

Modélisation du comportement mécanique après un transitoire thermique : application au cas de l'alliage à durcissement structural Inconel 718 pour le soudage TIG

Alexandre BALAN
(chaire Areva-Safran-INSA Lyon)

14^{ème} Colloque SNS - 17/03/2016

Encadrants :

Daniel NELIAS¹, Michel PEREZ², Thibaut CHAISE¹, Sophie CAZOTTES²
Fabien CORPACE³, François PICHOT³

¹ Université de Lyon, INSA-Lyon, LaMCoS UMR CNRS 5259, 69621 Villeurbanne, France

² Université de Lyon, INSA-Lyon, MATEIS UMR CNRS 5510, 69621 Villeurbanne, France

³ SNECMA SAFRAN-GROUP, Evry-Corbeil plant, 91003 Evry France

Contexte et problématique

Contexte

- Thèse au sein d'une chaire AREVA – SAFRAN – INSA de Lyon
- Objectif industriel commun : amélioration de la prédiction de la durée de vie des composants
- Aéronautique et nucléaire, besoin de matériaux spécifiques pour les zones critiques :
 - Résistance à la corrosion
 - Excellentes propriétés mécaniques à haute température (600-650°C)
 - Prix raisonnable

Choix de l'Inconel 718

Contexte et problématique

Problématique

- Quels sont les effets des procédés de soudage sur la microstructure du matériau au niveau de la ZAT ? (application au cas du soudage TIG)
- Quelles sont les conséquences de cette évolution microstructurale sur les propriétés mécaniques → tenue en service ?

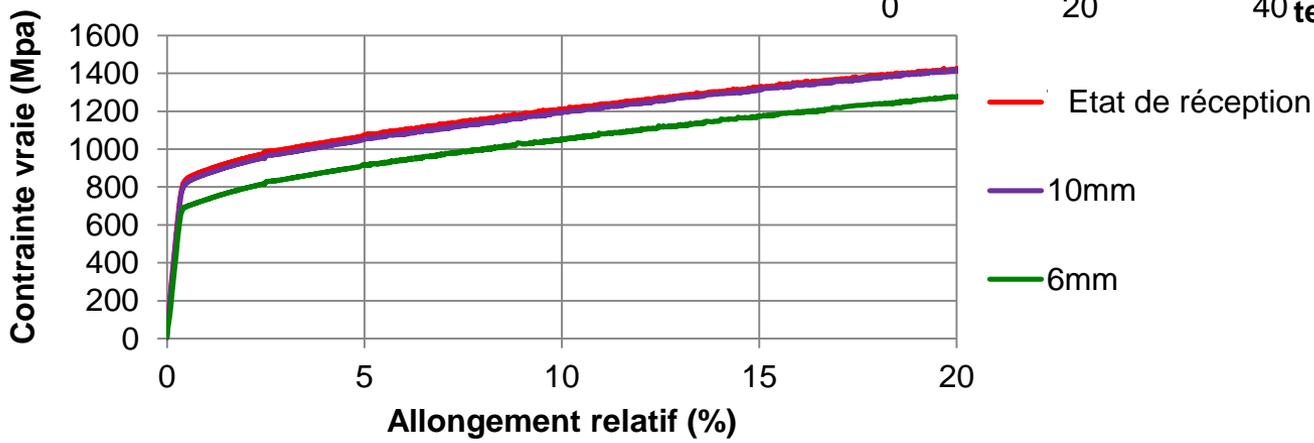
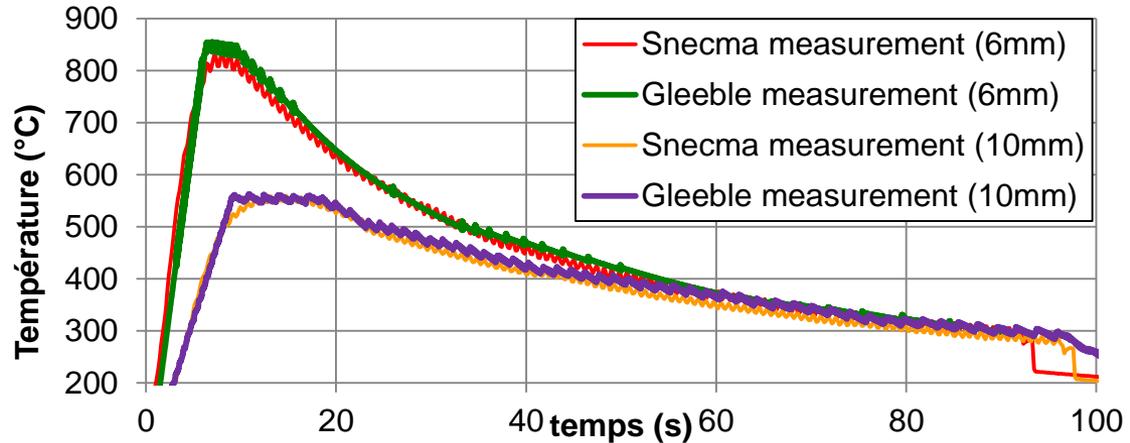
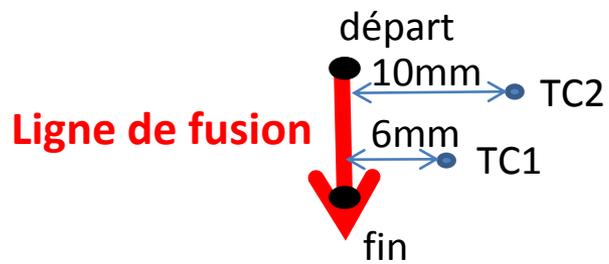
→ Etablir un lien entre :

- Traitements thermomécaniques type soudage
- Evolution microstructurale
- Propriétés mécaniques qui en résultent

Contexte et problématique

Problématique

- Effets des procédés de soudage sur les propriétés mécaniques du matériau au niveau de la ZAT ?



Sommaire

- Matériau étudié
 - Généralité
 - Précipitation de phases intermétalliques
- Modélisation de la précipitation de γ''
 - Présentation du logiciel PreciSo
 - Résultats de simulation VS expérimental
- Modélisation de la limite d'élasticité précipitation-dépendante
 - Présentation du modèle
 - Résultats de simulation VS expérimental
- Conclusion et suite des travaux

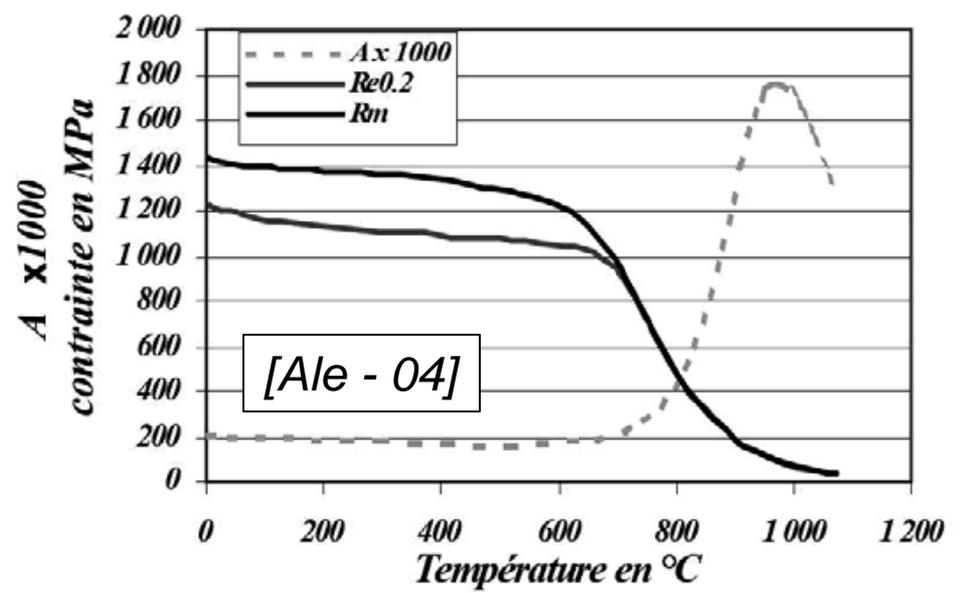
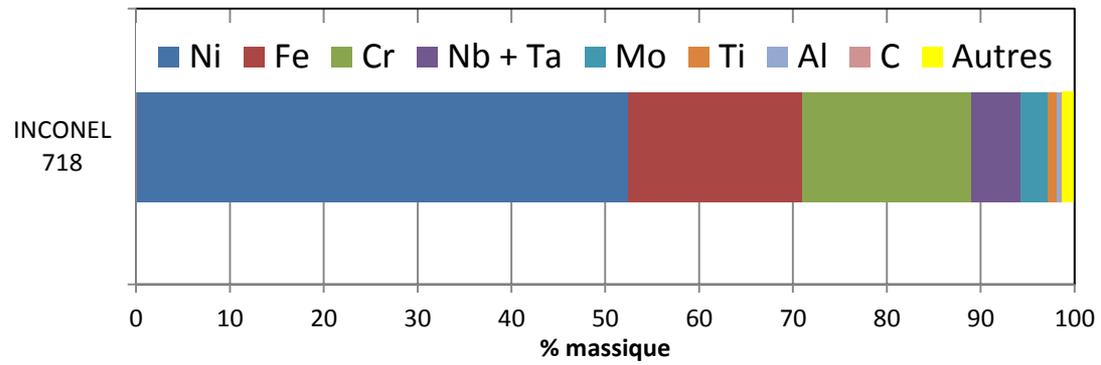
Sommaire

- Matériau étudié
 - Généralité
 - Précipitation de phases intermétalliques
- Modélisation de la précipitation de γ''
 - Présentation du logiciel PreciSo
 - Résultats de simulation VS expérimental
- Modélisation de la limite d'élasticité précipitation-dépendante
 - Présentation du modèle
 - Résultats de simulation VS expérimental
- Conclusion et suite des travaux



Matériau étudié : généralités

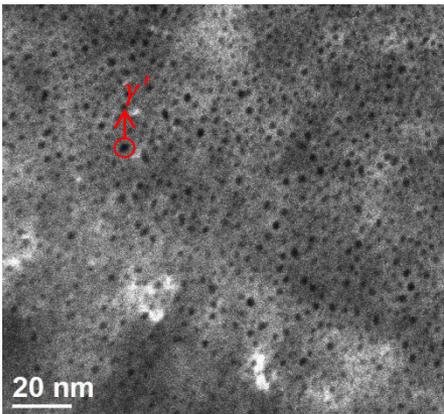
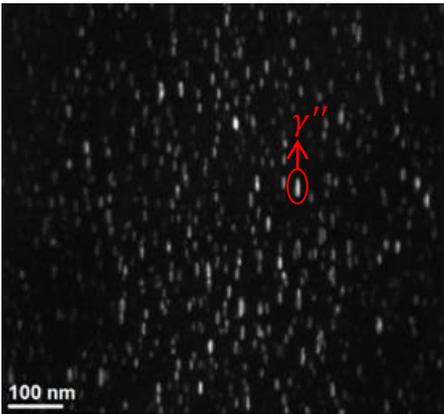
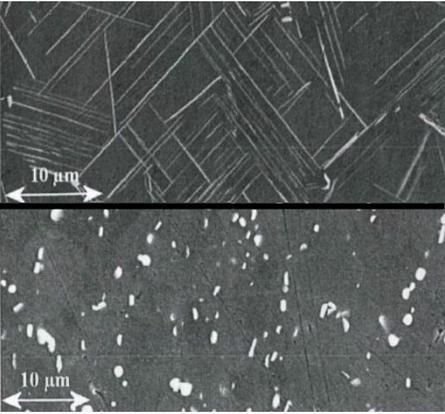
- Inconel 718 : superalliage base Nickel
- Représente 70 wt% de la consommation en superalliage dans le monde
- Composition complexe [Sneema]
- Conservation à haute T de ses prop méca [Ale-04]





Matériau étudié : précipitation de phase intermétalliques

- Propriétés mécaniques pilotées par la microstructure (μ) :
 - Taille de grain
 - Précipitation de phases intermétalliques au sein d'une matrice γ :

| | $\gamma : Ni$ | $\gamma' : Ni_3(Ti, Al)$ | $\gamma'' : Ni_3Nb$ | $\delta : Ni_3Nb$ |
|---------------------------------|--|---|--|-------------------|
| | | Durcissante | Durcissante | Non durcissante |
| Solution solide de substitution |  |  |  | |
| | Précipités sphériques | Précipités disques | Précipités sphériques ou plaquettes | |

Matériau étudié

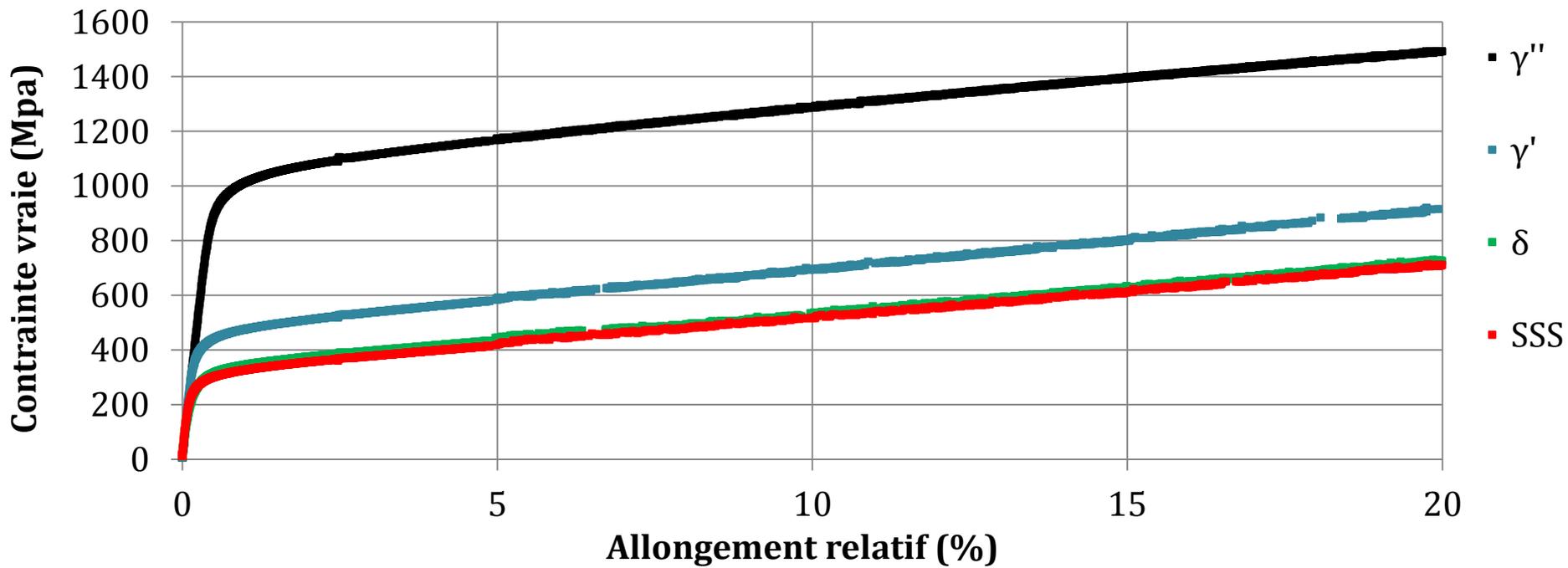
Modélisation de γ''

Modélisation σ_y

Conclusion

Matériau étudié : précipitation de phase intermétalliques

- Précipitation de la phase γ'' prédominante dans le durcissement structural :



- Essais de traction sur machine Schenck hydraulique à $\dot{\epsilon} = 10^{-4} s^{-1}$ (taille de grain constante)

Sommaire

- Matériau étudié
 - Généralité
 - Précipitation de phases intermétalliques
- Modélisation de la précipitation de γ''
 - Présentation du logiciel PreciSo
 - Résultats de simulation VS expérimental
- Modélisation de la limite d'élasticité précipitation-dépendante
 - Présentation du modèle
 - Résultats de simulation VS expérimental
- Conclusion et suite des travaux

Matériau étudié

Modélisation de γ''

Modélisation σ_y

Conclusion

Présentation du logiciel PreciSo

- PreciSo : logiciel de précipitation
 - Développement en C++ à l'INSA [Per-08]
 - Collaboration avec Cenaero et ESI pour implémentation dans Morfeo et Sysweld

- Modèle classique de germination et de croissance (modèle physique à base thermodynamique) :
 - Calcul du taux de germination $\frac{dN}{dt} = \beta^* N_0 Z \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{k_B T}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right]$
 - Vitesse de croissance (ou dissolution) $\frac{dr_p}{dt} = \frac{2q D}{\pi r_p} \frac{X_{Nb}^0 - X_{Nb}^i}{\alpha X_{Nb}^p - X_{Nb}^i}$
 - Quantité de soluté restant en solution solide (bilan de matière)

- Modèle à champ moyen: matrice de concentration unique $C(t)$, invariante dans l'espace

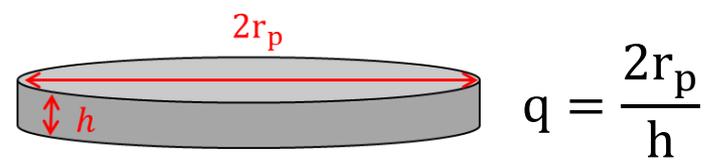




Présentation du logiciel PreciSo

- Modèle basé sur une compétition énergétique entre un terme volumique et un terme surfacique : $\Delta G = V_p \Delta g + S_p \Gamma$
- Energie de surface: paramètre de recalage du model (difficilement identifiable expérimentalement ([Dev-o8] a déterminé $\Gamma = 0,095 \pm 0,017 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$)
- Paramètre clé: produit de solubilité $\text{Log}(K_s) = -\frac{A}{T} + B$ (déterminé expérimentalement avec TT longs)
- Diffusion du Nb dans γ : données de la littérature

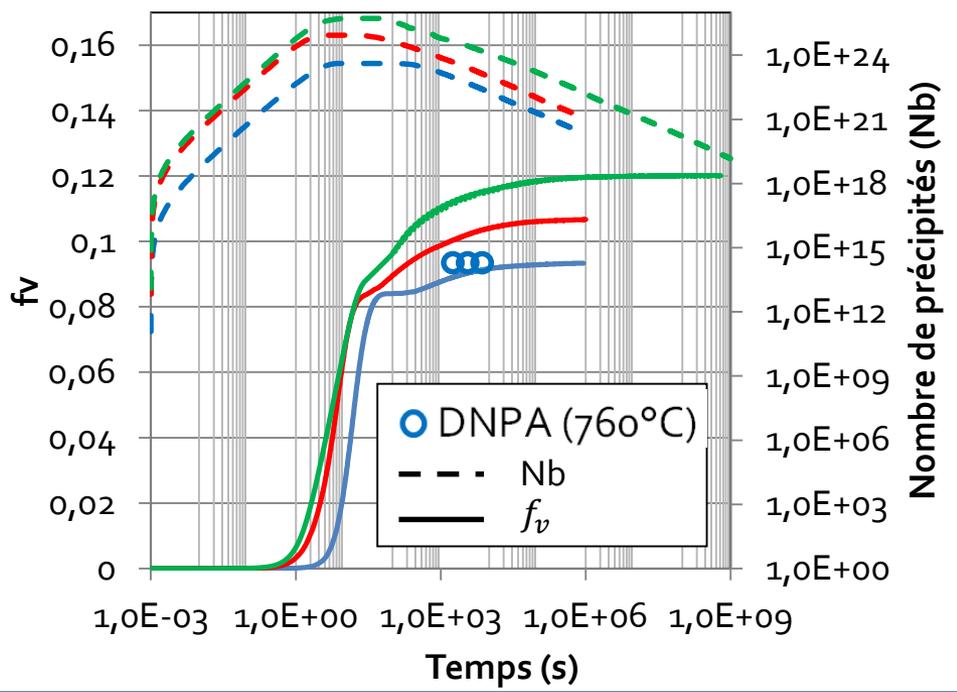
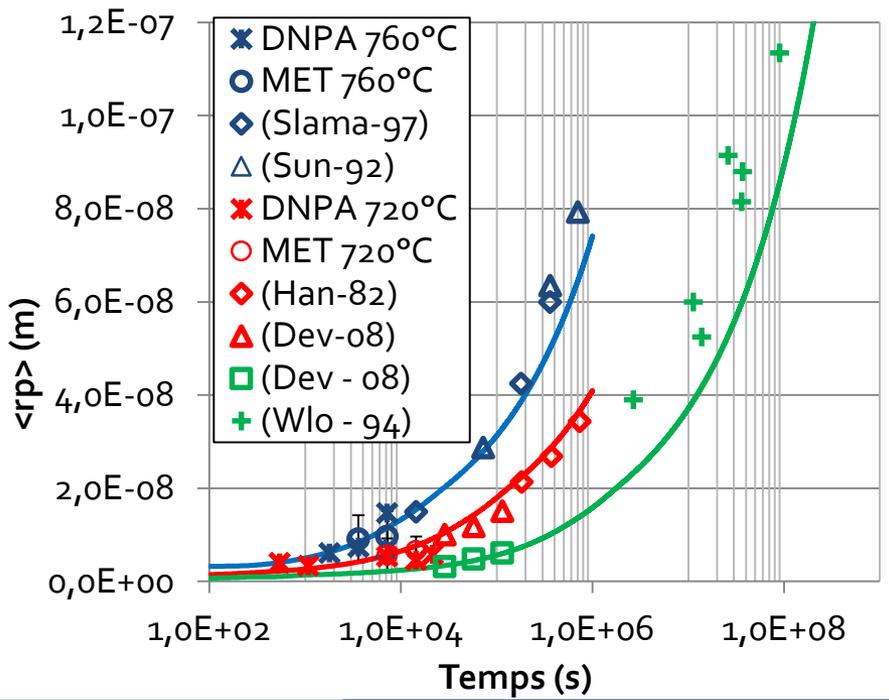
- Prise en compte de la forme des précipités





Résultats : confrontation simulation / données expérimentales

- Test de PreciSo pour différentes températures : 760°C, 720°C et 660°C
- Confrontation avec les données expérimentales (traitements isothermes)
- Validation des équations et des données d'entrée



Sommaire

- Matériau étudié
 - Généralité
 - Précipitation de phases intermétalliques
- Modélisation de la précipitation de γ''
 - Présentation du logiciel PreciSo
 - Résultats de simulation VS expérimental
- Modélisation de la limite d'élasticité précipitation-dépendante
 - Présentation du modèle
 - Résultats de simulation VS expérimental
- Conclusion et suite des travaux

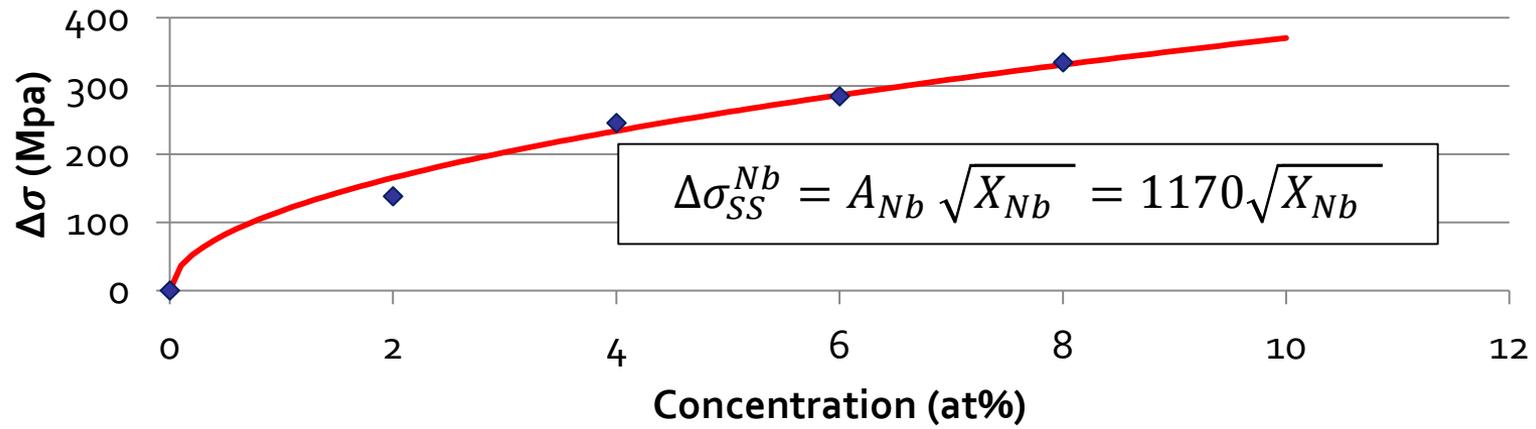


Présentation du modèle : limite d'élasticité précipitation dépendante

■ $\sigma_y = \sigma_0 + \Delta\sigma_{SS}^{Nb} + \Delta\sigma_p$ ---> Précipités (distribution de taille fournie par PreciSo)

Nb en solution solide

■ $\Delta\sigma_{SS}^{Nb}$:
[Mis-86]

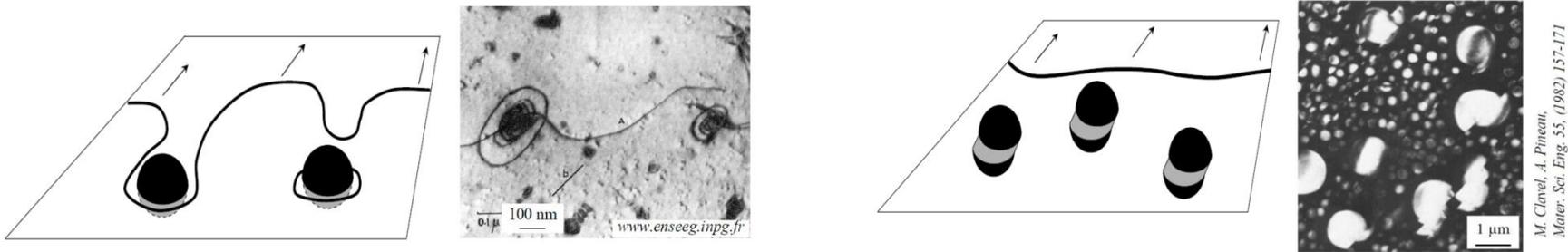


■ $\sigma_0 = \sigma_{PN} + \Delta\sigma_{d0} + \Delta\sigma_G + \Delta\sigma_{SS}^{others}$: Déterminé avec essai de traction (ech mis en solution)

Dislocations forêt Atomes en solution solide (sauf Nb)
Friction du réseau Grains

Présentation du modèle : limite élastique précipitation dépendante

- Précipités : Compétition entre phénomènes de contournement/cisaillement



- $$\Delta\sigma_p = \sqrt{\Delta\sigma_p^{sh2} + \Delta\sigma_p^{bp2}}$$
 avec
$$\Delta\sigma_p^{sh} = \frac{MF^{sh}}{bL^{sh}}$$
 et
$$\Delta\sigma_p^{bp} = \frac{MF^{bp}}{bL^{bp}}$$

- Distances calculées en utilisant les travaux [Esm-03], [Nie-96]

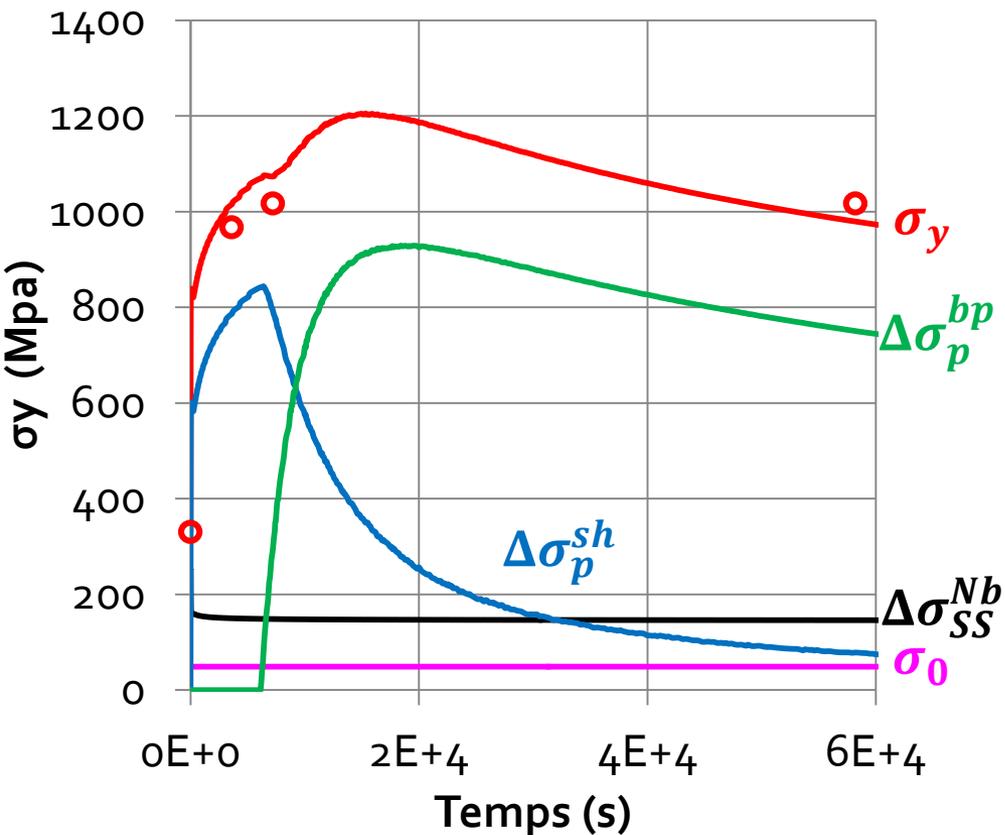
- $$F^{bp} = 2\beta Gb^2$$
 et
$$F^{sh} = kGb r_p$$
 avec
$$k = \frac{2\beta b}{r_c}$$
 avec r_c le rayon de transition

Paramètres à déterminer

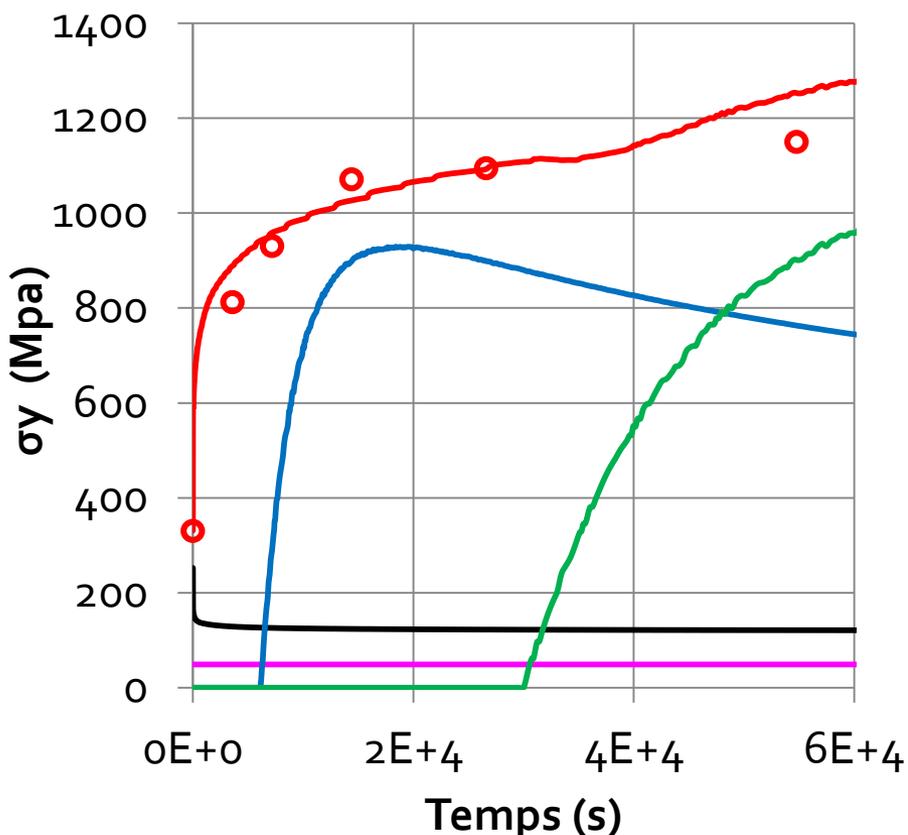


Résultats de simulation (TT isothermes)

760°C



720°C



Sommaire

- Matériau étudié
 - Généralité
 - Précipitation de phases intermétalliques
- Modélisation de la précipitation de γ''
 - Présentation du logiciel PreciSo
 - Résultats de simulation VS expérimental
- Modélisation de la limite d'élasticité précipitation-dépendante
 - Présentation du modèle
 - Résultats de simulation VS expérimental
- Conclusion et suite des travaux

Matériau étudié

Modélisation de γ''

Modélisation σ_y

Conclusion

Conclusion

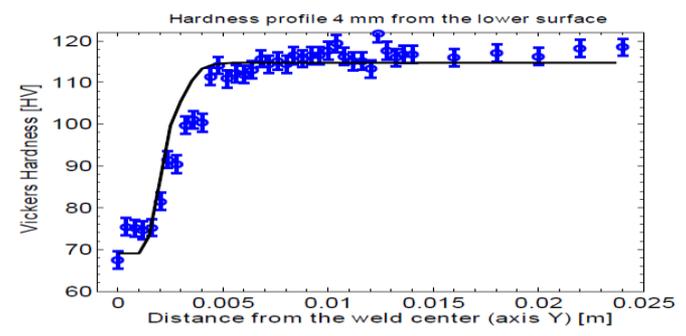
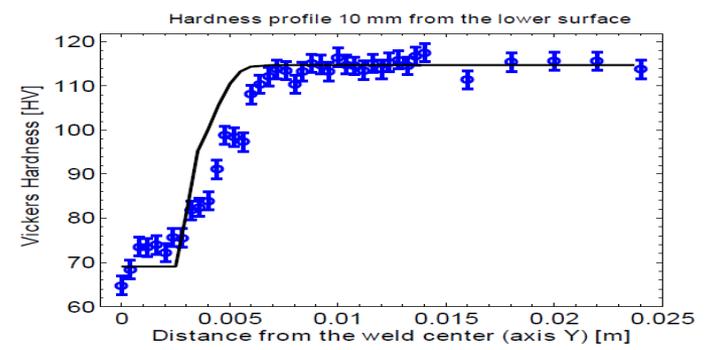
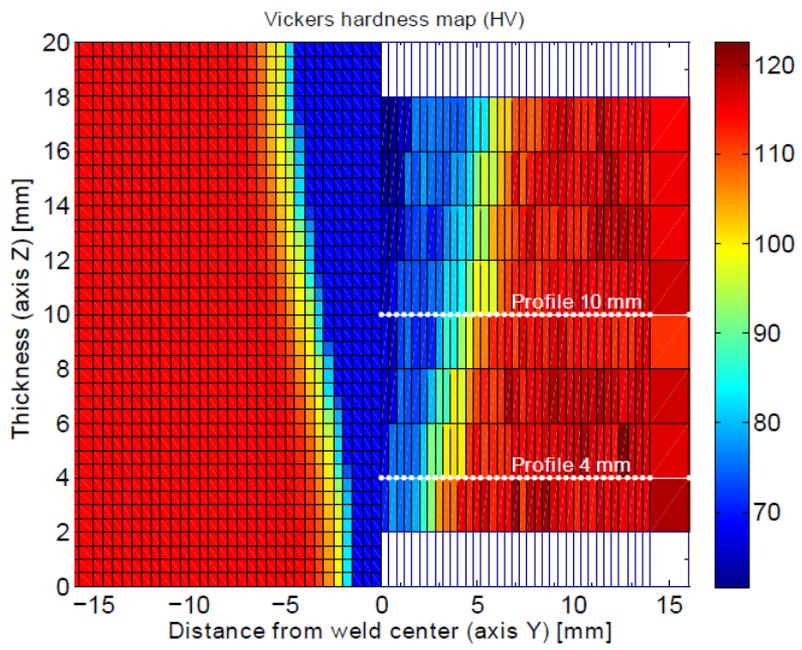
- **Caractérisation et modélisation de la précipitation** de γ'' à différentes températures : validation pour cette géométrie de précipités (plaquettes)
- Modèle de précipitation : seul paramètre ajustable énergie de surface Γ (en accord avec celui déterminé par [Dev – 08])
- **Modélisation de la limite d'élasticité** précipitation dépendante : prise en compte de toute la distribution simulée
- Détermination de la part de la limite élastique due au Nb en solution solide, aux précipités contournés et cisailés par les dislocations
- Seul paramètre ajustable: le rayon de transition r_c (proche de celui déterminé par [Chaturvedi-1987])





Perspectives

- Campagne DNPA : validation modèle précipitation + mécanique pour temps courts
- Prédiction de la limite élastique autour d'un cordon de soudure : travaux de Didier Bardel (6061-T6 weld joint)



Merci de votre attention

Références Bibliographiques

- [Ale-04] F. Alexandre (2004). Aspects probabilistes et microstructuraux de l'amorçage des fissures de fatigue dans l'alliage INCO 718. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
- [Cha-87]: Chaturvedi, M., & Han, Y. (1987). Effect of particle size on the creep rate of superalloy Inconel 718. *Material Science and Engineering*, 89, L7-L10.
- [Dev-08]: Devaux, A., Nazé, L., Molins, R., Pineau, A., Organista, A., Guédou, J., et al. (2008). Gamma double prime precipitation kinetic in Alloy 718. *Materials Science and Engineering(A 486)*, 117-122.
- [Esm-03]: Esmaeili, S., Lloyd, D., & Poole, W. (2003). A yield strength model for the Al-Mg-Si-Cu alloy AA6111. *Acta Materialia*, 51, 2243-2257.
- [Han-82]: Han, Y., Deb, P., & Chaturvedi, M. (1982). Coarsening behaviour of γ'' and γ' particles in Inconel alloy 718. *Metal Science*, 16, 555-561.
- [Mis-86]: Mishima, Y., Ochiai, S., Hamao, N., Yodogawa, M., & Suzuki, T. (1986). Solid Solution Hardening of Nickel - Role of Transmission Metal and B-subgroup Solutes -. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 27(9), 656-664.
- [Nie-96]: Nie, J., Muddle, B., & Polmear, I. (1996). The effect of precipitate shape and orientation on dispersion strengthening in high strength aluminium alloys. *Materials Science Forum*, 217-222, 1257-1262.

Références Bibliographiques

- [Per – 08]: Perez, M., Dumont, M., Acevedo-Reyes, D. (2008). Implementation of classical nucleation and growth theories for precipitation. *Acta Materialia*(56), 2119-2132.
- [Slama-97]: Slama, C., & Cizeron, G. (1997). Etude du comportement structural de l'alliage NC 19 Fe Nb (Inconel 718). *Journal de Physique III*, 665-688.
- [Sun-92]: Sundararaman, M., Mukhopadhyay, P., & Banerjee, S. (1992). Some Aspects of the Precipitation of Metastable Intermetallic Phases in Inconel 718. *Metallurgical Transactions*, 23A, 2015-2028.
- [Wlo-94]: Wlodek, S., & Fiedl, R. (1994). The effects of long time exposure on alloy 718. *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives* (pp. 659-670). E.A. Loria, The Minerals, Metals & Materials Society.