



Cenaero



Modélisation numérique du soudage par friction-malaxage de joints hétérogènes: application aux alliages d'aluminium

11^{ème} Colloque Modélisation et Simulation Numérique du Soudage

Larbi Arbaoui
Research Engineer
Contact: larbi.arbaoui@cenaero.be

Étapes du procédé FSW

- **Plongée**

- Mise en rotation de l'outil
- Plongée du pion dans le joint jusqu'à obtention du contact avec l'épaule

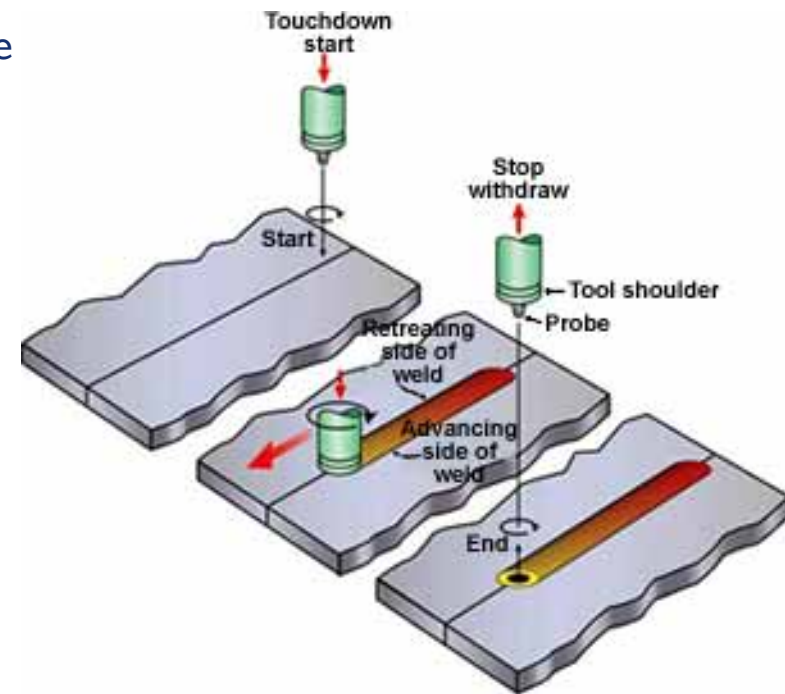
- **Soudage statique**

- Maintien de l'outil à la position finale de plongée
- Augmentation de la température

- **Soudage**

- Traversée de l'outil le long de l'interface

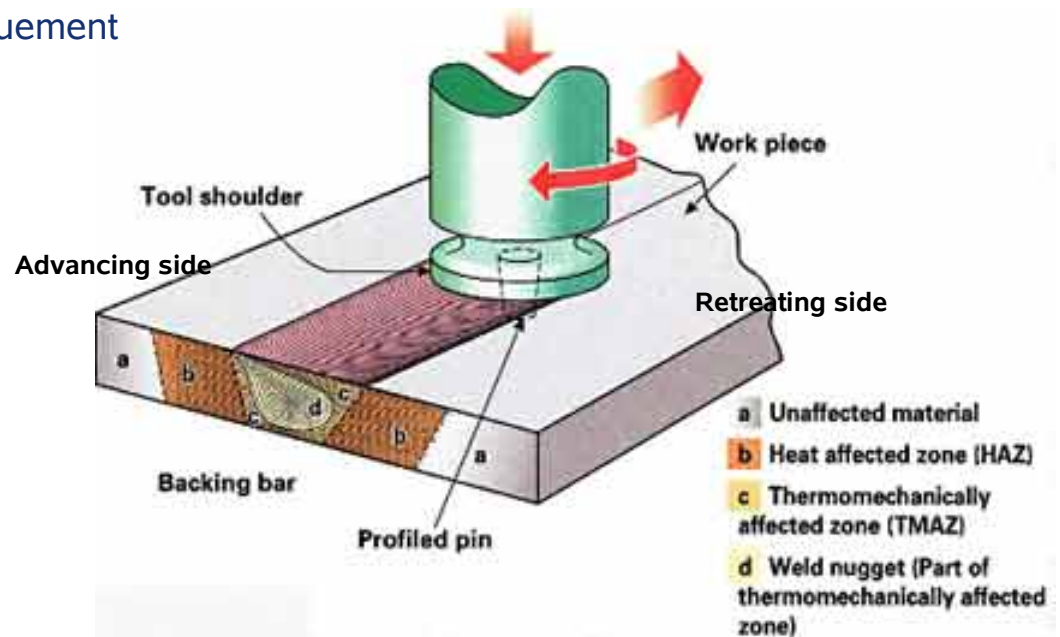
- **Retrait**



Procédé FSW : Phase de soudage

- **Caractéristiques de l'étape de soudage**

- Importante force de forgeage: maintenir le contact épaulement/pièces
- Chaleur générée par friction et déformation plastique
- Augmentation de la température: matériau mou
- Rotation du pion: malaxage des tôles en contact
- Mouvement de la matière de l'avant du pion vers l'arrière
- Sens d'avance et de rotation: coté avance et retrait
- HAZ : zone affectée thermiquement
- TMAZ : zone affectée thermo-mécaniquement
- Weld nugget : zone de malaxage



- **Objectifs de la simulation**
 - Prédiction du flux du matière autour de la zone de malaxage
 - Distribution du champs de température autour de l'outil
 - Puissance de déformation
- **Modélisation dans Morfeo du procédé FSW**
 - Formulation Eulérienne
 - Calcul stationnaire
 - Formulations mixte en vitesse/pression et en température
 - Modèle éléments finis:
 - Formulation VP: P1/P1+terme de stabilisation
 - Formulation thermique: P1
- **Hypothèse du modèle local**
 - État stationnaire de la phase de soudage
 - **Contact collant** (Vitesse imposée à l'interface outil/pièce)
 - **Pas de génération de chaleur par friction** (puissance de déformation)
 - Comportement viscoplastique
 - Modélisation implicite du filetage sur le pion et l'épaule de l'outil

Modèle local : Caractéristique du domaine de calcul

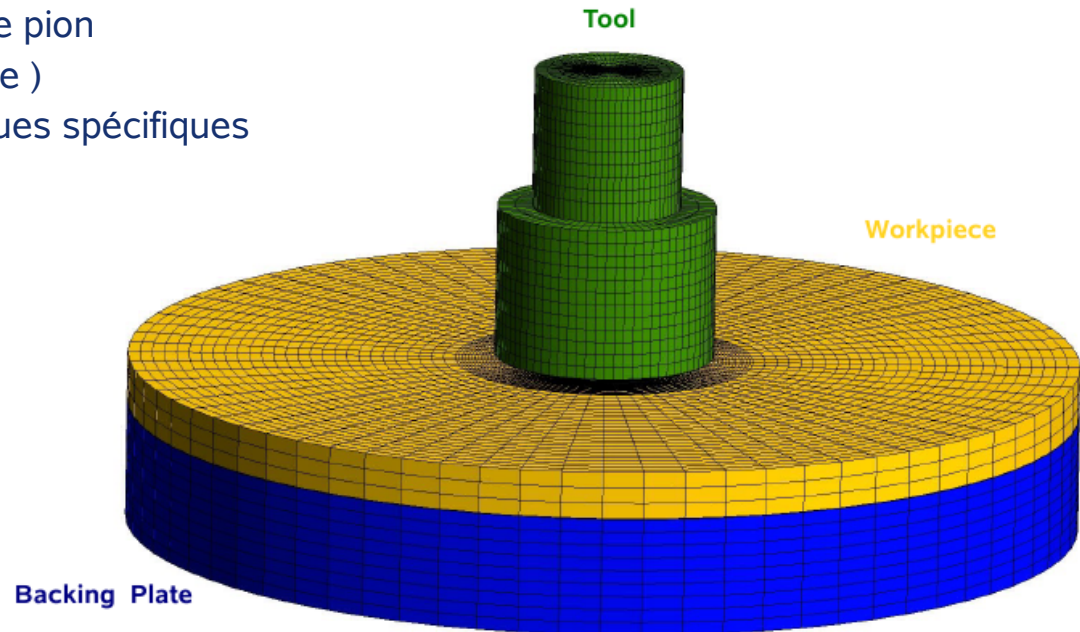
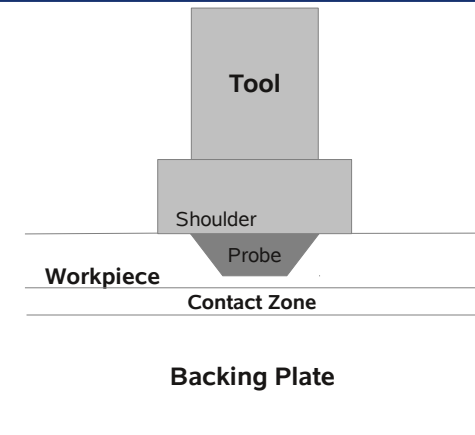
- **Un seul domaine de calcul**
 - Tête de l'outil comprenant épaulement et pion
 - Pièces centrées sur la zone de malaxage
 - Plaque support

- **Surface unique: interface outil/pièce**

- Pas d'algorithme de contact
- État stationnaire de la zone de contact

- **Géométrie simplifiée du pion et épaulement de l'outil**

- Pas de vis sur l'épaulement et le pion
- Géométrie lissée (axisymétrique)
- Condition aux limites cinématiques spécifiques



Modèle local : équations thermo-mécaniques

- **Couplage thermo-mécanique**

- Conservation du moment et incompressibilité

- Vitesse

- Déviateur des contraintes

- Pression hydrostatique

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot s(T) - \vec{\nabla} p & = 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{v} & = 0 \end{cases}$$

- Équation de la chaleur

- Temperature

- Densité, chaleur spécifique, conductivité

- Chaleur par déformation plastique

$$\rho C_p(T) \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} k(T) \cdot \vec{\nabla} T + \tau s(T) : \dot{\varepsilon}^{vp}$$

- Loi de comportement : matériau viscoplastique

- Loi de Norton

- Consistence

- Coefficient de sensibilité au taux de déformations

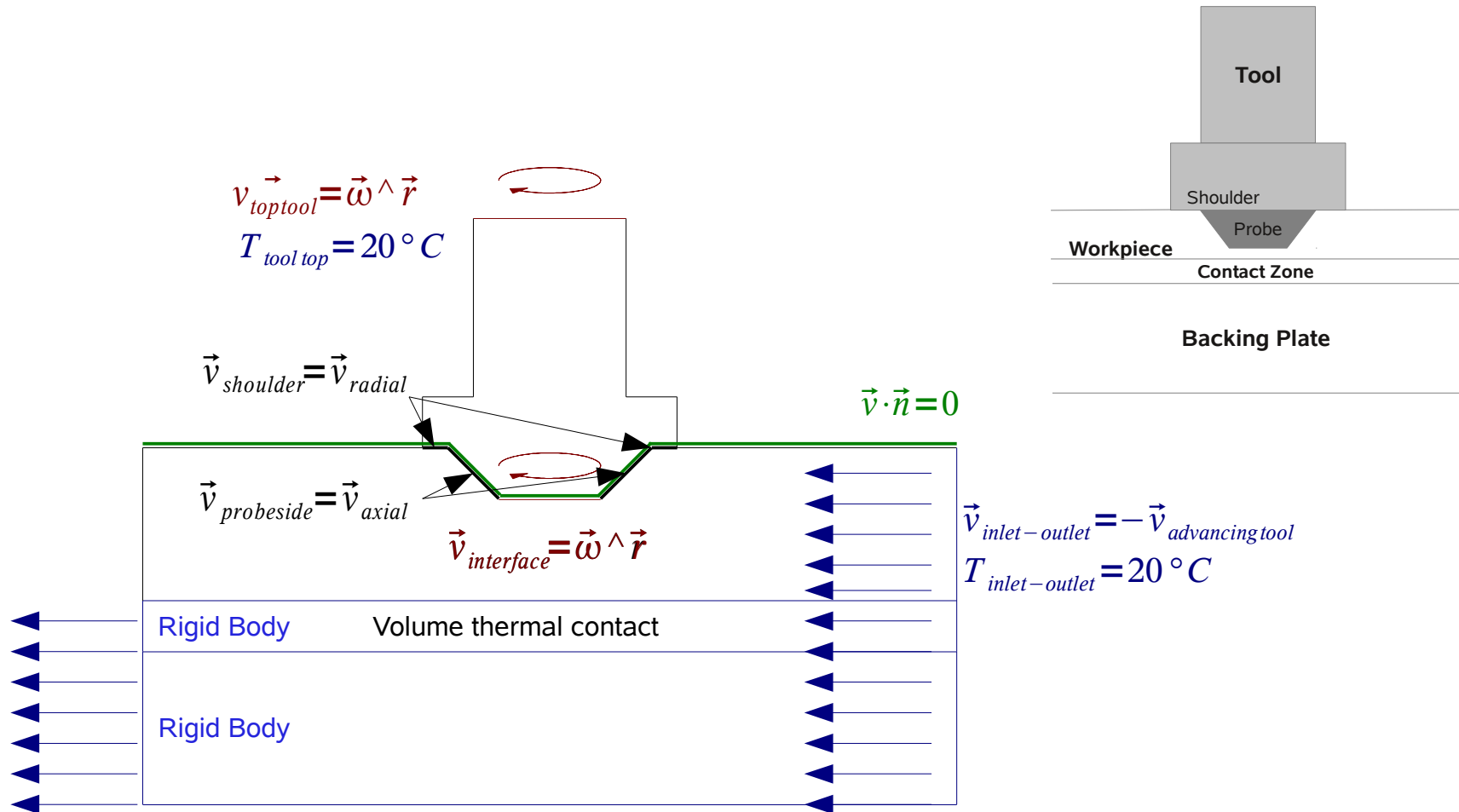
- Coefficient de sensibilité à la température

- Dépendance à la fraction liquide

$$s(T) = 2 K(T) \exp\left(\frac{\beta}{T}\right) (\sqrt{3} \dot{\varepsilon}_{eq}^{vp})^{m-1} \dot{\varepsilon}^{vp}$$

$$K(T) = \min(K_{max}, K_S(1 - f_L(T)) + K_L f_L(T))$$

Modèle local: Conditions aux limites thermiques et mécaniques

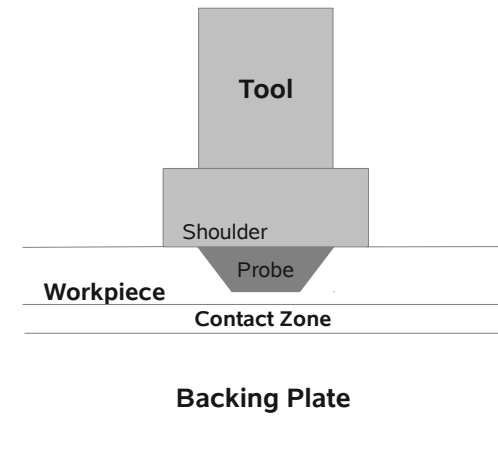


Modèle local: Modélisation implicite du pas de vis sur le pion et l'épaulement

Condition de Dirichlet sur l'interface outil/pièce

- Profil concave ou convexe
Angle du pion : direction de la vitesse axiale
Angle de l'épaulement : direction de la vitesse radiale
- Pas de vis: pion et épaulement

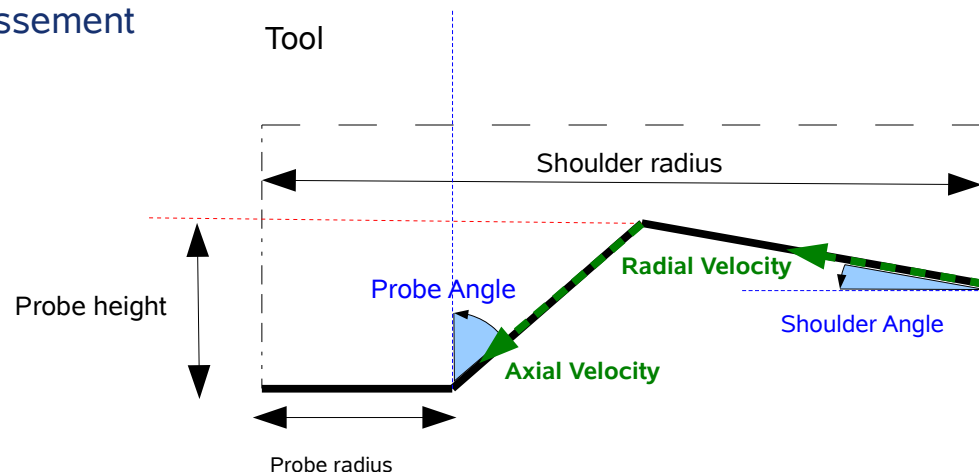
$$\begin{cases} pitch_{probe} = \frac{h_{probe}}{n_{thread-probe}} \\ pitch_{shoulder} = \frac{(r_{shoulder} - r_{probe})}{n_{thread-shoulder}} \end{cases} \begin{cases} \vec{v}_{radial} = -0.1 pitch_{shoulder} \frac{rpm}{60} f(x) \\ \vec{v}_{axial} = -0.1 pitch_{probe} \frac{rpm}{60} f(x) \end{cases}$$



- Fonction de lissage
Modélisation vitesse de glissement
Flux sortant

$$f(x) = K \cos^{\frac{1}{M}} \left(\frac{\pi}{2} \min(1, \max(tol, x)) \right)$$

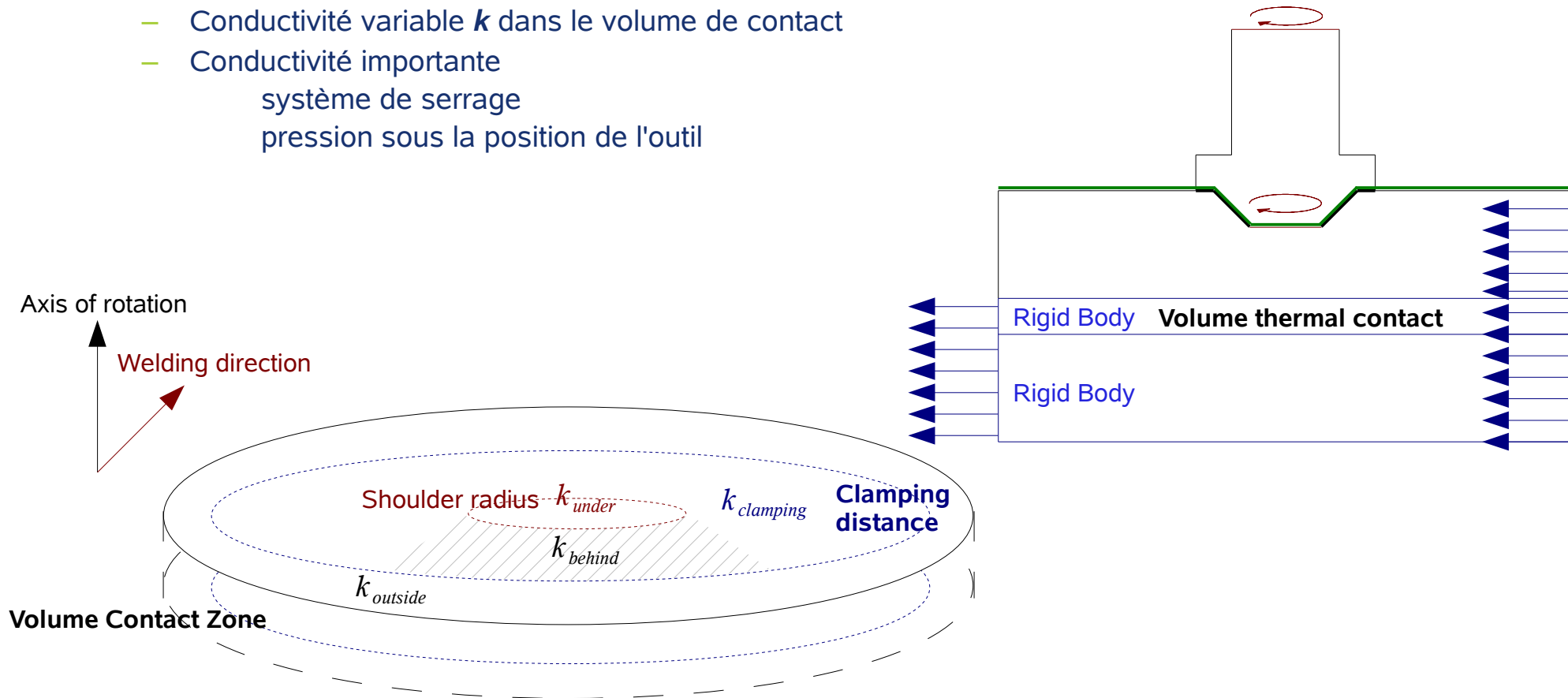
$$\begin{cases} x = \frac{h}{h_{probe}} \\ x = \frac{r - r_{probe}}{r_{shoulder} - r_{probe}} \end{cases}$$



Modèle local : contact thermique volumique

- **Échange thermique entre la pièce et la plaque support**

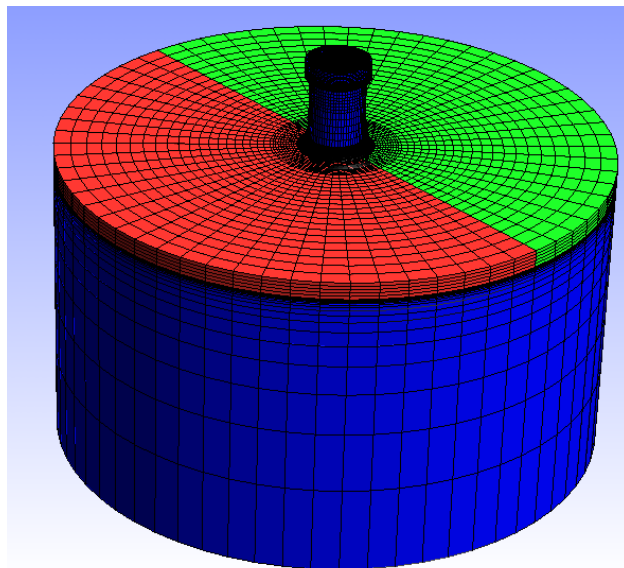
- Conductivité variable k dans le volume de contact
- Conductivité importante
système de serrage
pression sous la position de l'outil



Soudage hétérogène: application aux alliages d'aluminium

Retreating Side:
Material A

Advancing Side:
Material B



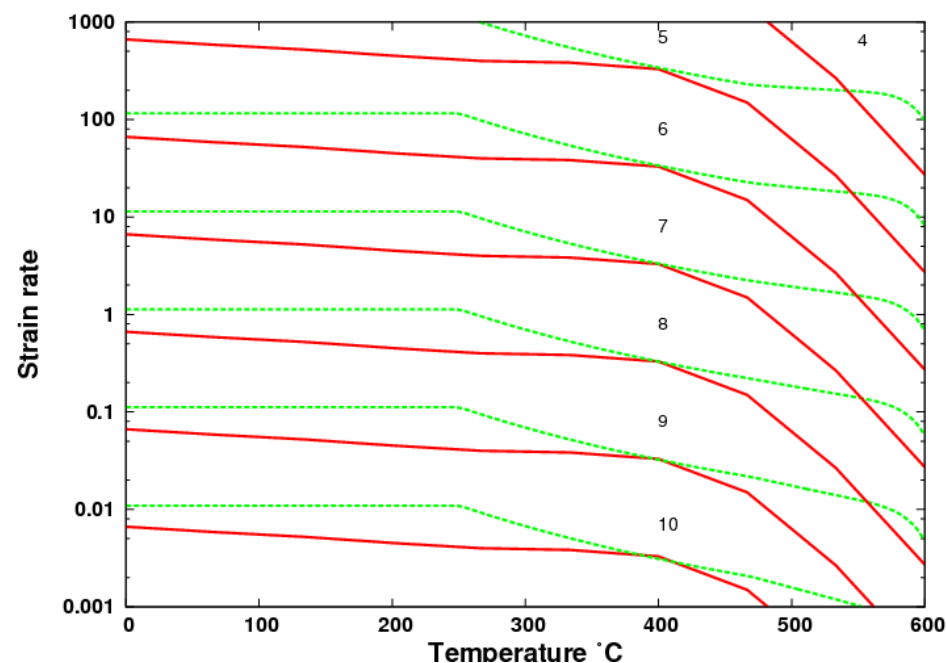
Épaisseur de tôles	4,7mm
Diamètre de l'épaulement	15mm
Diamètre du pion	5mm
Hauteur du pion	4,4mm

Alliages d'aluminium:

Viscosité échelle logarithmique

AA6061

AA2014

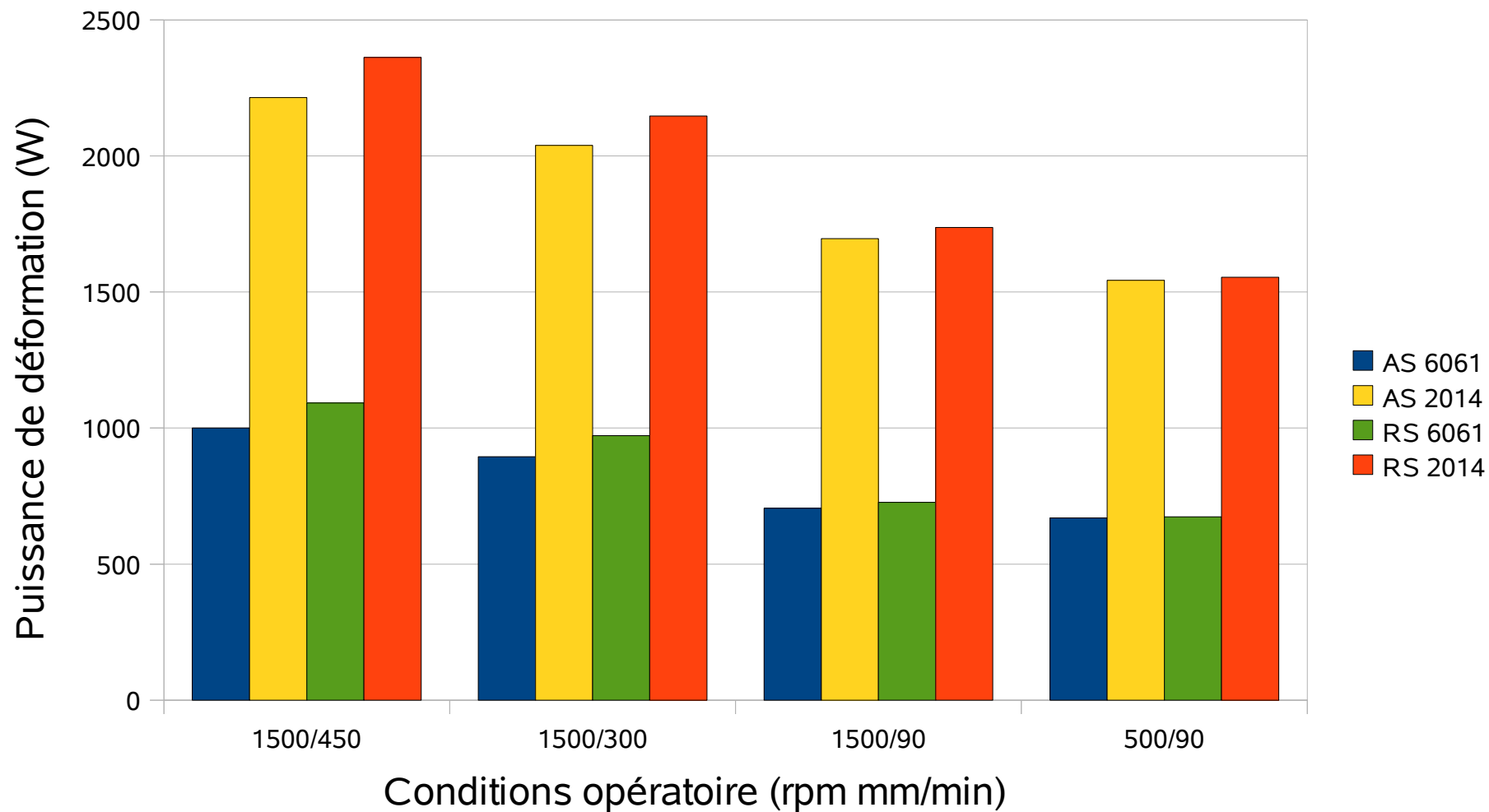


Soudage hétérogène: Plan d'expérience et analyse de sensibilité

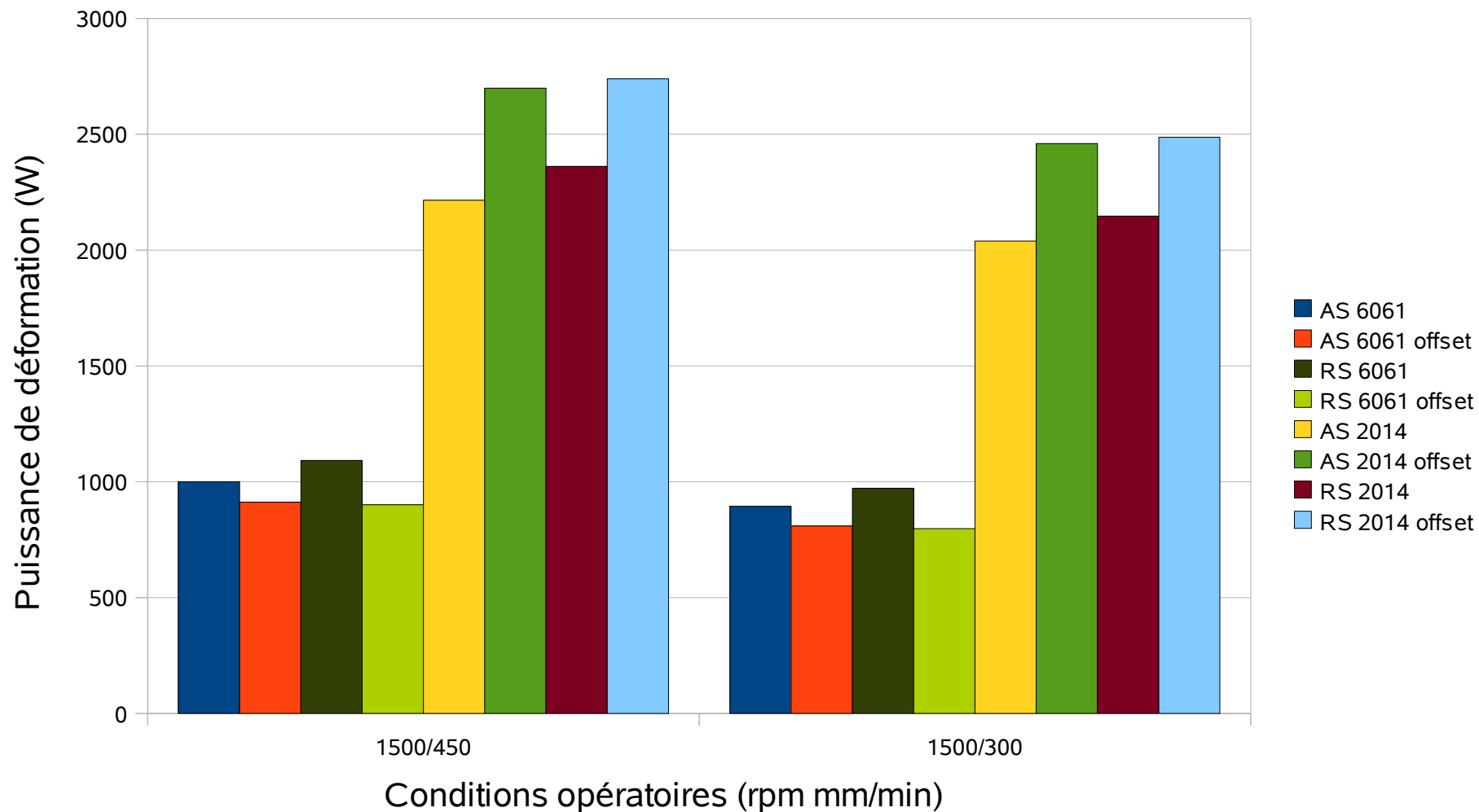
- Vitesse de rotation
- Vitesse d'avance
- Côté avance et retrait
- Offset

<i>Model Type</i>	<i>Rotation Speed</i>	<i>Advancing Speed</i>	<i>Offset</i>	<i>Material</i>	
				<i>Advancing Side</i>	<i>Retreating Side</i>
	<i>RPM</i>	<i>mm/min</i>	<i>mm</i>		
HEX	1500	450	0	6061	2014
HEX	1500	450	0	2014	6061
HEX	1500	300	0	6061	2014
HEX	1500	300	0	2014	6061
HEX	1500	90	0	6061	2014
HEX	1500	90	0	2014	6061
HEX	500	90	0	6061	2014
HEX	500	90	0	2014	6061
TET	1500	450	1	6061	2014
TET	1500	450	1	2014	6061
TET	1500	300	1	6061	2014
TET	1500	300	1	2014	6061

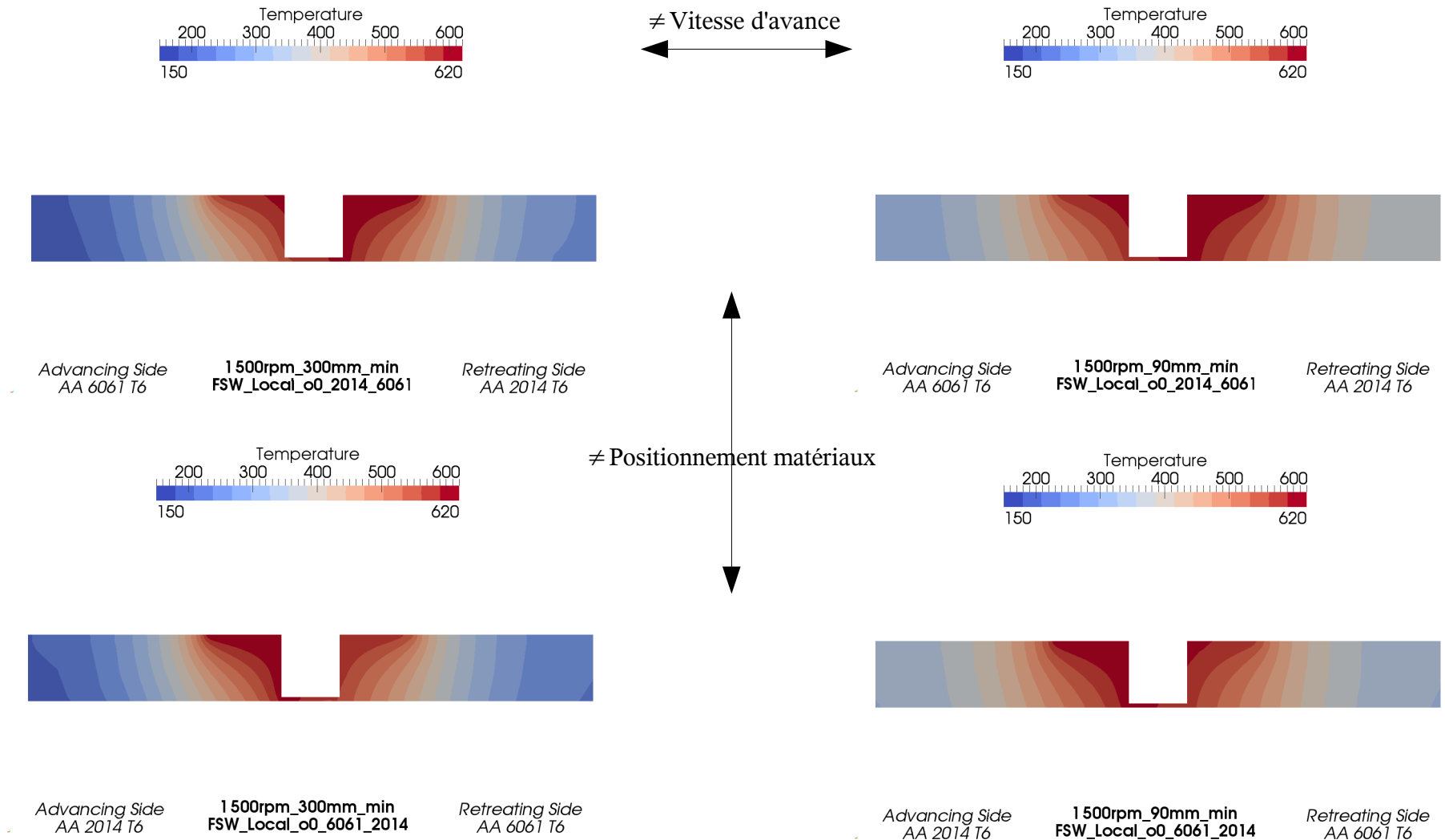
Soudage hétérogène: Répartition de puissance et analyse de sensibilité



Soudage hétérogène: Répartition de puissance et analyse de sensibilité

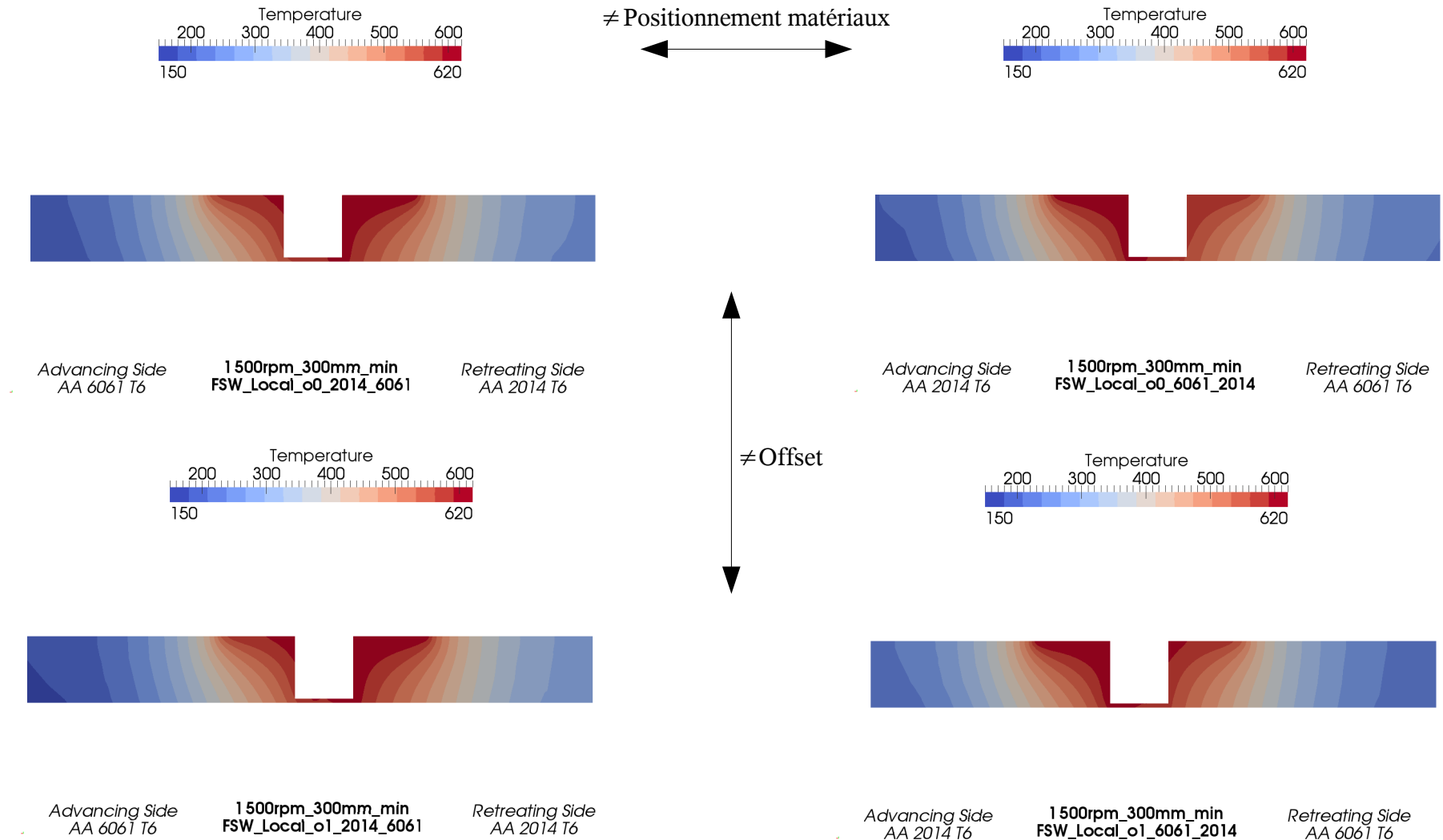


Soudage hétérogène: distribution de température et analyse de sensibilité



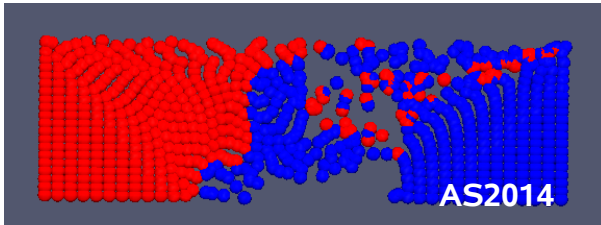
PROD-F-015-01

Soudage hétérogène: distribution de température et analyse de sensibilité

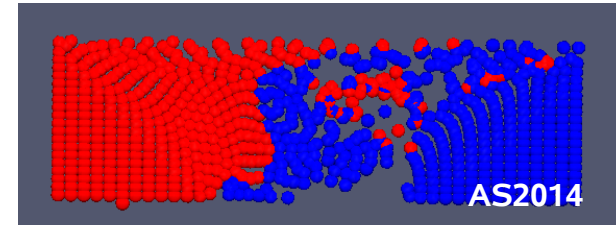


PROD-F-015-01

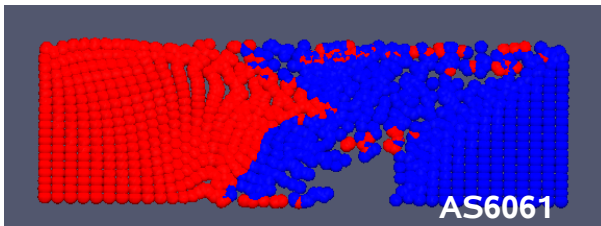
Soudage hétérogène: Distribution des particules dans les joints soudés



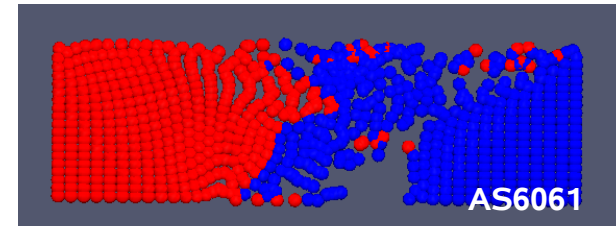
2014/6061 1500 rpm 300 mm/min



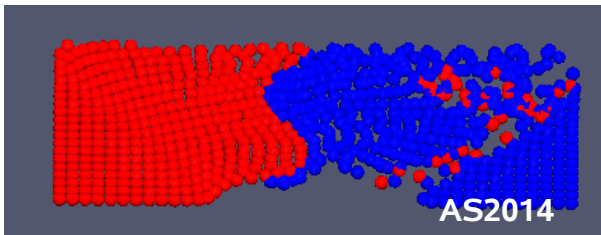
2014/6061 1500 rpm 450 mm/min



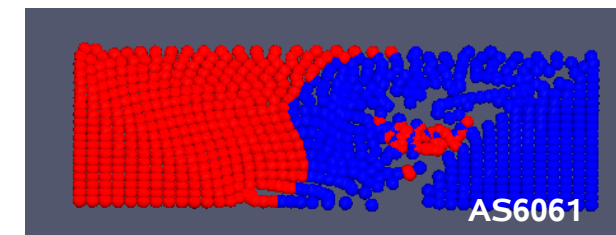
6061/2014 1500 rpm 300 mm/min



6061/2014 1500 rpm 450 mm/min



2014/6061 500 rpm 90 mm/min



6061/2014 500 rpm 90 mm/min

- **Modèle local thermo-fluide: simulation du soudage hétérogène par friction-malaxage**
- **Analyse de sensibilité:**
 - Vitesse d'avance
 - Vitesse de rotation
 - Positionnement relatif des alliages (côté avance/retrait)
 - Offset côté de l'outil vers AA2024
- **Puissance de déformation**
- **Distribution de température autour de l'outil**
- **Distribution de particules dans le joint final**
- **Prise en compte du frottement**
 - Vitesse de glissement
 - Chaleur générée par frottement