



**HAL**  
open science

## Dernières avancées sur la modélisation de la microstructure des soudures épaisses pour améliorer leur contrôle ultrasonore

M.A. Ploix, Cécile Gueudré, Gilles Corneloup, Jean Mailhé, J. Moysan

### ► To cite this version:

M.A. Ploix, Cécile Gueudré, Gilles Corneloup, Jean Mailhé, J. Moysan. Dernières avancées sur la modélisation de la microstructure des soudures épaisses pour améliorer leur contrôle ultrasonore. Journées COFREND, Jun 2023, Marseille, France. hal-04204582

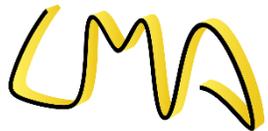
**HAL Id: hal-04204582**

**<https://hal.science/hal-04204582>**

Submitted on 12 Apr 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique

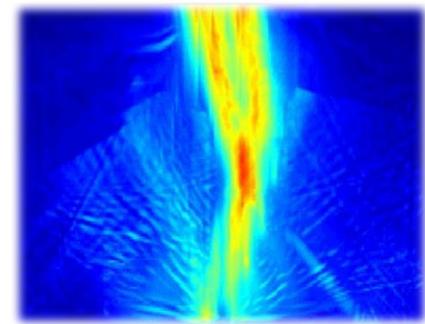
<http://www.lma.cnrs-mrs.fr/>



Aix-Marseille  
université  
Sociallement engagée

Centrale  
Méditerranée

PROTISVALOR  
Aix-Marseille université

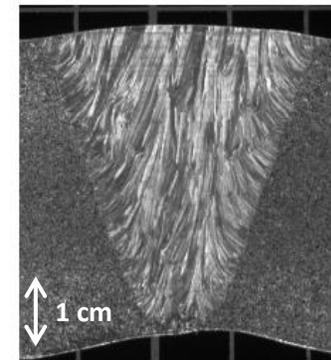
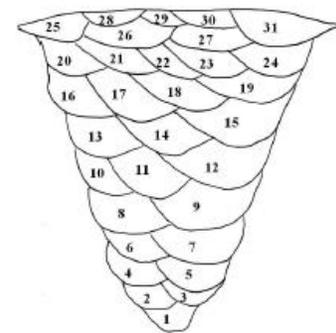


# Dernières avancées sur la modélisation de la microstructure des soudures épaisses pour améliorer leur contrôle ultrasonore

Marie-Aude PLOIX, Cécile GUEUDRÉ, Gilles CORNELOUP, Jean MAILHÉ, Joseph MOYSAN

[marie-aude.ploix@univ-amu.fr](mailto:marie-aude.ploix@univ-amu.fr)

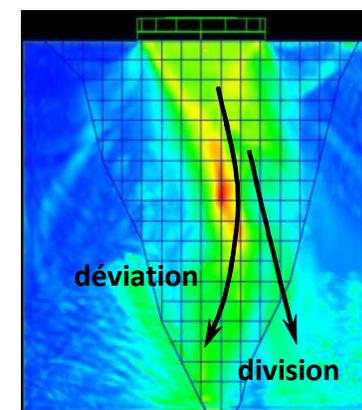
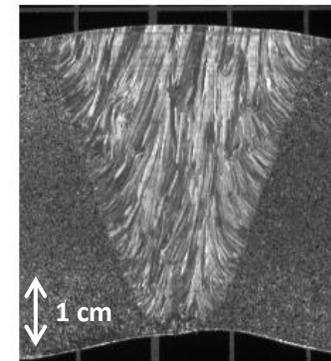
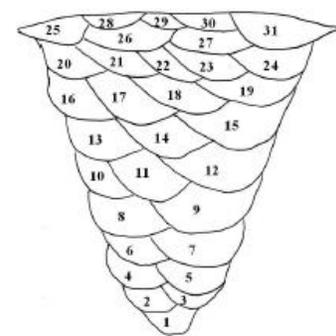
- Contrôle non destructif (CND) par **ultrasons** des tuyauteries des centrales nucléaires des générations actuelles (REP et EPR) et futures (RNR-Na)
- Soudures épaisses, multi-passes, en acier inoxydable austénitique (316L)
  - ⇒ **Grains colonnaires**, avec croissance dépendant de la thermique
  - ⇒ Structures **anisotropes et hétérogènes**



- Contrôle non destructif (CND) par **ultrasons** des tuyauteries des centrales nucléaires des générations actuelles (REP et EPR) et futures (RNR-Na)
  - ⇒ **Grains colonnaires**, avec croissance dépendant de la thermique
  - ⇒ Structures **anisotropes et hétérogènes**
  
- Propagation ultrasonore complexe : **dévi**ation, **divi**sion, **atté**nuation du faisceau
  
- **Interprétation, donc diagnostic difficile**



**Besoin de modéliser la microstructure, pour prévoir la propagation, donc le contrôle**



- **Modèle MINA : Modeling anisotropy from Notebook of Arc welding**

Modélisation phénoménologique produisant une description réaliste de la microstructure à partir des données du cahier de soudage

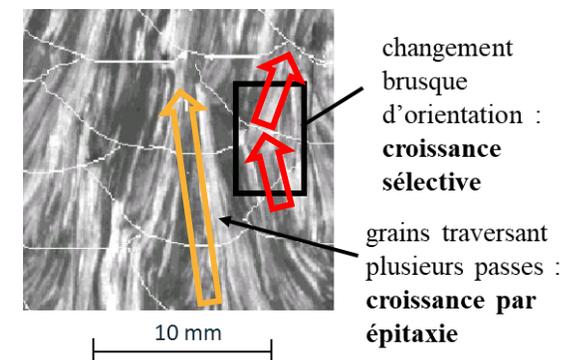
- Données d'entrée :
- ✓ Informations du cahier de soudage
  - ✓ Paramètres de solidification des passes, spécifiques au procédé (EE)

- **Modèle MINA : Modeling anisotropy from Notebook of Arc welding**

Modélisation phénoménologique produisant une description réaliste de la microstructure à partir des données du cahier de soudage

- Données d'entrée :
- ✓ Informations du cahier de soudage
  - ✓ Paramètres de solidification des passes, spécifiques au procédé (EE)

- Algorithme :
- ✓ Calcul de la direction locale du gradient de température
  - ✓ Mécanismes de solidification : épitaxie et croissance sélective



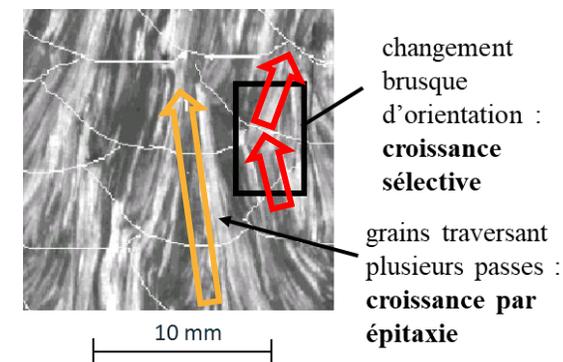
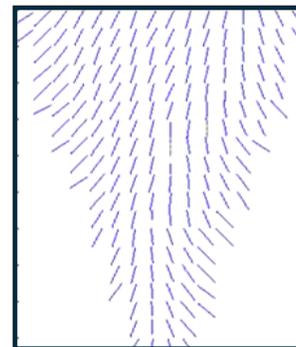
- **Modèle MINA : Modeling anisotropy from Notebook of Arc welding**

Modélisation phénoménologique produisant une description réaliste de la microstructure à partir des données du cahier de soudage

- Données d'entrée :
- ✓ Informations du cahier de soudage
  - ✓ Paramètres de solidification des passes, spécifiques au procédé (EE)

- Algorithme :
- ✓ Calcul de la direction locale du gradient de température
  - ✓ Mécanismes de solidification : épitaxie et croissance sélective

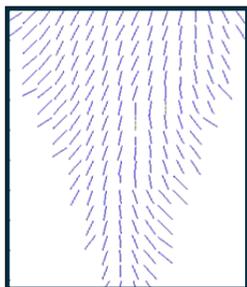
- Données de sortie :
- ✓ **Orientation locale des grains, dans un maillage < taille d'une passe**



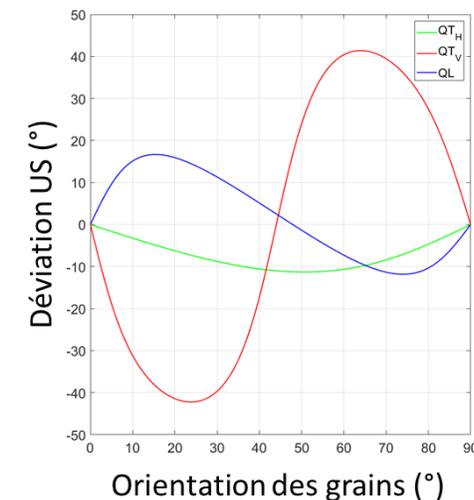
NB : MINA est en cours d'intégration à la plateforme logicielle de CND « **CIVA** », développée par le CEA (<https://www.extende.com/fr>)

## ■ Etapes de la modélisation :

- ✓ Description du milieu en termes de propriétés acoustiques :

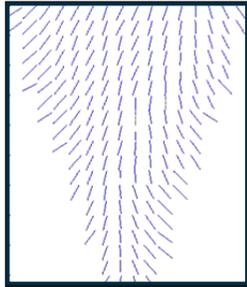


**+ 4 constantes d'élasticité  $C_{ij}$**   
 (orthotrope 2D, avec grains orientés à  $0^\circ$ ,  
 puis rotation de la matrice dans chaque  
 maille)



## Etapes de la modélisation :

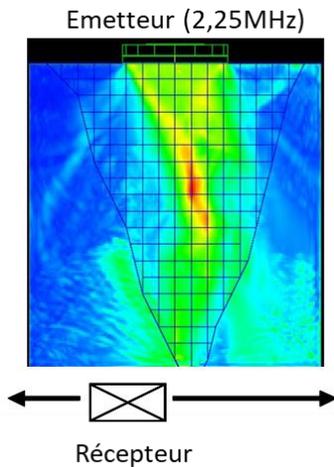
- ✓ Description du milieu en termes de propriétés acoustiques :



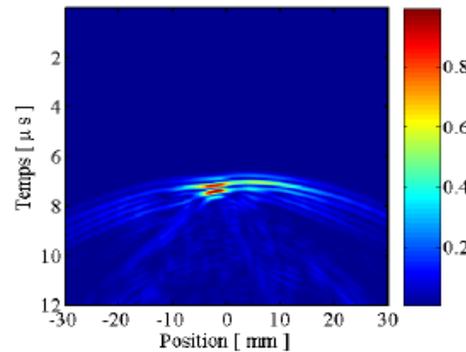
+ 4 constantes d'élasticité  $C_{ij}$   
(orthotrope 2D, avec grains orientés à  $0^\circ$ ,  
puis rotation de la matrice dans chaque  
maille)



- ✓ Modélisation avec le code EDF « ATHENA », éléments finis

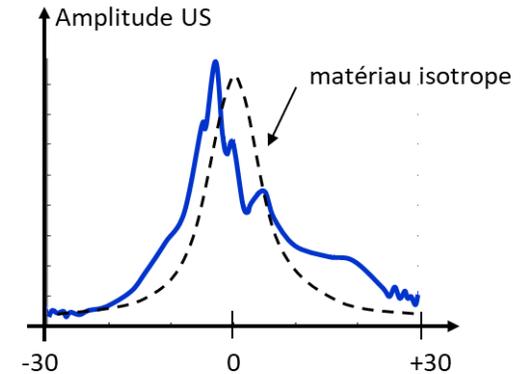


Sismogramme

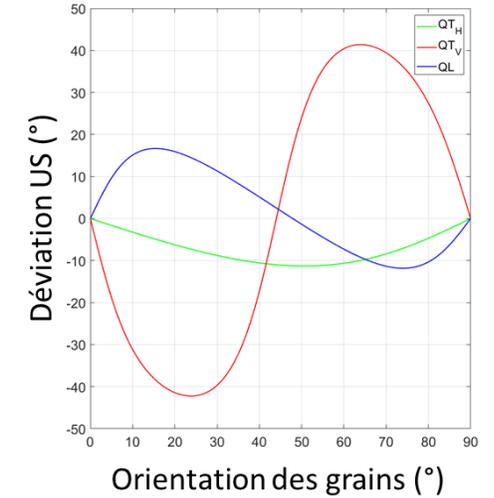


Signaux  
enregistrés en  
chaque point  
d'écoute

Echodynamique



Amplitudes  
maximales  
enregistrées  
en chaque  
point d'écoute



- **Objectif de ces essais** : vérifier qu'on peut passer à l'étape d'inversion, pour affiner la description MINA de la soudure

- **Principe :**

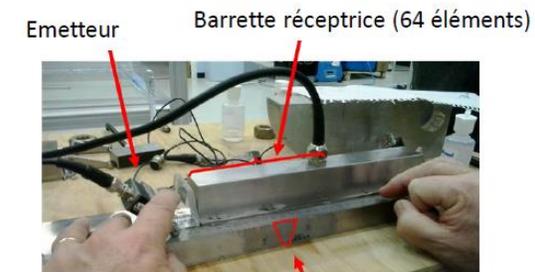
- ✓ Mode **tandem**, en réflexion, au contact, avec barrette multi-éléments (pour se rapprocher des conditions industrielles)
- ✓ Essais réalisés dans un sens puis dans l'autre par rapport à la soudure ⇒ distinguer soudure GD / soudure DG

Choix soudure dissymétrique (soudure corniche)



Passes déposées de Droite à Gauche

Choix mode faisant ressortir la dissymétrie (T60)



Soudure corniche

Sens 1



Position 1/36



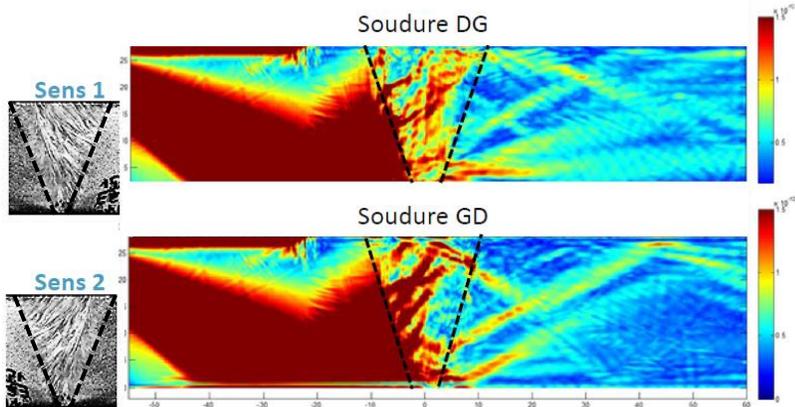
Acquisitions tous les 10 mm dans métal de base  
et tous les 5 mm dans la soudure (36 positions)

- **Objectif de ces essais** : vérifier qu'on peut passer à l'étape d'inversion, pour affiner la description MINA de la soudure

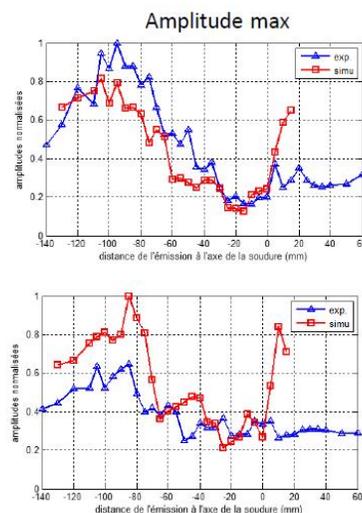
- **Principe :**

- ✓ Mode **tandem**, en réflexion, au contact, avec barrette multi-éléments (pour se rapprocher des conditions industrielles)
- ✓ Essais réalisés dans un sens puis dans l'autre par rapport à la soudure ⇒ distinguer soudure GD / soudure DG

- **Résultats de la comparaison :**



NB : simu avec orientations « réelles »

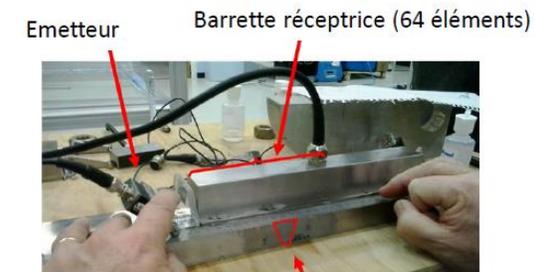


Choix soudure dissymétrique (soudure corniche)



Passes déposées de Droite à Gauche

Choix mode faisant ressortir la dissymétrie (T60)

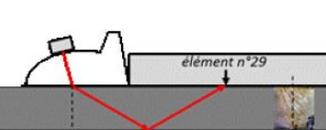


Soudure corniche

Sens 1



Position 1/36



Acquisitions tous les 10 mm dans métal de base et tous les 5 mm dans la soudure (36 positions)



Sensibilité au sens de soudage  
Et plutôt bon accord simu/exp  
Mais insuffisant pour espérer inverser



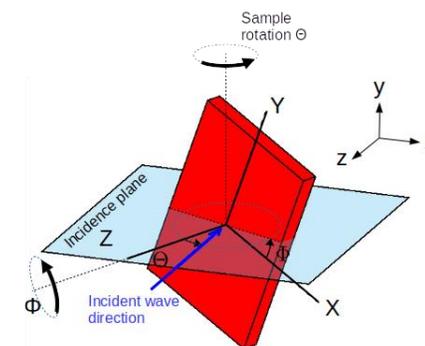
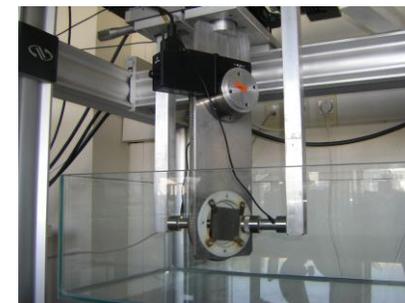
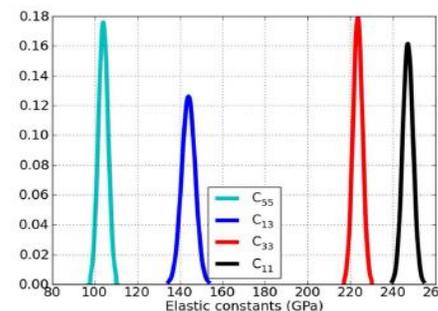
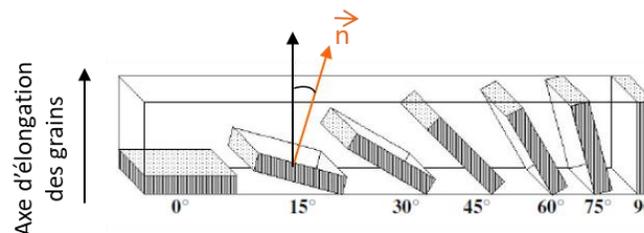
Origine des écarts ?

■ **Mesure des constantes d'élasticité** (travaux P. Guy, LVA, INSA Lyon) :

- ✓ 7 échantillons homogènes orthotropes
- ✓ Mesure des vitesses de phase des OL et OT, dans  $\neq$  plans avec  $\neq$  incidences
- ✓ Détermination des  $C_{ij}$  par inversion  
(comparaison entre plusieurs méthodes méta-heuristiques : algorithme génétique, recuit simulé, essais de particules, pattern recognition)

	$C_{11}$	$C_{33}$	$C_{13}$	$C_{55}$
moy	242.9	230.9	142.9	110
mini	230	217	134	98
maxi	283	236	153	130
$\sigma$	18.2	8.2	6.2	5.5

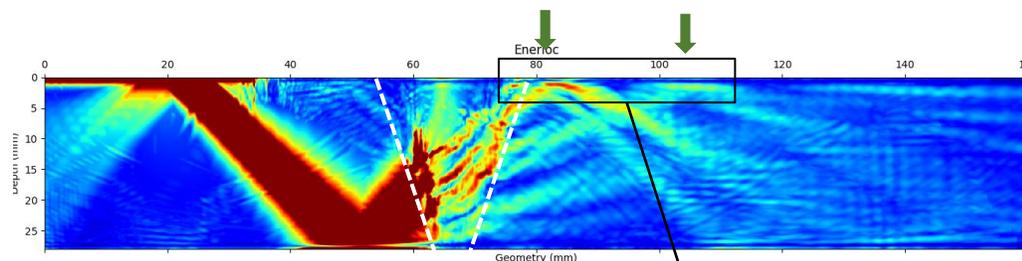
(GPa)



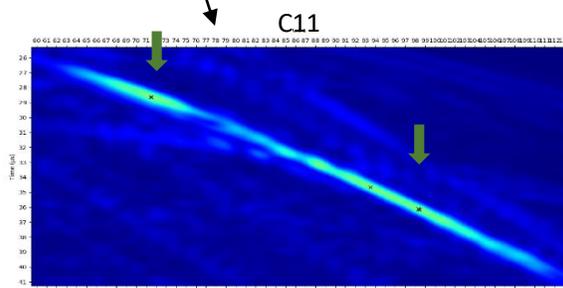
**Influence sur le résultat de simulation?**

⇒ **Mise en œuvre de la méthode de propagation analytique des incertitudes**

- Quelques exemples de résultats marquants :

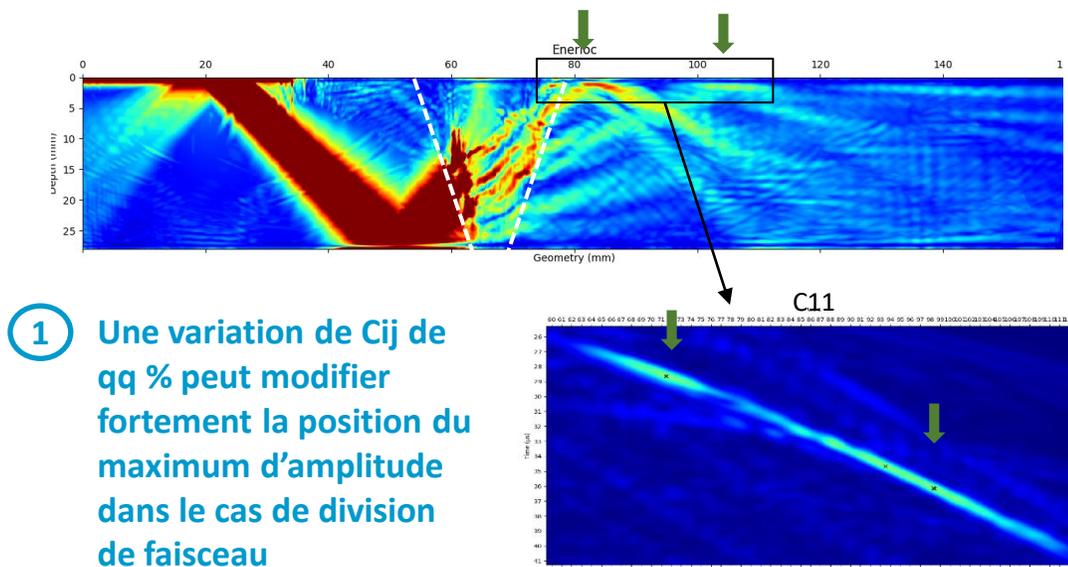


- Une variation de  $C_{ij}$  de qq % peut modifier fortement la position du maximum d'amplitude dans le cas de division de faisceau

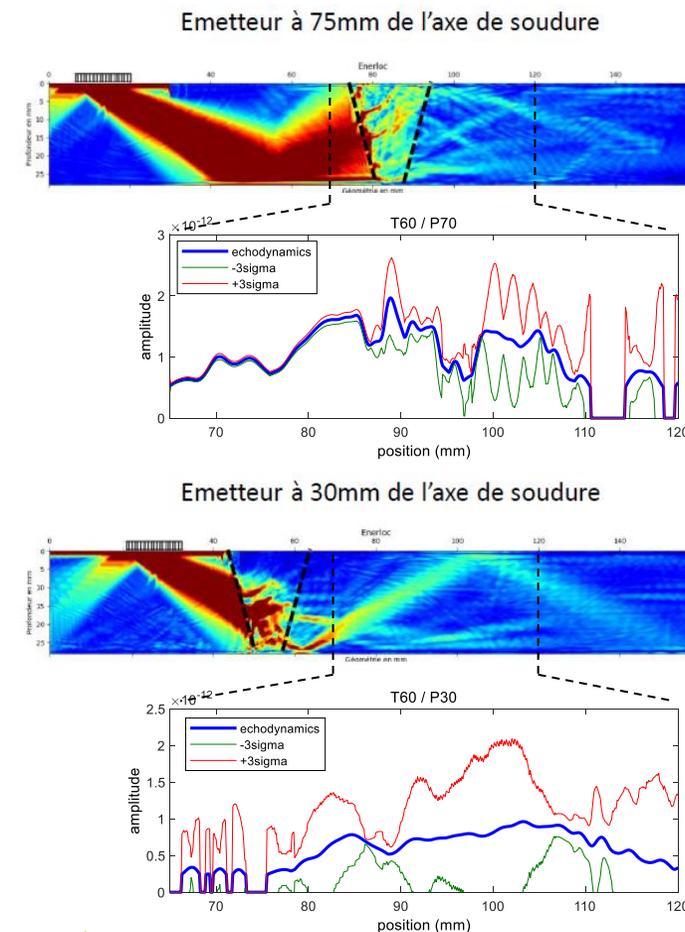


# Résultat de l'impact des incertitudes, en mode tandem

- Quelques exemples de résultats marquants :

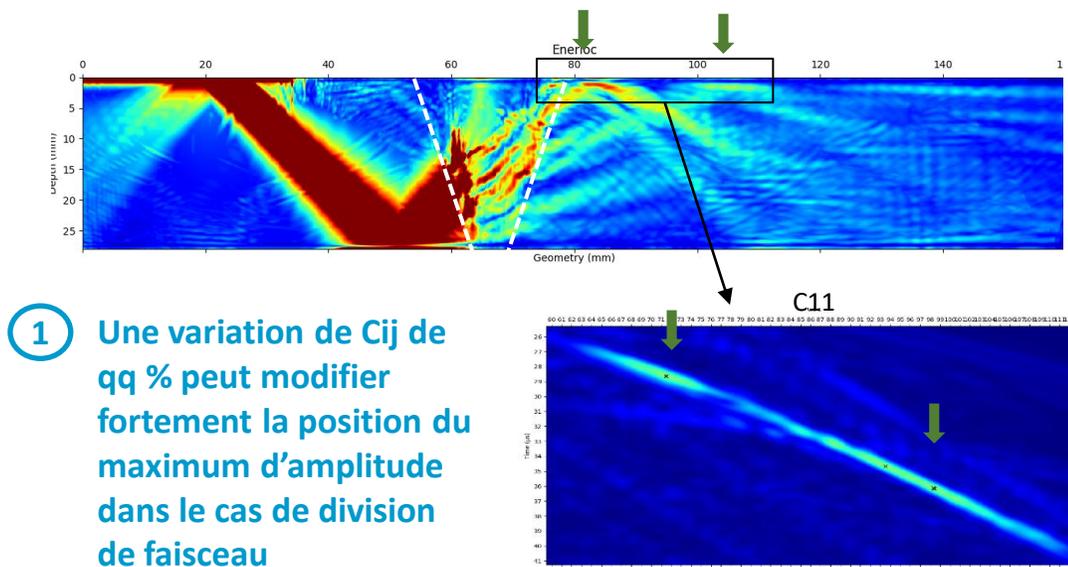


- 2** L'impact sur la modélisation dépend fortement de la position de l'émetteur



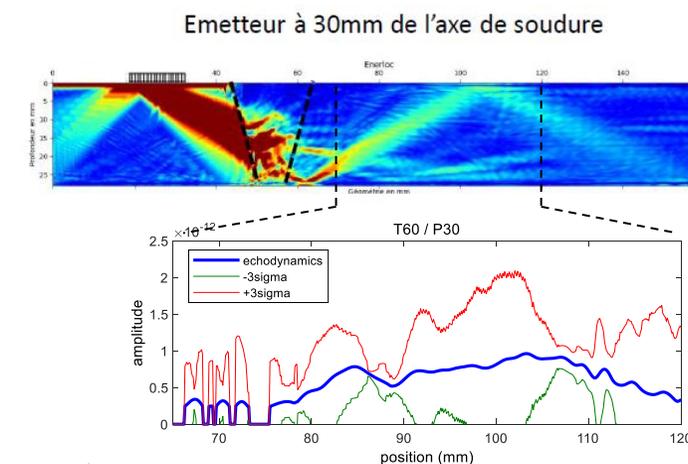
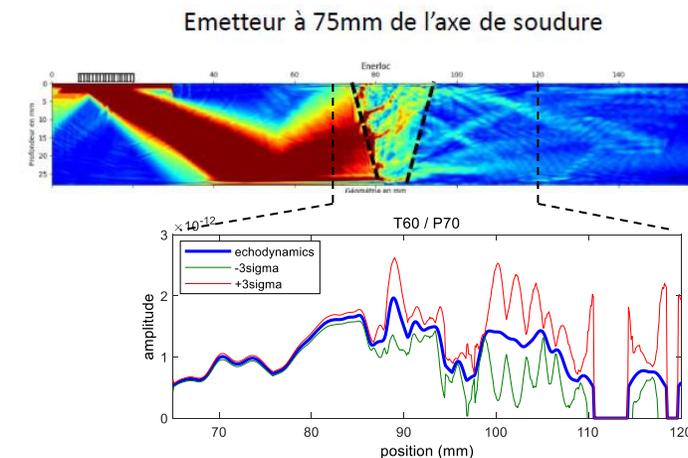
# Résultat de l'impact des incertitudes, en mode tandem

- Quelques exemples de résultats marquants :



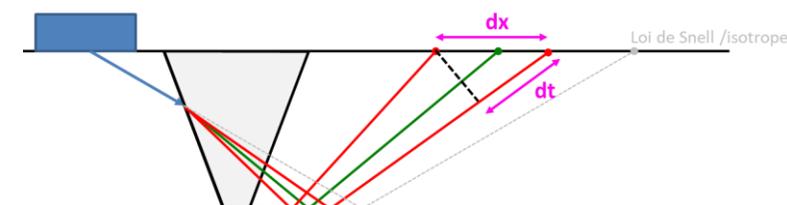
- Une variation de  $C_{ij}$  de qq % peut modifier fortement la position du maximum d'amplitude dans le cas de division de faisceau

- l'impact sur la modélisation dépend fortement de la position de l'émetteur

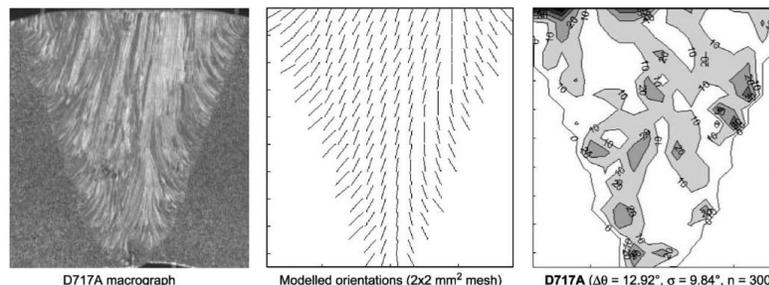


- Comme attendu, OL moins sensibles aux incertitudes des  $C_{ij}$  que OT

Configuration	T60	T45	L45 LL	L45 LT
dx maxi	35 mm	30 mm	4 mm	10 mm
dt maxi	11 $\mu$ s	8 $\mu$ s	0,3 $\mu$ s	1,3 $\mu$ s



- **MINA EE** validé, utilisé dans la littérature, et bientôt par les industriels dans CIVA



- MINA EE pas utilisable tel quel sur soudures TIG

⇒ **MINA TIG-auto** récemment développé : même philosophie mais procédé différent, donc paramètres différents



Commun :

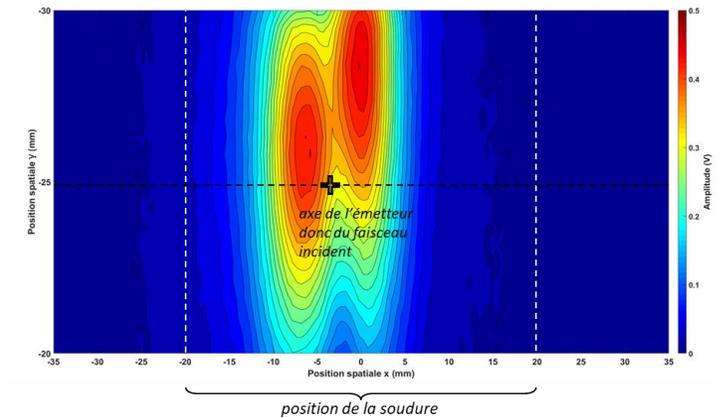
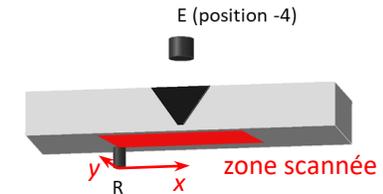
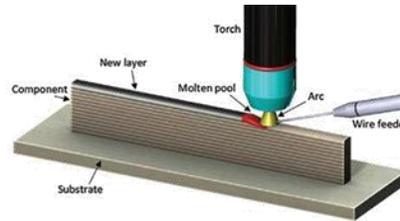
- Ordre d'enchaînement des passes
- Mécanismes de solidification (épitaxie et croissance sélective)

Spécifique au TIG, car influençant forme et dimensions des passes :

- Énergie de soudage (tension et intensité)
- Vitesse de soudage
- Vitesse de dévidement du fil

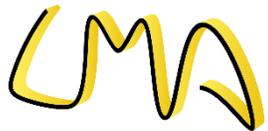
- **Modèle direct MINA + ATHENA** : ok mais incertitudes sur les données d'entrée ( $C_{ij}$ ) à prendre en compte

- REX suite à l'intégration de **MINA** dans la plateforme **CIVA**
- **MINA 3D** : dans certains cas, l'hypothèse 2D n'est pas suffisante (soudage en position) => projet ANR déposé, avec EDF, CEA LIST, CEA LTA, LMGC & IUSTI
- Prédiction de structure cristalline pour des pièces de **fabrication additive** (WA-AM)
- **Inversion** : IA pour optimiser orientations et Cij
- Notion de **contrôlabilité** : spécifier ordre des passes pour optimiser le futur contrôle



## Quelques références :

- Moysan J., Apfel A., Corneloup G., 2003, "Modelling the grain orientation of austenitic stainless steel multipass welds to improve ultrasonic assessment of structural integrity", Int. J. Press. Vess. Pip., 10.1016/S0308-0161(03)00024-3*
- Gueudré C., Le Marrel L., Moysan J., Chassignole B., 2009, "Direct model optimisation for data inversion. Application to ultrasonic characterisation of heterogeneous welds", NDT&E Int., 10.1016/j.ndteint.2008.07.003*
- Ye J., Moysan J., Song SJ., Kim HJ., Chassignole B., Gueudré C., Dupond O., 2012, "Influence of welding passes on grain orientation - The example of a multi-pass V-weld", Int. J. Press. Vess. Pip., 10.1016/j.ijvp.2012.02.007*
- Ploix M.A., Guy P., Chassignole B., Moysan J., Corneloup G., ElGuerjouma R., 2014, "Measurement of ultrasonic scattering attenuation in austenitic stainless steel welds: Realistic input data for NDT numerical modeling", Ultras., 10.1016/j.ultras.2014.04.005*
- Gueudré C., Mailhé J., Ploix M.A., Corneloup G., Chassignole B., 2019, "Influence of the uncertainty of elastic constants on the modelling of ultrasound propagation through multi-pass austenitic welds. Impact on non-destructive testing", Int. J. Press. Vess. Pip., 10.1016/j.ijvp.2019.02.011*
- Marsac Q., Gueudré C., Ploix M.A., Forest L., Baqué F., Corneloup G., 2020, "Realistic model to predict the macrostructure of GTAW welds for the simulation of ultrasonic non destructive testing", J. Nondestruct. Eval., 10.1007/s10921-020-00724-y*
- Corneloup G., Gueudré C., Ploix M.A., 2021, "Non-Destructive Testing and testability of materials and structures", 320 p., EPFL Press, ISBN 9782889154401*



Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique

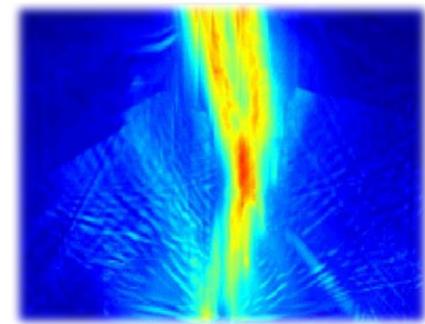
<http://www.lma.cnrs-mrs.fr/>



Aix-Marseille  
université  
Sociallement engagée

Centrale  
Méditerranée

PROTISVALOR  
Aix-Marseille université



# Dernières avancées sur la modélisation de la microstructure des soudures épaisses pour améliorer leur contrôle ultrasonore

Marie-Aude PLOIX, Cécile GUEUDRÉ, Gilles CORNELOUP, Jean MAILHÉ, Joseph MOYSAN

[marie-aude.ploix@univ-amu.fr](mailto:marie-aude.ploix@univ-amu.fr)