

Journée SNS 2014

MODÉLISATION DES STRUCTURES D' « ONION RINGS » EN FSW PAR PRISE EN COMPTE DES CONDITIONS TRANSITOIRES DE CONTACT

[Amèvi TONGNE]

DIRECTEUR: Christophe DESRAYAUD, Professeur HDR à l'EMNSE

CO-DIRECTEUR: Eric FEULVARCH, Maître assistant, Enseignant à l'ENISE

Collaboration avec M. JAHAZI Ecole de Technologie Supérieure de Montréal

PLAN

INTRODUCTION

1^{ère} Partie: Problématiques du soudage FSW

- Ecoulement de la matière
- Formation des onion rings
- Les difficultés de la modélisation du soudage FSW

2^{ème} Partie: Identification du régime périodique

- Dispositifs expérimentaux
- Résultats des essais

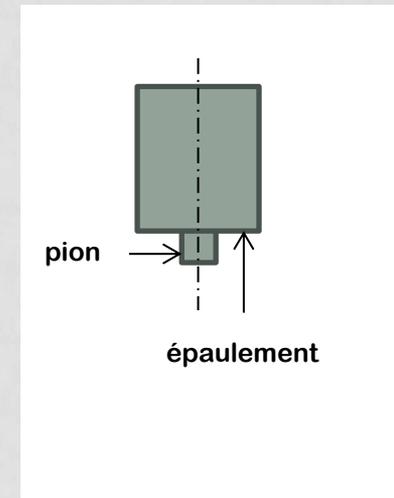
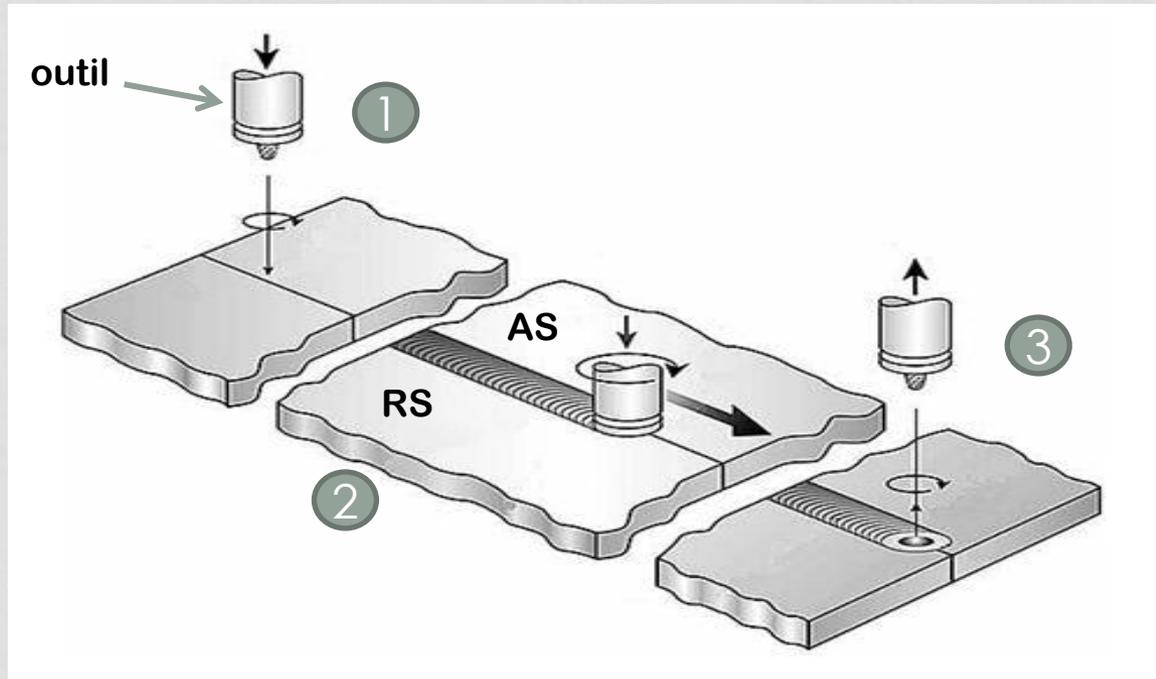
3^{ème} Partie: Modélisation

- Présentation du modèle
- Modélisation Physique
- Modélisation abaqus
- Evaluation des hypothèse sur les champs de vitesse du modèle

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

INTRODUCTION

- Le soudage FSW est développé par Thomas Wayne et breveté par The welding Institute (TWI) d'Angleterre en 1991
- Consiste à la déformer plastiquement à chaud l'interface de deux pièces en contact à l'aide d'un outil animé de mouvement de rotation et de translation.
- Le procédé est réalisé en trois qui sont la plongée, la phase de soudage et le retrait
- L'outil est constituée de deux partie active: le pion et l'épaulement



Présentation des différentes phases de soudage FSW

PROBLÉMATIQUES DU SOUDAGE FSW

Formation des onion rings:

Les « onion rings » sont des structures concentriques observées dans le noyau d'un joint de soudure FSW. Leur origine a fait l'objet de plusieurs interprétations dont Krishnan 2002

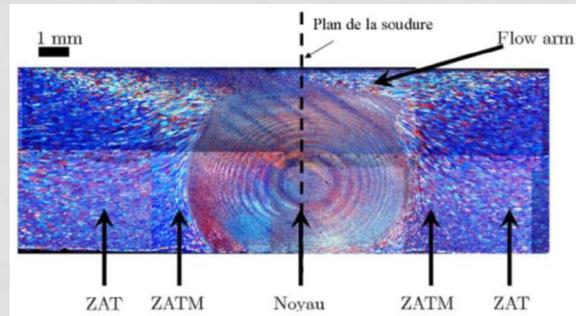
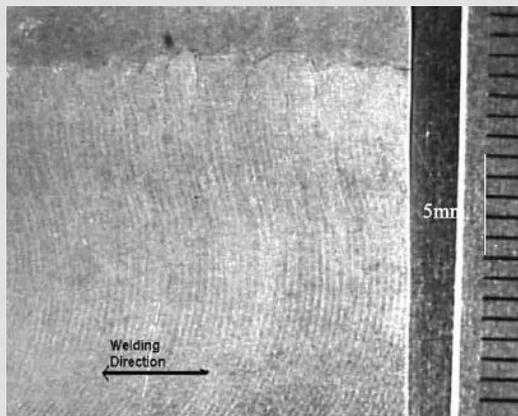
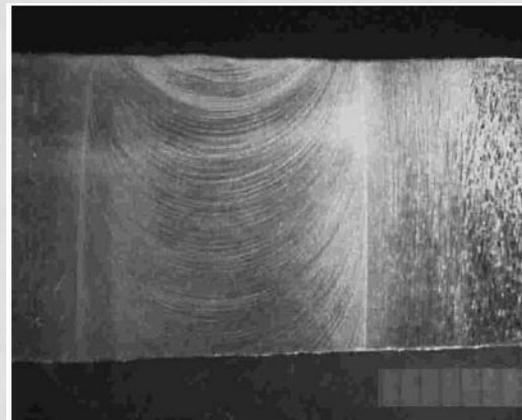


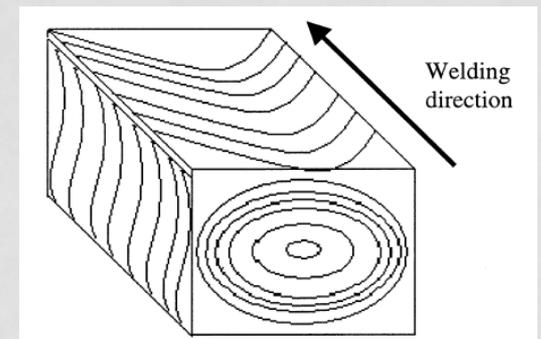
Figure 1. Cartographie d'un joint soudé 2024-T351 après oxydation anodique. Microscopie optique. Section selon un plan orthogonal au plan de soudure et au plan de la tôle [Genevois, 2004]



a. Coupe verticale longitudinale



b. Coupe horizontale



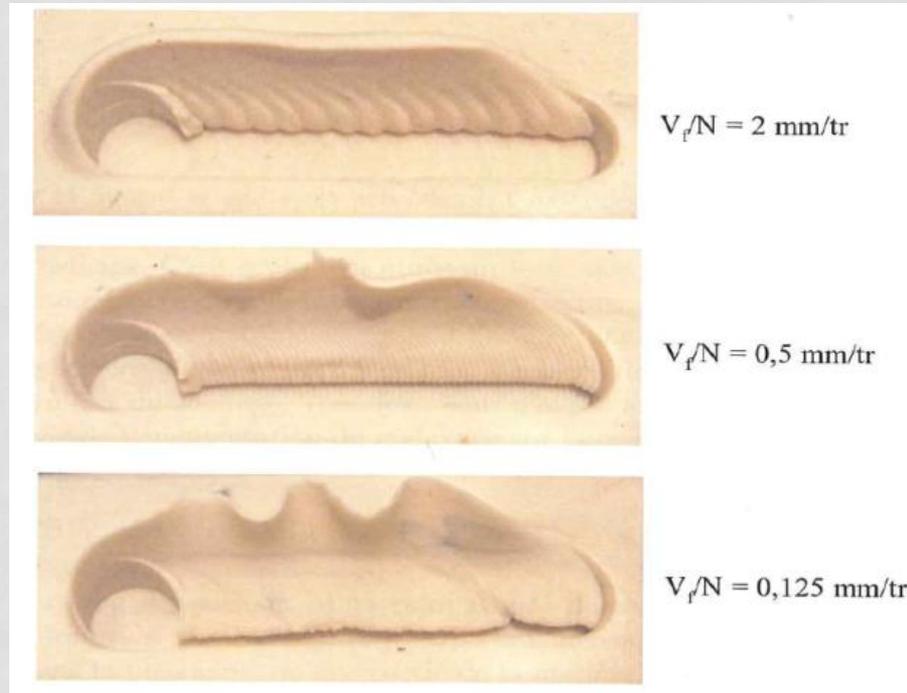
c. Représentation 3D

Figure 2. Empilement de couches de matière dont la coupe transversale montre les onion rings [Krishnan, 2002]

PROBLÉMATIQUES DU SOUDAGE FSW

Formation des onion rings:

L'épaisseur des couches de matière est égale à l'avance par tour de l'outil.



Influence de l'avance par tour sur la formation des couches de matière [Gratecap, 2007]

PROBLÉMATIQUES DU SOUDAGE FSW

Les difficultés de la modélisation du soudage FSW:

- **Le couplage thermique, mécanique et microstructural du soudage FSW**

Certains auteurs ont développés des modèles purement mécaniques en introduisant les champs de température comme des données . (Chen and Kovacevic [2003],Zhu and Chao [2004],Zhang et al. [2005])

- **Les grandes déformations générées par l'outil**

Besoin d'utiliser des techniques de remaillage rendant le temps de calcul coûteux.

D'où le besoin de créer des modèles thermiques où les variables mécaniques sont exprimées analytiquement. ([Zhang et al., 2011],[Jacquin et al., 2011],[Schmidt and Hattel, 2008]).

De plus, l'utilisation des formules de la mécanique des fluides en supposant le procédé de soudage FSW à l'écoulement d'un fluide autour d'un poteau a été utilisé par des auteurs comme [Heurtier et al.] et [Jacquin et al.]) pour l'expression de la vitesse de la matière pendant le soudage.

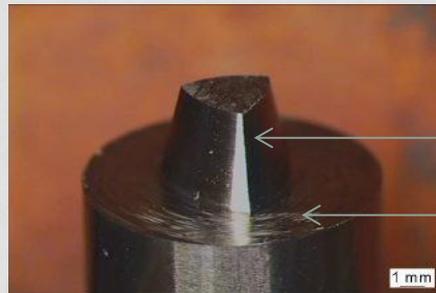
- **Les conditions de contact périodiques**

[Yang et al. 2004a] ont parlé des bandes de structure observés dans les joints de soudure FSW sans pour autant chercher à les modéliser. La plupart des modèles sont réalisés en stationnaire pour un gain de temps de calcul. Les phénomènes de stick-slip au contact pion-matière qui de loin, sont à l'origine de la formation des onion rings dont la morphologie influence la résistance mécanique des joints de soudure.

IDENTIFICATION DU RÉGIME PÉRIODIQUE

Dispositifs expérimentaux:

- Plaques à souder laminées en alliage d'aluminium 6082-T6
- Outil de soudage en carbure de tungstène de géométrie trigone



Pion

Epaulement

- Machine de commande numérique équipée d'un montage pour le bridage des plaques et d'une table dynamométrique pour l'enregistrement des efforts



Plaque à souder

Montage de soudage

Table dynamométrique

IDENTIFICATION DU RÉGIME PÉRIODIQUE

Résultats des essais:

- Observation de la microstructure

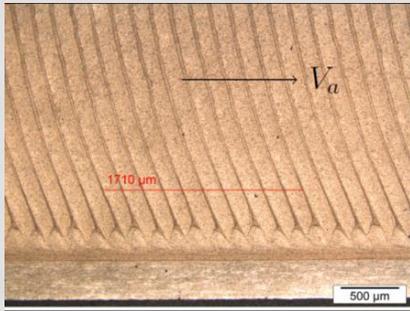


Figure 1. Bandes inclinées selon l'angle de cône de l'outil trigone. L'épaisseur de chaque couche correspond au tiers de l'avance par tour de l'outil.

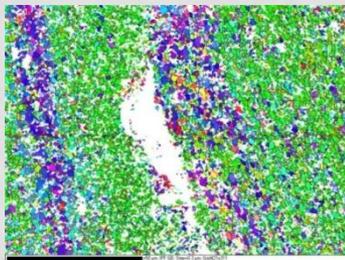
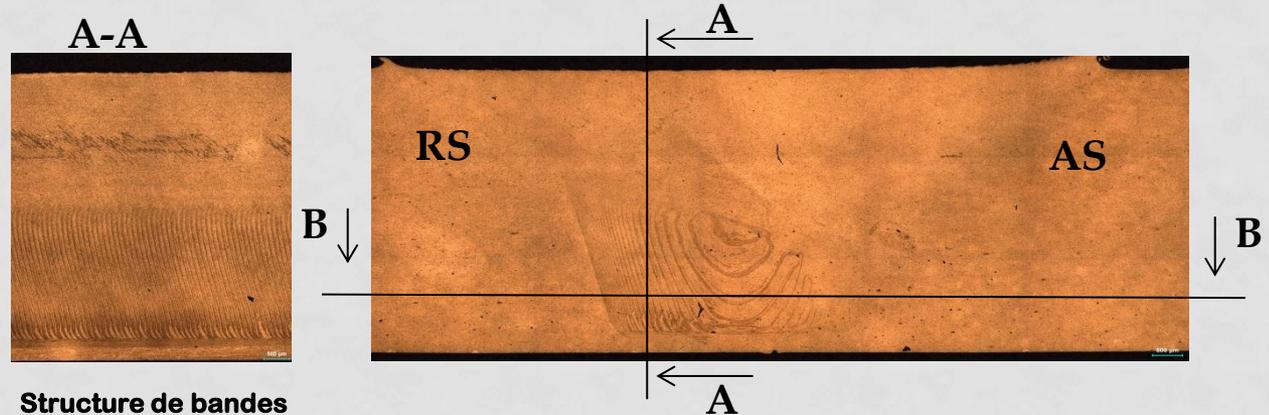
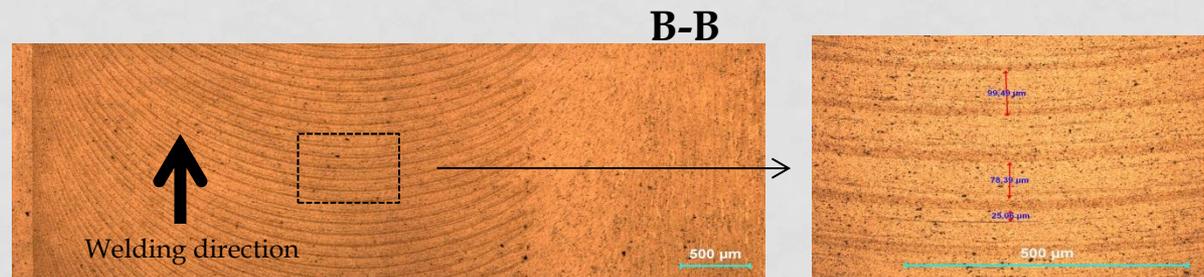


Figure 2. Structure d'orientation EBSD montrant les bandes de désorientation dans la coupe verticale le long d'un cordon



Structure de bandes dans l'épaisseur des plaques

visualisation des "Onion rings" dans la coupe transversale du cordon.



Structure de bandes dans le plan d s plaques

Figure 3. visualisation au MO d'un cordon de soudure. Vitesses de l'outil 2000tr/min et 600mm/min

ETUDES EXPÉRIMENTALES

- ✓ Structure en bandes: forgeage en de la matière par le pion en avale du procédé

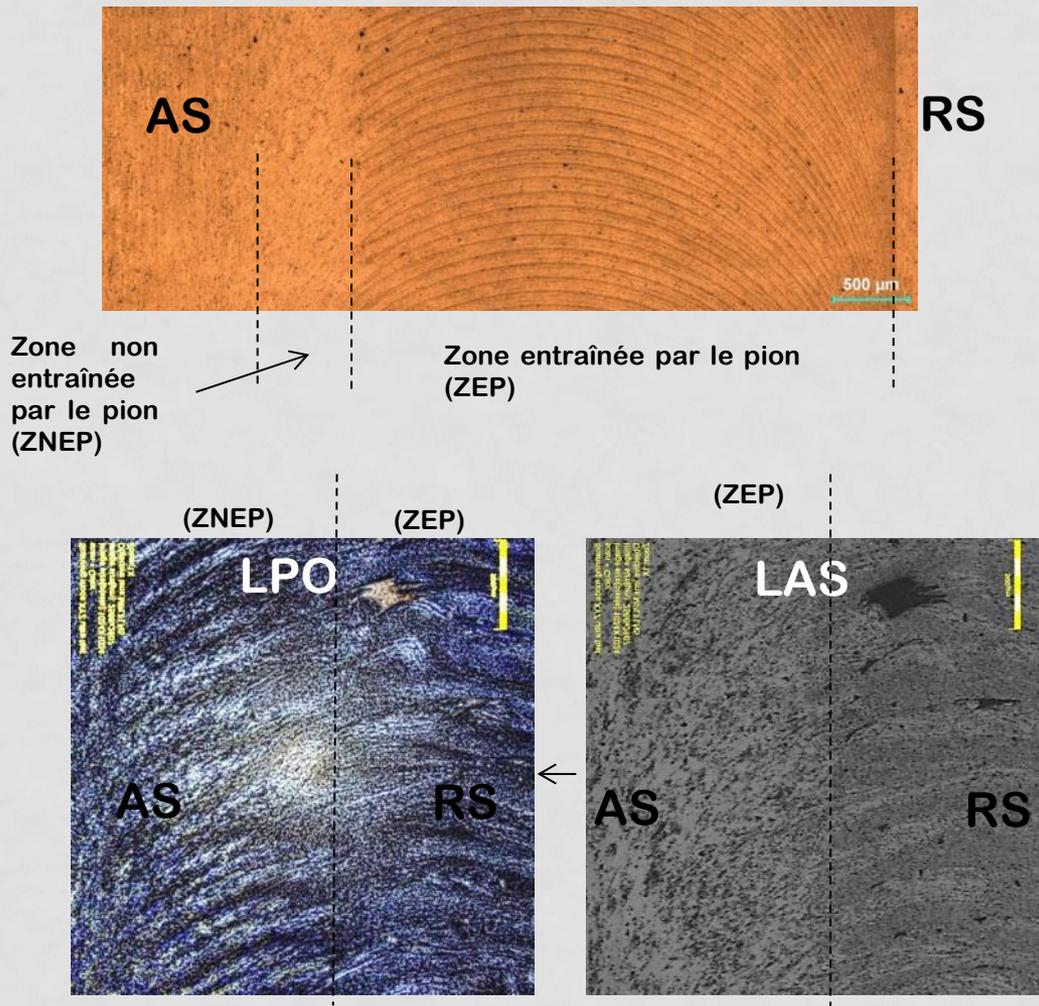


Figure1. La zone du côté advancing provenant de l'écoulement de la matière est aussi périodique.

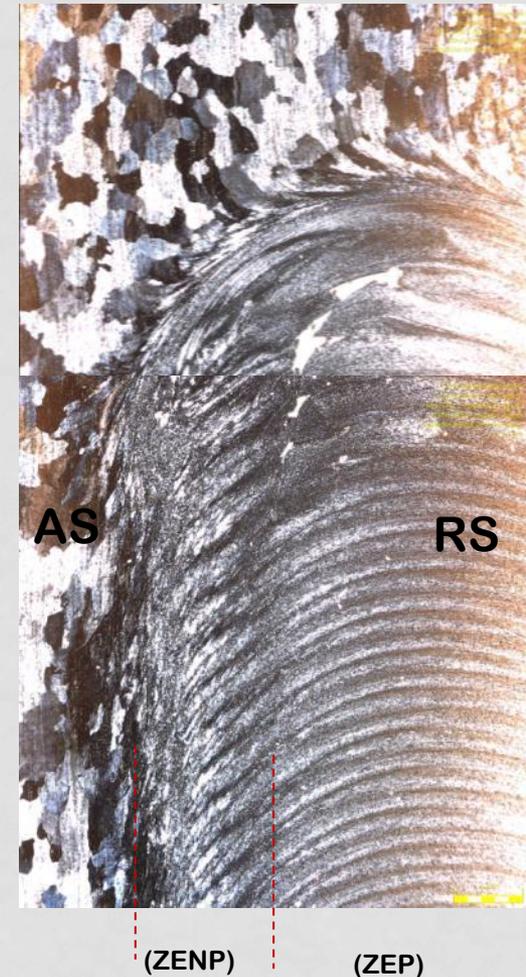


Figure2. Microscopie en lumière polarisée d'une soudure où les deux côtés du défaut de vide présentent des structure périodiques montrant que le pion forge de la matière en AS.

IDENTIFICATION DU RÉGIME PÉRIODIQUE

Résultats des essais:

- Observation des efforts de soudage

L'irrégularité dans la structure des cordons s'observe aussi au niveau des efforts de soudage

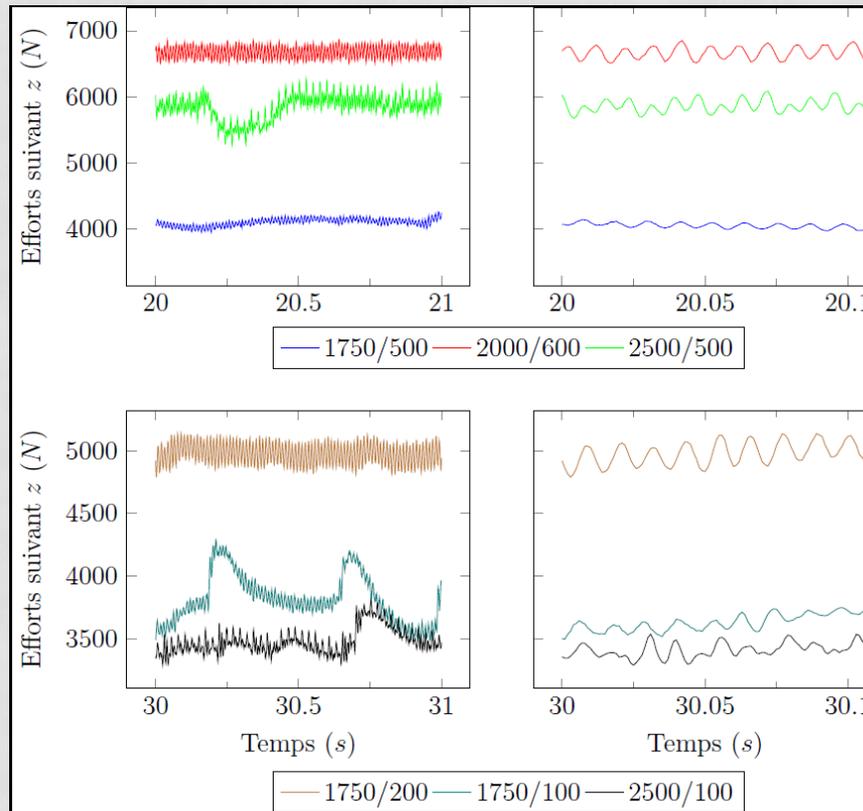


Figure 1. Visualisation de l'oscillation des efforts de soudage de fréquence égale au tiers de la rotation par tour de l'outil. L'amplitude étant d'environ 4% la valeur des efforts.

MODÉLISATION

Présentation du modèle:

- L'Objectif est de créer sur Abaqus un modèle thermique basé sur le même principe que le modèle de Jacquin et coauteurs réalisé en régime stationnaire par un code Fortran. Notre modèle permettra la simulation du procédé FSW en régime périodique dans un temps relativement court grâce au solveur Abaqus.
- Le flux de chaleur volumique dû au terme de dissipation thermique de l'équation de chaleur et le flux de chaleur surfacique généré par le frottement outil-matière sont injectés dans le modèle par une sous routine DFLUX.
- La convection de la chaleur dans la matière due aux champs de vitesse est prise en compte par une sous routine MASFL(Mass Flow Rate).
- Une troisième sous routine UEXTERNALDB(user external database) permet de définir les variables(COMMON BLOCKS) et de faire des opérations externes au solveur Abaqus.

MODÉLISATION

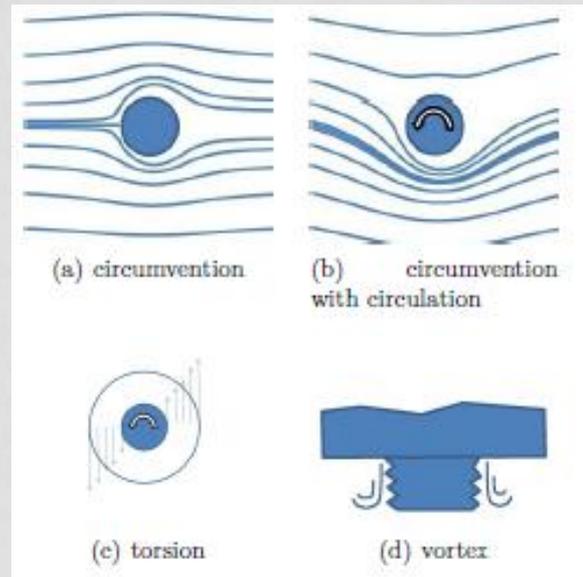
Modélisation physique:

- Equation de chaleur en Eulérien (convection forcée)

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) = \lambda \Delta T + Q_v \quad [1]$$

Les variables mécaniques sont la vitesse \vec{v} et l'énergie d'auto-échauffement Q_v

- Hypothèses sur les champs de vitesse



MODÉLISATION

Modélisation physique:

- Expression des champs de vitesse

$$\vec{v} = \begin{cases} v_x = V_a \left(1 - r_p^2 \frac{(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \right) - \alpha\omega \frac{y(z - 0,8h)}{0,2h} - \frac{\Gamma y}{2\pi(x^2 + y^2)} + V_r \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ v_y = V_a \left(-2r_p^2 \frac{xy}{(x^2 + y^2)^2} \right) + \alpha\omega \frac{x(z - 0,8h)}{0,2h} + \frac{\Gamma x}{2\pi(x^2 + y^2)} + V_r \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ v_z = V_z \end{cases} \quad [2]$$

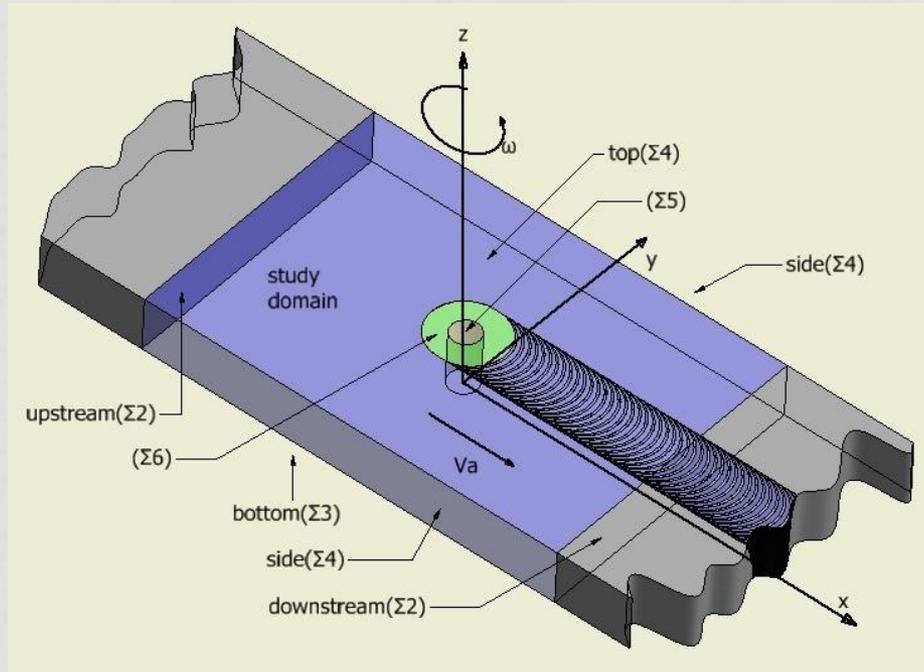
$$\left. \begin{aligned} \Gamma &= \Gamma_0 \cos \omega t \\ V_r &= V_{r0} \sin \omega t \\ V_z &= V_{z0} \sin \omega t \end{aligned} \right\} \text{ Conditions de contact oscillatoire}$$

V_{r0} et V_{z0} Sont la contribution du champ de vortex, simulée par Jacquin et Al.

MODÉLISATION

Modélisation Abaqus:

- Conditions aux limites



$$\Sigma 2, \Sigma 3, \Sigma 4, \Sigma 5: \phi = h(T_s - T_{inf})$$

$$\Sigma 6: SHF = C_{op} \frac{\bar{m}}{\sqrt{3}} \sigma_0 \omega (1 - \alpha) \sqrt{x^2 + y^2} \quad (\text{Loi de friction de Tresca})$$

$$\text{Study domain: } BHF = \Gamma_d \sigma_0 \bar{\epsilon} = \Gamma_d k \exp\left(\frac{mQ}{RT}\right) \bar{\epsilon}^{m+1}$$

MODÉLISATION

- **Discrétisation spatiale et temporelle**

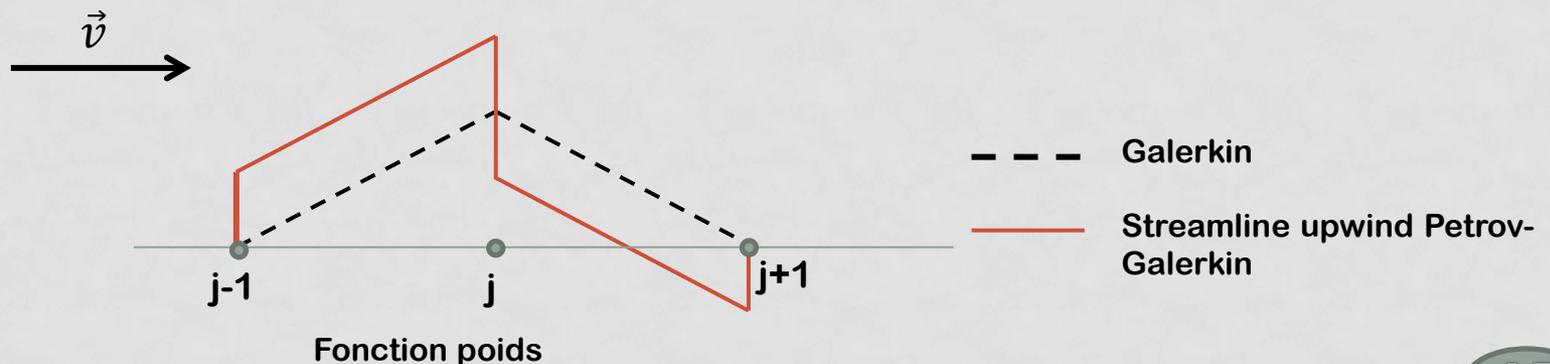
Pour les phénomènes de convection forcée, on utilise sur Abaqus les éléments DCC3D8 faisant appelle à des théories basées sur les travaux de Yu et Heinrich (1986, 1987).

Dans ces théories le "Streamline upwind« (SU) de Petrov-Galerkin est utilisé et la méthode d'intégration du temps est de Crank Nicholson (Methode du trapèze).

$$\int_{\Omega} \delta T \left[\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overrightarrow{grad}(T) \right) - BHF \right] d\Omega + \int_{\Omega} \delta T \lambda \Delta(T) d\Omega = 0 \quad [3]$$

$$\left. \begin{aligned} T(x) &= N^i(x) T^i \\ \delta T(x) &= N^j(x) \delta T^j \end{aligned} \right\} \text{Discrétisation spatiale (selon Galerkin)}$$

$$\left. \begin{aligned} T(x) &= N^i(x) T^i \\ \delta T(x) &= W^j \delta T^j = \left(N^j(x) + \bar{\lambda} \frac{\vec{v}}{|\vec{v}|} \overrightarrow{grad}(N^j(x)) \right) \delta T^j \end{aligned} \right\} \text{Discrétisation spatiale ("Streamline upwind" de Petrov-Galerkin)}$$



MODÉLISATION

- **Discrétisation spatiale et temporelle**

$$T(x, t) = N^i(x)A^k(t)T^{(i,k)} \quad \text{Discrétisation spatiale et temporelle de la température}$$

$A^k(t)$ Fonction d'interpolation temporelle linéaire formulée par Hughes pour l'intégration par la méthode du trapèze(Crank-Nicholson)

$$\delta T(x, t) = W^j \delta T^j = \left[N^j(x) \bar{A} + \underbrace{\frac{h}{2} \left(\alpha \bar{A} + \beta \frac{\Delta t}{2} \frac{d\bar{A}}{dt} \right) \frac{\vec{v}}{|\vec{v}|} \overrightarrow{grad}(N^j(x))}_{p^j} \right] \delta T^j$$

Partie discontinue
(Contribution de "steamline upwind")

α , Paramètre pour le contrôle de la diffusion artificielle

β , Paramètre pour le contrôle de la dispersion numérique (Abaqus intègre le contrôle de la dispersion numérique dans son élément DCC3D8D)

MODÉLISATION

- **Discrétisation spatiale et temporelle**

Forme faible de l'équation de chaleur:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} W^{j,k} \left[\rho c T^{i,k} \left(N^i \frac{\partial A^k}{\partial t} + A^k \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(N^i) \right) \right. \\ \left. - BHF \right] d\Omega + A^k T^{i,k} \lambda \int_{\Omega} (\bar{A} \lambda \overrightarrow{\text{grad}}(N^j) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(N^i) - P^j \Delta(N^i)) d\Omega \\ = \int_{s_u} N^j (SHF - h(T_s - T_i)) ds \end{aligned} \quad [4]$$

MODÉLISATION

- **Simulation numérique**

- **Régime stationnaire**

Maillage identique à celui de Jacquin et Al. (25000 noeuds). Le temps de calcul dure *2,87min* contre *45min* pour le modèle de Jacquin et Al.

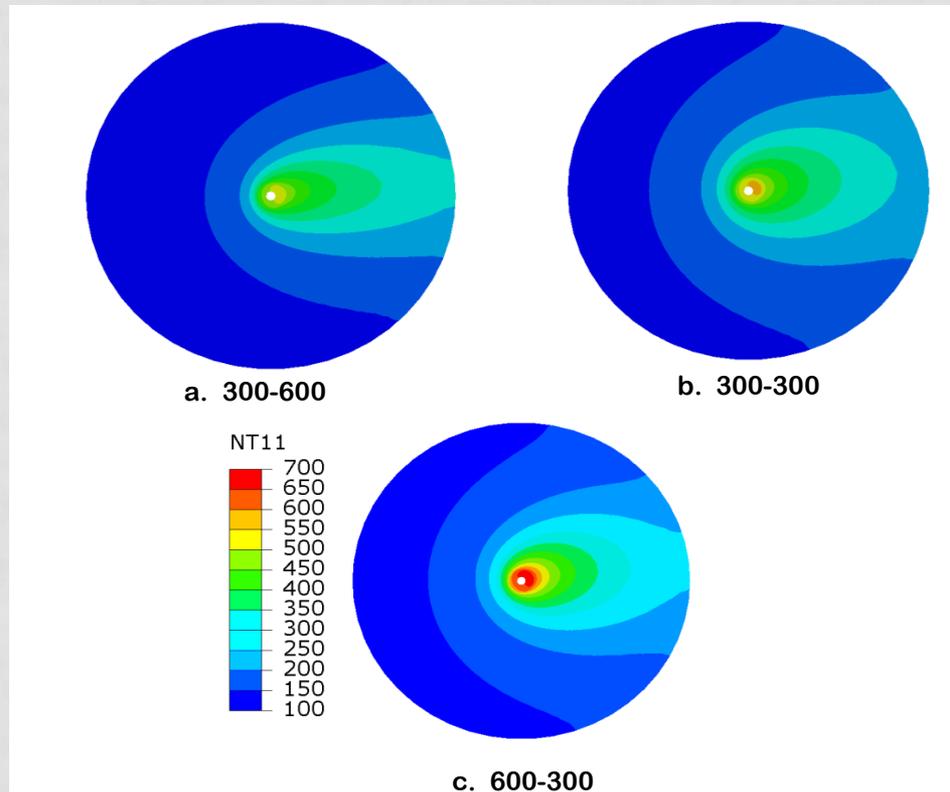


Figure 1. Evolution de la température en fonction des vitesses de soudage (Vitesse de rotation en tr/min - Vitesse d'avance en mm/min)

MODÉLISATION

- **Simulation numérique**

- Régime périodique (comparaison des éléments DCC3D8 et DCC3D8D)

Maillage de 39242 nœuds. Le temps physique est de 20s

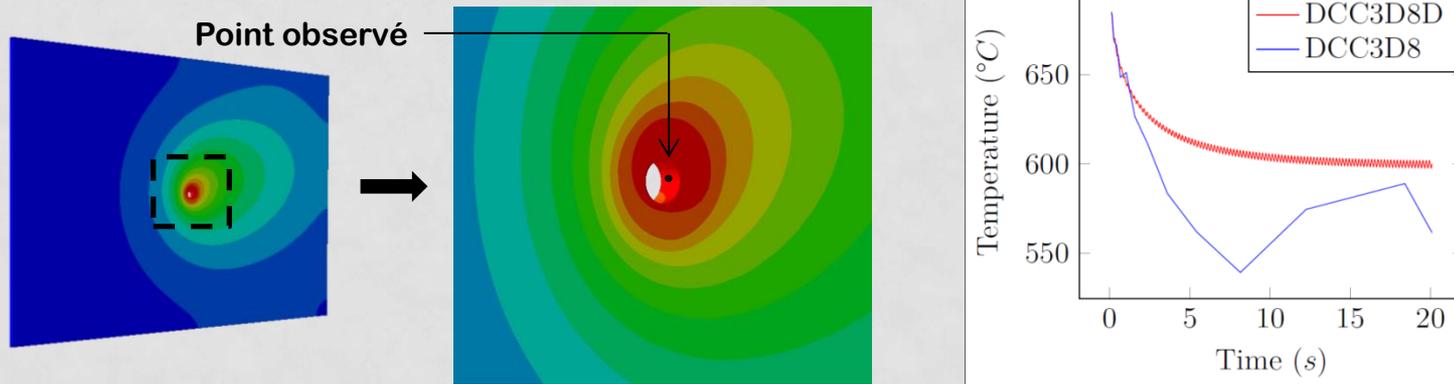


Figure 1. Effet du non-contrôle de la dispersion sur l'histoire thermique pour un Job Abaqus à pas de temps automatique (temps de calcul : DCC3D8=7min, DCC3D8D=2058min)

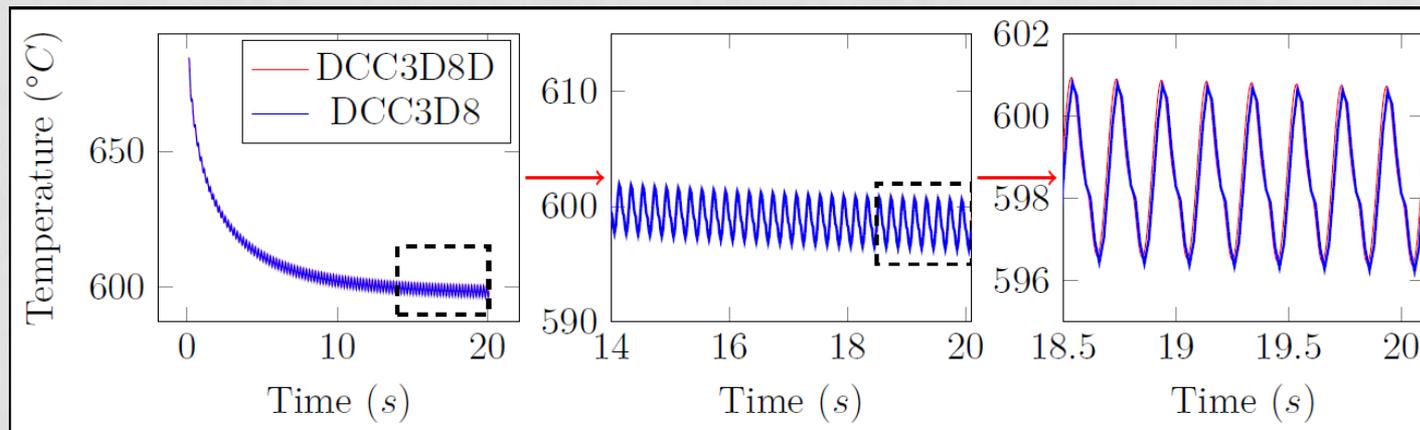


Figure 2. Absence (ou anodin) d'effet du non-contrôle de la dispersion sur l'histoire thermique pour un Job Abaqus à pas de temps fixé à 0,02s (temps de calcul : DCC3D8=204min, DCC3D8D=1869min)

MODÉLISATION

- Evaluation des hypothèse sur les champs de vitesse du modèle

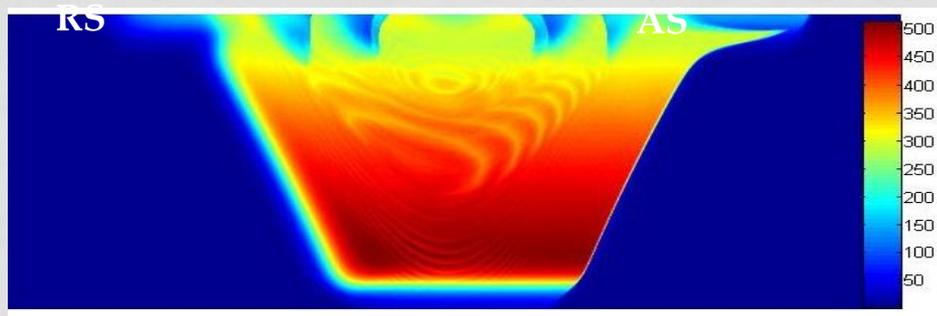


Figure 1. structures "onion rings" prédite par le modèle (prédiction basée sur la vitesse de déformation maximale des particules)



Figure 2. structure "onion rings" expérimentale

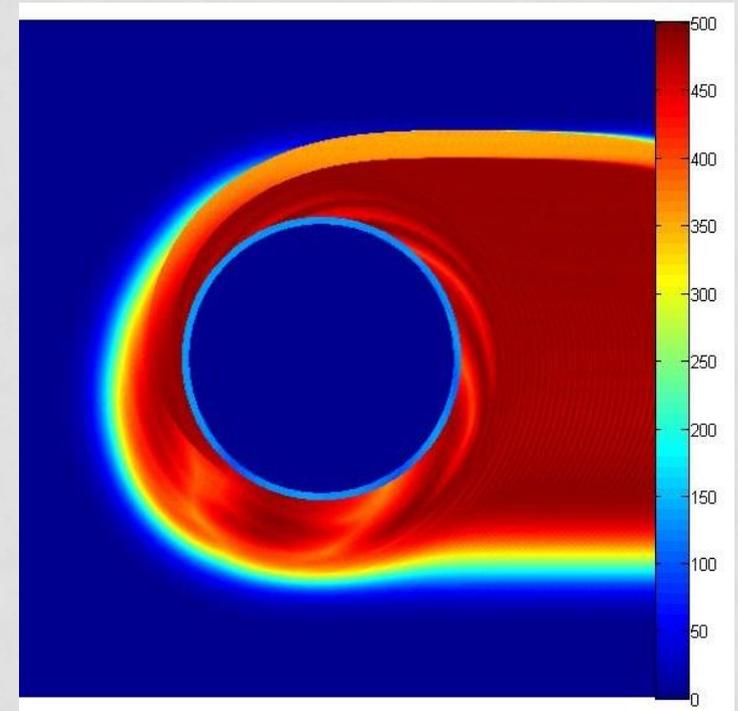


Figure 3. Structure de bandes prédit par le modèle (prédiction basée sur la vitesse de déformation maximale des particules)

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusions

- **Modèle intégrant les effets transitoires (périodiques) locaux au niveau du pion**
- **Loin du pion et de manière macroscopique bonne compatibilité avec le modèle en régime permanent**
- **Etat de déformation et température accessible dans les zones centrales du noyau**

Perspectives :

- **intégrer dans le modèle une condition évolutive au niveau du contact épaulement/matière dans le temps et dans le rayon.**
- **Atténuer l'effet de la circulation par l'évolution de la viscosité du matériau dans le rayon.**
- **Calibrer l'intensité des conditions de contact(coefficient d'entraînement de la matière) avec les paramètres de vitesse de soudage.**

MODÈLE ANALYTIQUE

- Champ de vitesse selon Jacquin et Al. Pour un outil cylindrique

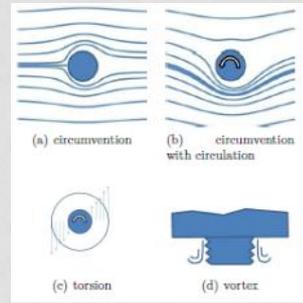
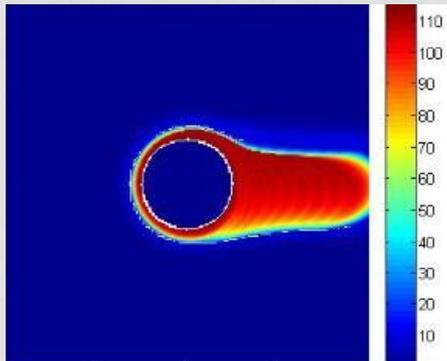


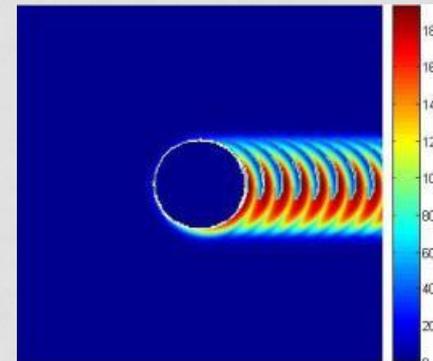
Figure1. description schématique des champs de vitesse

- ✓ Le champ de contournement est basé sur l'écoulement potentiel d'un fluide autour d'un cylindre

- Modification envisagée du champ de vitesse de contournement



Rétrécissement dû au champ de contournement



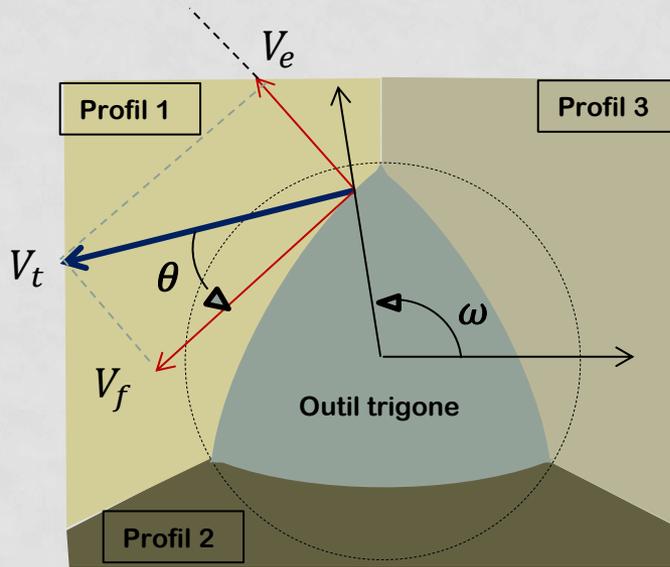
Résultat après modification du champ de contournement

Figure1. Vitesse de déformation maximale atteinte par chaque particule [s^{-1}] calculée à partir des champs de vitesse postulés

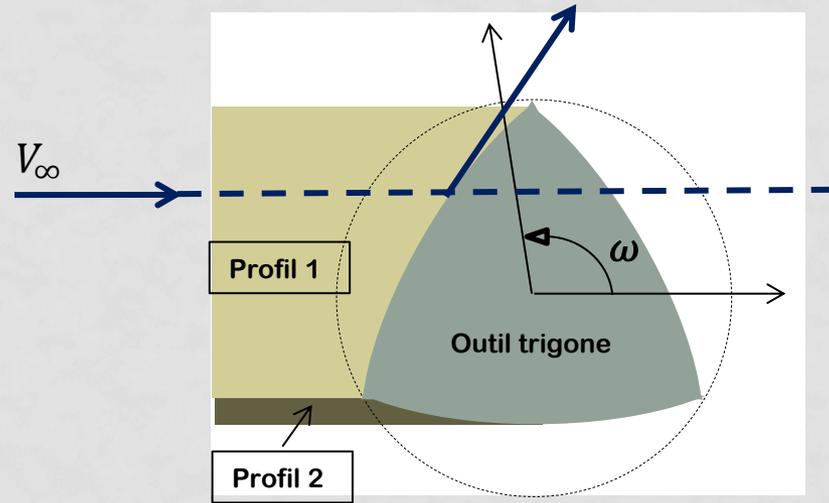
**Merci pour votre
Attention**

MODÈLE ANALYTIQUE

- Modèle analytique



Cas de la circulation



Cas du champ de contournement

Figure1. Zone d'influence de chaque profil de l'outil selon les champs de vitesse

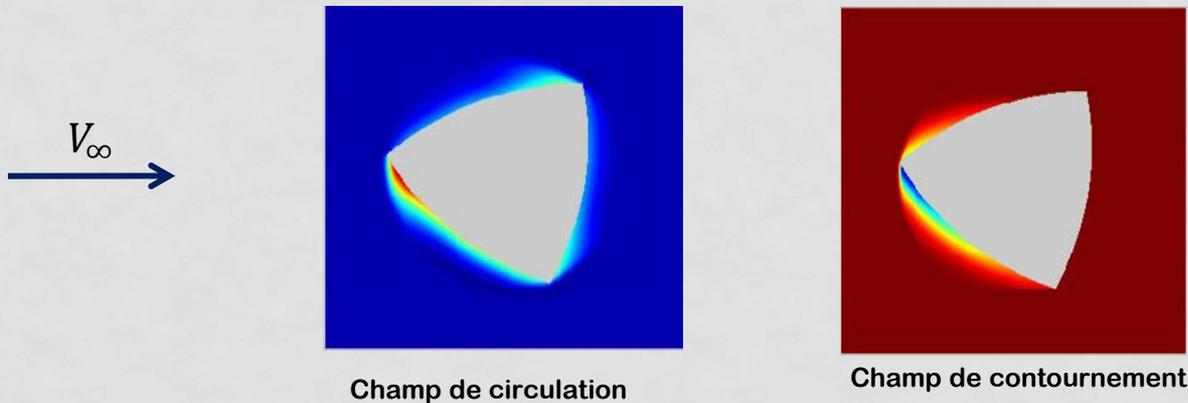


Figure2. Simulation des champs de vitesse moyenne