



SNS 2012 :
**Comportement rhéologique d'alliages
en cours de solidification**

Lionel BOUFFIER

*(thèse CIFRE : SIMaP/GPM2, EDF R&D,
Chatou)*

*Michel SUERY, Yves BRECHET (Grenoble
INP / SIMaP)*

*Jean-Michel CARPREAU (LaMSID, UMR EDF-
CNRS-CEA)*



- PLAN -

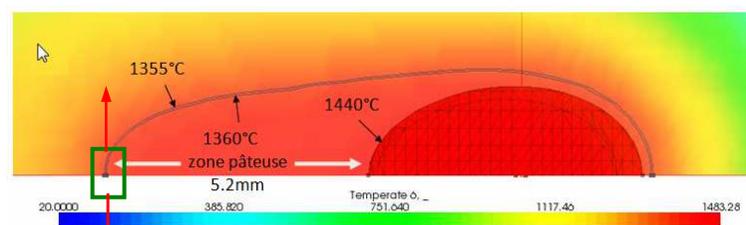
- ▶ **1 – Introduction**
- ▶ **2 – Essais de traction à chaud**
- ▶ **3 – Tomographie X**
- ▶ **4 – Conclusion et perspectives**

1 - Introduction

► Fissuration à Chaud (« FAC »)

Phénomène observé en fin de solidification (fonderie et soudage), dans la zone pâteuse, entre liquide et solide, sous l'effet de déformations principalement en traction :

- **Internes** : contraction thermique, retrait de solidification
- **Externes** : conditions de soudage, géométrie de la pièce, bridage etc...



Modélisation de la zone pâteuse dans le cas du soudage (torche TIG en mouvement)

Mieux comprendre ce phénomène et pouvoir le modéliser

→ Nécessité d'avoir une bonne connaissance du comportement de l'alliage étudié en zone de transition pâteuse, où se forme et évolue la fissure

2.1 – Essais de traction à chaud : principe

Objectif :

- étudier le comportement rhéologique de l'alliage considéré dans le domaine de température où se forme la FAC

→ Essais de traction à chaud

Principe : appliquer un effort en traction sur une éprouvette cylindrique dont la partie centrale chauffée à la température visée (correspondant à une fraction de solide donnée) concentre les déformations.

Alliages étudiés au SIMaP sous la direction de M. Suéry :

- Al-Cu (thèses M. Braccini, O. Ludwig)
- Al-Mg-Si (thèse D. Fabrègue : 6056, E. Giraud : 6061)

Nouvelle étude en cours sur Inconel 600 (Ni-Cr-Fe)

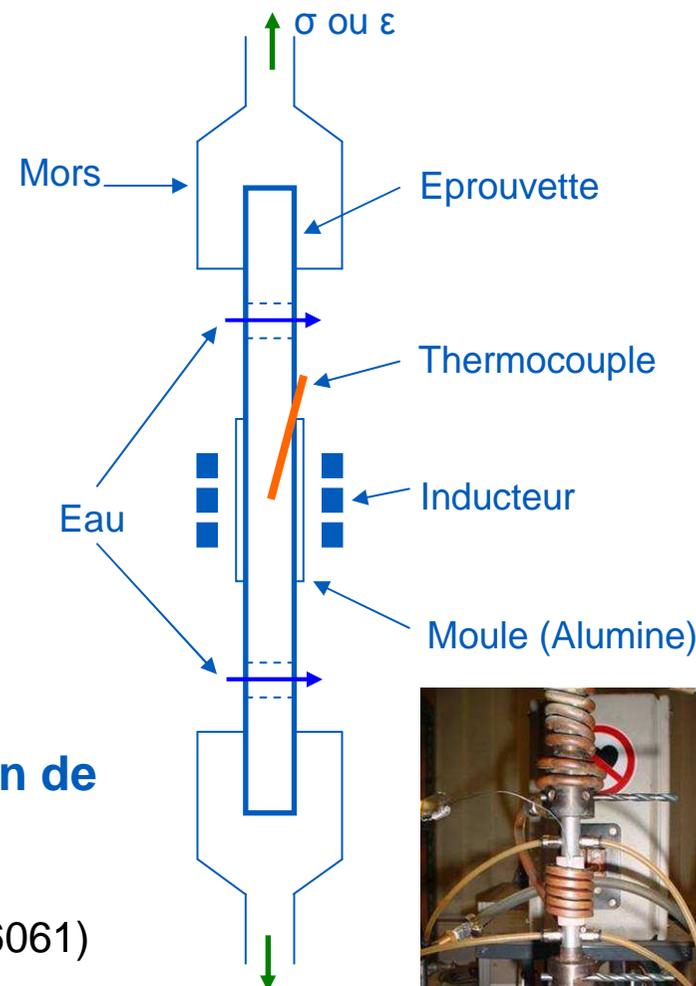
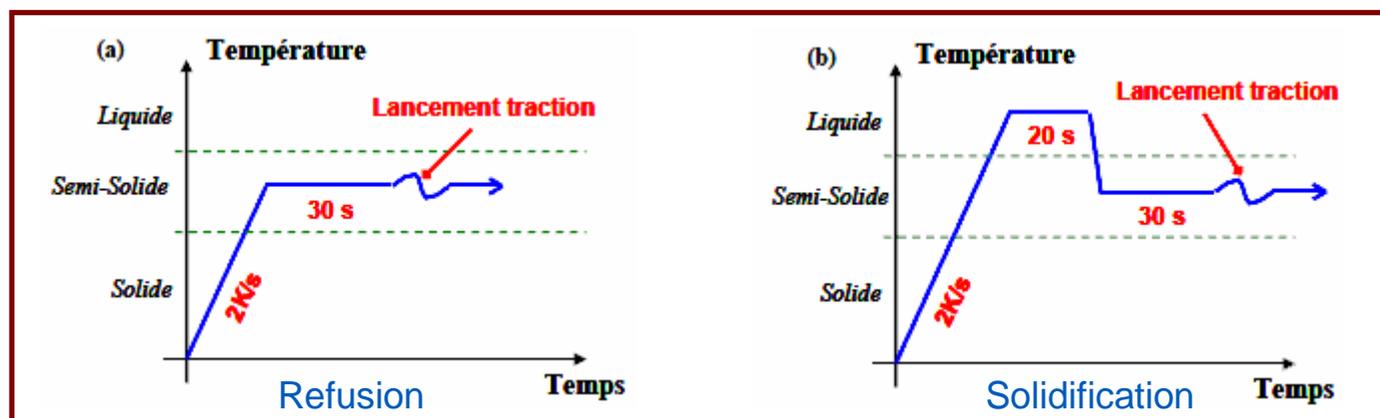


Schéma du dispositif d'essai de traction à chaud

2.1 – Essais de traction à chaud : principe

Différents types d'essais isothermes:

- En **refusion** (les plus répandus)
- En **solidification** (passage par l'état liquide : plus proche des conditions de soudage/fonderie, utilisation d'un creuset pour contenir le liquide)

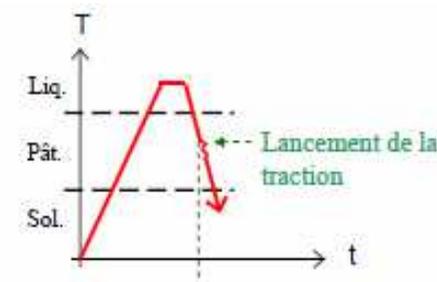


Courbes de températures caractéristiques d'essai (a) en refusion et (b) en solidification (thèse E. Giraud)

Gamme de fractions de solide visée :

0.80 – 0.99

Des essais **anisothermes** et à différentes vitesses de refroidissement ont également été effectués (non détaillés par la suite)

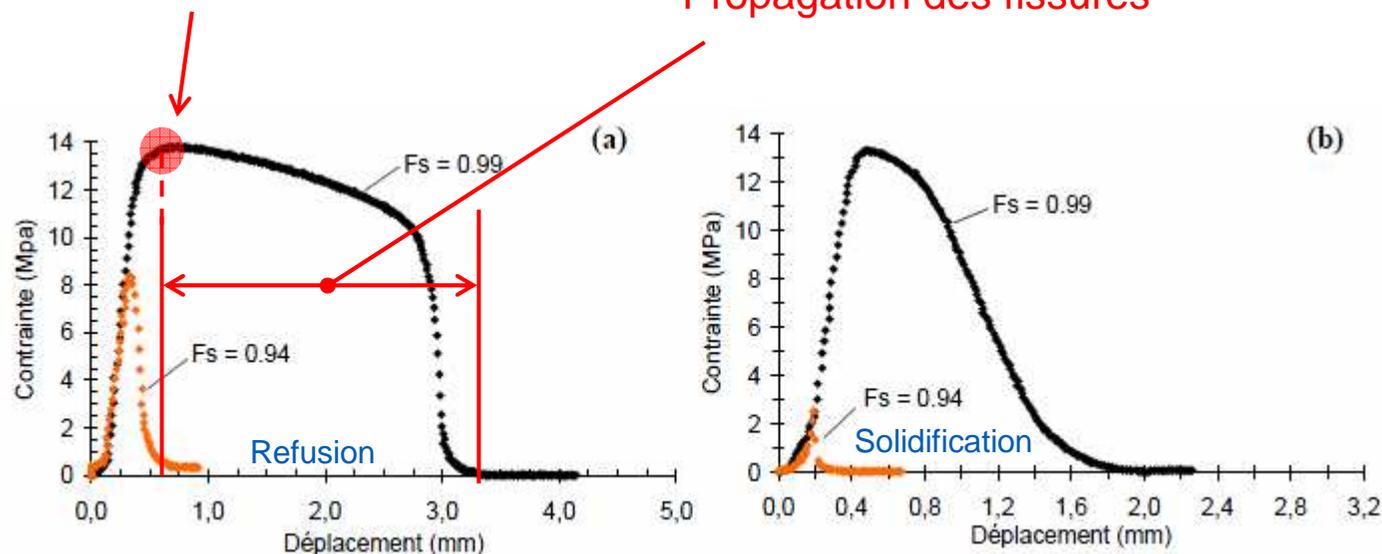


2.2 – Essais de traction à chaud : résultats

► Résultats : alliage 6061

Contrainte au pic :
Formation de fissures

Ductilité après pic :
Propagation des fissures



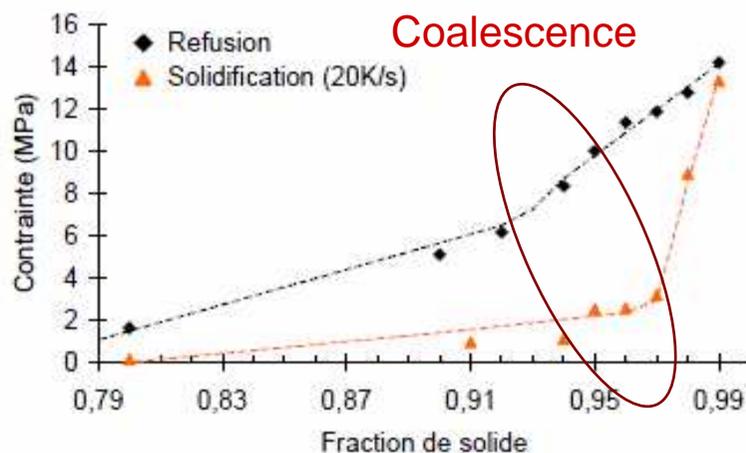
Courbes typiques contrainte-déplacement (alliage 6061) à différentes fractions de solide : (a) Refusion ; (b) Solidification

Alliage moins résistant en solidification qu'en refusion à fraction de solide égale (sauf lorsque f_{solide} tend vers 1) : conséquence du chemin thermique suivi sur la microstructure.

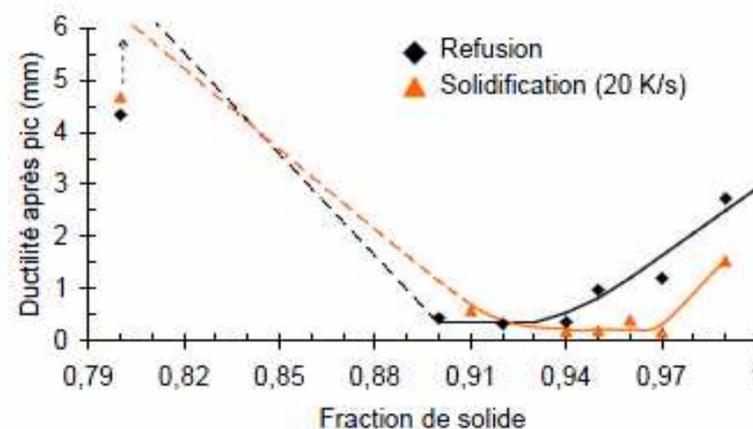
En solidification, quantité plus importante de liquide sous forme de films liquides intergranulaires
→ **Structure moins résistante**

2.2 – Essais de traction à chaud : résultats

► Résultats : alliage 6061



Contrainte au pic en fonction de la fraction de solide en refusion et en solidification



Ductilité après pic en fonction de la fraction de solide en refusion et en solidification

Contrainte au pic :

- Observation d'un changement de pente qui marque la fraction de solide de coalescence (formations de ponts solides interdendritiques renforçant fortement le réseau semi solide)

Ductilité après pic :

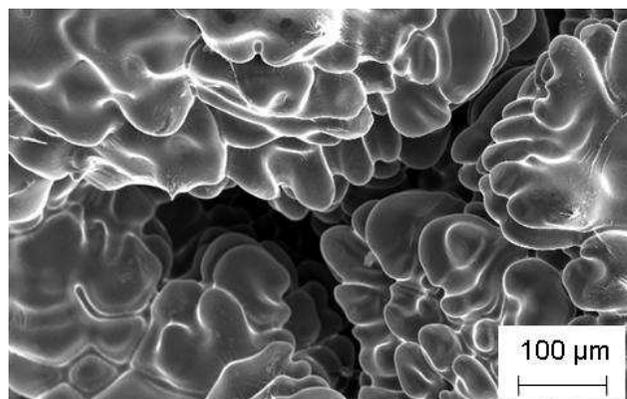
- Chute de ductilité de l'alliage aux alentours de $f_s = 0.93$: zone la plus sensible à la fissuration.

2.2 – Essais de traction à chaud : résultats

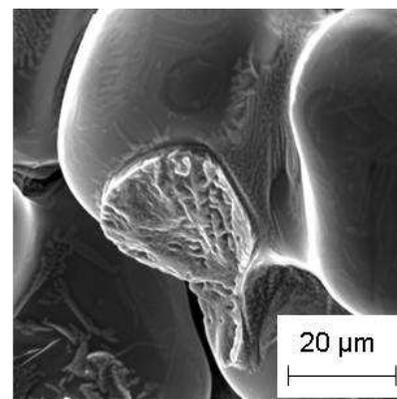
◆ Résultats : alliages Al-Cu

- ◆ Images MEB obtenues suite à des essais de traction à différentes fractions de solide, au dessous et au dessus de la fraction de coalescence ($f_s \sim 0.95$: formation de ponts solides)

$F_s = 0.90$



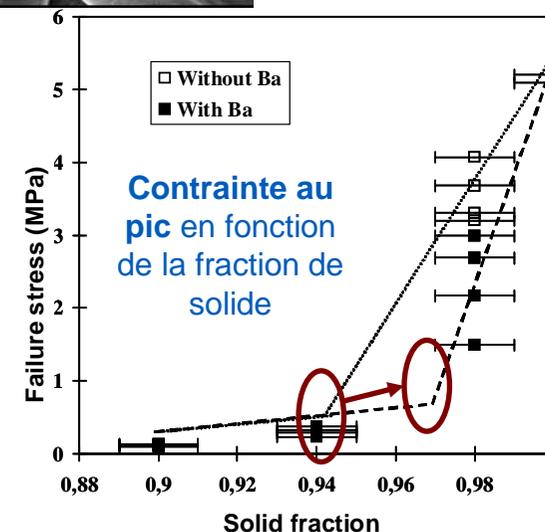
$F_s = 0.98$



Influence de la répartition du liquide sur la coalescence (et donc la zone sensible à la FAC) :

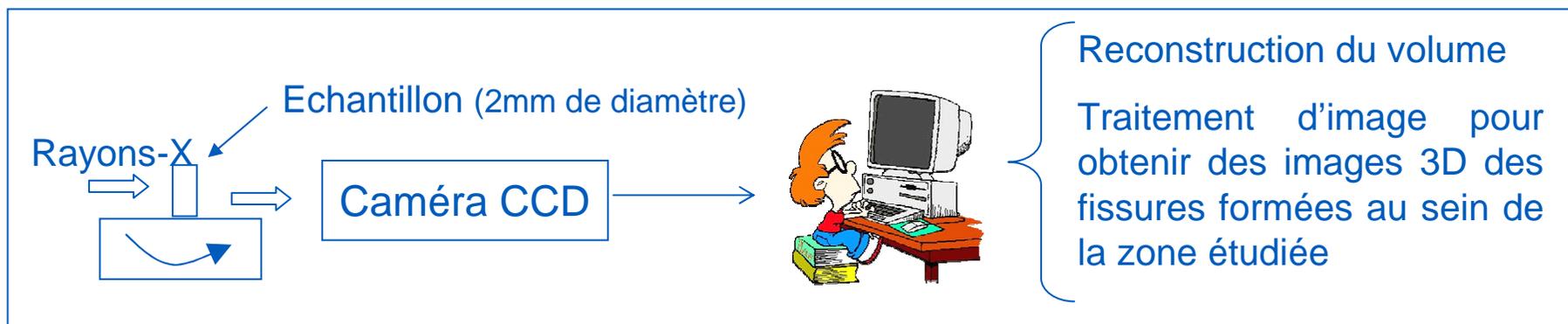
- ajout de Ba dans des Al-Cu : diminue l'énergie d'interface solide-liquide → favorise la présence de films liquides mouillants les joints de grains.

→ Décalage de la fraction de coalescence vers des fractions de solide plus élevées (persistance de films liquides)



A. Fallet, G. Chichignoud, C.L. Martin, M. Suéry, Ph. Jarry
Mater. Sci. Eng. A 426 (2006) 187–193

3 – Tomographie X



◆ 1. Études post-mortem réalisées à l'INSA de Lyon

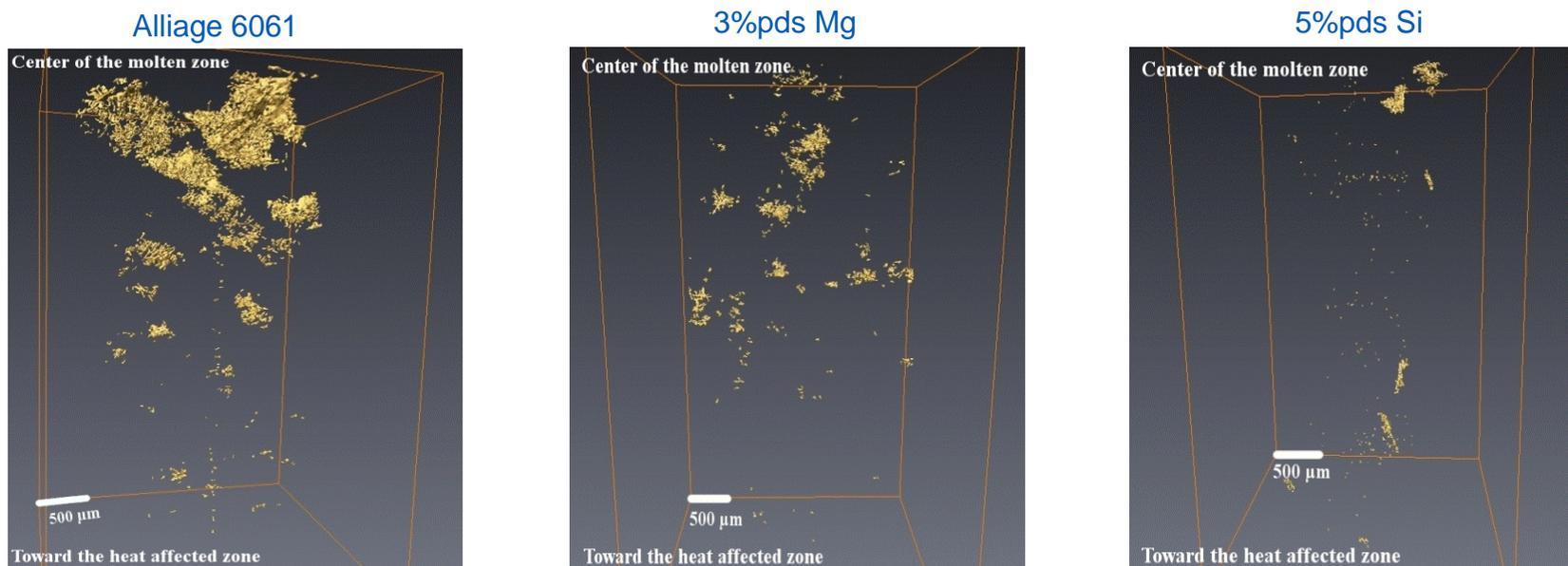
- ◆ **Solidification contrariée** (étude du nombre/tailles de fissures dans le volume : influence des différents éléments..)

◆ 2. Études in-situ réalisées à l'ESRF, Grenoble (source rayons X)

- ◆ **Résolution spatiale** : 1 μ m, **résolution temporelle** : 20s/scan (actuellement 1s/scan)
- ◆ **Essais de traction** : isotherme, en solidification (anisotheurme) → meilleure compréhension des mécanismes menant à la fissuration à chaud, répartition des phases solide/liquide, porosités, fissures etc...

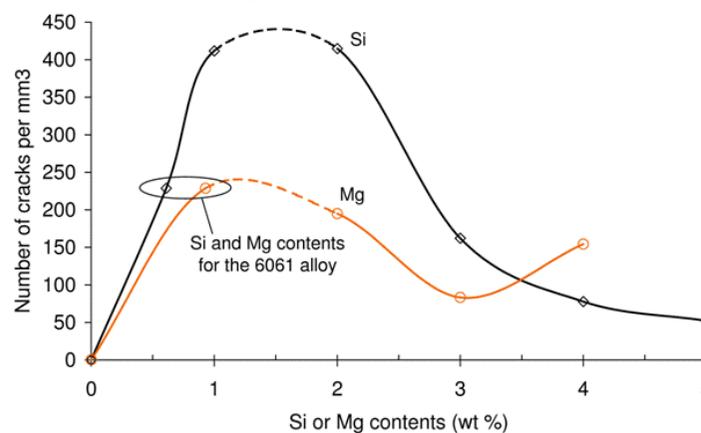
3.1 – Tomographie X : post mortem

► Solidification contrariée : alliages Al-Mg-Si



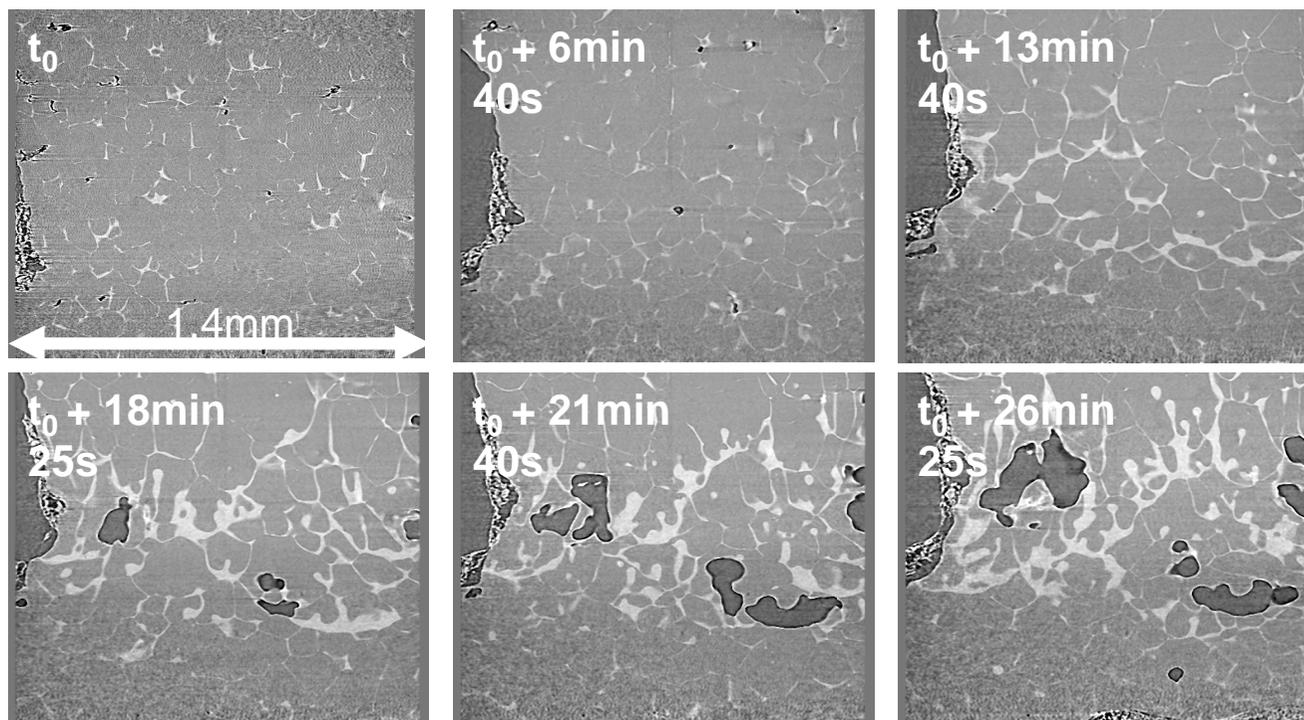
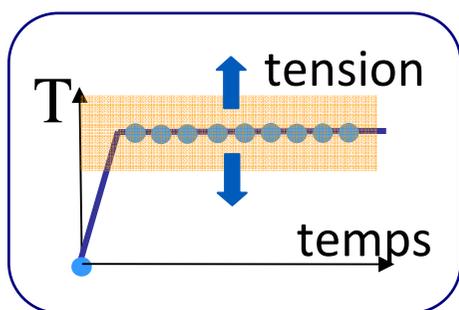
Représentations 3D de la zone fondue pour différents alliages d'aluminium

► Évolution du nombre de fissures apparaissant en solidification contrariée pour différentes nuances d'alliages



3.2 – Tomographie X : in-situ en cours de déformation

► **Al – 8%pds Cu** : essai de traction isotherme



M. Suéry, J. Adrien, C. Landron, S. Terzi, E. Maire,
L. Salvo, J.-J. Blandin, Int. J. Mat. Res., 101 (2010) 1080-1088

► Enrichissement de liquide aux joints de grains, développement de cavités dans les films liquides

4 – Conclusion et perspectives

- ◆ **Une approche complète de la modélisation de FAC implique la connaissance des mécanismes mis en œuvre et de la rhéologie de l'alliage dans les gammes de températures où s'amorce la fissure.**

- ◆ **Essais de traction à chaud :**
 - ◆ Mise en évidence de la fraction de solide de coalescence
 - ◆ Chute de ductilité : domaine d'apparition de la fissure

- ◆ **Tomographie X (INSA Lyon) :**
 - ◆ Influence des différents éléments : nombre et taille des microfissures formées

- ◆ **Tomographie X in-situ (ESRF Grenoble) :**
 - ◆ Observation « directe » de la formation des fissures, mécanismes mis en jeu (accumulation de liquide aux joints de grains etc...)

- ◆ **Perspectives :**
 - ◆ Mise en application des méthodes développées sur l'Inconel 600 : caractérisations mécaniques en zone de transition pâteuse. Difficultés : température de fusion plus élevée, métal plus absorbant aux rayons X...

Questions

Merci de votre attention