple C_z et de l'effort F_z

L'analyse proposée ci-après s'intéresse à deux éléments, l'évolution de $F_{z\ max}$ et $C_{z\ max}$ en fonction de N_p et v_p mais également l'analyse des courbes d'efforts et de couple.

La Figure 107 présente l'évolution de l'effort F_z et du couple C_z en fonction de la profondeur de plongée. La courbe d'effort est similaire à celle décrite par Gerlich et al. [GER05]. Globalement, cette courbe d'effort peut être décomposée en 3 étapes distinctes, comme présenté sur la Figure 107. La première étape correspond à l'amorçage de l'insertion du pion au sein de la matière. Cela nécessite un effort axial important aboutissant à un premier pic d'effort [GER05]. Sur la courbe de la Figure 107 cela correspond au premier millimètre de la phase de plongée. Le pic obtenu ici n'est pas aussi prononcé que celui obtenu par Gerlich et al. [GER05] sans doute à cause de paramètres opératoires différents. Lors de nos phases expérimentales des débris ont également pu être visualisés, Figure 108-A. Ceci peut s'apparenter à un phénomène de coupe. Puis, suite à l'adoucissement de la matière sous le pion [GER05, GUE07] l'effort axial diminue, Figure 107 – étape 2. L'immersion s'effectue alors sans recourir à un effort axial supplémentaire et génère l'extrusion du matériau le long du pion [GER05, ZAE05], comme visualisé sur les Figure 108-B. Dans le dernier millimètre de la phase de plongée, lorsque l'épaulement entre en contact avec le matériau extrudé l'effort connait un accroissement important, Figure 107 – étape 3 et Figure 108-C. Cet accroissement de l'effort est dû à l'écrasement de la matière extrudée se trouvant emprisonnée entre l'épaulement et la surface des pièces [GER05]. La matière est alors forgée puis refoulée sous l'épaulement à la fin de la plongée [GER05]. Ceci génère un pic d'effort axial en fin de plongée $F_{z\ max}$ [ZAE04], comme présenté sur la Figure 107 – étape 3 et Figure 108-D.

La courbe de couple quant à elle connaît une évolution plus « linéaire », comme présenté sur la Figure 107. Cette évolution du couple s'explique par une immersion progressive de l'outil au sein de la matière et par conséquent à une augmentation progressive

de la surface en contact, entrainant une augmentation quasi linéaire de la résistance à la rotation. Lorsque l'épaulement entre en contact avec la surface des pièces, Figure 107 – étape 3, le couple connaît alors une augmentation plus forte à cause de l'augmentation de surface en contact. Il atteint alors un pic, $C_{z\ max}$, à la fin de la plongée quasi simultanément au pic d'effort axial.

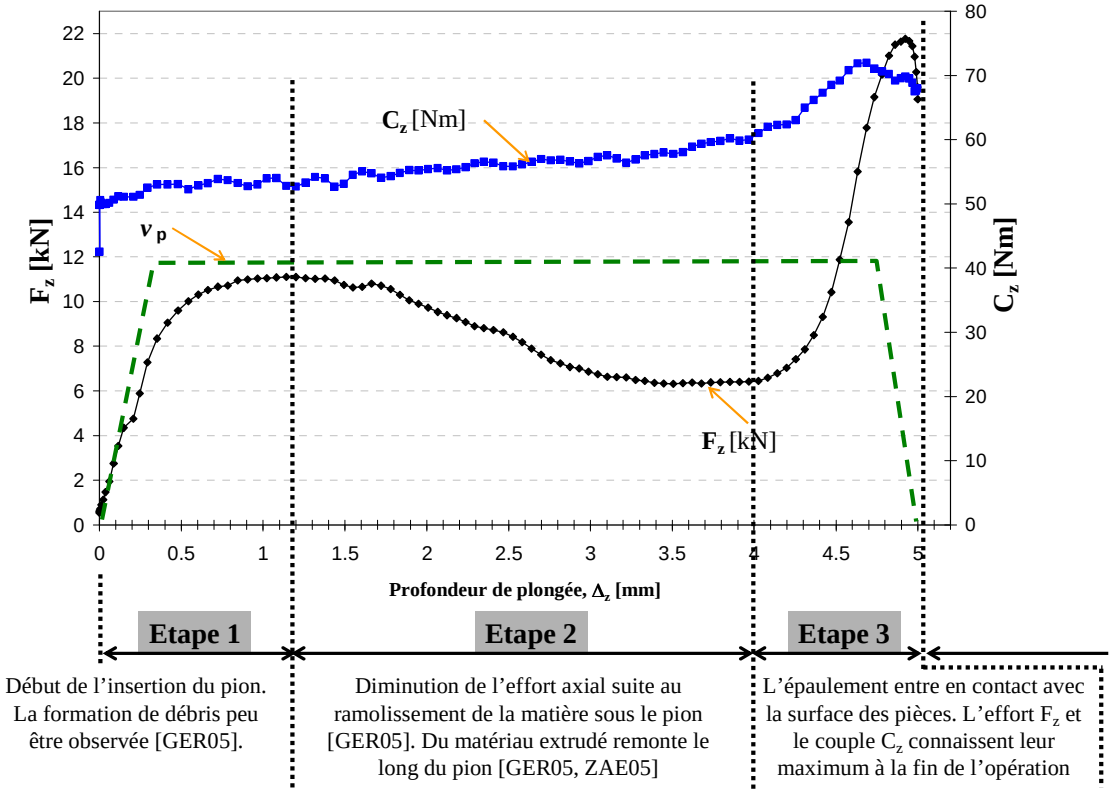


Figure 107: Présentation de l'évolution de F_z et de C_z en fonction de la profondeur de pénétration, pour N_p = 1200tr/min, v_p = 35mm/min et a_p = 31mm/min-s

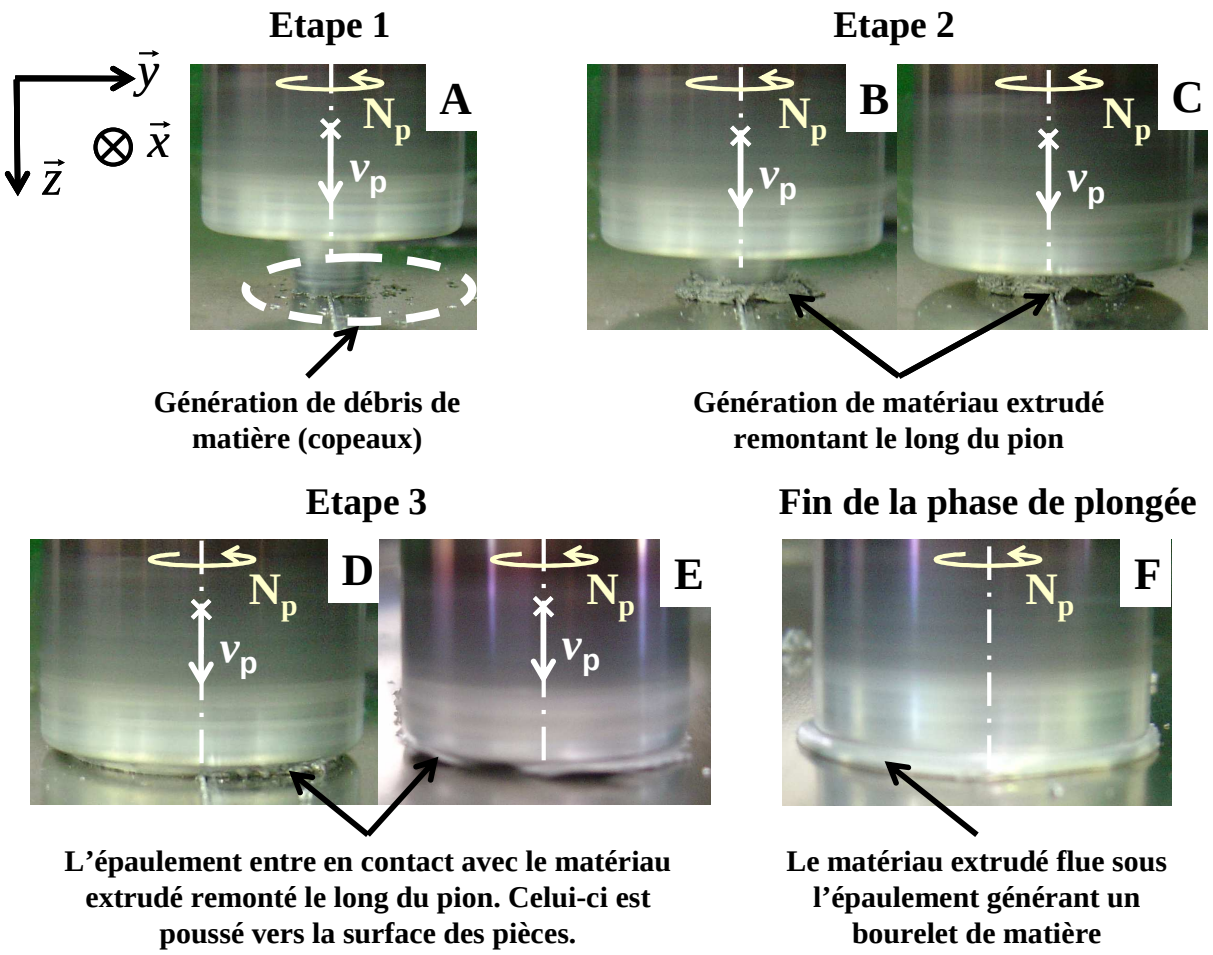


Figure 108: Visualisation de l'insertion de l'outil et de la formation de matière extrudée au cours de l'opération de plongée

3.2. Détermination de l'énergie dissipée en phase de plongée

L'étude présentée dans le chapitre 2 a montré que la composante de la puissance issue du mouvement d'avance était négligeable quelle que soit la phase de soudage. L'expression de la puissance peut ainsi être réduite à l'équation (41) :

$$P = C_z \cdot \varpi_p \; [W] \tag{41}$$

Cette puissance consommée va être dissipée sous forme de chaleur par frottement et déformation plastique [MAN08, GER07]. Etant donné que la position de l'outil n'évolue pas dans le plan (O, $\underline{x}$, $\underline{y}$) la source de chaleur reste donc stationnaire. Ainsi, l'aire sous la courbe de puissance en fonction du temps correspond à l'énergie dissipée sous forme de chaleur au sein du matériau et de l'outil. Nous définissons l'énergie dissipée $E_{dissipée}$ par l'équation (42) :

$$E_{dissipée} = \int_{t=0}^{t=\text{fin de la plongée}} C_z \times \frac{N_p \times 2\pi}{60} dt \quad [kJ] \tag{42}$$

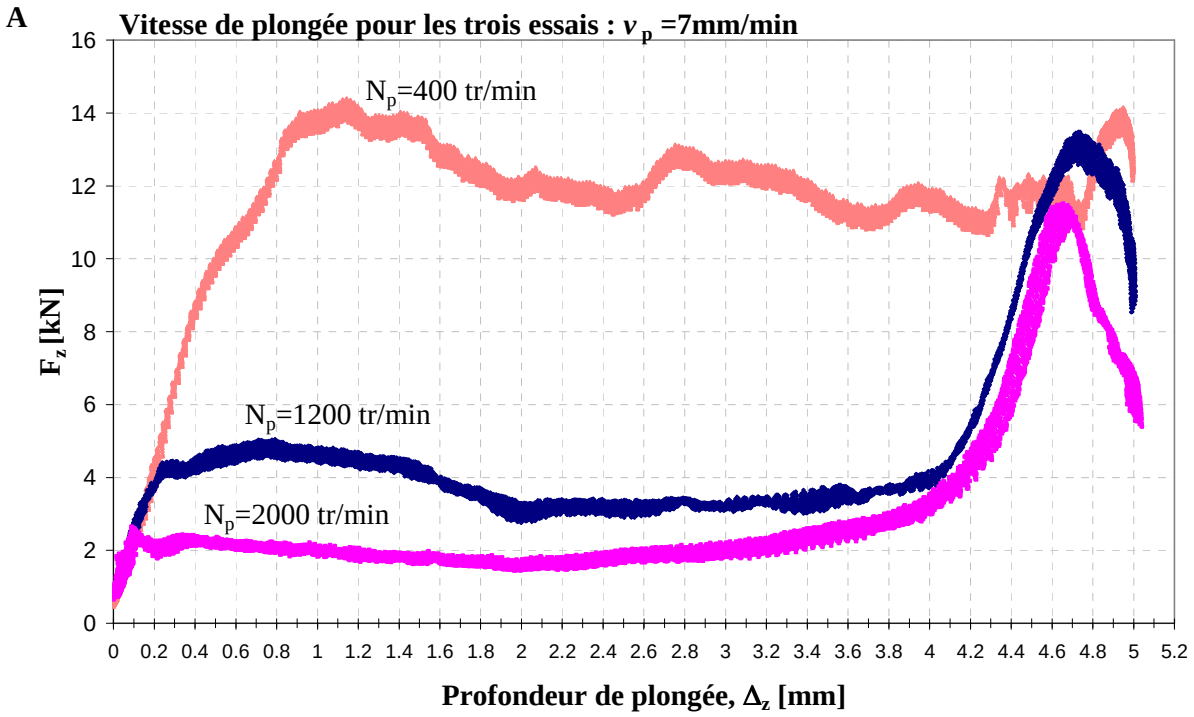
La chaleur générée est évacuée par l'outil, la pièce, l'enclume et le bridage. Toutefois, pour une même vitesse de plongée, en prenant pour hypothèse une dissipation de chaleur

équivalente d'un essai à l'autre, $E_{dissipée}$ peut servir d'indicateur de température de la matière autour de l'outil.

3.3. Etude de l'influence des paramètres opératoires

3.3.1. Influence sur l'évolution de C_z et de F_z

L'évolution de la courbe de l'effort axial F_z et du couple C_z témoignent des interactions mécaniques entre l'outil et le matériau. La Figure 109-A et B présentent leurs évolutions en fonction de la fréquence de rotation pour une vitesse de plongée donnée. Les courbes d'effort et de couple pour une fréquence de rotation égale à 1200 et 2000 tr/min, suivent la description donnée dans le paragraphe 3.1. Par contre, lorsque la fréquence de rotation est égale à 400 tr/min, les courbes de couples et d'effort présentent une allure différente.



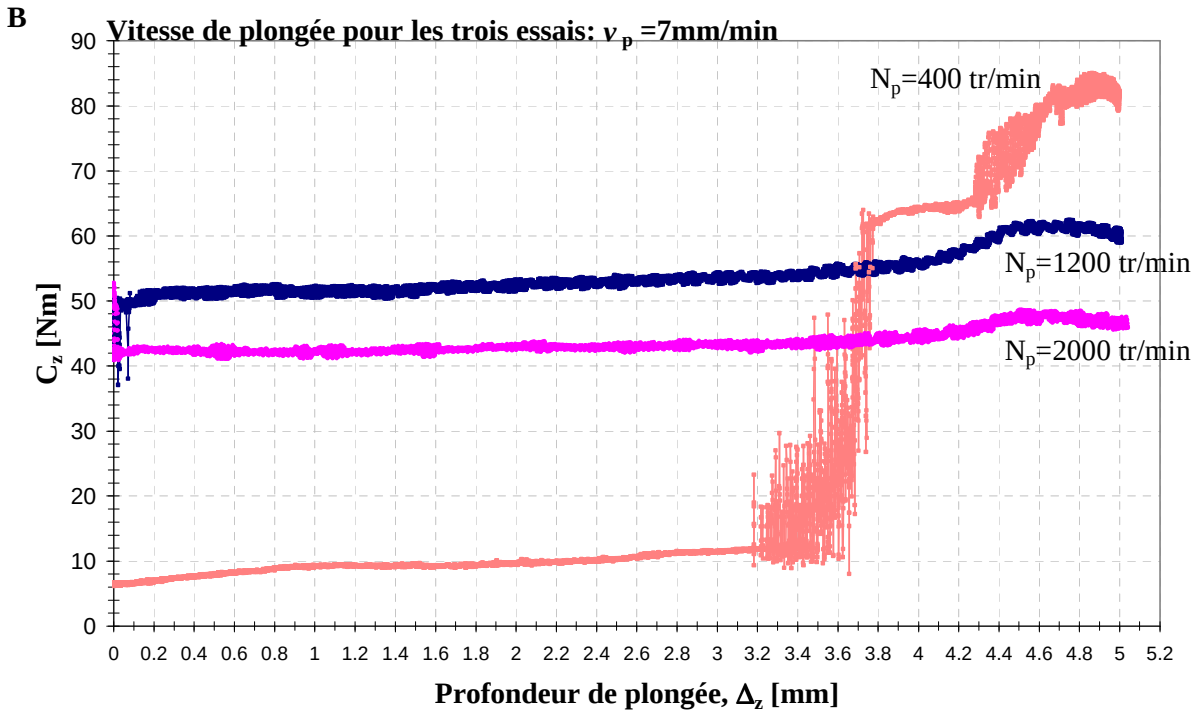


Figure 109: A- Evolution des courbes d'effort axial selon la fréquence de rotation en fonction de la profondeur de plongée. B- Evolution des courbes de couple selon la fréquence de rotation en fonction de la profondeur de plongée

Analyse des courbes de C_z et F_z pour N_p =400tr/min de manière plus détaillées

La courbe de couple pour N_p égale à 400tr/min (Figure 109-B) présente un couple faible, avoisinant les 10Nm, sur plus de moitié de la plongée. Puis, celui-ci connaît une

augmentation pour rejoindre un niveau plus « cohérent » par rapport aux deux autres courbes. Cette courbe laisse présager la présence de deux régimes thermomécaniques différents avec une phase de transition. Ce comportement est sans doute dû à des températures et une viscosité de matériau différentes au cours de la plongée. Ce phénomène se retrouve pour tous les essais réalisés à N_p =400tr/min et N_p =800tr/min, quelle que soit la vitesse de pénétration.

Nous expliquons ce comportement ainsi. Lorsque le couple est faible, nous supposons que le pion n'entraine pas la matière située autour de lui, c.à.d. que le malaxage n'est pas effectif. L'outil est comme « enfoncé » dans la matière, nécessitant un effort axial important pour insérer l'outil à la vitesse imposée. Le Tableau 11 présente l'énergie dissipée sur le premier millimètre, l'effort F_z et le couple C_z générés pour trois fréquences de rotation différentes. Un écart significatif peut être notifié. Avec seulement 3,5kJ d'énergie dissipée lorsque N_p est égale à 400tr/min, on peut supposer que l'apport d'énergie par frottement entre le bout du pion et la matière est trop faible pour amener le matériau à un état thermoplastique suffisant pour initier le malaxage.

Δ_z =1mm	N_p = 2000 rpm v_p = 7mm/min	N_p = 1200 rpm v_p = 7mm/min	N_p = 400 rpm v_p = 7mm/min
Energie dissipée	**100 kJ**	**70 kJ**	**3.5 kJ**
Couple moyen	**C_z = 42 Nm**	**C_z = 52 Nm**	**C_z = 08 Nm**
Effort Axial	**$F_z \leq$ 2.6kN**	**$F_z \leq$ 5kN**	**$F_z \leq$ 14.5kN**

Tableau 11: Comparaison de l'énergie apportée au matériau, de l'effort et du couple générés sur le premier millimètre de plongée

Puis, lorsque Δ_z =3,2mm, le couple augmente d'une manière soudaine, comme si la nature des interactions entre l'outil et la matière évoluaient. Ce changement notifie une évolution du comportement du matériau autour de l'outil. Nous supposons qu'à ce stade, les conditions thermomécaniques autour de l'outil permettent le malaxage de la matière ainsi que l'obtention de courbes de couple et d'effort cohérentes en fin de plongée, par rapport aux autres courbes (Figure 109-A et B).

Ainsi, la fréquence de rotation semble avoir une forte influence sur l'apport d'énergie et la nature du malaxage. En effet, une fréquence de rotation faible entraine une puissance dissipée faible et par conséquent un état viscoplastique du matériau ne permettant pas son malaxage autour du pion dès le démarrage de la phase de plongée. Cet écart peut également expliquer la différence d'amplitude du pic d'effort F_z pour ces trois essais.

Energie dissipée et pic d'effort $F_{z\ max}$

Une différence notable d'énergie totale dissipée en fin de plongée a été notifiée comme présenté dans le Tableau 12. Par hypothèse, étant donné que v_p et a_p sont identiques pour ces essais, la vitesse à laquelle l'outil touche la surface des pièces doit être similaire d'un essai à l'autre pour ces trois configurations. Ainsi, la différence d'amplitude des pics $F_{z\ max}$ et $C_{z\ max}$

peut également être expliquée par une différence de l'état thermoplastique du matériau. A fréquence de rotation plus élevée, le matériau est plus « mou » facilitant l'écoulement de la matière extrudée sous l'épaulement ce qui nécessite un effort $F_{z\ max}$ moins important.

v_p = 7mm/min

N_p [tr/min]	$C_{z\ max}$ [Nm]	$F_{z\ max}$ [kN]	$E_{Dissipée}$ [kJ]
400	85	15.5	**36**
1200	62	13.5	**201**
2000	49	11.5	**329**

Tableau 12: Comparaison de l'énergie dissipée lors des essais de plongée pour v_p=7mm/min, N =2000, 1200 et 400tr/min

Il apparaît qu'une corrélation entre la fréquence de rotation, la puissance dissipée, le couple et l'effort peut être établie. Ceci témoigne de l'influence des paramètres opératoires sur les actions mécaniques générés entre l'outil et la matière.

3.3.2. Etude de l'influence des paramètres opératoires sur les grandeurs de sortie

Analyse de l'évolution de $F_{z\ max}$, $C_{z\ max}$ et $E_{dissipée}$

La Figure 110 présente l'évolution de $F_{z\ max}$, $C_{z\ max}$ et $E_{dissipée}$ en fonction de N_p pour différente valeur de v_p, à savoir 7, 14, 20, 27 et 35 mm/min. Une relation entre paramètres opératoires, énergie dissipée et les valeurs de $F_{z\ max}$ et $C_{z\ max}$ se retrouve dans ces trois figures. Il peut être noté que l'effort maximal obtenu peut être associé au couple maximal et à l'énergie dissipée la plus faible.

L'analyse de la Figure 110 permet d'identifier l'influence des paramètres opératoires sur les valeurs $F_{z\ max}$ et $C_{z\ max}$:

- A vitesse de plongée constante, une augmentation de la fréquence de rotation entraine une augmentation de l'énergie dissipée et une diminution des valeurs de $F_{z\ max}$ et $C_{z\ max}$ (Figure 110-A – B et C). L'augmentation de l'énergie dissipée correspond à une augmentation de la température du matériau. La chute du couple provient d'une diminution de la limite d'écoulement de la matière autour de l'outil. Ainsi, malgré l'augmentation de la vitesse de déformation, due à une fréquence de rotation plus élevée, la viscosité du matériau diminue grâce à l'augmentation de la température et peut-être également grâce à un effet thixotrope. L'ensemble conduit à une diminution du couple à la broche. Cette diminution de viscosité peut également expliquer la diminution de l'effort $F_{z\ max}$. En effet, suite à la diminution de la viscosité du matériau, moins d'effort axial est nécessaire pour écraser la matière située entre l'épaulement et la surface des pièces en fin de la phase de plongée (Figure 108- D et E).

- A vitesse de rotation constante, une augmentation de la vitesse de plongée génère une diminution de l'énergie dissipée et une augmentation des valeurs de $F_{z\ max}$ et de $C_{z\ max}$ (Figure 110-A – B et C). Une augmentation de v_p entraine une augmentation du taux de déformation de la matière autour de l'outil. La diminution de l'énergie dissipée occasionne une diminution de la température et, par conséquent, une augmentation de la viscosité. Ceci explique pourquoi $F_{z\ max}$ augmente de manière importante avec v_p. La diminution de la température conduit à une augmentation du couple. Par contre, la vitesse de déformation liée à l'augmentation de v_p est orientée de telle sorte qu'elle n'augmente pas la résistance à la rotation de l'outil.

Le Tableau 13-A et B présente l'évolution de $F_{z\ max}$, $C_{z\ max}$ et $E_{dissipée}$ lorsque v_p varie de 400% et lorsque N_p varie de 400%. Les évolutions respectives de ces trois grandeurs permettent de mettre en avant que l'effort $F_{z\ max}$ est plus sensible aux variations de v_p que de N_p, tandis que le couple $C_{z\ max}$ est plus sensible aux variations de N_p que de v_p. Par contre, l'énergie dissipée dépend à la fois de N_p et de v_p.

A

N_p = 2000tr/min	**$F_{z\ max}$ [kN]**	**$C_{z\ max}$ [Nm]**	**$E_{dissipée}$ [kJ]**
v_p évolue de 7 à 35mm/min	13.7→ 22.1	63.1→ 72.7	243→ 73
soit +400%	**soit + 60%**	**soit + 15%**	**soit - 370%**

B

v_p = 20mm/min	**$F_{z\ max}$ [kN]**	**$C_{z\ max}$ [Nm]**	**$E_{dissipée}$ [kJ]**
N_p évolue de 400 à 2000tr/min	22→ 17.3	92.7→ 56.2	28→ 166
soit +400%	**soit - 20%**	**soit - 40%**	**soit + 490**

Tableau 13: A - Présentation de l'évolution de $F_{z\ max}$, $C_{z\ max}$ et $E_{dissipée}$ lorsque v_p varie de 400% pour N_p constant. B - Présentation de l'évolution de $F_{z\ max}$, $C_{z\ max}$ et $E_{dissipée}$ lorsque N_p varie de 400% pour v_p constant

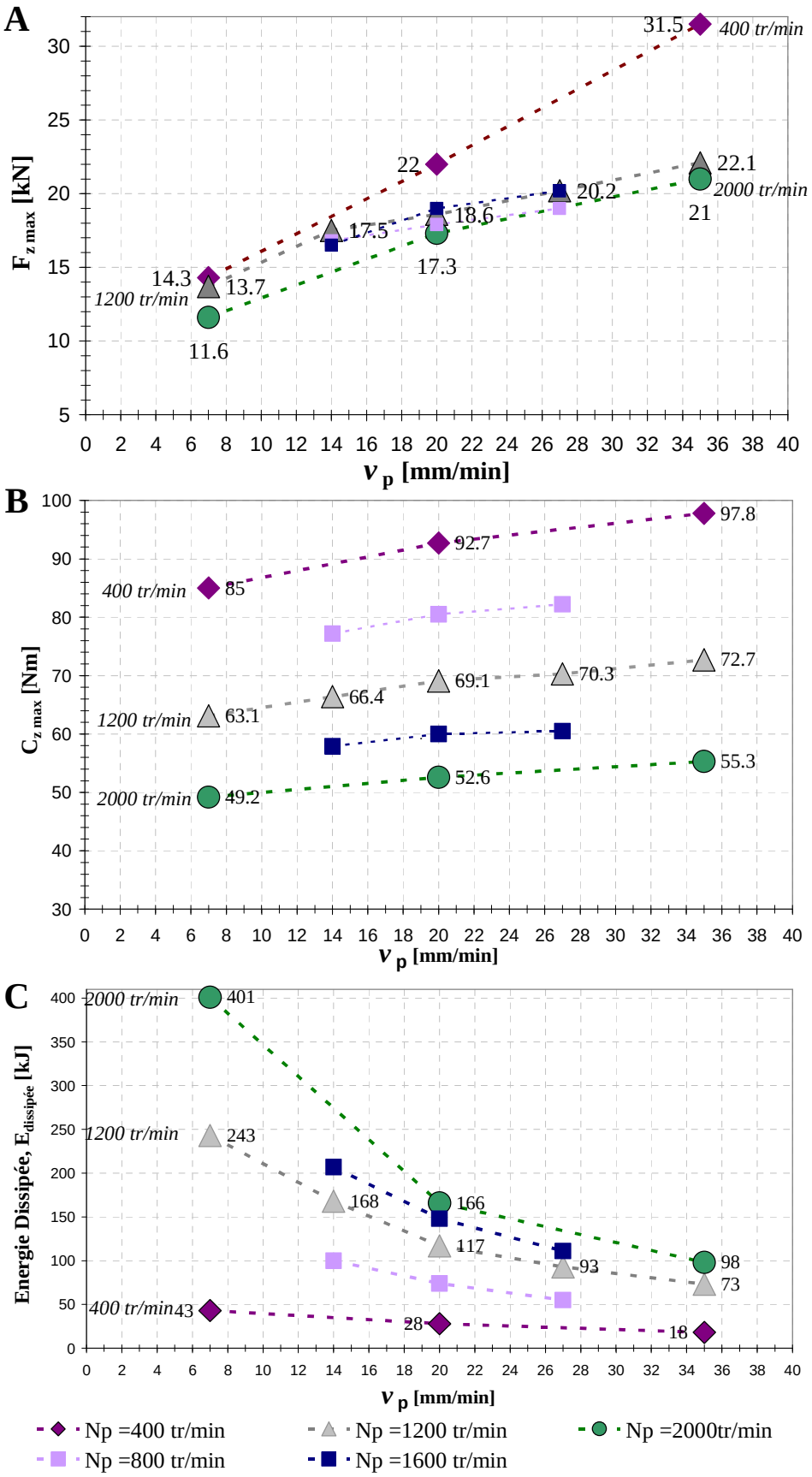


Figure 110: A- Evolution de Fz max en fonction des paramètres opératoires. B- Evolution de $C_{z\,max}$ en fonction des paramètres opératoires. C- Evolution de l'$E_{dissipée}$ en fonction des paramètres opératoires

Analyse de l'évolution de F_y et F_x

Les efforts dans le plan (O, x, y) sont également des grandeurs de sorties de notre étude. La Figure 111 présente l'évolution de la projection des efforts dans les trois directions. Pour tous les essais, ces efforts oscillent à une valeur moyenne sensiblement égale à zéro. L'amplitude de ces oscillations peut représenter de 10 à 20 % de $F_{z\ max}$. Ainsi, ils ne sont pas négligeables. L'analyse montre également que cette amplitude peut difficilement être corrélée avec les paramètres opératoires.

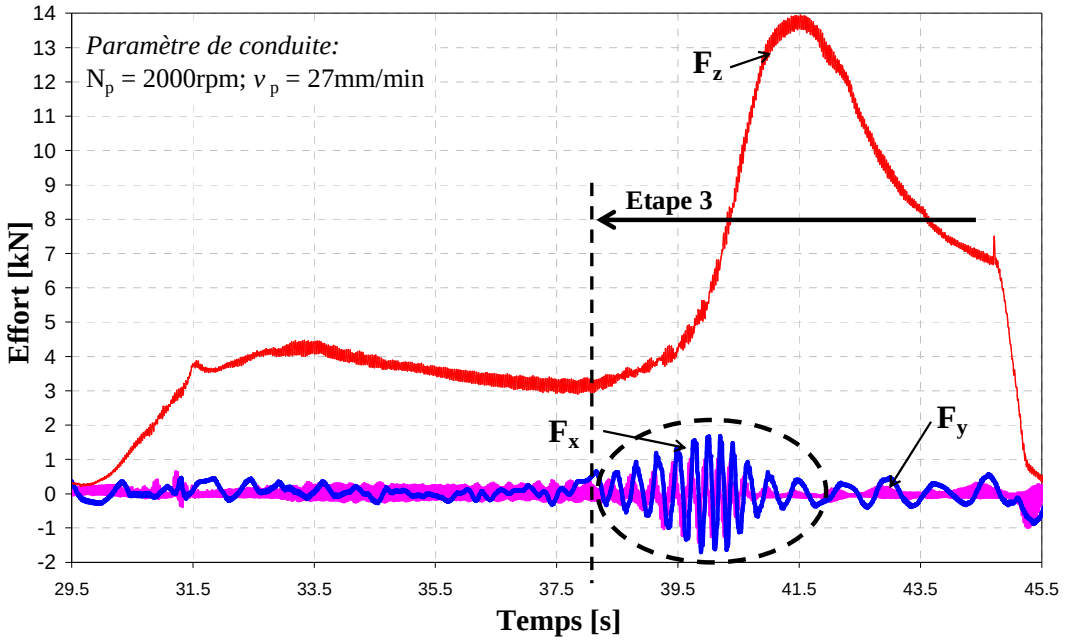


Figure 111: Evolution de F_z, F_x et F_y en fonction du temps au cours de la phase de plongée

Le phénomène oscillatoire des efforts F_x et F_y se retrouvent souvent :

- Au démarrage de la phase de plongée, lorsque l'outil entame son insertion dans la matière. Le pion ne possède pas encore de matière autour de lui pour le maintenir latéralement et celui-ci glisse sur la surface des pièces générant quelques oscillations. Elles se traduisent par des différences d'amplitude des efforts F_x et F_y.
- Lorsque l'épaulement entre en contact avec la surface des pièces, comme présenté sur la Figure 111. Dans ce cas de figure, l'oscillation de l'outil est sans doute due à des variations des efforts dans le plan (O, x, y) suite à un contact non homogène entre l'épaulement et la matière extrudée.

Remarque : ce phénomène n'est pas lié uniquement à l'inclinaison, i, de l'outil dans la mesure où il peut se retrouver avec un outil à épaulement plat (i=0).

Une analyse de la fréquence de ces oscillations a été réalisée à l'aide d'une FFT (Fast Fourrier Transform) sur les efforts F_x et F_y. Les résultats sont présentés sur la Figure 112. Au sein des oscillations des efforts de F_x et F_y, on distingue des basses fréquences, probablement

liées à la machine hydraulique et à son système de pilotage ainsi qu'une fréquence correspondant à la fréquence de rotation de l'outil.

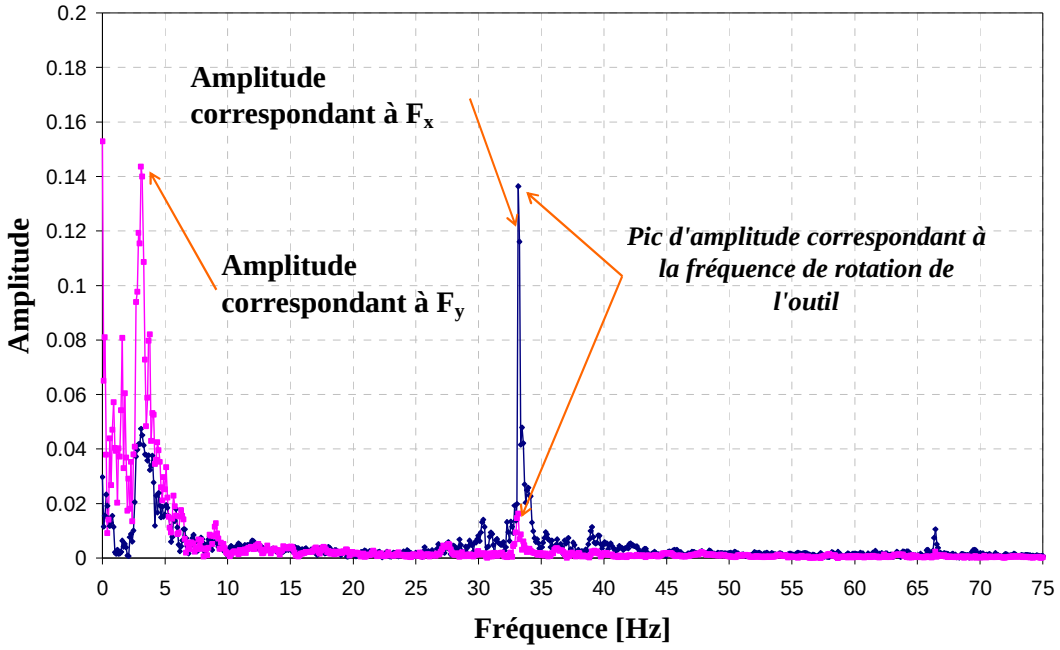


Figure 112: Résultat de la FFT (Fast Fourrier Transform) réalisée sur les efforts F_x et F_y

Il semble important de prendre en compte ces phénomènes oscillatoires, car ils peuvent avoir une incidence d'un point de vue vibratoires sur la structure de la machine FSW et l'ensemble du système de mise et maintien en position des pièces.

Cette étude nous amène à la conclusion que l'apport d'énergie, l'évolution de l'effort suivant (O, $\underline{z}$) et l'évolution du couple à la broche dépendent des interactions outil / matière générées pendant la phase de plongée. Ces dernières sont fonctions des paramètres de conduite N_p et v_p appliquées sur l'outil. Ceci démontre que l'effort et le couple maximaux apparaissant en fin de pénétration peuvent être influencés par ces deux paramètres.

Si l'effort et le couple dépendent des interactions outil / matière, alors à paramètres de conduite identiques les évolutions des courbes d'efforts et de couples devraient être identiques.

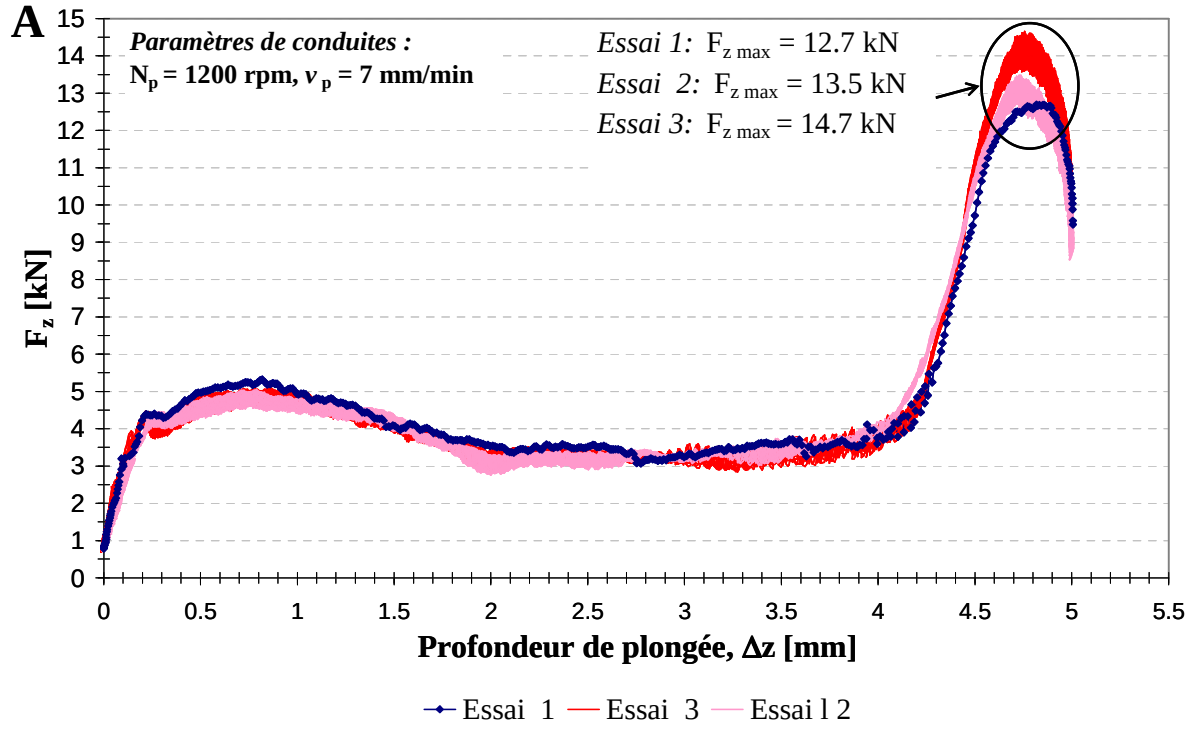
3.3.3. Evolution des actions mécaniques à paramètres opératoires identiques

La Figure 113-A et B présentent l'évolution des courbes d'effort et du couple en fonction de la profondeur de pénétration pour trois essais réalisés à paramètres opératoires identiques. Ces courbes d'efforts et de couples peuvent quasiment se superposer sur l'ensemble de la phase de plongée. Ceci témoigne de la répétabilité des actions mécaniques générées à l'interaction outil / matière à paramètres de conduite identiques.

L'ordre de grandeur de l'intensité de C_z est quasi identique pour ces trois essais (3% d'écart maximal d'un essai à l'autre). Ceci se vérifie pour tous les paramètres de conduite réalisés trois fois. Ainsi, cela témoigne de la répétabilité des conditions thermomécaniques

autour de l'outil d'un essai à l'autre. Cette répétabilité ne se vérifie pas pour l'amplitude de l'effort axial maximal, Figure 113- A. Comme $F_{z\ max}$ est une grandeur caractéristique pour le dimensionnement d'un moyen de production FSW, il parait intéressant d'étudier le phénomène plus en détail. C'est pourquoi, une étude a été réalisée sur 19 essais à paramètres de conduite et condition opératoire identiques. L'écart type de l'ensemble des mesures est de 0,8kN sur une moyenne de 18,5kN, signifiant une faible dispersion. Toutefois, l'écart maximal entre deux valeurs de $F_{z\ max}$ peut représenter 20%. L'erreur de mesure ne représentant que 5%, celle-ci ne peut donc pas être à l'origine d'une telle variation. Cette différence est non négligeable dans un contexte de dimensionnement statique et doit être prise en compte.

Pour expliquer une telle variation, des hypothèses peuvent être avancées. En théorie, étant donné que les paramètres de conduite sont identiques, la vitesse à laquelle l'outil touche la surface doit être semblable d'un essai à l'autre. Des dispersions dans le pilotage de la décélération peuvent occasionner des différences de vitesse d'accostage. Ces différences peuvent expliquer de petite variation de l'effort $F_{z\ max}$. Un autre facteur vient s'ajouter à celui-là. Comme présenté dans le paragraphe 3.1 (Figure 108), de la matière remonte le long du pion. D'un essai à l'autre, la répartition du volume de matière autour du pion n'est pas la même, engendrant des différences d'amplitude de l'effort lorsque l'épaulement vient à écraser cette matière (Figure 108 –D, E et F). La combinaison de l'ensemble de ces facteurs peut expliquer une différence d'amplitude de 20% d'un essai à l'autre. Ainsi, pour dimensionner statiquement une machine FSW, il est nécessaire de prendre en compte cette variabilité de l'effort $F_{z\ max}$.



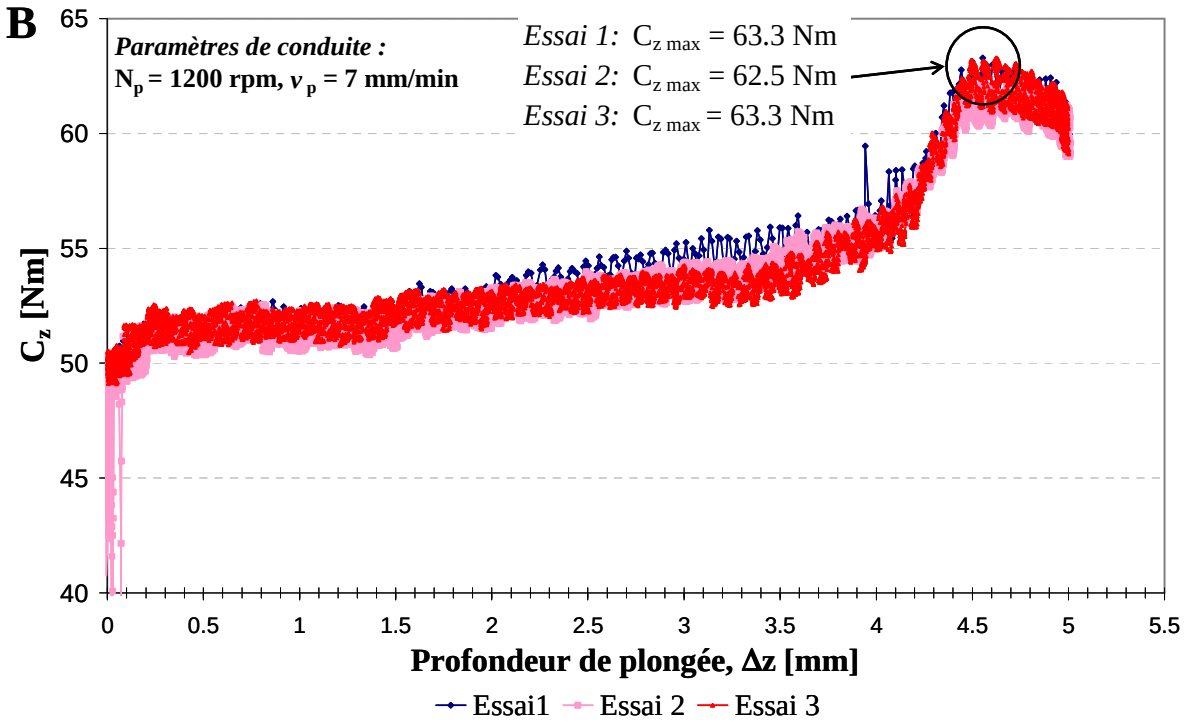


Figure 113: Evolution de l'effort suivant (O, z) et du couple à la broche pour trois essais réalisés à paramètres opératoires identiques

3.4. Influence de la profondeur de plongée sur $F_{z\ max}$ et $C_{z\ max}$

L'influence du paramètre opératoire Δ_z sur $F_{z\ max}$ et $C_{z\ max}$ ont été étudiée pour deux valeurs de Δ_z, 5mm et 5,5mm. Les autres paramètres de conduites restant identiques pour chaque essai. La Figure 114 présente l'évolution de $F_{z\ max}$ et de $C_{z\ max}$ en fonction de la profondeur de plongée, Δ_z.

Ce changement de profondeur de plongée a révélé l'influence du paramètre Δ_z sur l'amplitude de $F_{z\ max}$. En effet, une augmentation de Δ_z de 0,5mm entraine une augmentation de 24% de l'effort maximal atteint. Il s'avère ainsi que $F_{z\ max}$ est très sensible à une variation de Δ_z, contrairement au couple.

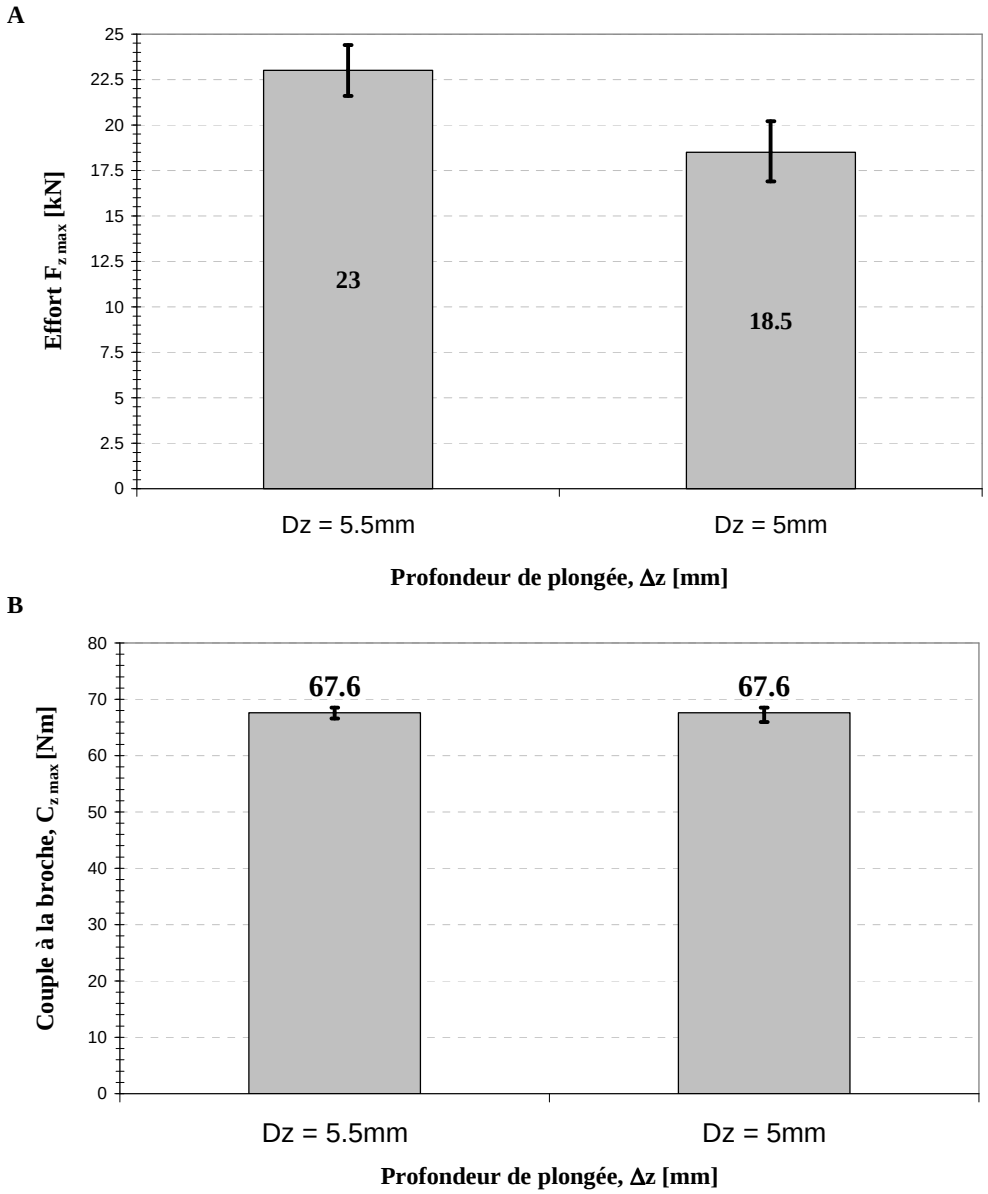


Figure 114: Evolution des valeurs moyennes de $F_{z\ max}$ et de $C_{z\ max}$ sur plusieurs essais en fonction de la profondeur de plongée. Les barres d'erreurs correspondent aux valeurs minimales et maximales enregistrées

Une profondeur de plongée plus élevée implique une pénétration de l'outil au sein de la matière plus conséquente et donc un volume de matière déplacé plus grand. Ceci requiert un effort plus important, justifiant l'augmentation de l'effort $F_{z\ max}$. Par contre, cela n'implique pas une augmentation de la résistance à la rotation de l'outil. En effet, l'évolution du couple et son amplitude maximale $C_{z\ max}$ n'évoluent pas lorsque Δ_z augmente de 0,5mm.

Ceci peut s'expliquer par le fait qu'à outil et paramètres opératoires identiques la contrainte tangentielle de contact n'évolue que très faiblement pour une « petite » variation de

Δ_z. La contrainte tangentielle de contact semble être limitée par la contrainte d'écoulement du matériau. Ainsi, à outil identique, l'effort normal F_z augmente, mais comme la contrainte de cisaillement du matériau est atteinte, celle-ci n'évolue plus. De ce fait, le couple $C_{z\ max}$ ne connait pas d'évolution pour à une « petite » variation de Δ_z et cela malgré une augmentation de F_z.

Ainsi, cela montre l'influence de Δ_z sur $F_{z\ max}$. Ce paramètre doit donc être correctement choisi afin d'éviter une surestimation de la valeur de $F_{z\ max}$. Il est à noter que lors d'un contrôle en effort, le paramètre Δ_z va uniquement conditionner le début de l'opération de soudage. En effet, le paramètre Δ_z n'influence pas la position de l'outil en cours de soudage, car celle-ci résulte de la position d'équilibre entre l'effort F_z appliqué et la réaction de la matière. Toutefois, ce paramètre risque d'être pertinent vis-à-vis de la transition entre les phases de plongée et de soudage.

3.5. Diagramme d'effort et de couple en fonction des paramètres opératoires

L'analyse réalisée montre qu'il est possible d'influencer les valeurs de $F_{z\ max}$ et de $C_{z\ max}$ en fonction des paramètres opératoires, v_p et N_p. En associant à chaque couple de paramètre opératoire les valeurs de $F_{z\ max}$ et $C_{z\ max}$, on s'aperçoit que des gammes d'efforts ou de couples peuvent être identifiées. La Figure 115 présente les résultats obtenus. Sur cette figure, des gammes arbitraires d'efforts on été dessinées en guise d'exemple.

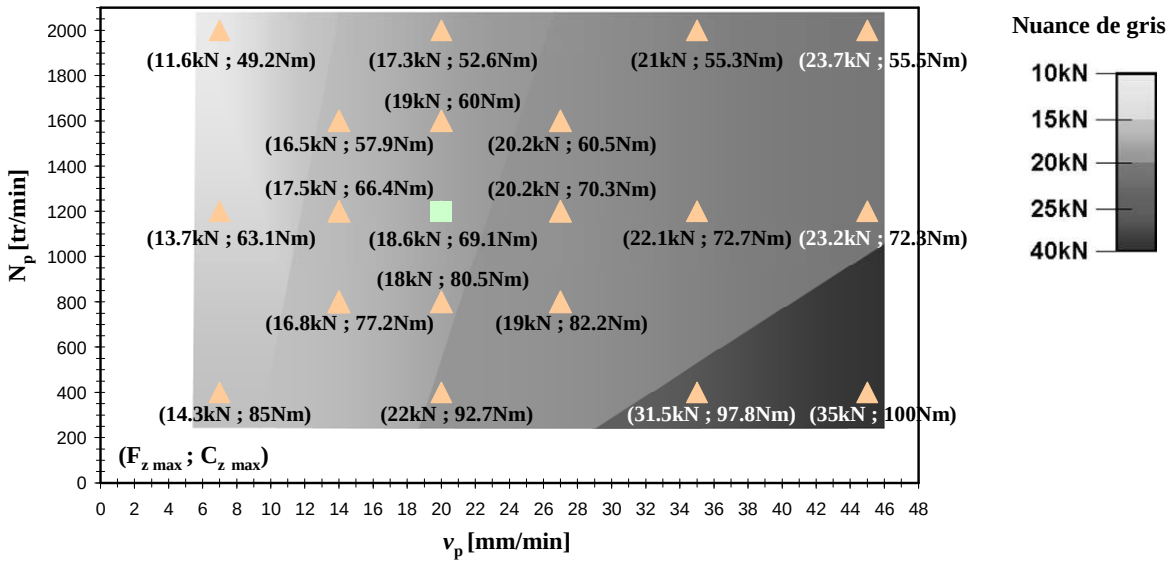


Figure 115: Gamme d'effort $F_{z\ max}$ en fonction des paramètres opératoires

Ce type de diagramme peut être utilisé pour sélectionner les paramètres de conduite N_p et v_p en fonction des capacités d'effort et de couple de la machine disponible ou choisie. Cela permet également de trouver un compromis entre effort généré et la productivité (v_p) de l'opération de soudage. De plus, si aucun point de fonctionnement ne permet de réaliser l'opération de plongée, cela indique à l'utilisateur la nécessité de changer de mode de pilotage

de l'opération. Un contrôle en effort de la phase est alors requis. De plus, ce diagramme peut également être utilisé pour dimensionner une machine de soudage par point.

La phase de plongée a été étudiée au travers de l'influence de la vitesse de pénétration v_p, de la vitesse de rotation de l'outil N_p et de la profondeur de plongée Δ_z. Lors de cette phase, l'outil est piloté en position.

Dans un premier temps, nous avons montré que l'évolution de l'effort axial et le couple à la broche connaissent un maximum ($F_{z\ max}$ et $C_{z\ max}$) quasi simultanément en fin de plongée lorsque l'épaulement entre en contact avec la surface des pièces et la matière refoulée par la pénétration du pion.

L'étude de l'influence de la vitesse de rotation de l'outil lors de la phase de plongée a mis en évidence ce qui semble être deux régimes d'écoulement. Le premier est obtenu pour les « faibles » vitesses de rotation pour lesquelles l'énergie dissipée ne semble pas suffisante pour amener le matériau dans un état thermoplastique permettant d'initier le malaxage. Le second régime correspond à un malaxage normal de la matière et est obtenu pour les « grandes » vitesses de rotation.

L'étude paramétrique a montré que le couple maximum à la broche diminue avec la vitesse de rotation. L'effort axial maximum augmente avec la vitesse de pénétration et la profondeur de pénétration et dans une moindre mesure diminue avec la vitesse de rotation. La dispersion mesurée sur la valeur de $F_{z\ max}$, peut aller jusqu'à 20%. Celle sur la mesure de C_z n'est que de quelques pourcents.

Après la phase de plongée, le travail se poursuit avec l'étude de la phase de soudage à vitesses constantes.

4. Analyse de la phase de soudage

L'objectif de cette étude est de définir le ou une partie du domaine de soudabilité opératoire. Sur la plage de fonctionnement identifiée, nous regarderons comment évoluent les actions mécaniques appliquées sur l'outil en fonction des paramètres opératoires. Seule la phase de soudage à vitesses d'avance et de rotation constantes a été étudiée. Les résultats de la campagne expérimentale réalisée vont être présentés dans deux parties distinctes :

- la mise en place du domaine de soudabilité opératoire déterminé à travers l'étude des défauts générés pendant la phase de soudage. Les résultats sont présentés pour l'alliage 6082-T651.
- l'analyse de l'évolution des interactions mécaniques outil/matière en fonction des paramètres opératoires.

Dans un premier temps, l'analyse portera sur les essais réalisés en pleines tôles qui seront ensuite comparés aux résultats des essais réalisés en bout à bout. Cela permettra d'identifier le défaut de pénétration partielle au sein du DSO.

4.1. Détermination du domaine expérimental étudié

La première campagne expérimentale est destinée à identifier les phénomènes « frontières » du DSO à partir d'un point de fonctionnement connu ($F_{z\ ref}$, $v_{a\ ref}$, N_{ref}). Pour la configuration donnée, le point de fonctionnement de référence est le suivant :

$$F_{z\ ref} = 14kN\ ;\ v_{a\ ref} = 600mm/min,\ N_{ref} = 1200tr/min$$

La méthodologie présentée au paragraphe 2.2.4

Mise en place d'un domaine de soudabilité opératoire (DSO) » consiste à faire varier un seul paramètre opératoire jusqu'à ce que les soudures obtenues ne remplissent plus les critères de validation définis. La partie du domaine de soudabilité opératoire ainsi explorée pour le 6082-T651 d'épaisseur 6mm a pour frontières :

- Pour le paramètre F_z : $F_{z\ lim\ inf}$ = 10kN et $F_{z\ lim\ sup}$ =21.5kN,
- Pour le paramètre N : $N_{lim\ inf}$ = 800tr/min et $N_{lim\ sup}$ = 1800tr/min,
- Pour le paramètre v_a : $v_{a\ lim\ inf}$ = 300mm/min et $v_{a\ lim\ sup}$ = 900mm/min.

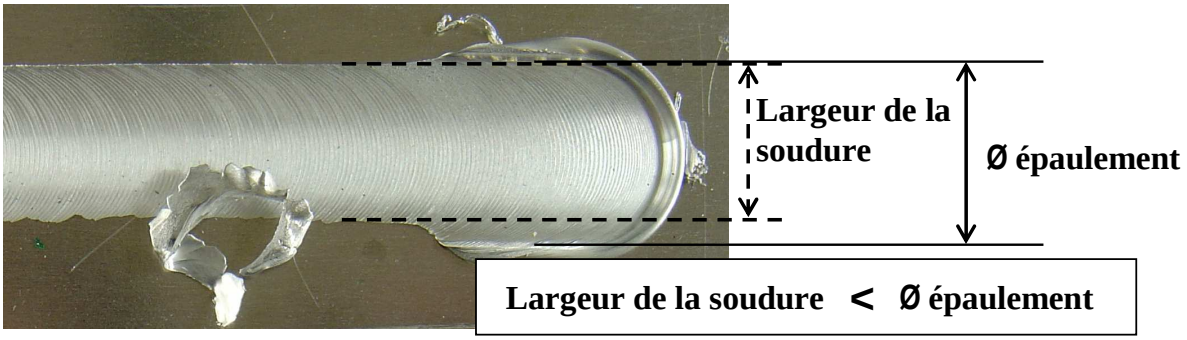
4.2. Analyse de la génération des défauts en fonction des paramètres opératoires

4.2.1. Présentation des défauts rencontrés

Les défauts rencontrés sont conformes à ceux décrits au chapitre 1 dans l'étude bibliographique pour d'autres alliages d'aluminium. Dans un premier temps, nous allons présenter les défauts identifiés, puis nous les localiserons autour du domaine de soudabilité opératoire.

Défauts identifiés via un contrôle visuel

- 1er défaut : le ***manque de marquage de l'épaulement sur la surface des pièces***, présenté à la Figure 116. Une différence entre la largeur de l'empreinte laissée par l'outil lors de la phase de pénétration et celle du cordon de soudure est alors identifiée. D'après la norme ISO/DIS 25239-3A, la largeur de la soudure ne doit comporter aucune variation.



F_z = 8kN; N= 1200 tr/min ; v_a =600mm/min

Figure 116: Défaut de manque de marquage de l'épaulement sur la surface des pièces

Ce défaut témoigne d'un effort insuffisant appliqué par l'outil qui laisse présager un défaut de pénétration partielle ou la présence d'un défaut tunnel (ces défauts sont explicités ci-après). La Figure 117 présente les forces appliquées sur l'outil. Lorsque l'équilibre des efforts appliqués sur l'outil n'est plus respecté la position de l'outil évolue par rapport à sa position original. Si l'outil remonte légèrement, le malaxage sous le pion devient alors insuffisant, conduisant à l'apparition du défaut de pénétration partielle. 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 117). Ce manque de matière peut occasionner l'apparition d'un défaut tunnel interne.

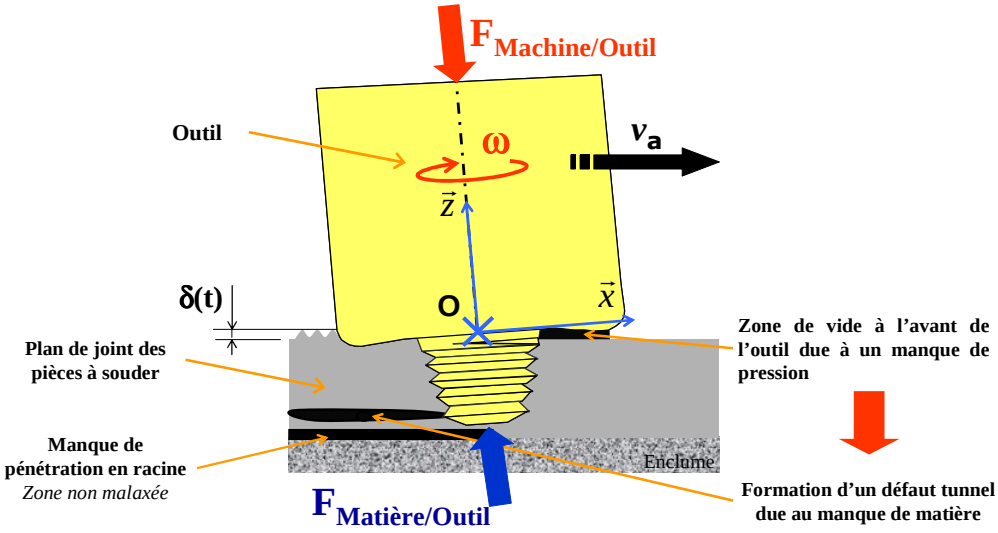
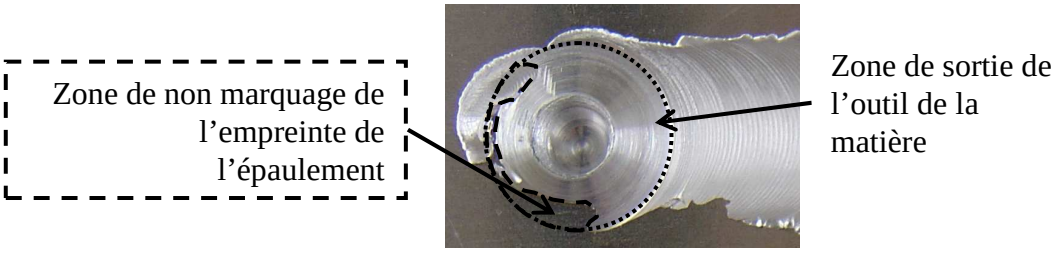


Figure 117: Schématisation de l'origine de la formation du défaut tunnel et de pénétration partielle

Ainsi, le manque de marquage de l'épaulement est souvent associé au ***défaut de manque de marquage de l'indentation*** de l'outil en sortie de cordon, comme présenté à la Figure 118. D'après la norme ISO/DIS 25239-3A, la surface de l'empreinte laissée doit au moins être de 80% de la surface de l'épaulement.



F_z = 8kN; N= 1200 tr/min ; v_a =600mm/min

Figure 118: Présentation du manque de marquage de l'empreinte de l'outil en sortie de matière

- 2ème défaut : ***l'outil s'enfonçant dans la matière***. Au cours du soudage, l'outil s'enfonce au sein de la matière entrainant une pénétration excessive de l'outil. Cela conduit à la ***formation d'une bavure excessive,*** comme présenté sur la

Figure 119, et par conséquent à une réduction de section de soudure. Cette bavure correspond au surplus de matière déplacée par l'outil lorsque celui-ci s'enfonce. Arbegast [ARB07b] a dénommé ce défaut « Ribbon flash ». La notion de bavures excessives est difficile à quantifier et à définir. A partir de quand correspond-t-il à un défaut ?

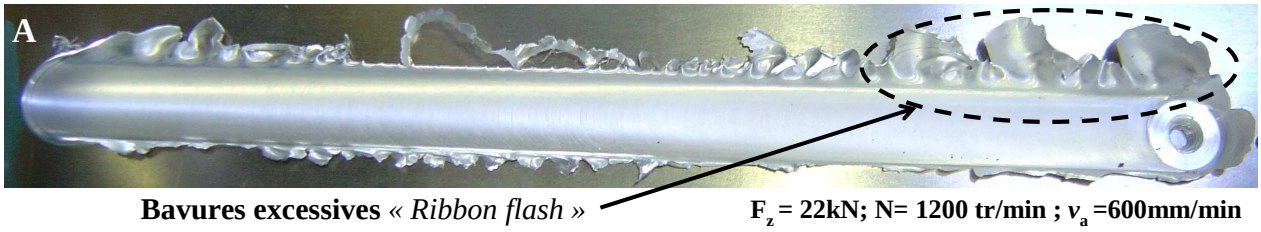


Figure 119: Outil s'enfonçant au sein de la matière générant une bavure excessive ou « ribbon flash »

Lorsque l'outil ne stabilise pas sa position suivant (O, z) le pion finit par toucher l'enclume, comme le présente l'essai interrompu sur la Figure 120. Cela détériore l'outil et l'enclume. Sur l'image on peut visualiser l'empreinte de l'épaulement s'insérer progressivement au sein de la matière.

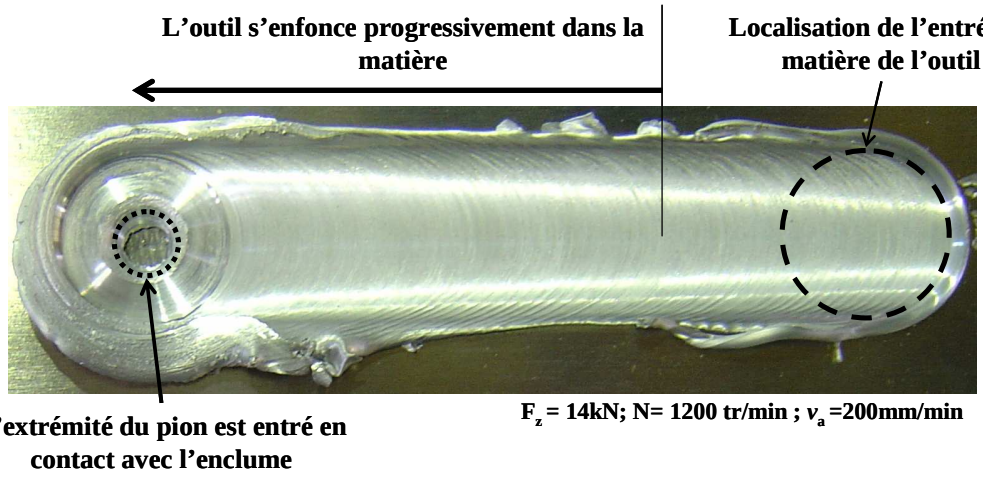


Figure 120: Outil plongeant au sein de la matière au cours du soudage. L'extrémité du pion est entrée en contact avec l'enclume

- 3ème défaut : des ***défauts de surfaces de type éraillures ou « écailles »*** laissées en surface par le passage de l'épaulement sur le cordon de soudure sont présentées à la Figure 121. Cette succession d'« écailles » se situe généralement au centre du cordon, voire du côté avance de la soudure. Elles peuvent s'apparenter à des brûlures en surface sans doute dues à des températures opératoires et à une vitesse d'avance de l'outil trop élevées. La Figure 122 présente une macrographie de ce défaut de surface.

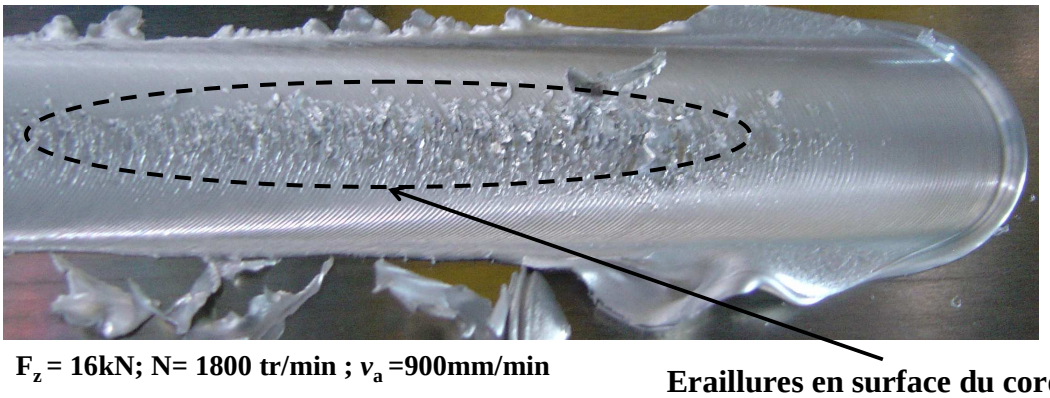


Figure 121: Défaut en surface du cordon dénommé éraillures ou écailles

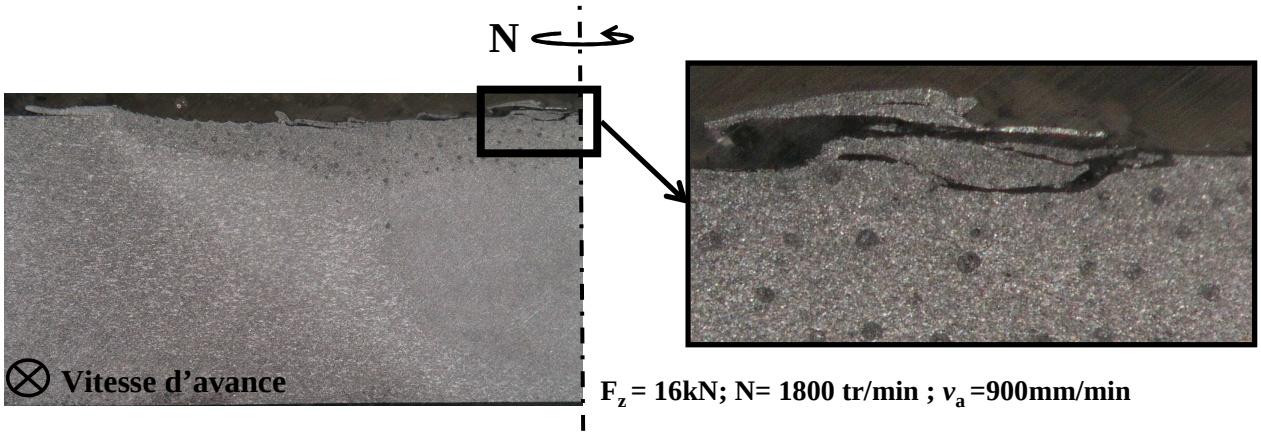


Figure 122 : Zoom sur le défaut de surface dénommé éraillure Fz=21.5kN, N=1800tr/min et v_a=900mm:min.

Défaut identifié via un contrôle au rayon X

- ***Défaut tunnel interne.*** Il correspond à un manque de consolidation de la matière au passage de l'épaulement. La radiographie d'un cordon (Figure 123) présente ce défaut. Il peut apparaître au début ou au milieu de la soudure. Dans notre étude, il a pour origine un défaut de malaxage.

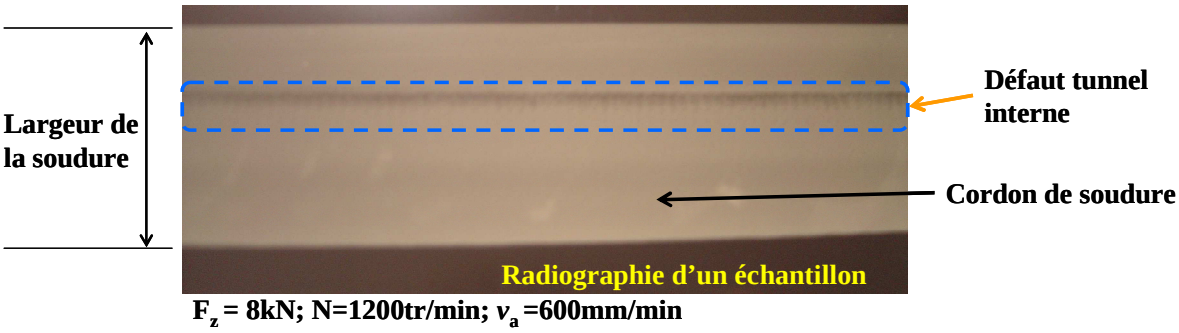
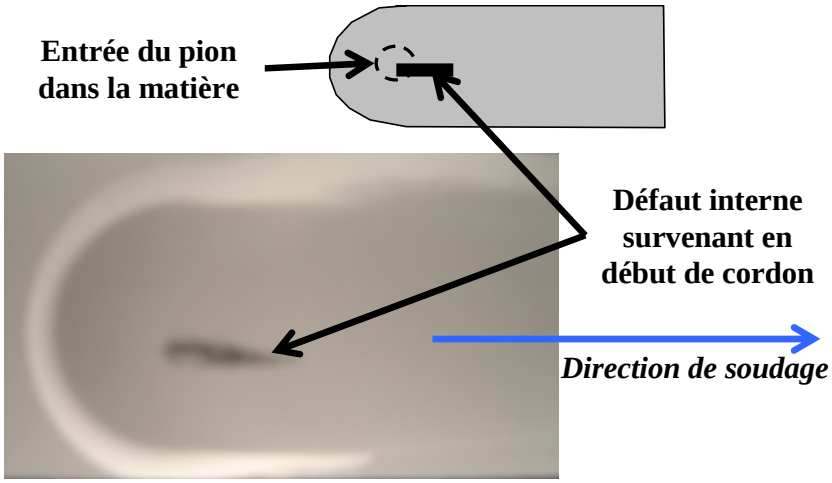


Figure 123: Radiographie présentant un défaut tunnel interne

Un défaut tunnel situé au tout début de la phase de soudage a été observé, comme présenté à la Figure 124. Nous l'avons dénommé ***« défaut tunnel interne à la transition plongée – soudage ».*** Il se referme après quelques millimètres de soudage, c'est pourquoi, dans l'analyse des défauts présentés ci-après, nous n'en

tiendrons pas compte. Cependant, nous reviendrons plus en détail sur son origine dans la suite du manuscrit.



Visualisation du défaut aux rayons X

Figure 124: Visualisation du défaut interne se situant à la transition des phases entre la plongée et le mouvement d'avance de l'outil

Défaut identifié via un contrôle destructif

- Le **défaut de pénétration partielle** est dans notre application généré suite à la remontée de l'outil en cours de soudage. La position de l'extrémité du pion ne permet plus au flux de matière d'assurer la génération du cordon sur toute l'épaisseur (Figure 117). Il ne peut être décelé que lors du soudage bout à bout de deux pièces et est problématique pour la tenue mécanique du cordon. En effet, cette zone non soudée est la localisation de l'amorçage d'une fissure qui fragilise l'assemblage, comme le présente l'essai de pliage de la Figure 125. Il est donc nécessaire de le prendre en considération. Pour déterminer si les cordons présentent un défaut de manque de pénétration, deux méthodes peuvent être employées, le contrôle macrographique ou un essai de pliage.

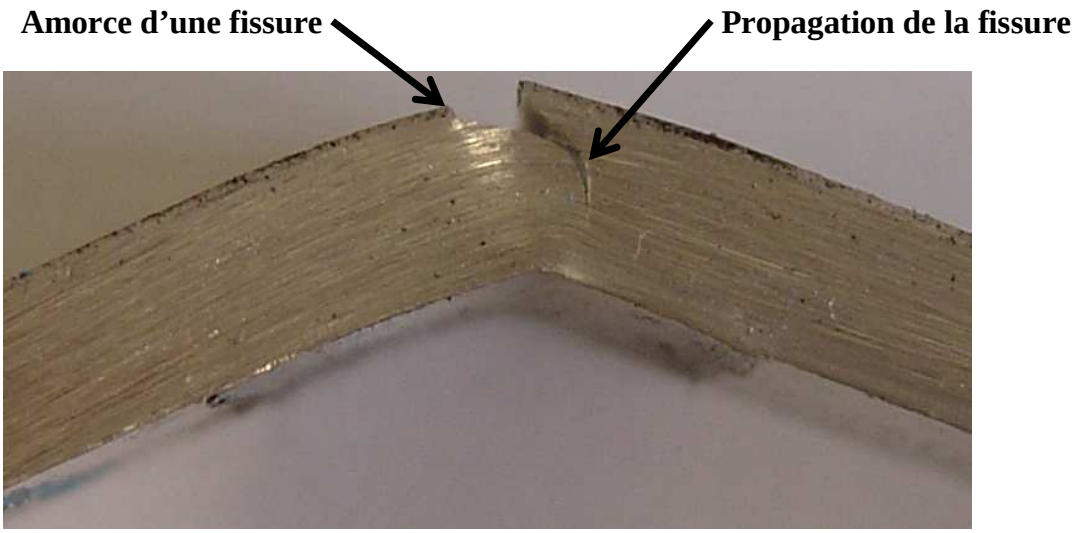


Figure 125: Défaut de pénétration partielle d'une soudure bout à bout

Comme souligné par Arbegast [ARB08] ou Kim et al. [KIM06], la génération des défauts dépendent de l'interaction entre l'outil et les paramètres opératoires. Nous allons maintenant regarder la localisation de la génération de ces défauts pour notre application.

4.2.2. Localisation des défauts

La première phase expérimentale réalisée, définissant les plages de variation admissible de chacun des paramètres de conduite, a permis de mettre en avant la génération des différents types de défaut en fonction des paramètres opératoires et de l'énergie nominale. Les expérimentations présentées par Peel et al. [PEE06] montrent qu'il est possible de lier l'énergie nominale au pic de température mesuré au cours du soudage. Ainsi, on peut dans le cadre d'une première estimation, utiliser l'évolution de l'énergie nominale comme indicateur de la température de soudage.

L'étude porte sur l'apparition des défauts lorsqu'un des paramètres de conduite évolue de manière indépendante. Ceci rend l'interprétation des phénomènes physiques mis en jeu plus facile. Du fait d'essais réalisés en pleine tôle, le défaut de pénétration partielle ne sera pas pris en considération. La Figure 126 présente les résultats obtenus. Les domaines de fonctionnement identifiés sont bornés par des zones, à haute énergie nominale (« trop chaude ») où l'outil s'enfonce dans la matière et à faible énergie nominale (« trop froide ») conduisant à l'apparition de défauts tunnels internes ou à un manque de marquage de l'épaulement. Ceci rejoint les conclusions émises par Arbegast [ARB08]. Toutefois, un défaut tunnel apparaît à haute énergie nominale, lorsque la fréquence de rotation est la plus élevée.

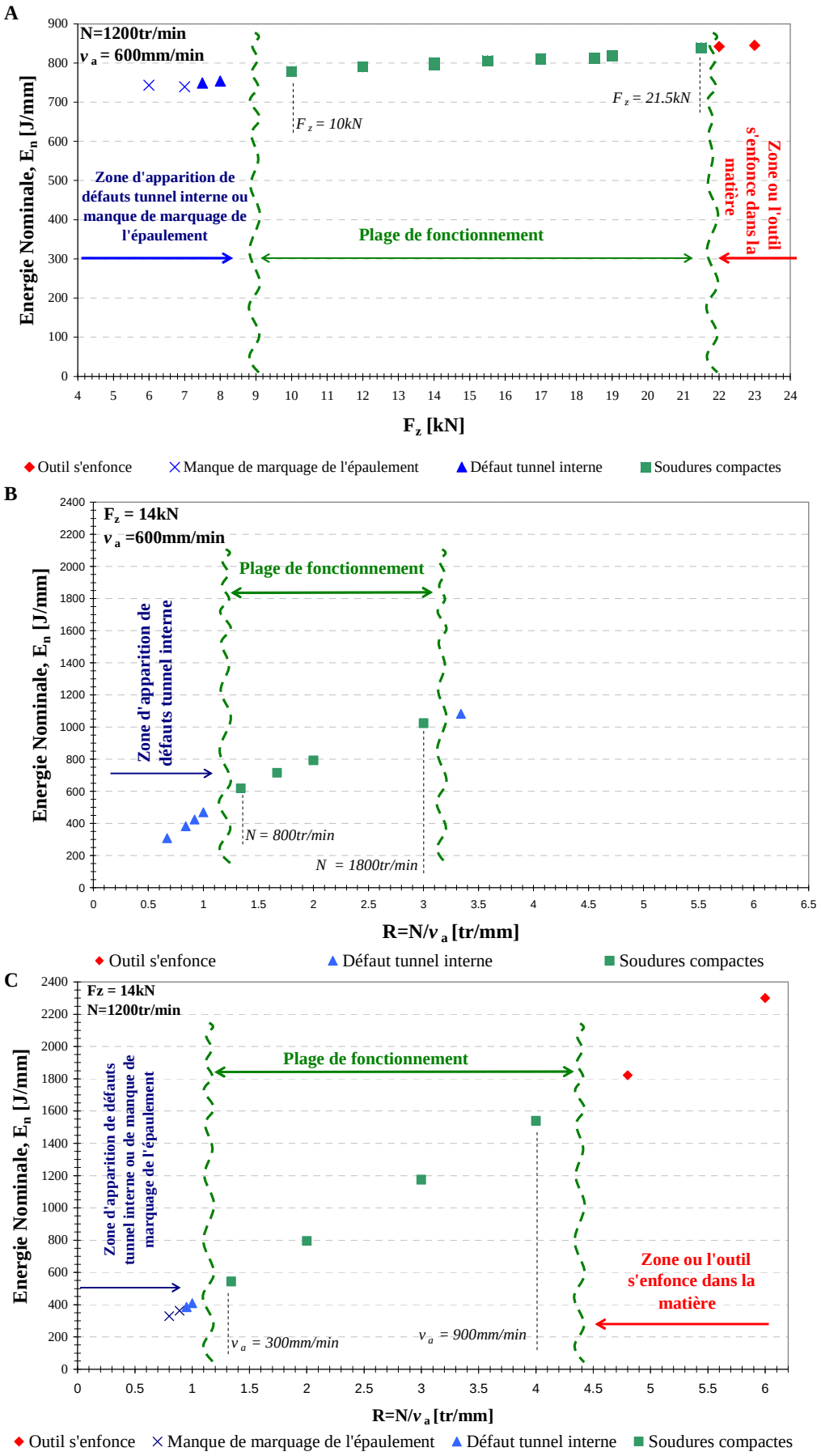


Figure 126: Présentation de l'apparition des défauts en fonction des paramètres opératoire. A- lorsque F_z évolue B - lorsque N évolue, C- lorsque v_a évolue

Appariation des défauts : tunnels internes

Le défaut tunnel interne apparaît dans quatre cas de figure :

- ***Pour N et v_a constants, lorsque l'effort F_z devient insuffisant***. Dans ce cas de figure, l'épaulement n'est plus parfaitement en contact avec la surface des pièces. Une zone de vide est créée à l'avant de l'outil sous l'épaulement, lors de sa remontée, entre l'épaulement et la surface des pièces comme présenté sur la Figure 117. Ce manque de matière malaxée occasionne le défaut tunnel interne.

Remarque : Ce défaut est généralement associé au manque de marquage de l'épaulement suite à la remonté de l'outil.

- ***Pour F_z et v_a constants, lorsque la fréquence de rotation N devient trop faible.***
- ***Pour F_z et N constants, lorsque la vitesse d'avance v_a devient trop élevée***.

  Dans ces deux cas de figure, cela entraine une réduction de l'apport de chaleur et une augmentation de la vitesse de déformation. Avec l'augmentation de la vitesse, on atteint les zones de malaxage « froides » du domaine de soudabilité. Le défaut tunnel apparaît alors.

- ***Pour F_z et v_a constants, lorsque la fréquence de rotation N est élevée***. Ce défaut est généralement associé à des conditions opératoires « froides » [ARB058] contrairement à ce qui est observé ici. L'énergie nominale de la Figure 126-B n'est révélatrice d'une perturbation de l'interaction outil / matière pour ces conditions opératoires. Dans un premier temps, il faudrait répéter cette soudure pour confirmer la présence du défaut tunnel pour ces conditions de soudage. Si celui-ci est confirmé, une investigation micro et macrographique supplémentaire est nécessaire pour comprendre les phénomènes intervenants.

Apparition du défaut : manque de marquage de l'épaulement

Il apparaît, à des conditions opératoires « trop froides », lorsque l'épaulement n'est plus parfaitement en contact avec la surface des pièces :

- Pour N et v_a constants, lorsque l'effort F_z devient insuffisant.
- Pour F_z et v_a constants, lorsque la fréquence de rotation N devient trop faible.
- Pour F_z et N constants, lorsque la vitesse d'avance v_a devient trop élevée.

Appariation du défaut : outil qui s'enfonce dans la matière

Il apparaît essentiellement, à des conditions opératoires « trop chaudes », lorsque le matériau ne peut plus compenser l'effort F_z imposé par la machine sur l'outil :

- v_a diminue pour F_z et N constants. Cela engendre une vitesse de déformation autour de l'outil plus élevée et un apport de chaleur plus important. L'ensemble conduisant à des conditions opératoires trop chaudes.
- F_z augmente pour N et v_a constants. L'effort appliqué par la machine sur l'outil devient alors trop important pour que la réaction de la matière puisse le compenser.

Apparition du défaut : type éraillures ou « écailles » en surface

Il apparaît en surface, à des conditions opératoires « chaudes », lorsque N, v_a et F_z sont élevées. L'effort F_z et la vitesse relative trop élevé de l'outil par rapport à la surface des pièces génèrent les écailles en surface. Ce défaut provient certainement du frottement de l'épaulement sur le cordon à l'arrière de l'outil (localisation de la plus grande vitesse de glissement). Il doit correspondre au défaut de type « tronc de palmier » observé en extrusion dans des conditions sévères (vitesse de mise en forme et pression de contact) de mise en forme [FEL**]. On peut supposer qu'une fine pellicule de matière au contact de l'épaulement atteint un état semi-solide proche de la fusion. La solidification de cette pellicule génère des fissures en surfaces (voir micrographie à la Figure 122).

Dans notre étude, aucun défaut de compacité au sein du joint n'a été associé à ce défaut visuel.

Ces analyses peuvent-elles se transposer sur l'ensemble du domaine de soudabilité opératoire étudié ?

4.2.3. Analyse des défauts au sein de la plage de fonctionnement

Analysons les défauts générés et l'énergie nominale lorsque N et v_a évoluent dans le domaine étudié pour F_z égal à 10, 16 et 21kN. La Figure 127 présente la plage de fonctionnement pour F_z égal à 16kN, v_a variant de 300 à 900mm/min et N évoluant de 800 à 1800tr/min.

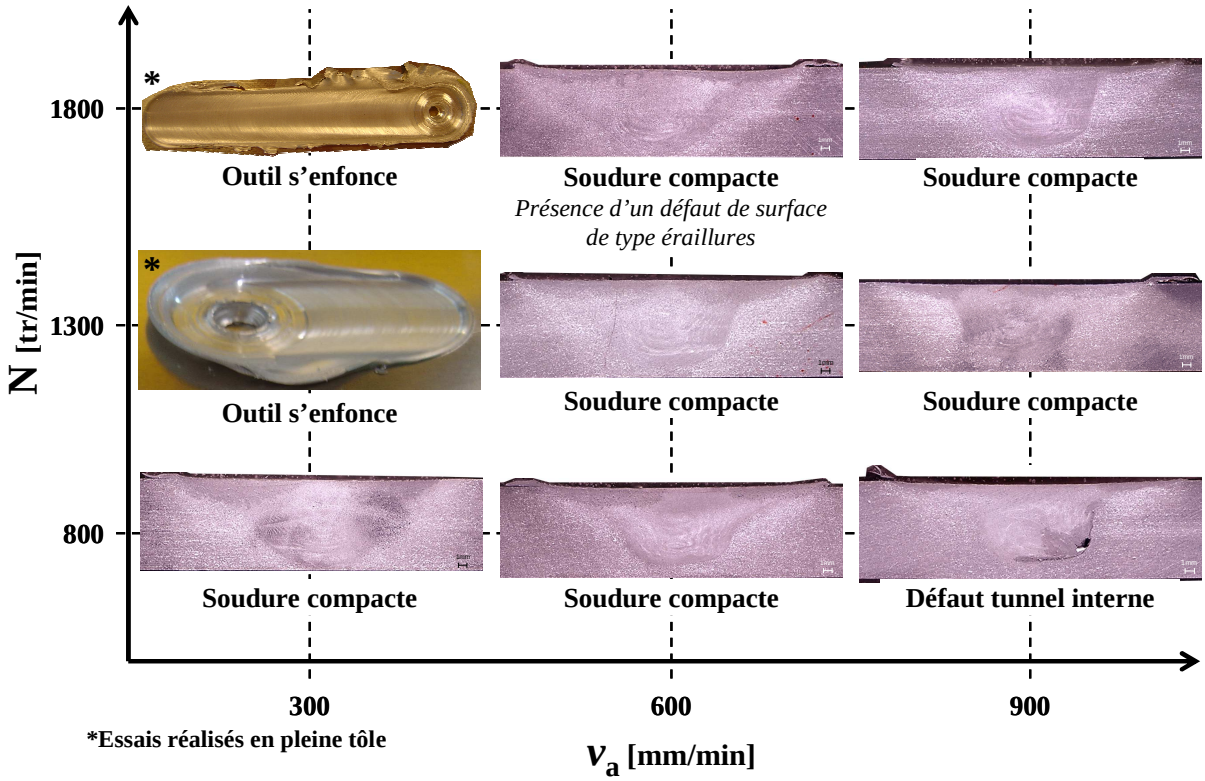


Figure 127: Présentation des macrographies et identification des défauts obtenus selon N et v_a pour Fz = 16kN

Etudions brièvement les défauts apparaissant pour F_z = 10kN, F_z = 16kN et F_z = 21.5kN.

➢ Etude du domaine pour F_z = 10kN

C'est la plage de fonctionnement étudiée avec un effort axial le plus faible. Les relations entre les paramètres opératoires et défauts présentées ci-dessus se retrouvent dans l'analyse des macrographies. En effet, pour F_z et N constants, l'augmentation de la vitesse d'avance se traduit par une baisse de l'énergie nominal, aboutissant à la génération de défaut tunnel.

D'une manière générale, la présence des défauts tunnels et du manque de marquage de l'épaulement notifié pour presque tous les essais. Seuls deux d'entre eux ne semblent pas présenter ces deux défauts, pour v_a = 300mm/min ; N =1300tr/min et v_a = 300mm/min ; N=1800tr/min. Seuls ces combinaisons de paramètres opératoires assurent un apport d'énergie suffisant.

➢ Etude du domaine pour F_z = 16kN

La cartographie des défauts pour F_z = 16kN est présentée à la Figure 127. L'augmentation de l'effort F_z permet de réduire la formation du défaut tunnel. Cela rejoint les constatations expérimentales émises par Kumar et al. [KUM07]. Dans ce plan de fonctionnement, seul un défaut tunnel interne apparaît lorsque la vitesse d'avance est la plus

élevée combinée à la fréquence de rotation est la plus faible. Ce défaut apparaît a pour l'énergie nominale la plus faible. Le manque de marquage de l'épaulement n'est expérimentalement plus visualisé. Toutefois cela ne signifie pas la non présence d'un défaut de manque de pénétration en racine. Par contre, à vitesse d'avance faible et à des fréquences de rotations élevées, l'outil s'enfonce au sein de la matière. L'énergie nominale est alors la plus élevée. Un léger défaut de surface de type éraillures en surface apparaît également dans cette plage de fonctionnement.

- **Etude du domaine pour F_z = 21.5kN**

Lorsque F_z est égal à 21.5kN le défaut tunnel n'apparaît plus, montrant que la pression appliquée sur l'outil est suffisante pour assurer la compacité du joint. Les défauts apparaissant sont principalement un outil s'enfonçant de manière excessive au sein de la matière. Un défaut de surface de type éraillures apparaît également. Ces défauts sont caractéristiques de conditions opératoires « chaudes ».

Ceci témoigne de l'importance de l'effort F_z dans la compacité du joint, pour les mêmes combinaisons de paramètres opératoires.

Une plage de fonctionnement, d'une application donnée, vient d'être déterminée sur des essais en pleine tôle. Ces résultats sont-il transposable à la configuration bout à bout ?

L'apparition et la localisation des défauts sont bien conformes à celles décrites dans la littérature. D'une manière générale, les phénomènes présentés se retrouveront pour d'autres alliages d'aluminium mais leurs frontières dépendent du comportement du matériau face au cycle thermomécanique subi.

4.2.4. Comparaison entre les essais pleines tôles et bout à bout

Aspect esthétique des cordons de soudure

Pour les essais réalisés en pleine tôle et bout à bout, à paramètres opératoires identiques, l'aspect esthétique des cordons obtenus est très similaire.

La génération de défaut au sein du domaine de soudabilité opératoire étudié présente une excellente correspondance. C'est-à-dire, les défauts tunnels, les défauts de surface de type éraillures et le manque de marquage de l'épaulement sont générés pour les mêmes paramètres opératoires. Ainsi, pour le 6082-T651 épaisseur 6mm, l'étude de la génération de défauts ou la détermination d'un domaine de soudabilité opératoire basé sur le critère de compacité peuvent s'effectuer par des essais en pleine tôle.

Par contre, comme le défaut de pénétration partielle ne peut être identifié par des essais pleine tôle, il est nécessaire de les valider par des essais bout à bout.

4.2.5. Identification du défaut de pénétration partielle

Pour les essais validés par la compacité de joint, des essais de soudage bout à bout ont été réalisés. Ils permettent de mettre au jour le défaut pénétration partielle. Pour l'identifier, nous procédons au contrôle macrographique de la racine du cordon, présenté à la Figure 128. Au final, seulement 3 soudures sur 20 remplissent le critère d'une pénétration totale. Le Tableau 14 présente une synthèse des essais réalisés et les défauts rencontrés. Les résultats de l'analyse sont les suivants :

- Toutes les soudures réalisées avec un effort égal à 10kN présente un manque de pénétration en racine. L'effort appliqué par l'outil est trop faible pour pouvoir assurer la liaison sur toute l'épaisseur.
- Deux soudures pour F_z= 16kN ; v_a = 600mm/min ; N= 1300tr/min et F_z= 16kN ; v_a = 600mm/min ; N=1800tr/min ne présentent pas ce défaut.
- Une soudure ne présente pas ce défaut pour F_z= 21.5kN, lorsque N= 1300tr/min et v_a = 600mm/min.
- Pour les autres essais à F_z= 16kN et F_z= 21.5kN un défaut de manque de pénétration apparaît suite à l'apport d'énergie trop faible pour assurer la bonne position de l'outil par rapport à la surface des pièces ;

Parmi les 27 points testés, le Tableau 14 présente les essais conformes en essais pleine tôles. Seuls trois de ces essais ne présentent pas le défaut de manque de pénétration lors des essais bout à bout.

Le défaut de pénétration partielle apparaît lorsque la matière sous le pion n'est pas malaxée (voir Figure 128). Ce malaxage dépend de l'épaisseur de matière sous le pion et de sa consistance. L'épaisseur dépend de la position de l'outil qui résulte de l'équilibre entre l'effort F_z et la réaction de la matière. Cette dernière dépend en grande partie de la consistance du matériau et donc de sa température. L'apparition de ce défaut provient d'une action combinée de l'effort F_z et de l'énergie nominale. Il apparaît notamment pour des efforts et des énergies nominales faibles.

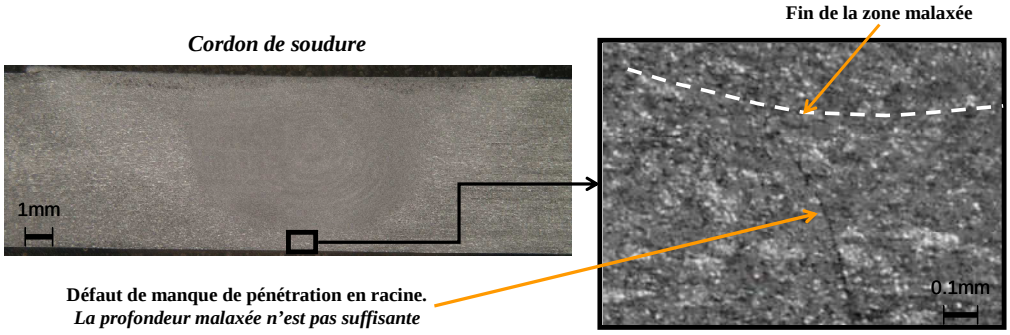


Figure 128: Présentation du cordon de soudure réalisé avec les paramètres F_z =10kN, N=1800tr/min et v_a =600mm/min. Zoom sur la « racine » du cordon de soudure pour la visualisation du défaut de pénétration partielle (échantillon attaqué au Tucker)

Etant donné que 85% des soudures compactes présentes un défaut de pénétration partielle. Il doit donc faire l'objet d'une attention particulière étant donné qu'il réduit drastiquement le domaine de soudabilité opératoire.

Fz [kN]	Va [mm/min]	N [tr/min]	Contrôle Visuel	Contrôle Macrographique	Présence du défaut de pénétration partielle
10	300	800	Manque de Marque de l'épaulement	Soudure Compacte	OUI
10	300	1300	OK	Soudure Compacte	OUI
10	300	1800	OK	Soudure Compacte	OUI
10	600	800	Manque de Marque de l'épaulement	Défaut tunnel	OUI
10	600	1300	Manque de Marque de l'épaulement	Soudure Compacte	OUI
10	600	1800	Manque de Marque de l'épaulement	Soudure Compacte	OUI
10	900	800	Défaut tunnel	-	-
10	900	1300	Défaut tunnel	-	-
10	900	1800	Manque de Marque de l'épaulement	Soudure Compacte	OUI
16	300	800	OK	Soudure Compacte	OUI
16	300	1300	Pénétration excessive	-	-
16	300	1800	Pénétration excessive	-	-
16	**600**	**800**	**OK**	**Soudure Compacte**	**NON**
16	**600**	**1300**	**OK**	**Soudure Compacte**	**NON**
16	600	1800	Eraillures en surface	Soudure Compacte	OUI
16	900	800	Manque de Marque de l'épaulement	Défaut tunnel	OUI
16	900	1300	OK	Soudure Compacte	OUI
16	900	1800	OK	Soudure Compacte	OUI
21.5	300	800	Pénétration excessive	-	-
21.5	300	1300	Pénétration excessive	-	-
21.5	300	1800	Pénétration excessive	-	-
21.5	600	800	OK	Soudure Compacte	OUI
21.5	**600**	**1300**	**OK**	**Soudure Compacte**	**NON**
21.5	600	1800	Pénétration excessive	-	-
21.5	900	800	OK	Soudure Compacte	OUI
21.5	900	1300	OK	Soudure Compacte	OUI
21.5	900	1800	Eraillures en surface	Soudure Compacte	OUI

Tableau 14: Synthèse des essais réalisés avec l'analyse des défauts rencontrés. Les cases grisées correspondent aux soudures compactes sans défaut de pénétration partielle et les cases noircies identifient la présence de défaut tunnel

Une analyse des défauts générés en FSW a été menée. L'objectif étant de déterminer le domaine de soudabilité opératoire avec un certain nombre de critères dont la compacité et la pénétration totale. Conformément à ce qui est décrit dans la littérature, on retrouve deux types de défaut en fonction des conditions opératoires. Lorsque l'énergie nominale et l'effort axial sont faibles, les défauts retrouvés sont le tunnel et le manque de pénétration. Lorsque l'énergie nominale et l'effort axial est important, il y a un risque d'excès de pénétration et d'écaillage en surface. Ces deux familles de défauts encadrent le Domaine de Soudabilité

Opératoire (DSO). De façon générale, plus l'effort axial est important plus le DSO se décale vers les fortes vitesses de soudage et les faibles vitesses de rotation.

La suite est consacrée à l'étude de l'influence des paramètres de conduite sur les efforts engendrés entre l'outil et la matière.

4.3. Etude de l'influence des paramètres opératoires sur les actions mécaniques appliquées sur l'outil

L'étude sur les efforts F_x, F_y et le couple C_z générés est réalisée sur l'ensemble des points de fonctionnement, y compris les points conduisant à l'appariation de défauts. Les mesures présentées ci-après correspondent aux essais réalisés en pleine tôle car plus nombreux. Nous montrerons à la fin de ce chapitre que les tendances et les ordres de grandeurs des intensités mesurées sont du même ordre en pleine tôle et qu'en soudage bout à bout.

Comme énoncé au chapitre 2, l'ensemble des résultats représentent la mesure des composantes du torseur des actions mécaniques de la matière appliqué sur l'outil. Cela correspond à la réponse de la matière suite à l'application sur l'outil des paramètres de conduite. Les résultats expérimentaux seront présentés ainsi :

- L'étude de l'évolution de F_x, F_y, C_z en fonction de l'effort F_z pour N et v_a constants,
- L'étude de l'évolution de F_x, F_y, C_z en fonction N et de v_a variant de manière indépendante pour un effort F_z constant,
- L'étude de l'évolution de F_x, F_y, C_z en fonction de N, v_a et F_z.

Tous les résultats présentent les valeurs moyennes des efforts et couples mesurés pendant la phase de soudage à vitesses constantes.

4.3.1. Analyse de l'évolution de F_x, F_y et C_z en fonction de F_z pour N et v_a constants

Analyse du couple C_z lorsque F_z évolue

La détermination des valeurs « frontières » du DSO a permis d'étudier l'évolution des paramètres de sorties pour F_z variant de 7 à 23kN à N et v_a constants. La Figure 129 présente l'évolution du couple à la broche et de l'énergie nominale en fonction de l'effort axial. Une augmentation de F_z de 10 à 21.5kN, soit 115% d'augmentation, n'entraine qu'une élévation du couple de 8%. Ainsi, une augmentation de l'effort axial appliqué sur l'outil n'entraine pas de variation significative de la résistance à la rotation.

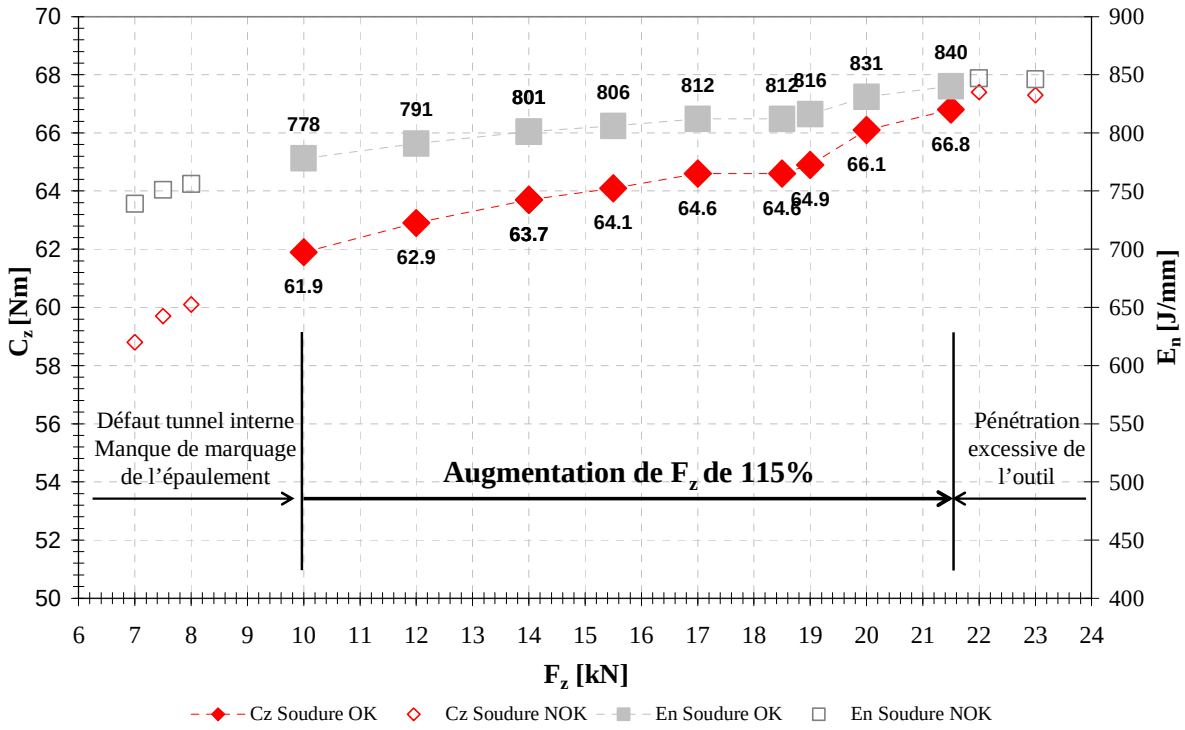


Figure 129: Evolution C_z et de E_n en fonction de l'effort axial appliqué pour N=1200tr/min et v_a =600mm/min

Cette faible évolution du couple peut s'expliquer par une contrainte tangentielle de contact limitée par la contrainte d'écoulement (viscoplastique) du matériau. Par conséquent, même si l'effort normal augmente, une fois la contrainte tangentielle du matériau atteinte, le couple nécessaire au cisaillement de la matière ne connaît plus d'augmentation significative. Ce type de comportement du matériau a déjà été identifié en mise en forme à chaud et a été modélisé par la loi de frottement dénommé Coulomb limité Tresca.

Etant donné que v_a et N sont identiques pour chaque essai, l'énergie nominale et la puissance consommée à la broche évoluent de la même manière que C_z, c.à.d de 8% lorsque F_z varie de 115%. Comme l'énergie nominale reflète l'énergie dissipée au niveau de l'outil lors du soudage [PEE06], l'évolution de F_z n'entraine donc pas de changement caractéristique de la température de soudage. Peut-on espérer des propriétés mécaniques similaires ? Les macrographies des essais réalisés à F_z= 10, 12, 14 et 21kN sont présentées sur la Figure 130. Selon l'intensité de l'effort F_z, la position de l'outil par rapport à la surface des pièces évolue, laissant présager une différence de la compacité du joint et un défaut de pénétration partielle pour les faibles valeurs de F_z. Ainsi, la qualité de la soudure n'est pas la même, malgré un couple et une énergie nominale dissipée similaires.

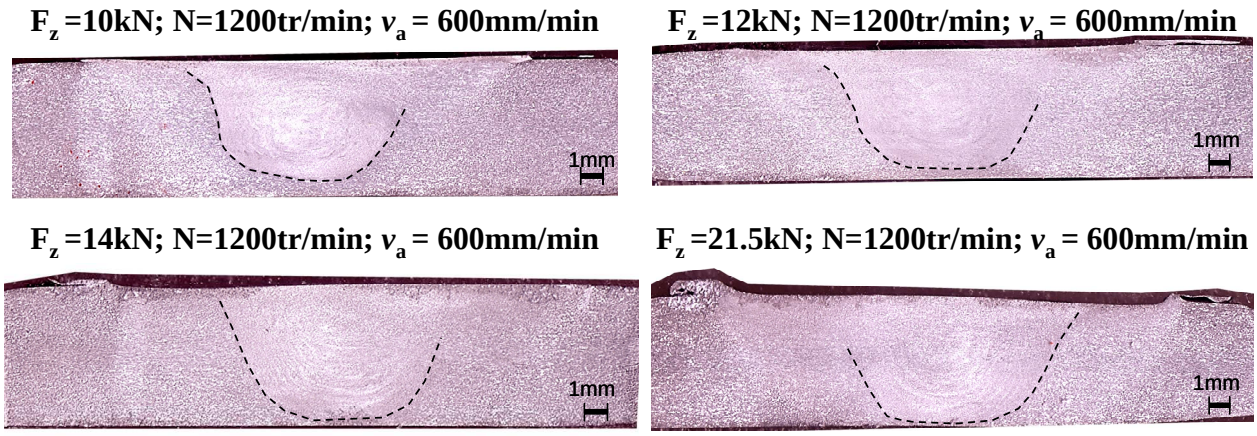


Figure 130: Macrographies de cordon de soudure réalisées pour N et va identiques et Fz évoluant de 10 à 21.5kN

Sur la Figure 129, la diminution de F_z mène à la formation d'un défaut tunnel au sein du cordon entrainant une chute du couple. Ce défaut tunnel est associé au manque de marquage de l'épaulement. Le contact avec la matière se fait sur une partie seulement de l'épaulement. Ceci explique en partie la chute du couple constatée.

Analyse de F_x et F_y lorsque F_z évolue

La Figure 131 présente l'évolution des efforts F_x et F_y en fonction de F_z. Lors de la formation d'un cordon avec défauts, les efforts F_x et F_y générés sont plus élevées. En effet, dans la plage de fonctionnement sans défaut F_x est de l'ordre de 5 à 10% de F_z, tandis que dans les zones avec défauts il atteint 7 à 20% de F_z. De même pour F_y, il varie de 2,5 à 8% pour les soudures compactes et de 8 à 25% pour les soudures avec défaut. Ces constations rejoignent celle de Balasubramanian et al. [BAL09] et de Jene et al. [JEN08] qui associent les intensités de F_x et F_y au flux de matière. Ils constatent qu'un défaut tunnel interne engendre une augmentation des efforts F_x et F_y par rapport à une soudure sans défaut. D'autre part, lorsque l'outil pénètre au sein de la pièce la quantité de matière déplacée augmente générant également un surcroît d'effort F_x et F_y.

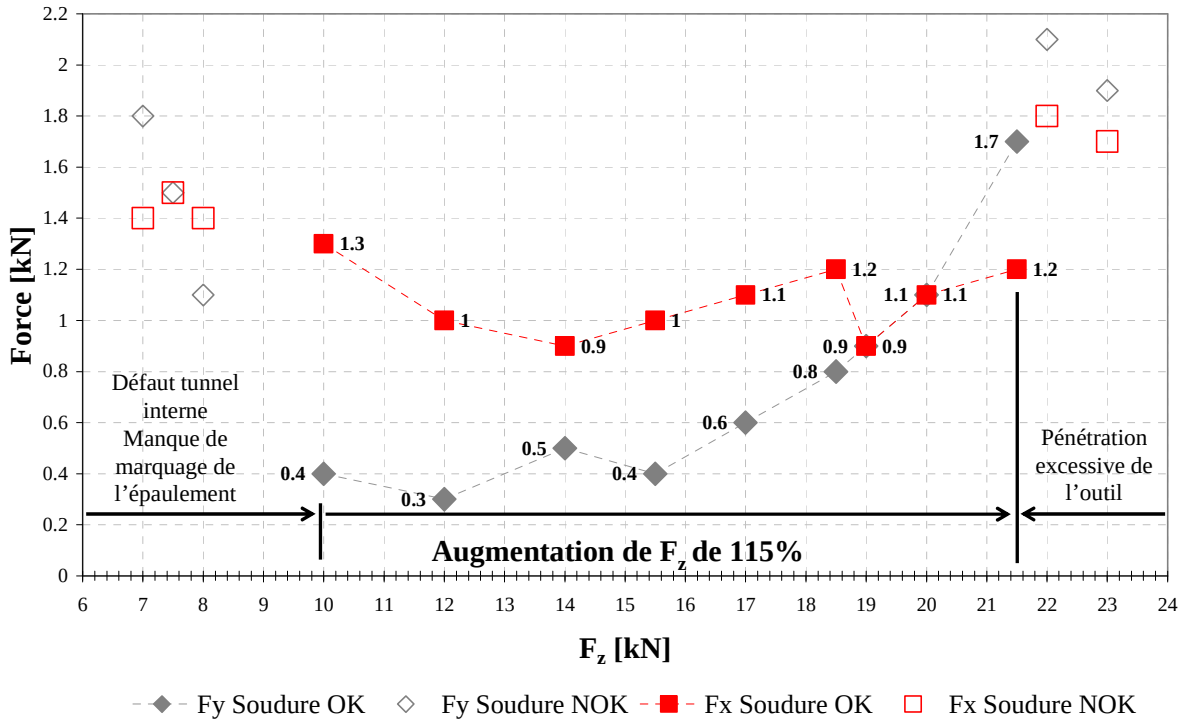


Figure 131: Evolution des efforts F_x et F_y en fonction de F_z pour N=1200tr/min et v_a =600mm/min

Dans le chapitre 2, l'étude réalisée avait permis de conclure que les efforts F_x et F_y pouvaient atteindre 10 à 20% de l'intensité de F_z et étaient donc non négligeables. Ces résultats confirment cette tendance et montre que leurs intensités dépendent des paramètres opératoires.

4.3.2. L'étude de l'évolution de F_x, F_y et C_z en fonction N et de v_a variant de manière indépendante pour un effort F_z constant

Analyse du couple C_z lorsque N et v_a évoluent

La Figure 132 présente l'évolution de C_z en fonction de N (points en forme de carré) lorsque v_a et F_z restent constants et en fonction de v_a (points en forme de triangle) pour N et F_z constants.

Lorsque la fréquence de rotation augmente, le couple diminue. Ce phénomène est dû à une augmentation de la vitesse de déformation de la matière et de la température. L'ensemble génère une diminution de la viscosité du matériau conduisant à une chute du couple.

L'augmentation de la vitesse d'avance entraine un faible accroissement du couple. L'accroissement de la vitesse d'avance diminue l'apport d'énergie, donc la température, et augmente la vitesse de déformation de la matière. Globalement, la viscosité augmente générant une faible élévation du couple.

Les mesures permettent de constater qu'une augmentation de la fréquence de rotation de 125%, de 800 à 1800tr/min, à vitesse d'avance constante entraine une diminution de

l'intensité du couple de 26.5%. Par contre, celui-ci semble être moins sensible aux variations de v_a. Une diminution de 66%, de 900 à 300mm/min, n'entraine qu'une diminution du couple de 5.5%. Ainsi, le paramètre N a une influence plus importante sur le couple C_z que v_a. Cette constatation a également été réalisée dans d'autres études [JOH01, PEE06, ARO09].

Pour la valeur du couple, le paramètre R ne semble pas être caractéristique. Pour un R donné, le couple est pas le même selon les valeurs de N et v_a.

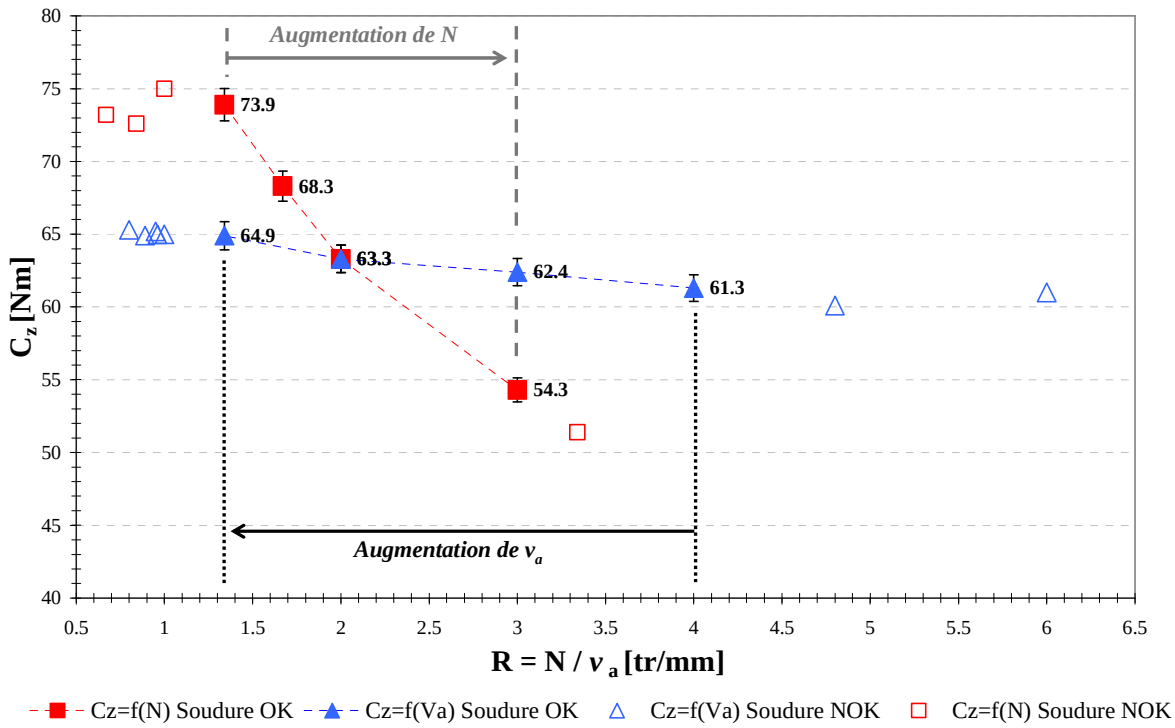


Figure 132: Evolution de C_z en fonction de N et de v_a pour F_z =14kN. La barre d'erreur correspond à la dispersion de mesure du couple.

Ces mêmes tendances ont été visualisées par Peel et al. [PEE06] qui ont étudié l'influence de N et de v_a lors du soudage d'un assemblage bout à bout dissemblable du 6082-T6 et 5083-T3 en épaisseur 3mm avec un contrôle en position. Les nôtres confirment ces résultats et précisent que le couple à la broche C_z est fonction des trois paramètres de conduite, mais est plus sensible aux variations de N que de F_z et de v_a. Ainsi, l'énergie nominale peut être approchée comme présentée sur l'équation (43).

$$E_n = \frac{Puissance}{v_a} = \frac{C_z \cdot \omega}{v_a} = \frac{f(\omega) \times \omega}{v_a} [J / mm] \qquad (43)$$

Ainsi, l'énergie dissipée par le matériau est principalement une fonction de N et de v_a.

Analyse de F_x et F_y lorsque N et v_a évoluent

La Figure 133-A présente l'évolution de l'effort moyen F_x lorsque N évolue (points en forme de carré) pour v_a=600mm/min et F_z =14kN. La Figure 133-B présente l'évolution de l'effort moyen F_y lorsque v_a évolue (points en forme de triangle) pour N=1200tr/min et F_z =14kN.

Pour une augmentation de N ou une diminution de v_a, l'apport d'énergie augmente et l'intensivité de l'effort F_x se réduit (Figure 133-A). On peut constater que pour R faible, une augmentation brutale de F_x est associée à l'apparition des défauts tunnel. Ceci ne se retrouve pas pour les fortes valeurs de R. D'après Sheiki [SHE05] l'augmentation de la température de soudage augmente le volume de matière plastifiée situé à l'avant du pion et diminue la consistance du matériau.

L'évolution de la courbe de F_y suit la même tendance que celle de F_x (Figure 133-B) quand v_a augmente. En effet, on constate une valeur relativement stable pour les fortes valeurs de R suivie par un accroissement lors de l'apparition des défauts tunnels. Par contre, l'influence de N est moins marquée que v_a.

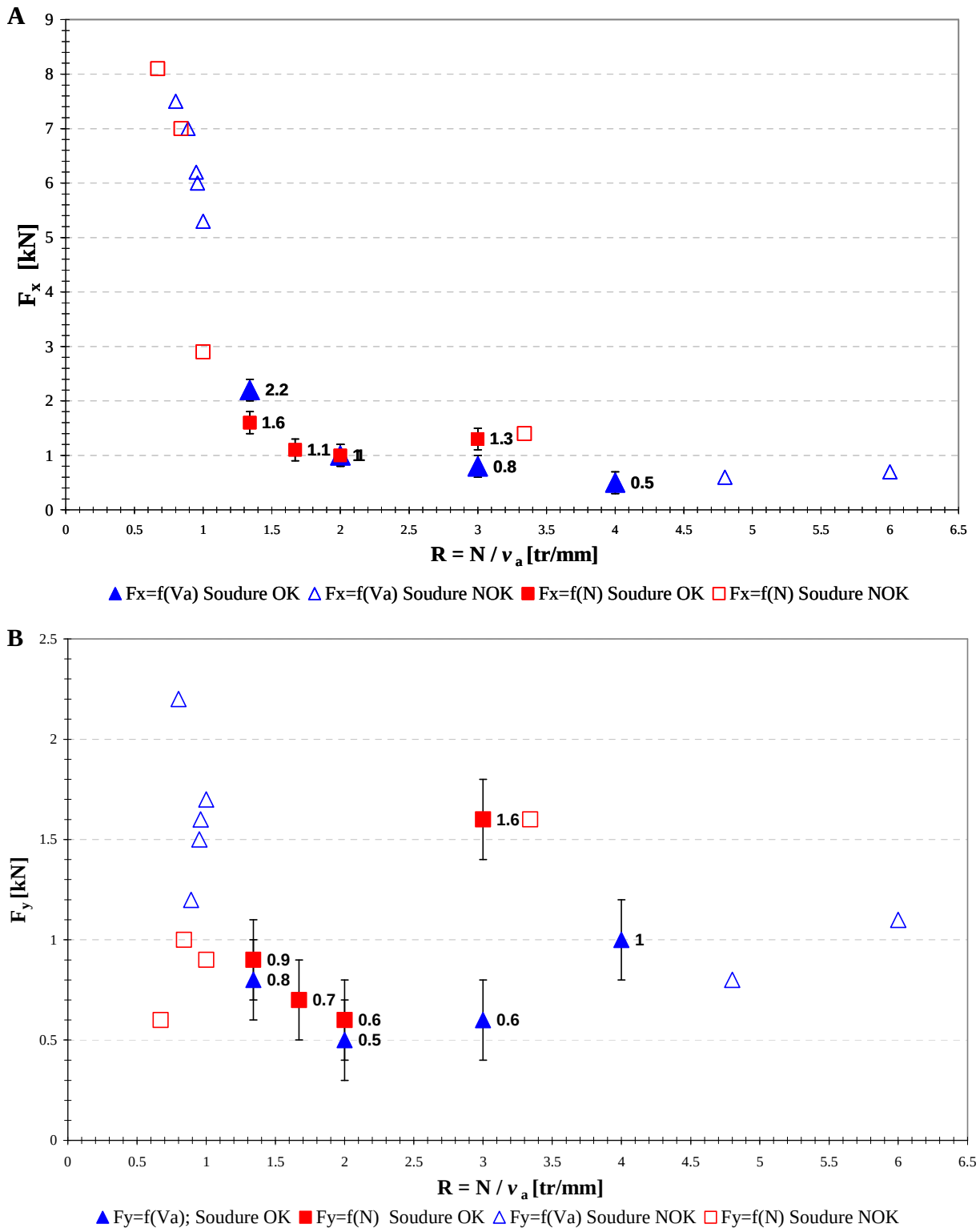


Figure 133: Présentation de l'évolution des efforts F_x et F_y en fonction de N et de v_a.

A- Evolution de l'effort moyen F_x en fonction de N et de v_a pour F_z =10kN en fonction de R et de E_n. B - Evolution de F_y en fonction de N et de v_a pour F_z =10kN en fonction de R et de E_n.

Analyse de F_R lorsque N et v_a évoluent

L'effort F_R résultant a été défini au chapitre 1. Son expression est donnée par l'équation (44).

$$F_r = \sqrt{\left(F_x^2 + F_y^2\right)} \text{ [BAL09]} \qquad (44)$$

La Figure 134 présente l'évolution de l'effort résultant F_R lorsque v_a augmente. Une augmentation de la vitesse d'avance accroît l'effort résultant F_R qui tend progressivement vers la direction de (O, -X). Cet effort témoigne de l'influence des paramètres opératoires sur le flux de matière. Par contre, selon Balasubramanian et al. [BAL09]. On retrouve ce qui a été constaté précédemment, lorsque des défauts tunnels apparaissent, F_x et F_y augmentent conduisant à l'accroissement de F_R. Cet accroissement est sans doute dû à une perturbation dans la répartition de la matière autour du pion.

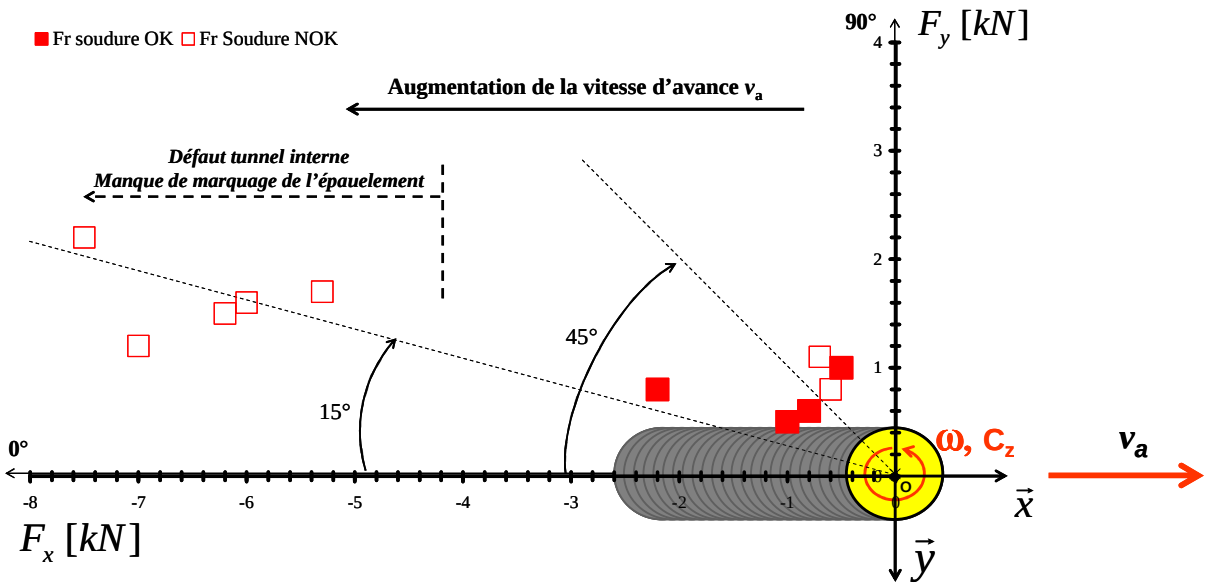


Figure 134: Présentation de l'évolution de l'effort résultant F_R lorsque v_a évolue de 200 à 1500mm/min pour N et F_z constants

Lorsque la fréquence de rotation augmente, à vitesse d'avance constante, l'effort résultant tant à s'orienter dans la direction de (O, -Y).

Une étude sur les évolutions des paramètres de sortie, C_z, F_x et F_y vient d'être réalisée lorsqu'un des paramètres opératoires connaissait une variation. Regardons maintenant si ces tendances visualisées peuvent se généraliser sur la partie domaine de soudabilité opératoire étudié.

4.3.3. Etude de l'évolution de F_x, F_y, C_z et E_n en fonction de N, v_a et F_z

La Figure 135 présente l'évolution de C_z en fonction de F_z, N et v_a. Tout comme cela avait été présenté précédemment, ces courbes montrent bien l'influence prépondérante du

paramètre N sur l'intensité du couple. Ainsi, quelles que soient les combinaisons de paramètres opératoires, une augmentation de la fréquence de rotation engendre une diminution de la viscosité du matériau générant une chute du couple.

Il peut être noté, que la présence d'un défaut tunnel au sein du cordon peut générer une chute du couple, sans doute à cause du manque de matière à malaxer.

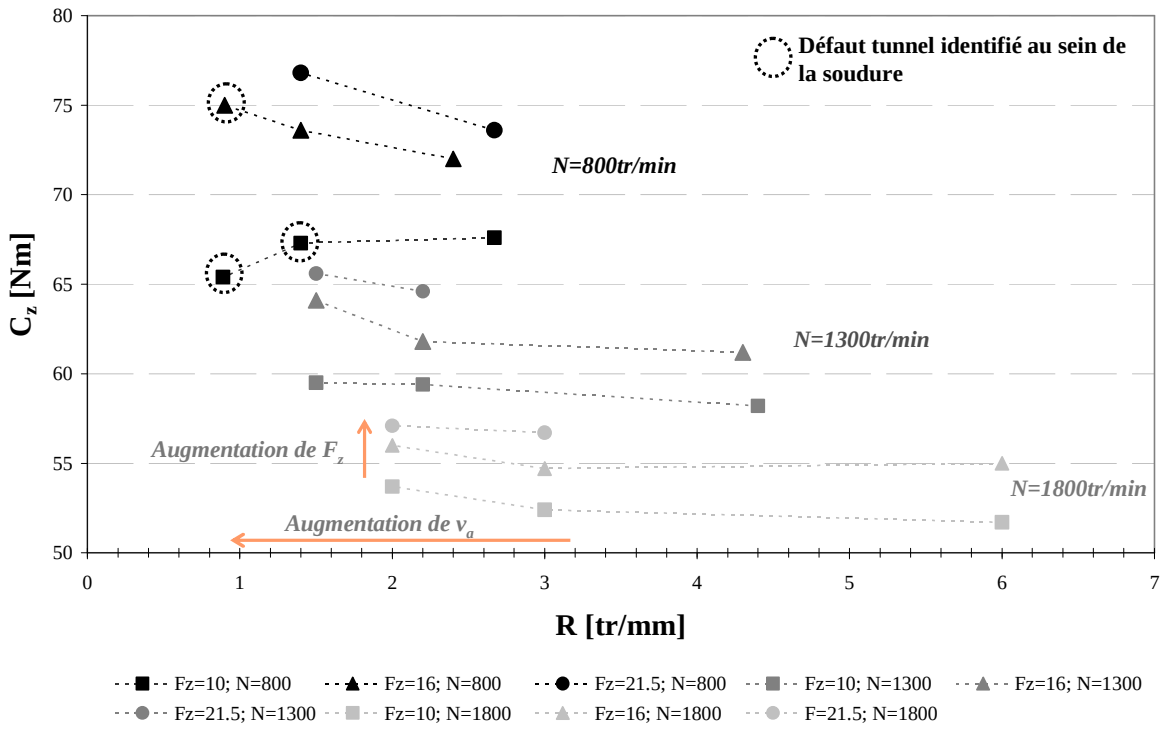


Figure 135: Evolution du couple à la broche en fonction des paramètres opératoires

A cause d'un nombre plus faible de points, les tendances visualisées précédemment pour les efforts F_x et F_y ne sont pas aussi nettes.

La Figure 136 présente l'évolution de l'effort F_x en fonction de R, pour N allant de 800 à 1800tr/min, v_a de 300 à 900mm/min et F_z constant. Cette variation de F_x correspond à celle visualisée sur la Figure 133-A. Cependant, lorsque F_x évolue en fonction de F_z aucune tendance ne se dessine contrairement à ce qui a été présenté ci-dessus.

De même, les tendances visualisées sur les évolutions de F_y lorsque N, v_a et F_z varie ne se retrouvent plus. Le nombre insuffisant de points de mesure ou des phénomènes physiques entrant en jeu peuvent être à l'origine de cette différence. Ainsi, il n'est pas possible de statuer sur la généralisation des évolutions présentées précédemment.

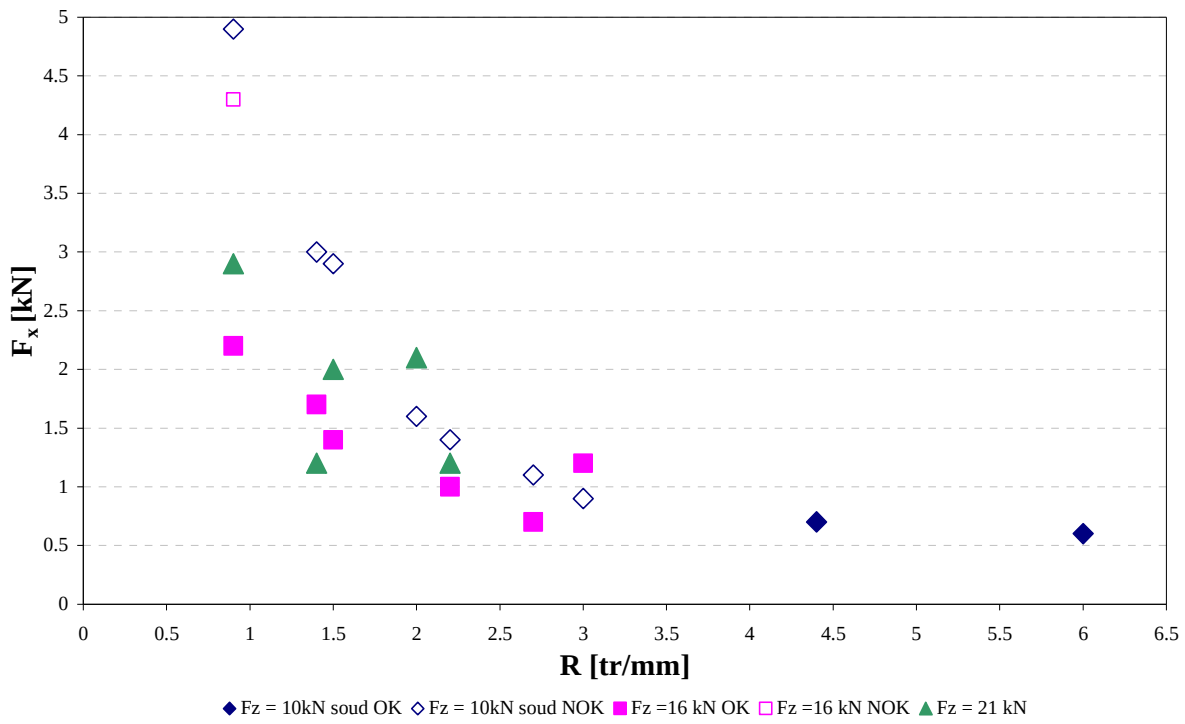


Figure 136: Evolution des efforts F_x en fonction de N et de v_a pour F_z constants. Essais réalisés en soudure bout à bout

4.3.4. Etude dynamique des efforts

L'étude des efforts a laissé apparaître un comportement dynamique des efforts F_x, F_y et C_z. La Figure 137 présente un zoom des efforts F_x et F_y générés au cours de l'opération de soudage. Ils connaissent des oscillations au cours du temps. Ces dernières correspondent à la fréquence de rotation pour les efforts F_x. Cette fréquence se retrouve dans l'analyse fréquentielle FFT de F_x, F_y, F_z et C_z. Ces variations d'amplitudes suivant F_x et F_y ont été identifiées dans la littérature [BAL09, MUT08, JEN08]. Selon Muthukumaran et al. [MUT08] elles sont dues à des changement de conditions thermomécaniques. Ceci entraîne une variation de contact entre l'outil et le matériau faisant évoluer la contrainte de cisaillement, ce qui expliquerait les phénomènes oscillatoires visualisés sur F_x, F_y, F_z et C_z.

Quant-à F_y, l'analyse de Fourier identifie deux fréquences distinctes, la fréquence de rotation de l'outil et une fréquence à 2,6Hz. Cette dernière correspond à la fréquence des oscillatons identifiées sur la Figure 137. Cette basse fréquence pourrait provenir de l'asservissement de la machine hydraulique.

Ainsi pour qualifier un moyen de production FSW, il parrait important de prendre en considération cet aspect dynamique des efforts car ils sont transmis à la machine et à l'ensemble du système de mise en position des pièces. Etant donné que d'autres auteurs, utilisant des outils et machines différentes, ont visualisé ce même phénomène, il apparait qu'il est inhérant à la formation du joint. C'est pourquoi, il est nécessaire de le prendre en considération pour le dimensionnement.

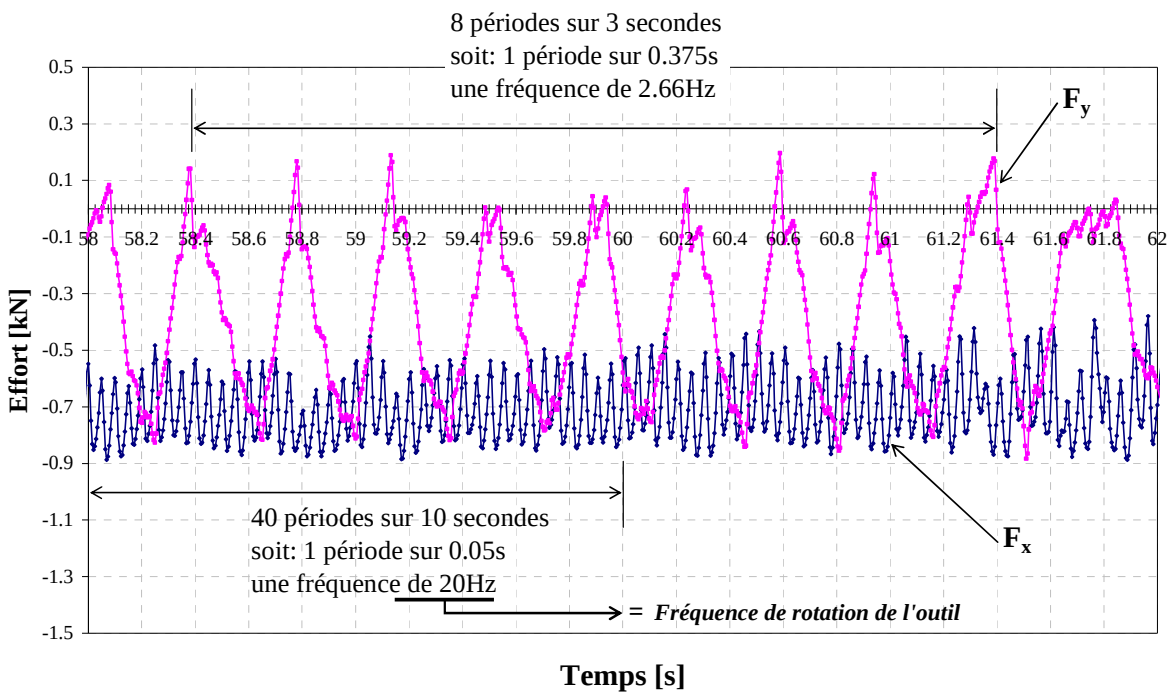


Figure 137: Zoom sur les oscillations présentent sur les mesures des efforts F_x et F_y lors d'un essai de soudage

4.3.5. Analyse de la répétabilité des intensités du couple et des efforts mesurés

Chaque combinaison de paramètres opératoires étant réalisée trois fois, il est ainsi possible d'estimer si les intensités de F_x, F_y et C_z sur l'outil sont reproductibles. Cette notion est importante, car si une variabilité conséquente des intensités est observée, il sera impératif d'utiliser un coefficient de sécurité sur les valeurs mesurées pour un dimensionnement de machine FSW.

	C_z [Nm]				F_y [kN]				F_x [kN]			
Param N°	**Moyenne**	**Mini**	**Maxi**	**Ecar-type**	**Moyenne**	**Mini**	**Maxi**	**Ecar-type**	**Moyenne**	**Mini**	**Maxi**	**Ecar-type**
1	68	66.1	70.7	2.41	0.37	0.3	0.4	0.06	1.04	0.5	1.4	0.48
2	57.4	56.8	57.7	0.48	0.34	0.3	0.4	0.06	0.65	0.6	0.7	0.08
3	50.9	50.6	51.2	0.33	0.77	0.7	0.8	0.06	0.55	0.5	0.6	0.08
5	58.9	58.3	59.5	0.62	0.6	0.5	0.7	0.1	1.4	1.3	1.5	0.15
6	51.9	51.3	52.5	0.62	0.74	0.7	0.8	0.06	0.85	0.8	0.9	0.08
9	54.2	52.2	57.2	2.69	1	0.9	1.1	0.11	1.6	1.6	1.6	0
10	70.2	69.1	70.8	0.91	0.47	0.4	0.5	0.06	0.65	0.6	0.7	0.08
13	73.5	73.1	73.9	0.4	0.6	0.6	0.6	0	1.7	1.7	1.7	0
14	61.9	61	63.6	1.48	0.6	0.6	0.6	0	0.95	0.9	1	0.08
15	54.2	53.9	54.3	0.21	1.54	1.5	1.6	0.06	1.15	1.1	1.2	0.08
17	63	62.3	63.7	0.7	0.4	0.4	0.4	0.01	2.2	2.1	2.3	0.15
18	55.4	54.9	55.8	0.46	1.34	1.2	1.4	0.12	1.35	1.3	1.4	0.08
22	76.2	75.3	76.7	0.74	0.87	0.8	0.9	0.06	1.2	1.2	1.2	0
23	64.3	63.6	64.6	0.58	1.54	1.5	1.6	0.06	1.2	1.2	1.2	0
25	78.5	78.3	78.6	0.16	0.5	0.4	0.6	0.1	2.9	2.9	2.9	0
26	65.2	64.6	65.6	0.51	0.8	0.7	0.9	0.11	2	2	2	0
27	56.9	56.5	57.2	0.36	1.57	1.5	1.6	0.06	2.1	2.1	2.1	0
4	67.1	66.4	67.4	0.56	1.7	1.5	1.9	0.24	2.95	2.8	3.1	0.22
8	59.3	58.8	59.8	0.51	1.84	1.7	1.9	0.12	2.85	2.8	2.9	0.08
16	73.3	72.7	74	0.66	1.1	1.1	1.1	0	4.25	4	4.5	0.36
			Moyenne	**0.77**			**Moyenne**	**0.08**			**Moyenne**	**0.1**

Tableau 15: Présentant les valeurs moyennes, minimales et maximales pour trois essais réalisés à paramètres opératoires identiques pour F_x, F_y et C_z. Les cases grisées correspondent à des soudures présentant un défaut tunnel

Etude du couple à la broche

L'ensemble de ces essais a montré une excellente répétabilité du couple sur trois essais, avec une variation comprise entre 0.3 et 3%. Etant donné, que N, v_a, F_z, C_z et par conséquent E_n sont identiques sur trois essais réalisés, on peut supposer des conditions thermiques et un malaxage similaires entre chaque essai. Cela témoigne de la reproductibilité de la qualité des soudures. Cette caractéristique est intéressante pour le dimensionnement du moyen de production et de sa broche. En effet, il n'est pas nécessaire de majorer la valeur du couple et de la puissance pour le dimensionnement de la broche.

Etude des efforts F_x et F_y

L'ordre de grandeur des efforts mesurés pour chaque essai effectué à paramètres de conduite identique est similaire. La variation enregistrée est de 0 à 0,2kN pour F_y et de 0 à 0,5kN pour F_x. Etant donné que les amplitudes des efforts sont faibles, ces variations peuvent représenter entre 0 et 60%. Ces valeurs sont certainement perturbées par l'erreur de mesure de la machine de 0,4kN. Ainsi, il est impossible de conclure sur une répétitivité de l'intensité des efforts F_x et F_y. Cela devra être pris en compte pour le dimensionnement d'un moyen de

production. Ceci afin de palier à une éventuelle variabilité de leurs intensités permettant également de palier aux phénomènes oscillatoires.

Une bonne similarité des valeurs du couple C_z, entre plusieurs essais réalisés à paramètres opératoires identiques, semblent se profiler. Cela témoigne de la robustesse du procédé couramment évoqué en FSW. En partant de la constatation que N, v_a, F_z, C_z et E_n sont similaires la qualité des soudures obtenues sont sans doute équivalente. Par contre, une telle constatation n'a pas pu être faite pour F_x et F_y. Ainsi, pour un dimensionnement, il sera nécessaire de majorer ces efforts mesurés.

4.3.6. Comparaison des efforts et couples mesurés lors des essais en pleine tôle et bout à bout

Johnson [JOH01] parle d'une bonne transposition des efforts et des couples mesurés en essais en pleine tôle et bout à bout. Cette caractéristique est importante car pour un gain de temps et de commodité, la détermination des paramètres opératoires s'effectue lors d'essais en pleine tôle plus aisés à mettre en œuvre. Si cela se vérifie, la qualification d'un moyen de production pourra alors se baser sur des mesures du torseur des actions mécaniques d'essais réalisés en pleine tôle. La différence, entre du soudage pleine tôle et du soudage bout à bout, est la présence d'une discontinuité de la matière en amont de la soudure.

Dans le domaine de soudabilité opératoire étudié, la correspondance de la formation des défauts entre les essais pleine tôle et bout à bout a été montrée. Ceci témoigne de la génération des mêmes phénomènes physiques entre ces deux configurations.

La Figure 138 présente l'intensité moyenne de C_z et de F_y, sur trois essais, pour des essais réalisés en pleine tôle et bout à bout à paramètres identiques. Les tendances de leur évolution en fonction des paramètres opératoires sont identiques dans les deux configurations.

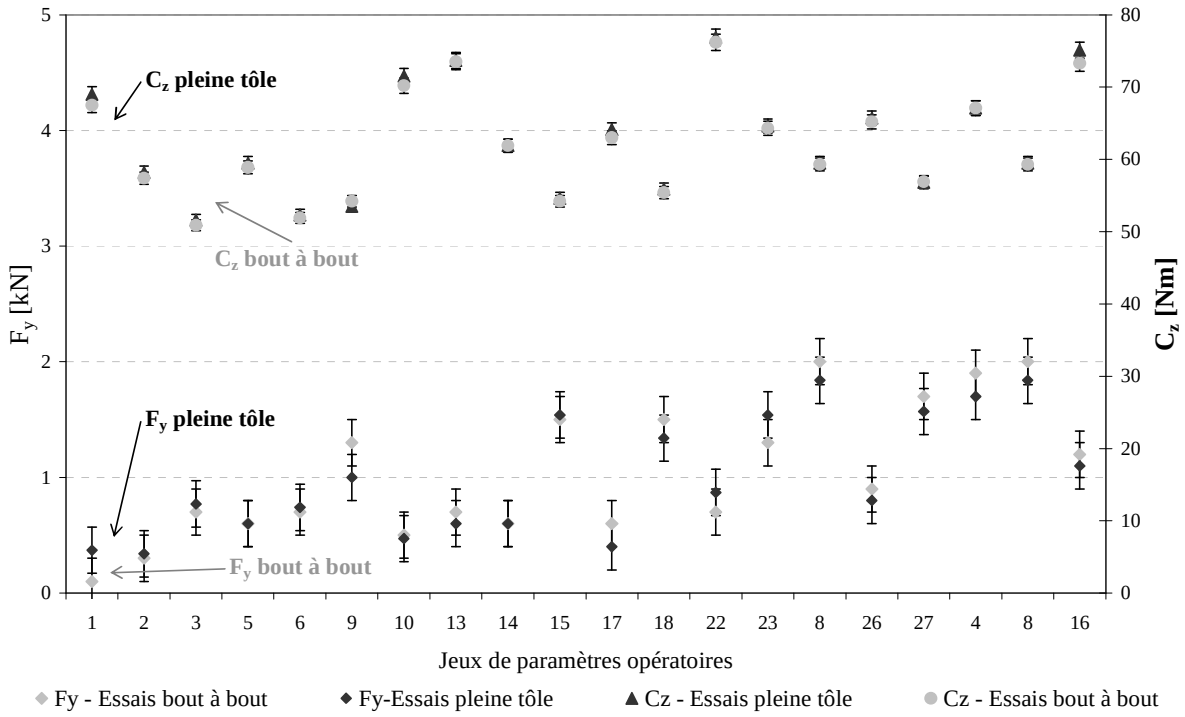


Figure 138: Comparaison entre le couple C_z et l'effort F_y mesuré en soudure pleine tôle et bout à bout pour différents paramètres opératoires. Les barres d'erreurs des valeurs de F_y correspondent à l'erreur de mesure

Pour presque toutes les combinaisons de paramètres opératoires, l'intensité du couple est quasi identique pour les essais réalisés en pleine tôle et bout à bout. La variation de cette intensité est comprise entre 0 et 2,4%, ce qui correspond à la répétitivité estimée de la valeur du couple sur plusieurs essais réalisés en pleine tôle. Ainsi, elle ne connaît pas de différence entre un essai pleine tôle et bout à bout. La présence d'une discontinuité de la matière n'occasionne donc pas de variation de résistance à la rotation.

Des paramètres opératoires identiques et des couples quasi égaux entrainent donc une énergie nominale et une puissance à la broche identiques pour les deux configurations.

Les valeurs des efforts F_y sont du même ordre de grandeur pour des essais pleine tôle et bout à bout. Malgré une erreur de mesure influençant de manière importante ces valeurs, une bonne correspondance, entre les mesures des essais pleines tôle et bout à bout, peut être conclue.

Toutefois, le nombre d'essais, trois pour chaque configuration, est insuffisant pour établir une étude statistique complète. Ainsi, nous conclurons que les valeurs de C_z et de F_y affichent une bonne correspondance entre des essais pleine tôle et bout à bout. Cela ne s'appliquera que lorsque les pièces sont mises en position sans jeu et correctement bridées. Ceci laisse présager que des mesures des couples et des efforts des essais réalisés en pleine tôle permettront de qualifier statiquement le moyen de production FSW.

Ces constatations permettent de penser qu'un domaine de soudabilité déterminé en soudage pleine tôle est transposable en soudage bout à bout. Il faudra tout de même prêter

attention à la présence du défaut de pénétration partielle, qui survient uniquement en soudage bout à bout.

4.4. Domaine de soudabilité opératoire et plages d'efforts

L'objectif est d'associer au domaine de soudabilité opératoire ou aux points de fonctionnement connus le torseur des actions mécaniques en chaque point. La réunion de ces données permettra de choisir un point de fonctionnement respectant le cahier des charges de l'assemblage et de valider le moyen de production FSW choisi.

Kim et al. [KIM06] ont schématisé le domaine de soudabilité opératoire sous forme de zone d'effort dans le plan (N, v_a). De la même manière, nous avons schématisé sur la Figure 139 les plages d'efforts de notre configuration. Si l'on regarde le domaine de soudabilité présenté par Kim et al. [KIM06], plus l'effort F_z est grand plus la gamme de combinaisons de paramètres (N, v_a) est vaste. Cette constatation ne semble pas s'appliquer aux résultats obtenus. Il est possible que cela soit dû à la nature des alliages étudiés (ACD12, alliage de fonderie pour Kim et al. [KIM06]). Cependant, l'ensemble des essais nous a permis d'identifier une zone centrale, autour de N=1200tr/min et v_a =600mm/min, où la gamme d'effort applicable menant à une soudure compacte est la plus vaste.

Ce diagramme permettra également de cerner les plages d'efforts accessibles par la machine choisie. L'objectif est de sélectionner les paramètres opératoires qui permettent de réaliser l'application soudée en respectant les critères exigés et en assurant la productivité requise. Ceci caractérise la phase de soudage en vue de l'industrialisation du 6082-T651 d'épaisseur 6mm pour un outil donné.

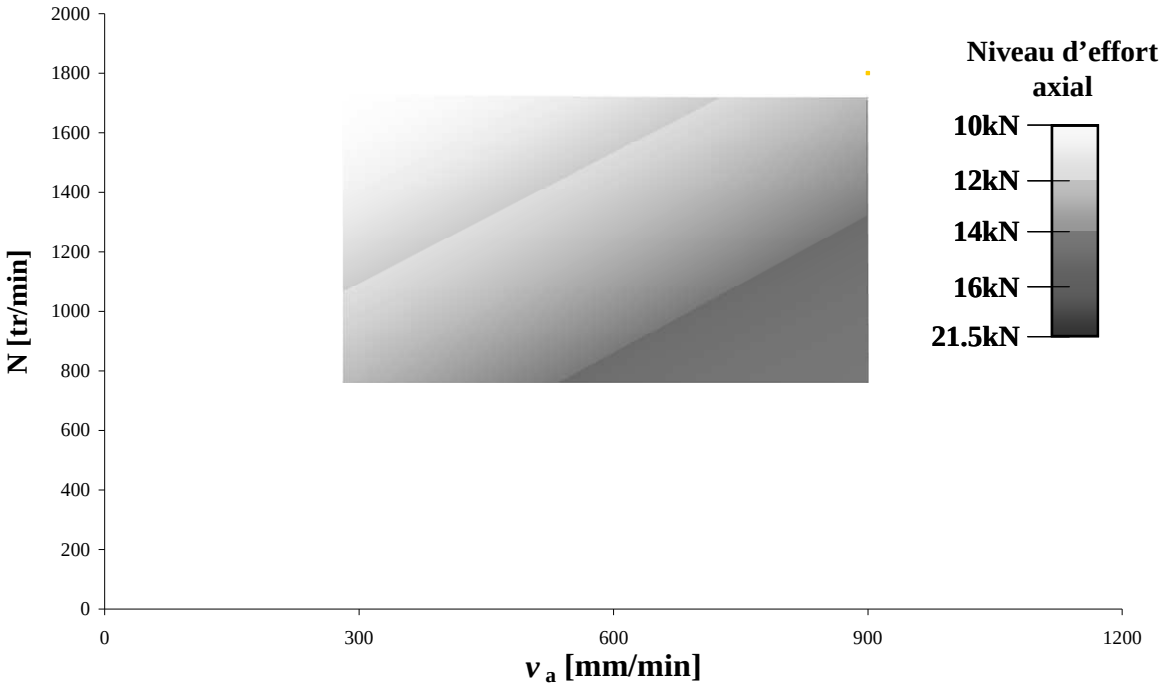


Figure 139: Schématisation du domaine de soudabilité opératoire en soudage pour le 6082-T651 d'épaisseur 6mm

4.5. Transition entre ces deux phases opératoires

Dans l'expérimentation réalisée, les phases de temps de maintien et d'accélération étaient toujours paramétrées avec les mêmes valeurs. Le contrôle aux rayons X a permis d'identifier la présence d'un défaut tunnel au début de la phase de soudage pour certains essais. Celui-ci apparait à la transition des phases de maintien et de l'accélération.

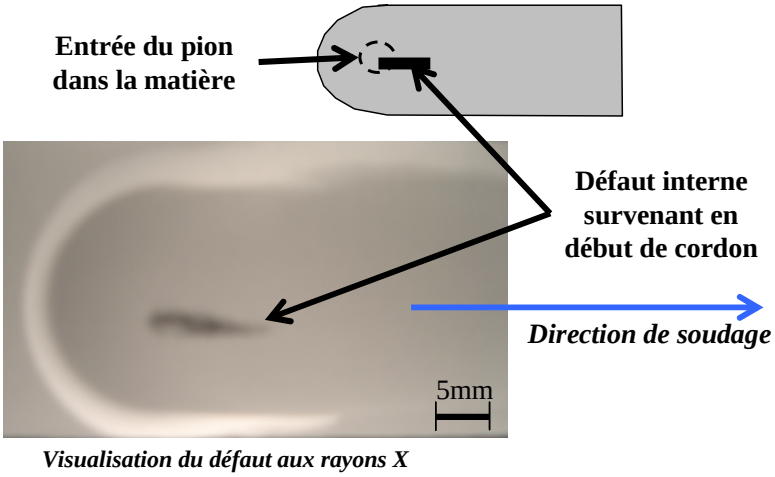


Figure 140: Défaut tunnel à la transition pénétration / soudage

L'origine de ce défaut est sans doute due à des conditions thermomécaniques inadaptées à la fin du temps de maintien le générant ce défaut en début de soudage. Le matériau est sans doute dans un état thermique « trop froid », générant ce défaut tunnel. Celui-ci se referme après quelques millimètres de soudure, suite à l'apport de chaleur apportée par la formation

du cordon. A l'aide de la simulation numérique, Zhang et al. [ZHA07b] ont étudié l'influence de la température au démarrage de la phase de soudage. Ils montrent que les conditions thermiques en début de soudure sont importantes. Ainsi, des conditions « trop chaudes » ou « trop froides » aboutissent à un échec dans l'amorçage du malaxage au début du soudage. Ces résultats rejoignent nos constations. Ainsi, pour éviter la formation de ce défaut tunnel, il est nécessaire d'adapter le temps de maintien et la phase d'accélération pour démarrer le soudage dans des conditions thermomécaniques adaptées. Ceci nous amène à reconsidérer les enchainements des actions de la démarche de définition des plages de fonctionnement pour une application de FSW donnée. Trois actions avaient été définies, auxquelles s'ajoutent les actions ci-dessous en italique gras :

- A1 : Choisir un point de fonctionnement,
- A2 : Définir la plage de fonctionnement de la phase de plongée,
- ***A3 : Définir les paramètres de temps de maintien et d'accélération,***
- A4 : Définir le domaine de soudabilité opératoire.

La phase de soudage est alors définie dans son ensemble.

Remarque1 : l'enchainement des actions A1, A2, A3 et A4 consiste à mettre en place une démarche expérimentale sur l'ensemble de la phase de soudage.

Remarque 2 : la normalisation en vigueur (norme ISO/DIS 25239-3A) stipule que lorsque le DMOS (description et qualification des modes opératoires de soudage) le spécifie, une longueur de 50mm au début de soudure peut être ignorée. Ces défauts pourront alors, si nécessaire, être non considérés car ils se situent dans les 30 premiers millimètres de soudage. Cette non considération des 50 premiers millimètres de soudage entraine un découpage systématique d'une partie du cordon. Cela occasionne une perte de matière et une opération supplémentaire dans la chaine de fabrication, donc un surcoût. Ceci montre l'intérêt, dans un souci d'industrialisation du procédé, de tenir compte de ce défaut et d'essayer d'y palier. De plus, dans certaines configurations, comme par exemple lors du soudage de deux éléments circulaires, les 50 premiers millimètres ne peuvent pas être supprimés.

L'étude de la phase de soudage à vitesses constantes à montré que des phénomènes défauts de deux types, chauds et froids, limitent le Domaine de Soudabilité Opératoire.

Comme pour la plongée, le couple à la broche est essentiellement une fonction de la vitesse de rotation de l'outil. Ceci implique sur la puissance de soudage est principalement liées à la vitesse de rotation.

L'évolution de l'effort d'avance présente une bonne corrélation avec celle de l'avance par tour. L'évolution de l'effort transverse n'est pas aussi régulière. On note toutefois une augmentation forte de son amplitude pour les essais présentant un défaut tunnel interne. Des

essais à paramètres opératoires identiques ont montré une assez forte variabilité de la valeur des efforts d'avance et transverse.

L'ensemble des composantes des efforts présente une composante dynamique de fréquence égale à la fréquence de rotation de l'outil.

La comparaison entre des essais en pleine tôle et des essais de soudage montre une bonne correspondance en ce qui concerne l'apparition des défauts et l'amplitude des efforts outil/matière. Seul le défaut de pénétration partielle est très difficile à appréhender en essai pleine tôle. Les observations macrographiques de la zone malaxée sous le pion ne permettent pas une détection de ce défaut de façon assurée.

4.6. Choisir son point de fonctionnement

La méthodologie présentée dans ce chapitre consistait à définir les domaines de fonctionnement des phases de plongée et de soudage à vitesses constantes. A ces dernières on associe aux paramètres de conduite les torseurs des actions mécaniques. Ceci permettra de choisir les paramètres opératoires des phases de plongée et de soudage respectant les critères du cahier des charges. A l'aide des torseurs associés à ces paramètres, il est possible de procéder à la qualification des moyens de production.

Ainsi, en associant les plages de fonctionnement de ces deux phases, présentées aux Figure 115 et Figure 139, les phases principales de soudage sont définies. La Figure 141 schématise cette démarche au sein du triptyque produit / procédé / ressources.

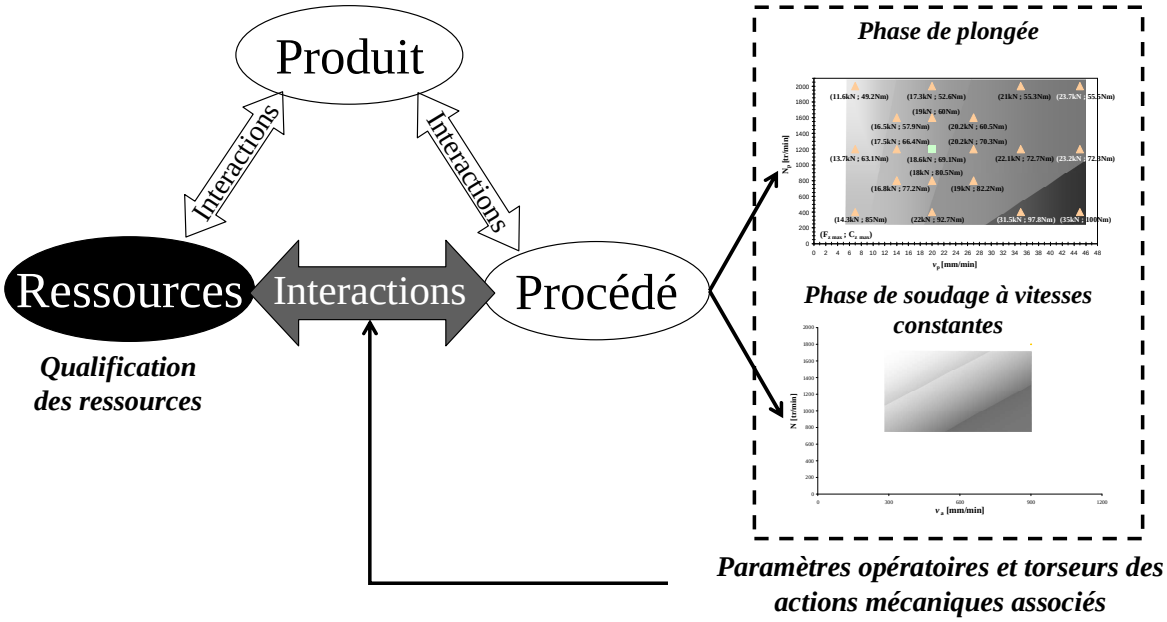


Figure 141: Schématisation de la position de ces travaux au sein du triptyque produit / procédé / ressources

Si aucun point de fonctionnement ne permet de réaliser l'opération avec le moyen choisi, il sera nécessaire de modifier la géométrie de l'outil.

5. Conclusion

Nous venons de présenter la démarche permettant la mise en place des plages de fonctionnement pour les deux phases identifiées comme caractéristiques d'une opération de soudage. A travers leurs définitions, l'influence des paramètres de conduite sur les actions mécaniques appliquées sur l'outil a été étudiée. D'une manière générale, il a été montré que les paramètres de conduite influence le comportement du matériau et par conséquent les actions mécaniques générées. Ainsi, il est possible de moduler leurs intensités en travaillant sur les paramètres d'entrée.

Tout d'abord, nous avons présenté les résultats obtenus sur la phase de plongée. Nous avons montré que les paramètres de conduites influençaient la puissance dissipée, et par conséquent l'état du matériau. Ceci se visualise par différentes évolutions des courbes d'efforts F_z et de couples C_z. Les résultats de l'étude montrent que le couple maximal $C_{z\ max}$ est plus sensible aux variations de la fréquence de rotation et que l'effort maximal $F_{z\ max}$ est plus sensible aux variations de la vitesse de plongée. Le couple $C_{z\ max}$ présente une excellente répétitivité sur plusieurs essais. Ceci n'est pas le cas pour $F_{z\ max}$ dont la valeur peut varier jusque 20% (dans le cas étudié). Ainsi, pour un dimensionnement, cette variabilité de $F_{z\ max}$ doit être prise en compte.

Puis, nous avons étudié la phase de soudage à vitesses constantes. La première étape a consisté à déterminer les frontières du DSO à travers la formation des défauts (phénomènes limites). Les résultats obtenus pour le 6082-T651 sont conformes à ceux décrits pour d'autres alliages d'aluminium dans la bibliographie. Les actions mécaniques appliquées générées, au sein du domaine identifié, ont été analysées. A nouveau, le couple C_z a montré une sensibilité plus prononcée aux variations de N que celle de F_z et v_a. Par contre, les intensités des efforts F_x et F_y évoluent en fonction des trois paramètres N, v_a et F_z.

Ainsi, il est possible de moduler les intensités des actions mécaniques en travaillant sur les jeux de paramètres de conduite. Ces derniers ont également une influence sur la qualité du cordon obtenu. Il sera donc parfois nécessaire de trouver le meilleur compromis entre la qualité de joint et les actions mécaniques appliquées sur l'outil afin de favoriser l'utilisation de moyen de production standards et flexibles.

Ces campagnes expérimentales ont permis de recueillir les torseurs des actions mécaniques et cinématiques associés à chaque point M_i de la ligne de joint $\mathcal{L}$, pour différents points appartenant aux plages de fonctionnement des phases de soudage et de plongée. Ces données sont importantes pour procéder à la qualification d'un moyen de production. Elles doivent être ajoutées aux données relatives à la position et à l'orientation de l'outil le long de la une ligne de joint $\mathcal{L}$, données déterminer au chapitre 2. Ainsi, l'étape suivante est la qualification d'un moyen de production FSW.

CHAPITRE 4 : QUALIFIER UN MOYEN DE PRODUCTION FSW

Ce chapitre s'attache à la qualification du moyen de soudage FSW en s'appuyant sur la capitalisation des informations / connaissances développées dans les trois premiers chapitres. Dans un premier temps, nous allons mettre en place une méthodologie générique pour qualifier un moyen de production, en estimant son aptitude à appliquer / subir les actions mécaniques appliquées sur l'outil. Cette méthodologie sera appliquée à un robot six axes. Ainsi, dans un deuxième temps, pour faciliter le choix des paramètres opératoires, les domaines, des DSO déterminés au chapitre 3, atteignables par un robot seront définis. Ce travail permettra de caractériser, pour une application donnée, la faisabilité de l'opération dans l'espace de travail d'un robot. Enfin, une première étude pour définir les tolérances du FSW dans la mise en position et de l'orientation de l'outil sans générer de défaut a été réalisée.

Sommaire

1. INTRODUCTION 197

2. VALIDER LE MOYEN DE PRODUCTION CHOISI 201

3. APPLICATIONS 216

4. LES DEFAUTS RENCONTRES LORS DE L'UTILISATION D'UN MOYEN POLYARTICULE 237

1. Introduction

La Figure 142 présente le schéma d'intégration produit / procédé / ressources utilisé pour mettre en place la démarche d'industrialisation. Le texte écrit en gras correspond aux points étudiés dans cette thèse. Dans le chapitre 2, l'étude des interactions produit / procédé a été présentée. Elle s'appuie sur l'analyse outil / matière et outil / pièces. De cette analyse, nous avons ressorti les informations suivantes : la définition de la géométrie de la ligne de joint, les paramètres de conduites et les torseurs cinématique et des actions mécaniques outil / matière.

Le chapitre 3 a permis de mettre en place les plages de fonctionnement des phases de plongée et de soudage à vitesses constantes. A ces domaines, pour chaque combinaisons de paramètres opératoires le torseur des actions mécaniques ont été associés. Ce travail a permis de définir la cinématique de l'outil et les actions mécaniques, en chaque lieu de la ligne de joint, pour différentes combinaisons de paramètres opératoires. Ces résultats vont permettre la qualification du moyen de soudage qui doit supporter ou appliquer ces actions mécaniques.

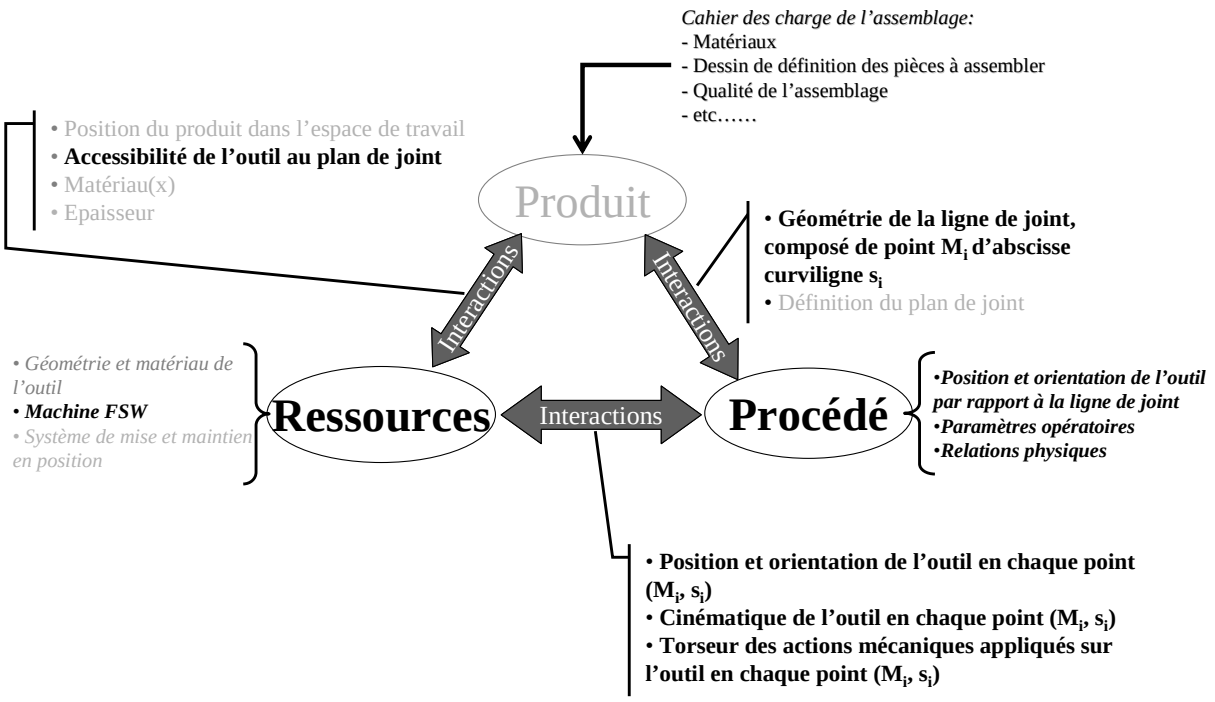
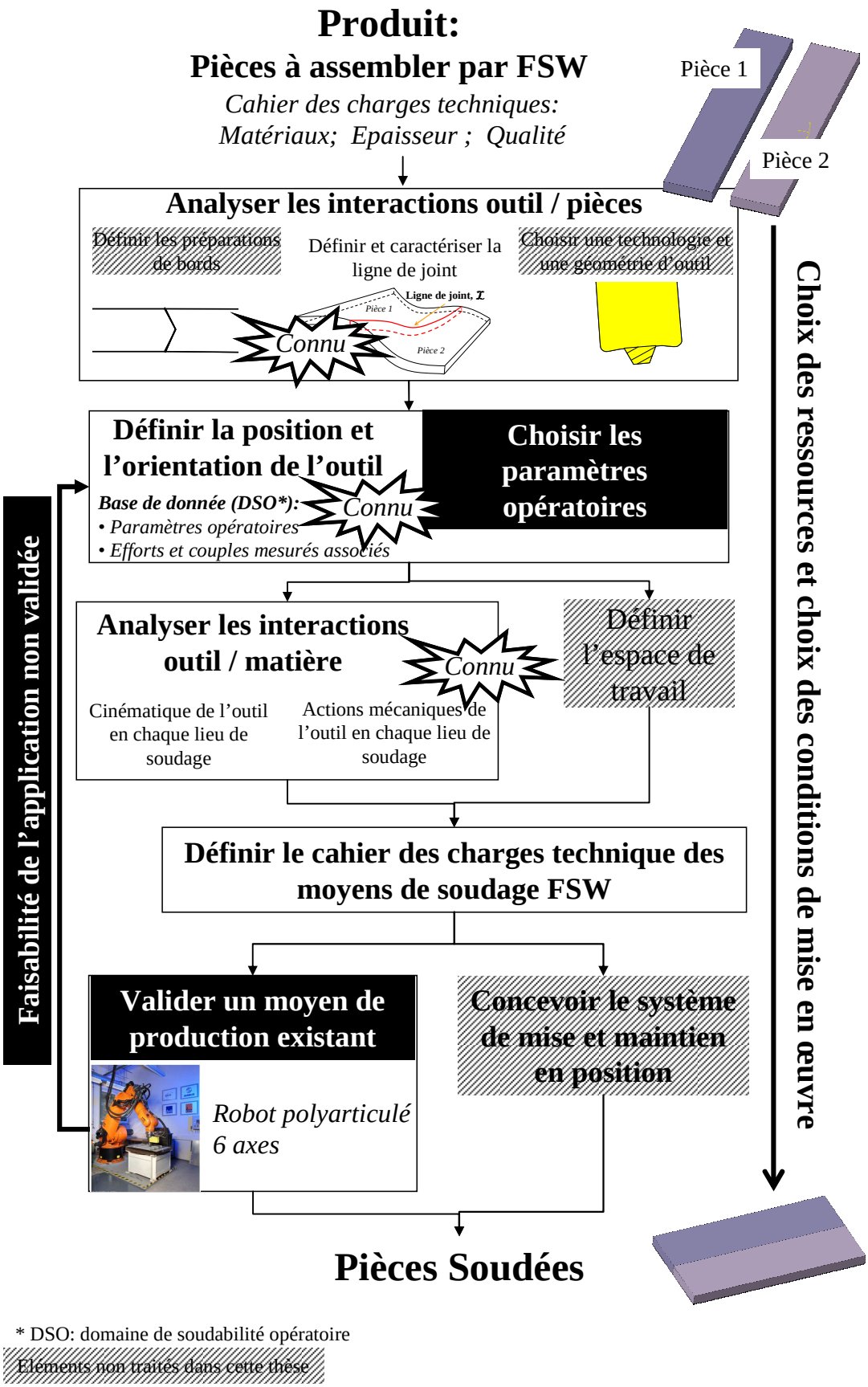


Figure 142: Schéma d'intégration produit / procédé / ressources présentant les points étudiés dans cette thèse en gras

La Figure 143 présente le schéma global de la méthodologie sur laquelle le positionnement de ces travaux est représenté. Ils concernent le choix des paramètres opératoires, en s'appuyant sur des DSO intégrant les capacités en effort de la machine considérées et la validation du moyen de production choisi. Le moyen support sera un robot polyarticulé 6 axes.



* DSO: domaine de soudabilité opératoire

Eléments non traités dans cette thèse

Figure 143: Identification (cases noircies) du positionnement des travaux du chapitre 4 au sein du schéma global décrivant la méthodologie mise en place

Pour qualifier un moyen de production FSW, une méthodologie générique a été mise en place. La Figure 144 présente le diagramme IDEF-0 de la démarche proposée. Les données, issues de l'analyse et de l'expérimentation, collectées au travers des chapitres 2 et 3 peuvent être identifiées. Elles permettent de procéder à la validation du moyen de production choisie.

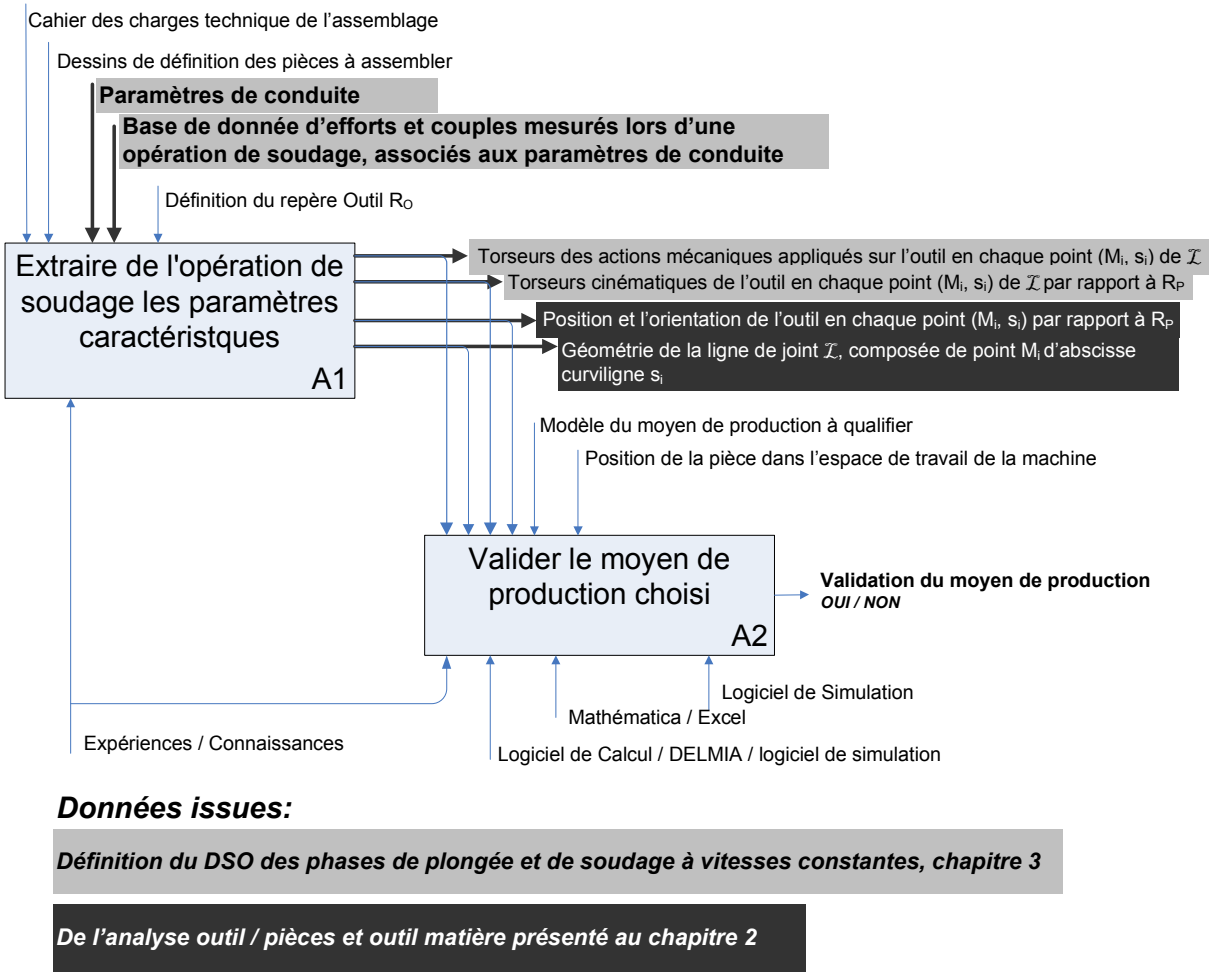


Figure 144: Diagramme IDEF-0 de la démarche de qualification d'un moyen de production FSW présenté au chapitre 2

L'action ***A2 – Valider le moyen de production choisi*** correspond à vérifier si, pour l'application choisie, le moyen de production permet :

- de faire suivre la trajectoire de soudage à l'outil,
- d'appliquer en chaque point de la ligne de joint $\mathcal{L}$ les actions mécaniques sur l'outil afin d'assurer la formation et la qualité de la soudure.

Remarque : la validation proposée se limite à l'étude de la faisabilité du suivi de la trajectoire et à un calcul des capacités nécessaires des actionneurs pour réaliser l'opération. Ainsi, les aspects dynamiques ou la tenue aux efforts du porte-pièces ne seront pas pris en compte.

La Figure 145 présente le détail sous forme de diagramme IDEF0 de l'action A2. Elle se décompose en quatre sous-actions :

- ***A21 – Vérifier si la trajectoire peut être suivie.*** Il faut calculer les positions articulaires de la machine et vérifier qu'elle permet d'assurer le suivi de la trajectoire.
- ***A22 – Calculer les actions mécaniques appliquées par chaque actionneur du moyen de production.*** Pour chaque position articulaire, il faut estimer les couples / efforts appliqués sur chaque actionneur de la machine.
- ***A23 – Comparer les actions mécaniques appliquées par chaque actionneur à ses capacités.*** Il faut s'assurer que sur chaque actionneur les efforts et les couples restent inférieurs à ceux admissibles.
- ***A24 – Qualifier le moyen de production.*** L'information de la faisabilité issue des actions A21 et A23 permet de valider l'aptitude du moyen de production FSW.

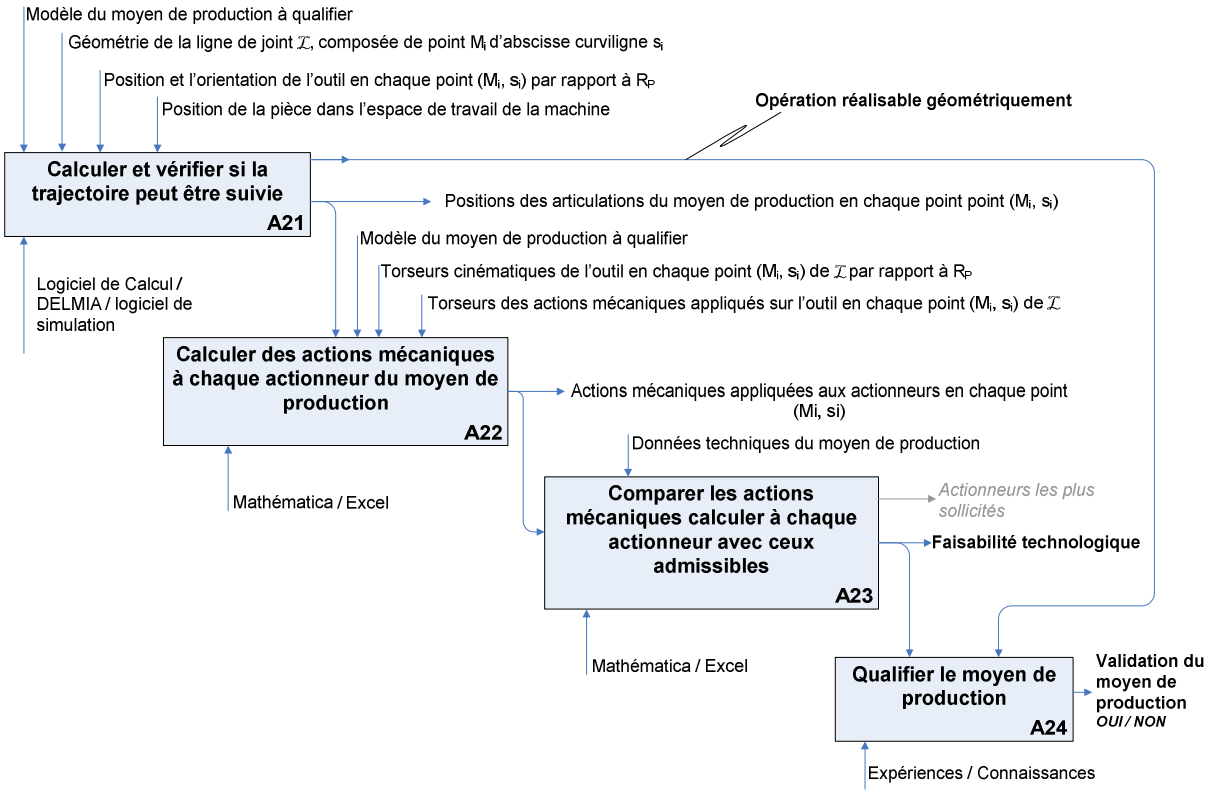


Figure 145: Diagramme IDEF0, démarche de qualification d'un moyen de production FSW. Action A2: Valider le moyen de production FSW choisi

Remarque : les résultats des actions A22 et A23 permettent d'étudier quel(s) actionneur(s) de la machine est (sont) le(s) plus sollicité(s). Ces informations permettent, lorsque l'application n'est pas réalisable, d'envisager un nouveau posage de la pièce dans l'espace de travail, sollicitant de manières différentes les actionneurs du moyen de production. Ainsi, la position et l'orientation de la pièce au sein de l'espace de travail peuvent devenir un levier d'action pour permettre la réalisation de l'opération de soudage avec le moyen de production choisi.

Cette démarche générale peut être appliquée à n'importe quelle machine de FSW. Dans le cadre de nos travaux, nous l'avons appliquée à un robot polyarticulé. D'une machine à l'autre, les paramètres modifiés sont le « modèle du moyen de production à qualifier » et les « données techniques du moyen de production » (paramètre de contrôle des actions A21, A22 et A23 du digramme IDEF-0 présenté à la Figure 145).

2. Valider le moyen de production choisi

2.1. Présentation du système

Le système étudié est schématisé à la Figure 146. Il peut se composer en :

- un espace moyen de production constitué des éléments :
  - une machine, dans notre cas d'étude ce sera un robot polyarticulé six axes
  - une broche, composée d'un rotor et d'un stator
  - un outil FSW
- un espace tâche à réalisée, composé des éléments :
  - le solide table
  - le porte-pièces
  - les pièces
- un « sol », socle de ces deux espaces.

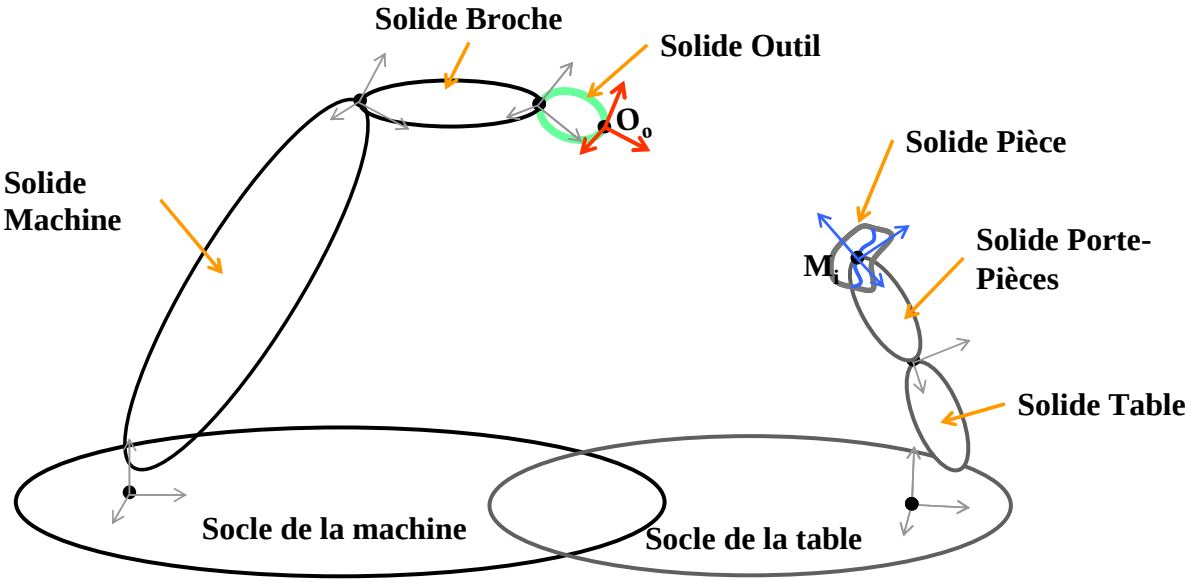


Figure 146: Schématisation du système FSW étudié

Nous allons présenter le système de manière générale.

2.1.1. Le moyen de production

La machine FSW

La machine étudiée est un robot polyarticulé 6 axes de forte capacité, généralement utilisé dans l'industrie pour le déplacement de charge pouvant atteindre 570kg. Il peut déplacer cette charge dans un espace de travail de 68m^3 avec une précision de plus ou moins 0,3mm. Son rayon d'action est de 2830mm.

Le solide robot est composé de sept solides, S_0 à S_6, liés par des liaisons pivots. La Figure 147 présente le système modélisé ci-après.

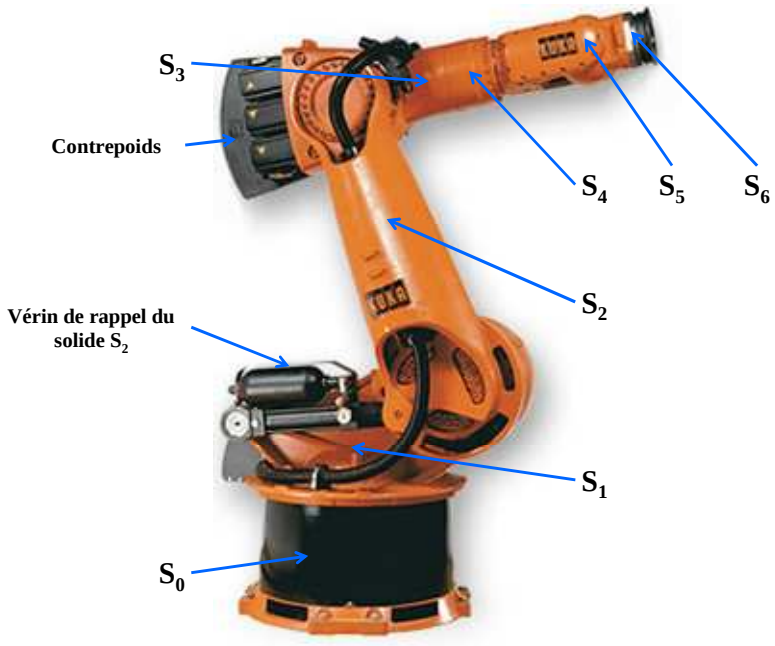


Figure 147: Représentation des différents solides composant le robot polyarticulé KUKA KR500-2

Les positions et les orientions de l'outil vont être délimitées par les longueurs de chaque axe et la plage de mouvement angulaire de chacune de ces articulations qui sont présentées dans le Tableau 16.

Plage de mouvement [°]	
Axe1	**± 185°**
Axe2	**-130° / -20°**
Axe3	**- 94° / + 150°**
Axe4	**± 350°**
Axe5	**± 180°**
Axe6	**± 350°**

Tableau 16: Plage de mouvement en degré de chacune des articulations issues du logiciel DELMIA ®

Le domaine d'application du robot est limité par les couples maximums admissibles en chacun des axes. Généralement, les constructeurs ne dévoilent que les capacités globales de la

structure. KUKA, par exemple, ne dévoile aucun couple maximum. Nous les avons estimés. Le robot possède une charge maximale de 500kg. En considérant le bras en position totalement tendu avec une charge de 500kg fixée sur l'axe 6, il est possible d'estimer les couples générés aux différentes articulations. Le Tableau 17 présente les couples calculés. Ces valeurs représentent une limite basse des capacités réelles car le robot est dimensionné pour tenir la charge statiquement et dynamiquement dans son espace de travail. Toutefois, ces valeurs serviront de première approximation pour les calculs présentés ci-après.

	Couple admissible	**KuKa KR 500 MT**
Axe1	$C_{01\ admissible}$	**15 000 Nm**
Axe2	$C_{12\ admissible}$	**10 000Nm**
Axe3	$C_{23\ admissible}$	**10 000Nm**
Axe4	$C_{34\ admissible}$	**7 000Nm**
Axe5	$C_{45\ admissible}$	**4 000Nm**
Axe6	$C_{56\ admissible}$	**1 500Nm**

Tableau 17: Estimation des couples admissibles aux différents motoréducteurs du robot

Avec :

$C_{j-1\ j\ admissble}$ [Nm] Couple admissible sur le moteur de l'articulation entre les solides S_{j-1} et S_j

La broche ne dispose pas de vérin permettant d'appliquer l'effort axial. Ainsi, pour assurer le contact entre l'épaulement et la surface des pièces pendant l'opération de soudage, le robot dispose d'un contrôle en effort. Celui-ci est assuré par l'ensemble des actionneurs.

La broche

La broche est composée d'un stator, reliée au solide S_6, et d'un rotor solidaire de l'outil. La Figure 148 présente la tête de soudage montée sur le solide S_6 du robot. La masse $m_{Tête\ de\ soudage}$ correspond à la masse de l'ensemble « tête de soudage, porte outil ». La masse est appliquée au point $G_{tête}$, centre de masse de l'ensemble, supposé sur l'axe de rotation de la tête. Elle représente 50 kg et ne peut donc être négligée.

Les axes de rotation des solides S_6, S_{Broche} et S_{outil} sont supposés concourants.

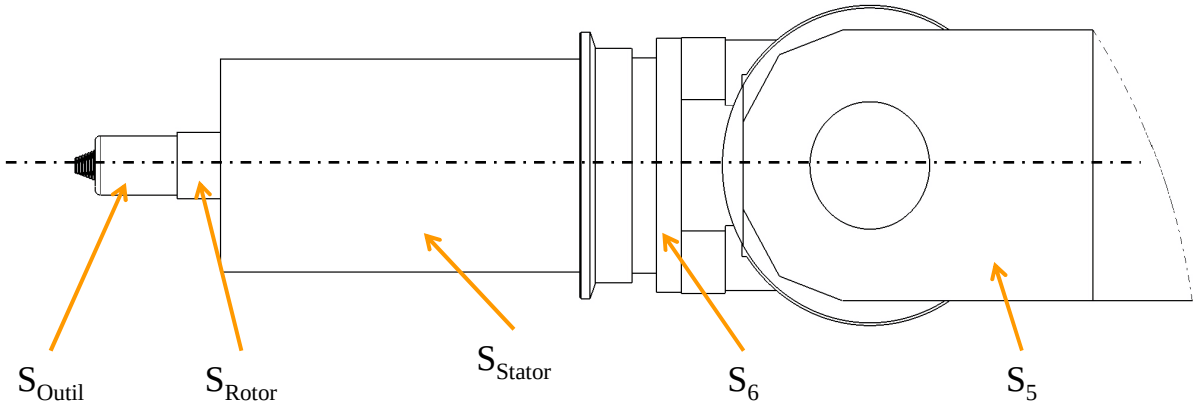


Figure 148: Présentation de la broche montée sur l'axe 6 du robot

Les organes composant la broche permettent d'assurer un couple maximal de 60Nm, un effort axial de 15kN et des efforts latéraux de 5kN. Ces valeurs constituent les premières grandeurs d'actions mécaniques maximales applicables sur l'outil. Elles permettent déjà d'éliminer tout une partie des plages de fonctionnement des phases de plongée et de soudage mise en place précédemment.

L'outil

C'est un outil conventionnel avec un épaulement concave. On suppose que la géométrie de l'outil ainsi que sa rotation au cours du soudage dans la broche sont parfaites. Comme présenté et défini au chapitre 2, le repère orthonormé direct lié à l'outil est schématisé à la Figure 149.

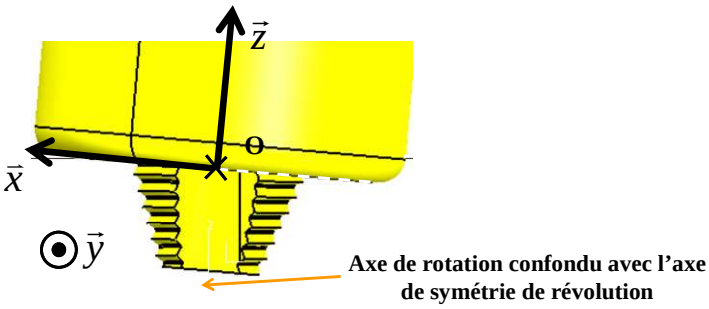


Figure 149: Schématisation de l'outil utilisé

2.1.2. Description de l'espace tâche à réalisée

Les solides table et porte-pièces

Le système est composé d'une table, fixée au sol et posée dans l'espace de travail du robot. Les solides table et porte-pièces sont considérés comme deux solides distincts, car une

mobilité pourrait-être intercalée entre ces deux entités. Dans notre cas de figure, nous supposons ces entités fixes par rapport au solide sol.

Les pièces

Les pièces à souder sont dans notre application deux plaques mises bout à bout présentées à la Figure 150. Elles possèdent une ligne de joint comme définie au chapitre 2. L'analyse géométrique permet de définir l'orientation et la position du repère R_{Mi} (M_i, $\underline{x}_{Mi}$, $\underline{y}_{Mi}$, $\underline{z}_{Mi}$) pour chaque point M_i d'abscisse curviligne s_i. La soudure à réaliser est un cordon rectiligne à plat de longueur 300mm.

Ces plaques sont mises et maintenues en position sur le porte-pièces solidaire de la table de soudage. A partir de cette géométrie et des connaissances physiques du procédé, la position et l'orientation théorique de l'outil par rapport au plan de joint pourront être définies.

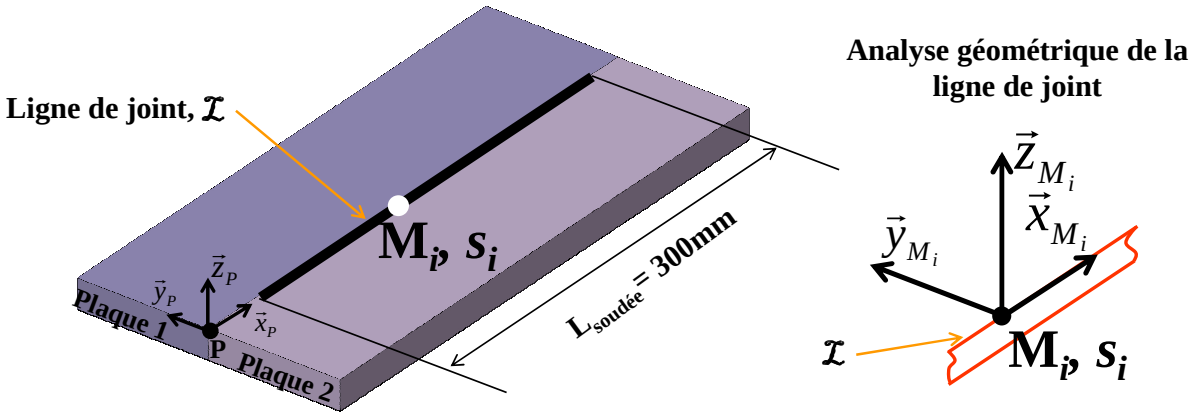


Figure 150: Schématisation de la pièce et de la tâche à réaliser

Nous venons de décrire l'ensemble du système FSW. Il s'agit maintenant de le modéliser. Pour ce faire, nous allons décrire deux espaces de travail, l'espace tâche et celui du moyen de production.

2.1.3. Modélisation de l'ensemble du système

Nous allons nous intéresser à une qualification statique de l'application. En chaque point (M_i, s_i) un torseur des actions mécaniques est appliqué sur l'outil. Le calcul des couples exercés sur chaque axe est alors réalisé. Cette valeur est comparée au couple admissible.

La Figure 151 présente une partie du diagramme IDEF-0 de l'action ***A2 – Valider le moyen de production choisi.*** Les deux actions, A21 et A22, nécessitent la mise en place d'un modèle du moyen de production à qualifier. Ce dernier comprend deux espaces de modélisation, un pour le moyen de production et le second pour la tâche.

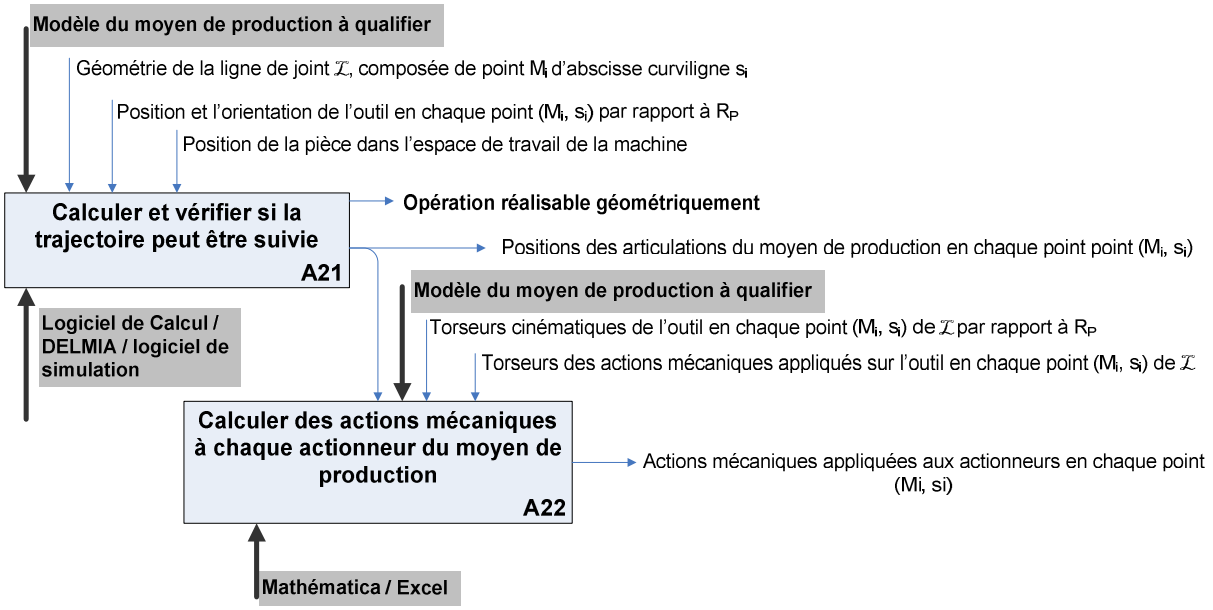


Figure 151: Zoom sur les actionsA21 et A22 du diagramme IDEF0 de l'activité A2

A chacun des solides constituant le système un repère orthonormé direct est associé. A partir du schéma cinématique, nous définissons les matrices en coordonnées généralisées pour lier chaque repère associé à un solide composant les deux espaces.

Hypothèses posées

Les hypothèses posées sont les suivantes [COI92] :

- A chaque point M_i d'abscisse curviligne s_i, le robot est supposé en équilibre.
- Les segments du robot sont parfaits en termes de rigidité, de géométries et d'articulations mécaniques.
- Les liaisons pivots sont parfaites (pas de jeu, pas de frottement,….),
- L'opération est supposée pilotée en position.

Remarque 1 : le contrôle en effort de l'opération de soudage implique des variations de la position de l'outil suivant l'axe (O, $\underline{z}$). Ce mouvement est petit est pourra donc être négligé dans notre modèle.

Remarque 2 : l'erreur commise en négligeant les inerties en soudage est faible car l'opération de soudage est réalisée à faible vitesse. Toutefois, elle doit être remise en cause lors de l'utilisation de robots polyarticulés dans la mesure où ces derniers possèdent des positions singulières autour desquelles un faible mouvement de l'outil peut correspondre à de grandes vitesses et accélérations articulaires.

- Le contrepoids appliqué sur l'axe 3 du robot sera négligé, tout comme l'effort appliqué par le vérin de rappel sur le solide 2 (manque de données techniques sur le robot).

Nous abordons le problème et la qualification du moyen de production d'un point de vue statique. Cette première approche permet d'estimer la faisabilité de l'opération de soudage par un moyen de production à capacités restreintes.

2.2. Modélisation du moyen de production

L'objectif de la modélisation est de déterminer les positions et les orientations, pour l'ensemble de la trajectoire de soudage, de chaque solide composant le moyen de production. Ceci permettra de vérifier l'aptitude de la machine à réaliser l'opération. D'autre part, ce modèle devra permettre l'estimation des actions mécaniques appliquées sur chacun de ses actionneurs. C'est pourquoi, nous avons utilisé un schéma cinématique paramétré pour modéliser l'ensemble. On considère l'installation comme étant un assemblage de corps solides permettant de positionner le repère de l'outil par rapport à la ligne de joint $\mathcal{L}$.

Mobilité et cinématique

Le robot polyarticulé est constitué de sept solides, supposés rigides, liés les uns aux autres par des liaisons pivots parfaites. La Figure 152 présente le schéma cinématique paramétré du robot. La broche est placée sur le solide 6 du robot. Etant donné que l'axe de rotation du solide 6 est confondu avec celui de la broche, leurs mobilités sont redondantes. C'est pourquoi, nous considèrerons le solide S_6 comme étant composé de l'articulation 6 du robot et des solides Broche et Outil comme présenté sur la Figure 153. Ceci est valable lorsque l'opération de soudage est réalisée sans suivi de joint.

Remarque : lorsqu'une caméra dédiée au suivi de joint est implémenté au système, la mobilité de l'axe 6 permettra de garder la caméra alignée avec la ligne de joint au cours du soudage.

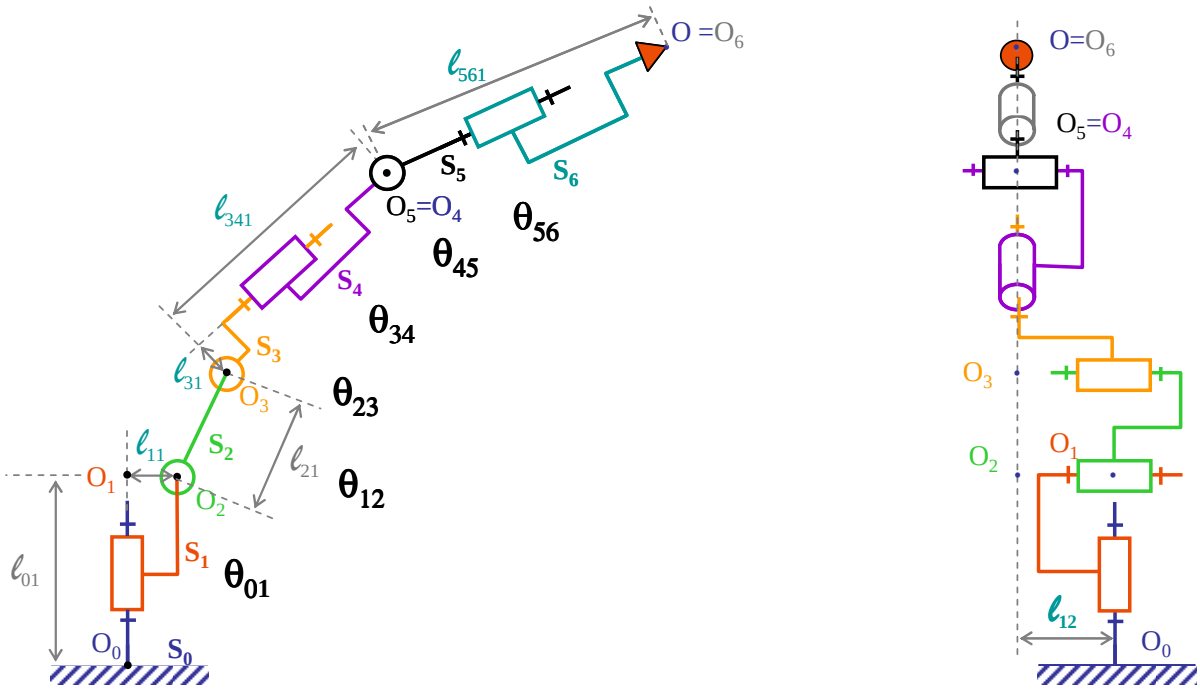


Figure 152: Schéma cinématique du robot polyarticulé

Avec :

- O_j Origine du repère lié solide S_j
- $\theta_{j-1\,j}$ Mobilité angulaire entre les solides S_{j-1} et S_j. Les plages de valeurs de ces angles sont données dans le Tableau 16.

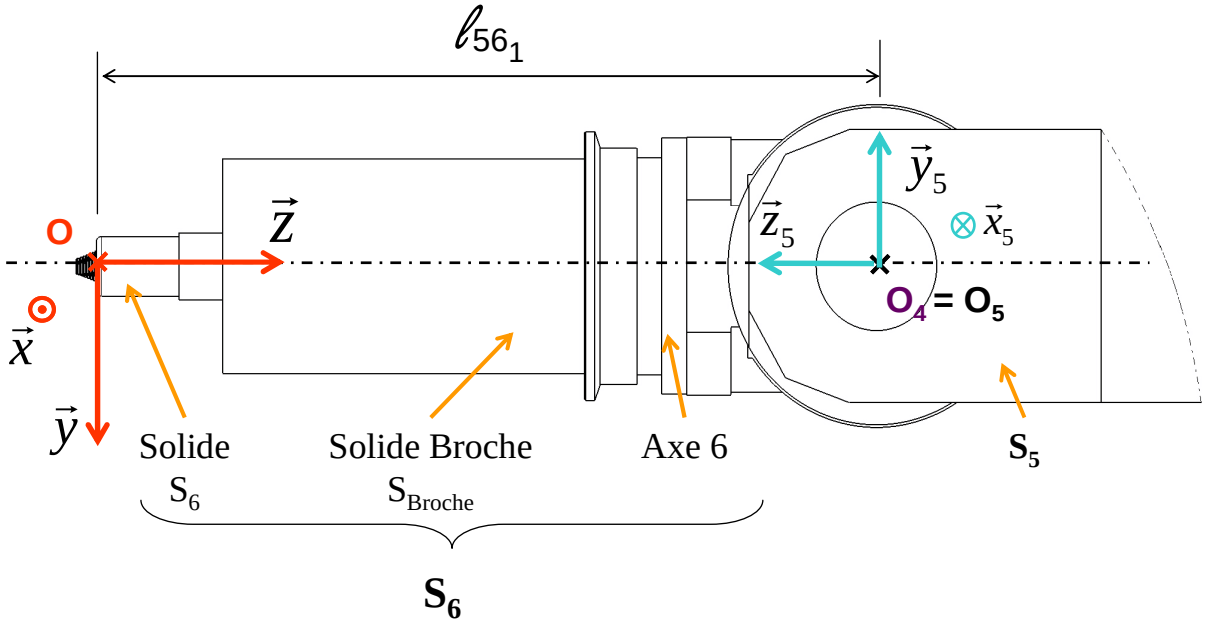


Figure 153: Présentation de l'orientation du repère de l'outil par rapport au repère du solide 5

Nous avons exprimé la position et l'orientation de l'outil par rapport au socle du robot, repère R_0, par une matrice de passage en coordonnées généralisées présentée sur l'équation (45).

$$\left[\begin{array}{ccc|c} & M_{R_O}^{R_0} & & \overrightarrow{O_0O}_{(R_0)} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{array}\right] = \mathbf{A}\ (\theta_{01}, \theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{34}, \theta_{45}, \theta_{56}) \qquad (45)$$

Avec :

- $M_{R_O}^{R_0}$ définie l'orientation de l'outil par rapport au repère R_0. C'est une fonction des angles (θ_{01}, θ_{12}, θ_{23}, θ_{34}, θ_{45}, θ_{56}).

- $\overrightarrow{O_0O}$ [m] La position de l'origine de l'outil par rapport à O_0 est exprimée dans le repère R_0.

Remarque : l'angle θ_{56} sera considéré comme nul, car son axe de rotation est confondu avec celui de la broche.

Les actions mécaniques

Chaque articulation est composée d'une liaison pivot et d'un motoréducteur. Ainsi, sur chacune des liaisons, le torseur des actions mécaniques appliquées sur le solide isolé S_j est présenté par l'équation :

$$\left\{\mathcal{T}_{\text{Solide j-1 / Solide j}}\right\} = \left\{\vec{R}_{solide\ j-1/solide\ j} \ \middle|\ \vec{M}_{solide\ j-1/solide\ j}\right\}_{O_j} \qquad (46)$$

Pour déterminer le couple sur l'axe du pivot, il faut projeter le moment de l'équation (46) sur son axe de rotation :

$$C_{j-1\,j} = \overrightarrow{M_{j-1\,j}} \cdot \vec{d}_{j-1\,j} \qquad (47)$$

Avec :

- $C_{j-1\,j}$ [Nm] Le couple sur le moteur de l'articulation entre les solides S_{j-1} et S_j.

- $\underline{d}_{j-1\,j}$ Le vecteur directeur de l'axe du pivot entre S_{j-1} et S_j.

A chaque solide composant le robot, le torseur poids associé est donné par :

$$\left\{\mathcal{T}_{\text{Poids Solide j}}\right\} = \left\{\begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -m_{Solide\ j} \times g & 0 \end{array}\right\}_{R_0, G_j} \qquad (48)$$

La masse $m_{\text{Tête de soudage}}$ correspond à la masse de l'ensemble « tête de soudage et porte outil ». La masse est appliquée au point $G_{\text{tête}}$, centre de masse de l'ensemble supposé sur l'axe

de rotation de la tête. Elle représente 50 kg et ne peut être négligée. Le torseur poids associé est :

$$\left\{\mathcal{T}_{\text{Poids Tête de soudage}}\right\} = \left\{\begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -m_{\text{tête de soudage}} \times g & 0 \end{array}\right\}_{R_0,\, G_{\text{tête}}} \qquad (49)$$

Nous prendrons en compte ces torseurs dans le calcul des couples aux moteurs du robot car ils sont non négligeables.

2.2.1. Modélisation de l'espace tâche

La tâche correspond à la trajectoire de l'outil pour assurer l'opération de soudage. Celle-ci est définie à partir de la ligne de joint $\mathcal{L}$ supposée continue et dérivable, présentée dans le chapitre 2. Une schématisation de la pièce dans l'espace tâche, posée sur le porte-pièces et la table, est représentée sur la Figure 154.

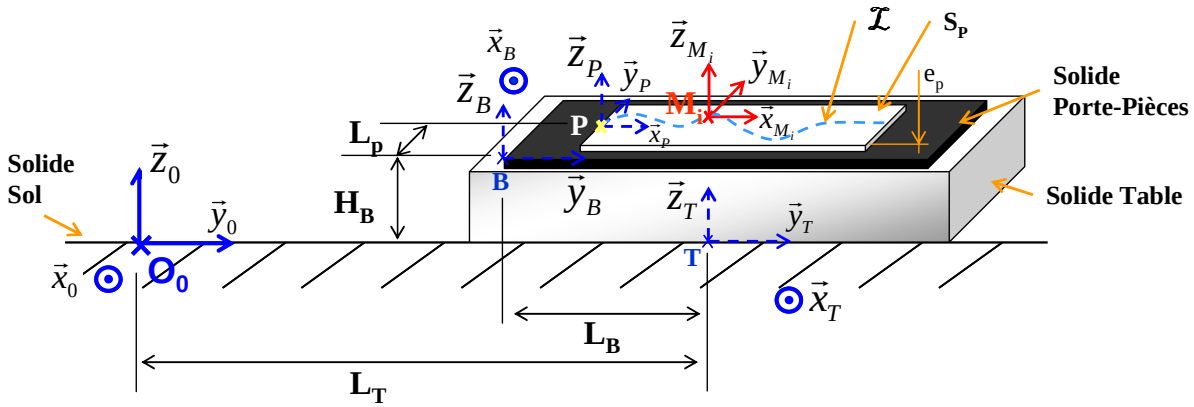


Figure 154: Schématisation de l'espace tâche. Représentation de la ligne de joint $\mathcal{L}$ dans l'espace de travail

Mise en position de la pièce dans l'espace de travail du robot

Les pièces à souder sont placées dans l'espace de travail. La matrice présentée à l'équation (50) permet d'exprimer la position et l'orientation de la pièce dans l'espace de travail :

$$\left[\begin{array}{ccc|c} & M_{R_P}^{R_0} & & \overrightarrow{O_0P}_{(R_0)} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] = \mathbf{B}\,(X_p, Y_p, Z_p, \alpha_p, \beta_p, \gamma_p) \qquad (50)$$

Avec :

- $M_{R_P}^{R_0}$ définit l'orientation de la pièce dans le repère R_0.

- $\overrightarrow{O_0P}$ [m] est la position du repère pièce exprimé dans le repère R_0

Remarque : cette matrice de passe n'évolue pas au cours du temps, car aucune mobilité n'est donnée au porte-pièces.

Description de la ligne de joint $\mathcal{L}$

La ligne de joint $\mathcal{L}$ est décrite par une succession de repère R_{Mi} en chaque point M_i d'abscisse curviligne s_i, comme présenté au chapitre 2. Ainsi, les positions et les orientations de R_{Mi} par rapport à R_P sont décrites par :

$$\left[\begin{array}{ccc|c} & M_{R_{M_i}}^{R_P} & & \overrightarrow{PM}_{i\,(M_i,s_i)(R_p)} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{array}\right] = \mathbf{C}\ (s_i) \qquad (51)$$

Avec :

- $M_{R_{M_i}}^{R_P}$ correspond à la description de la géométrie de la ligne de joint $\mathcal{L}$ dans le repère R_P.
- $\overrightarrow{PM}_{i\,(s_i)}$ [m] est la position du repère local R_{Mi} exprimé dans le repère R_P.

La géométrie de $\mathcal{L}$ est alors définie dans le repère R_0. Il faut maintenant définir la position « théorique » de l'outil en chaque point (M_i, s_i). La tâche ou la trajectoire théorique de l'outil sera alors définie par rapport au repère R_0.

Position théorique de l'outil par rapport $\mathcal{L}$

Au cours de l'opération de soudage, le repère de l'outil doit être positionné par rapport au repère R_{Mi} pour chaque point M_i d'abscisse curviligne s_i, comme cela est présenté dans le chapitre 2.

Afin de distinguer la position et l'orientation du repère R_O associé à l'outil, monté au bout du bras du robot, nous posons $R_{O\ Théorique}$ (O_T, $\underline{x}_{OT}$, $\underline{y}_{OT}$, $\underline{z}_{OT}$) qui définit, par rapport à R_{Mi}, la position et l'orientation théorique de l'outil, en chaque point (M_i, s_i). La démarche est illustrée sur la Figure 155.

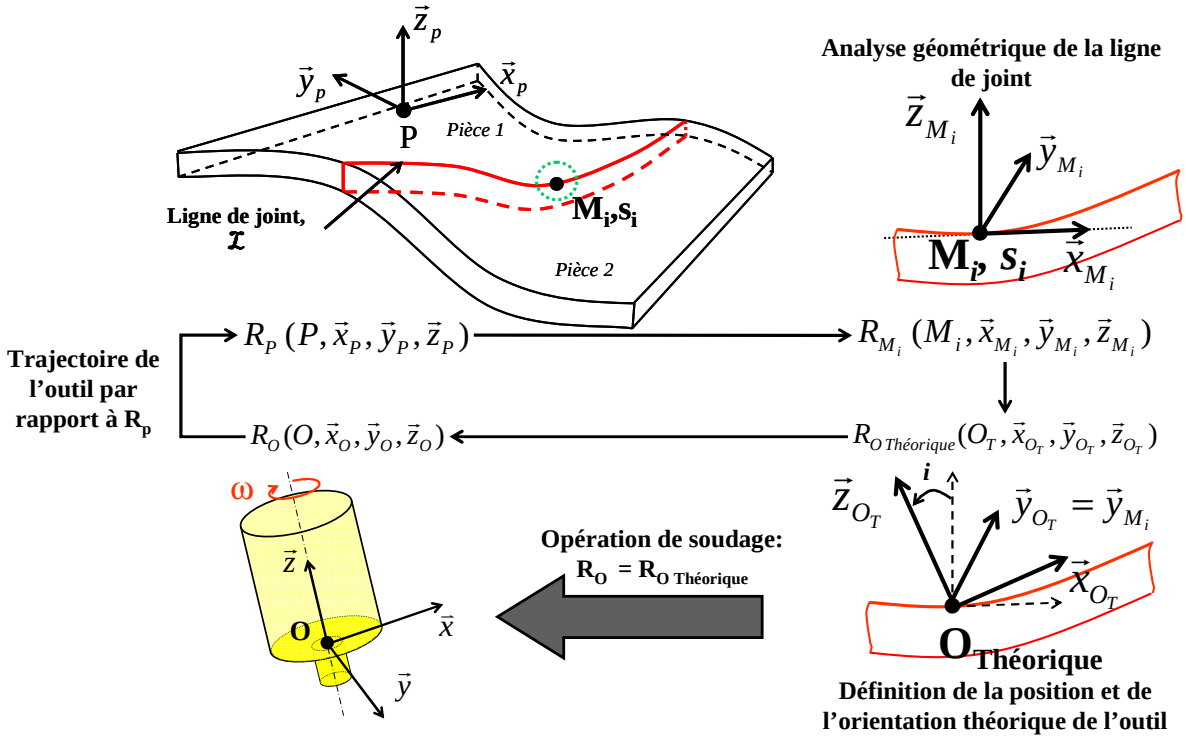


Figure 155: Cheminement pour mettre en place la trajectoire par rapport à la ligne de joint

Ainsi, les positions et les orientations de $R_{O\,Théorique}$ par rapport à R_{Mi} sont décrites par :

$$\left[\begin{array}{ccc|c} \multicolumn{3}{c|}{M^{R_{M_i}}_{R_{O_{Théorique}}}} & \overrightarrow{M_i O_{Théorique}}_{(R_{M_i})} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] = \mathbf{D}\,(X_{OT}, Y_{OT}, Z_{OT}, \alpha, \beta, \gamma) \qquad (52)$$

Avec :

- $M^{R_{M_i}}_{R_{O_{Théorique}}}$ l'orientation de l'outil exprimée par rapport au repère R_{Mi}.

- $\overrightarrow{M_i O_{Théorique}}$ [m] est la position du repère local $R_{O\,Théorique}$ exprimé dans le repère R_{Mi}

Remarque : Généralement, la position et l'orientation du repère $R_{O\,Théorique}$ doivent rester identiques par rapport à la ligne de joint. Ainsi, la matrice de passage entre R_{Mi} à $R_{O\,Théorique}$ n'est pas évolutive le long de $\mathcal{L}$. Ainsi, les angles α, β, γ sont des constantes.

La trajectoire théorique que doit suivre l'outil en cours du soudage est définie par cinq composantes (trois pour la position de l'outil, deux pour son orientation). Ainsi, en chaque lieu de soudage, R_O (O, $\underline{x}$, $\underline{y}$, $\underline{z}$) doit être confondu avec $R_{O\,Théorique}$ (O_T, $\underline{x}_{OT}$, $\underline{y}_{OT}$, $\underline{z}_{OT}$). Ainsi nous pouvons déterminer la trajectoire de l'organe terminal de la machine FSW.

2.2.2. Détermination de la trajectoire de l'outil

Les positions et les orientations de l'outil en bout du bras de robot en chaque point (M_i, s_i) sont données par l'équation (53). Cette équation est composée de deux parties, l'une correspondant à la tâche à réaliser qui est définie et connue, l'autre correspond à la position de l'effecteur qui reste à déterminer. Pour y parvenir, il faut résoudre un système d'équations non linéaires.

$$\underbrace{\left[\begin{array}{c|c} M_{R_O}^{R_0} & \overrightarrow{O_0O_{(R_0)}} \\ \hline 0\quad 0\quad 0 & 1 \end{array}\right]}_{\text{Position et orientation de l'outil}} = \underbrace{\left[\begin{array}{c|c} M_{R_P}^{R_0} & \overrightarrow{O_0P_{(R_0)}} \\ \hline 0\quad 0\quad 0 & 1 \end{array}\right]}_{\text{Position des pièces à souder dans l'espace de travail}} \bullet \underbrace{\left[\begin{array}{c|c} M_{R_{M_i}}^{R_P} & \overrightarrow{PM_{i\,(R_P)}} \\ \hline 0\quad 0\quad 0 & 1 \end{array}\right]}_{\text{Description de la géométrie à souder}} \bullet \underbrace{\left[\begin{array}{c|c} M_{R_{O_{Théorique}}}^{R_{M_i}} & \overrightarrow{M_iO_{Théorique\,(R_{M_i})}} \\ \hline 0\quad 0\quad 0 & 1 \end{array}\right]}_{\text{Position « théorique », locale, de l'outil par rapport à la ligne de joint}} \quad (53)$$

A DETERMINER ***Définition de la tâche == CONNUE***

Les positions angulaires de chaque articulation du robot vont être définies par l'équation (7) :

$$A(\theta_{01},\theta_{12},\theta_{23},\theta_{34},\theta_{45}) = B(X_P,Y_P,Z_P,\alpha_P,\beta_p,\gamma_P)\cdot C(s_i)\cdot D(X_{O_T},Y_{O_T},Z_{O_T},\alpha,\beta,\gamma) \quad (54)$$

Ces équations, (53) et (7), caractérisent l'opération géométriquement, c.à.d. sans notion de cinématique. Celle-ci intervient à travers la vitesse d'avance, v_a et la fréquence de rotation. En dérivant la trajectoire au cours du temps, on obtient :

$$\dot{A} = B\cdot\frac{dC}{ds}\cdot D\cdot v_a \quad (55)$$

Cette équation va gouverner les vitesses angulaires à chaque articulation du robot afin de respecter la cinématique à imposer sur l'outil pour que celui-ci conserve une bonne orientation et position par rapport à R_{Mi}.

Nous venons de définir la trajectoire de l'outil au sein de l'espace de travail par rapport au repère R_0. Cette démarche peut être appliquée à toutes machines de FSW.

A partir de schémas cinématiques paramétrés, le modèle de l'ensemble pièces à souder et machine de soudage vient d'être défini. Il va nous permettre de procéder à la qualification du moyen de production.

2.3. Valider le moyen de production FSW choisi : un robot polyarticulé six axes

Pour valider un moyen de production FSW, nous avons identifié quatre actions présentées dans le diagramme IDEF-0 de la Figure 145. Nous allons les reprendre une à une.

2.3.1. Calculer et vérifier si la trajectoire peut être suivie

Il faut vérifier si toutes les positions et orientations peuvent être atteintes, c.à.d. que les positions angulaires requises à chaque articulation du robot appartiennent à leurs plages de mouvement. La plage de mouvement avait été définie dans le Tableau 16. Cela valide l'opération géométriquement. La détermination des angles θ_{j-1j} (j compris entre 1 et 6) en chaque point (M_i, s_i) est obtenue par la résolution de l'équation (54).

Si cette condition est remplie pour l'ensemble de la trajectoire, l'opération peut alors être effectuée géométriquement parlant.

Après avoir résolu le problème géométrique, il faudra résoudre le problème cinématique et s'assurer que l'évolution des angles $\theta_{j-1\ j}$ le long de la ligne de joint soit continue.

2.3.2. Calculer des actions mécaniques appliquées par chaque actionneur

Nous abordons ce problème d'un point de vue statique. Etant donné que les vitesses de soudage en FSW sont relativement faibles, l'erreur commise par la simplification d'un problème de dynamique en une succession d'équilibres statiques ne doit pas générer d'erreurs trop importantes. Par contre, cette hypothèse sera à remettre en cause dans le cas d'une accélération des mouvements des articulations (une vitesse de soudage faible n'est pas toujours synonyme de faible vitesse articulaire des solides du robot). Cette première approche permet d'estimer la faisabilité de l'opération de soudage par un moyen de production à capacités restreintes.

Pour chaque point (M_i, s_i) de la trajectoire, le torseur des actions mécaniques appliqués sur l'outil et la position articulaire (θ_{01}, θ_{12}, θ_{23}, θ_{34}, θ_{45}) prisent par le robot sont connus. De même le poids de chaque articulation ainsi que son centre d'application sont connus. Les données nécessaires pour un calcul des couples en chaque axe, avec le principe fondamental de la statique, peut être effectué.

Application du principe fondamental de la statique

La première des choses est d'isoler le système étudié. Pour calculer le couple $C_{j-1\ j}$ on isole les solides compris entre le solide j et le solide 6. Les efforts extérieurs s'appliquant à notre système sont :

- le torseur des actions mécaniques appliquées par la matière sur l'outil,
- les torseurs liés au poids de chaque solide appliqués au centre de masse,
- les actions mécaniques appliquées sur la liaison isolée comprise entre les Solides S_{j-1} et le Solides $_j$) par les solides situés en aval :

En appliquant le principe fondamental pour l'articulation comprise entre les Solides j-1 et j on obtient l'expression donnée sur l'équation (56) :

$$\left\{\mathcal{T}_{\text{Matière / Outil}}\right\} + \sum_{r=j-1}^{r=6}\left\{\mathcal{T}_{\text{Poids Solide r}}\right\} + \left\{\mathcal{T}_{\text{Solide j-1 / Solide j}}\right\} = \mathbf{0} \tag{56}$$

En écrivant la somme des moments appliqués sur le solide isolé au centre de l'articulation, on obtient :

$$\overrightarrow{M_{j-1\,j\,O_j}} = \overrightarrow{M_{Matière/Outil\,O_j}} + \overrightarrow{O_jO} \times \overrightarrow{R_{Matière/Outil}} + \sum_{r=j}^{6} -m_{Solide\,r} \times g\,\vec{z}_0 \times \overrightarrow{O_jG_r} \tag{57}$$

Pour obtenir le couple appliqué au motoréducteur, il faut projeter le moment $\underline{M}_{j\,j+1}$ sur l'axe de rotation de la liaison pivot. L'équation (58) présente l'expression de $C_{j\,j+1}$:

$$C_{j-1j} = \overrightarrow{M_{j-1\,j\,O_j}} \cdot \vec{d}_{j-1\,j} \tag{58}$$

2.3.3. Comparer les actions mécaniques calculer avec celles admissibles

Pour que l'opération de soudage soit réalisable avec le robot, il faut qu'à chaque point (M_i, s_i) les couples appliqués aux axes restent inférieurs aux couples admissibles, c.à.d. que l'inégalité de l'équation (59) soit respectée :

$$C_{j-1\,j} < C_{j-1\,j\;admissble} \tag{59}$$

Si cette inégalité n'est pas respectée en cours de soudage, le système de sécurité du robot stoppera l'opération.

2.3.4. Qualifier le moyen de production

Si l'ensemble des positions et des orientations peuvent être atteintes et si pour chacune d'entres elles les couples appliqués aux axes restent inférieurs aux couples admissibles, alors l'opération est réalisable d'un point de vue statique.

Lorsque l'analyse démontre que l'opération n'est pas réalisable statiquement alors, on peut modifier les paramètres suivants :

- Les paramètres de conduite de l'opération. Ceci peut s'effectuer en sélectionnant d'autres paramètres de conduite dans le DSO générant des actions mécaniques moins élevées.
- En modifiant la position et l'orientation des pièces au sein de l'espace de travail. Il peut ainsi être intéressant de « scanner » à l'aide d'un outil numérique si une autre position et orientation des pièces dans l'espace de travail conduiraient à la faisabilité de l'opération.
- Changer la géométrie de l'outil.

Nous venons de décrire la méthodologie pour qualifier un moyen de production appliquée à un robot polyarticulé. Elle s'appuie sur la mise en place d'un modèle permettant de vérifier si le moyen de production choisi permet d'assurer la trajectoire de l'outil et d'appliquer / subir les actions mécaniques outil / pièces.

La validation géométrique et cinématique fait ressortir séparément les positions articulaires du robot, la position de la pièce dans l'espace du robot, la géométrie de la pièce à souder et les paramètres opératoires au travers de la position et l'orientation locales de l'outil.

La validation statique correspond à vérifier que les couples aux articulations sont inférieurs à la capacité maximale des actionneurs associés.

Cette première validation statique nous permet d'estimer la faisabilité de l'opération. Si celle-ci ne peut être réalisée, deux leviers d'actions ont été identifiés. L'un d'entre eux est de choisir une autre combinaison de paramètres opératoires. Expérimentalement, nous ne disposons que de points du domaine de soudabilité opératoire. Ne serait-il pas possible de déterminer l'intensité des actions mécaniques pour d'autres points du domaine non testés ? Regardons la possibilité de faire passer une surface réponse, à partir de modèles polynomiaux, au sein des plages de fonctionnement identifiées dans le chapitre 3 pour les phases de plongée et de soudage.

3. Applications

3.1. Détermination d'une relation entre C_z, F_x et F_y et les paramètres de conduite

Est-il possible de déterminer l'amplitude du couple C_z et des efforts F_x et F_y pour toutes combinaisons de paramètres opératoires (N, v_a, F_z) appartenant aux plages de fonctionnement ? Pour ce faire regardons s'il est possible de trouver une expression polynomiale permettant de déterminer l'intensité des grandeurs de sortie en fonction de N, v_a et de F_z et d'estimer l'erreur commise.

Quelques travaux dans la littérature parlent d'analyses réalisées à partir de plans d'expérience [EIR06, SPE01, REC05]. Ils travaillent tous avec un contrôle en position de l'opération de soudage. Selon Record [REC05] les réponses entre les paramètres d'entrée et de sortie ne sont pas linéaires, la réponse serait quadratique. De même, Eireiner [EIR06] annonce une bonne précision entre les résultats donnés par le modèle et les résultats expérimentaux. Par contre, aucun de ces auteurs n'a travaillé que sur la phase de plongée.

Nous allons essayer de regarder si nous pouvons utiliser une relation polynomiale pour modéliser nos résultats expérimentaux. Ceci permettra de savoir s'il est possible d'estimer les grandeurs de sorties pour n'importe quel point appartenant au domaine de fonctionnement. Nous posons donc l'hypothèse de convexité des domaines de soudabilité opératoires.

Pour modéliser les grandeurs de sorties nous allons utiliser l'expression polynomiale présentée à l'équation (60). On suppose alors que les effets et les interactions entre les paramètres agissent linéairement et qu'ils sont additifs [SAV06].

$$y = y_0 + \sum_i a_i \times x_i + \sum_i \sum_j a_{ij} \times x_i \times x_j + ... \quad \text{[SAV06]} \tag{60}$$

Ainsi, la méthodologie des plans d'expériences va être appliquée aux plages de fonctionnement déterminées précédemment.

3.1.1. La phase de plongée

Pour la phase de plongée, nous avons étudié l'influence de la fréquence de rotation N_p et de la vitesse de plongée v_p sur les valeurs de $F_{z\ max}$ et de $C_{z\ max}$ obtenues en fin de plongée. Les résultats avaient montré une forte influence de N_p sur les valeurs de $C_{z\ max}$, tandis que F_{z_max} semblaient être fonction de v_p et de N_p.

La Figure 156 présente la campagne expérimentale réalisée. A partir d'un point de référence, une variation de ±33% et de ±66% des paramètres opératoires initiaux $N_{p\text{-}0}$ et $v_{p\text{-}0}$ ont été effectuées. Sur ce plan d'expérience trois points ont été ajoutés, à la droite du domaine étudié (pour v_p = 45mm/min).

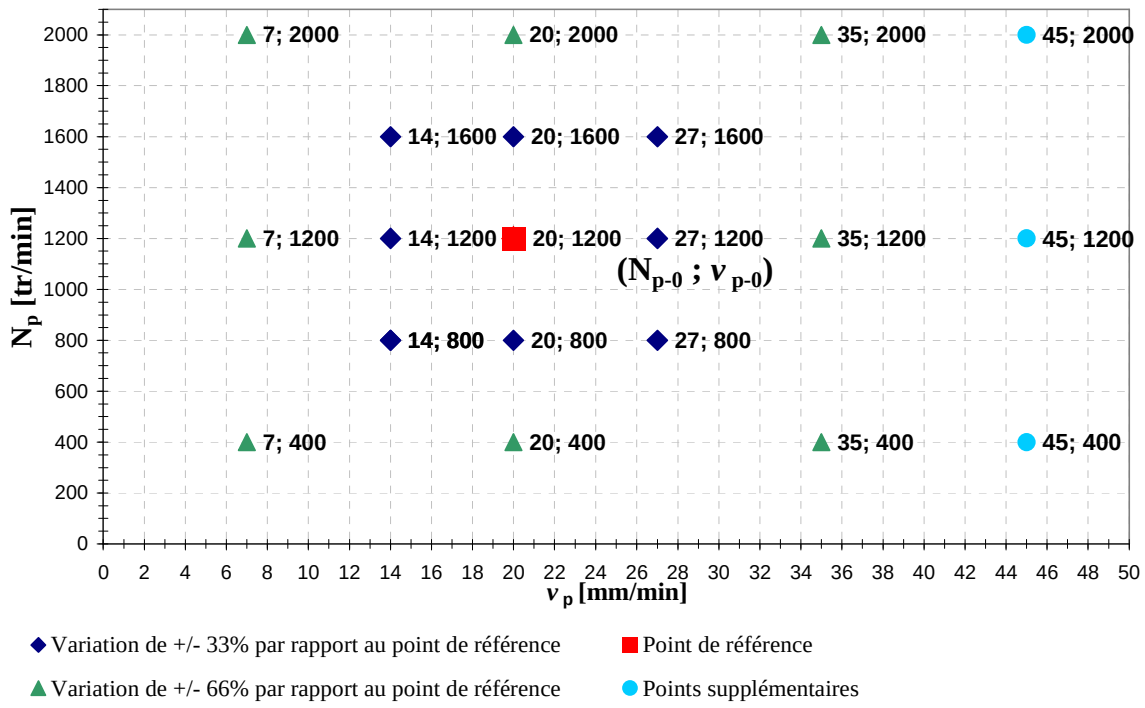


Figure 156: Domaine expérimental sur lequel l'étude des plans d'expérience a été réalisée

Pour ces paramètres, nous avons modélisé les efforts et les couples à partir d'un modèle polynomiale linéaire, présenté aux équations (61), (62), et un modèle du second ordre présenté aux équations (63) et (64)).

Nous allons regarder quelles sont les erreurs commises par ces modèles et si l'estimation du modèle linéaire est suffisante.

Modèles polynomiaux linéaire :

$$F_{z\,calculé} = F_0 + A \times N_p^{\ *} + B \times v_p^{\ *} \tag{61}$$

$$C_{z\,calculé} = C_0 + O \times N_p^{\ *} + P \times v_p^{\ *} \tag{62}$$

Modèles polynomiaux du second ordre :

$$F_{z\,calculé} = F_0 + A \times N_p^{\ *} + B \times v_p^{\ *} + C \times N_p^{\ *} \times v_p^{\ *} + D \times N_p^{\ *} \times N_p^{\ *} + E \times v_p^{\ *} \times v_p^{\ *} \tag{63}$$

$$C_{z\,calculé} = C_0 + O \times N_p^{\ *} + P \times v_p^{\ *} + Q \times N_p^{\ *} \times v_p^{\ *} + R \times N_p^{\ *} \times N_p^{\ *} + S \times v_p^{\ *} \times v_p^{\ *} \tag{64}$$

Pour que les valeurs de N_p et de v_p ne viennent pas interférer les résultats, elles ont été homogénéisées de telle sorte à être chacune comprise entre -1 et 1. Les relations entre les valeurs homogénéisées, surmontées d'une étoile, et les valeurs réelles sont les suivantes :

$$N_p^{\ *} = \frac{2 \times N_p}{N_{p\max} - N_{p\min}} - \frac{N_{p\max} + N_{p\min}}{N_{p\max} - N_{p\min}} \tag{65}$$

$$v_p^{\ *} = \frac{2 \times v_p}{v_{p\max} - v_{p\min}} - \frac{v_{p\max} + v_{p\min}}{v_{p\max} - v_{p\min}} \tag{66}$$

Les coefficients des équations (61), (62), (63) et (64) ont été déterminées à partir des valeurs N_p^* et v_p^*.

Modèle polynomial retenu

Les coefficients des équations (61), (62), (63) et (64) ont été estimés avec le critère de résolution suivant : minimisation de l'erreur maximale. Nous avons choisi ce critère, car les valeurs moyennes obtenues sont plus proches des valeurs mesurées, comparées à l'utilisation du critère minimisant la somme des écarts aux carrés. La différence est de l'ordre de 5% à 10% sur les erreurs maximales et moyennes obtenues.

Le Tableau 18 présente l'estimation de l'erreur obtenue avec les deux modèles polynomiaux.

Pour l'analyse de la phase de plongée, nous retiendrons le modèle linéaire, car il est plus facile d'exprimer les grandeurs $C_{z\,max}$ et $F_{z\,max}$ en fonction des paramètres opératoires.

A

$F_{z\ max\ calculée}$	Erreur [%]		
	Max	Min	Moy
Modèle linéaire	**15**	**1**	**9**
Modèle d'ordre 2	**12.5**	**0.3**	**7**

B

$C_{z\ max\ calculée}$	Erreur [%]		
	Max	Min	Moy
Modèle linéaire	**5**	**0.2**	**2.5**
Modèle d'ordre 2	**1.2**	**0.04**	**0.8**

Tableau 18: Estimation de l'erreur obtenue avec deux modèles polynomiaux. A- Pour les valeurs de $F_{z\ max}$. B - Pour les valeurs de $C_{z\ max}$

Détermination des plages de fonctionnement en plongée du robot polyarticulé

Les coefficients des équations (61) et (62), permettant de déterminer $C_{z\ max\ calculé}$ et $F_{z_max_calculé}$, sont données dans le Tableau 19.

A

$F_{z\ 0}$	A	B
20.3	-3.3	7.1

B

$C_{z\ 0}$	O	P
71.2	-19.6	4.9

Tableau 19: Coefficients de l'expression polynomiale. A- pour les valeurs de $F_{z\ max}$ en fonction de N_p et de v_p B- pour les valeurs de $C_{z\ max}$ en fonction de N_p et de v_p

Ces équations vont permettre de tracer, au sein de la plage de fonctionnement, les droites correspondant aux limites machines, en termes de couple et d'effort maximums. Les équations sont les suivantes :

$$F_{z\max\ broche} = F_0 + A \times N_p^{\ *} + B \times v_p^{\ *} \qquad (67)$$

$$C_{z\max\ broche} = C_0 + O \times N_p^{\ *} + P \times v_p^{\ *} \qquad (68)$$

Avec :

- $F_{z\ max\ broche}$, l'effort maximal admissible à la broche. Le constructeur donne 15kN. Au chapitre 3, une variabilité de 20% sur les valeurs mesurées de $F_{z\ max}$, avait été présentée. Celle-ci doit être prise en compte dans le dimensionnement. L'erreur maximale du modèle polynomiale est estimée à 15%. Ainsi, en prenant en compte la variabilité et l'erreur du modèle, nous prendrons pour $F_{z\ max\ broche}$ une valeur de 9,75kN (15kN - 35%).

- $C_{z\ max\ broche}$, le couple maximal admissible à la broche. Le constructeur donne 60Nm. Au chapitre 3, une faible variabilité, de 3%, avait été visualisée. L'erreur maximale du modèle

polynomiale sur $C_{z\ max\ calculé}$ est de 5%. Ainsi, pour le dimensionnement de la broche, nous prendrons pour $C_{z\ max\ broche}$ 55,2Nm (60Nm - 8%)

En traçant dans la plage de fonctionnement, les deux droites $F_{z\ max\ broche}$ = 9.75kN et $C_{z\ max\ broche}$ = 55,2Nm en fonction de v_p, ainsi que la limite en fréquence de rotation de la broche, on obtient la plage de fonctionnement accessible par notre machine. Celle-ci est présentée sur la Figure 157. Pour le robot polyarticulé de notre étude, cette plage est très petite, elle se situe hors du domaine étudié expérimentalement. Il faut donc extrapoler le domaine étudié avec le modèle.

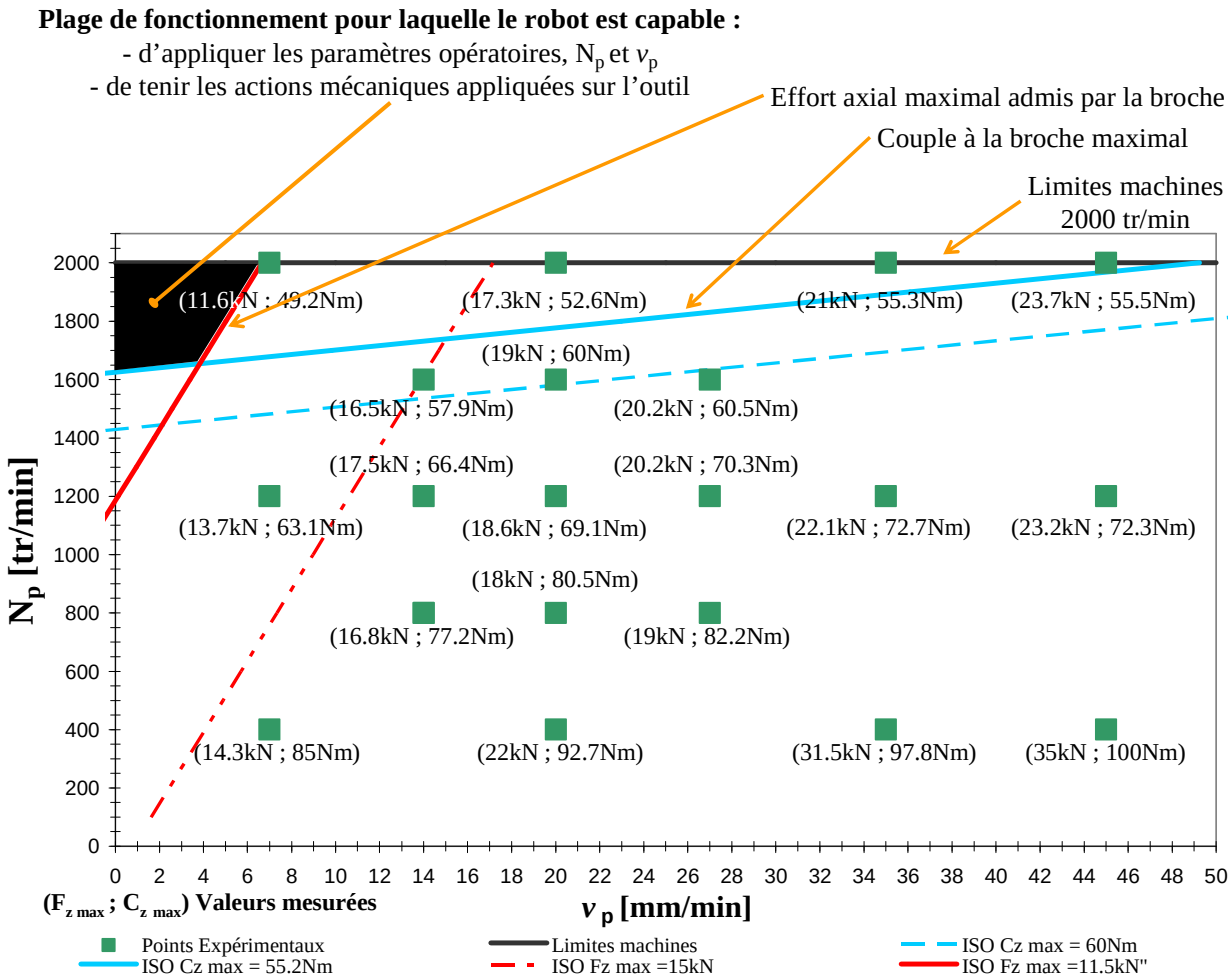


Figure 157: Plage de fonctionnement avec les limites machines représentées

Remarque 1 : le point expérimental v_p = 7mm/min et N_p=2000tr/min, pourrait être utilisé, car $F_{z\ max}$ = 11,6kN et $C_{z\ max}$ =49,2Nm. Ce point, même en tenant compte des variabilités des mesures, conduit à des valeurs inférieures aux limites machines. Si celui-ci n'est pas compris dans le domaine défini par les droites issues des modèles polynomial, c'est parce que l'erreur maximal de calcul a été prise en compte.

Remarque 2 : si aucun des points du domaine n'est accessible par le robot, l'opération de plongée pourra être pilotée en effort. Les paramètres opératoires sont alors : un effort F_z constant appliqué et la fréquence de rotation. L'avantage est de

contrôler un des paramètres du dimensionnement, F_z. Par contre, les équations développées ci-dessus ne sont plus applicables.

Regardons maintenant la phase de soudage à vitesses constantes.

3.1.2. La phase de soudage à vitesses constantes

Pour les essais réalisés au cours de la phase de soudage, on s'intéresse au domaine de soudabilité opératoire établi sur le critère de la compacité de la soudure. Comme l'opération est pilotée en effort, nous allons modéliser en fonction de N, v_a et F_z :

- le couple C_z moyen à la broche,
- les efforts F_x et F_y moyens.

La recherche de l'équation polynomiale permettant de calculer les valeurs moyennes de C_z, F_x et F_y sur la phase de soudage a été déterminée sur l'ensemble des points de fonctionnement aboutissants à une soudure compacte. Tout comme pour la phase de plongée, nous avons linéarisé les valeurs des paramètres de conduite pour obtenir des valeurs comprises entre -1 et 1 comme précédemment.

Nous allons regarder quelles sont les erreurs commises par les modèles polynomiales du premier et du second ordre. Le Tableau 20 présente l'estimation de l'erreur obtenue avec les deux modèles polynomiaux pour les valeurs moyennes de C_z et F_x et F_y. Les erreurs moyennes des deux modèles sont proches, et pour des raisons de simplification des calculs, nous utiliserons le modèle polynomial linéaire :

$$F_{x\,moy\,calculé} = F_{x0} + A \times N^* + B \times v_a^* + C \times F_z^* \quad (69)$$

$$F_{y\,moy\,calculé} = F_{y_0} + D \times N^* + E \times v_a^* + F \times F_Z^* \quad (70)$$

$$C_{z\,moy\,calculé} = C_0 + O \times N^* + P \times v_a^* + Q \times F_z^* \quad (71)$$

A

$C_{z\ moy\ calculé}$	Erreur [%]		
	Max	Min	Moy
Modèle linéaire	**4.5**	**0.23**	**2.3**
Modèle d'ordre 2	**1.88**	**0.3**	**1.5**

B

$F_{x\ moy\ calculé}$	Erreur [%]		
	Max	Min	Moy
Modèle linéaire	**24.5**	**2**	**14.5**
Modèle d'ordre 2	**18.5**	**0.6**	**11.6**

C

$F_{y\ moy\ calculé}$	Erreur [%]		
	Max	Min	Moy
Modèle linéaire	**35**	**0.42**	**22.7**
Modèle d'ordre 2	**30**	**4.3**	**17.4**

Tableau 20: Erreurs maximales, minimales et moyennes relevées entre les valeurs mesurées et calculées. A - Pour le couple moyen, B- Pour l'effort F_x moyen et C - Pour l'effort F_y moyen

Tout comme pour la phase de plongée, le critère utilisé pour déterminer les coefficients des relations polynomiales est le critère minimisant la somme des écarts aux carrés.

Remarque : le modèle d'ordre 2 ne semble pas apporter d'amélioration significative par rapport au modèle linéaire. Par contre, il serait intéressant de rechercher d'autres fonctions d'interpolation.

Détermination des plages de fonctionnement en soudage du robot polyarticulé

Les coefficients des équations (2), permettant de déterminer $C_{z\ moycalculé}$, $F_{x_moy_calculé}$ et $F_{y\ moy\ calculé}$, sont données à dans Tableau 21.

A

$C_{z\ 0}$	O	P	Q
62.5	-7.7	0.9	4

B

$F_{x\ 0}$	A	B	C
1.33	-0.24	0.66	-0.02

C

$F_{y\ 0}$	D	E	F
0.74	0.28	0.08	0.24

Tableau 21: Coefficients de l'expression polynomiale. A- pour les valeurs de $F_{z\ max}$ en fonction de N_p et de v_p B- pour les valeurs de $C_{z\ max}$ en fonction de N_p et de v_p

Les équations (69), (70) et (71) vont permettre de tracer, au sein de la plage de fonctionnement, les droites correspondant aux limites machines, en termes de couple et d'efforts F_x et F_y maximums. Les équations sont les suivantes :

$$F_{y\,\max\,\text{broche}} = F_{y\,0} + D \times N^* + E \times v_a^{\,*} + F \times F_z^{\,*} \tag{72}$$

$$F_{x\,\max\,\text{broche}} = F_{x\,0} + A \times N^* + B \times v_a^{\,*} + C \times F_z^{\,*} \tag{73}$$

$$C_{z\,\max\,\text{broche}} = C_{z\,0} + O \times N^* + P \times v_a^{\,*} + Q \times F_z^{\,*} \tag{74}$$

Avec :

- $F_{x\ \max\ \text{broche}}$ et $F_{y\ \max\ \text{broche}}$ les efforts maximums admissibles par la broche dans le plan (O, x, y). Le constructeur donne 5kN dans chacune des directions. En prenant en compte l'erreur de calcul du modèle, nous prendrons pour $F_{x\ \max\ \text{broche}}$ et $F_{y\ \max\ \text{broche}}$ 3kN (5kN - 35%).

- $C_{z\ \max\ \text{broche}}$ le couple maximal admissible à la broche. Avec une variabilité de 3% des valeurs mesurées et une erreur de 4,5% du modèle, nous prendrons pour $C_{z\ \max\ \text{broche}}$ 55,2Nm.

Traçons les caractéristiques limites de la machine dans les plages de fonctionnement (v_a, F_z) pour N constant. Ceci nous permet d'associer pour une fréquence de rotation, un des paramètres prépondérant pour le dimensionnement, F_z, et le paramètre conditionnant la durée de l'opération de soudage v_a. En traçant dans la plage de fonctionnement, la droite $C_{z\ \max\ \text{broche}}$ = 55,2Nm en fonction de v_a et de N, ainsi que la limite en fréquence de rotation de la broche, on obtient la plage de fonctionnement atteignable par notre machine.

Les efforts F_x et F_y ne sont dans notre cas pas limitatifs car les valeurs calculées restent inférieurs à 3kN. C'est pourquoi, leurs droites n'apparaissent pas dans le domaine étudié.

Remarque : dans notre étude, les efforts F_x et F_y moyens ont été considérés. Il faudrait prendre en considération dans le cadre d'un dimensionnement les valeurs maximales de ces efforts.

La Figure 158-A et B présentent les plages de fonctionnement pour le robot polyarticulé de notre étude avec les limites machines. Nous faisons l'hypothèse que tous les points de cette zone appartiennent au domaine de soudabilité opératoire. Nous supposons ainsi le DSO convexe.

Sur la Figure 158-A, la droite ISO C_z =55,2Nm ne coupe pas la zone du DSO étudié lorsque N=1300tr/min. De même, pour le domaine à N =800tr/min, car le couple à broche est toujours supérieur à 60Nm.

Sur la Figure 158-B une zone du DSO étudié atteignable par la machine peut être identifiée. Ainsi, pour N=1800tr/min, nous disposons une gamme d'effort et de vitesse d'avance admissible par le robot polyarticulé.

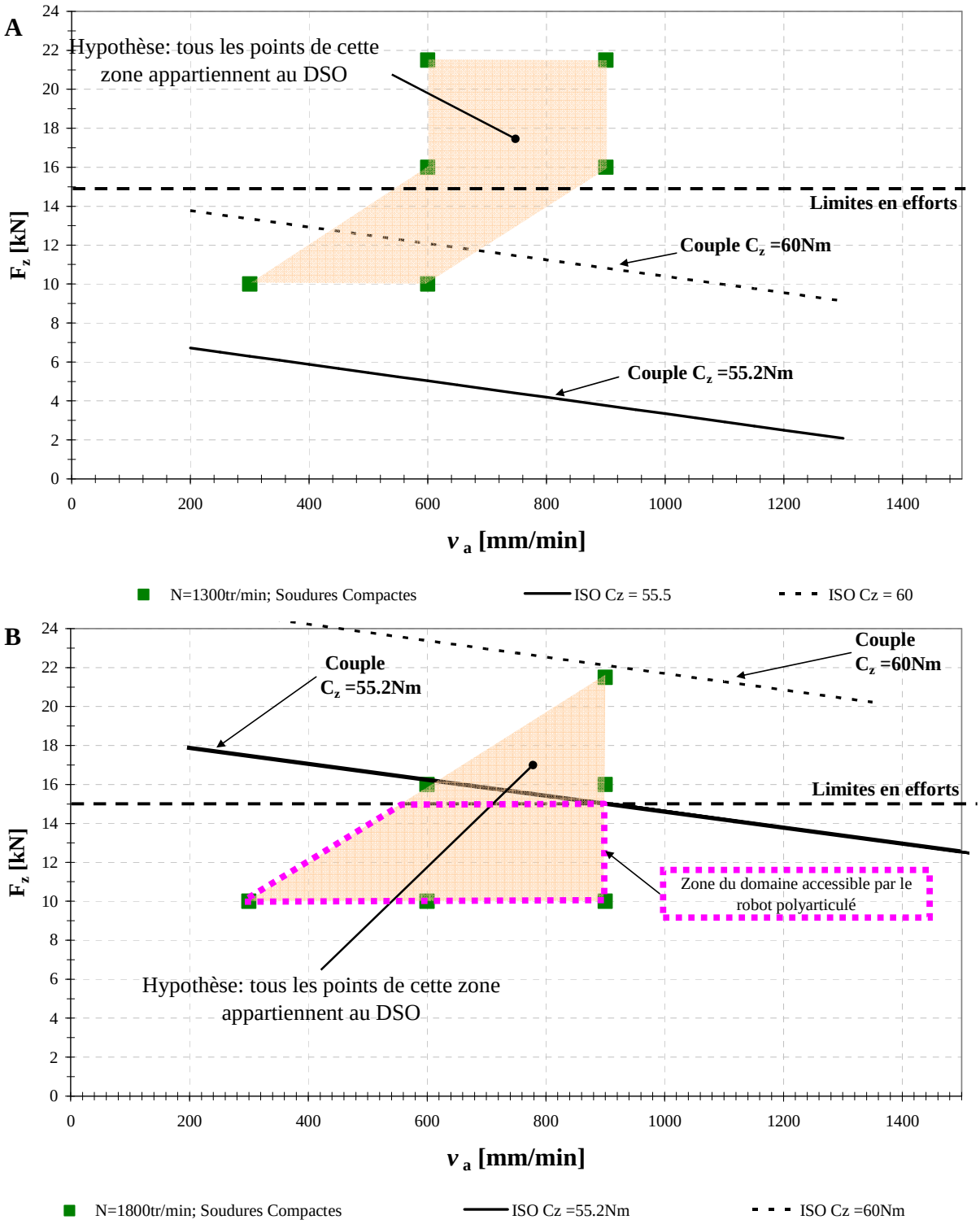


Figure 158: Plages de fonctionnement en soudage et caractéristiques du moyen de production. A- Pour N=1300tr/min et B- Pour N=1800tr/min

Les résultats obtenus ont montré qu'il était possible d'obtenir des surfaces réponses relativement fiables entre les paramètres de conduite et les actions mécaniques pour les phases de plongée et de soudage à vitesses constantes.

Les expressions polynomiales obtenues permettent maintenant de tracer les limites en efforts de la machine choisie dans le domaine de soudabilité opératoire. Les zones du domaine accessible par la machine peuvent alors être identifiées. Ceci permet de choisir en fonction de la qualité de la machine et de ses capacités les paramètres opératoires de l'opération de soudage.

3.2. Deux configurations de soudage

Les domaines de fonctionnement, accessibles par la broche montée sur le robot, ont été identifiés pour les phases de plongée et de soudage à vitesses constantes. Nous allons utiliser ces résultats pour choisir les paramètres de conduite et déterminer l'aptitude du robot à réaliser l'opération de soudage. Les limites machines identifiées correspondent aux limites de la broche de soudage et non à l'ensemble du système car il n'est pas possible de sortir de manière directe les limites du robot polyarticulé dans le domaine de soudabilité. En effet, les capacités du robot dépendent non seulement des actions mécaniques appliquées sur l'outil mais également de sa position.

Nous allons étudier la faisabilité de l'opération de plongée dans quelques positions dans l'espace de travail, puis nous regarderons la faisabilité de la réalisation d'un cordon de soudure de 300mm dans deux positions de l'espace de travail.

3.2.1. Soudage par points

Le principe est identique à celui du soudage FSW classique, comme le montre la Figure 159. Pour le soudage de tôles par recouvrement, l'outil FSW en rotation est inséré dans ces deux tôles. Une fois l'épaulement parfaitement en contact avec les deux pièces, l'outil continue de tourner pendant un temps donné. Le flux de matière vertical, créé autour du pion, permet de former une liaison entre les pièces (Figure 159). Une fois l'opération terminée, l'outil est retiré de l'empreinte. Cela s'apparente donc à une opération de plongée suivie d'un temps de maintien long. Les principaux paramètres opératoires sont identiques à cette phase, conditionnant les actions mécaniques appliquées par l'outil sur les pièces.

Ainsi, les données collectées sur la phase de plongée permettent le dimensionnement d'une machine FSW dédiée au soudage par points.

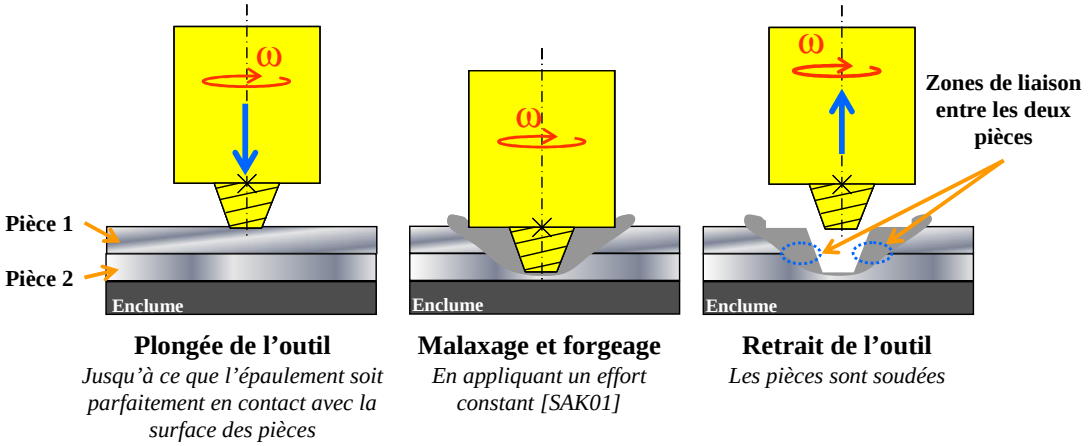


Figure 159: Schématisation d'une opération de soudage par point [BAD07]

Nous souhaitons réalisés quatre points dans l'espace de travail alignés suivant l'axe (O, $\underline{x}_0$). Ils sont à 1000, 1300, 2000 et 2300mm de la base du robot. La Figure 160 schématise l'opération à réaliser. L'objectif est de déterminer à l'aide des plages de fonctionnement présentées ci-dessus les paramètres conduisant à $v_{p\ max}$ afin de favoriser la productivité de l'opération.

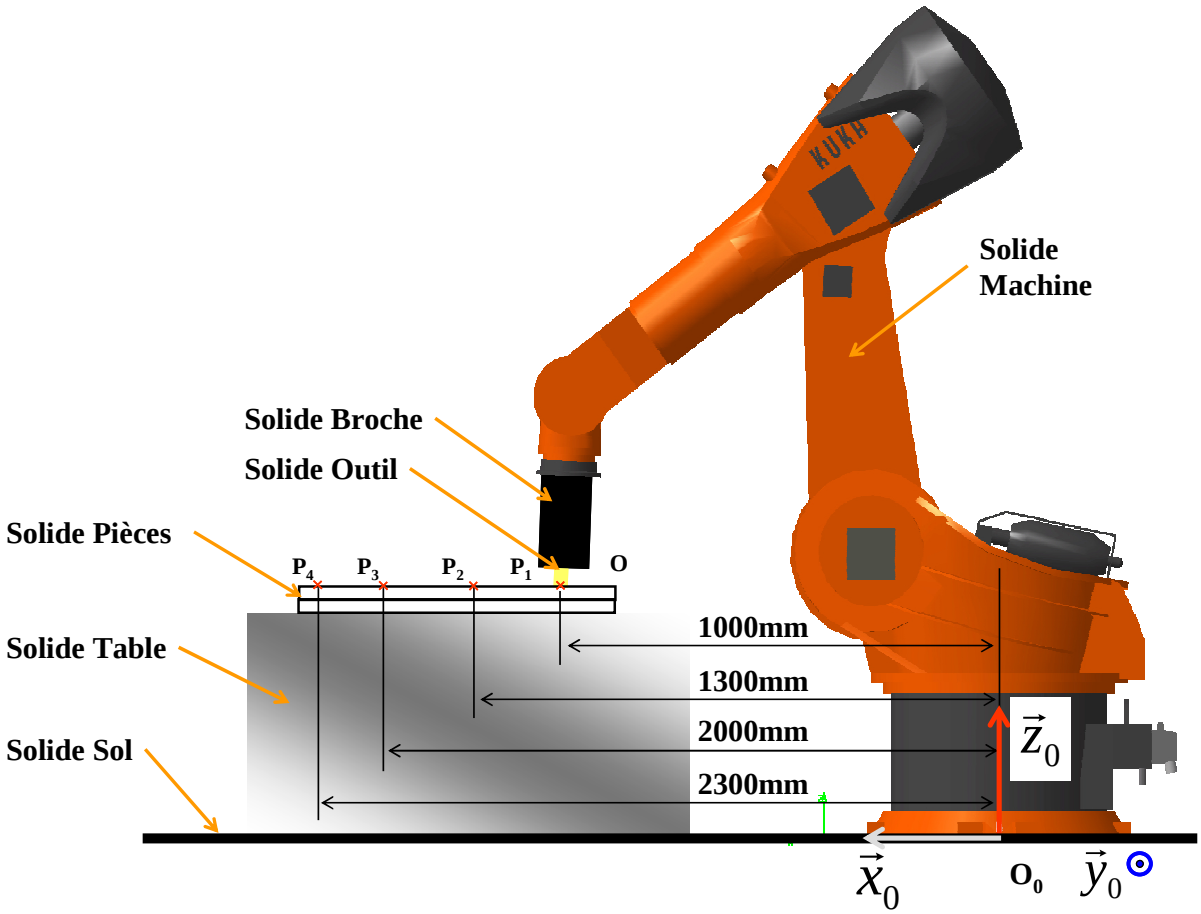


Figure 160: Schématisation de la réalisation du soudage par points avec un robot polyarticulé. Quatre points sont réalisés, à 1000, 1300, 2000 et 2300mm

Les positions de ces quatre points dans l'espace de travail sont données au Tableau 22.

	Position de l'origine outil		
Position	**X**	**Y**	**Z**
1	**1000**	**76.6**	**1334.3**
2	**1300**	**76.6**	**1334.3**
3	**2000**	**76.6**	**1334.3**
4	**2300**	**76.6**	**1334.3**

Tableau 22 : Position dans l'espace de travail des quatre points de soudage

Détermination des positions angulaires du robot

A l'aide du logiciel Delmia® il est possible de déterminer les positions angulaires permettant d'accéder aux quatre positions de soudage. Les résultats sont présentés dans le Tableau 23-B. Ces valeurs sont comprises dans les plages angulaires admissibles du robot Tableau 23-A. L'action A21 « Vérifier si la trajectoire peut être suivie » (sans la prise en compte d'éventuelle collision) est donc vérifiée, le robot peut donc géométriquement réaliser l'opération.

A

Axe1	**Axe2**	**Axe3**	**Axe4**	**Axe5**	**Axe6**
± 185°	**- 94° / + 150°**	**- 94° / + 150°**	**± 350°**	**± 180°**	**± 350°**

B

	Position de l'origine outil			Position angulaire de l'architecture					
Position	**X**	**Y**	**Z**	**Axe 1**	**Axe 2**	**Axe 3**	**Axe 4**	**Axe 5**	**Axe 6**
1	1000	76.6	1334.3	0	-84.9	121.5	0	50.9	0
2	1300	76.6	1334.3	0	-72.9	106.7	0	53.7	0
3	2000	76.6	1334.3	0	-43.9	61	0	70.5	0
4	2300	76.6	1334.3	0	-22.8	22	0	88.4	0

Tableau 23: Vérification de l'accessibilité du point de plongée. A - Plages de mouvement admissibles. B- Position et l'outil et position articulaire

Remarque : pour une position et orientation du repère outil, plusieurs positions articulaires sont possibles.

Choix des paramètres opératoires

A l'aide de la plage de fonctionnement définie précédemment, Figure 161, pour la phase de plongée, le point permettant d'assurer une profondeur de pénétration la plus rapide est :

$$N_p = 2000\text{tr/min} \; ; \; v_p = 6.65\text{mm/min} \; ;$$

Ce point est hors du domaine expérimental testé, nous extrapolons ainsi la plage de fonctionnement.

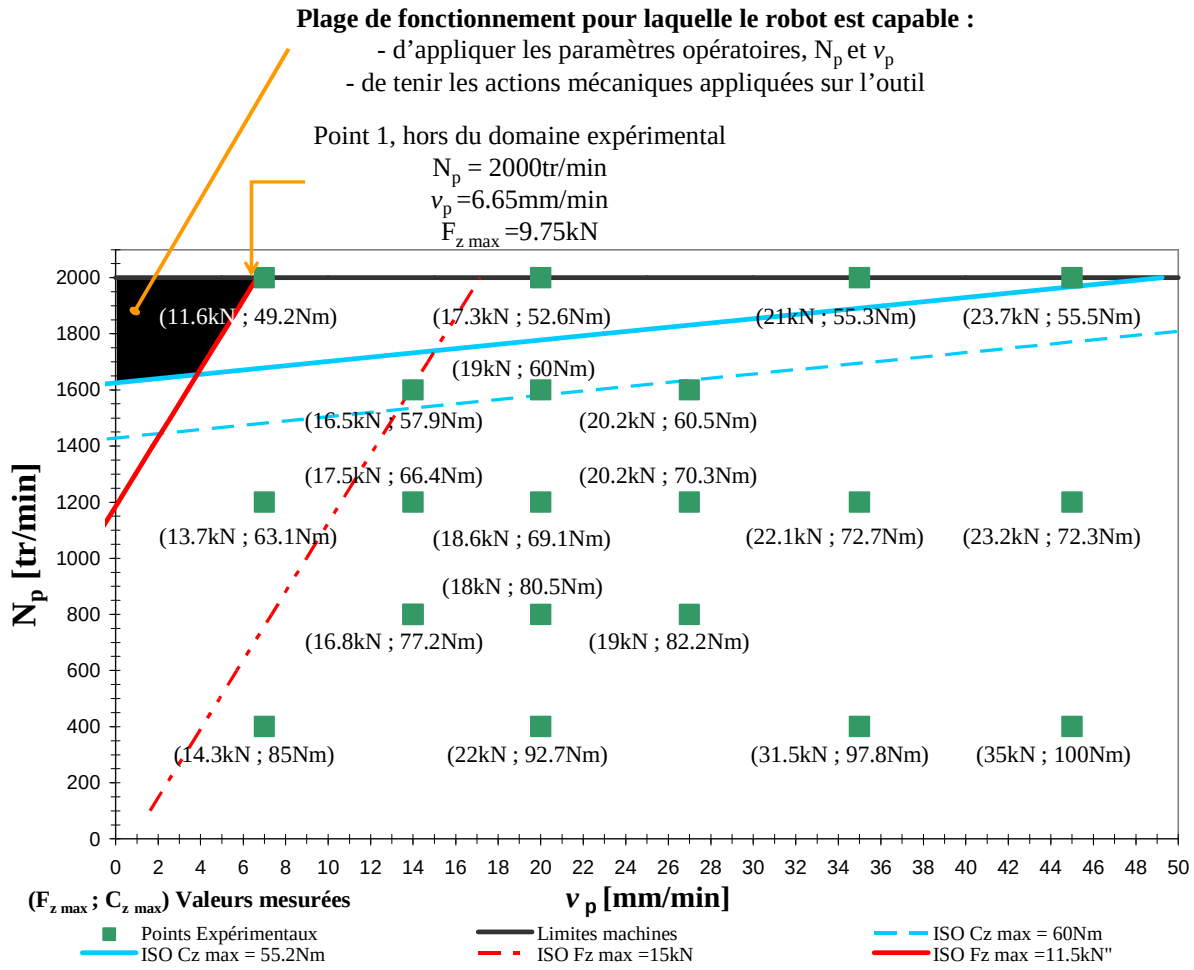


Figure 161: Utilisation des plages de fonctionnement pour choisir un paramètre opératoire

Calculons maintenant les couples aux différentes articulations du robot pour ces quatre positions.

Calcul des couples aux axes et faisabilité de l'opération

Tout d'abord définissons le torseur des actions mécaniques appliquées sur l'outil. De la plage de fonctionnement, nous connaissons les valeurs de $F_{z\ max}$ = 9.75kN et de C_z =55.2Nm. Au chapitre 3, l'amplitude des oscillations de F_x et F_y avait été estimée entre 10 à 20 % de F_{z_max}. C'est pourquoi, nous prendrons : $F_x = F_y$ = 2kN. Ainsi, les torseurs des actions mécaniques et cinématiques sont donnés par :

Le torseur cinématique associé est :

$$\left\{ C_{Outil/Pièces} \right\} = \left\{ \begin{array}{c|c} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 2000 & 6.68 \end{array} \right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \qquad (75)$$

Et le torseur des actions mécaniques associé est :

$$\left\{\mathcal{T}_{\text{Matière / Outil}}\right\} = \left\{\begin{array}{c|c} 2 & 0 \\ 2 & 0 \\ 9.75 & 55.2 \end{array}\right\}_{(O,\vec{x},\vec{y},\vec{z})} \tag{76}$$

Le Tableau 24 présente les couples aux différents axes du robot lors de la réalisation des quatre points de soudage (calcul réalisé à l'aide de Mathématica).

Sur quatre points de soudage, deux ne peuvent être réalisées à cause des couples aux axes supérieurs à ceux admissibles par le robot. Ses deux points sont les plus éloignés du socle du robot.

Les axes 2, 4 et 5 sont les plus sollicités. Plus l'opération de soudage est éloignée du socle du robot, plus les couples aux axes augmentes réduisant ces capacités en termes d'efforts.

Pour les positions suivantes, X=1000mm et 1300mm, les actions :

- *A21 – Vérifier si la trajectoire peut être suivie,*
- *A22 – Calculer les actions mécaniques appliquées par chaque actionneur du moyen de production,*
- *A23 – Comparer les actions mécaniques appliquées par chaque actionneur à ses capacités,*

sont respectées. Pour les deux autres points, le robot, avec les paramètres opératoires choisis et la position de la pièce dans l'espace de travail, ne peut réaliser l'opération de soudage par point.

A

$C_{01\ admissible}$	$C_{12\ admissible}$	$C_{23\ admissible}$	$C_{34\ admissible}$	$C_{45\ admissible}$	$C_{56\ admissible}$
15 000 Nm	**10 000Nm**	**10 000Nm**	**7 000Nm**	**4 000Nm**	**3 000Nm**

B

Position	Couple Axe 1 [Nm]	Couple Axe 2 [Nm]	Couple Axe 3 [Nm]	Couple Axe 4 [Nm]	Couple Axe 5 [Nm]	Couple Axe 6 [Nm]
1	3 773.40	-4 427.90	4 012.32	5 840.05	3 229.81	-55.00
2	4 512.80	-6 162.60	5 004.80	6 486.60	3 666.00	-55.00
3	6 193.90	-9 943.41	5 054.20	**7 430.97**	**4 662.40**	-55.00
4	6 924.80	**-11 450.00**	3 009.00	**6 920.00**	**5 090.00**	-55.00

Tableau 24: Détermination de la faisabilité statique. A- Couples admissible en chacun des axes. B- Couples estimés

3.2.2. Soudage linéaire 300 mm

Nous avons précédemment déterminé les plages de fonctionnement en soudage et en phase de plongée pour l'alliage 6082-T651 d'épaisseur 6mm. Les données collectées nous permettent de déterminer si un point de fonctionnement permet de réaliser l'opération de soudage. La Figure 162 présentent la ligne de joint $\mathcal{L}$ et la Figure 163 schématise la position de nos pièces dans l'espace de travail. L'espace articulaire étant défini et connu, modélisons notre tâche. La soudure est orientée suivant l'axe (O_0, $\underline{x}_0$) de l'axe du robot et le robot soude en « poussant » la soudure suivant ce même axe. La soudure fait 300mm de long.

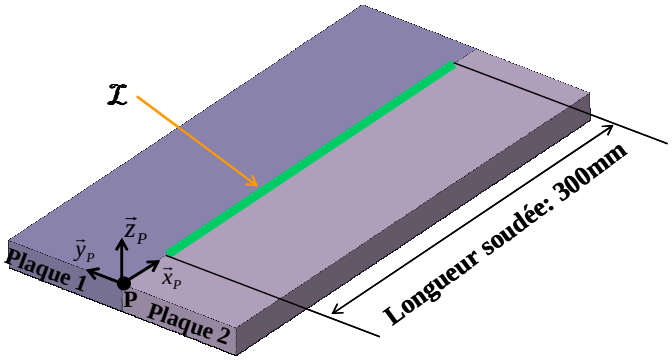


Figure 162: Présentation de la ligne de joint $\mathcal{L}$ de l'application soudée

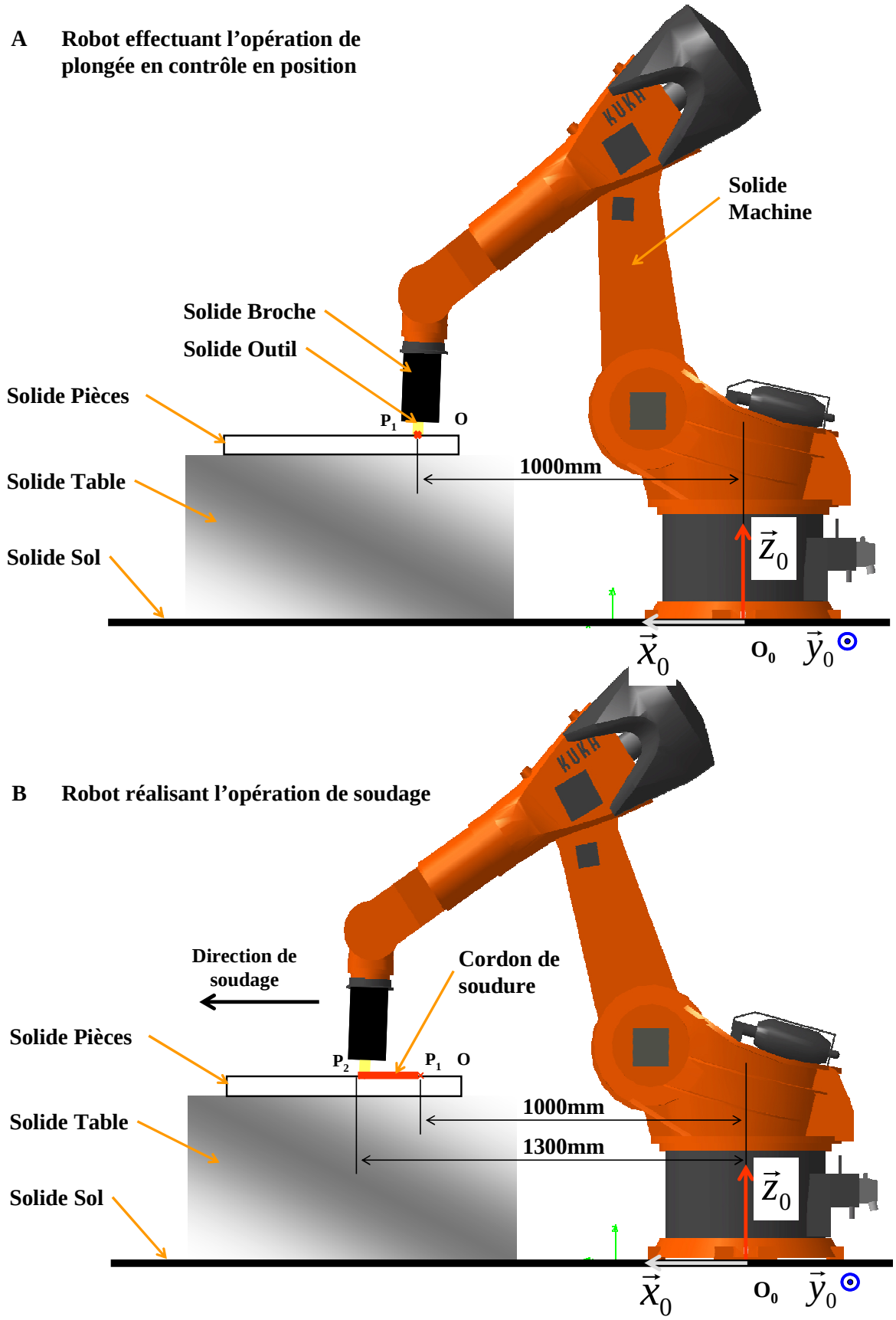


Figure 163: Schématisation de l'opération de soudage réalisée par le robot polyarticulé. A- Au début de la soudure, lors de la phase de plongée. B- Pendant l'opération de soudage.

Présentation de la ligne de joint au sein de l'espace tâche

La Figure 164 présente la schématisation de la soudure bout à bout telle que nous l'avons définie. La ligne de joint $\mathcal{L}$ est discrétisée par un nombre n de points M_i distants chacun d'une valeur d. Nous le prendrons égale à 5mm.

Ecrivons maintenant les matrices de passage permettant de décrire la ligne de joint et la position théorique de l'outil par rapport à cette dernière.

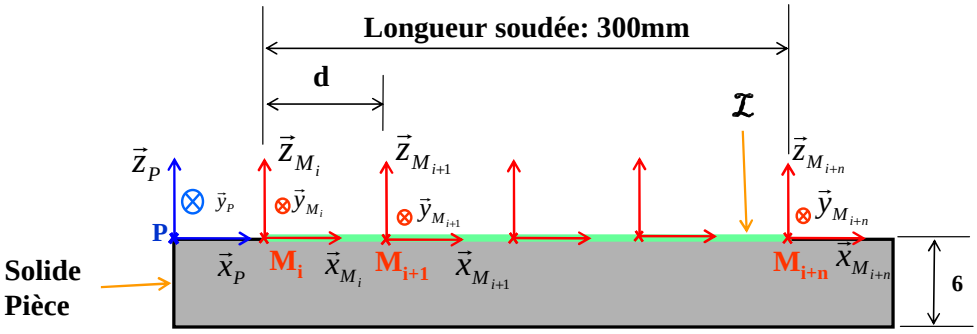


Figure 164: Schématisation de la ligne de joint avec les positions et les orientations des repères R_{Mi} (x_{Mi}, y_{Mi}, z_{Mi}) en chaque points (M_i, s_i)

Les positions de ces points dans l'espace de travail sont données dans le Tableau 25.

Opération	Point	X	Y	Z
Plongée	1	1000	76.6	1334.3
Soudage	2	1025	76.6	1334.3
	3	1050	76.6	1334.3
	5	1100	76.6	1334.3
	7	1150	76.6	1334.3
	9	1200	76.6	1334.3
	11	1250	76.6	1334.3
Fin	13	1300	76.6	1334.3

Tableau 25: Position dans l'espace de travail des points composant le cordon de soudage

Remarque : la trajectoire de l'outil a été définie avec DELMIA®. Ainsi, l'évolution angulaire pour chacun des axes le long de $\mathcal{L}$ forme une fonction continue.

Détermination des positions angulaires du robot

La position angulaire du robot est donnée dans le Tableau 26-B et peut être comparée aux plages de mouvement admissible du Tableau 26-A. L'ensemble des positions et orientations peuvent être atteintes par l'outil. Le robot peu donc géométriquement assurer la trajectoire de l'outil le long de la ligne de joint $\mathcal{L}$.

A

Axe1	Axe2	Axe3	Axe4	Axe5	Axe6
± 185°	- 94° / + 150°	- 94° / + 150°	± 350°	± 180°	± 350°

B

	Position angulaire de l'architecture					
Position suivant X [mm]	**Axe 1 [°]**	**Axe 2 [°]**	**Axe 3 [°]**	**Axe 4 [°]**	**Axe 5 [°]**	**Axe 6 [°]**
1000	0	-80.7	116.6	0	54	0
1025	0	-83.9	120.3	0	51.03	0
1050	0	-82.8	119.2	0	51.2	0
1100	0	-80.8	116.8	0	51.53	0
1150	0	-78.8	114.33	0	51.9	0
1200	0	-76.8	111.8	0	52.5	0
1250	0	-74.86	109.4	0	53.05	0
1300	0	-72.9	106.7	0	53.7	0

Tableau 26: Vérification de l'accessibilité du point de plongée. A - Plages de mouvement admissibles. B- Position articulaire le long de la ligne de joint $\mathcal{L}$

Déterminons maintenant les paramètres opératoires.

Choix des paramètres opératoires

Pour choisir les paramètres opératoires, nous allons chercher à optimiser la productivité de l'opération de soudage.

Pour la phase de plongée

La plage de fonctionnement de la plongée est donnée à la Figure 161. Comme pour l'application du soudage par point, nous choisissons le point du domaine accessible par le robot permettant d'assurer l'opération de plongée la plus rapide :

$$N_p = 2000\text{tr/min} \; ; \; v_p = 6.65\text{mm/min} \; ; \; F_{z\,max} = 9.75\text{kN} \; ; \; C_z = 55.2\text{Nm}$$

Pour la phase de soudage

La Figure 165 présente la plage de fonctionnement accessible par le robot polyarticulé, du DSO pour N=1800tr/min, v_a et F_z. Nous avons sélectionné les trois points suivants assurant une productivité maximale de l'opération :

- Point de fonctionnement 1 : F_z = 15kN, N=1800tr/min, v_a =920mm/min. Ce point est hors du DSO étudié expérimentalement. Nous extrapolons ainsi le DSO en supposant ce point comme aboutissant à une soudure compacte. Cette

hypothèse peut être faite, car ces paramètres sont proches d'un point de fonctionnement validé, à savoir F_z = 16kN, N=1800tr/min, v_a =900mm/min. Ainsi, avec seulement 0,6% de variation de F_z et 0,2% de variation de v_a ce point peut être considéré comme validé.

- Point de fonctionnement 2 : F_z = 12kN, N=1800tr/min, v_a =900mm/min
- Point de fonctionnement 3 : F_z = 10kN, N=1800tr/min, v_a =900mm/min

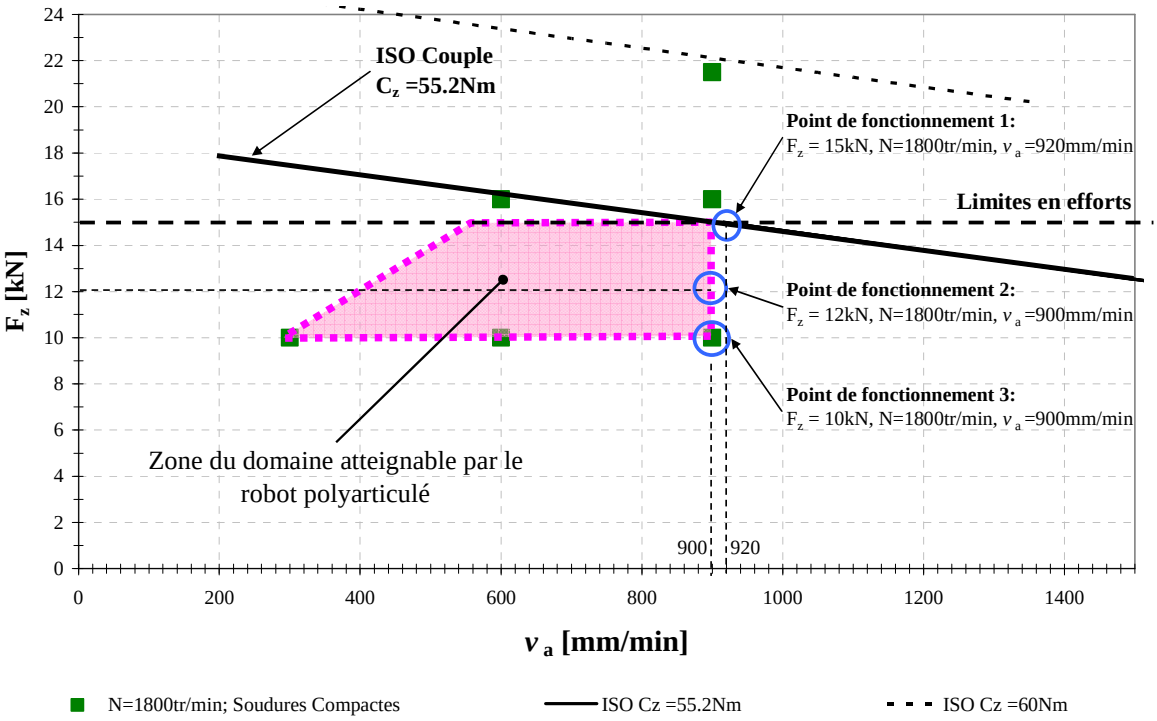


Figure 165: Utilisation des plages de fonctionnement de soudage (N=1800tr/min) pour choisir un paramètre opératoire

Remarque : nous ne souhaitons pas extrapoler le DSO étudié vers la droite, en augmentant v_a, ou vers le bas, en diminuant F_z, car la frontière réelle du DSO avec l'apparition du défaut tunnel interne n'est pas connue. Sa position, par rapport au domaine, est difficile à prédire.

Calculons maintenant les couples aux différentes articulations du robot sur l'ensemble de la ligne de joint, pour ces différents points de fonctionnement.

Calcul des couples et axes et faisabilité de l'opération

Définissons tout d'abord, le torseur des actions mécaniques appliquées sur l'outil sur toute l'opération de soudage.

Pour la phase de plongée

De la plage de fonctionnement, nous connaissons les valeurs de $F_{z\ max}$ = 9,75kN et de C_z =55,2Nm et nous prendrons F_x et F_y égal à 2kN soit égal à 20 % de $F_{z\ max}$ (valeurs identifiées au chapitre 3).

Pour la phase de soudage

Le calcul de $C_{z\ moyen}$, $F_{x\ moyen}$ et $F_{y\ moyen}$ s'effectue avec les équations polynomiales définies par les équations (69), (70) et (71). Les valeurs du torseur des actions mécaniques ont été déterminées à l'aide des équations polynomiales posées précédemment en prenant en compte les erreurs du modèle et de mesure des différentes grandeurs.

Avec Mathématica, les calculs des couples aux axes ont été déterminés.

Pour le point de fonctionnement 1 la valeur du couple à l'axe 4, C_{34} est égal à 8850Nm. Il est supérieur au couple admissible, 7000Nm. L'opération de soudage, dans cette configuration, ne peut être réalisée avec le robot polyarticulé.

Pour le point de fonctionnement 2 la valeur du couple à l'axe 3, C_{23} est égal à 10100Nm. Il est supérieur au couple admissible, 10000Nm. L'opération de soudage, dans cette configuration, ne peut également pas être réalisée avec le robot polyarticulé.

Pour le point de fonctionnement 3, tout le long de la ligne de joint $\mathcal{L}$, les couples calculés restent inférieurs aux couples admissibles du robot. Ainsi, pour ce point de fonctionnement et cette position des pièces dans l'espace de travail, les actions :

- ***A21 – Vérifier si la trajectoire peut être suivie,***
- ***A22 – Calculer les actions mécaniques appliquées par chaque actionneur du moyen de production,***
- ***A23 – Comparer les actions mécaniques appliquées par chaque actionneur à ses capacités,***

sont respectées. La faisabilité de l'opération de soudage est alors déterminée. La Figure 166 présente l'évolution des couples aux axes, de la phase de plongée jusqu'à la fin de l'opération de soudage, pour toutes les articulations du robot polyarticulé.

Les axes les plus sollicités lors du soudage dans cette position sont les axes 1, 2, 4 et 5.

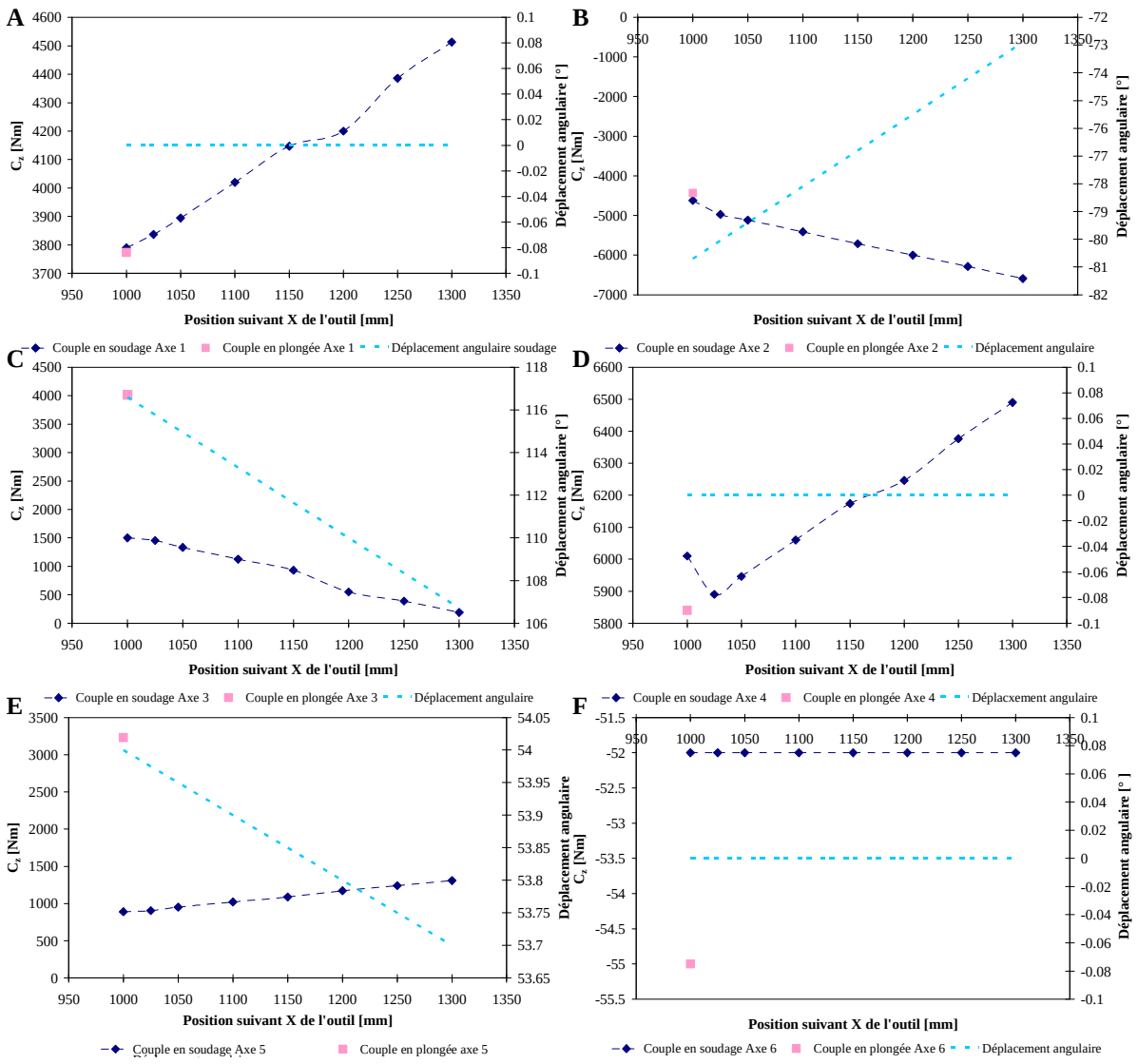


Figure 166: Déplacement angulaire et couple aux axes générés pendant l'opération de soudage. A - Articulation 1, B - Articulation 2, C - Articulation 3, D - Articulation 4, E - Articulation 5, F - Articulation 6

Cette application a permis de montrer comment valider un moyen de production FSW, d'un point de vue statique, en s'appuyant sur le domaine de soudabilité opératoire, dans lequel les plages de fonctionnements accessibles par la machine ont été définies. Celles-ci nous permettent de choisir les paramètres opératoires pour chacune des phases.

Les limites machine du robot polyarticulé ne peuvent être directement transcrite au sein du DSO. Les limites dépendent, outre des capacités des actionneurs, de la position et l'orientation de la pièce dans l'espace du robot. Les applications montrent, que le choix des paramètres opératoires et de la position de l'opération dans l'espace de travail influence l'intensité des couples à développer aux articulations. Ces derniers conditionnent la faisabilité de l'opération de soudage. Une optimisation sur la position de la pièce dans l'espace du robot est nécessaire pour conclure à la faisabilité de l'opération de soudage.

4. Les défauts rencontrés lors de l'utilisation d'un moyen polyarticulé

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été menés en collaboration avec l'Institut de Soudure. C'est pourquoi, dans un souci de confidentialité, cette partie de manuscrit a été supprimée. Seuls les membres du jury ont eu accès à cette partie.

Conclusions

Dans le contexte de l'industrialisation du procédé de soudage FSW, ces travaux se sont intéressés au choix des ressources, plus particulièrement à celui de la machine de soudage, et aux conditions de mise en œuvre à travers le choix des paramètres de conduite. L'objectif était de mettre en place des outils pour qualifier un moyen de production FSW. Le travail a consisté à déterminer les paramètres caractéristiques pour le dimensionnement et à identifier la partie du domaine de soudabilité opératoire accessible par le moyen de production envisagé. Ce travail comporte les trois grandes phases suivantes :

- **la détermination des paramètres caractéristiques** pour qualifier un moyen de production FSW à partir de l'analyse de l'opération de soudage. Ce travail conduit à l'écriture des spécifications d'un cahier des charges pour le choix ou la conception d'un moyen de production.
- **la mise en place de la démarche d'identification du DSO « classique »** en associant les efforts de soudage. Ainsi, pour chaque point du DSO (chaque jeu de paramètres) on doit pouvoir associer un torseur cinématique et un torseur des efforts à l'interface outil/matière.
- **la validation du moyen de production choisi**, grâce à l'ensemble des données expérimentales recueillies.

Déterminer les paramètres caractéristiques

L'opération de soudage FSW a été analysée à travers les interactions produit / procédé, afin d'extraire les paramètres caractéristiques pour qualifier ou concevoir un moyen de production. Plus précisément, l'étude des interactions outil / matière et outil / pièces a abouti à la détermination de la trajectoire et des conditions opératoires devant être appliquées par la machine sur l'outil lors de l'opération de soudage.

L'analyse de la géométrie des pièces à souder a permis de définir la ligne de joint $\mathcal{L}$ ainsi qu'un repère local associé à chaque point de $\mathcal{L}$. Avec la prise en compte de l'outil et de la configuration de soudage, la position et l'orientation de l'outil ont été exprimées par rapport à ce repère local. Quatre paramètres opératoires ont ainsi été identifiés. ***La trajectoire de l'outil et l'espace de travail nécessaire à la réalisation de la soudure constituent des données nécessaires pour qualifier un moyen de production***.

L'analyse des interactions outil / matière consiste à déterminer ce qui doit être imposé localement à l'outil pour générer la formation du cordon. Cette étude prend en compte les torseurs cinématiques et les actions mécaniques outil / matière. Ainsi, à partir de la cinématique de l'outil, quatre phases ont pu être identifiées : la plongée, le temps de maintien, le soudage et le retrait de l'outil. Les phases de plongée et de soudage peuvent être

décomposées en trois phases : accélération, vitesses constantes et décélération. Pour chacune de ces phases, les paramètres opératoires ont été listés d'une manière exhaustive.

Les torseurs des actions mécaniques et cinématiques ont été présentés pour toutes les phases de soudage. Les résultats expérimentaux montrent que, dans chacune des phases opératoires, les efforts F_x, F_y et F_z et le couple à la broche décrivent les interactions mécaniques à l'interface outil / pièce. Les deux autres composantes du moment ont été négligées. Par ailleurs, parmi l'ensemble des paramètres, ceux pertinents pour le dimensionnement d'un moyen de production ont été identifiés. ***Les résultats obtenus conduisent à la restriction de l'étude des efforts aux phases de plongée et de soudage à vitesses constantes***. Comme ces deux phases semblent être suffisantes pour qualifier un moyen de production FSW, le domaine de soudabilité opératoire a été mis en place pour chacune d'entre elles.

Identifier le domaine de soudabilité opératoire accessible

L'identification des domaines de soudabilité opératoire est basée sur des campagnes expérimentales. Dans un premier temps, le travail a consisté à définir, à partir d'un point de fonctionnement connu, les intervalles de variation admissibles de chaque paramètre de conduite. ***Grâce à l'identification des défauts de soudage, les phénomènes-frontières et leurs positions autour du DSO ont alors été visualisés (les résultats sont conformes à ceux de la littérature)***. Les défauts relevés sont les défauts tunnel, l'excès ou le manque de pénétration et les éraillures en surface. Ils peuvent être classés dans deux grandes familles selon les conditions thermiques du soudage : « chaud » ou « froid ». Les conditions « chaudes » apparaissent pour une vitesse d'avance faible et une fréquence de rotation élevée, les conditions « froides » correspondant à l'inverse. Les défauts « froids » sont le défaut tunnel, les rainures en surface et le manque de pénétration. Les défauts « chauds » sont l'excès de pénétration et les éraillures en surface.

Les actions mécaniques appliquées sur l'outil ont été associées à chaque combinaison de paramètres opératoires des DSO. ***Leur analyse a permis de montrer qu'il était possible de modifier de manière significative l'amplitude des actions mécaniques appliquées sur l'outil en agissant sur les paramètres de conduites***. Concernant la phase de plongée (pilotée en position), une augmentation de la fréquence de rotation permet de réduire le couple maximum à la broche. Une diminution de la vitesse de plongée induit une diminution de l'effort axial maximum. L'amplitude des efforts transverses ne semble pas corrélée aux paramètres de conduite. Concernant la phase de soudage, l'augmentation de la fréquence de rotation a pour effet une diminution du couple à la broche. Par contre, le couple est peu sensible aux variations de l'effort axial F_z et de la vitesse d'avance v_a. L'amplitude des efforts F_x augmente avec l'accroissement de la vitesse d'avance v_a. Lors de la formation d'un défaut tunnel, l'effort d'avance et transverse augmentent considérablement. Ceci est sans doute dû à une perturbation dans la répartition de la matière autour du pion.

L'ensemble des données collectées expérimentalement (paramètres de conduite caractéristiques, qualité de la soudure et les actions mécaniques générées) permettent d'entreprendre la qualification d'un moyen de production FSW.

Valider le moyen de production FSW

Un moyen de production FSW doit pouvoir assurer la trajectoire de l'outil sur l'ensemble de la ligne de joint $\mathcal{L}$ et appliquer / subir les actions mécaniques imposées sur ce même outil. Dans cet objectif, la démarche mise en place est basée sur trois étapes. La première consiste à vérifier que la trajectoire peut être suivie (validations géométrique et cinématique). A ce titre, les éventuelles collisions de l'outil avec l'environnement n'ont pas été prises en compte. La seconde est l'estimation des couples et efforts appliqués sur chaque actionneur de la machine le long de $\mathcal{L}$. Ces deux étapes peuvent être accomplies à l'aide d'un modèle associé au système de production considéré. La troisième étape consiste à comparer les actions mécaniques appliquées par chaque actionneur avec les capacités du moyen de production. Si les actions mécaniques générées restent inférieures à celles admissibles et que la trajectoire peut être suivie, alors le moyen de production choisi est apte à réaliser l'opération de soudage FSW envisagée. ***Cette démarche est générale et peut s'appliquer à n'importe quel type de structure.***

Cependant, le choix des paramètres opératoires et les actions mécaniques résultantes conditionnent la machine de FSW. C'est pourquoi, afin de faciliter le choix des paramètres opératoires, les ***limites de la machine sont intégrées aux domaines de soudabilités opératoires*** des phases de plongée et de soudage. Cela conduit à l'identification de plages de fonctionnement optimales en termes de sollicitations des moyens de production et de qualité de soudure. Néanmoins, lors de l'utilisation d'un robot polyarticulé, ces critères ne suffisent pas car ce type de structure ne permet pas d'obtenir directement les limites machine au sein du DSO.

La démarche a été appliquée dans le cas du soudage FSW avec un robot polyarticulé. Pour ce type de structure, la position de la soudure dans l'espace de travail a une incidence importante sur la sollicitation des articulations. La position et l'orientation des pièces dans l'espace du robot deviennent des paramètres du problème. Les robots polyarticulés sont des structures « souples ». Leurs déformations sous les actions mécaniques outil / pièces peuvent provoquer des déviations de l'outil par rapport à la ligne de joint conduisant à des défauts. La tolérance du FSW vis-à-vis de ces défauts a été étudiée expérimentalement. Celle-ci doit faire l'objet de la phase de caractérisation expérimentale du procédé.

Perspectives

La démarche de qualification développée dans ces travaux de thèse est applicable à tout type de géométrie, de configuration de soudage et de moyen de production. Cette première approche, statique, pose les fondements de la démarche. La continuité de ce travail sera de réaliser, dans un premier temps, les applications de soudage par points et de soudage linéaire avec le robot polyarticulé présenté au chapitre 4. Ceci permettra de valider expérimentalement l'approche analytique développée pour qualifier la faisabilité du moyen de soudage FSW.

Au gré de l'avancement de ces travaux de recherche, quelques interrogations ont été soulevées et sont restées sans réponse, faute de temps d'investigation. L'ensemble de la méthodologie de qualification d'un moyen de production FSW fait appel à l'étude des actions mécaniques à l'interface outil/matière, générées en phases de plongée et de soudage à vitesse constante. L'investigation menée a conclu que ces actions étaient suffisantes pour qualifier un moyen de production. Or, cette investigation se base sur des résultats expérimentaux réalisés avec une accélération paramétrée à la vitesse divisée par deux. Il est donc nécessaire de déterminer quelle est l'influence des phases d'accélération (et de décélération) sur les actions mécaniques et de vérifier si les conclusions obtenues restent valables.

De même, lors de l'étude expérimentale de la phase de soudage, un défaut tunnel de quelques millimètres, non répertorié dans la littérature, est apparu à la transition entre les phases de plongée et de soudage. Il ne survient que pour quelques combinaisons de paramètres opératoires. Nous avions conclu que ce défaut tunnel était dû à une inadéquation des paramètres de plongée, temps de maintien, d'accélération et de soudage. Il serait donc intéressant d'étudier quels phénomènes physiques génèrent ce défaut et comment travailler sur les phases de temps de maintien et d'accélération pour éviter sa formation.

Au vu de ces constatations, il apparaît intéressant d'essayer de construire une étude paramétrique, de type plan d'expérience, sur l'ensemble de l'opération de soudage (plongée, maintien, soudage) en se restreignant aux principaux paramètres de chaque phase.

Les phénomènes oscillatoires, observés dans les courbes d'efforts et de couples, doivent impérativement être pris en compte pour dimensionner le moyen de production car ils peuvent perturber le pilotage de l'outil lors du soudage et provoquer des vibrations dans la machine et le montage. Il paraît également nécessaire de rechercher leurs origines. Une étude, utilisant les résultats expérimentaux actuels, peut ainsi être menée sur la corrélation entre la fréquence et l'amplitude des oscillations, les paramètres opératoires et la présence de défauts. Ceci permettra sans doute de faire un pas de plus vers la compréhension du procédé FSW.

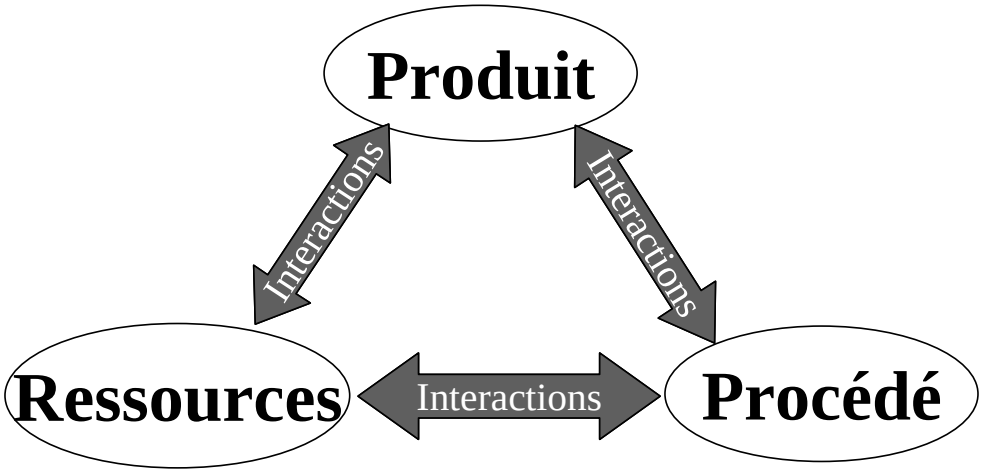
Concernant la qualification du moyen de soudage, et dans le cas considéré, celui d'un robot polyarticulé, il est nécessaire de compléter le modèle du système établi en y ajoutant les raideurs des articulations, le vérin de rappel et le contrepoids. Ces données seront toutefois difficiles à obtenir du constructeur. Une étude inverse devra être menée pour obtenir ces données et valider le modèle du robot. Ceci permettra d'avoir des estimations plus fiables de

la faisabilité ou non de l'opération de soudage. De même, étant donné que les défauts de positions et d'orientation sont problématiques avec ce type de structure, il serait intéressant de prédire les déformations de la structure et d'évaluer les défauts occasionnés.

Nous nous sommes intéressés uniquement à la qualification de la machine. Lorsque le robot polyarticulé ne peut réaliser l'opération dans les configurations données, un des paramètres pouvant être modifié est la position et l'orientation des pièces dans l'espace de travail. La méthodologie mise en place prend en compte le montage de soudage et la présence éventuelle du positionneur. Ceci permet, par la recherche de la position et de l'orientation optimales des pièces dans l'espace de travail, d'élargir la partie du DSO accessible par la machine. De plus en considérant l'ensemble, machine de soudage et système de mise et de maintien en position, les problèmes de collision entre la machine, les pièces et le montage peuvent être pris en compte.

La phase de qualification du procédé a été menée expérimentalement dans ces travaux. Elle pourrait toutefois être appuyée par la simulation. Une pré-étude par simulation contribuerait à réduire fortement la durée et par conséquent le coût des campagnes de validation expérimentales.

Dans notre démarche a été construite dans le contexte de l'intégration produit / procédé / ressources. Le point de départ était une configuration de soudage (géométrie de pièces et matériaux) et les spécifications du cahier des charges de la soudure.



Notre démarche devra s'intégrer dans un schéma plus global abordant la reconception des produits : choix des matériaux et géométries des pièces. De la méthodologie de validation des moyens de production mise en place, il devient insuffisant de faire ressortir uniquement la validation ou non du moyen de production. Il devient nécessaire de décrire les raisons de cette non faisabilité. Une non validation pour cause de collision, n'induira pas le même type de reconception que des efforts de soudage trop importants.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

[ARB08] W. J. Arbegast, A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding. Scripta Materialia 58 (2008) p. 372–376

[ARB07a] W. J. Arbegast, 2007, Chapter 13: Application of Friction Stir Welding and Related Technologies, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International

[ARB07b] W. J. Arbegast, Mechanisms of flow related defects in FSW welds, http://ampcenter.sdsmt.edu/2000/presentation_files/Arbegast%20Defects%20Welding%20Brazil%20200727112007.pdf (consulté le 28 mai 2009)

[ARO09] A. Arora, R. Nandan, A.P. Reynolds, T. DebRoy, 2009, Torque, power requirement and stir zone geometry in friction stir welding through modeling and experiments, Scripta Materialia 60 (2009) 13–16

B

[BAD07] H. Badarinarayan, F. Hunt, K. Okamoto, 2007, Chapter 12: Friction Stir Spot Welding, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International

[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

[BHA**] H. K. D. H. Bhadeshia, Friction Stir Welding, http://www.msm.cam.ac.uk/phasetrans/2003/FSW/aaa.html (consulté le 10 juin 2009)

[BIA99] G. Biallas, R. Braun, C. Dalle Donne, G. Staniek, 1999, W. A. Kayser, Mechanical properties and corrosion behavior of friction stir welded 2024-T3, 1st International FSW Symposium, Thousand Oaks, USA

[BJO02] G. Bjorkman, A. Kooney, C. Russell, 2002, Friction Stir Process Mapping Methodology, (consulté le 28 mai 2009)

http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040084055_2004085962.pdfn

[BOU09] C. Boucher, L'aluminium et ses alliages – soudabilité métallurgique du soudage, Publication du soudage et de ses applications ISBN : 2-85701-340-X

[BOZ08] S. Bozzi1, A.L Etter, T. Baudin, V. Klosek, B. Criqui, J.G. Kerbiguet, 2008, The parameters influencing the mechanical properties of Friction Stir Spot Welds between 6016 aluminum alloy and HSLA steel, 7th International FSW Symposium, Awaji Island, Japan

C

[CAR07] D. S. Caravaca, C. R Bird, K. Beamish and S. Maddox, 2007, Correlation of phased array inspection and fatigue performance of FSW joints, 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2007, San Diego, California, 10-15 June 2007 (http://www.twi.co.uk/content/spdscjun07.html#ref4, consulté le 01/09/2008)

[CED03] L. Cederqvist, 2003, A weld that lasts for 100 000 years: FSW of copper canister, 4st International Symposium on friction stir welding, USA

[CAB08] A. Cabello Munoz, G. Rückert, B. Huneau, X. Sauvage, S. Marya, 2008, Comparison of TIG welded and friction stir welded Al–4.5Mg–0.26Sc alloy, Journal of materials processing technology 197: 337–343

[CAM00] C. L. Campbell, M. S. Fullen, M. J. Skinner, 2000, Control system for control system for friction stir welding background of the invention, International Patent Application No : PCT/US1999/015587

[CHE06] H. B. Chen, K. Yan, T. Lin, S. B. Chen, C. Y. Jiang, Y. Zhao, 2006, The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy, friction stir welds, Materials Science and Engineering A 433: 64–69

[COL05] P. A. Colegrove, H. R. Shercliff, 2005, 3-Dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile, Journal of Materials Processing Technology 169 (2005) 320–327

[COL**] K. J. Colligan, Friction Stir Welding for ship construction, http://www.ncemt.ctc.com/useruploads/file/publications/FSWShipConstruction.pdf, consulté le 02 mars

[COL**a] K. J. Colligan, P. J. Konkol, J. J. Fisher, J. R. Pickens, Improved tools and process parameters were used to fabricate structures of 2519 aluminum armor for the U.S. Marine Corps' Advanced Amphibious Assault Vehicle, http://www.aws.org/w/s/wj/2003/03/feature3/index.html (consulté le 02 juin 2006)

[COM08] L. Commin, Assemblage des alliages de magnésium laminés à chaud par soudage friction malaxage et soudage laser – approche expérimentale vers la compréhension des propriétés mécaniques-, thèse de doctorat soutenu le 09 octobre 2008 à l'ENSAM d'Aix-en-Provences

[COO03] Cook G.E., Smartt H.B., Mitchell J.E., Strauss A.M., Crawford R., 2003, Controlling robotic friction stir welding, Welding Journal, Vol. 82 No.6, pp.28-34.

[CRA06] R. Crawford, G. E. Cook, A. M. Strauss, 2006, Modelling of friction stir welding for robotic implementation, Int. J. Modelling, Identification and Control, Vol. 1, No. 2

[CUI08] G.R. Cui, Z.Y. Ma, S.X. Li, 2008. Periodical plastic flow pattern in friction stir processed Al–Mg alloy. Scripta Materialia 58: 1082–1085

D

[DEF06] J. Defalco, Friction stir welding vs. fusion welding, 2006, Welding journal vol. 85, n°3: 42-44

E

[EIR06] D. Eireiner, 2006, Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding, ISBN: 3-8316-0650-1

[ELA08] K. Elangovan, V. Balasubramanian, 2008, Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, Materials and Design 29: 362–373

[ERI00] M. Ericsson, R. Sandström, J. Hagström, 2000, Fatigue of friction stir welded AlMgSi-alloy 6082, 2nd International FSW Symposium, Gothenburg, Suède

[ERI03] M. Ericsson, R. Sandström, 2003, Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG, International Journal of Fatigue 25: 1379–1387, 2003

[EUR**a] Euralliage, http://www.euralliage.com/6082.htm (consulté le 02 juin 2009)

[EUR**b] Euralliage, http://www.euralliage.com/alliage.html#ancre656093 (consulté le 06 juillet 2009)

F

[FEL**] E. Felder, Effet thermique de la mise en forme - Théorie et phénomènes volumiques, Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques M 3 012.

[FRA07] L Fratini, A Barcellona, G Buffa, and D Palmeri, 2007, Friction stir spot welding of AA6082-T6: influence of the most relevant process parameters and comparison with classic mechanical fastening techniques, Proc. IMechE Vol. 221 Part B: J. Engineering Manufacture

[FOU08] L. Fourment, S. Guerdoux, 2008, 3D numerical simulation of the three stages of Friction Stir Welding based on friction parameters calibration, In Proc. ESAFORM 2008, Lyon, France

[FUL07] C. B. Fuller, 2007, Friction Stir Welding and Processing - Chapter 2 Friction Stir Tooling: Tool Materials and Designs, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International

G

[GEB08] P. Gebhard, M. F. Zaeh, 2008 Force control design for CNC-Milling Machines for Friction Stir Welding, , 7th International Symposium on FSW, Awaji Island, Japan

[GEN04] C. Genevois, 2004, Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 & 5000 et comportement mécanique résultant, thèse soutenu en septembre à l'INPG

[GUE07] S. Guerdoux, 2007, Simulation numérique du soudage par friction malaxage, thèse soutenu en décembre à l'Ecole des Mines de Paris

[GER05] A. Gerlich, P. Su, T.H. North, 2005, Tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloys. J Mat Sci 40: 6473–6481

[GEST08] D. Gesto, V. Pintos, J. Vazquez, I. Villar, J. Rasilla, S. Barreras, 2008, 7th International Symposium on FSW, Awaji Island, Japan

[GOU05] J.C. Goussain, B. Da Costa, J. Laye, 2005, Le Friction Stir Welding, http://www.comitemecanique-fc.com/doc_rub/84.pdf (consulté le 10 janvier 2009)

[GRA07] F. Gratecap, 2007, Contributions au procédé de soudage par frottement et malaxage FSW. Ph.D. thesis, Ecole Centrale de Nantes, France.

[GRA08] F. Gratecap, G. Racineux, S. Marya, 2008, A simple methodology to define conical tool geometry and welding parameters in friction stir welding, Int J Mater Form 1:143–158, DOI 10.1007/s12289-008-0370-z

H

[HAY06] T. J. Haynie, A. D. Hofferbert, A. H. Koppy, 2006, Adaptator for friction stir welder, US Patent Application No.: US 2006/0032 887 A1

[HEU06] P. Heurtier, M.J. Jones, C. Desrayaud, J.H. Driver, F. Montheillet, D. Allehaux, 2006, Mechanical and thermal modelling of Friction Stir Welding, Journal of Materials Processing Technology 171: 348–357

[HOR99] H. Hori, S. Makita, H. Hino, 1999, Friction stir welding of rolling stock for subway, 1st International FSW Symposium, USA,

I

J

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

[JOH01] R. Johnson, Forces in friction stir welding of aluminium alloy, 3rd International FSW Symposium, Japan, 2001

K

[KAL04] S. W. Kallee, 2004, Friction stir provided prefabricated components and panels, Aluminium International today, TWI Ltd

[KAW04] T. Kawasaki, T. Makino, K. Masai, H. Ohba, Y. Ina, M. Ezumi, 2004, Application of friction stir welding to construction of railway vehicles, JSME International Journal 47 3:502-511

[KET09] M. S. Ketari, 2009, Contribution to the validation step of the use of a poly hinged robot arm in the application of Friction Stir Welding, Projet de fin d'études du cursus ingénieurs Arts et Métiers ParisTech

[KIM06] Y. G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki, K. Nakata, 2006, Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy, Materials Science and Engineering A 415: 250–254

[KUM07] K. Kumar, S. V. Kailas, 2007, The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation, Materials Science and Engineering A 485 (2008) 367–374

L

[LAR**] Dictionnaire Larousse en ligne, consulté le 04 mars 2009 http://www.larousse.fr/encyclopedie/#larousse/72764/11/soudage (consulté le 01 mars)

[LIE03] T. J. Lienert, W. L. Stellwag, B. B. Grimmett, R. W. Warke, 2003, Friction Stir Welding Studies on Mild Steel, Supplement to the welding journal, January 2003

M

[MA06] Z.Y. Ma, S.R. Sharma, R.S. Mishra, 2006, Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum, Materials Science and Engineering A 433: 269–278

[MA08] Z.Y. Ma, A.L. Pilchak, M.C. Juhas, J.C. Williams, 2008, Microstructural refinement and property enhancement of cast light alloys via friction stir processing, Scripta Materialia 58 361–366

[MAH07] M. W. Mahoney, 2007, Chapter 5 Mechanical properties of Friction Stir Welded Aluminum Alloys, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International

[MAR08] F. Marie, B. Guerin, D. Deloison, D. Aliaga, C. Desrayaud, 2008, Investigation on Bobbin Tool Friction Stir Welding of 2000 serie aluminium thin sheets, 7th FSW Symposium, Japan, 2008

[MIY08] K. Miyagawa, H. Matsumura, T. Yasui, M. Tsubaki, M. Fukumoto, 2008, The Microstructure of Interface in Spot Welding between Aluminum Alloy and High-tensile Strength Steel by Friction Stirring, 7th International FSW Symposium, Awaji Island, Japan

[MIS05] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, 2005. Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering, 50, 1-78.

[MIS07a] R. A. Mishran, 2007, Chapter 1 Introduction, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International

[MIS07b] R. A. Mishran, M. W. Mahoney, Chapter 14: Friction Stir Processing, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International

[MAN08] S. Mandal, J. Rice, A.A. Elmustafa, 2008, Experimental and numerical investigation of the plunge stage in friction stir welding. J Mat Process Technol 203: 411–419

[MON01] J. Mononen, M. Siren, H. Hänninen, 2001, Cost comparison of FSW and MIG welded aluminium panels, 3rd International Symposium on FSW, Japan on May 2001

[MOR09] P.M.G.P. Moreira, T. Santos, S.M.O. Tavares, V. Richter-Trummer, P. Vilaça, P.M.S.T. de Castro, 2009, Mechanical and metallurgical characterization of friction stir welding joints of AA6061-T6 with AA6082-T6, Materials and Design 30: 180–187

[MUR**] G. Murry, Soudage et soudabilité métallurgique des métaux, Techniques de l'ingénieur – traité matériaux métallurgiques M715-1

[MUT08] S. Muthukumaran, S. K. Mukherjee, 2008, Multi-layered metal flow and formation of onion rings in friction stir welds, Int J Adv Manuf Technol 38:68–73

[MT090] MT AEROSPACE, 2009, Damage Tolerance Characterization of 2195 Base Material and Friction Stir Welds,

http://www.congrex.nl/09c11/presentations/15_Windisch.pdf (consulté le 28 mai)

N

[NAN08] R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, 2008, Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties, Progress in Materials Science 53: 980–1023

[NOR07] Avant-projet de norme soumis à enquête probatoire jusqu'au : 25 novembre 2007. ISO/DIS 25239-1

O

[OTS08] D. Otsuka, Y. Sakai, Self reacting application for railway car body, 2008, 7th International FSW Symposium, Awaji Island, Japan

[OTU**] http://www.otua.org/publication_dossier-soudage-assemblage.htm#sujet2, consulté le 04 mars 2009

P

[PEE06] M.J. Peel, A. Steuwer, P.J. Withers, T. Dickerson, Q. Shi, H. Shercliff, 2006, Dissimilar Friction Stir Welds in AA5083-AA6082. Part I: Process Parameter Effects on

Thermal History and Weld Properties, Metallurgical and materials transactions, Volume 37 A, July 2006-2183

[PER04] R. Perinet, J.C Goussain, B. Da Costa, 2004, Comparison of the mechanical and corrosion behaviour between Friction Stir Welding Joints and MIG welded joints in 7020 aluminium alloy, 5th International FSW Symposium, France,

[PHI07] C. Philip, Soudage des alliages d'aluminium, Cours ENSAM bordeaux, http://courscoeli.ensam.eu/content/download/1321/5424/file/soudage-alu.pdf (consulté le 25 mai 2009)

[PKM**] Tricept PKM Tricept product of France http://www.pkmtricept.com/files/catalogo_en.pdf (consulté le 10 septembre 2009)

[PON05] M. Ponte, J. Adamowski, C. Gambaro, E. Lertora, 2005, Low-cost transformation of conventional milling machine into a simple FSW work station, Advanced Manufacturing and Technology, CISM Courses and Lectures No.486, Springer Wien New York, ISBN: 10-3-211-26537-6 p.357-365

R

[REC05] J. H. Record, 2005, Statistical investigation of friction stir processing parameter relationships, Master of Science Thesis of Brigham Young University http://contentdm.lib.byu.edu/ETD/image/etd732.pdf (consulted le 15/01/2007)

[REY99] A.P. Reynolds, T.U. Seidel et M. Simonsen, 1999, Visualization of the Material Flow in an Autogenous Friction Stir Weld, Proc. 1st International Symposium on friction stir welding, Thousand Oaks, USA

S

[SAK01] R. Sakano, K. Muakami, K. Yamashita, T. Hyoe, M. Fujimoto, M. Inuzuka, Y. Nagao, H. Kashiki, 2001, Development of spot FSW Robot system for automobile body members, 3rd FSW Symposium, Kobe, Japan

[SAV06] A. Savary, 2006, Les plans d'expériences - Annexe : Les plans complets ou factoriels complets, cours en sciences de l'ingénieur de l'ENS Cacha, http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?page=affiche_ressource&id=19 (consulté le 29 mars 2008)

[SCH07] J.A. Schneider, 2007, Friction Stir Welding and Processing -Chapter 3 Temperature distribution and resulting metal flow, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International

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

[SIM06] A. Simar, 2006, A multiscale multiphysics investigation of aluminum friction stir welds from thermal modelling to mechanical properties through precipitation evolution and hardening Thèse de doctorat de l'Université Catholique de Louvain

[SMI00] C.B. Smith, 2000, Robotic Friction Stir Welding using a Standard Industrial Robot, 2nd FSW Symposium, Gothenburg, Sweden

[SMI03] C.B. Smith, J. F. Hinrichs, W. A. Crusan, 2003, Robotic Friction Stir Welding: The state of Art, 4th FSW Symposium, USA

[SMI07] C. B. Smith, 2007, Friction Stir Welding and Processing - Chapter 11 Robots and machines for friction stir welding / processing, Friction Stir Welding and Processing, Edité par R.S. Mishra et M.W. Mahoney, ISBN-13 978-0-87170-840-3, ASM International

[SOR08] M. Soron, 2008, Friction stir welding of high-strength aluminium alloys using an industrial robot system: A feasibility study, 7th International FSW Symposium, Awaji Island, Japan

[SOR07] M. Soron, 2007, Towards Multidimensionality and Flexibility in Friction Stir Welding Using an Industrial Robot System, Recent Advances in Friction Welding and Allied Processes, Dubrovnik, Croatia

[SOU05] V. Soundararajan, S. Zekovic, R. Kovacevic, 2005, Thermomechanical model with adaptive boundary conditions for friction stir welding of Al 6061, Int J Mach Tools Manuf 45:1577–1587

[SPE01] T. Speller, J. Perrelli, W. Lam, 2001, Friction Stir Weld (FSW) Design of Experiments 1 - Tests Conducted on November 19 and 20 http://web.mit.edu/thsjr711/www/Design%20of%20Experiment%201.pdf (consulté le 13/06/2006)

[SVE99] L.E. Svensson et L. Karlesson, 1999, Microstructure, hardness and fracture in Friction Stir Welding AA6082, 1st International Symposium on friction stir welding, Göteborg, Sweden

[STR00] A. von Strombeck, C. Schilling, J.F. dos Santos, 2000, Robotic Friction Stir Welding – Tool Technology and Applications, 2nd International FSW Symposium, Gothenburg, Sweden

[SYL**] J. Sylvanus, Friction-Stir-Welding (FSW) - Reibrührschweißen

http://www.iwb.tum.de/iwbmedia/Downloads/studium/Lehrveranstaltungen/Vorlesungen/Fuegetechnik/EADS_Silvanus.pdf (consulté le 15 décembre 2007)

T

[TAN08] K. Tanaka, M. Kumagai, H. Yoshida, 2008, Dissimilar Joining of Aluminum Alloy and Steel Sheets by Friction Stir Spot Welding, 7th International FSW Symposium, Awaji Island, Japan

[THO00] J. Thompson, 2000, FSW for cost savings in contract manufacturing, 2nd International FSW Symposium, Suède

[TWI**] Pushing the boundaries - Friction stir goes deeper than before,

http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/c1401.html, consulté le 30 avril 2009

V

[VOE06] G. Voellner, F. Zaeh, O. Kellenberger, D. Lohwasser, J. Silvanus, 2006, 3-D FSW using a modified high payload robot, 6th International FSW Symposium, Saint Sauveur, Canada

[VOE07] G. Voellner, F. Zaeh, J. Silvanus, O. Kellenberger, 2007, Robotic Friction Stir Welding, AeroTech Congress & Exhibition, Los Angeles, California

[VOE08] G. Voellner, F. Zaeh, J. Silvanus, 2008, Influence of the machine types on FSW seam qualities, 7th International FSW Symposium, Awaji Island, Japan

W

[WAY91] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templemith, C.J. Dawes, 1991, G.B. Patent 9125978.8

[WYK97] D. H. Wykes, Cerritos, Calif., 1997, Adjustable Pin for FSW Tool, Patent Number 5 697 544,

X

[XU09] W. Xu, J. Liu, G. Luan, C. Dong, 2009, Temperature evolution, microstructure and mechanical properties of friction stir welded thick 2219-O aluminum alloy joints, Materials and Design 30: 1886–1893

Y

[YAV04] H. Yavuz, 2004, Function-oriented design of a FSW robot, Journal of Intelligent Manufacturing, 15, 761-775

[YU09] L. Yu, K. Nakata, J. Liao, 2009, Microstructural modification and mechanical property improvement in friction stir zone of thixo-molded AE42 Mg alloy, Journal of Alloys and Compounds xxx (2009) xxx–xxx

Z

[ZAE04] M. F. Zaeh, D. Eireiner, L. Papadakis, 2004, Friction Stir Welding with modern milling machines. Requirements, Approach and Application, 5th International FSW Symposium, Metz, France

[ZET04] R. Zettler, S. Lomolino, J. F. dos Santos, T. Donath, F. Beckmann, T. Lippman, D. Lohwasser, 2004, A Study on Material Flow in FSW of AA 2024-T351 and AA 6056-T4 Alloys, 5th International FSW Symposium, Metz, France

[ZHA07] Z. Zhang, H. W. Zhang, 2007, Numerical studies on effect of axial pressure in Friction Stir Welding, Science and Technology of Welding and Joining, VOL 12 NO 3: 226-248

[ZHA09] Z. Zhang, H. W. Zhang, 2009, Numerical studies on the effect of transverse speed in friction stir welding, Materials and Design 30: 900–907

[ZHO05] C. Zhou, X. Yang, G. Luan, 2005, Fatigue properties of friction stir welds in Al 5083 alloy, Scripta Materialia 53: 1187–1191

[ZHO06] C. Zhou, X. Yang, G. Luan, 2006, Effect of kissing bond on fatigue behavior of friction stir welds on Al 5083 alloy, Journal of material and sciences 41: 2771 –2777 (J M A T E R S C I 4 1 (2 0 0 6) 2771 –2777)

[ZIM07] S. Zimmer, W. Chapeau, B. Da Costa, X. Stassart, N. Ben Slima Ayadi, L. Langlois, J.C. Goussain, B. de Meester, L. D'Alvise, Manuel Pédagogique, Le soudage par friction malaxage, friction stir welding, ISBN 978-2-900781-67-8

[ZIM09] S. Zimmer, J. Laye, C. Guyomard, L. Langlois, R. Bigot, P. Martin, 2009, FSW : un procédé de soudage pour les alliages d'aluminium de fonderie, 11ème Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne 22-24 avril

[SAT05] Y. S. Sato, H. Takauchi, S. H. C. Park, H. Kokawa, 2005, Characteristics of the kissing-bond in friction stir welded Al alloy 1050, Materials Science and Engineering A 405: 333–338

CONTRIBUTION A L'INDUSTRIALISATION DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR FRICTION MALAXAGE

RESUME : Le soudage par friction malaxage, ou FSW, est un procédé de soudage à l'« état solide » permettant d'éviter certains problèmes rencontrés en soudage par fusion comme la fissuration à chaud ou la création de soufflures. La soudure est réalisée par l'action d'un outil à l'interface de deux pièces à souder. Celui-ci a pour rôle de malaxer et d'échauffer par frottement la matière. Le cordon est réalisé de proche en proche. Les efforts générés à l'interface outil/matière doivent être repris par la machine et le montage de soudage. Ils sont donc un facteur important pour le choix des moyens de soudage. Ce travail de thèse consiste à mettre en place une démarche pour qualifier les moyens de production FSW, en identifiant la partie du domaine de soudabilité opératoire accessible par le moyen envisagé. Ce travail comporte trois phases. La première est l'identification des paramètres caractéristiques du procédé FSW. Cela aboutit à l'écriture de spécifications du cahier des charges pour le choix ou la conception d'un moyen de production. Une fois ces paramètres identifiés, la deuxième étape de la démarche est la caractérisation expérimentale des domaines de soudabilités opératoires (DSO). Les actions mécaniques appliquées sur l'outil ont été associées à chaque combinaison des paramètres opératoires de ces domaines. Cette étude expérimentale a mis en évidence l'influence des paramètres de conduite sur le torseur des efforts outil/matière. Ces derniers peuvent être réduits en agissant sur ces mêmes paramètres opératoires. Enfin, la dernière phase de la démarche est la validation du moyen de production FSW choisi, grâce à l'ensemble des données expérimentales recueillies. Ce moyen de production est modélisé dans le but de tester les capacités de la machine, de la broche et du porte-pièces pour réaliser l'opération de soudage.

La démarche de qualification a été mise en œuvre à la réalisation de soudures FSW par un robot polyarticulé (6 axes). Cette structure « peu rigide » et de « faible » capacité en effort est très sensible aux actions mécaniques générées par le FSW. Le choix des paramètres opératoires de soudage s'appuie sur les DSO déterminés expérimentalement pour les phases de plongée et de soudage, bornées par les limites de la machine. Il est nécessaire, pour ce type de structure, de qualifier son aptitude à réaliser l'opération de soudage FSW, car ses capacités dépendent fortement de la position de l'outil dans l'espace de travail.

Mots-clés : *soudage par friction malaxage (FSW), industrialisation, domaine de soudabilité opératoire, machine de soudage FSW*

CONTRIBUTION TO THE INDUSTRIALIZATION OF FRICTION STIR WELDING

ABSTRACT: The Friction Stir Welding (FSW) is a solid state welding process which avoids some problems encountered by fusion welding, like hot cracking or solidification defects. The welding is performed by a rotating tool, inserted into the interface of two rigidly clamped workpieces. The required heat energy is provided by the friction between this tool and the workpieces. The combined tool rotation and translation create the material stirring, joining the workpieces together. The resulting efforts at the interface must be support by the machine and the part-holding device. They are thus a major issue for the choice of the welding equipments. This thesis work consists in implementing a method to qualify means of production for FSW process, by identifying the suitable part of the process windows. This method is threefold. The first point is the identification of the characteristic parameters of FSW process. These one are taken into account in specifications for the choice or the design of a means of production for FSW. The second point of the method is the experimental characterization of the process windows. The mechanical actions on the tool were associated with each combination of the operating parameters of the process windows. This experimental study highlighted the effect of driving parameters on the efforts at the tool/product interface. Lastly, the last point of the method is the validation of the selected means of production for FSW, thanks to the collected experimental data sets. These mean of production is modelled in order to check the capacities of the device, the pin and the parts holder used to carry out the operation of welding.

The method of qualification was implemented in the case of multi-axis robot (6 axis). This "low rigid" and "low capacity" structure is very sensitive to the mechanical actions of FSW. The choice of the welding operating parameters leans on the process windows and the limits of the robot, which have been experimentally determined for the plunging and welding stages. It is necessary, for this kind of structure, to qualify its ability to carry out a FSW welding, because its capacities strongly depend on the position of the tool within the workspace.

Keywords: *Friction Stir Welding, industrialization, process windows, FSW Equipment*