

Corrélation entre la forme d'inclusions intergranulaires et l'énergie de joints de grains dans un alliage Cu-1Pb

D. Scherer, V. Laporte, F. Diologent, A. Mortensen

Laboratoire de Métallurgie Mécanique, EPFL

M. Dadras, M. Leboeuf

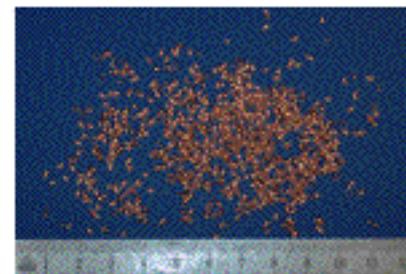
Service for Microscopy and Nanoscopy, UNI Neuchâtel

Introduction

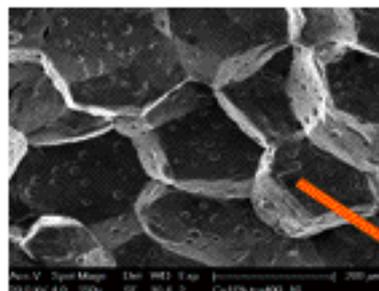
Contexte industriel :
ajout du Pb aux alliages
➔ amélioration de l'usinabilité



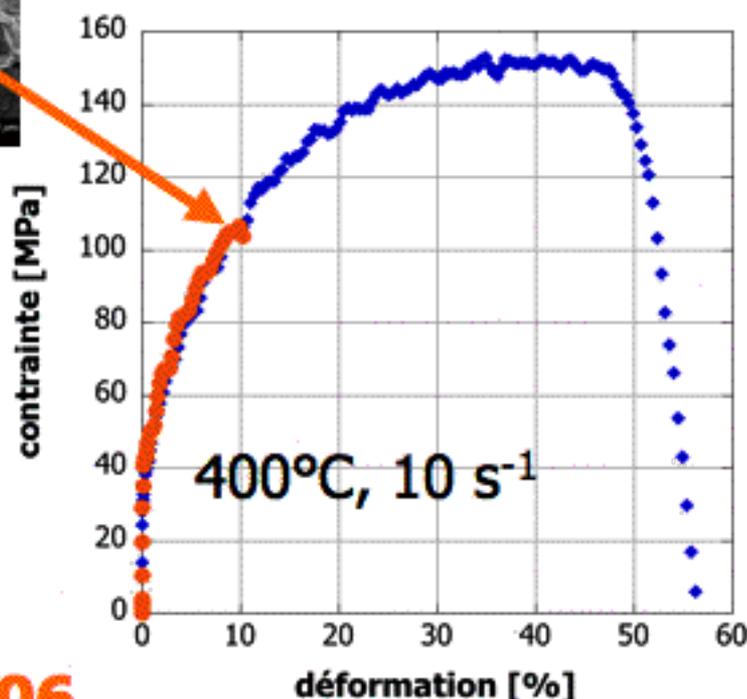
copeaux de Cu-OFHC



copeaux de Cu-1Pb



surface de rupture de
Cu-1Pb
(L. Felberbaum)



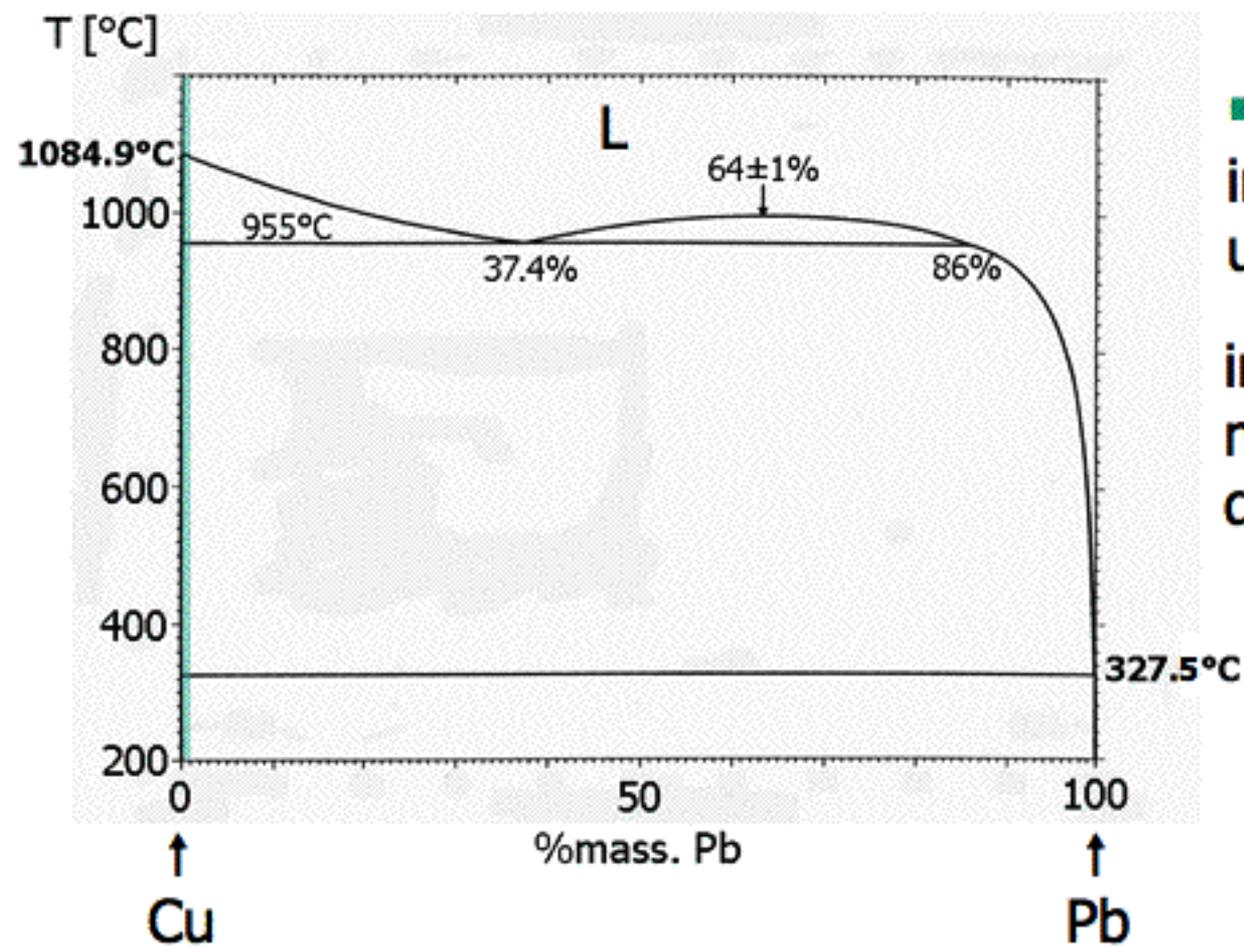
Autre effet du Pb ajouté:

sévère fragilisation du
matériau aux
températures élevées

➔ rupture le long des
joints de grains

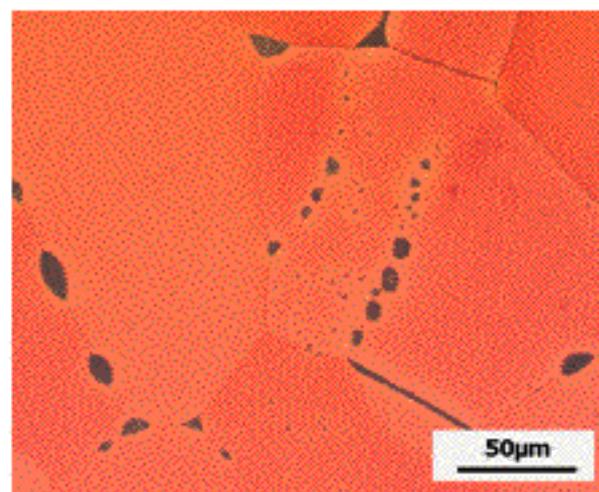
Systeme Cu-Pb

solubilité du Pb dans le Cu presque nulle



➔ microstructure:
inclusions de Pb dans
une matrice de Cu

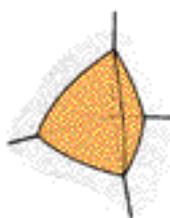
inclusions dans les grains,
mais majorité aux joints
de grains



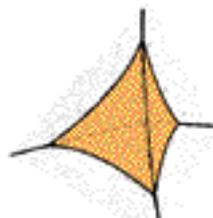
Formes d'inclusions

Inclusions aux joints de grains:
forme selon leur fraction volumique V_β et leur angle dièdre ϕ

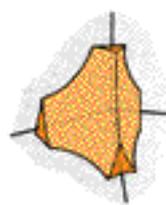
4 grains:



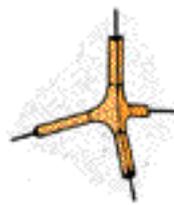
$\phi > 73.53^\circ$



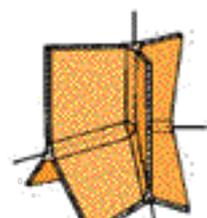
$73.53^\circ > \phi > 60^\circ$



$\phi < 60^\circ$



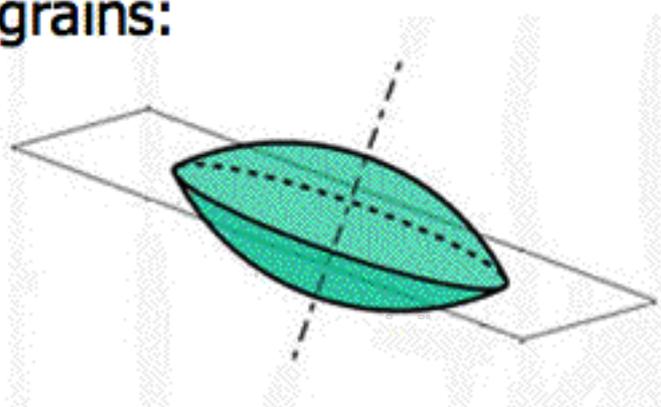
$\phi < 60^\circ$
petite V_β



$\phi = 0^\circ$

Wray, Acta Met. 24, 1976

2 grains:



deux cas extrêmes:

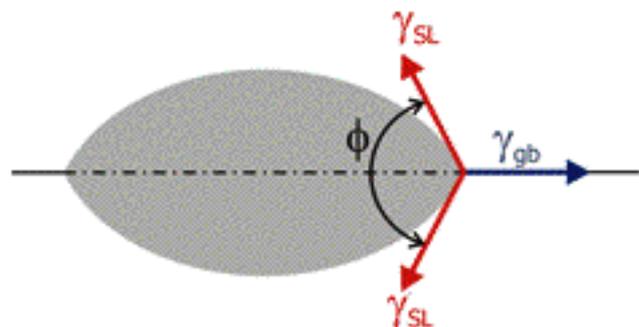
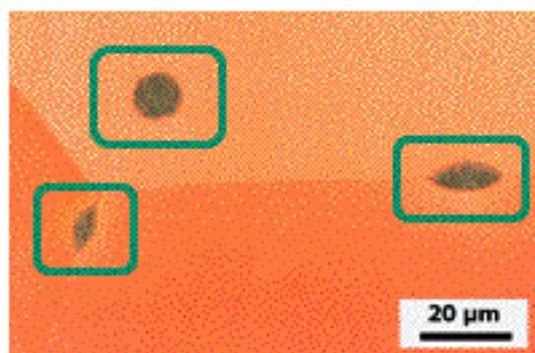
$\phi = 180^\circ$

➔ sphère

$\phi = 0^\circ$

➔ mouillage

Equilibre d'un inclusion intergranulaire



inclusion intragranulaire: sphère

➔ énergie de l'interface solide/liquide γ_{SL} est isotrope

inclusion intergranulaire: lentille

➔ ϕ peut être calculé par le rapport des énergies γ_{SL} et γ_{gb} (énergie de joints de grains)

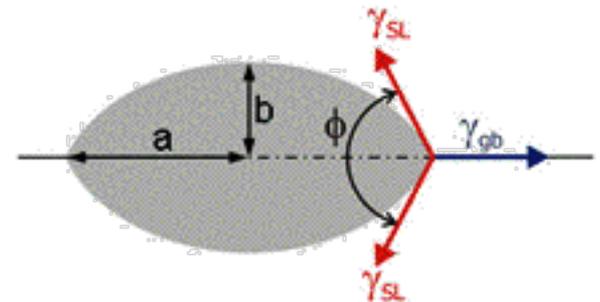
$$\cos \frac{\phi}{2} = \frac{\gamma_{gb}}{2\gamma_{SL}}$$

relation directe entre ϕ et l'énergie de joints de grains

Mesures pour l'angle dièdre

mesure "classique" pour ϕ :
coupe métallographique et mesure de
l'épaisseur et de la largeur des
inclusions à la surface - 2D

$$\cos \frac{\phi}{2} = \frac{a^2 + b^2}{a^2 - b^2}$$



désavantage: coupe aléatoire

- ➔ grande nombre des valeurs nécessaire
- ➔ traitement statistique ➔ valeur unique "moyenne" pour ϕ vrai

mesures en 3D:

sillons aux joints de grains, TEM pour petites inclusions

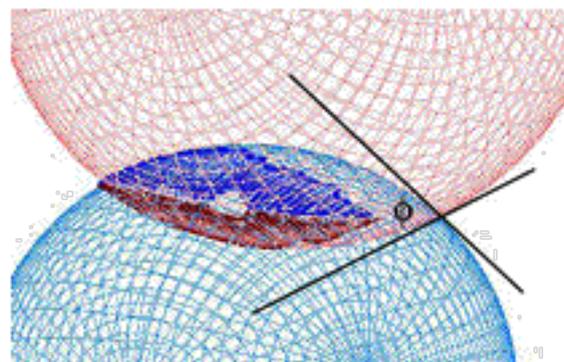
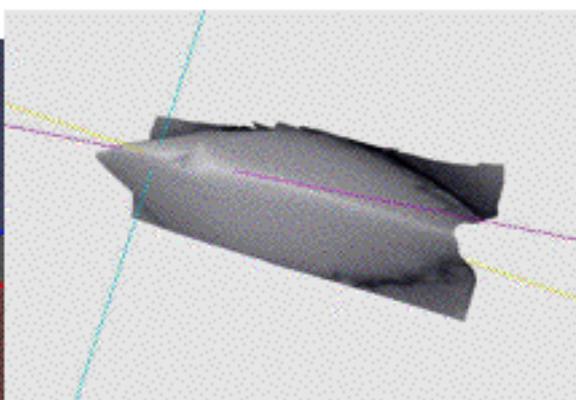
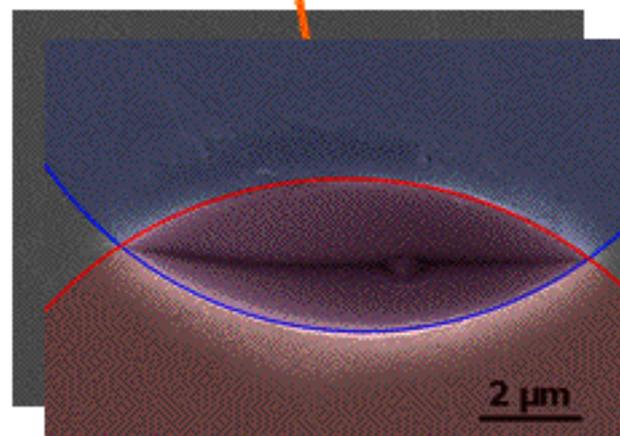
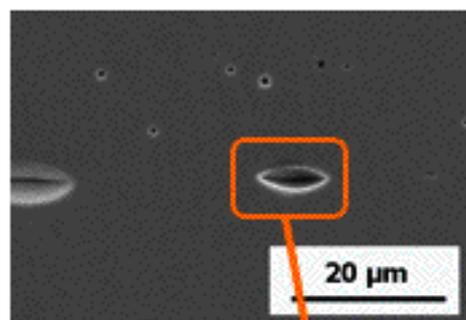
➔ **nouvelle méthode**

Préparation

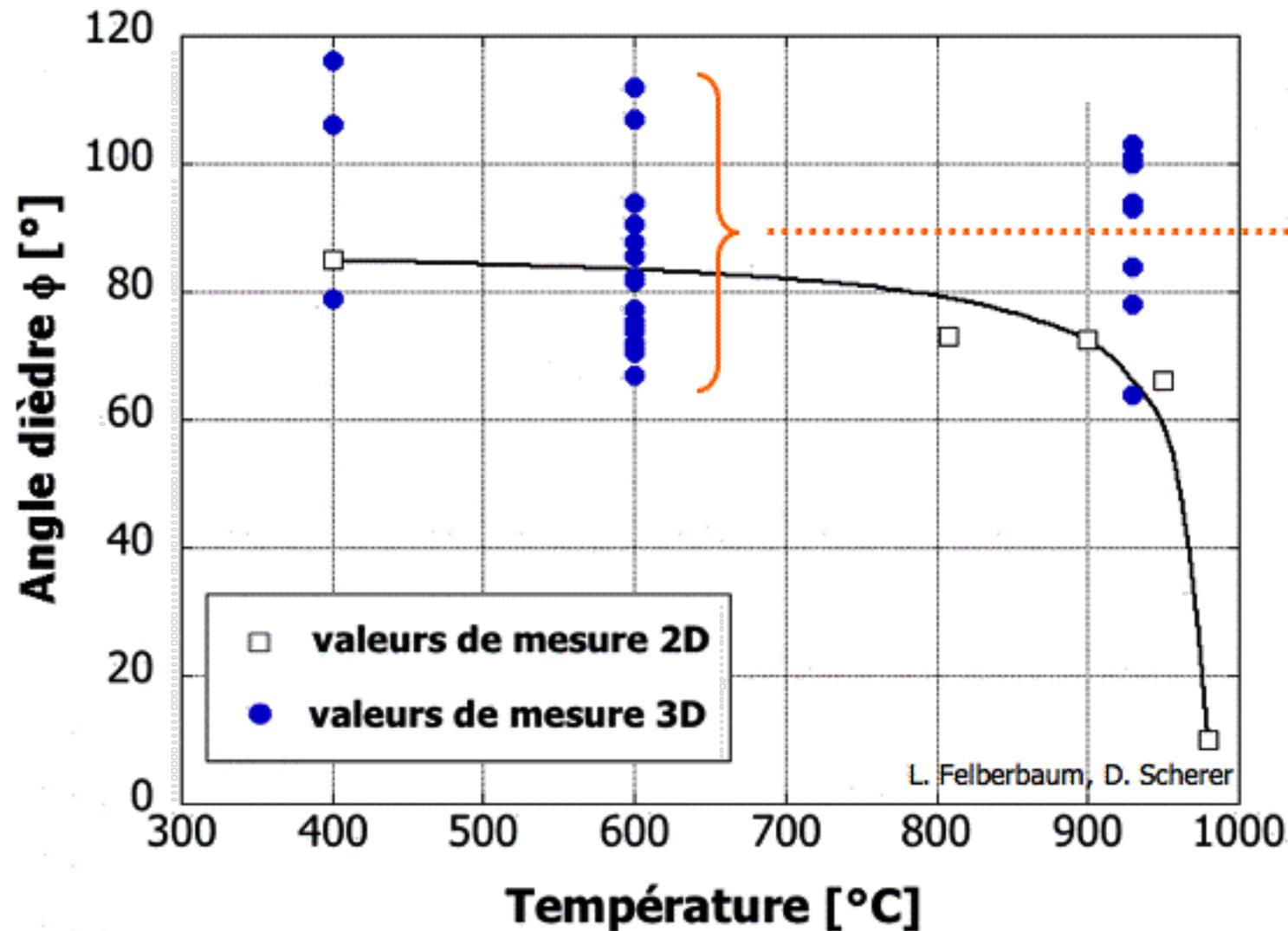
- ☞ coulée du Cu-1Pb sous Argon
- ☞ traitement thermique → équilibre thermomécanique
- ☞ coupe métallographique, polissage jusqu'à $1\mu\text{m}$
- ☞ dissolution partielle du Pb par acide acétique
- ☞ reconstruction 3D

Méthode de reconstruction

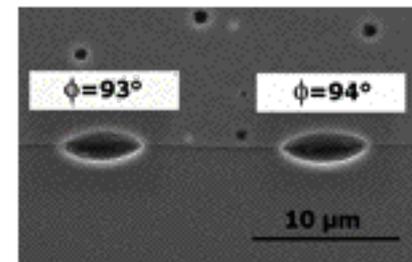
- sélectionner des inclusions appropriées à la reconstruction
- prendre une paire stéréographique d'images de l'inclusion en question au MEB
- reconstruction 3D (logiciel MeX 4.1)
- approximation des points obtenus à deux sphères
- contrôle du résultat avec l'inclusion vraie



Résultats pour l'angle dièdre



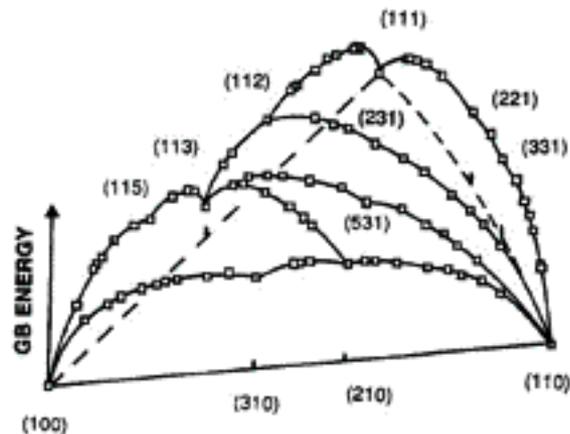
15 valeurs
 $\phi_{\min} = 67^\circ$
 $\phi_{\max} = 112^\circ$
 $\phi_{\text{médian}} = 82^\circ$



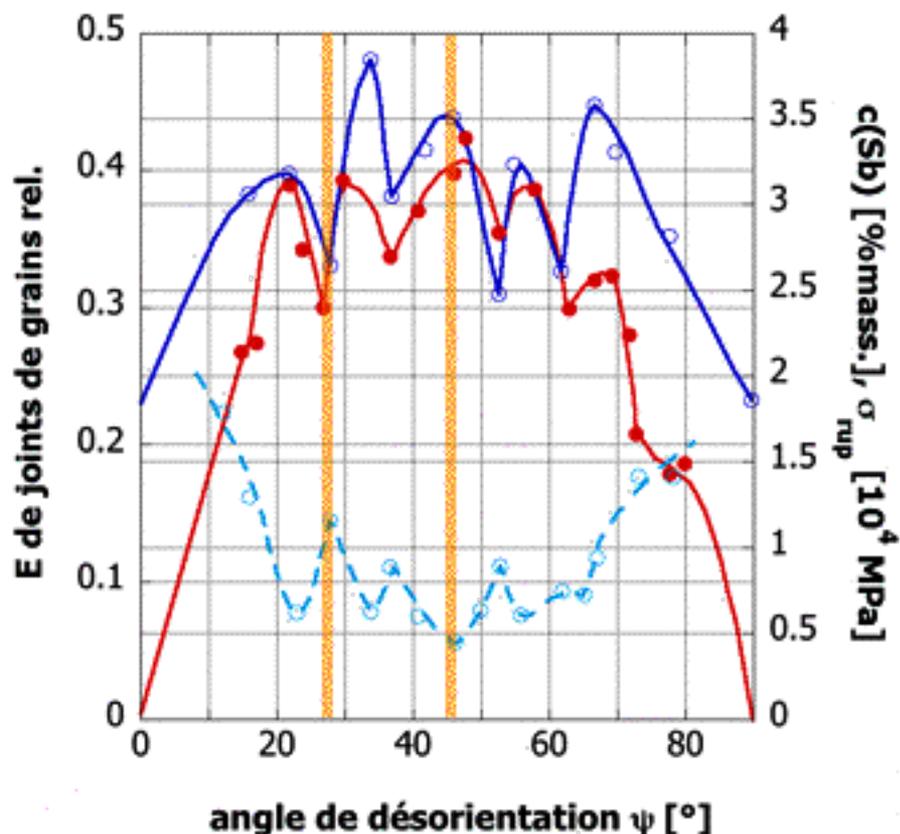
$$\cos \frac{\phi}{2} = \frac{\gamma_{gb}}{2\gamma_{SL}}$$

Discussion

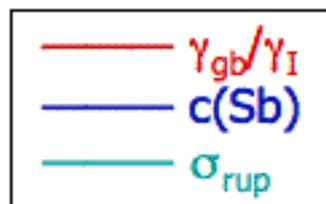
$$\Delta\phi \Leftrightarrow \Delta\gamma_{gb} \Leftrightarrow \text{désorientation } \Delta\psi$$



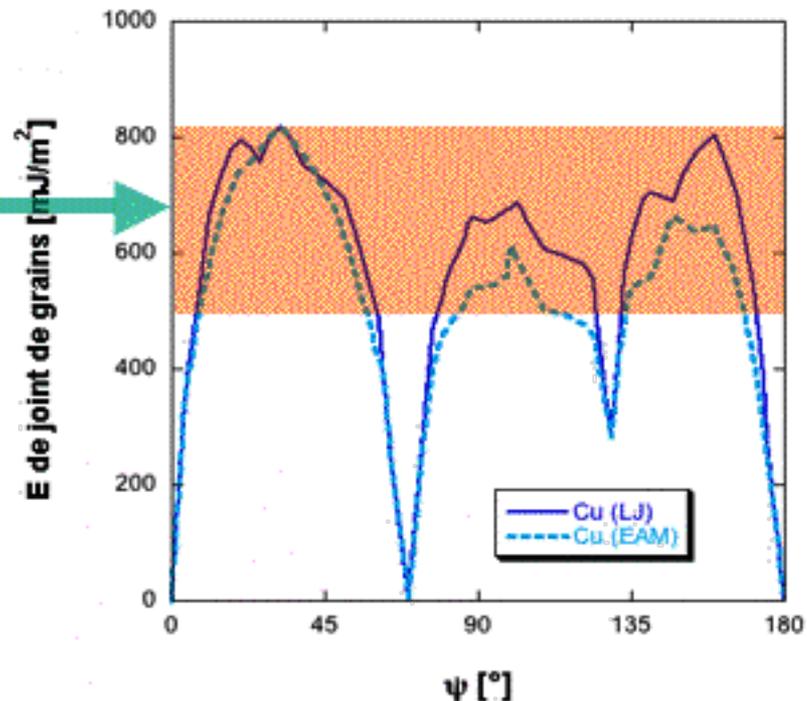
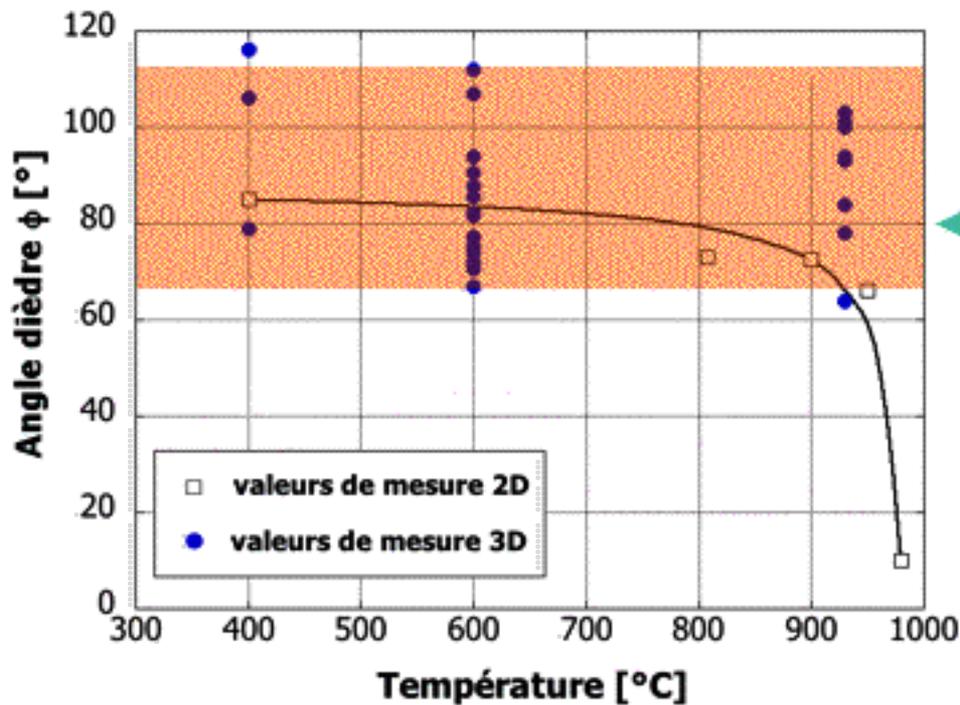
Surface de l'énergie pour joints de grains de flexion symétrique [Wolf, Acta met. mat. 38, 1990]



Energie de joints de grains relative, quantité de Sb ségrégué et contrainte de rupture versus désorientation [Monzen, Mat. Sci. Eng. 387-389A, 2004]



Discussion



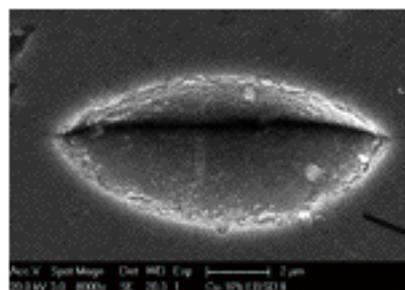
Energies des joints de grains de flexion symétrique autour de la direction [011]. [Wolf, Acta met. mat. 38, 1990]

$$\frac{\cos \frac{\phi_{\max}}{2}}{\cos \frac{\phi_{\min}}{2}} \approx 0.65 \equiv \frac{\gamma_{gb \min}}{\gamma_{gb \max}}$$

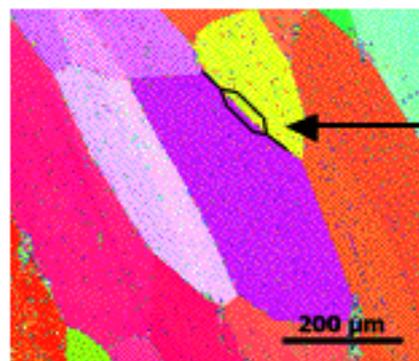
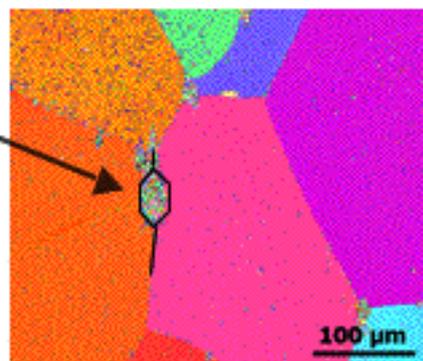
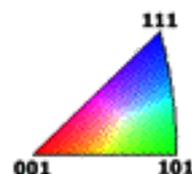
EBSD

définition des joints de grains par 5 degrés de liberté
"interface plane scheme": $GB=(N_1, N_2, \theta)$

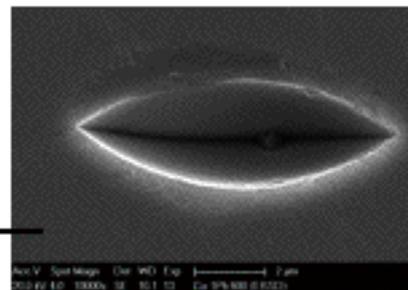
$$\phi_1 = 112^\circ$$



$$N_1 = [9 \ 4 \ 2]$$
$$N_2 = [7 \ 2 \ 1]$$
$$\theta = 6^\circ$$



$$\phi_2 = 72^\circ$$



$$N_1 = [21 \ 20 \ 5]$$
$$N_2 = [18 \ 17 \ 2]$$
$$\theta = 69^\circ$$

Joint de grains générale → Energie de joints de grains:
Modèles?

par ex. Wynblatt et Takashima (Interface Sci. 9, 2001)

Résumé

- ➔ nouvelle méthode pour mesurer l'angle dièdre vrai des inclusions intergranulaires
- ➔ relation entre l'angle dièdre et l'énergie de joint de grains
- ➔ nécessité d'un modèle simple pour estimer γ_{gb}
- ➔ mesures additionnelles en cours...

Merci!