



framatome



Etablissement de la texture en soudage TIG d'alliages austénitiques : soudures réelles et numériques

Thomas Billotte^{1,2}, Dominique Daloz², Julien Zollinger², Guillaume Tirand³, Vincent Robin⁴

¹ : Institut de Soudure, centre de Goin (57420)

² : Université de Lorraine, UMR CNRS 7198, Institut Jean Lamour (54011)

³ : Framatome, Saint Marcel (71100)

⁴ : EDF R&D, Chatou (78400)

PLAN

- I. Présentation du sujet
- II. Matériaux et techniques
- III. Evolution des microstructures des soudures
 1. Soudures réelles
 2. Soudures numériques
- IV. Conclusions et perspectives

I. Présentation du sujet

- Application visées
 - Énergie nucléaire

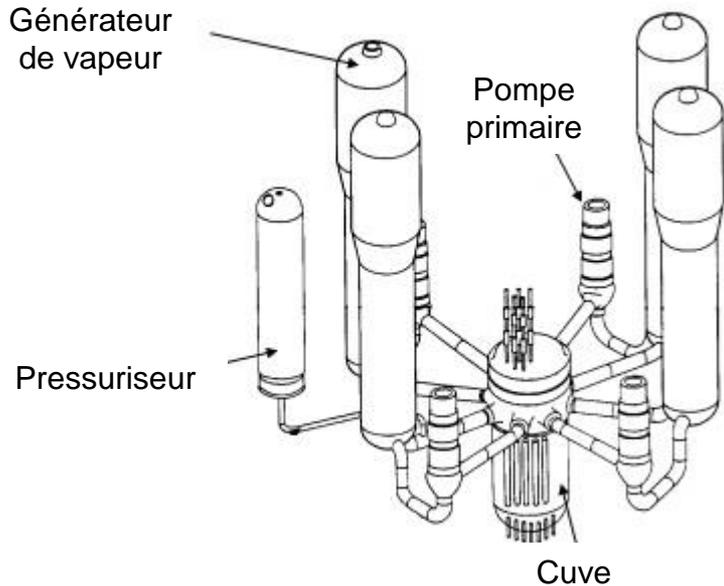


Schéma : Réacteur à eau pressurisée



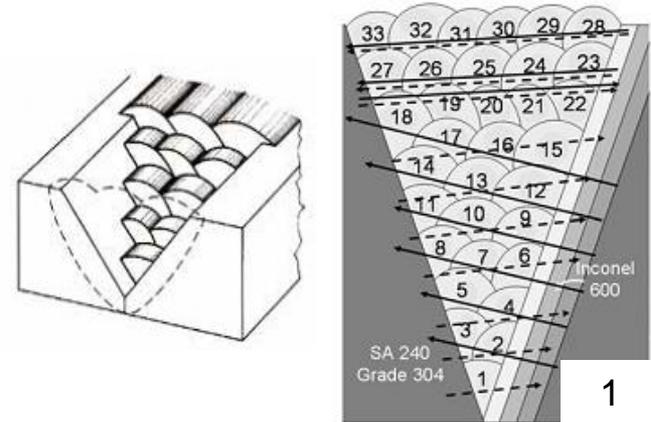
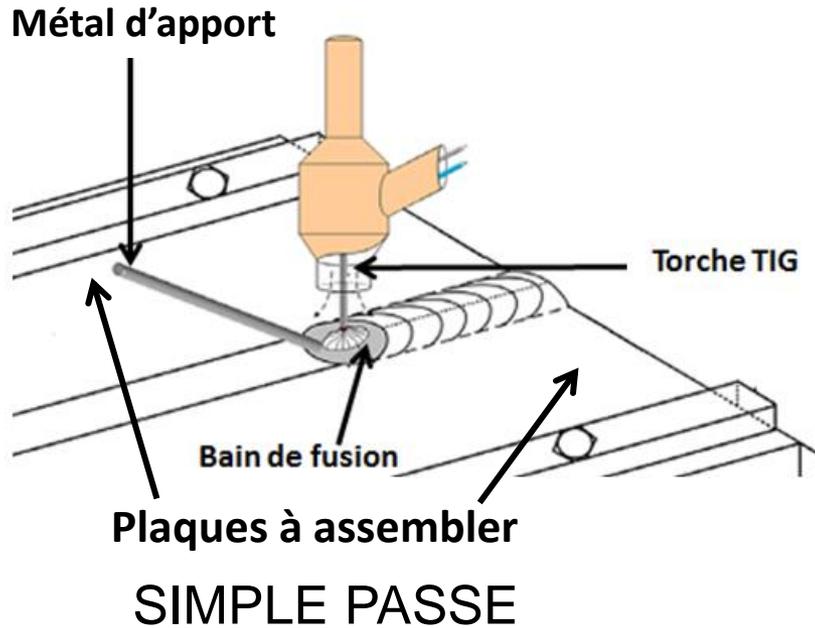
Générateur de vapeur



Usine de fabrication des équipements lourds,
Framatome, Chalon sur Saône

I. Présentation du sujet

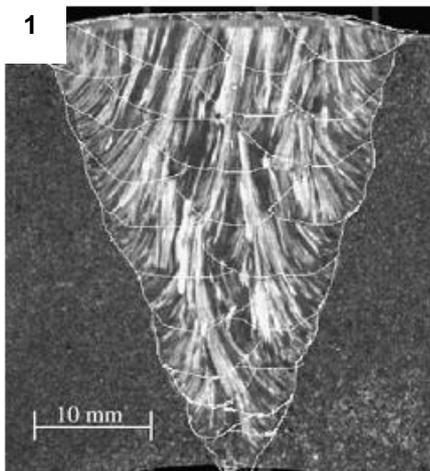
- Soudage TIG (Tungsten Inert Gas)



MULTI-PASSES

I. Présentation du sujet

- Dans l'industrie, l'intégrité de la soudure doit être contrôlée
 - Contrôle Non Destructif (CND) par ultrason
 - Principe d'une échographie médicale
 - L'onde rebondit lorsqu'elle rencontre un défaut et fait apparaître un écho
 - Révèle la taille, la nature et la position du défaut dans la pièce²
 - Pour les soudures
 - Interprétations de ces signaux délicates



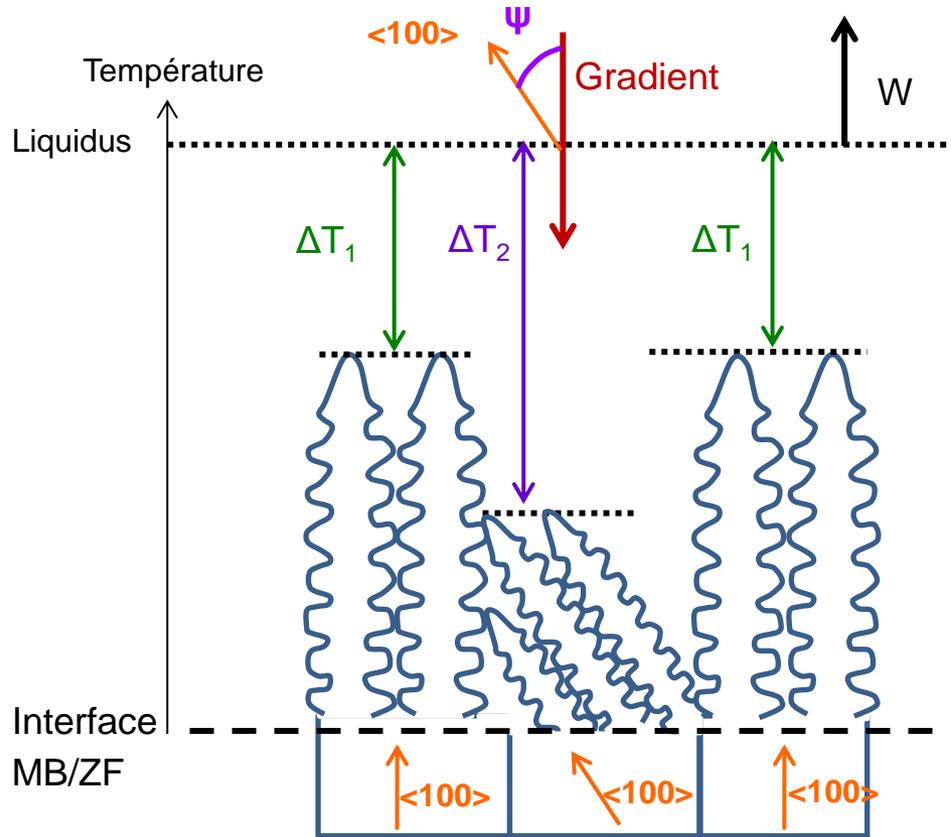
- Nombre de domaines élastiques : Taille des grains
- Désorientation entre chaque domaine : Texture de la soudure

¹ A.Apfel et al, Coupling an ultrasonic propagation code with a model of the heterogeneity of multipass weld to simulate ultrasonic testing, Ultrasonic 43, 2005, 447 – 456

² Mohammed Cherfaoui, Essais non destructifs, Techniques de l'ingénieur, référence bm 6450, 10/07/2006

I. Présentation du sujet

- Sélection des grains en croissance dendritique



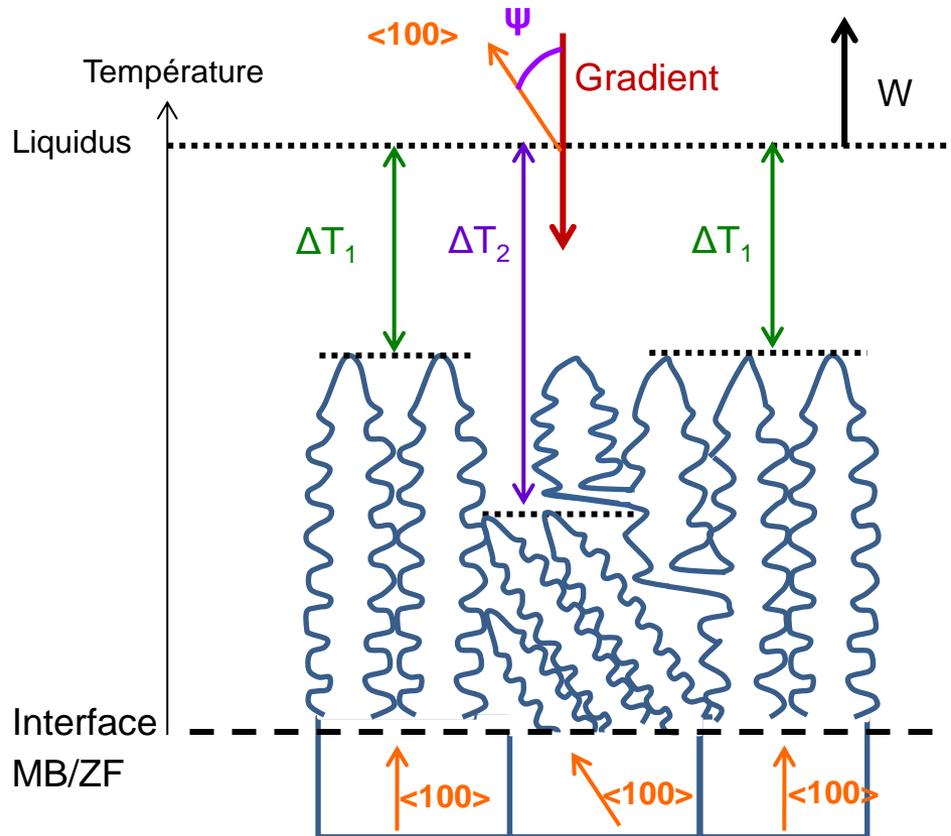
⇒ Vitesse de croissance V dépend de l'orientation de $\langle 100 \rangle$ par rapport au gradient et de la vitesse de soudage W

$$\Rightarrow V = \frac{W}{\cos\psi}$$

⇒ **Surfusion ΔT** différentes d'un grain à l'autre

I. Présentation du sujet

- Sélection des grains en croissance dendritique



⇒ Vitesse de croissance V dépend de l'orientation de $\langle 100 \rangle$ par rapport au gradient et de la vitesse de soudage W

$$\Rightarrow V = \frac{W}{\cos\psi}$$

⇒ **Surfusion ΔT** différentes d'un grain à l'autre

⇒ La **désorientation du grain** par rapport au gradient pilote la sélection

- Sélection des grains
 - **Diminution du nombre de grains dans la soudure**
 - **Augmentation de la texture dans la soudure**

I. Présentation du sujet

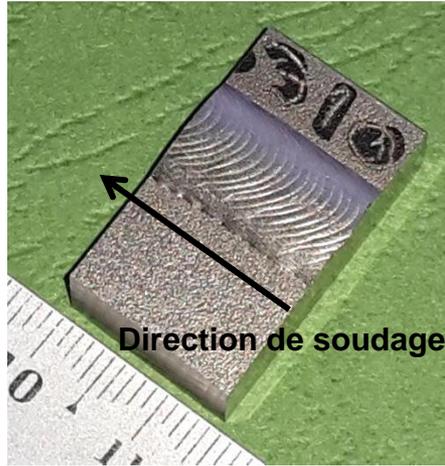
- Objectif : Identification des phénomènes thermo-métallurgiques associés à la sélection des grains en soudage TIG
 - Elaborer une méthode de traitement des données microstructurales des soudures via un cas « simple »
 - Relier ces évolutions microstructurales aux phénomènes physiques du soudage sur le cas « simple »
 - Appliquer ces méthodes aux soudures numériques sur le cas simple

PLAN

- I. Présentation du sujet
- II. Matériaux et techniques**
- III. Evolution des microstructures en soudage
- IV. Conclusions et perspectives

II. Matériaux et techniques

- Expérience de soudage : cas « simple »
 - Ligne de refusion sur substrat plat



Ligne de refusion

Substrat :

- A600 (Ni 72, Cr 18, Fe 10)

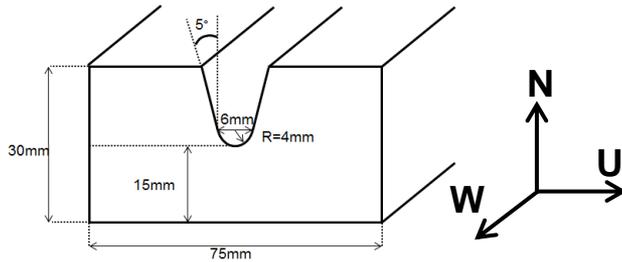
Métal d'apport :

- FM52 (Ni 60, Cr 30, Fe 10)

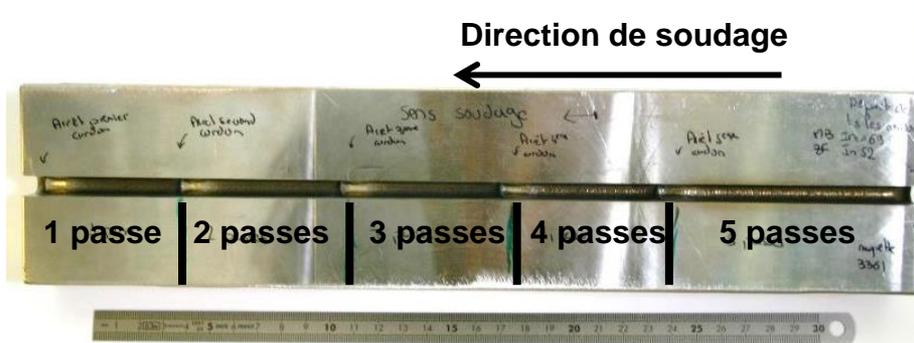
- **Mise au point d'une méthode de caractérisation des microstructures**
- **Compréhension de la formation des microstructures en soudage**

II. Matériaux et techniques

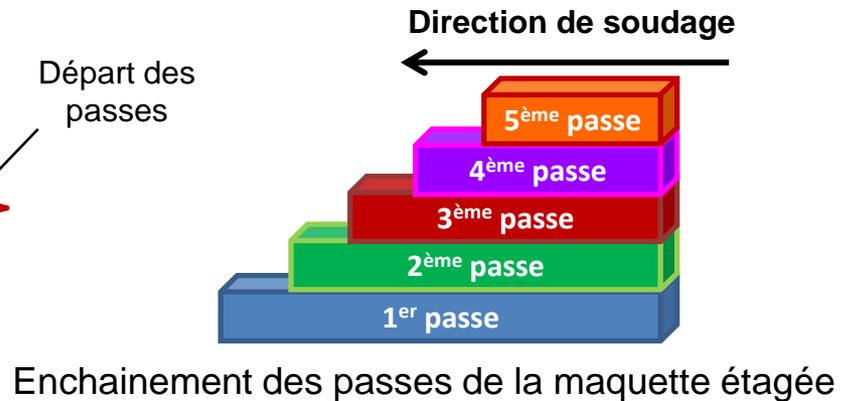
- Expériences de soudage : maquette étagée



Géométrie du chanfrein



Maquette étagée



Enchaînement des passes de la maquette étagée

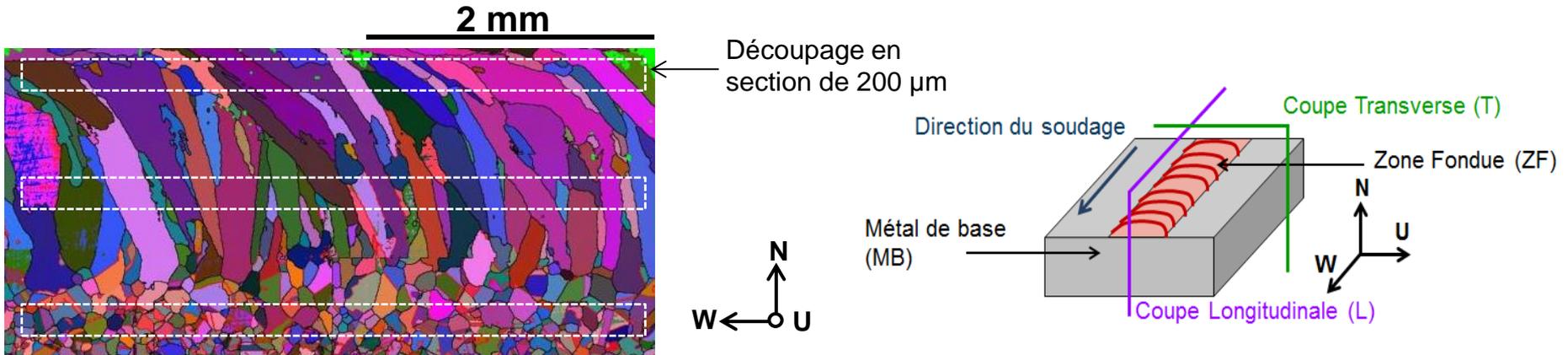
- Influence du procédé multi-passes sur de la formation des microstructures en soudage

PLAN

- I. Présentation du sujet
- II. Matériaux et techniques
- III. Evolution des microstructures des soudures
 1. Soudures réelles
 2. Soudures numériques
- IV. Conclusions et perspectives

III. Evolution des microstructures des soudures

- Ligne de refusion
 - Propriétés des soudures à caractériser
 - Nombre de grains ou densité de grains dans la ZF
 - Texture ou l'orientation cristalline des grains dans la ZF
 - Méthode de suivi de la densité de grains dans la ZF



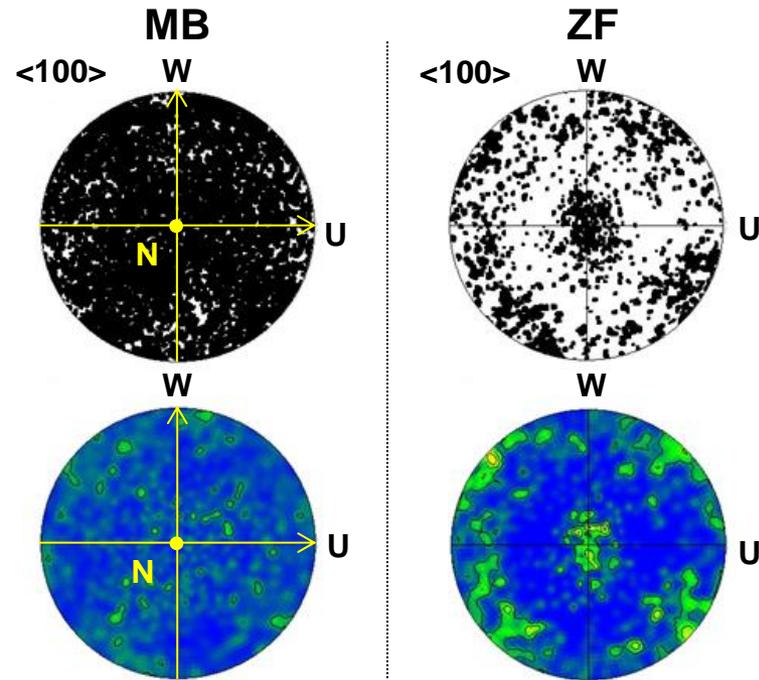
Carte EBSD en pseudo contraste d'orientation, coupe L

- Découpage de la carte en EBSD en plusieurs sections de surfaces égales
- Comptage des grains dans les cartes découpées
- Evolution de la densité de grains dans la zone fondue

$$- \text{densité de grains} = \frac{\text{nombre de grain}}{\text{surface des cartes découpées}}$$

III. Evolution des microstructures des soudures

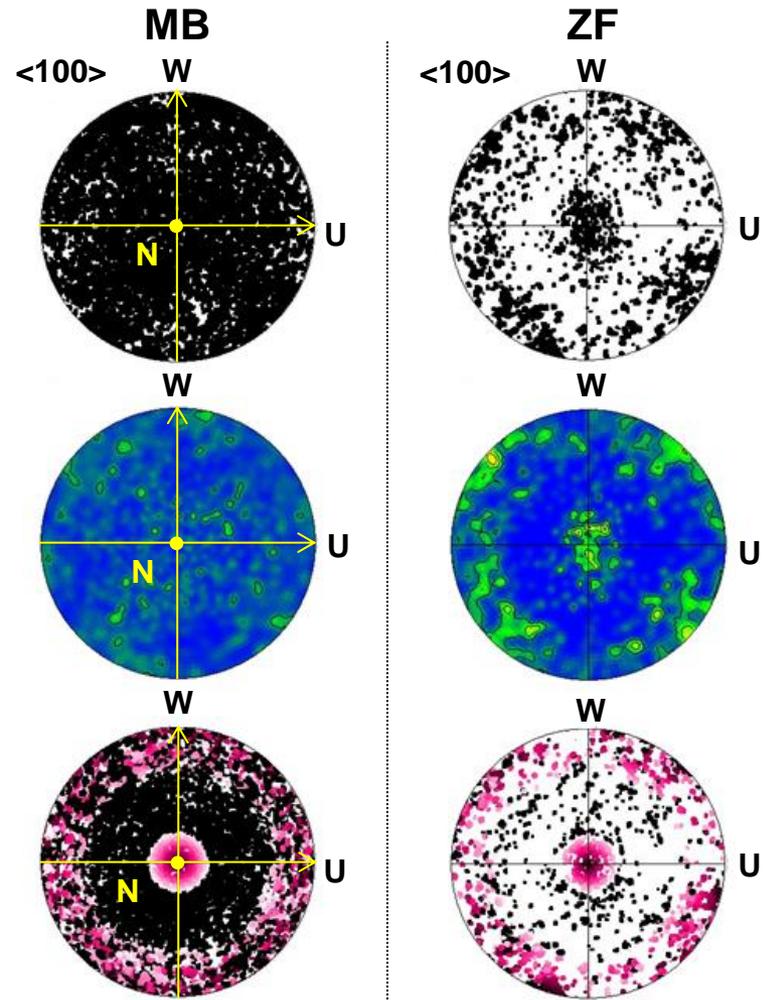
- Ligne de refusion
 - Analyse des textures de la ZF : **critère de sélection des orientations**



- MB isotrope
- Analyse globale de la ZF
⇒ fibre $\langle 100 \rangle // \mathbf{N}$

III. Evolution des microstructures des soudures

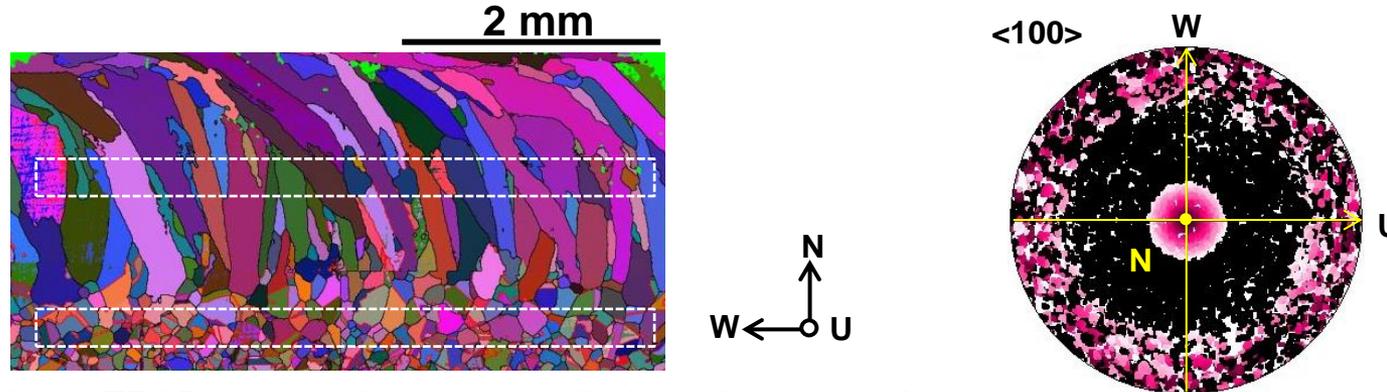
- Ligne de refusion
 - Analyse des textures de la ZF : **critère de sélection des orientations**



- MB isotrope
- Analyse globale de la ZF
 - ⇒ fibre $\langle 100 \rangle // \mathbf{N}$
- Critère de sélection
 - ⇒ Un grain est bien orienté si une direction $\langle 100 \rangle$ est alignée avec le gradient (\mathbf{N}) à $\pm 25^\circ$

III. Evolution des microstructures des soudures

- Ligne de refusion
 - Évolution de la texture dans la zone fondue



Carte EBSD en pseudo contraste d'orientation, coupe L

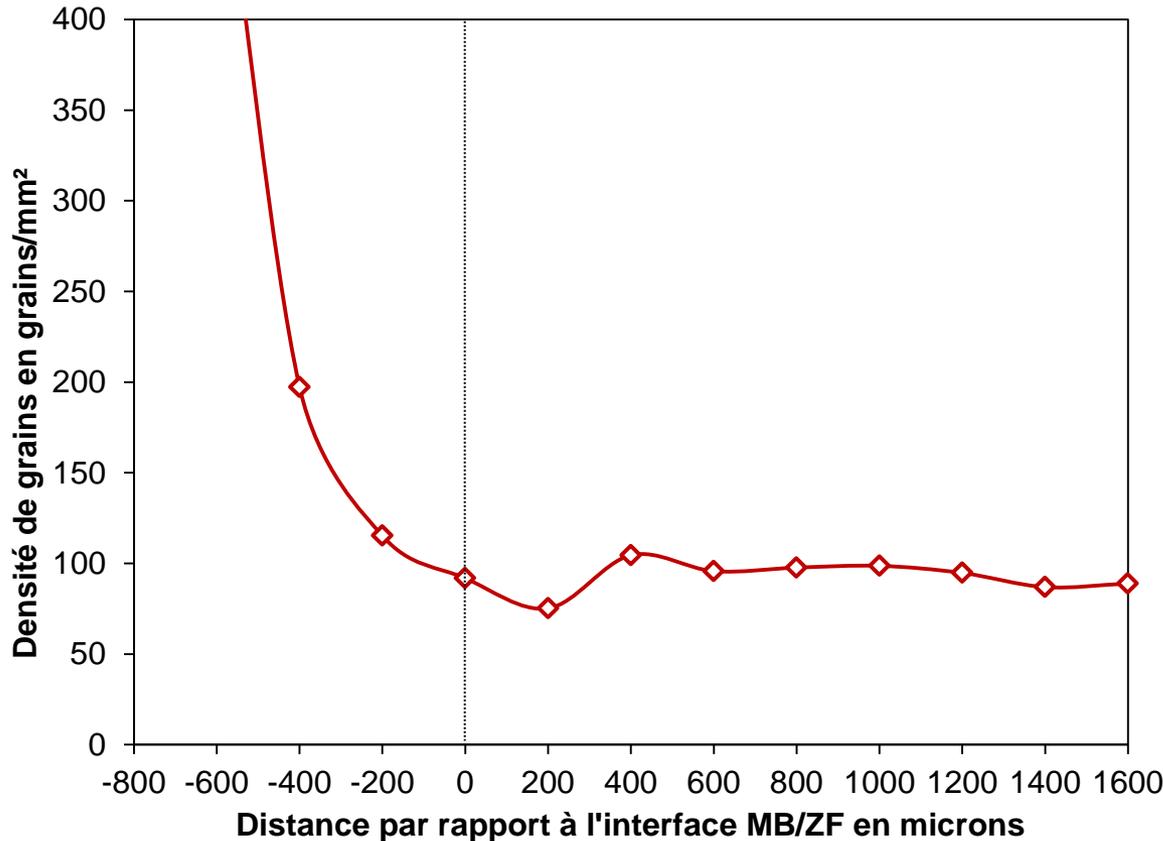
- Pour chaque section, le pourcentage de grains respectant le critère est mesuré : **le degré de texturation**
- Pour chaque section :

$$\text{Degré de texturation} = \frac{\text{Nombre de grains dans le critère}}{\text{Nombre total de grains}} * 100$$

⇒ **Evolution du degré de texturation dans la zone fondue**

III. Evolution des microstructures des soudures

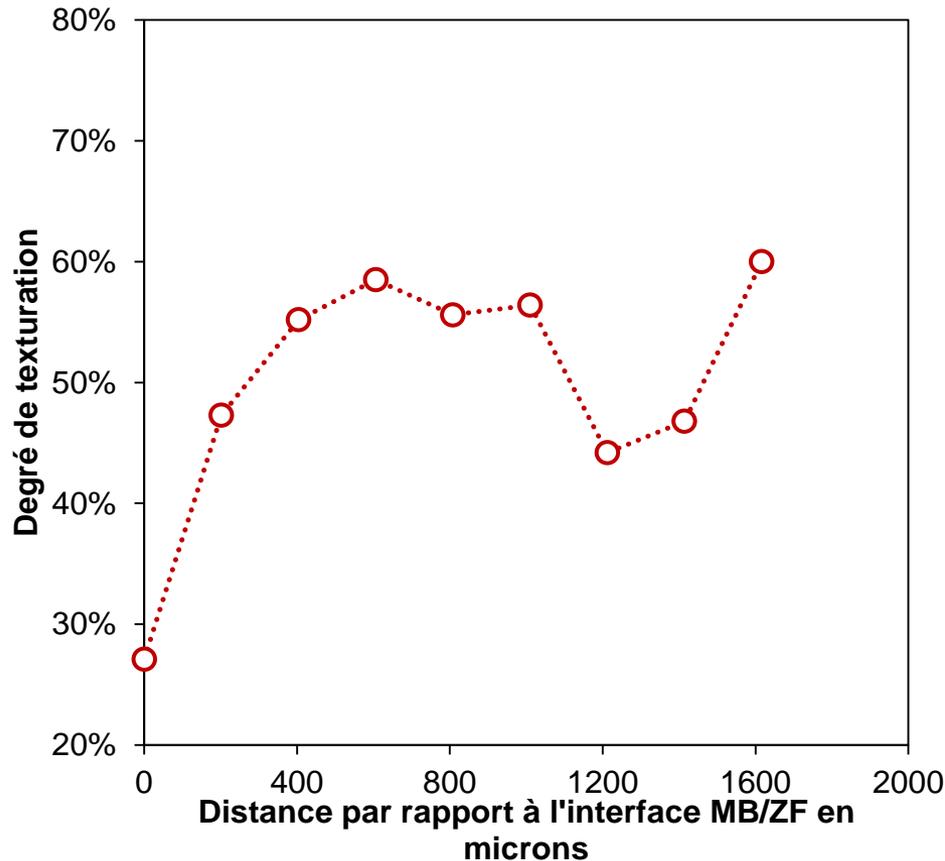
- Ligne de refusion
 - Évolution de la densité de grain dans la zone fondue



- Diminution du nombre de grains indique qu'une **sélection des grains** s'opère dans la ZF
- Sélection est-elle terminée ?

III. Evolution des microstructures des soudures

- Ligne de refusion
 - Évolution du degré de texturation dans la ZF



- Augmentation rapide du degré de texturation de la ZF
- Palier de texturation entre 400 et 1400 μm
- Nouvelle augmentation de la texture après 1400 μm

III. Evolution des microstructures des soudures

- Ligne de refusion
 - Évolution du degré de texturation dans la ZF

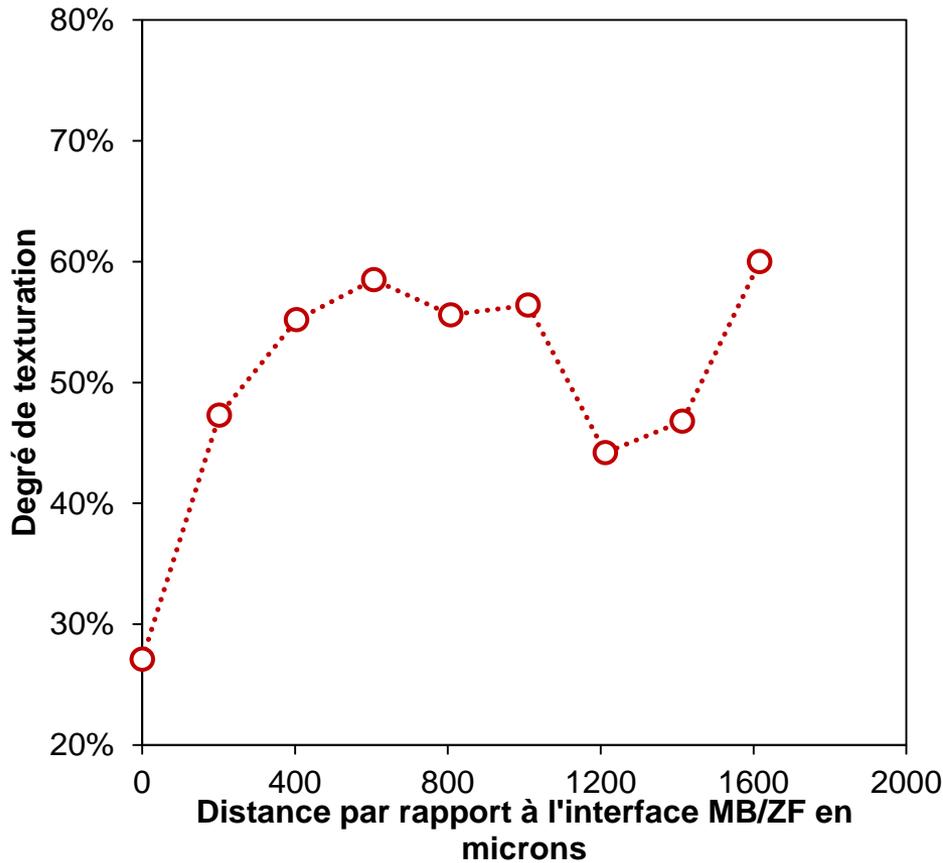
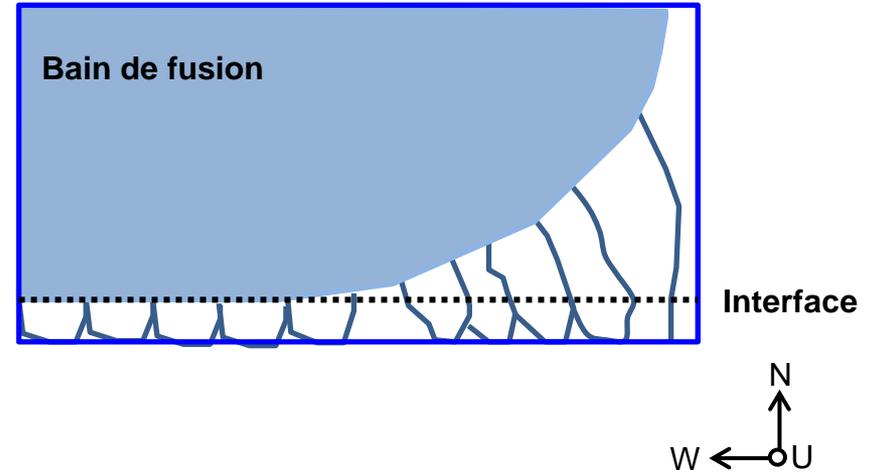


Schéma de la croissance en soudage



III. Evolution des microstructures des soudures

- Ligne de refusion
 - Évolution du degré de texturation dans la ZF

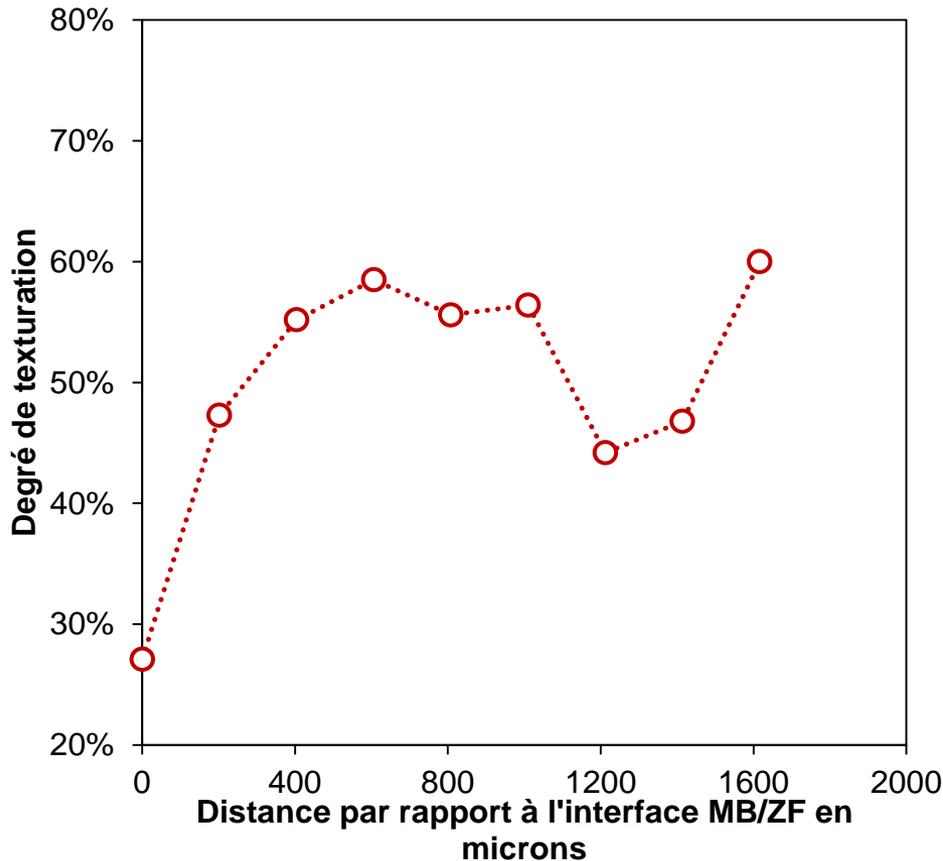
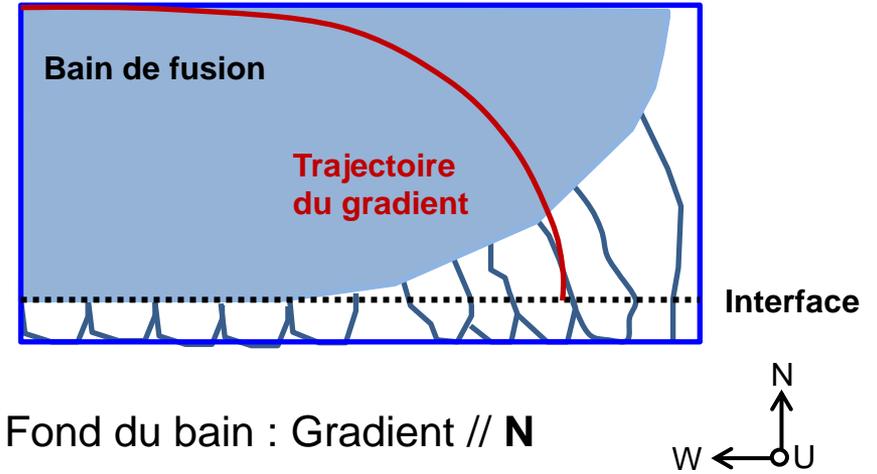


Schéma de la croissance en soudage



Fond du bain : Gradient // **N**

Surface du bain : Gradient // **W**

III. Evolution des microstructures des soudures

- Ligne de refusion
 - Évolution du degré de texturation dans la ZF

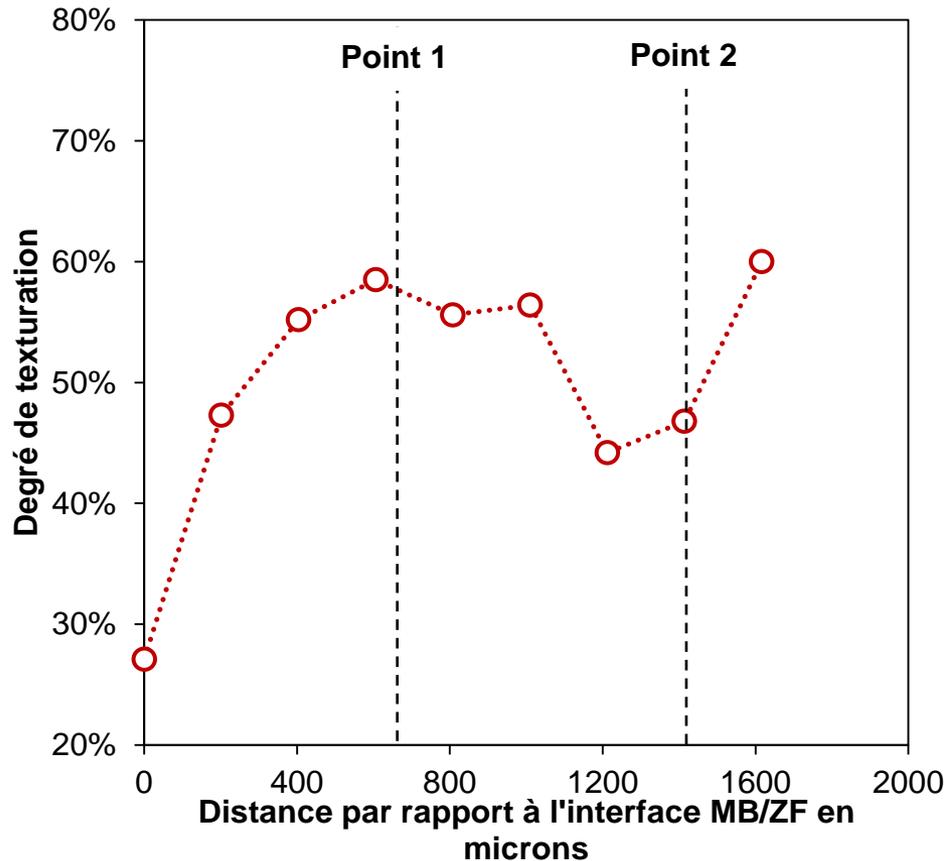
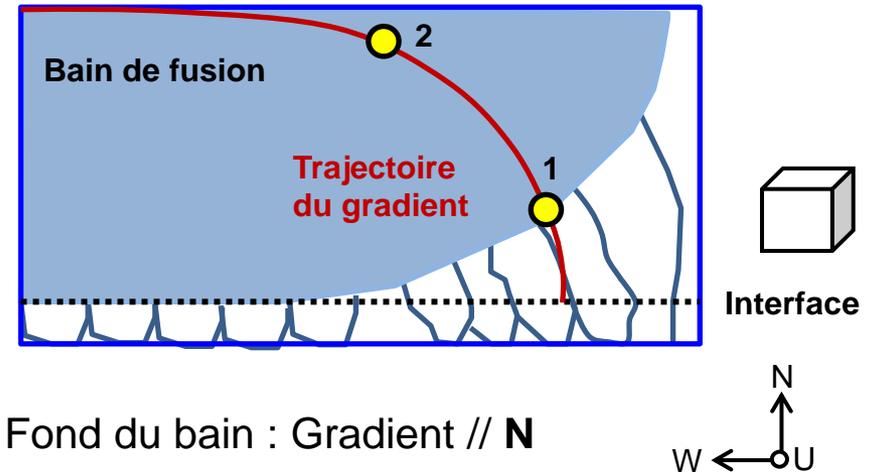


Schéma de la croissance en soudage



Fond du bain : Gradient // **N**

Surface du bain : Gradient // **W**

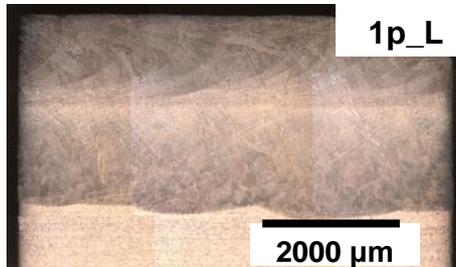
Entre 1 et 2 : Rotation du gradient de **N** vers **W**

⇒ Les grains désorientés par rapport à **N** sont favorisés entre les points 1 et 2

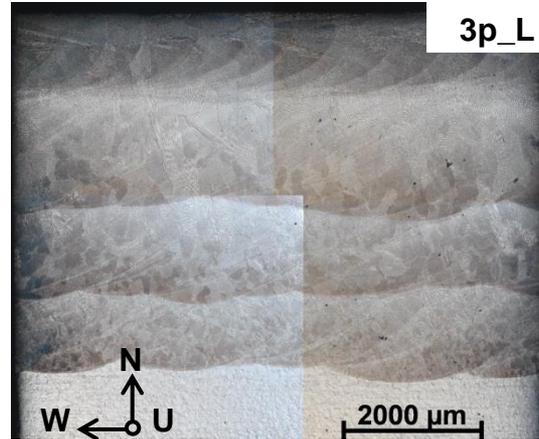
III. Evolution des microstructures des soudures

- Cas du soudage multi-passes
 - Évolution du degré de texturation dans la ZF

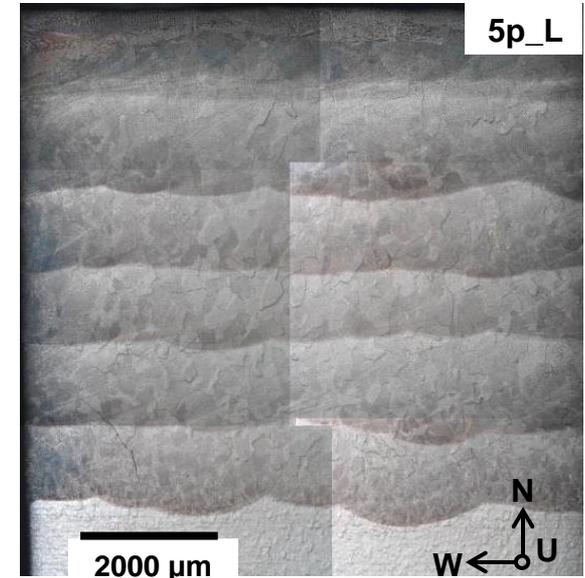
Cordon 1 passe



Cordon 3 passes



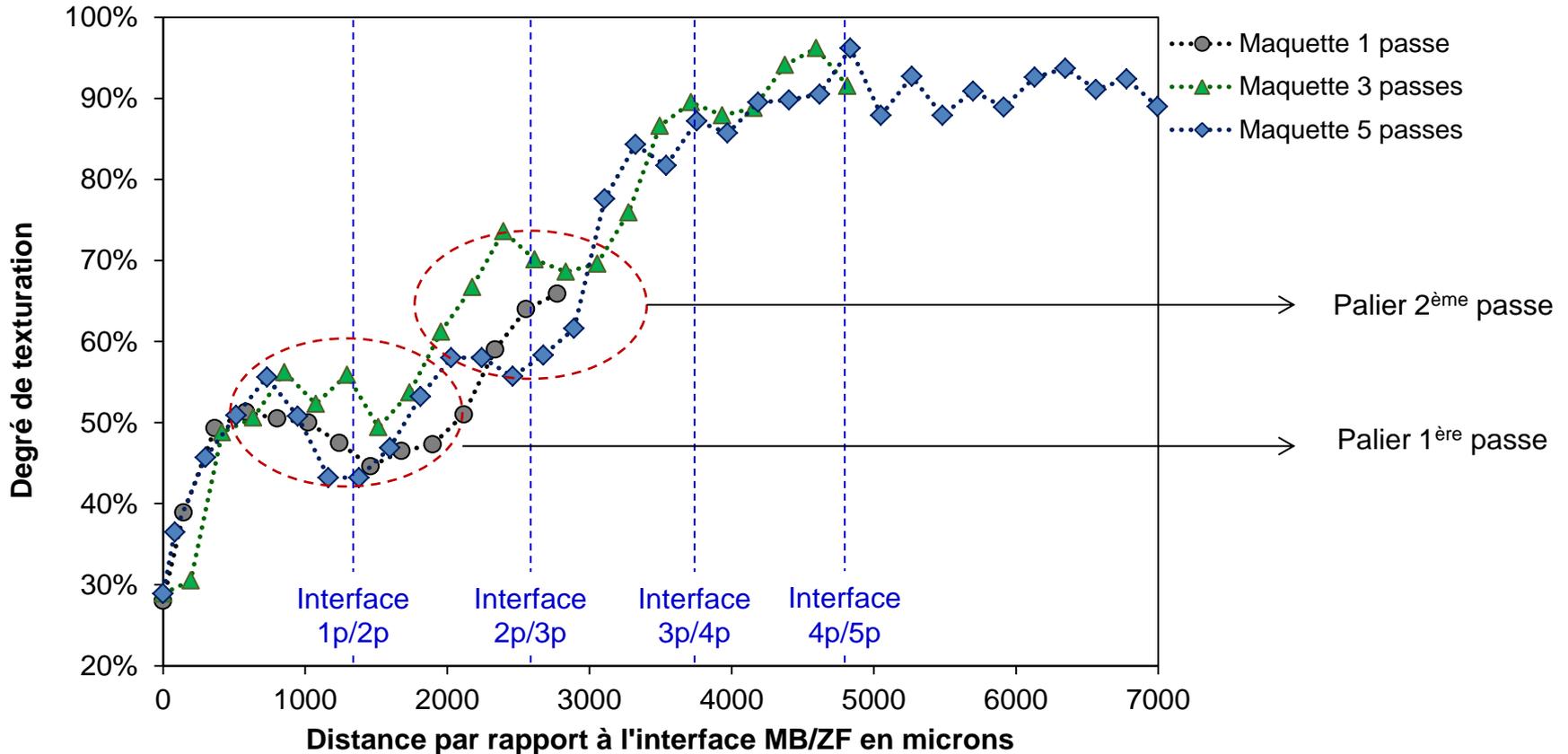
Cordon 5 passes



- Interfaces entre les passes « rectilignes »
- Application de la méthode de découpage sur les cartes EBSD correspondantes

III. Evolution des microstructures des soudures

- Cas du soudage multi-passes
 - Évolution du degré de texturation dans la ZF



- Sélection des grains terminée lorsque tous les grains de la zone fondue suivent le critère de sélection
- Effet multi-passes : **profondeur de la refusion**

PLAN

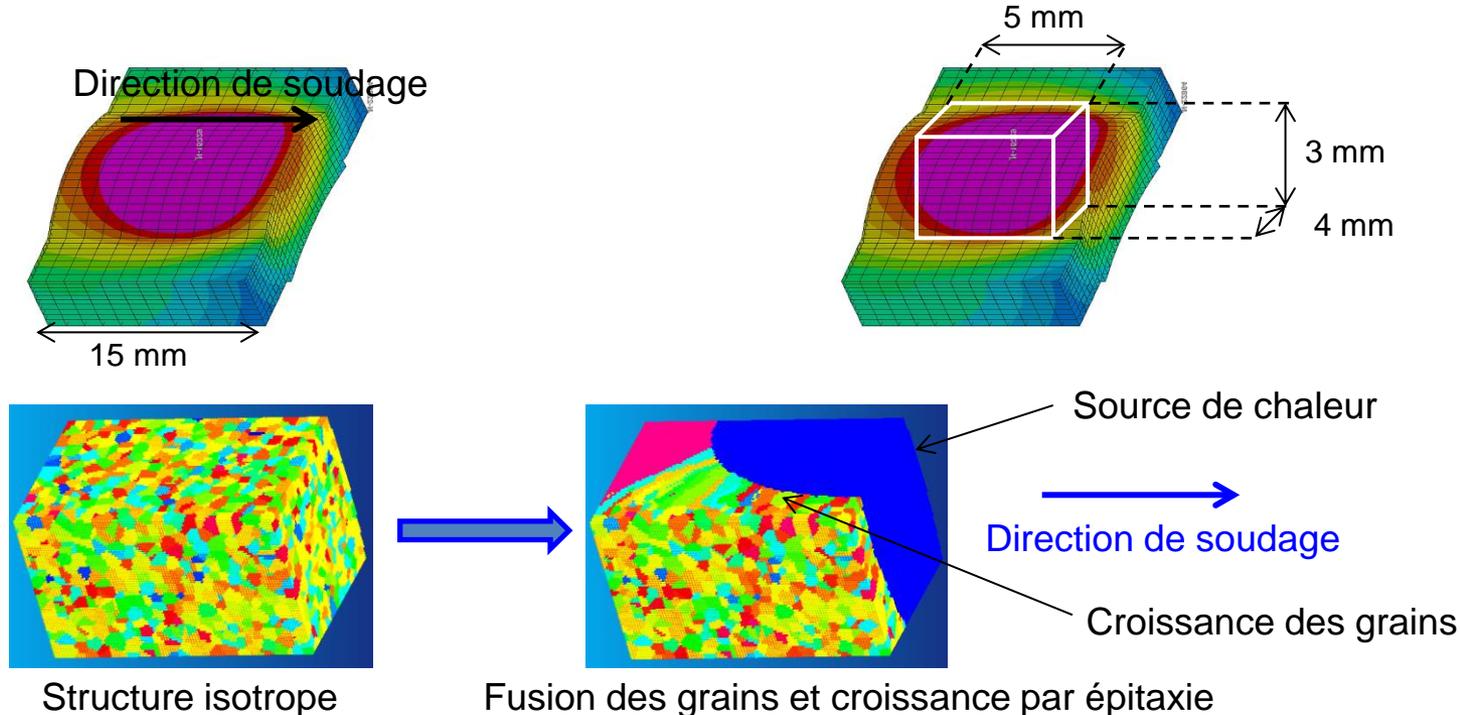
- I. Présentation du sujet
- II. Matériaux et techniques
- III. Evolution des microstructures en soudage
 - 1. Soudures réelles
 - 2. Soudures numériques
- IV. Conclusions et perspectives

IV. Evolution des microstructures des soudures

- Modèle CAFE_WELD de ESI

- Fonctionnement

- Calcul de thermique via SYSWELD de la totalité de la ligne A600vsFM52
 - Post traitement du calcul de thermique avec un Automate Cellulaire

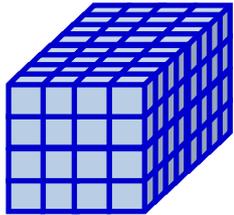


- Sélection des grains

- Direction de croissance $\langle 100 \rangle$ des grains à l'interface imposée
 - Vitesse de croissance des grains donnée par la surfusion par une loi de type $V = f(\Delta T)$

IV. Evolution des microstructures en soudage

- Traitement des données CAFE_WELD



Cellules de la boîte CAFE WELD



Exportations des données des cellules de la boîte CAFE_WELD

- Position de la cellule
- Orientation via les angles d'Euler



Réalisation de coupes 2D sur des plans de la boîte CAFE



Reconstruction de la carte d'orientation CAFE_WELD avec le logiciel de traitement EBSD

- Mise en données CAFE_WELD
 - Taille des grains de la structure isotrope
 - Pas de grossissement des grains à l'état solide dans le modèle
 - ⇒ Taille des grains à l'interface mesurée sur la carte EBSD
 - Taille des cellules : 25 μm

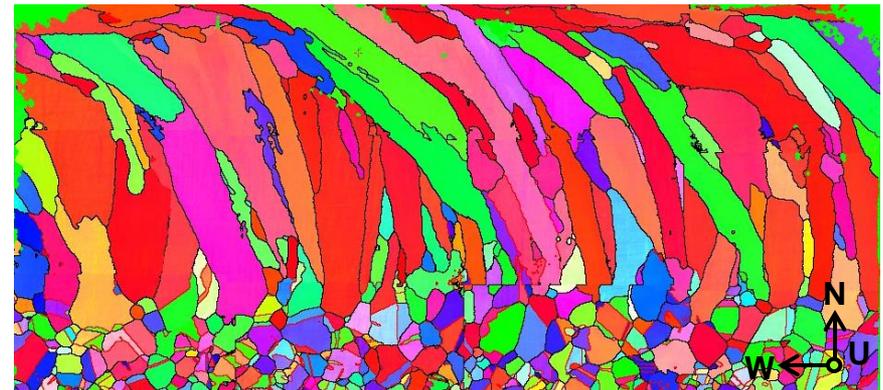
IV. Evolution des microstructures en soudage

- Modèle CAFE_WELD : expérience vraie vs expérience numérique
 - Cartes d'orientations : expérience numérique vs expérience vraie

➤ Ligne de refusion



CAFE_WELD



EBSD

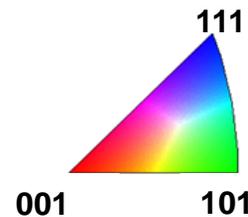
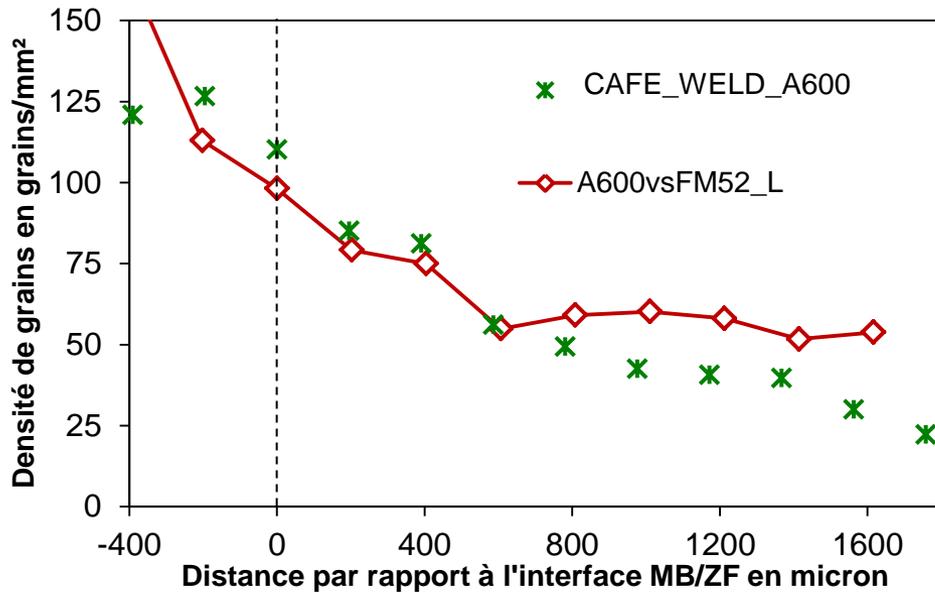


Figure de pôle inverse dont le contraste est basé sur la direction **N**

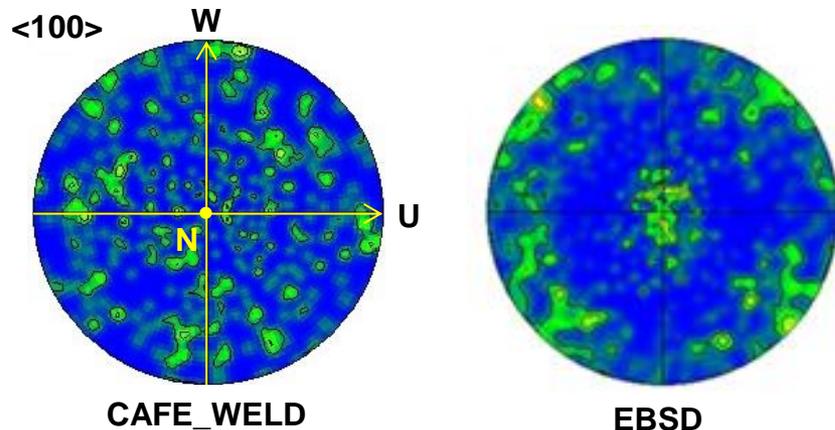
IV. Evolution des microstructures en soudage

- Modèle CAFE_WELD : expérience vraie vs expérience numérique
 - Densité de grains



- Reproduction correcte de l'évolution de la densité de grains dans la zone fondue jusque 600 μm

- Texture de la zone fondue



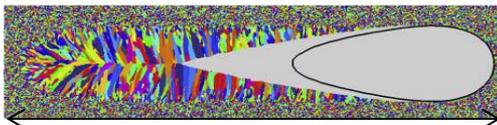
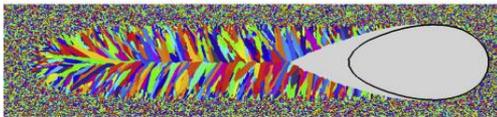
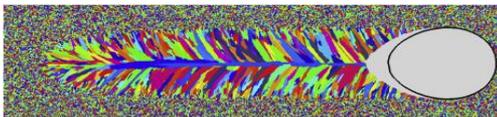
- Pas de texture $\langle 100 \rangle$ dans les zones fondues numériques

PLAN

- I. Présentation du sujet
- II. Matériaux et techniques
- III. Evolution des microstructures des soudures
- IV. Conclusions et perspectives

VI. Conclusions et perspectives

- Caractérisation des microstructures des soudures
 - Méthodologie dédiée à l'analyse des structures soudées établie
 - Densité de grains stable \neq sélection des grains terminée, d'où la nécessité de recourir au degré de Texturation
 - Mise en évidence du rôle de la refusion sur l'établissement de la texture en soudage multi-passes
- Affinement du critère de sélection des orientations
 - Effet du procédé de soudage (vitesse de soudage) ?
 - Position du gradient thermique, valeur de l'angle critique de désorientation
- Simulation de type CAFE en soudage



35 cm

- Appliquer ces modèles aux lignes de refusion
- Comment la sélection des grains s'opère dans ces nouvelles soudures ?

**Merci de votre
attention**