

EVALUATION PAR MICROTOMOGRAPHIE AUX RAYONS X DE LA SENSIBILITE A LA FISSURATION A CHAUD D'ALLIAGES Al-Mg-Si

Eliane Giraud (SIMaP – Grenoble INP)
Michel Suéry (SIMaP – Grenoble INP)
Jérôme Adrien (MATEIS – INSA Lyon)
Eric Maire (MATEIS – INSA Lyon)
Michel Coret (LaMCoS – INSA Lyon)



- ☐ Contexte et objectifs
- ☐ Procédure expérimentale
- ☐ Préparation des alliages
- ☐ Essais de solidification contrariée
- ☐ Observations microtomographiques
- ☐ Sensibilité à la fissuration à chaud
- ☐ Conclusions

CONTEXTE ET OBJECTIFS

Thèse : Etude expérimentale et modélisation du phénomène de fissuration à chaud (FAC) lors du soudage par faisceau d'électrons et TIG d'alliages 6061 T6

ETUDE EXPERIMENTALE



→ Cerner le comportement de l'état semi-solide sous divers modes de sollicitation et chemins thermiques dont certains se rapprochant des conditions d'apparition de la FAC :

- **Essais de traction à l'état semi-solide** (refusion, solidification, isotherme, non isotherme)
- Essais de cisaillement à l'état semi-solide (isotherme, non isotherme)
- Essais de compression drainée (isotherme, non isotherme)

- **Essais de solidification contrariée**

MODELISATION

EN COURS

→ Développer un modèle décrivant la rhéologie de l'état semi-solide en fonction du mode de sollicitation

→ Implantation du modèle dans un code de calcul éléments finis

CONTEXTE ET OBJECTIFS

Essais de solidification contrariée ↔ Essais de criquabilité

But : déterminer une sensibilité à la fissuration à chaud en fonction de la composition

Essais de criquabilité dans la littérature :

Essais sans étape
de soudage

Ex. : test de l'anneau

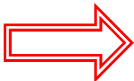
Mais conditions de solidification = coulées

Essais avec étape
de soudage

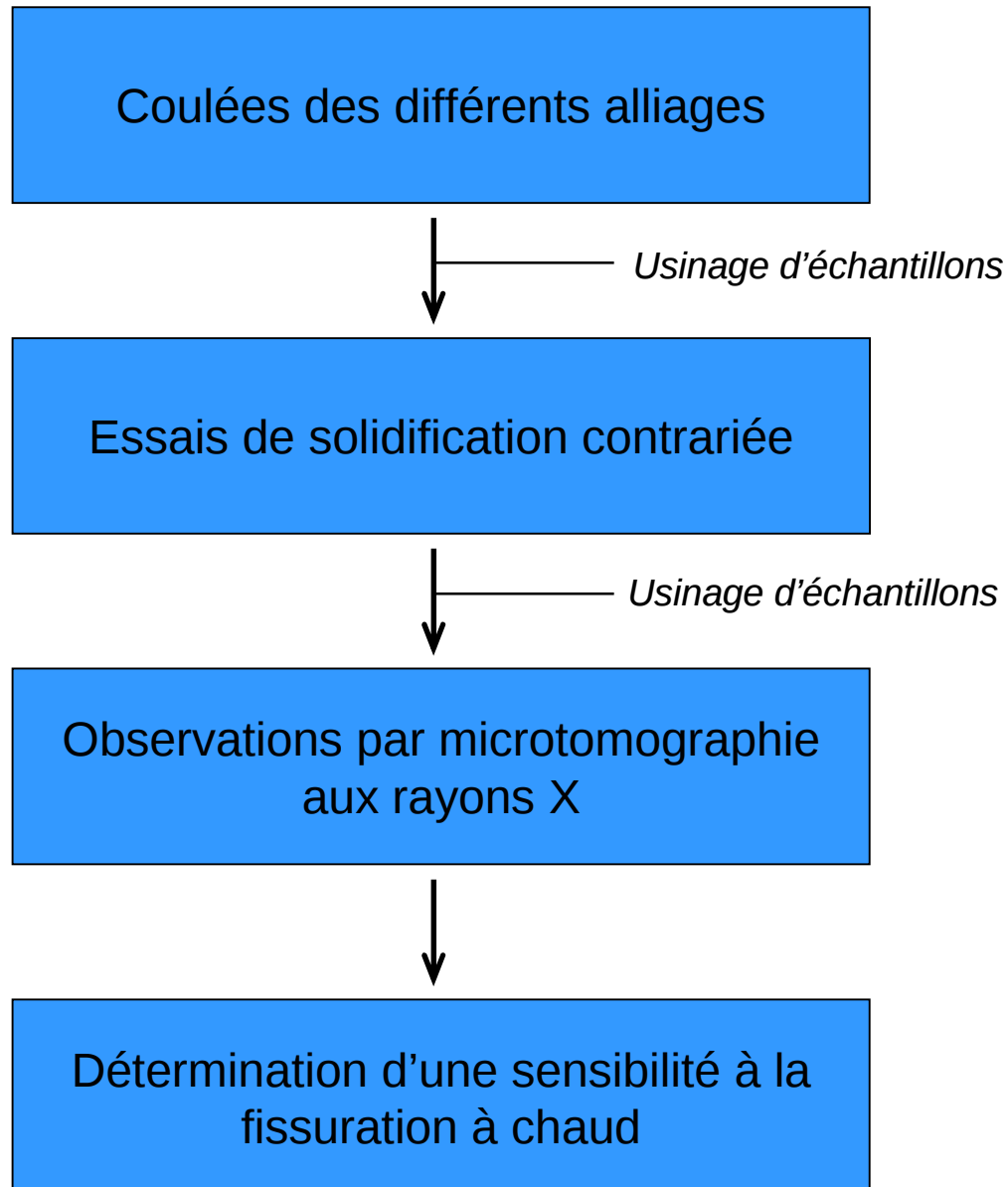
Ex. : test varestraint

Mais banc de soudage nécessaire

Essais sans étape de soudage mais avec :

- 
- i. des conditions de solidification se rapprochant de celles rencontrées lors du soudage
 - ii. des compositions représentant celles rencontrées en zone fondue avec ou sans utilisation de métal d'apport

PROCEDURE EXPERIMENTALE



PREPARATION DES ALLIAGES

But : Obtenir des échantillons présentant des compositions semblables à celles rencontrées en zone fondue avec ou sans utilisation d'un métal d'apport

→ Coulée d'alliages en utilisant :

- Un alliage 6061 comme métal de base (Si : 0.61 wt % and Mg : 0.93 wt%)
- Des alliages 4043 (Al-5Si), 4047 (Al-12Si) or 5356 (Al-5Mg) comme métal d'apport

⇒ Alliages étudiés :

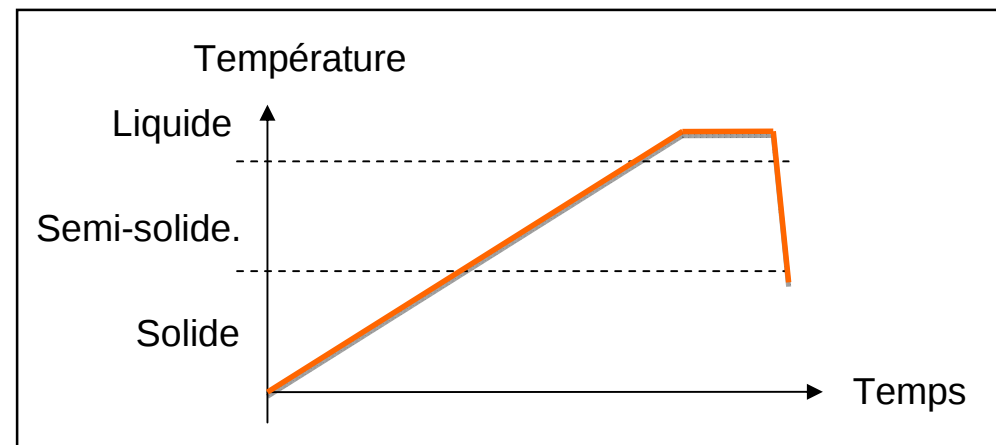
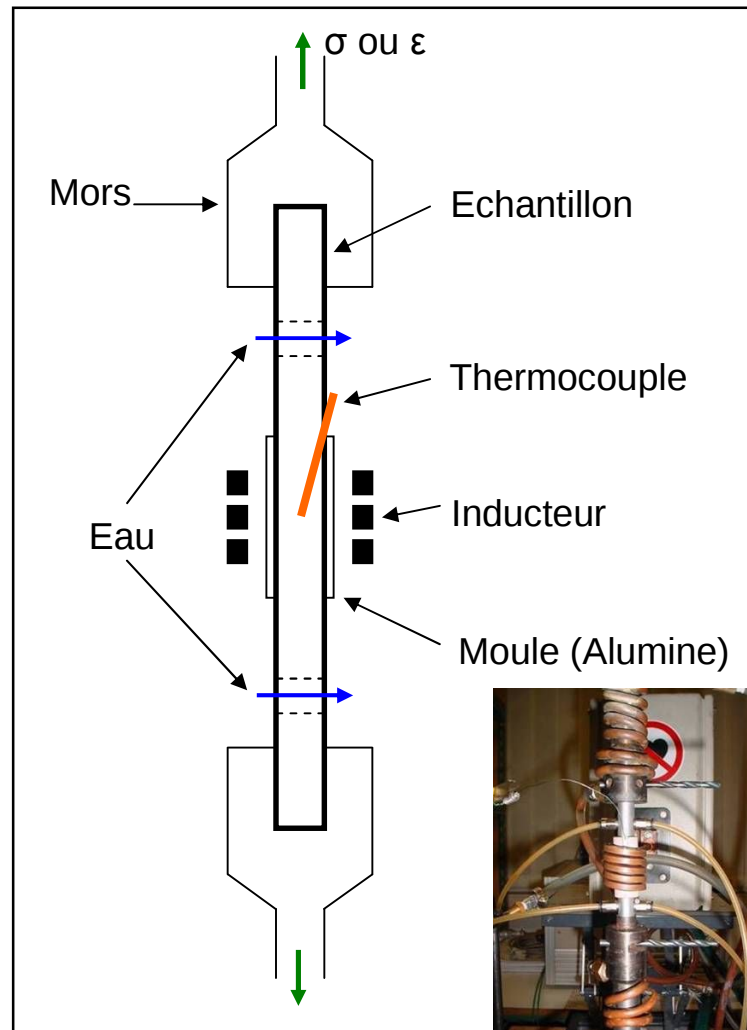
- Alliage 6061
- Mélanges 6061 / 4043 contenant : **1% / 2% / 3% Si**
- Mélanges 6061 / 4047 contenant : **4% / 5% Si**
- Mélanges 6061 / 5356 contenant : **2% / 3% / 4% Mg**

Illustration d'un échantillon coulé



DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Echantillon : cylindre de 9.5 mm de diamètre et de 120 mm de long



Vitesse de chauffe ~ 2 K/s

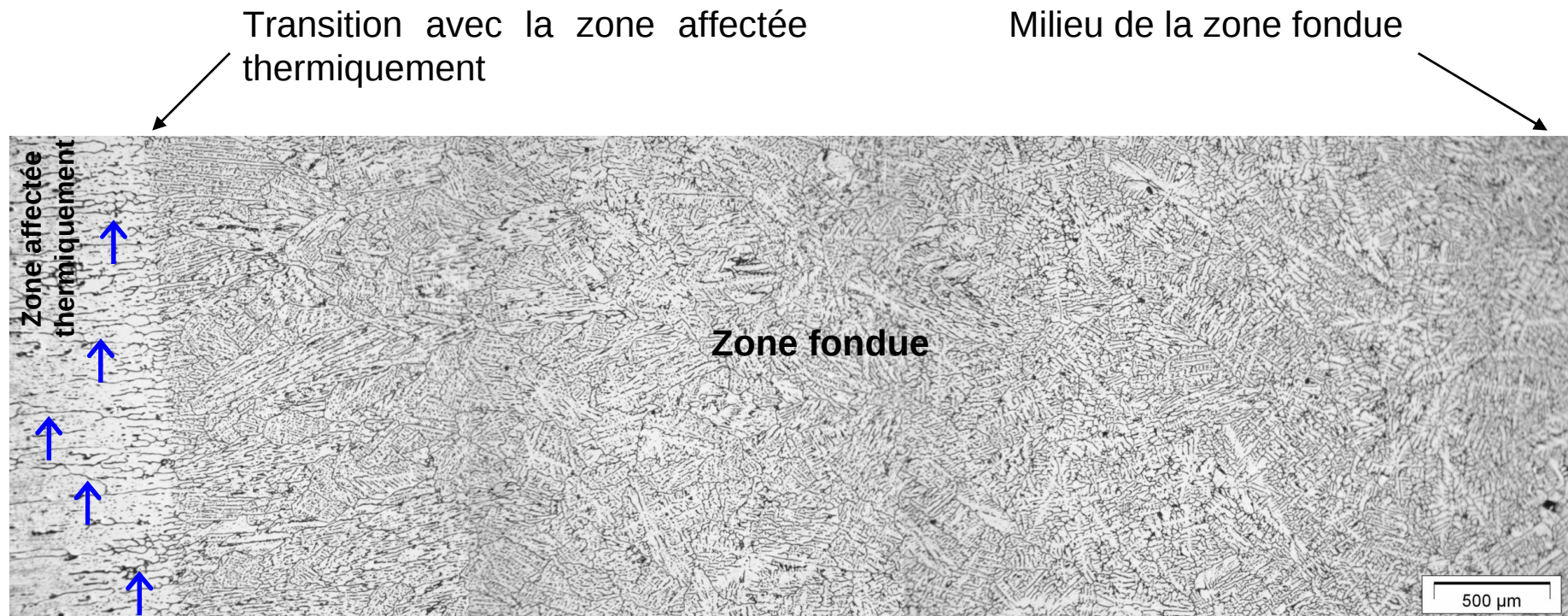
Vitesse de refroidissement ~ 80 K/s

Accommodation des déformations lors de la montée en température

Refroidissement en maintenant les mors fixes = **solidification contrariée**

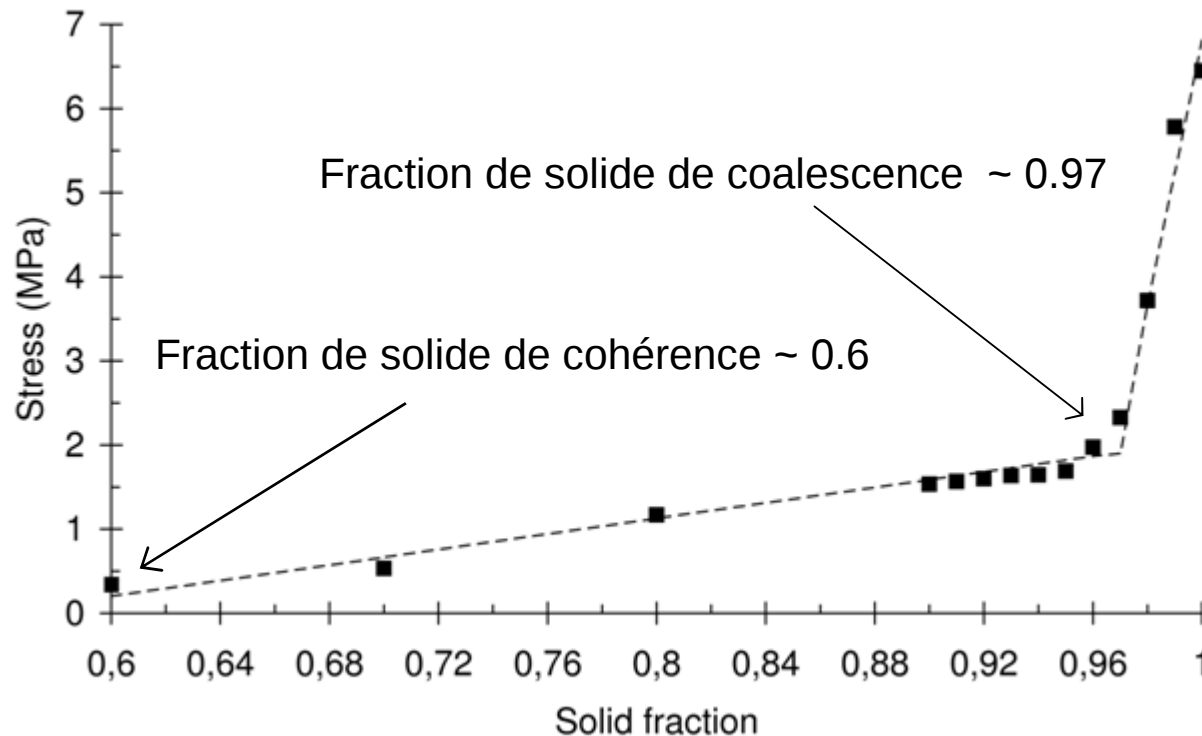
COHERENCE AVEC LES CONDITIONS DE SOUDAGE

- (1) Forte vitesse de refroidissement V
- (2) Solidification contrariée V
- (3) Présence d'une zone affectée thermiquement avec une structure granulaire et un phénomène de liquation (flèches bleues) V
- (4) Backfilling X



VARIATION DE LA CONTRAINTE MESUREE AVEC LA TEMPERATURE

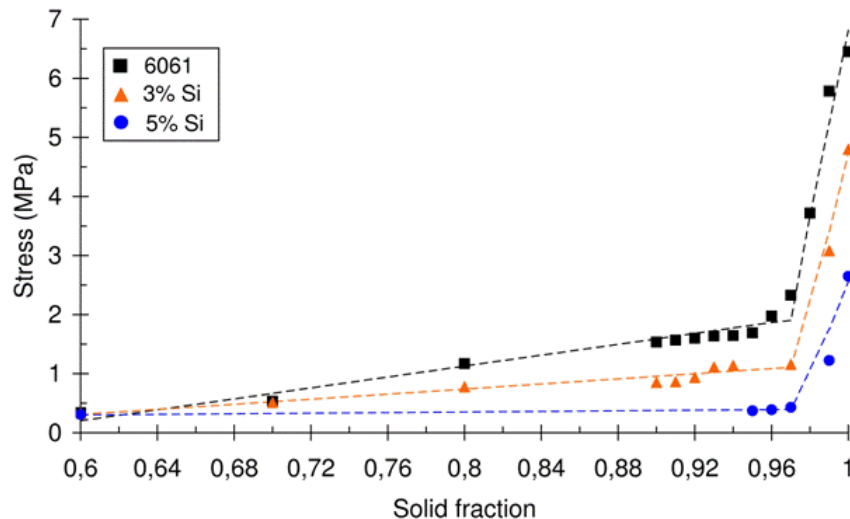
Contraintes engendrées par la solidification enregistrées en temps réel en fonction de la température (convertie en fraction de solide à l'aide du logiciel ProPhase)



Deux pentes = Changement dans le mode d'accommodation des déformations :

- $F_s < 0.97$: circulation du liquide et réarrangement des grains
- $F_s > 0.97$: déformation des dendrites

INFLUENCE DU Si ET Mg SUR LA VARIATION DE CONTRAINTE



Pour le Si :

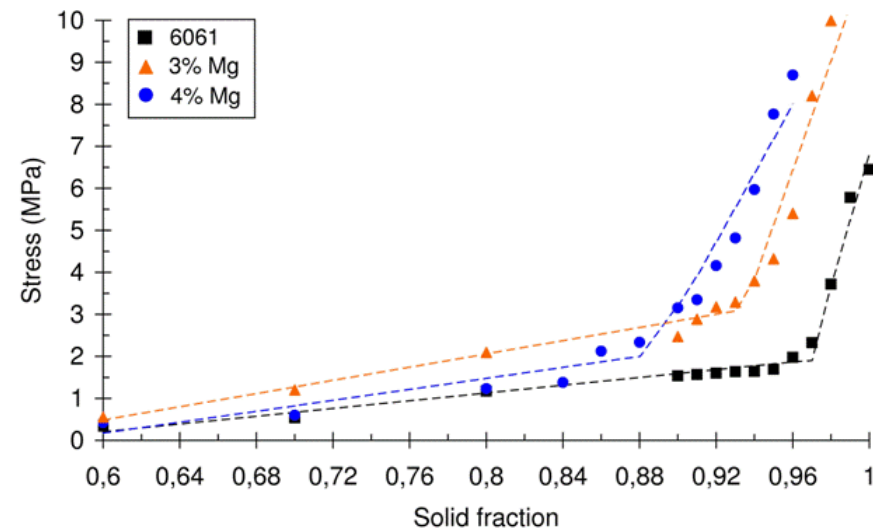
Pas d'impact sur la valeur de la fraction de solide de coalescence

Contraintes plus faibles (que pour le 6061)

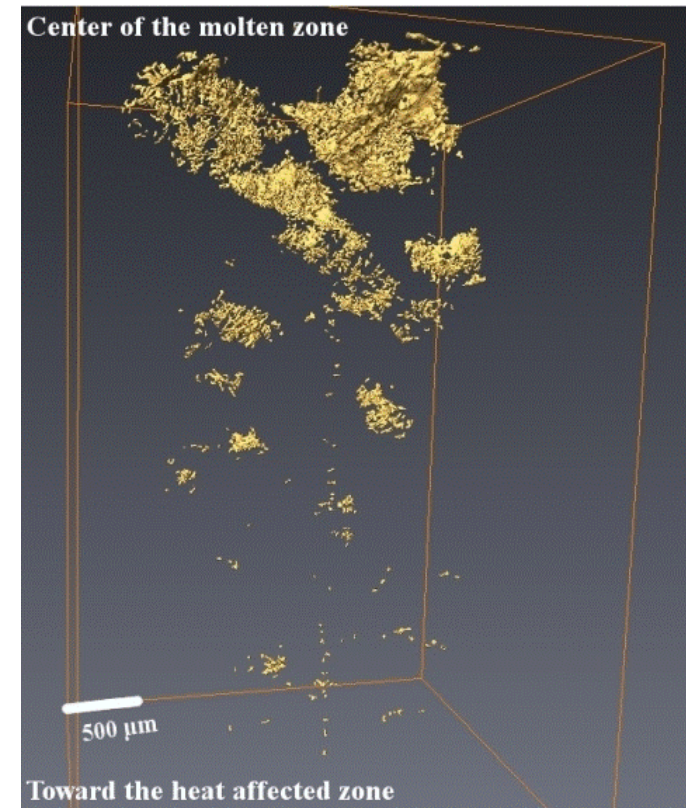
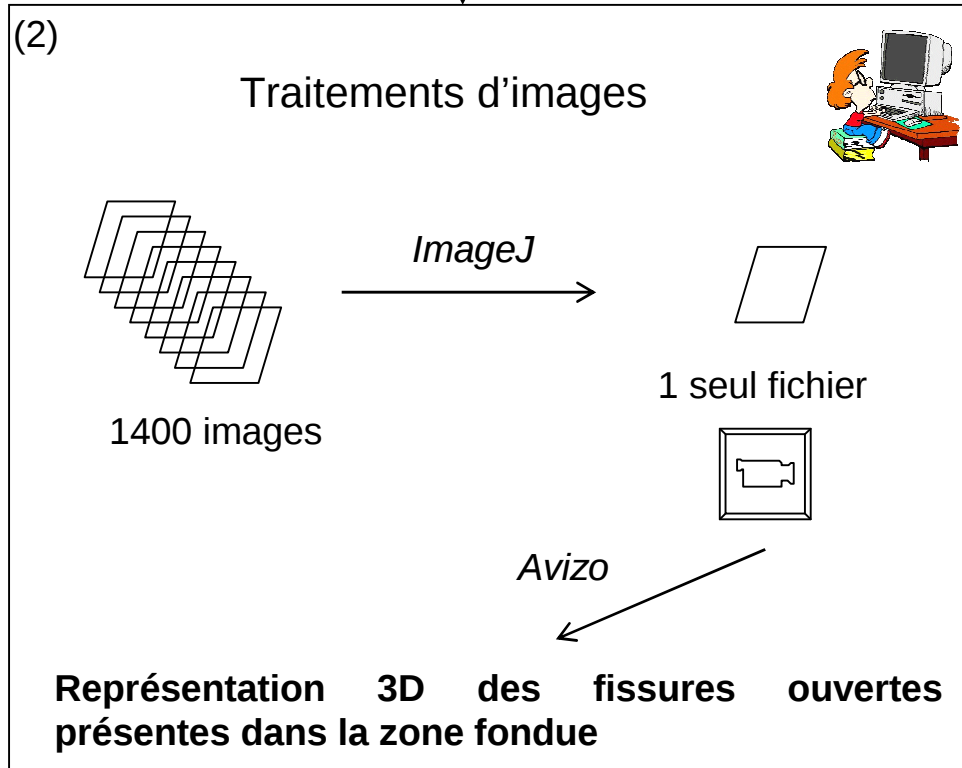
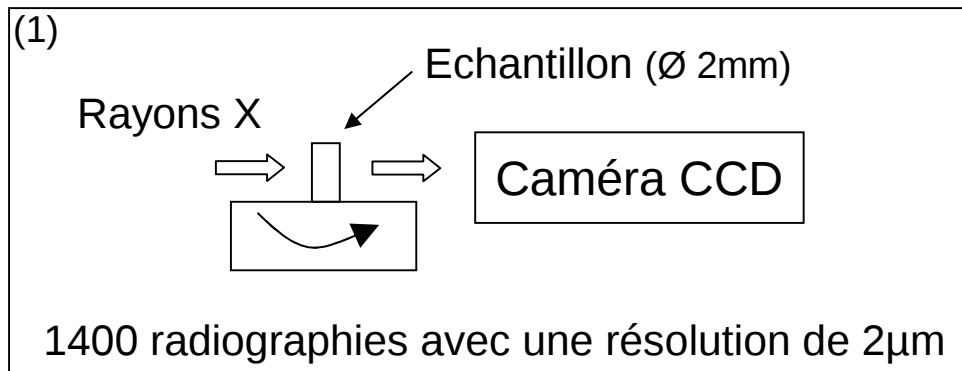
Pour le Mg :

En augmentant la teneur en Mg, la fraction de solide de coalescence diminue : développement du squelette solide de plus en plus précoce

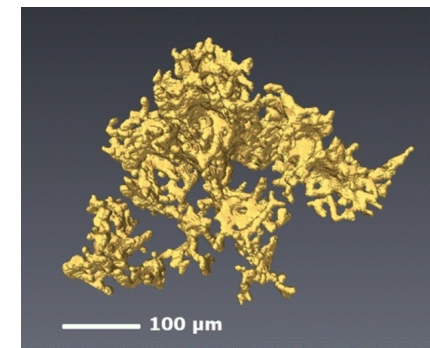
Contraintes plus élevées



OBSERVATIONS MICROTOMOGRAPHIQUES



Représentation 3D de la zone fondue d'un échantillon 6061



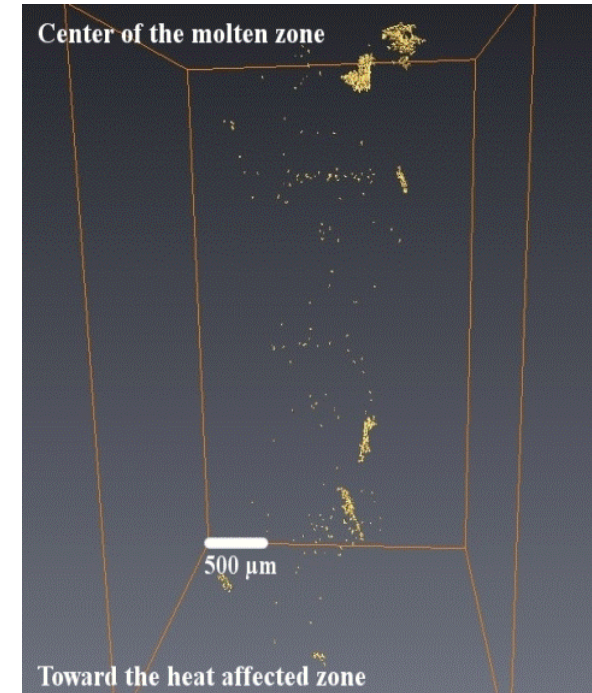
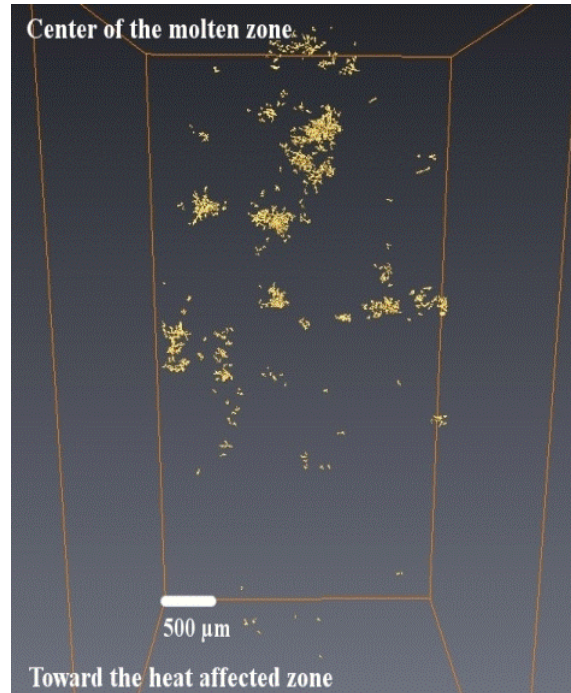
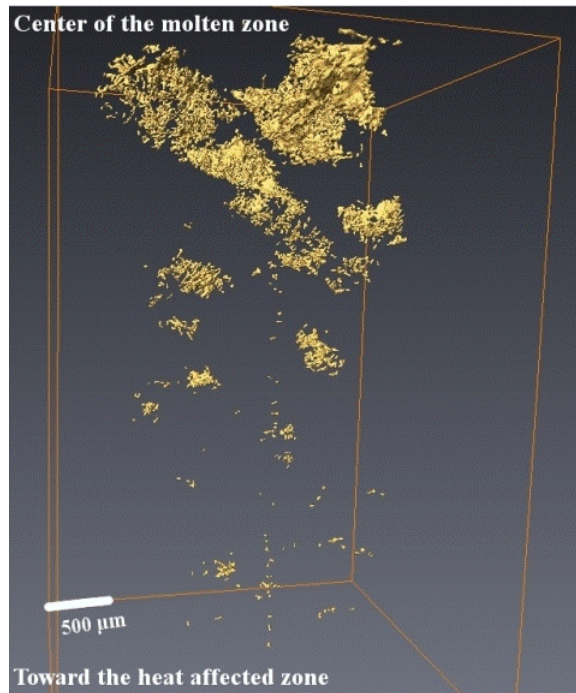
OBSERVATIONS MICROTOMOGRAPHIQUES

Représentations 3D de la zone fondue pour le :

6061

3% Mg

5% Si



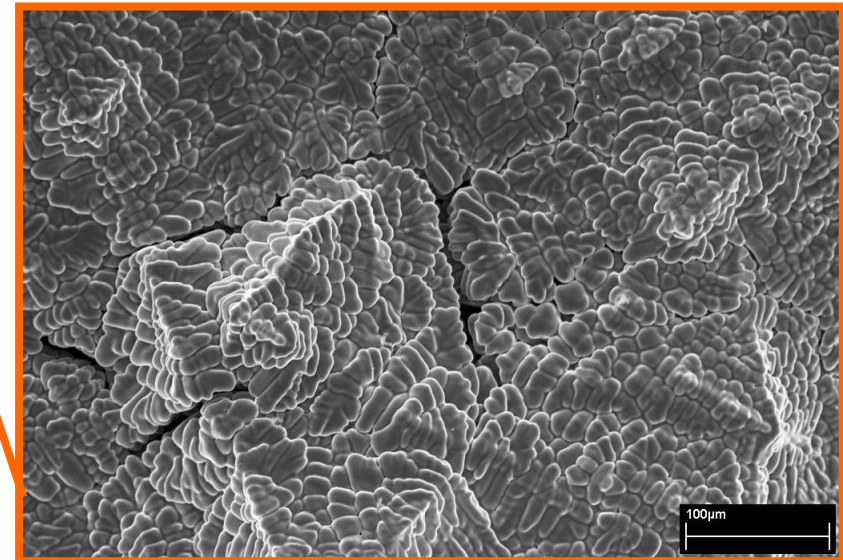
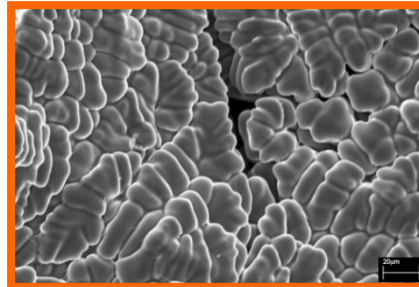
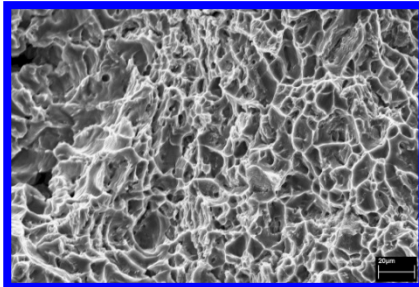
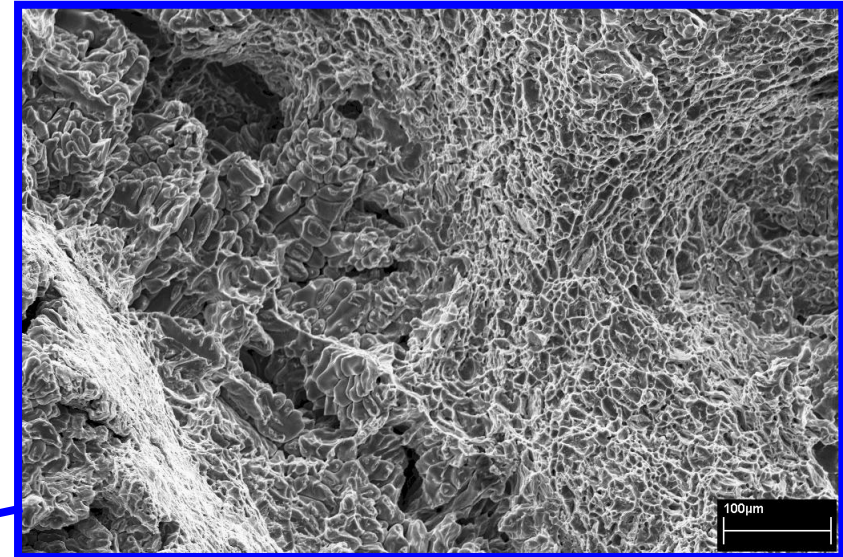
- Diminution de la quantité de fissures quand la teneur en Si ou Mg augmente
- Les fissures sont concentrées dans le centre de la zone fondue où les déformations sont maximales
- Les fissures sont principalement orientées perpendiculairement à la direction du gradient thermique, direction suivant laquelle les déformations s'appliquent et tendent à ouvrir les films liquides

OBSERVATIONS MICROTOMOGRAPHIQUES

Est-ce que les fissures observées dans la zone fondue sont réellement dues au phénomène de fissuration à chaud ?

Réalisation d'une traction à température ambiante sur les éprouvettes ayant subi une solidification contrariée

Faciès de rupture = Zones de déformation ductile (bleu) + **Zones avec dendrites lisses (orange)** typiques de la FAC



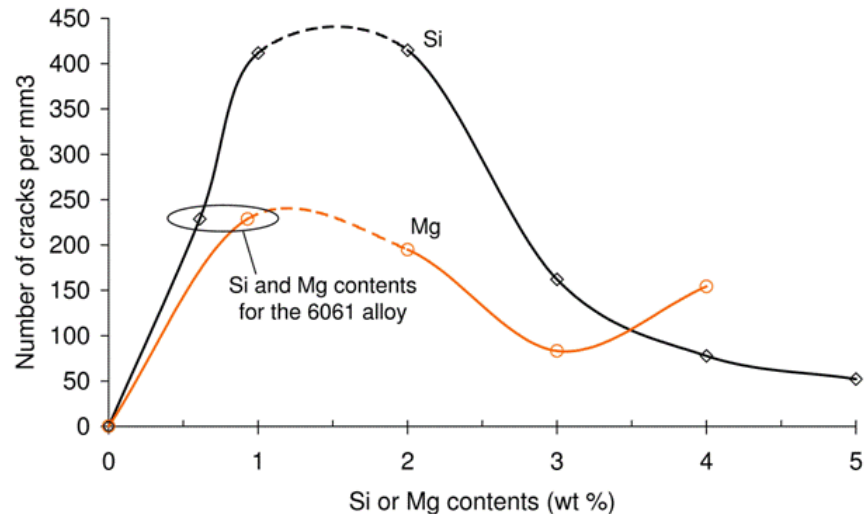
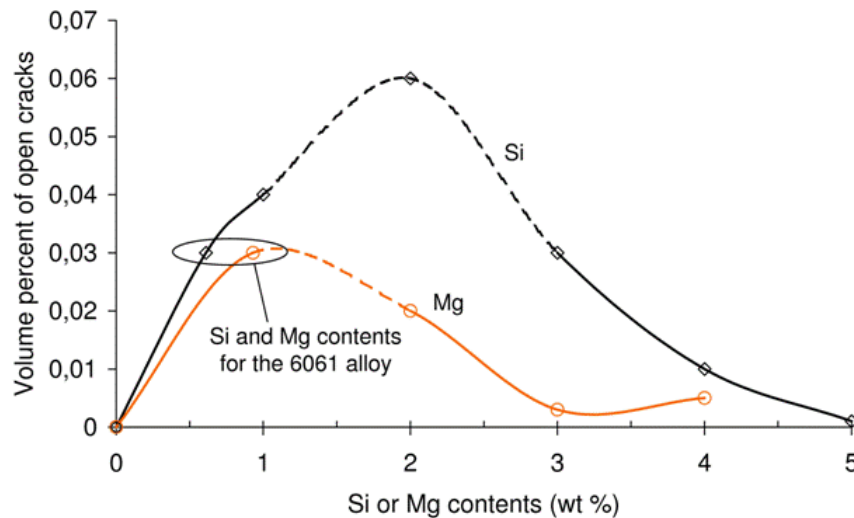
Faciès de rupture obtenus après un essai de traction à température ambiante sur une éprouvette de 6061

SENSIBILITE DETERMINEE POUR DEUX PARAMETRES DIFFERENTS

Determination de la sensibilité en fonction de la teneur en Si ou Mg en considérant :

- le pourcentage volumique de fissures
- le nombre de fissures par unité de volume

En traitant les données obtenues par microtomographie



- Courbe lambda avec un pic de sensibilité entre 1-2% de Si ou de Mg
- Alliages moins sensibles que le 6061 → Si > 3% or Mg > 2%
- Sensibilité minimale pour 5% Si ou 3% Mg
- Comportement du 4% Mg non expliqué

COMPARAISON AVEC LA LITTERATURE

Etude de Shimizu et al. → Hot cracking during electron beam welding of 6061 alloy (with 4043, 4047, 5356 as filler metals)

→ Tous les métaux d'apport conduisent à une diminution de la sensibilité 

→ Pas de fissures pour Si > 3,2% 

→ Cette étude : sensibilité minimale pour 5% Si

→ Hyp. : Absence d'alimentation en liquide (i.e. backfilling) → Conditions appliquées plus sévères que celles rencontrées lors du soudage

→ Pas de fissures pour Mg > 2,3% 

→ Cette étude : sensibilité minimale autour de 3% Mg

CONCLUSIONS

- ❑ Possibilité de réaliser une solidification contrariée avec une forte vitesse de refroidissement = conditions relativement proches de celles rencontrées en soudage
- ❑ Mesure en temps réel du développement des contraintes engendrées par la solidification (retrait thermique, retrait de solidification) en fonction de la température :
 - transition dans le mode d'accommodation des déformations
 - dépendance de la fraction de solide de coalescence avec la teneur en Mg
- ❑ Formation de fissures dans la zone fondue détectables par microtomographie aux rayons X
- ❑ Détermination d'une sensibilité à la fissuration à chaud en considérant le pourcentage volumique de vide ou le nombre de fissures par unité de volume
- ❑ Mélanges 6061 / Métal d'apport moins sensibles à la fissuration à chaud que le 6061 seul lorsque la teneur en Si dépasse 3% ou lorsque la teneur en Mg dépasse 2%.