



Thomas BILLOTTE

FUI MUSICAS

Caractérisations microscopiques pour la simulation des structures soudées par chaînage SYSWELD/Automate Cellulaire

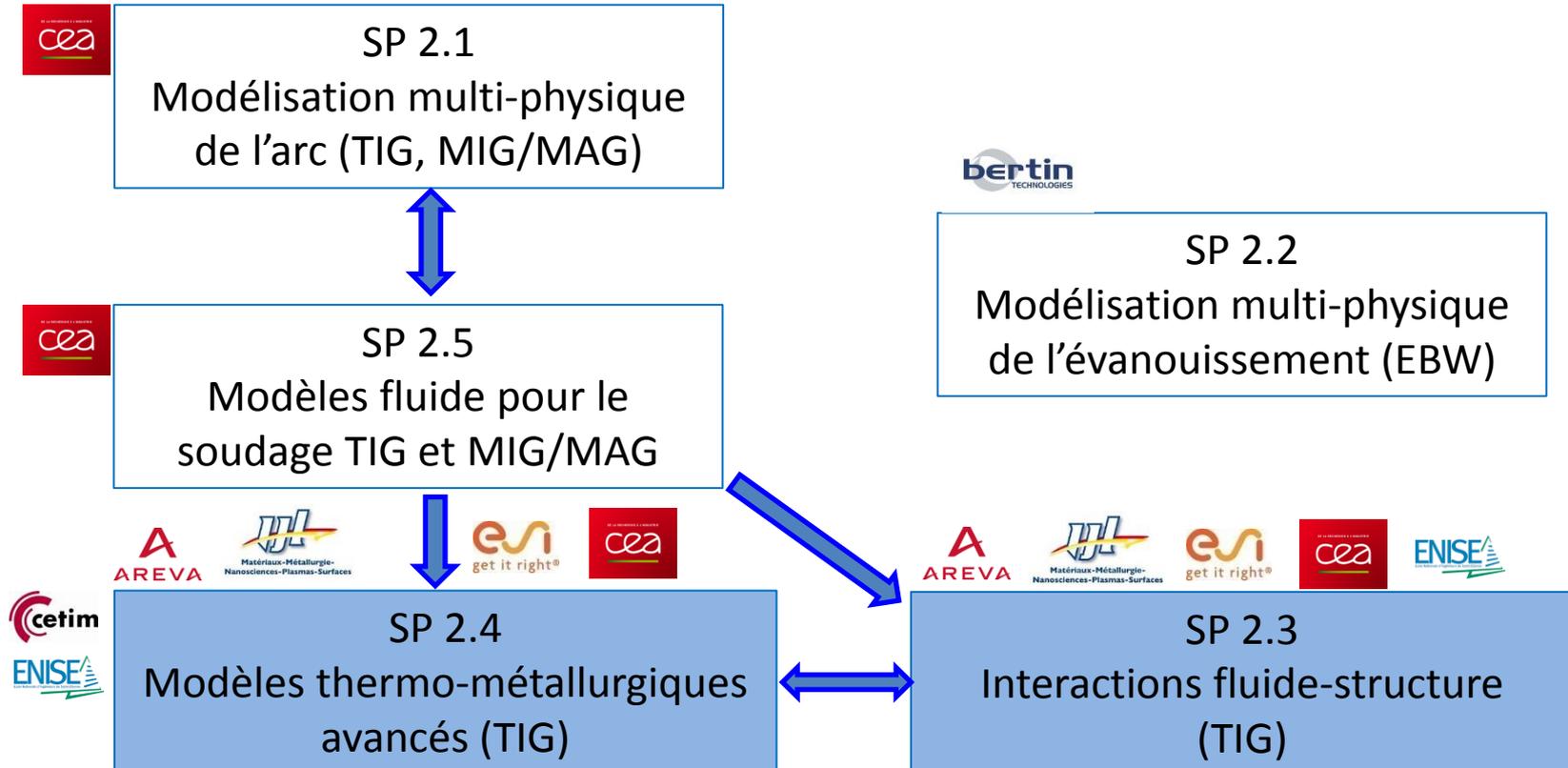
**Dominique Daloz
Julien Zollinger**

**Vincent Robin
Guillaume Tirand**

MUSICAS

(Méthodologies Unifiées de la Simulation pour l'intégrité et la Contrôlabilité des Assemblages Soudés)

- Projet multipartenaire (16, AREVA, Renault, PSA...)
- **Objectif** : Créer une chaine complète de la modélisation du soudage
- Organisation en 6 sous projets
 - SP « Modélisations avancées des procédés de soudage »

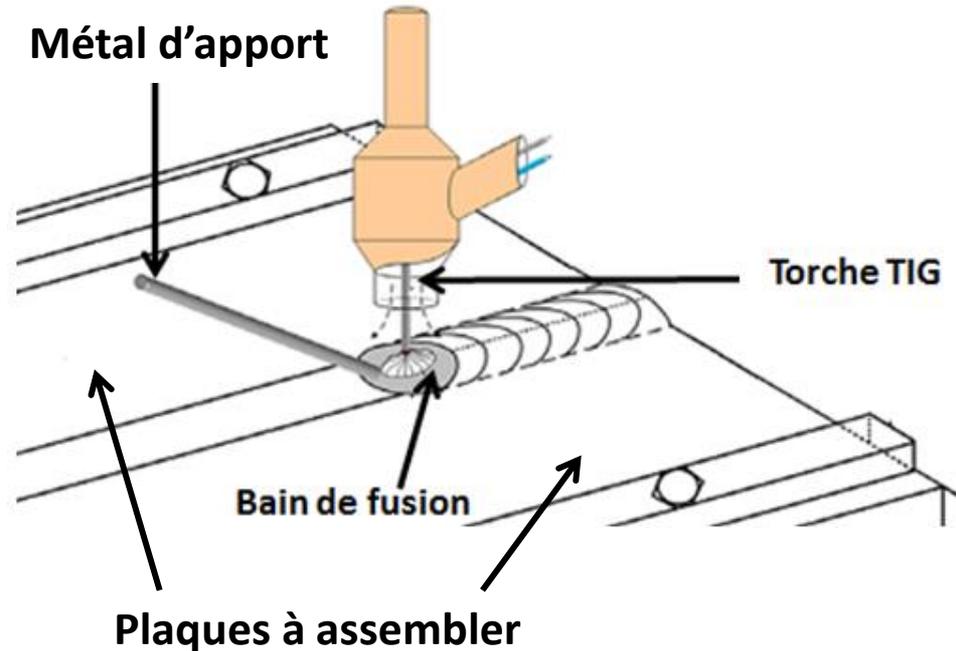


PLAN

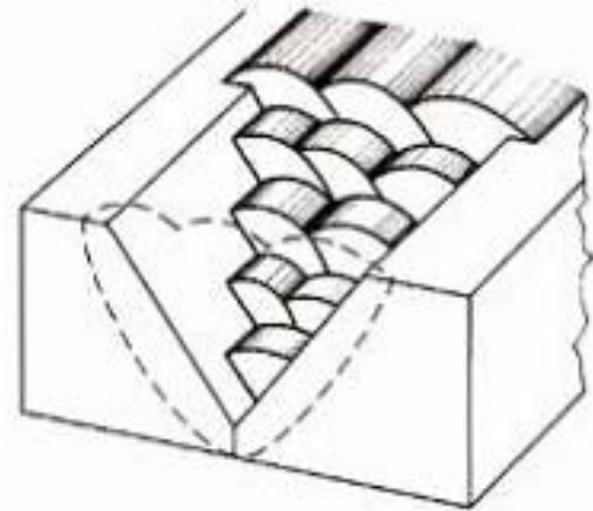
- I. Présentation du sujet
- II. Configuration de soudage : cas test
- III. Chaînage éléments finis/Automate cellulaire : CAFE WELD
- IV. Résultats et discussions
 - Cas test : orientations des grains sélectionnés
 - Traitements des données CAFE WELD
 - Comparaison structure simulée/cas test
- V. Conclusion

I. Présentation du sujet

- Soudage TIG (Tungsten Inert Gas)



SIMPLE PASSE

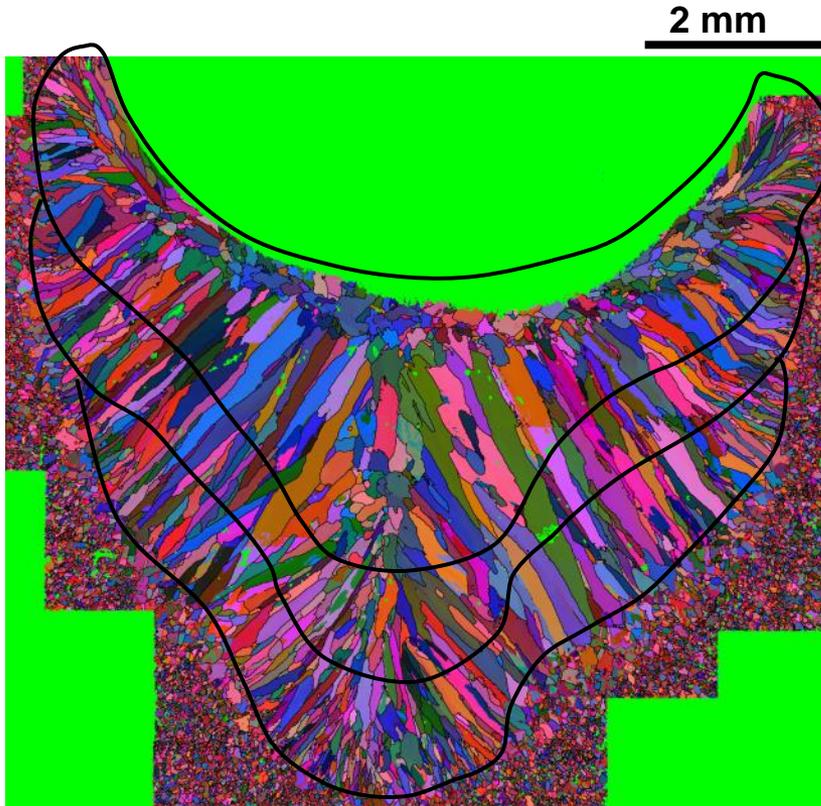


MULTI-PASSES

- Tester l'intégrité de la soudure : CND par onde ultrasonore
⇒ Révèle la taille, la nature et la position du défaut dans la soudure par interprétation des perturbations de l'échographe*

I. Présentation du sujet

- Microstructure en soudage multi-passes



Carte EBSD d'un cordon de soudure TIG, 3 passes

➔ Microstructure anisotrope

⇒ Engendre des perturbations sur la propagation du signal US*

⇒ Paramètres à prendre en considération*

- Orientation cristalline des grains
- Taille des grains

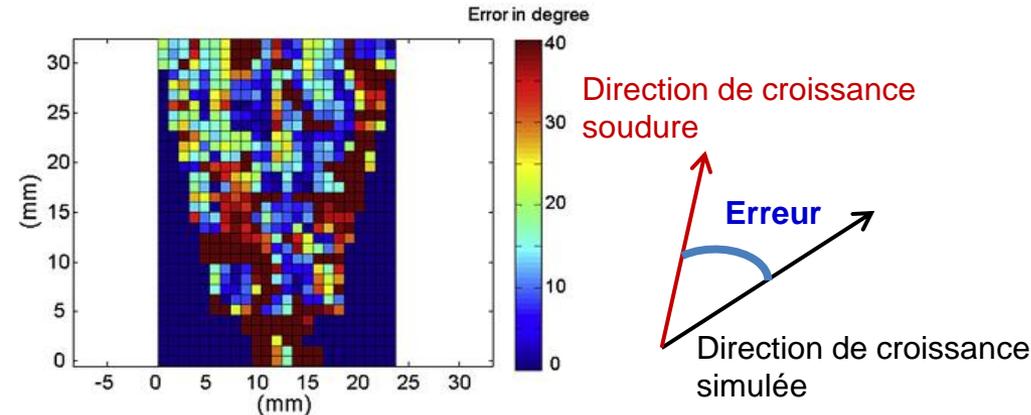
⇒ **Nécessité de travailler sur des structures de soudage simulées, pour pouvoir, à terme, interpréter les signaux US des CNDs obtenus dans les soudures**

* Bertrand Chassignole, Influence de la structure métallurgiques des soudures en acier inoxydable austénitique sur le contrôle non destructif par ultra-son, Thèse de l'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2000

* B.Chassignole, O. Dupond, L. Doudet, V. Duwig, N. Etchegaray, Ultrasonic examination of an austenitic weld: illustration of the disturbances of the ultrasonic beam, AIP Conference Proceedings 1096, 2009

I. Présentation du sujet

- MINA (Modeling the anisotropy from Notebook of Arc welding) ¹
 - Modèle macroscopique basé sur la thermique (gradient G connu dans la soudure)
 - La sélection de grains s'effectue via un algorithme simple basé sur l'écart angulaire entre la direction de croissance et G



- Ecart angulaire important entre la structure vraie et la microstructure simulée (bord du chanfrein)
- Faiblesse du modèle : **non prise en compte des phénomènes de solidification**

Comparaison structure simulée/Structure réelle²

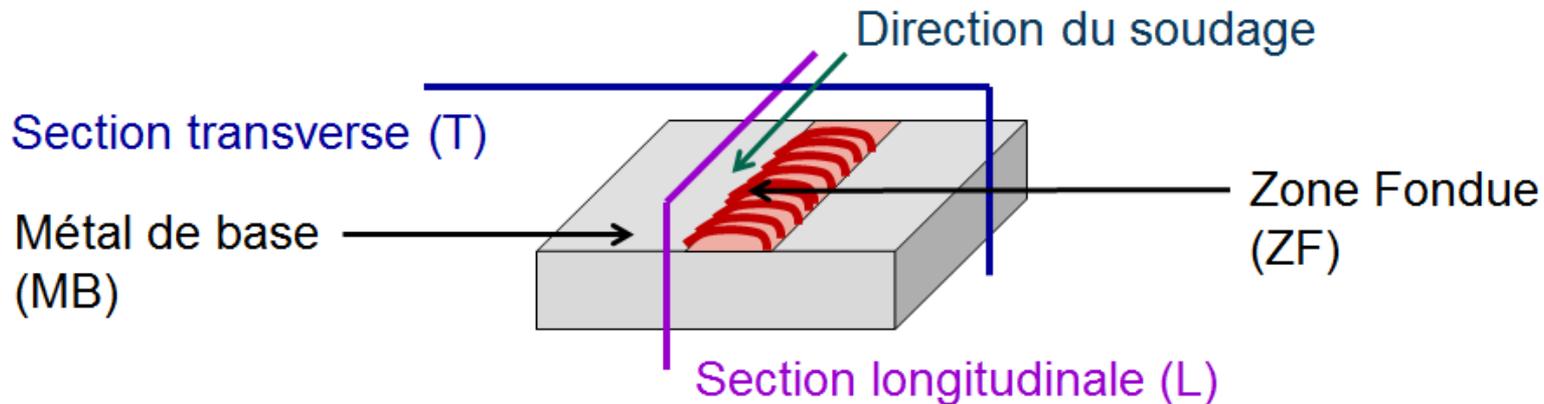
- ⇒ Simulation de structure de solidification par chaînage éléments finis/automate cellulaire (CAFE)
 - Simuler la croissance des grains à grandes échelles (\approx cm)

¹ J.Moyasan et al, Modelling the grain orientation of an austenitic stainless steel multipass welds to improve ultrasonic assessment of structural integrity, International Journal of Pressure Vessels and Piping 80, 2003, 77 – 85

² A.F. Mark et al, Investigation of the elastic/crystallographic anisotropy of welds for improved ultrasonic inspections, Materials Characterization 98 (2014) 47–53

II. Configuration de soudage : cas test

- Ligne de refusion avec métal d'apport sur substrat plat
 - Vitesse de soudage : 10 cm/min
 - Puissance moyenne : 1512 W



- Alliages utilisés
 - Bases Nickel 100% austénitique

Composition % massique	Ni	Cr	Fe	Ti	Al
Métal de base A600	Base	18.78	9.18	0.17	0.18
Métal d'apport FM52	Base	29.98	10.06	0.52	0.65

III. Chaînage éléments finis/Automate cellulaire : CAFE WELD

- Modèle CAFE WELD

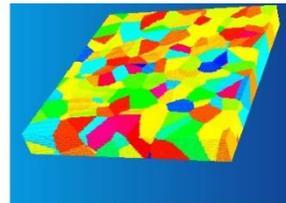
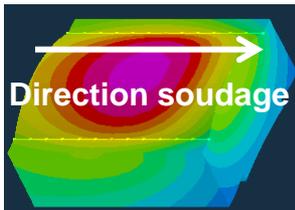
Calcul de thermique via
SYSWELD du cas test



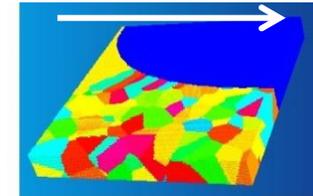
Prélèvement d'une partie
du maillage éléments finis



Post-traitement CAFE du calcul
thermique



Génération d'une structure
isotrope dans une boîte
CAFE

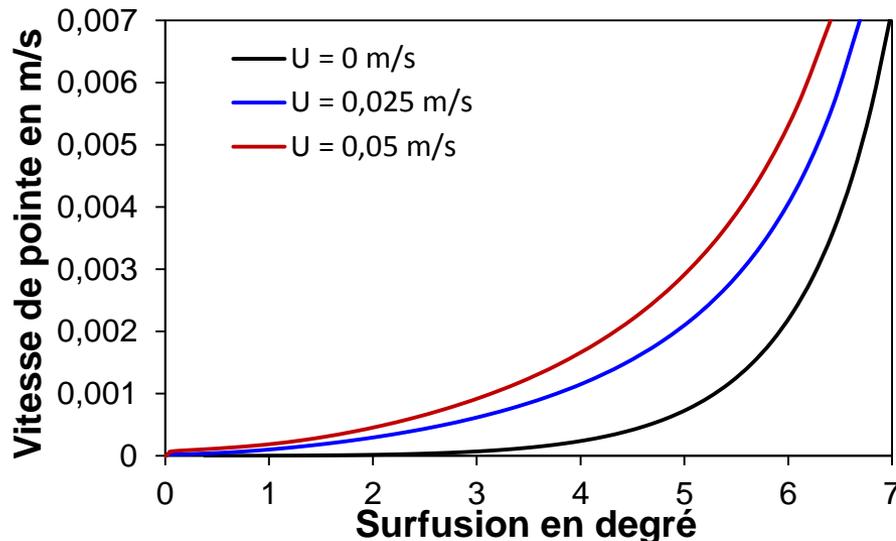


Passage de la
source de
chaleur

III. Chaînage éléments finis/Automate cellulaire : CAFE WELD

- CAFE WELD et lois de solidification
 - Non prise en compte de la transition colonnaire équiaxe
 - Croissance épitaxiale
 - Direction de croissance : $\langle 100 \rangle$
 - Pas de convection dans le liquide
 - Modèle de surfusion :

- Calcul KGT ¹ : $\Delta T = \sum_i m_i * w_i^{l_0} \left(1 - \frac{1}{(1-k_i)*F(P_i)}\right)$
- Prise en compte de la convection dans le liquide ² :
$$\Delta T = \sum_i m_i * w_i^{l_0} \left(1 - \frac{1}{(1-k_i)*F(P_i, Pu_i)}\right)$$



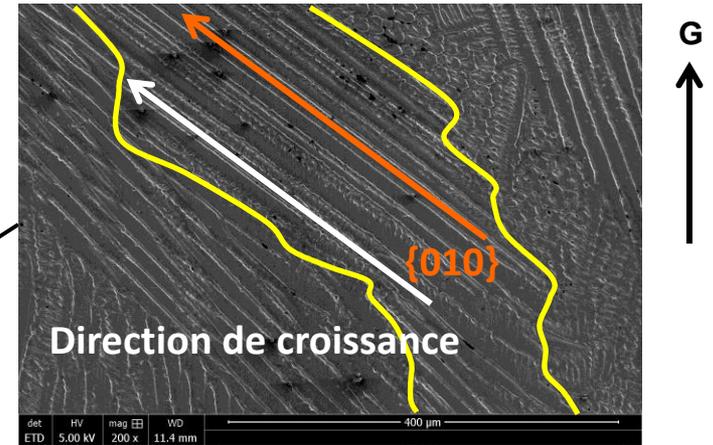
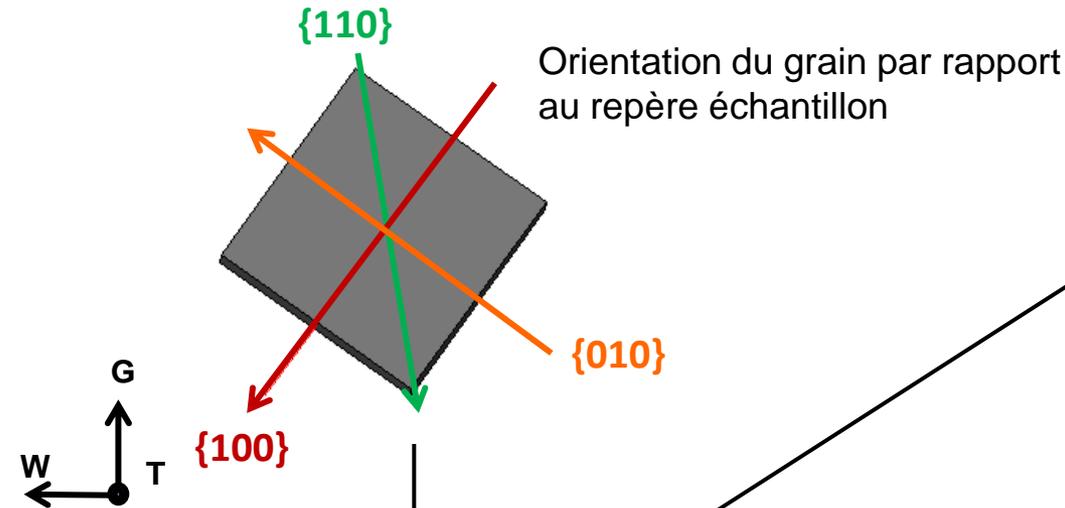
- Convection diminue la surfusion de la pointe
- Avec $v = 1,66$ mm/s
 - KGT : $5,7^\circ\text{C}$
 - Avec convection à $U = 0,025$ m/s : $4,6^\circ\text{C}$

¹ W. Kurz, B. Giovanola, R. Trivedi, Theory of microstructural development during rapid solidification, Acta Metallurgica, Vol 34, No.5, 23 August 1985, 823 – 830

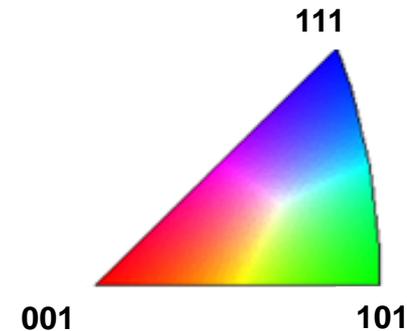
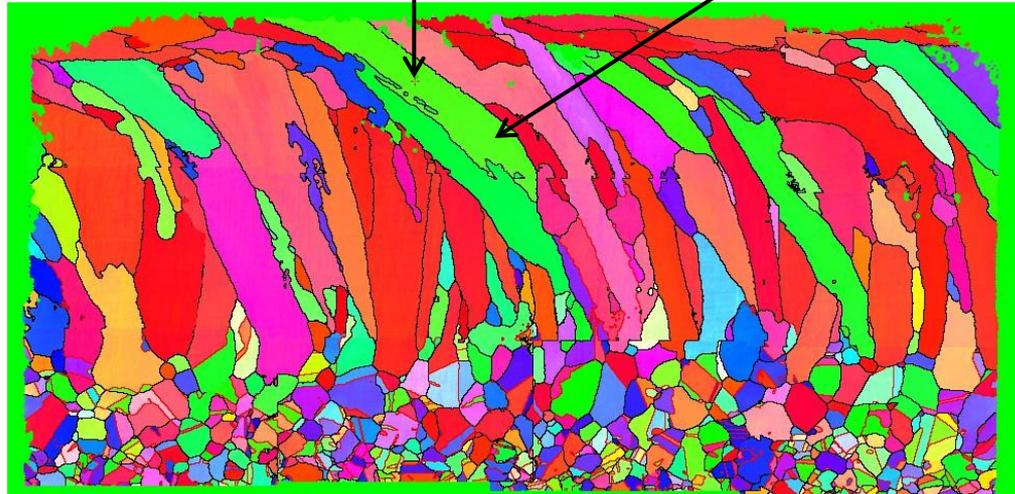
² B. Appolaire et al, Modeling of equiaxed growth in multicomponent alloys accounting for convection and for the globular/dendritic morphological transition, Materials Science and Engineering A 487 (2008), pp. 33-45

IV. Résultats et discussions

- Cas test : orientations des grains sélectionnés



Observation MEB x 200 du grain après attaque électrolytique



Légende de la figure de pôle inverse suivant la direction G

IV. Résultats et discussions

- Sélection de grains

- Suivre l'évolution de la densité de grains dans la zone fondue

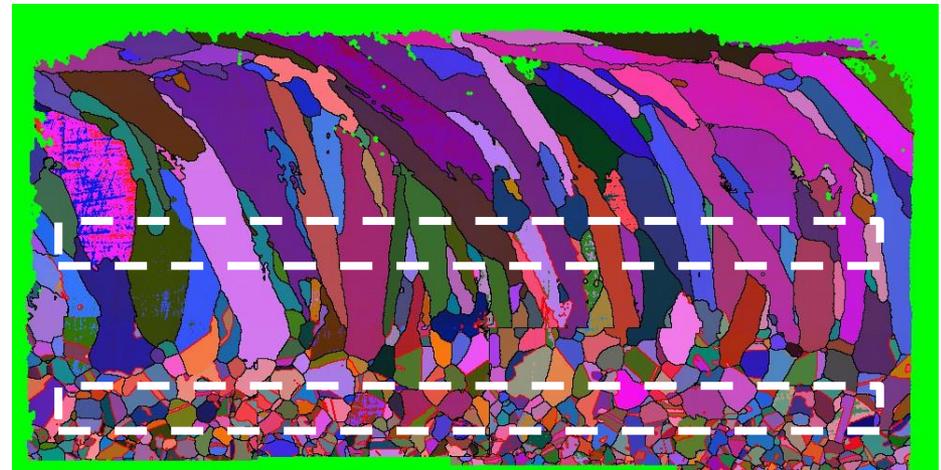
- Localiser la zone fondue
⇒ Microscope optique
- Compter les grains de part et d'autre de la zone fondue
⇒ EBSD



Microscopie optique A600 vs FM 52 mode longitudinale

- Méthode de comptage

- Découpage de la carte en EBSD en plusieurs sections de surfaces égales
- Compter les grains dans les cartes découpées
- Divise le nombre de grains mesuré par la surface de la carte
⇒ évolution de la densité de grains dans la zone fondue

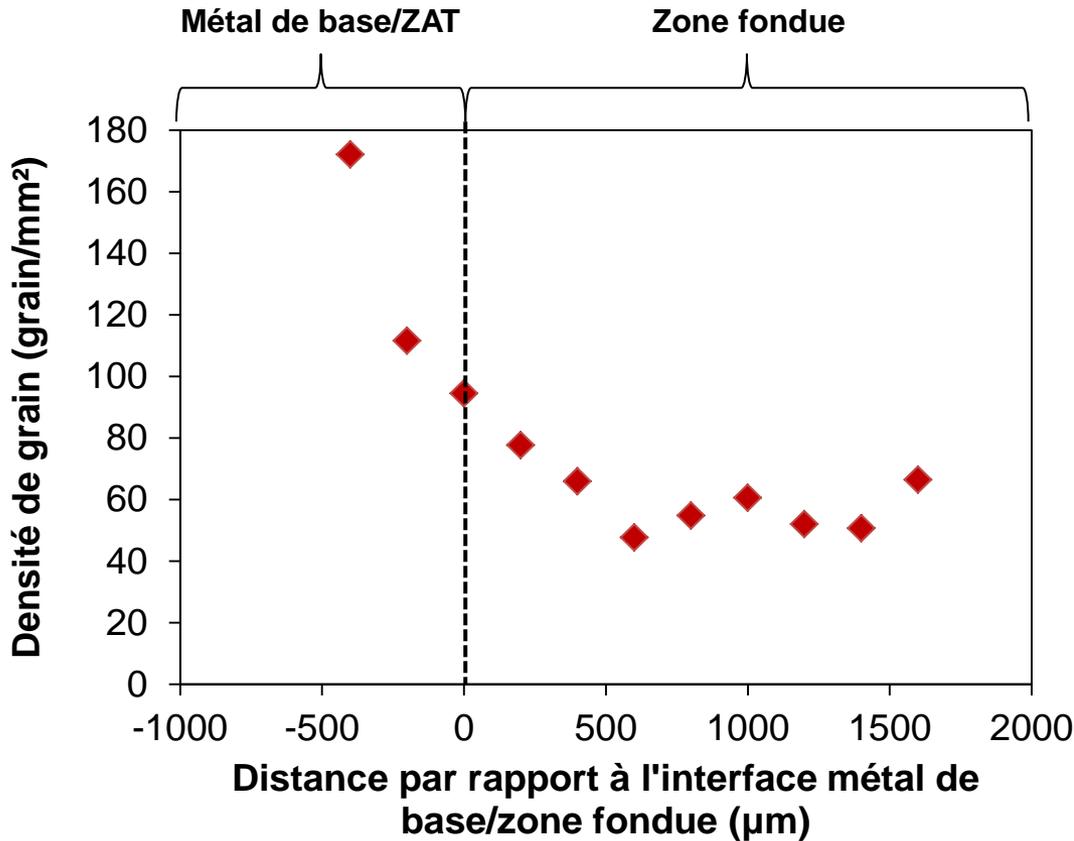


2 mm

Carte EBSD A600 vs FM 52 mode longitudinale

IV. Résultats et discussions

- Sélection de grain : cas test

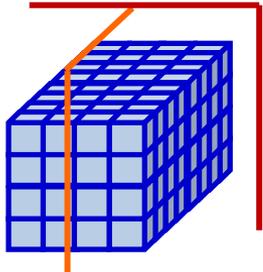


- Gradient de taille de grains dans le métal de base => Zone Affectée Thermiquement
- Fin de la sélection dans la zone fondue après 800 μm

⇒ **Comparer les résultats à ceux de CAFE WELD**

IV. Résultats et discussions

- Traitements 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 EBSD CAFE WELD avec le logiciel de traitement EBSD

2 mm



Reconstruction EBSD d'une coupe 2D de la boîte CAFE WELD

- Mise en données CAFE WELD

- Taille de grains de la structure isotrope
 - Pas de grossissement de grain à l'état solide⇒ Taille de grains à l'interface mesurée sur la carte EBSD
- Dimension de la boîte CAFE WELD
 - 1 x 4,2 x 5 mm => 21 mm³
 - 1 344 400 cellules cubiques
 - Taille des cellules : 25 μm
- Loi de surfusion : $v = 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T^3 + 5,15 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T^2$

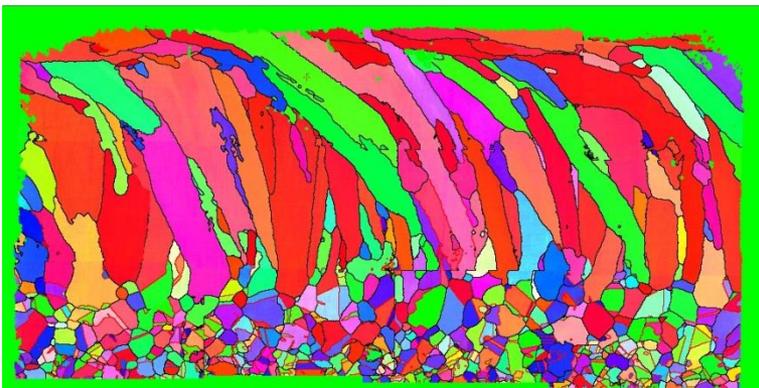
IV. Résultats et discussions

- Comparaison structure simulée/cas test

2 mm

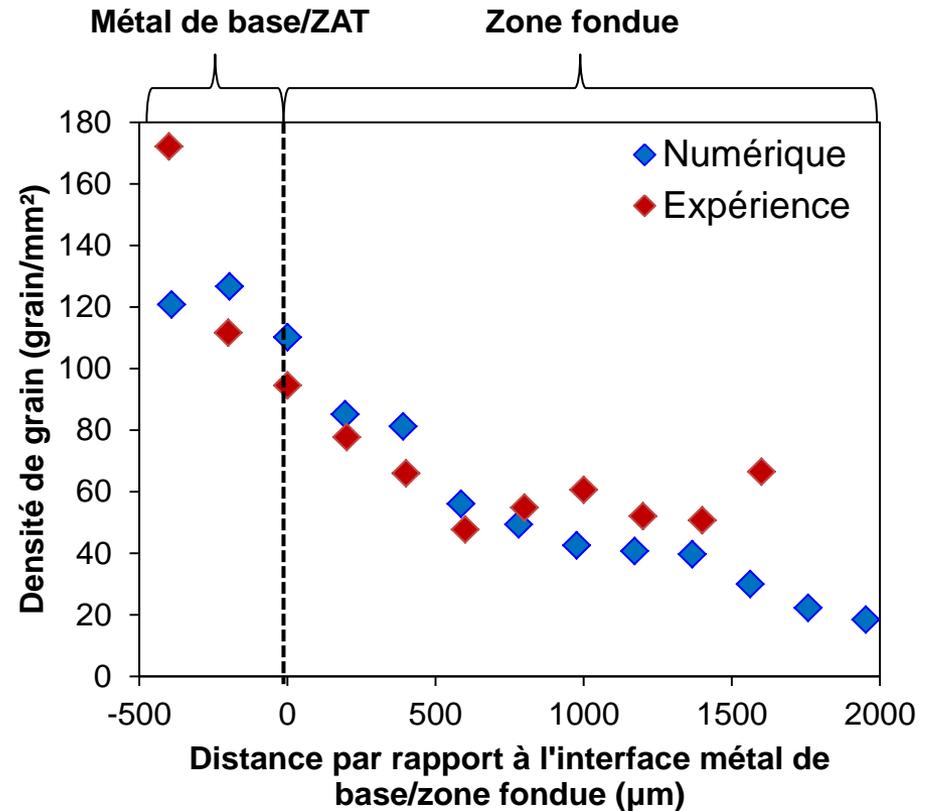


Reconstruction EBSD de la coupe 2D longitudinale de la simulation du cas test



2 mm

Carte EBSD du cas test mode longitudinale



- Bonne reproduction de la sélection de grains par CAFE WELD excepté en fin de solidification

V. Conclusion

- Modèle CAFE en post-traitement du calcul thermique
 - Reproduit la sélection de grain dans la zone fondue hormis en fin de solidification
 - Pas de prise en compte de la convection dans le bain fondu
 - Même si la convection est prise en considération dans le calcul de surfusion, la convection varie fortement entre le fond et la surface du bain
 - ⇒ Surestimation de la surfusion en fin de solidification
 - Pas de prise en compte de l'interaction des champs de solutés pendant la solidification
 - Vérifier les textures prédites par CAFE WELD dans une boîte plus importante

**Merci de votre
attention**