



Thomas Heuzé

# Modélisation des couplages fluide/solide dans les procédés de soudage

Application au Friction Stir Spot Welding

# Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	iii
Introduction	1
<b>1 Modélisation des procédés de soudage par friction et malaxage</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction	6
1.2 Les procédés de soudage par friction et malaxage	7
1.2.1 Le Friction Stir Welding	7
1.2.2 Le Friction Stir Spot Welding	12
1.3 Modélisation numérique des procédés de soudage par friction et malaxage	18
1.3.1 Les phénomènes physiques impliqués	18
1.3.2 La modélisation du Friction Stir Welding	19
1.3.3 La modélisation du Friction Stir Spot Welding	24
1.4 Modélisation proposée du procédé FSSW	26
1.4.1 Idée principale de la modélisation proposée	26
1.4.2 Approche euléro-lagrangienne	27
1.4.3 Modélisation du problème	29
1.4.4 Synthèse	36
1.5 Conclusions	36
<b>2 Un élément fini mixte pour la modélisation de comportements incompressibles</b>	<b>39</b>
2.1 Introduction	41
2.2 L'élément P1+/P1	42
2.3 Élément fluide	44
2.3.1 Formulation faible	44
2.3.2 Formulation aux éléments finis	45
2.3.3 Condensation statique du noeud bulle	49
2.3.4 Résolution	52
2.3.5 Calcul du champ bulle	52
2.3.6 Commentaires	53
2.4 Élément solide	53
2.4.1 Formulation faible	54
2.4.2 Formulation aux éléments finis	55
2.4.3 Condensation statique du noeud bulle	58
2.4.4 Résolution	58

4.4.3	Fonctions aux limites avec une formulation en vitesses en mécanique des solides . . . . .	59
4.5	Stratégie de calcul pour le couplage fluide/solide . . . . .	59
4.5.1	Le couplage fluide/solide . . . . .	60
4.5.2	Appeler eulero lagrangienne : mise en oeuvre numérique . . . . .	61
4.5.3	Actualisation de la géométrie . . . . .	63
4.5.4	Commentaires . . . . .	70
4.6	Conclusions . . . . .	71
<b>4</b>	<b>Simulation de l'étalement P1+/P1 en comportement fluide et solide</b>	<b>73</b>
4.1	Introduction . . . . .	74
4.2	Le problème de Couette en comportement fluide . . . . .	74
4.2.1	Rappel de la solution mécanique pour un écoulement stationnaire, laminaire et incompressible . . . . .	74
4.2.2	Problème mécanique instationnaire . . . . .	77
4.2.3	Problème couplé (mécanique stationnaire) - (thermique instationnaire) . . . . .	79
4.3	Comparaison des solutions analytique/numérique en mécanique des fluides . . . . .	83
4.3.1	Mécanique instationnaire . . . . .	83
4.3.2	(Mécanique stationnaire) - (Thermique instationnaire) . . . . .	83
4.4	Le viscosimètre de Couette avec un matériau élastoplastique . . . . .	85
4.4.1	Matériau rigide, parfaitement plastique . . . . .	85
4.4.2	Matériau élastoplastique écrouissable . . . . .	86
4.4.3	Décharge . . . . .	94
4.4.4	Extension au cas des grandes transformations . . . . .	95
4.5	Comparaison des solutions analytique/numérique pour un solide . . . . .	98
4.5.1	Mise en données . . . . .	98
4.5.2	Résultats . . . . .	99
4.6	Conclusions . . . . .	101
<b>4</b>	<b>Simulation du Friction Stir Spot Welding</b>	<b>103</b>
4.1	Introduction . . . . .	104
4.2	Le viscosimètre de Couette . . . . .	104
4.2.1	Mise en données . . . . .	104
4.2.2	Résultats . . . . .	105
4.3	Simulation du Friction Stir Spot Welding . . . . .	109
4.3.1	Mise en données . . . . .	109
4.3.2	Résultats . . . . .	112
4.4	Difficultés et limites du modèle . . . . .	120
4.4.1	Régularité du résidu . . . . .	121
4.4.2	Le chargement thermomécanique généré par l'outil . . . . .	122
4.4.3	Instabilités numériques du champ de vitesse . . . . .	122
4.4.4	Formulation de l'étalement solide . . . . .	123
4.5	Conclusions . . . . .	123
<b>5</b>	<b>Conception de montages expérimentaux pour le Friction Stir Spot Welding</b>	<b>125</b>
5.1	Introduction . . . . .	126
5.1.1	Vérification de la simulation numérique du soudage . . . . .	126
5.1.2	Démarche proposée . . . . .	127

5.2	Cahier des Charges Fonctionnel . . . . .	128
5.2.1	Analyse Fonctionnelle partielle du besoin . . . . .	128
5.2.2	Analyse des contraintes de conception . . . . .	129
5.2.3	Démarche de validation du procédé FSSW . . . . .	134
5.3	Conception de deux montages spécifiques expérimentaux . . . . .	136
5.3.1	Montage plan d'appui . . . . .	136
5.3.2	Montage butée . . . . .	141
5.4	Mise en oeuvre des essais . . . . .	148
5.4.1	Stratégie expérimentale pour le FSSW . . . . .	149
5.4.2	Résultats expérimentaux . . . . .	152
5.5	Conclusions . . . . .	161
<b>Conclusion</b>		<b>163</b>
<b>A</b>	<b>Calcul des matrices tangentes</b>	<b>1</b>
A.1	Matrice fluide . . . . .	1
A.2	Matrice tangente solide . . . . .	4
<b>B</b>	<b>Modélisation du filetage d'un outil FSSW</b>	<b>7</b>
B.1	Cinématique imposée . . . . .	7
B.2	Modélisation du filet . . . . .	10
B.3	Comparaison des deux modèles . . . . .	12
<b>Bibliographie</b>		<b>xi</b>

L'objet de ce travail est de développer un couplage fluide/solide appliqué à la simulation numérique des procédés de soudage dans lesquels une zone subissant de forts taux de déformation cohabite avec une partie solide au sein de la structure. Ce modèle est construit sur la base du Friction Stir Spot Welding, ce procédé représentant une première étape avant les procédés de soudage à l'arc. Ce type d'approche permet de décrire correctement l'état de la matière dans chaque partie de la structure, et de tirer profit des traitements numériques associés usuellement à chaque type de comportement. Cette approche permet aussi de concilier les approches usuelles en simulation numérique du soudage qui se focalisaient soit sur la modélisation du procédé lui-même (le bain fondu en soudage à l'arc) soit sur les conséquences induites, c'est-à-dire les contraintes et distorsions résiduelles. On présente d'autre part une approche expérimentale permettant de qualifier par des essais représentatifs le procédé Friction Stir Spot Welding. Aussi, deux montages spécifiques sont proposés, et intègrent une démarche de validation globale visant à calibrer la modélisation proposée du procédé.



**Thomas Heuzé**

Thomas Heuzé est un ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan. Il est agrégé de mécanique et docteur en mécanique. Il a réalisé son doctorat à l'Institut Jean Le Rond d'Alembert à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6) sur la simulation numérique du soudage ponctuel par friction et malaxage.



978-613-1-55984-6

