

Relation microstructure/propriétés mécaniques pour les alliages à durcissement structural suite à une opération de soudage ou de fabrication additive – cas d'un alliage Al-Mg-Si et d'un alliage à base Nickel

D. Nélias, T. Chaise, M. Perez, S. Cazottes, D. Bardel, A. Balan



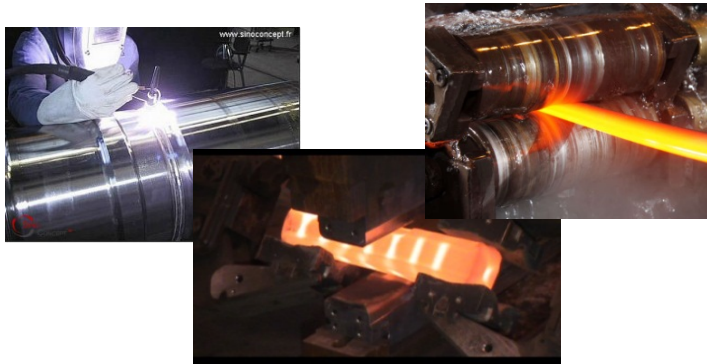
PLAN CAMPUS : L'INSA LYON INAUGURE SON PREMIER BÂTIMENT NEUF DU QUARTIER « INGÉNIERIE »

la recherche, dans un lieu unique et sur le campus de La Doua. Ce bâtiment n'aurait aussi probablement pas vu le jour sans la contribution décisive de Jean-François Jullien, professeur en Génie Civil, qui a travaillé sur plusieurs avant-projets d'implantation avant que celui-ci soit retenu. Le directeur actuel, Eric Maurincomme, a transformé les idées dessinées sur un coin de table en une construction sur 6 niveaux hébergeant aujourd'hui près de 200 chercheurs, personnels et doctorants. Enfin tous



Contexte

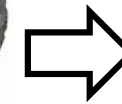
Procédés



Conditions d'utilisations



&



Durée de vie des
composants

Objectifs communs

 **SAFRAN**

INSA | INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
LYON

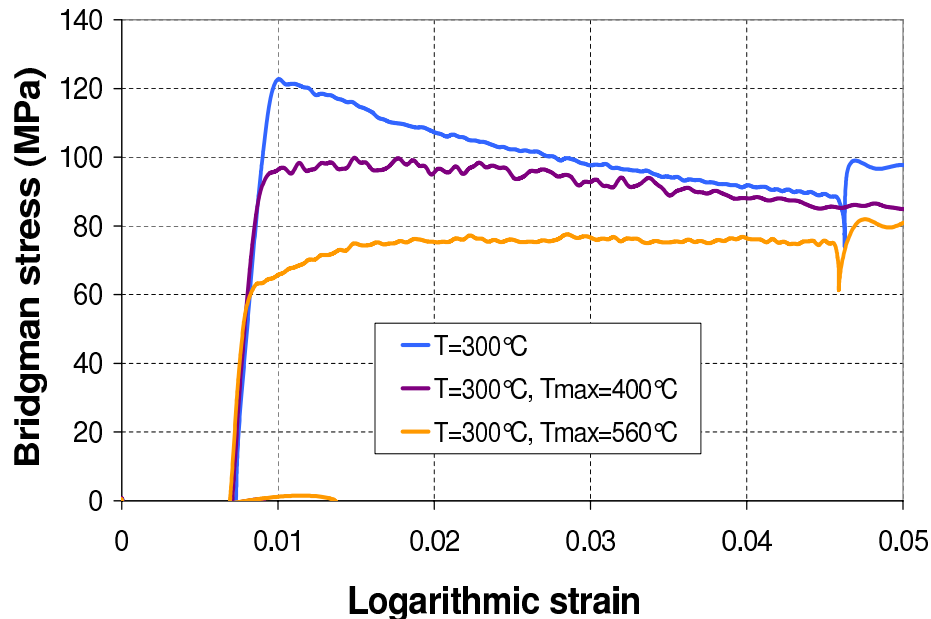

AREVA

Safran Aircraft Engines

Chaire industrielle

Enjeux scientifiques

i. Comment expliquer ce comportement ?



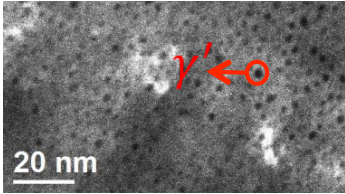
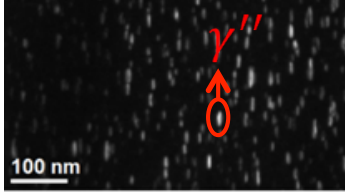
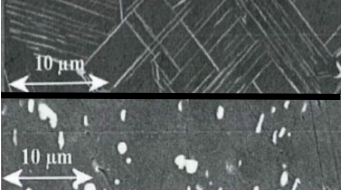
Courbe contrainte-déformation à 300°C pour un alliage d'aluminium 6061-T6 après différentes histoires thermiques (soit en partant de la température ambiante ou après un préchauffage à 400 ou à 560°C)

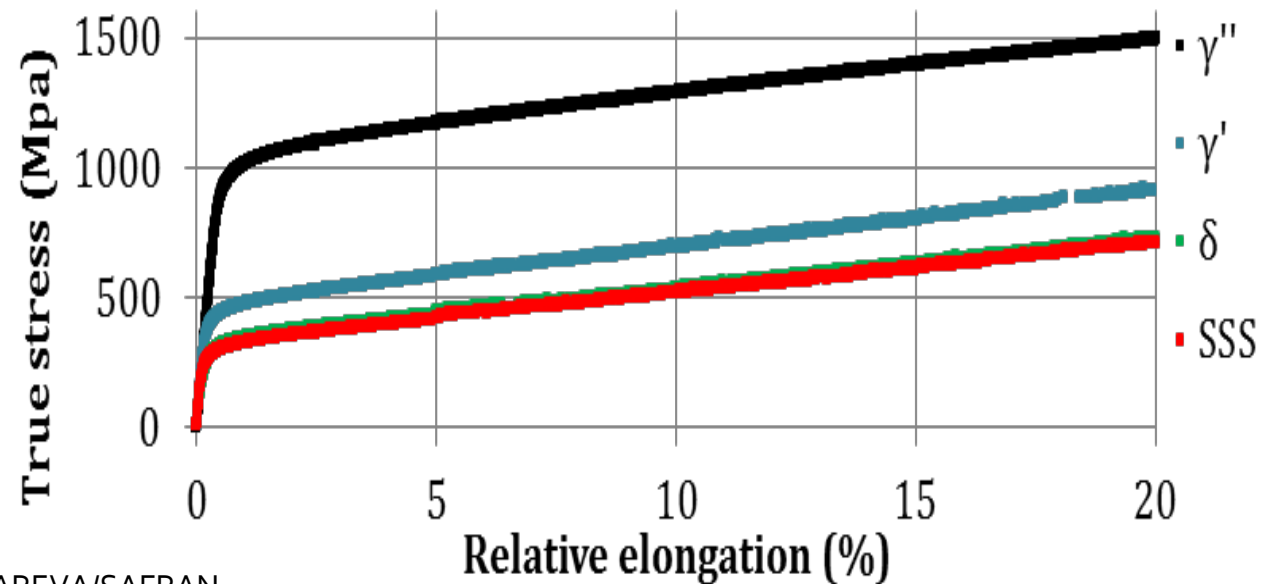
ii. Relation microstructure / propriétés mécaniques (limite élastique, écrouissage) ?

iii. Est-il possible de prédire par simulation numérique les propriétés mécaniques d'un alliage à durcissement structural pendant un procédé thermomécanique (soudage, fabrication additive) ?

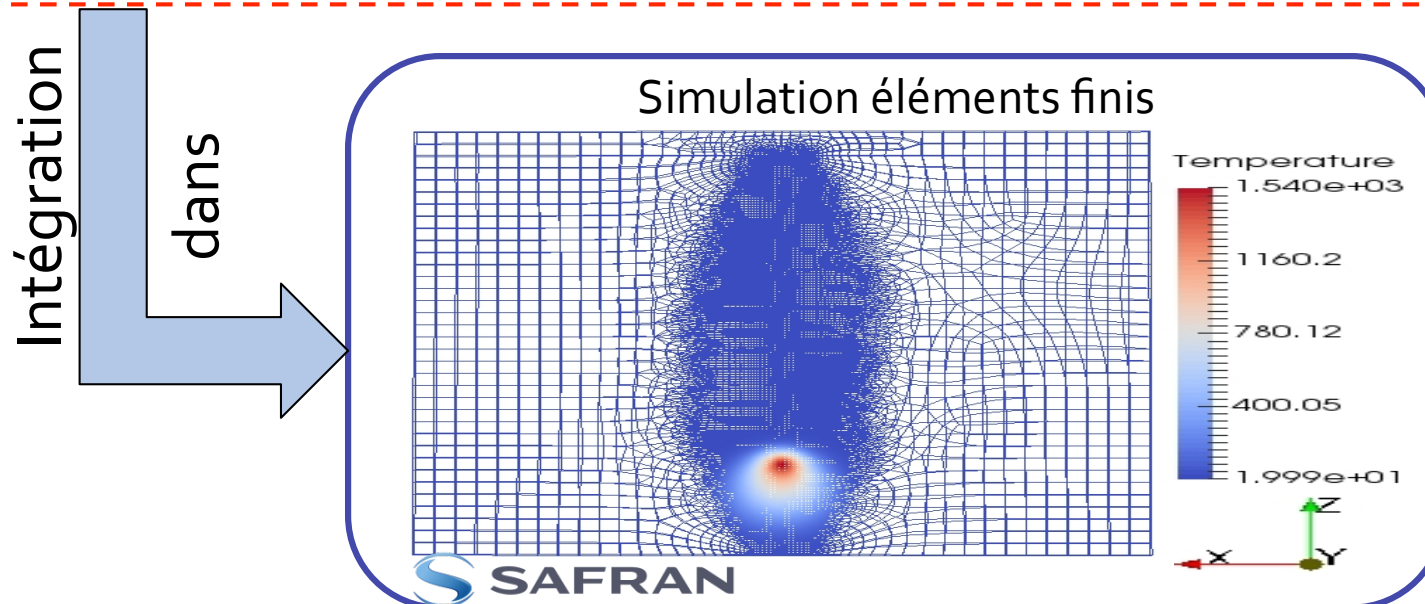
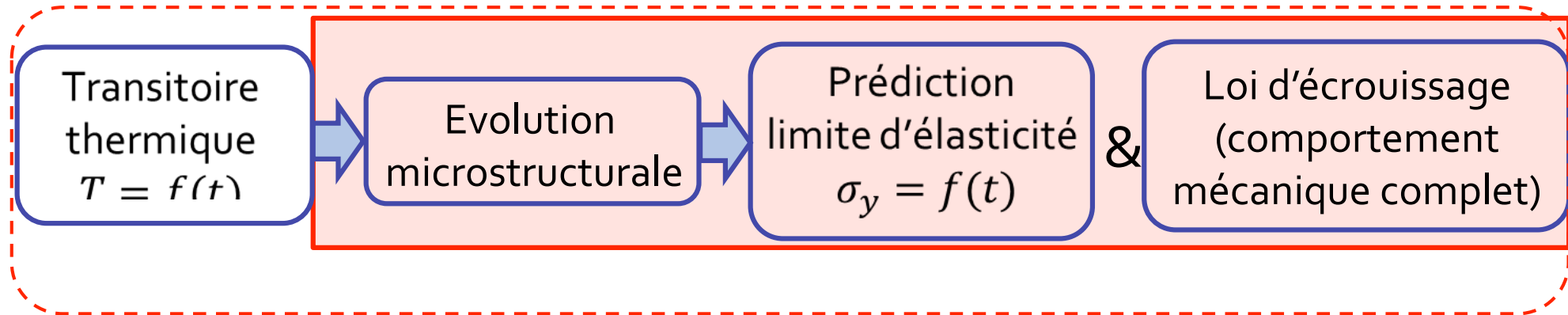
Inconel 718

Durcissement par précipitation d'une phase intermétallique

	$\gamma : Ni$	$\gamma' : Ni_3(Ti, Al)$	$\gamma'' : Ni_3Nb$	$\delta : Ni_3Nb$
		durcissant	durcissant	Non-durcissant
Solution solide				
		Précipités sphériques	disques	Sphériques ou lamelles



Problématique



Approche choisie pour la modélisation

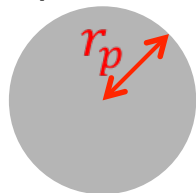
- PreciSo (Precipitation Software) :
 - Développé en C++ à MATEIS et au LaMCoS [*Perez-o8*]

- Collaboration :



- Modèle KWN (Kampman & Wagner Numerical)

Sphères



[*Perez-07*]

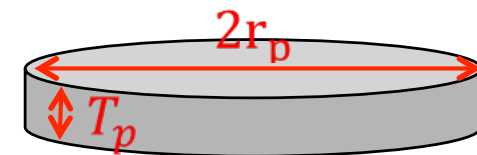
Bâtonnets (AA6061)



[*Bardel-14*]

Facteur de forme : $q = \frac{l}{r_p}$

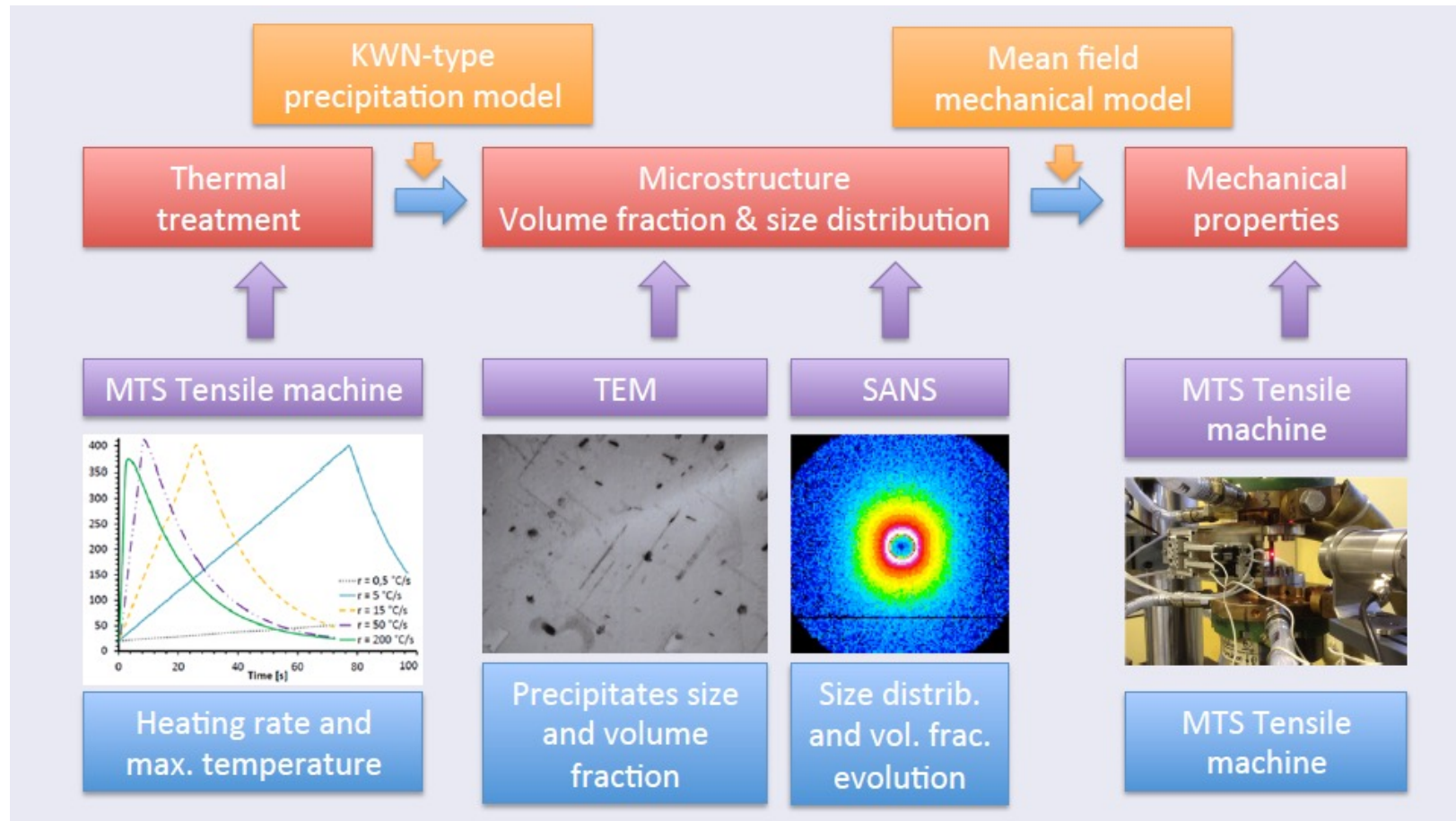
l'alliage 718 (phase γ'') :
plaquettes



[*Balan-17*]

Facteur de forme : $q = \frac{2r_p}{T_p}$

Stratégie : compréhension et suivi des propriétés mécaniques



Input : histoire thermique (T_{\max} , dT/dt)

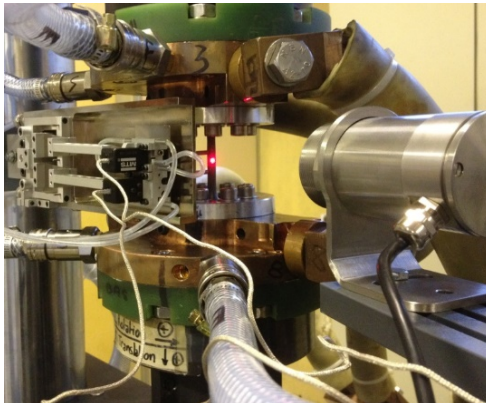
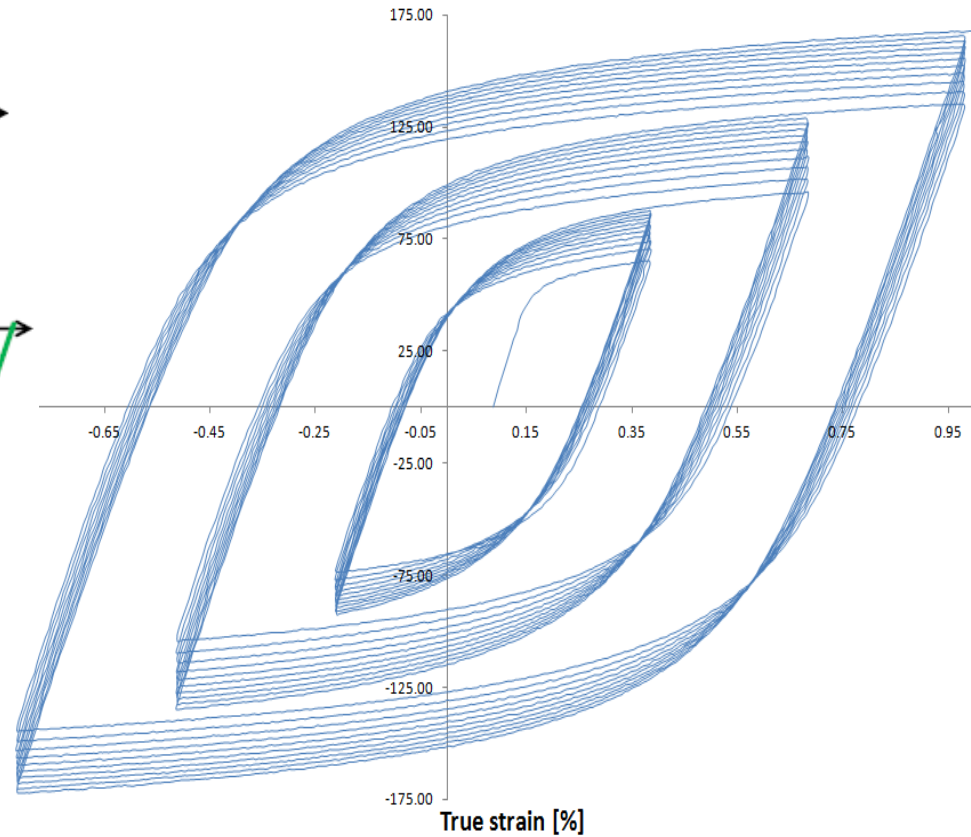
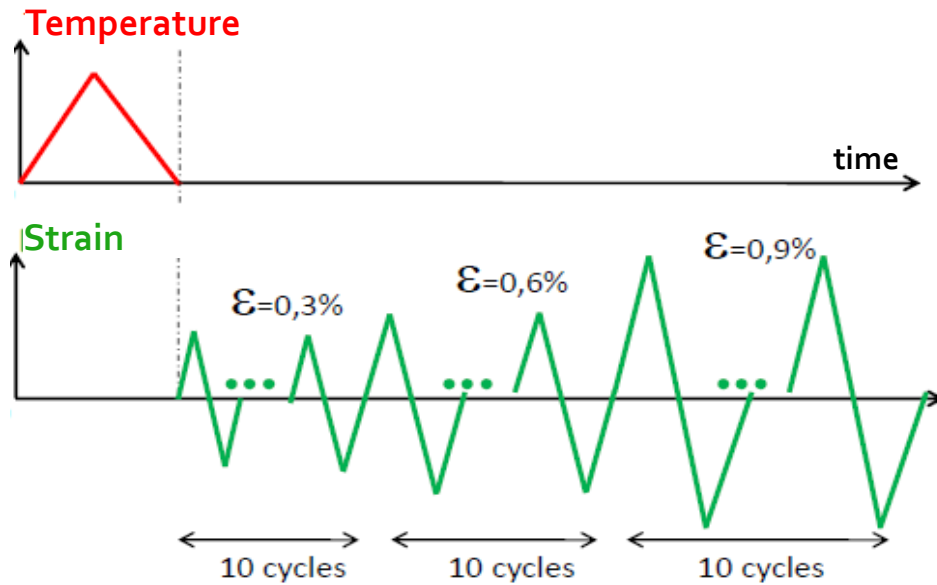


Output : propriétés mécaniques (σ_y , écrouissage)

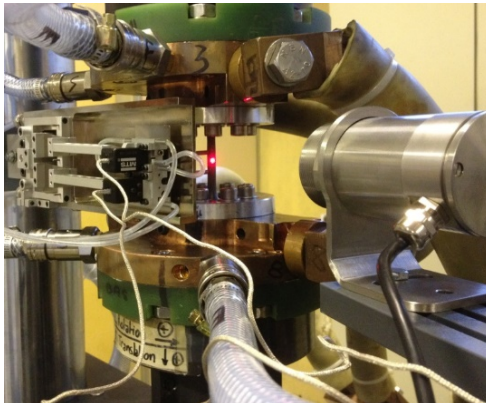
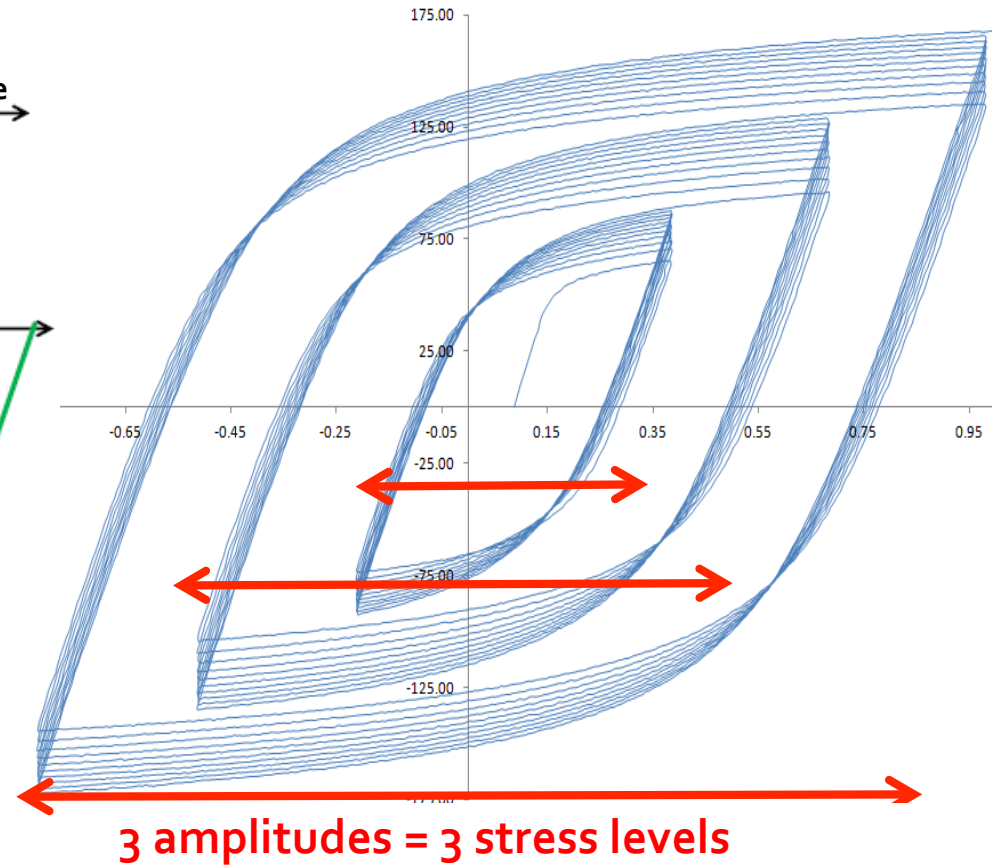
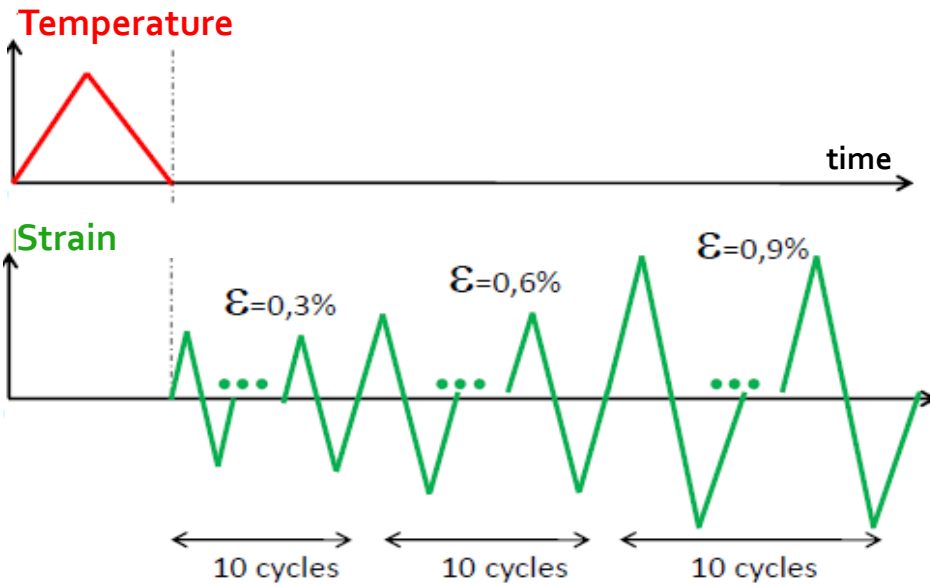


Experimental data to compare with

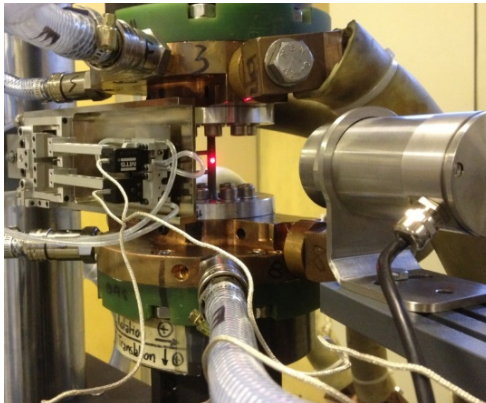
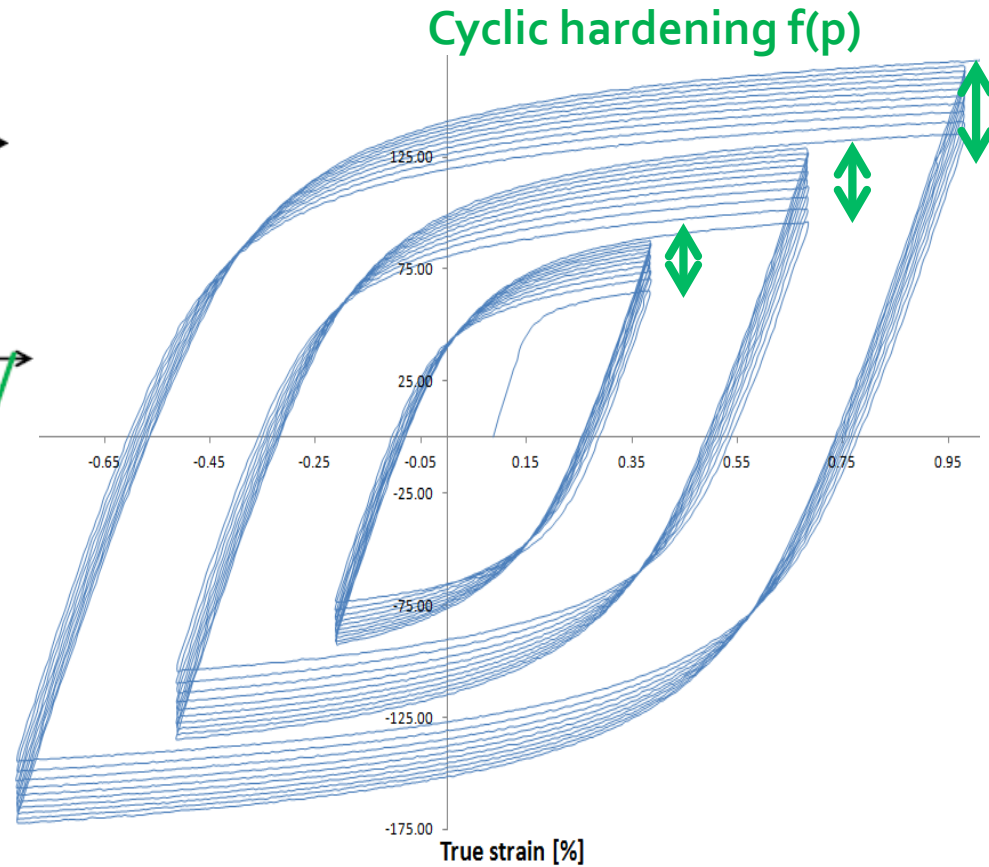
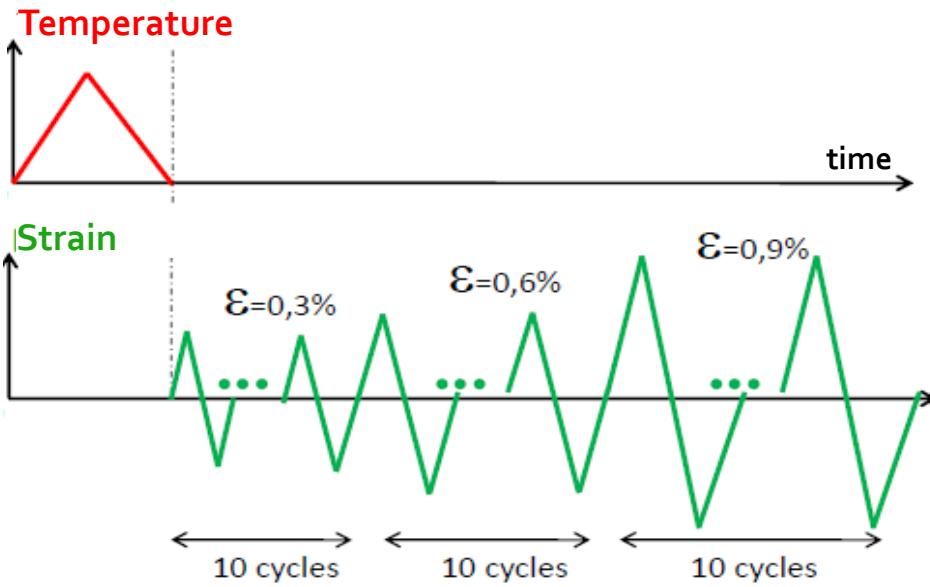
Cyclic loading



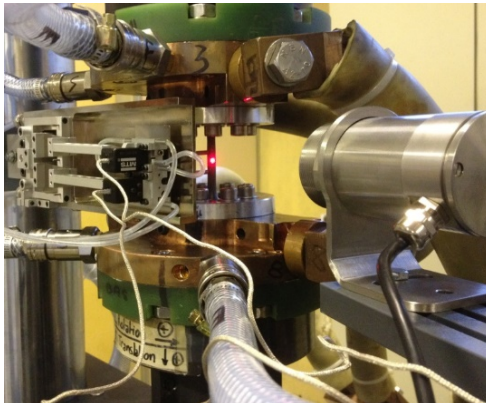
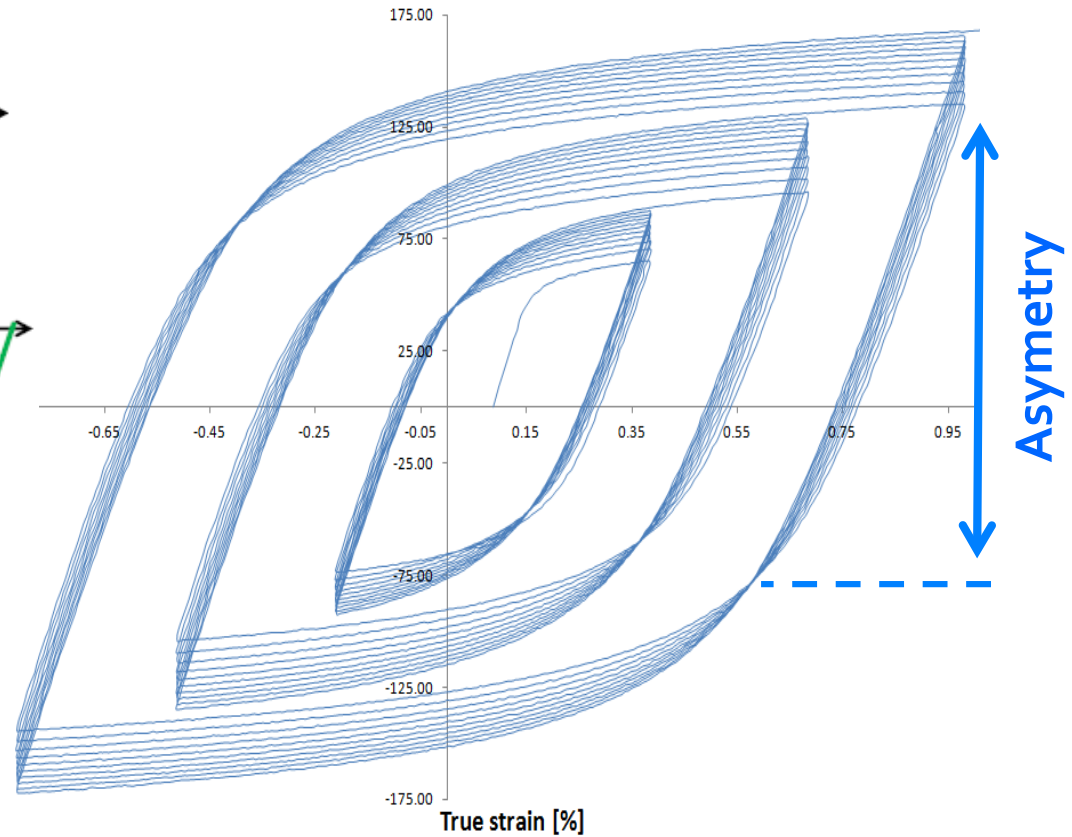
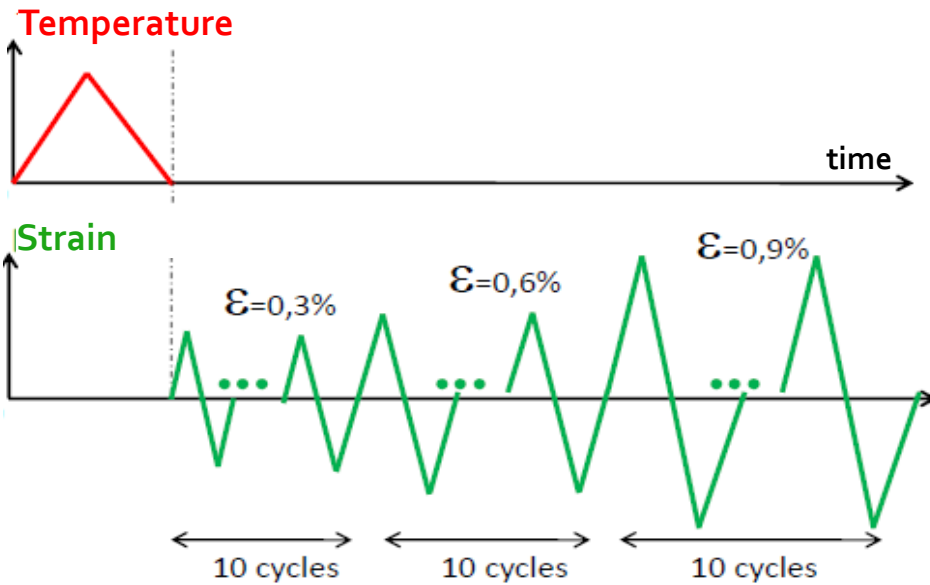
Cyclic loading



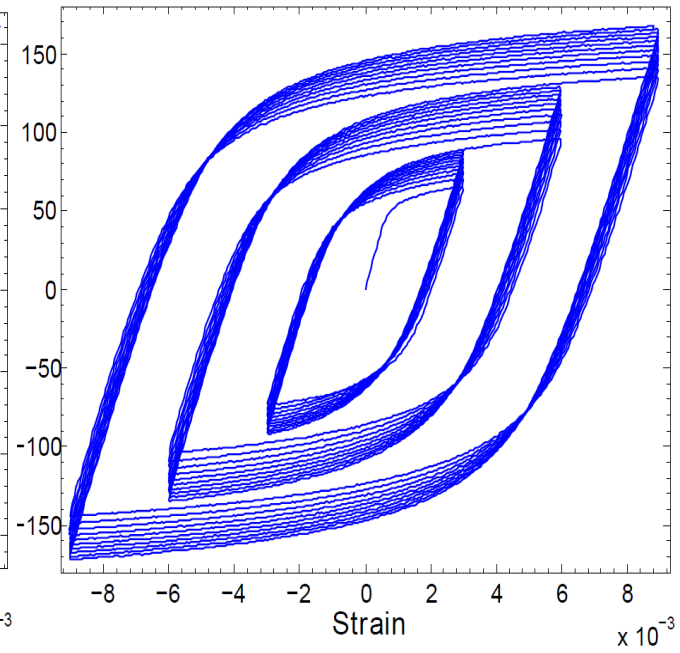
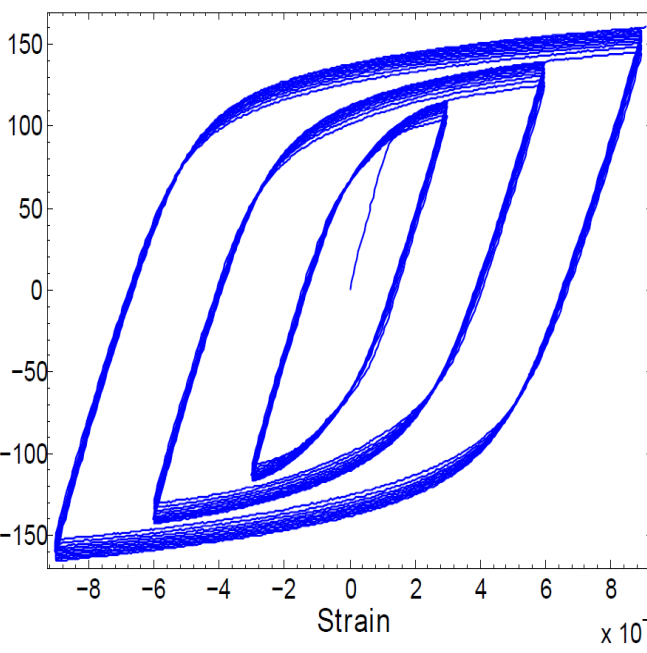
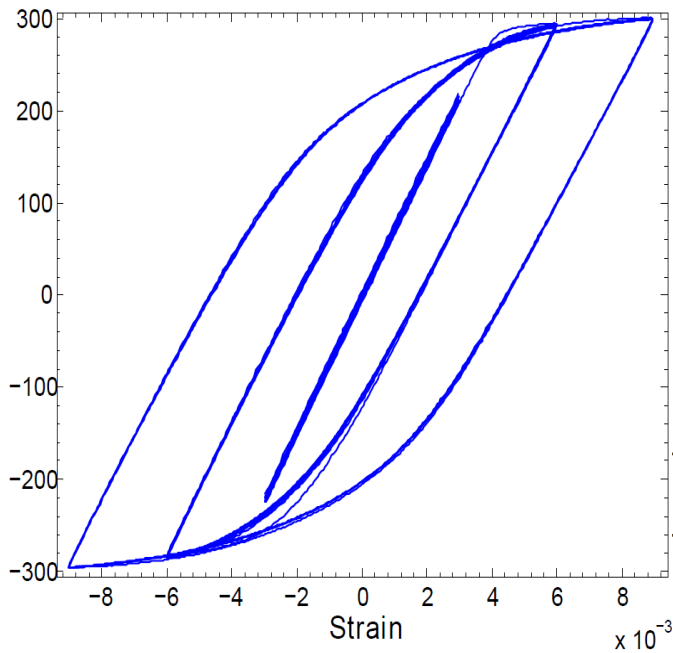
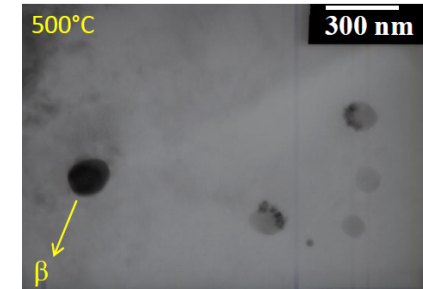
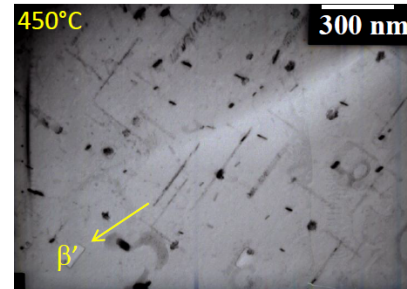
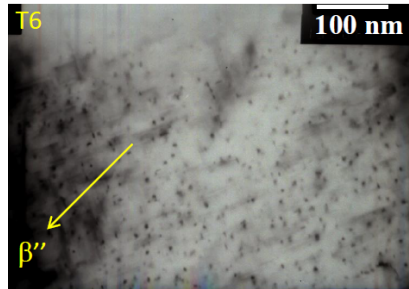
Cyclic loading



Cyclic loading

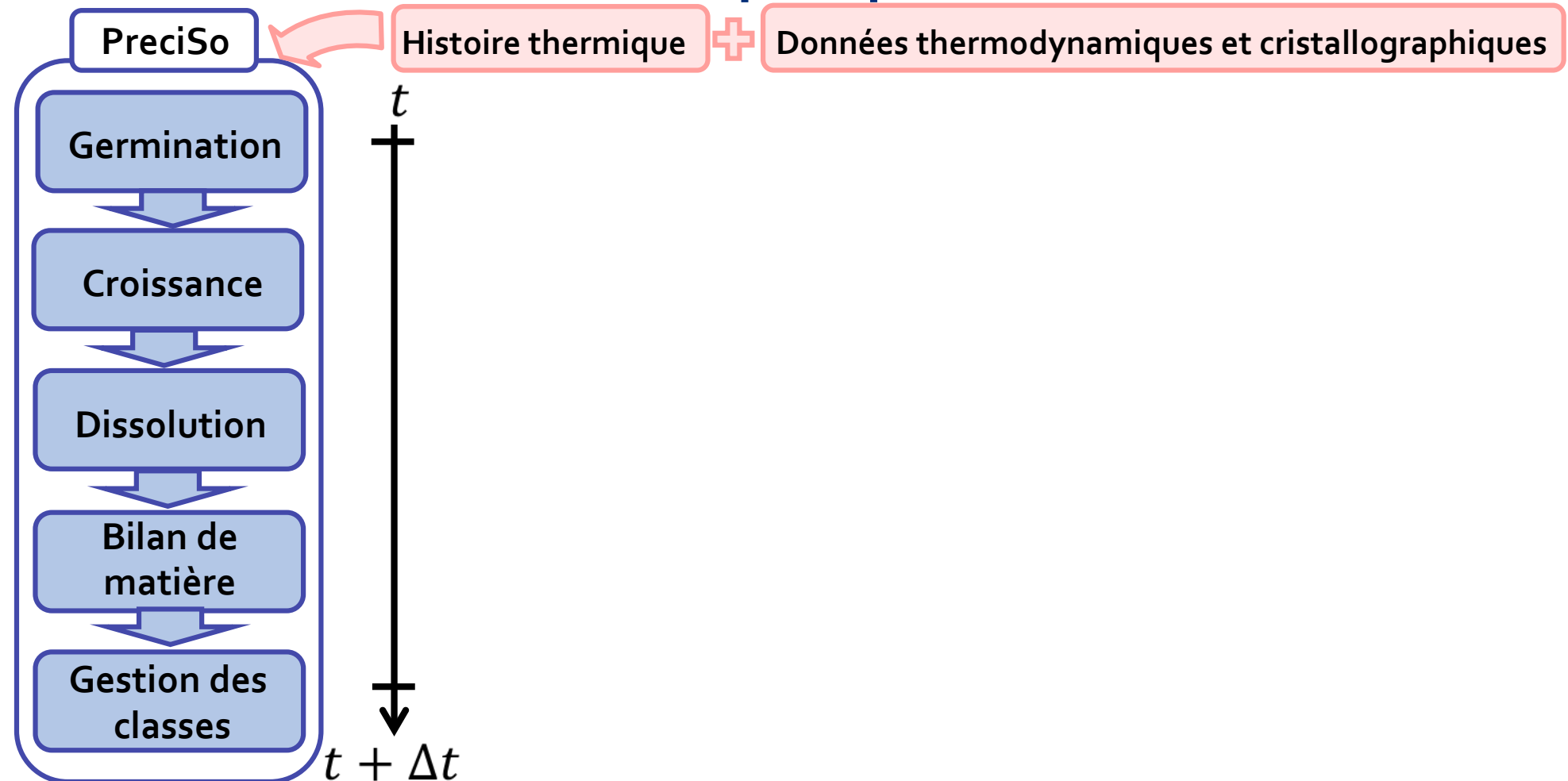


Some examples : AA6061 (à T_{amb} après T6 – $T_{max} = 450^{\circ}C$ et $500^{\circ}C$)

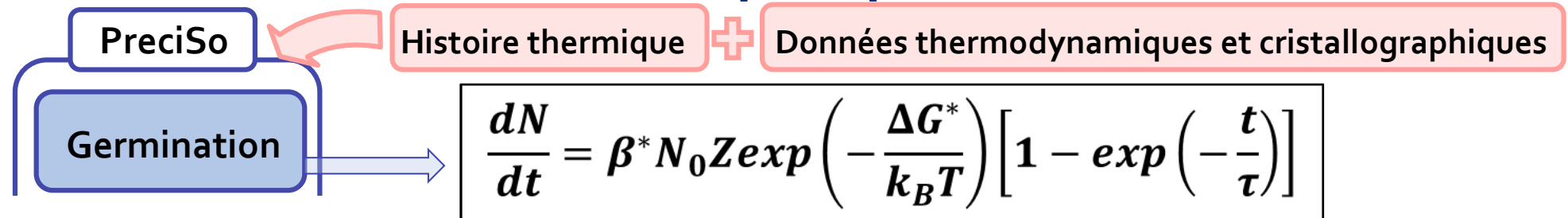


Microstructural degradation (ie \searrow of the density of hardening precipitates β'' and β')

Présentation du modèle de précipitation



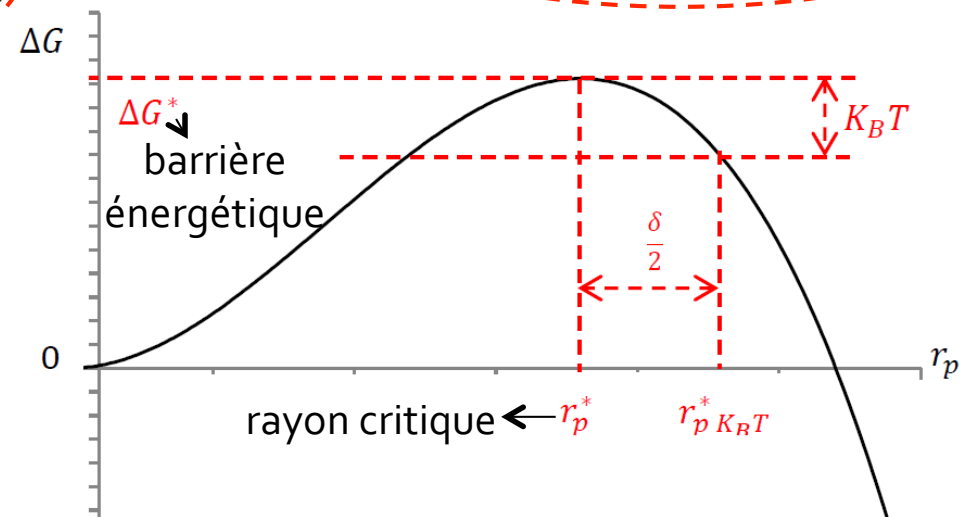
Présentation du modèle de précipitation



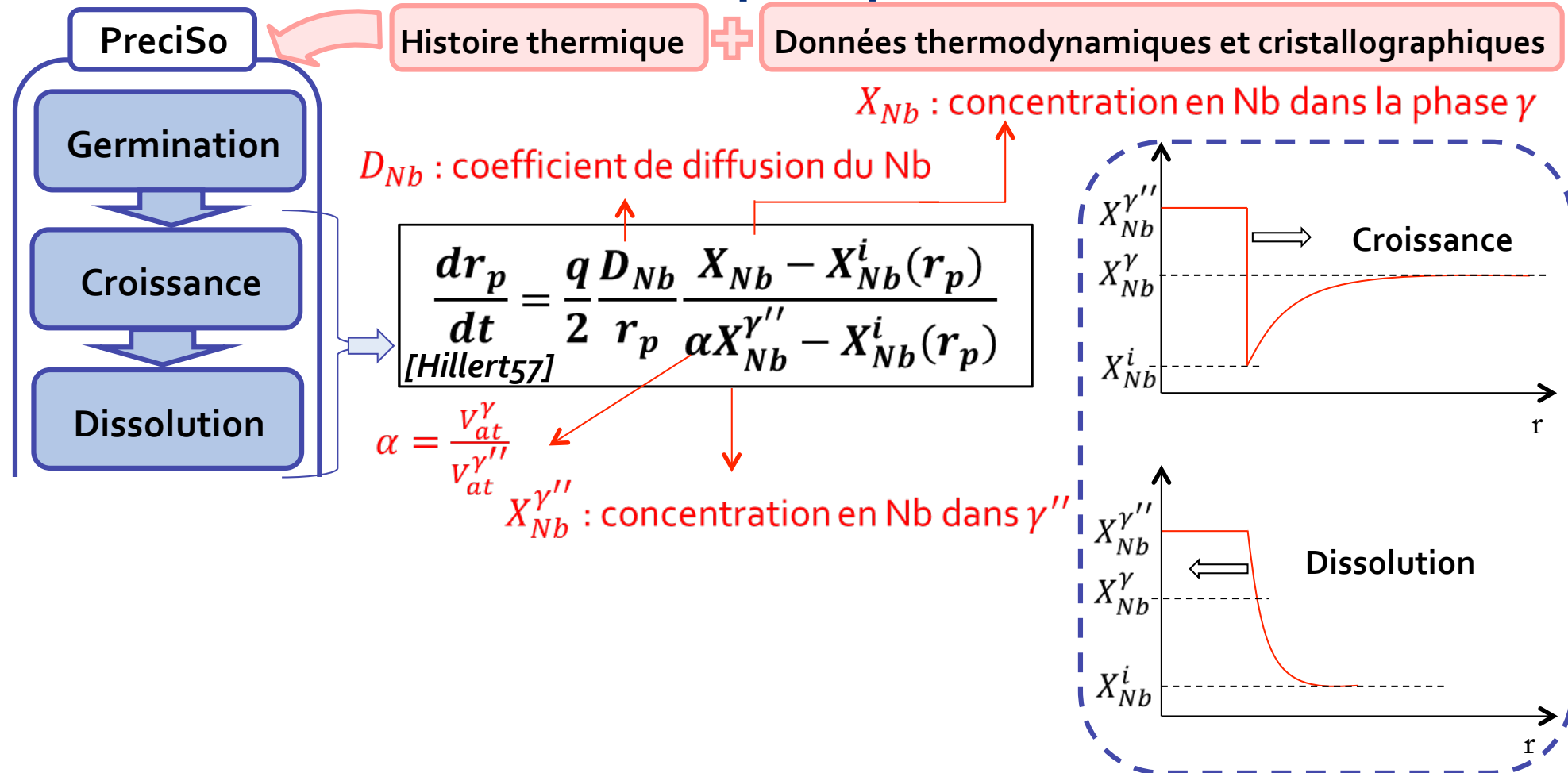
ΔG : variation de l'enthalpie libre du système (précipitation d'une particule dans la matrice)

$$\Delta G = V_p \Delta g + S_p \Gamma = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \Delta g \left(\frac{3}{2q}\right) + 4\pi \Gamma r_p^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{q}\right)$$

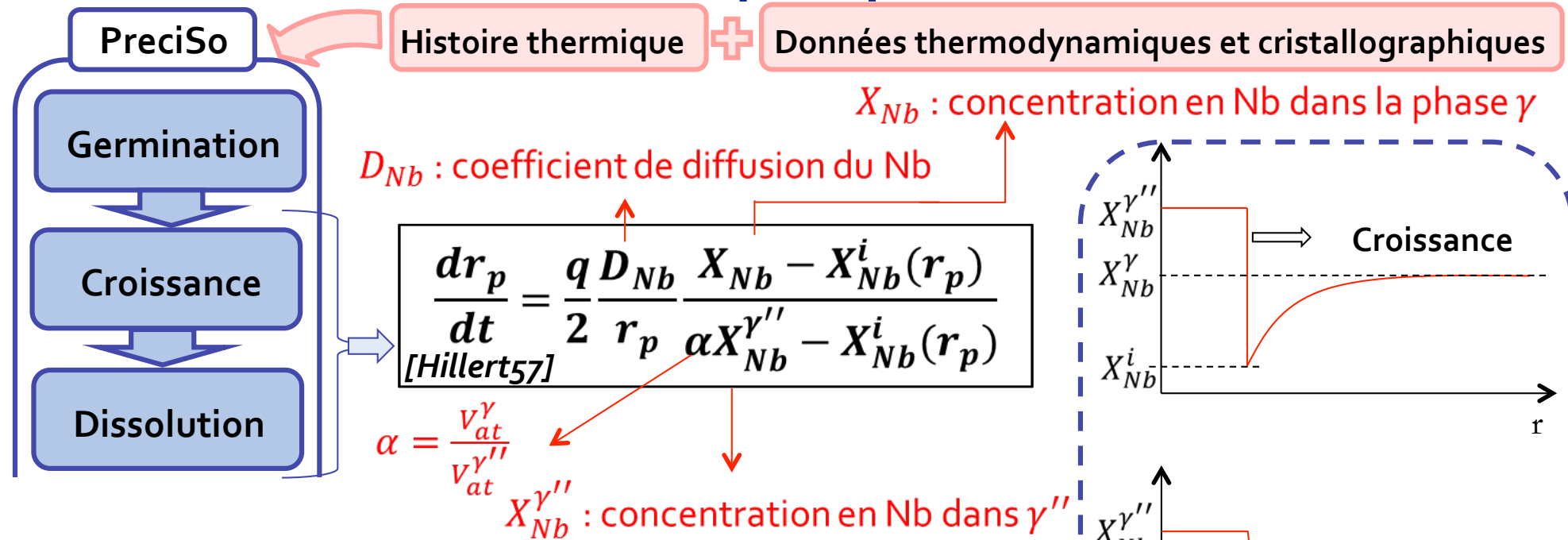
(Effet de la géométrie)



Présentation du modèle de précipitation



Présentation du modèle de précipitation

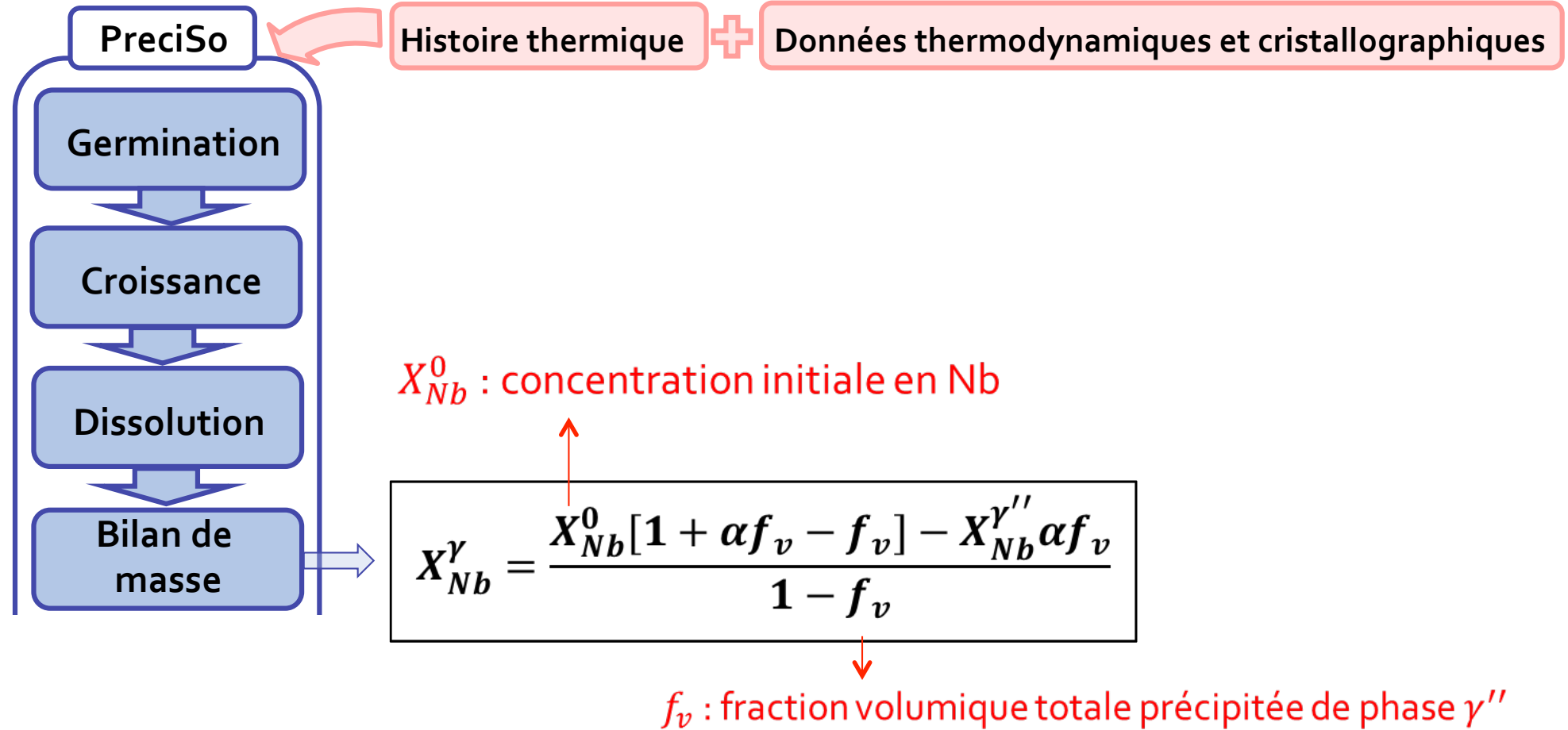


Effet Gibbs-Thomson : courbure de l'interface

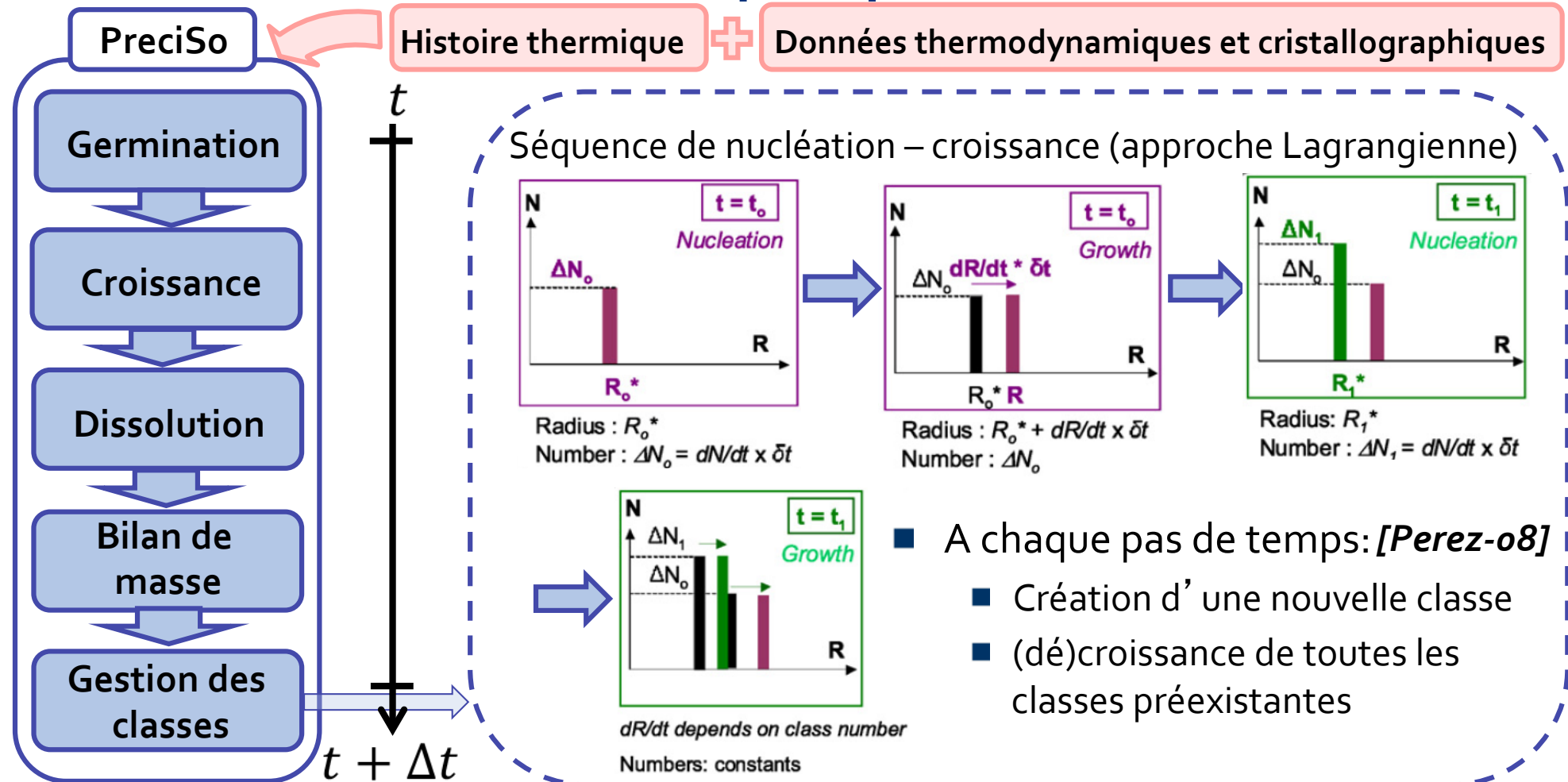
Produit de solubilité

$$X_{Ni}^i(r_p) X_{Nb}^i(r_p) = K_s \cdot \exp\left(\frac{8V_{at}^{\gamma''} \Gamma(q+2)}{r_p k_B T \cdot 3}\right)$$

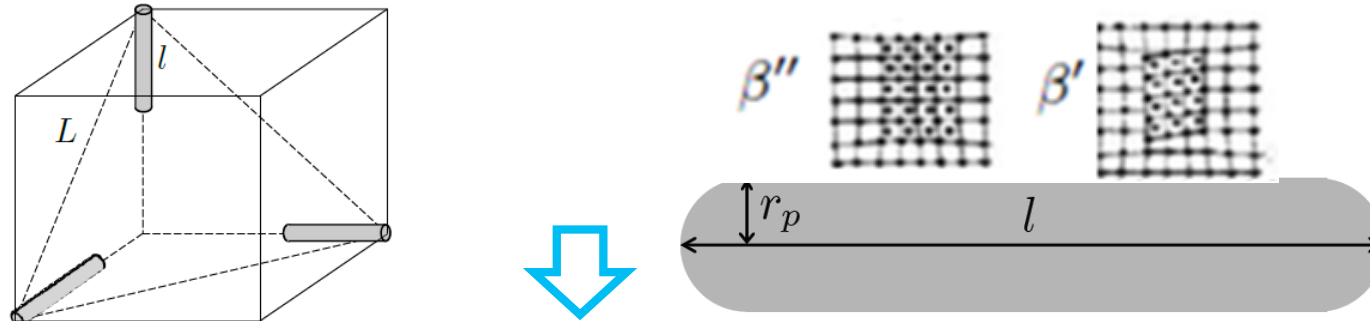
Présentation du modèle de précipitation



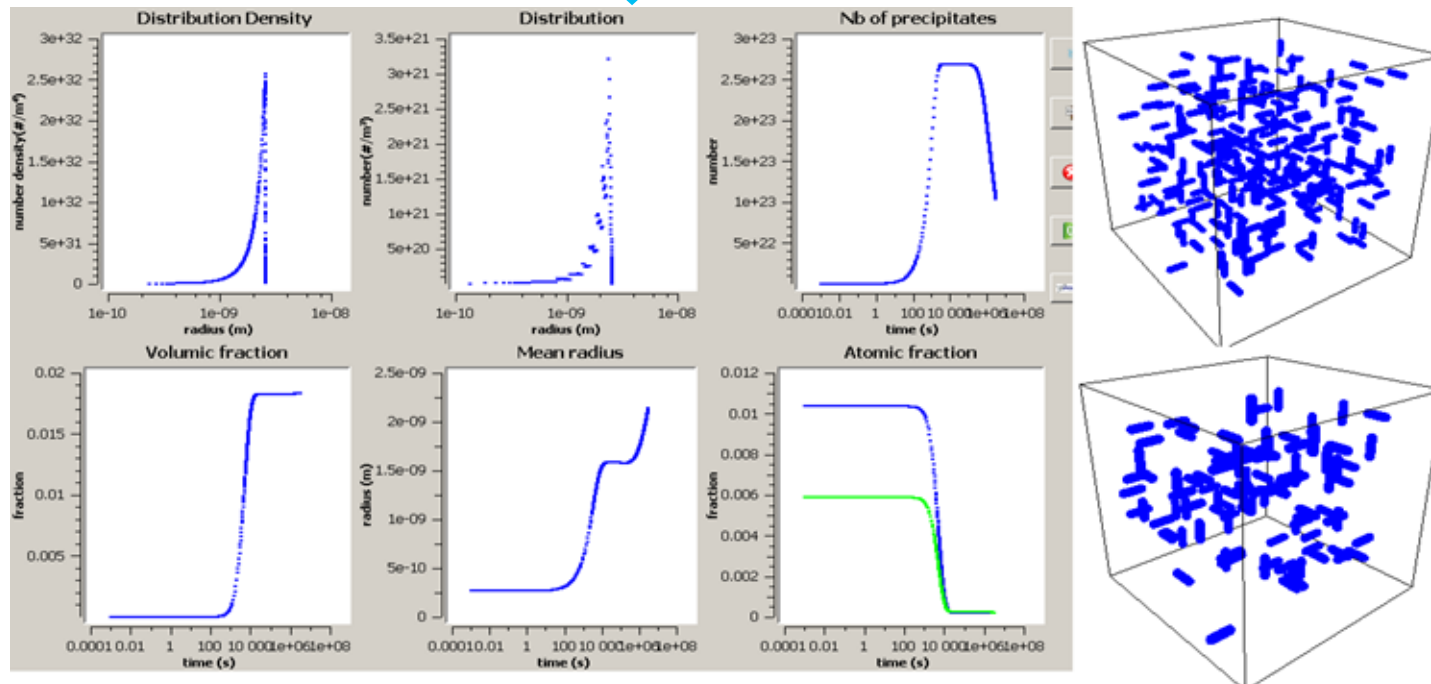
Présentation du modèle de précipitation



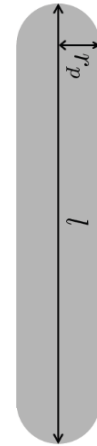
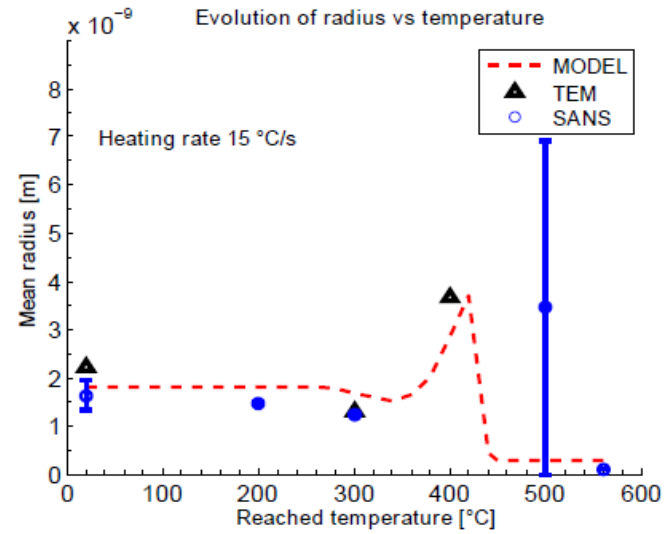
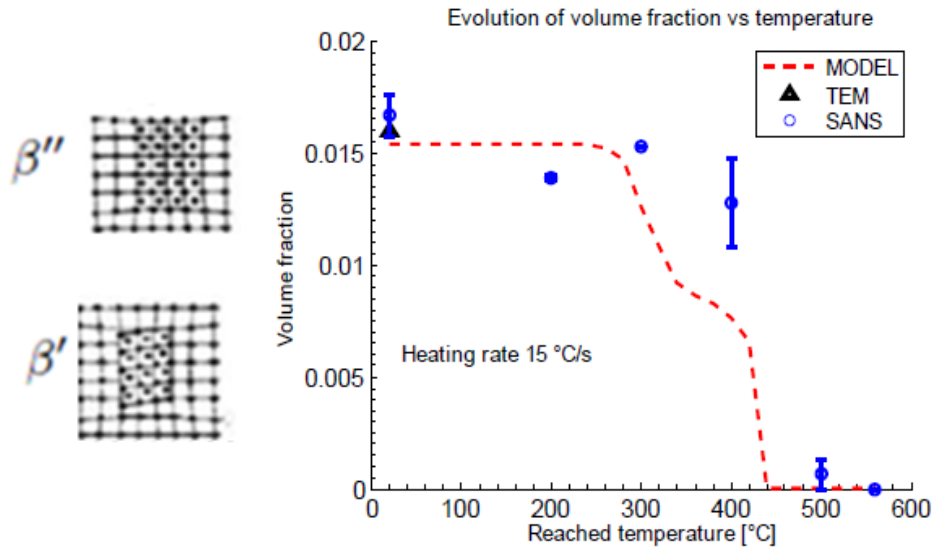
Example of precipitation modeling: Beta''/Beta' hardening phase in AA6061



Classical theory adapted for rods

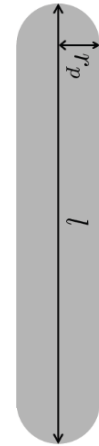
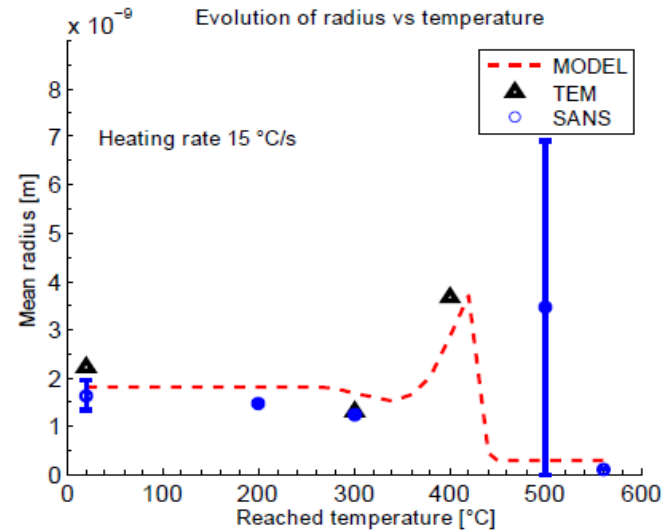
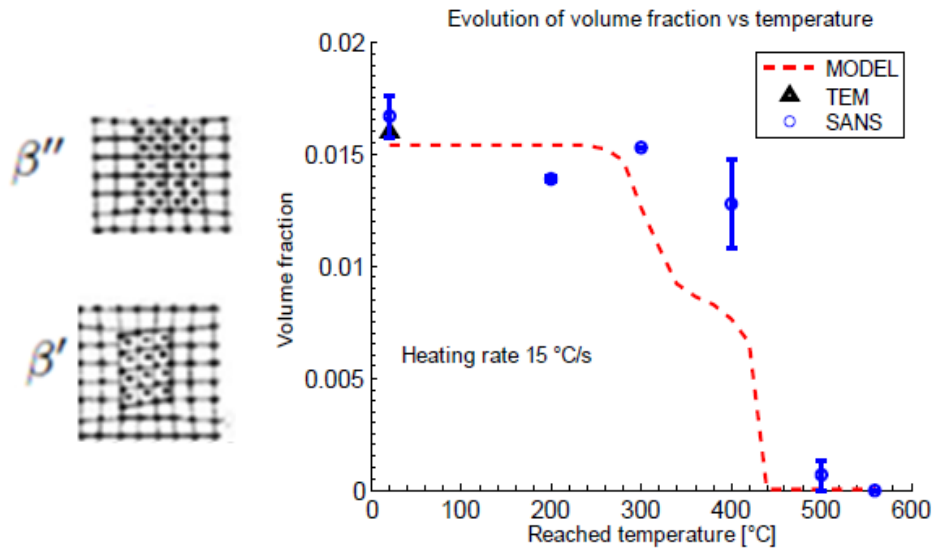


Calibration and coupling

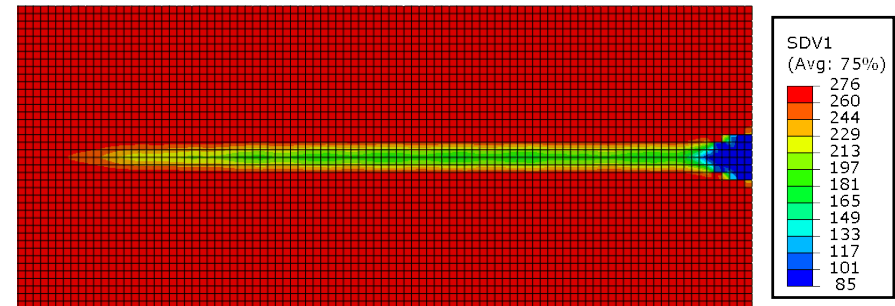
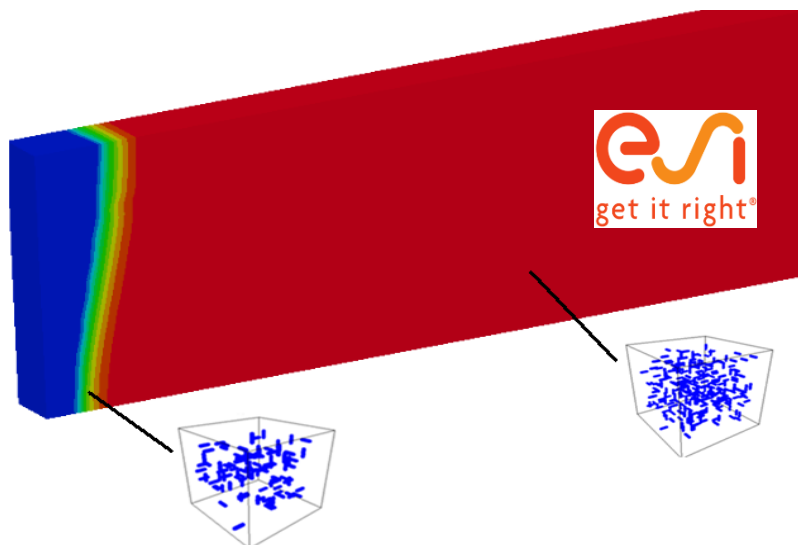


[Hillert-57]

Calibration and coupling



[Hillert-57]



Limite élastique : approche choisie

- Modèle basé sur **[Bardel-14]**
 - Interactions dislocations/précipités; développé par **[Friedel-64]** puis **[Kocks-75]** : modèle de type KME
 - Contribution de chaque classe de taille de précipités : contournement ou cisaillement

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

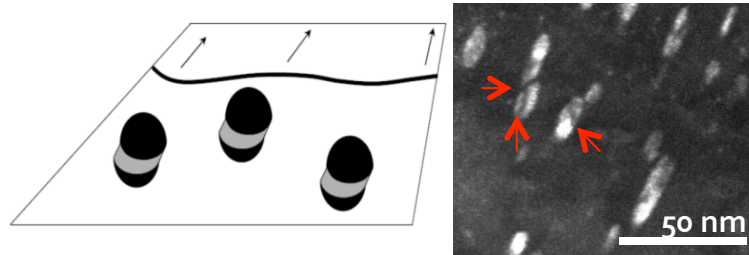
Nb en solution solide **[Mishima-86]**

- $\sigma_0 = 137 \text{ MPa}$: essai de traction (ech remis en solution) **Inco 718**

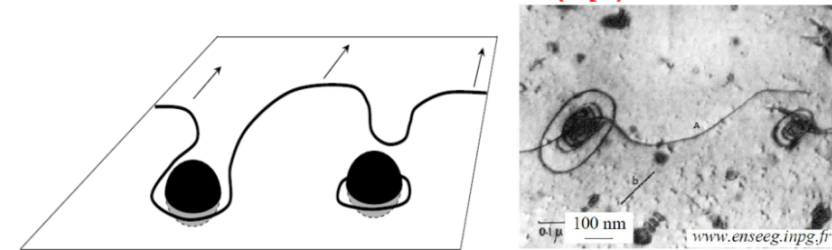
Présentation du modèle de limite d'élasticité

- Précipités: Compétition entre phénomènes de contournement/cisaillement

Cisaillement (sh)



Contournement (bp)



- $$\Delta\sigma_p = \sqrt{\Delta\sigma_p^{sh^2} + \Delta\sigma_p^{bp^2}} \quad [Bardel-14]$$

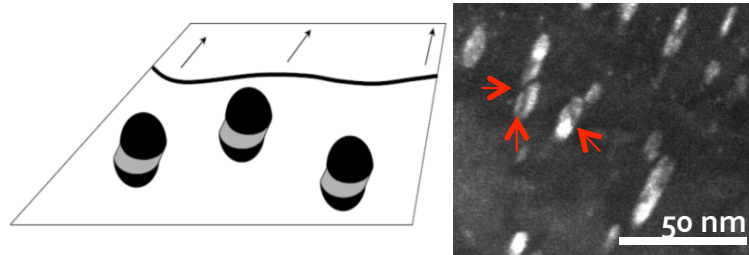
i_c :

classe de rayon r_c
transition $sh \rightarrow bp$

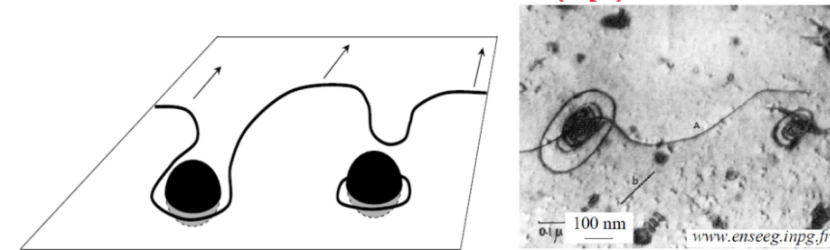
Présentation du modèle de limite d'élasticité

- Précipités: Compétition entre phénomènes de contournement/cisaillement

Cisaillement (*sh*)



Contournement (*bp*)



- $\Delta\sigma_p = \sqrt{\Delta\sigma_p^{sh^2} + \Delta\sigma_p^{bp^2}}$ [Bardel-14]

$$\Delta\sigma_p^{sh} = \frac{M}{bL_{sh}} \frac{\sum_{i < i_c} N_i F_i^{sh}}{\sum_{i < i_c} N_i} \text{ avec } F_i^{sh} = kGb r_{pi}$$

i_c :
classe de rayon r_c
transition *sh* → *bp*

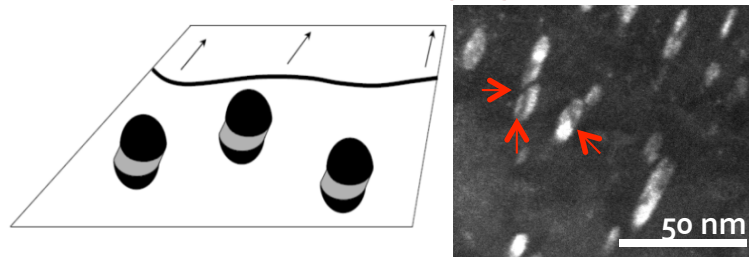
$$\Delta\sigma_p^{bp} = \frac{M}{bL_{bp}} \frac{\sum_{i > i_c} N_i F_i^{bp}}{\sum_{i > i_c} N_i} \text{ avec } F_i^{bp} = 2\beta Gb^2$$

Paramètres à déterminer

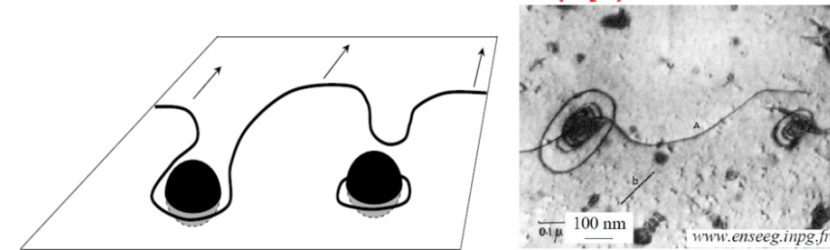
Présentation du modèle de limite d'élasticité

- Précipités: Compétition entre phénomènes de contournement/cisaillement

Cisaillement (*sh*)



Contournement (*bp*)



- $\Delta\sigma_p = \sqrt{\Delta\sigma_p^{sh^2} + \Delta\sigma_p^{bp^2}}$ [Bardel-14]

Facteur de Taylor

$$\Delta\sigma_p^{sh} = \frac{M}{bL_{sh}} \frac{\sum_{i < i_c} N_i F_i^{sh}}{\sum_{i < i_c} N_i} \text{ avec } F_i^{sh} = kGb r_{pi}$$

Vecteur de Burger

constante de tension de ligne

Coefficient de cisaillement

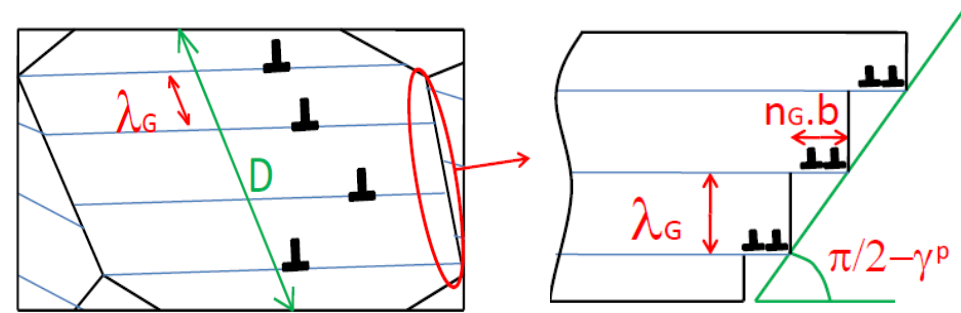
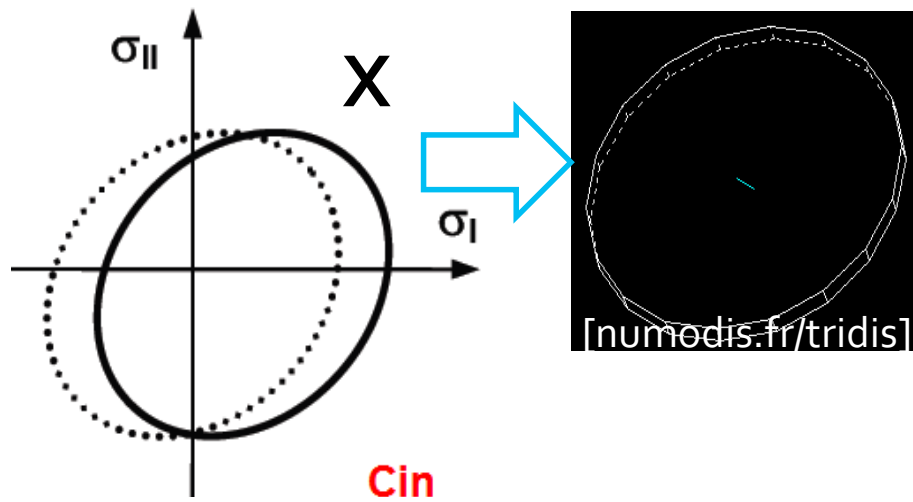
i_c :
classe de rayon r_c
transition *sh* → *bp*

$$\Delta\sigma_p^{bp} = \frac{M}{bL_{bp}} \frac{\sum_{i > i_c} N_i F_i^{bp}}{\sum_{i > i_c} N_i} \text{ avec } F_i^{bp} = 2\beta Gb^2$$

Module de cisaillement

Paramètres à déterminer

Kinematic hardening



$$\begin{cases} X_g = M \frac{2\beta\mu b}{D} n_G & \text{[Sinclair-o6]} \\ \frac{\partial n_G}{\partial \epsilon_p} = M \frac{\lambda_G}{b} \left(1 - \frac{n_G}{n_G^* \cdot \text{Sign}(\dot{\epsilon}_p)} \right) \end{cases}$$

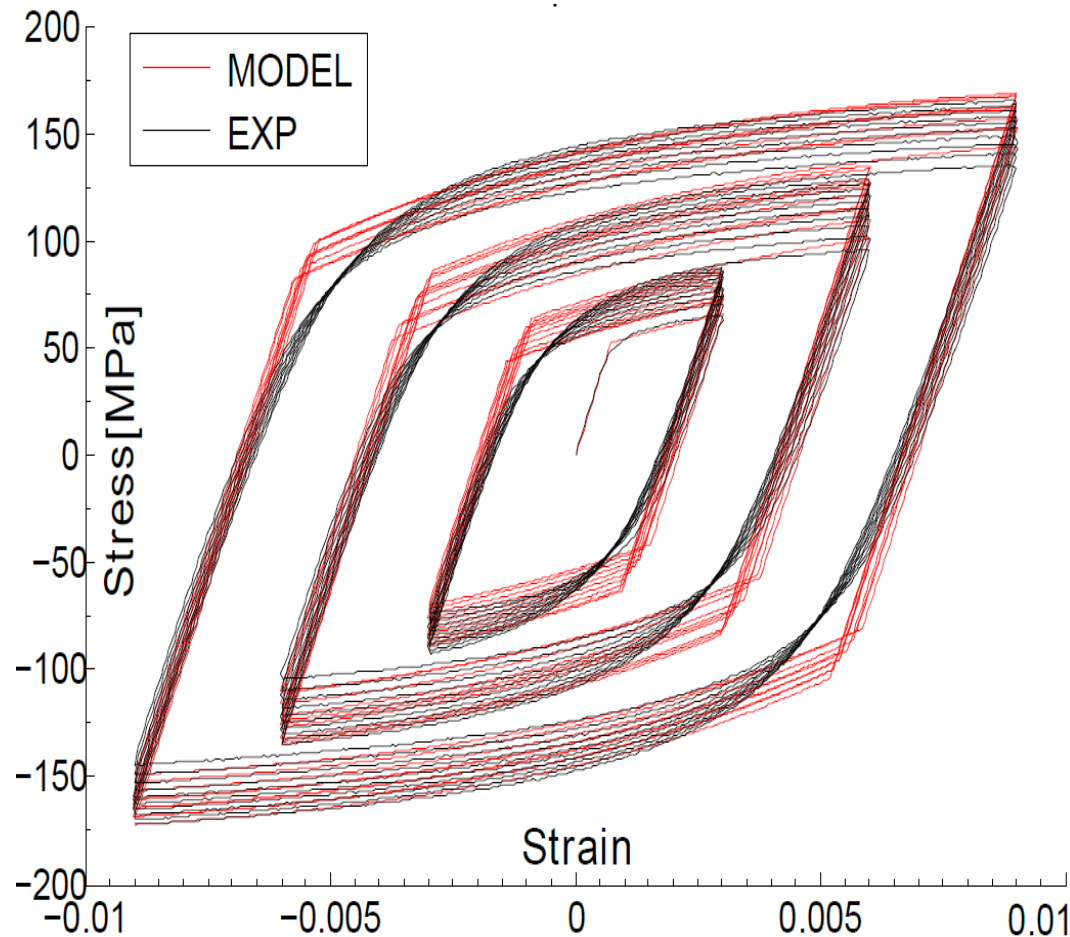
X_g kinematic stress due to grain boundaries

X_{ppt} kinematic stress due to Orowan storage

Adapted from [Proudhon-o8]

$$\begin{cases} \frac{\partial n_{ppt}}{\partial \epsilon_p} = M \frac{l_{bp}}{b\sqrt{3}} \left(1 - \frac{n_{ppt}}{n_{ppt}^* \cdot \text{Sign}(\dot{\epsilon}_p)} \right) \\ X_{ppt} = M \frac{\mu \cdot f_v^{bp} \cdot \Omega \cdot \mu^*}{\mu^* - \Omega(\mu^* - \mu)} \frac{n_{ppt} \cdot \phi \cdot b \cdot \sqrt{3}}{l_{bp}} \end{cases}$$

Calibration on SSS



$$\dot{\sigma} = E (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_p)$$

$$\dot{\epsilon}_p = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma}$$

$$f = |\sigma - X_G - X_{ppt}| - (\sigma_0 + R)$$

$$R = \Delta\sigma_{SS} + \sqrt{\Delta\sigma_p^2 + \Delta\sigma_d^2}$$

$$\Delta\sigma_d = M \alpha \mu b \sqrt{\rho}$$

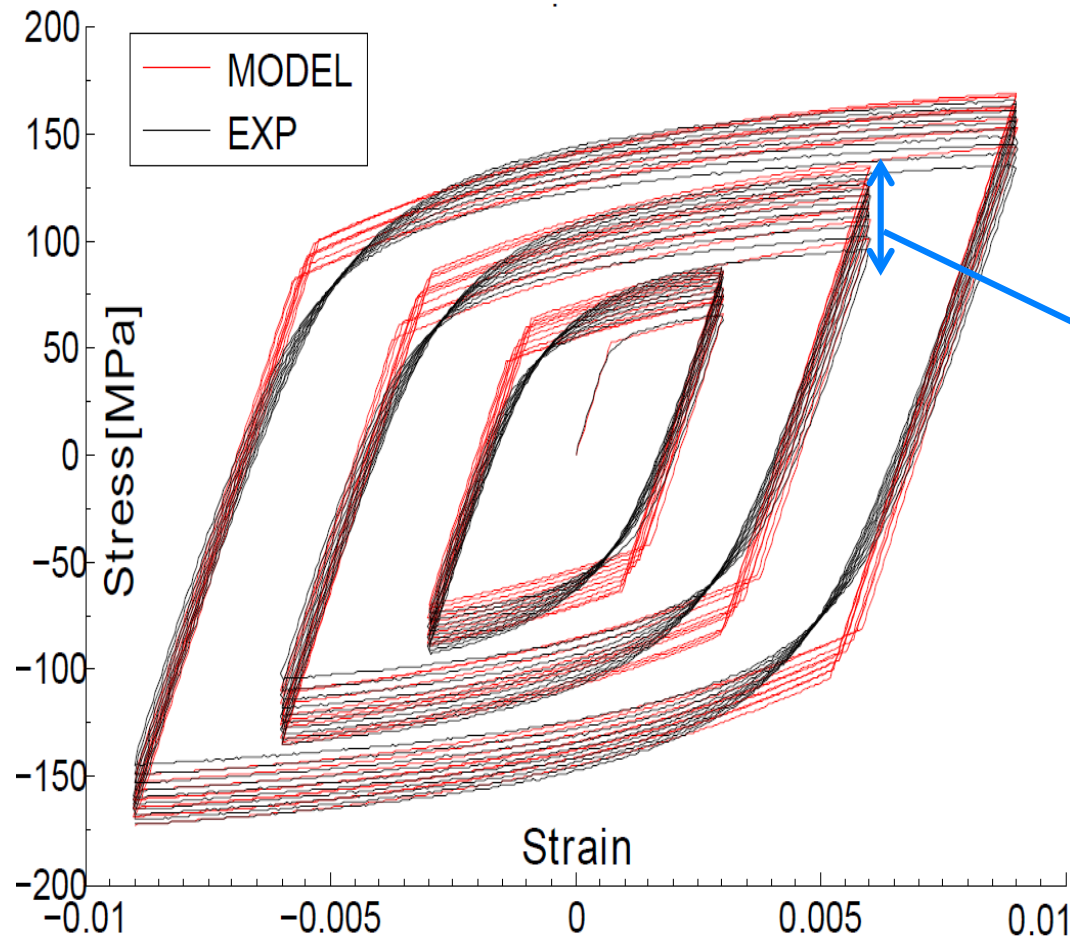
$$\frac{\partial \rho}{\partial p} = M \left[k_1 \sqrt{\rho} - k_2 \rho \right]$$

$$\frac{\partial n_G}{\partial \epsilon_p} = \frac{M \lambda_G}{b} \left(1 - \frac{n_G}{n_G^* \cdot \text{Sign}(\dot{\epsilon}_p)} \right)$$

$$X_G = \frac{M 2 \beta \mu b}{D} \cdot n_G$$

$$\dot{p} = |\dot{\epsilon}_p| = \dot{\lambda}$$

Calibration on SSS



$$\dot{\sigma} = E (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_p)$$

$$\dot{\epsilon}_p = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma}$$

$$f = |\sigma - X_G - X_{ppt}| - (\sigma_0 + R)$$

$$R = \Delta\sigma_{SS} + \sqrt{\Delta\sigma_p^2 + \Delta\sigma_d^2}$$

$$\Delta\sigma_d = M \alpha \mu b \sqrt{\rho}$$

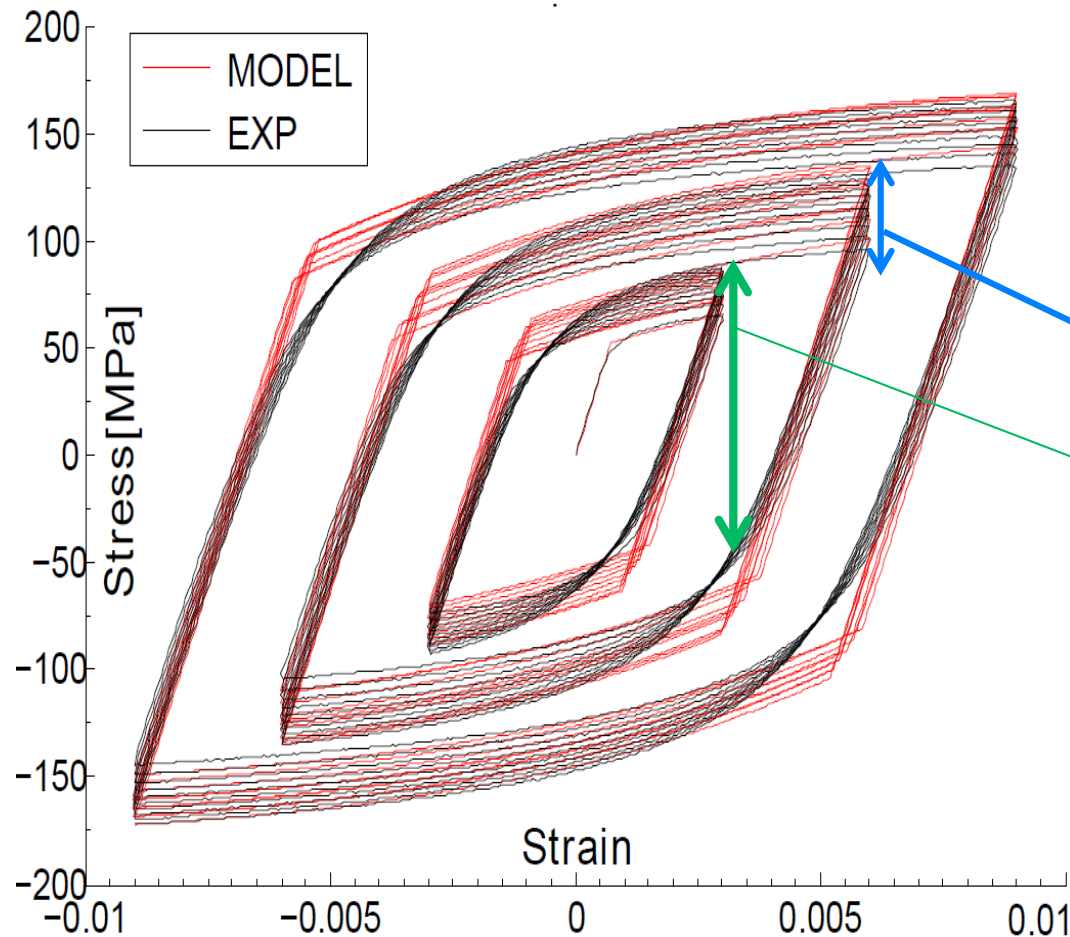
$$\frac{\partial \rho}{\partial p} = M \left[k_1 \sqrt{\rho} - k_2 \rho \right]$$

$$\frac{\partial n_G}{\partial \epsilon_p} = \frac{M \lambda_G}{b} \left(1 - \frac{n_G}{n_G^* \cdot \text{Sign}(\dot{\epsilon}_p)} \right)$$

$$X_G = \frac{M 2 \beta \mu b}{D} \cdot n_G$$

$$\dot{p} = |\dot{\epsilon}_p| = \dot{\lambda}$$

Calibration on SSS



$$\dot{\sigma} = E (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_p)$$

$$\dot{\epsilon}_p = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma}$$

$$f = |\sigma - X_G - X_{ppt}| - (\sigma_0 + R)$$

$$R = \Delta\sigma_{SS} + \sqrt{\Delta\sigma_p^2 + \Delta\sigma_d^2}$$

$$\Delta\sigma_d = M \alpha \mu b \sqrt{\rho}$$

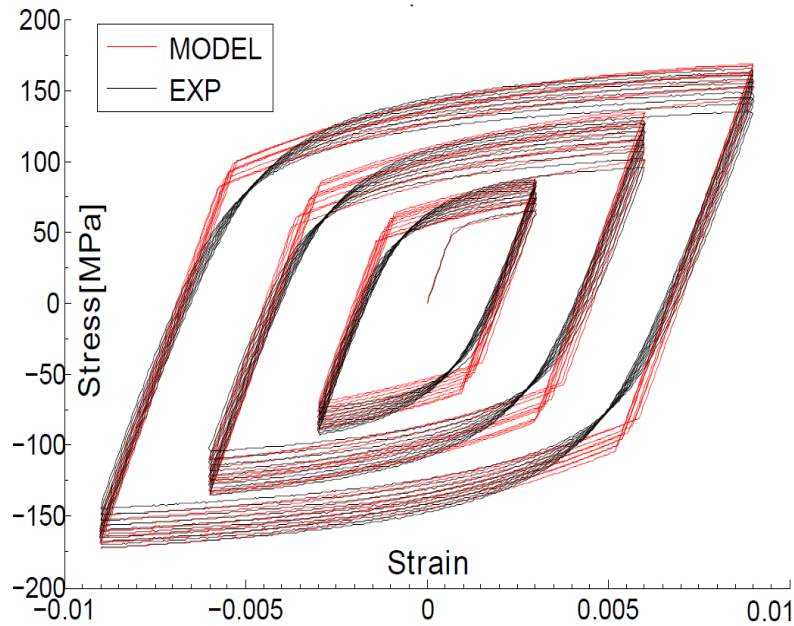
$$\frac{\partial \rho}{\partial p} = M \left[k_1 \sqrt{\rho} - k_2 \rho \right]$$

$$\frac{\partial n_G}{\partial \epsilon_p} = \frac{M \lambda_G}{b} \left(1 - \frac{n_G}{n_G^*} \text{Sign}(\dot{\epsilon}_p) \right)$$

$$X_G = \frac{M 2 \beta \mu b}{D} . n_G$$

$$\dot{p} = |\dot{\epsilon}_p| = \dot{\lambda}$$

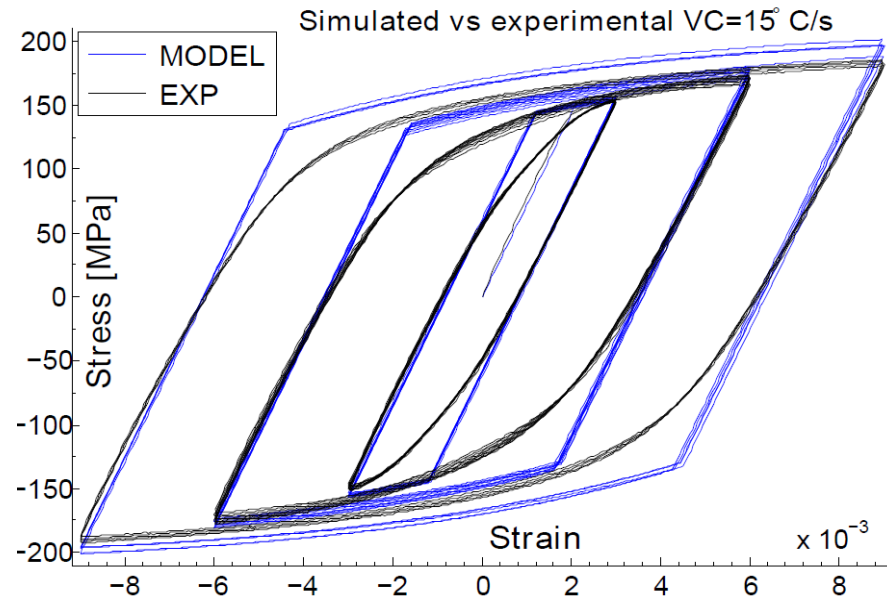
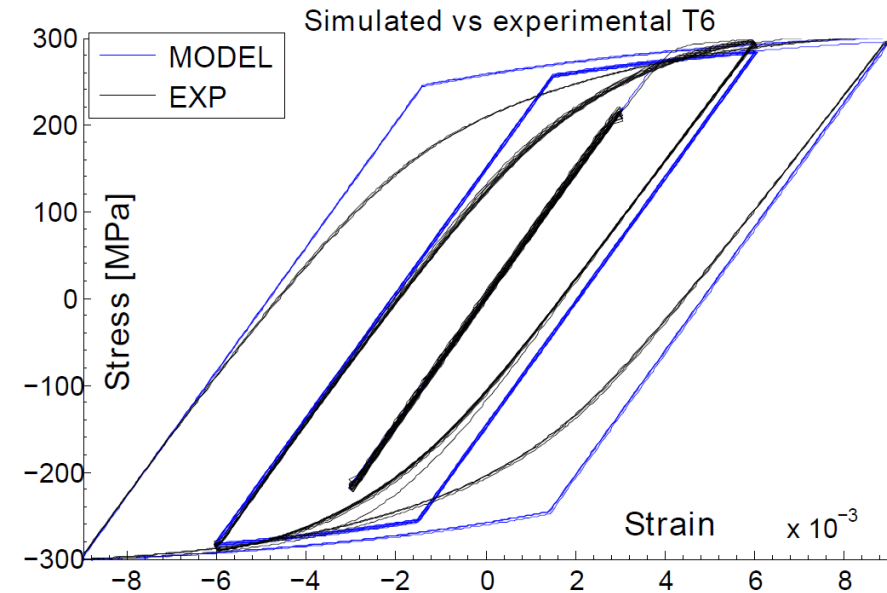
Prediction capability



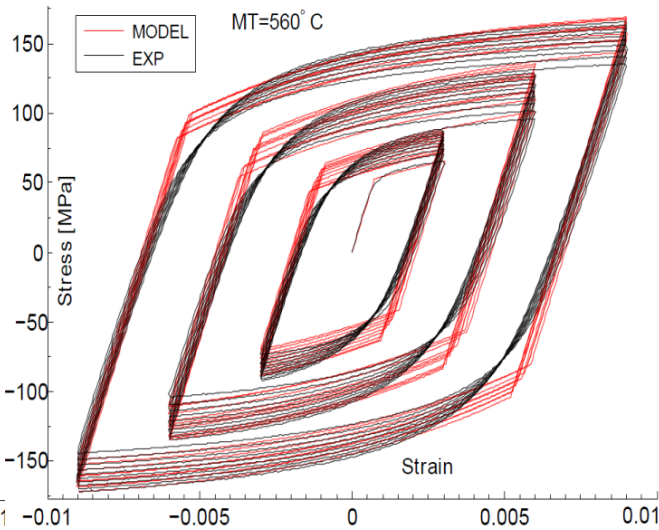
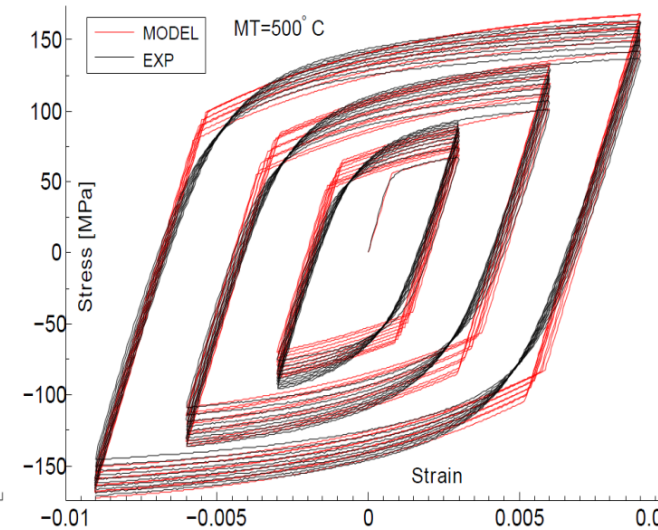
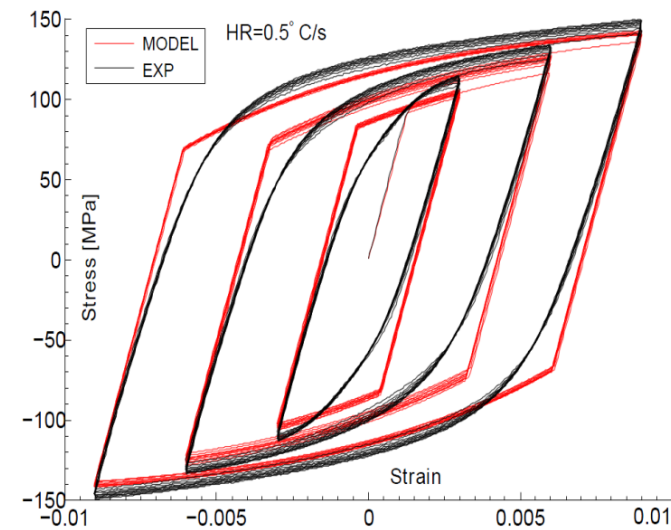
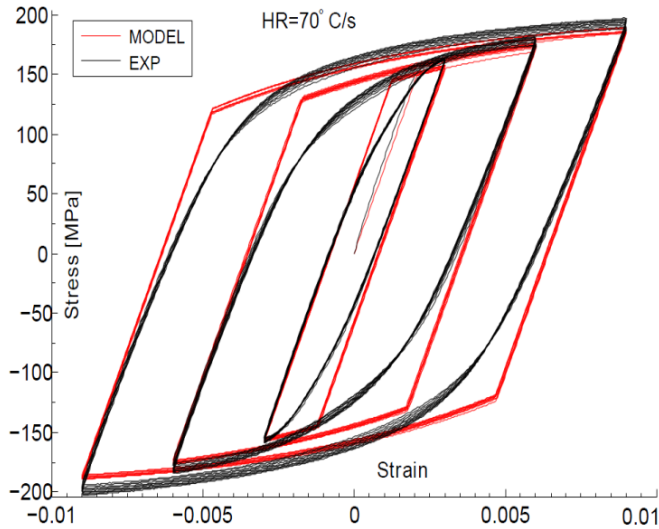
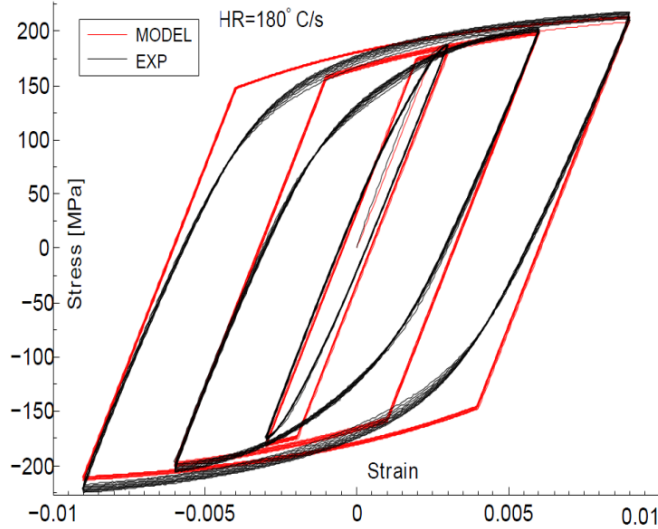
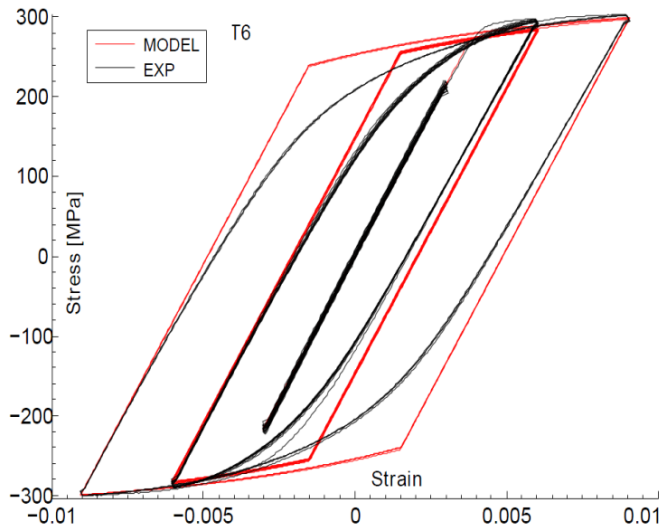
$$R = \Delta\sigma_{ss} + \sqrt{\Delta\sigma_p^2 + \Delta\sigma_d^2}$$

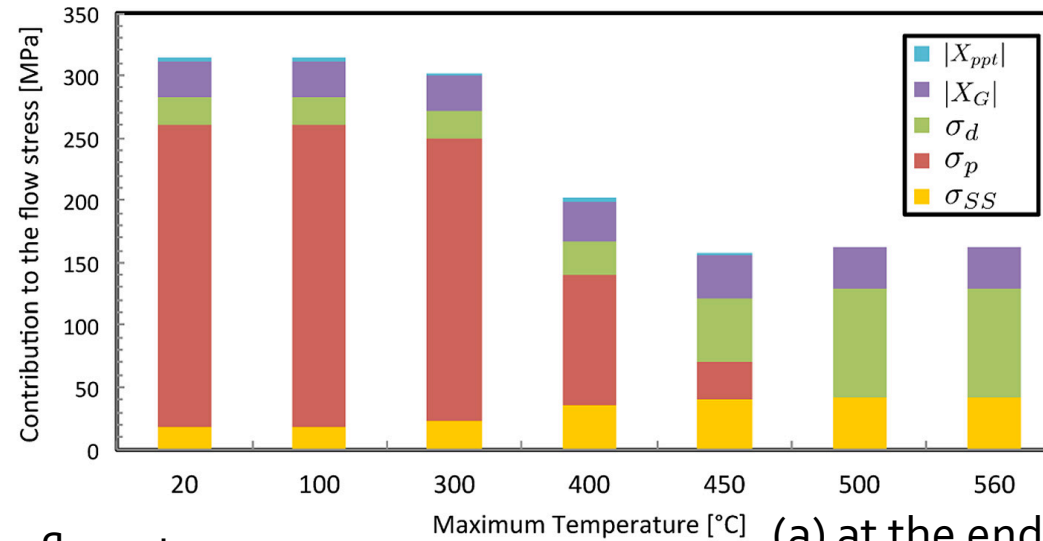
$$= \Delta\sigma_{ss} + \Delta\sigma_p \sqrt{1 + \frac{\Delta\sigma_d^2}{\Delta\sigma_p^2}}$$

$$\approx \Delta\sigma_{ss} + \Delta\sigma_p$$



Contact and Structural Mechanics Laboratory

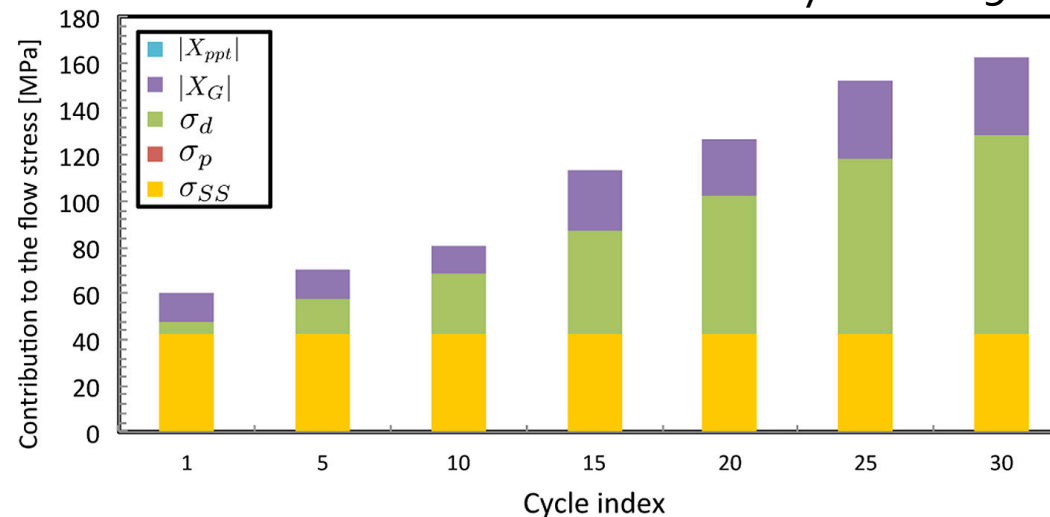




Contributions to the flow stress:

(a)

(a) at the end of the last deformation cycle at 0.9% for all MT treatments;



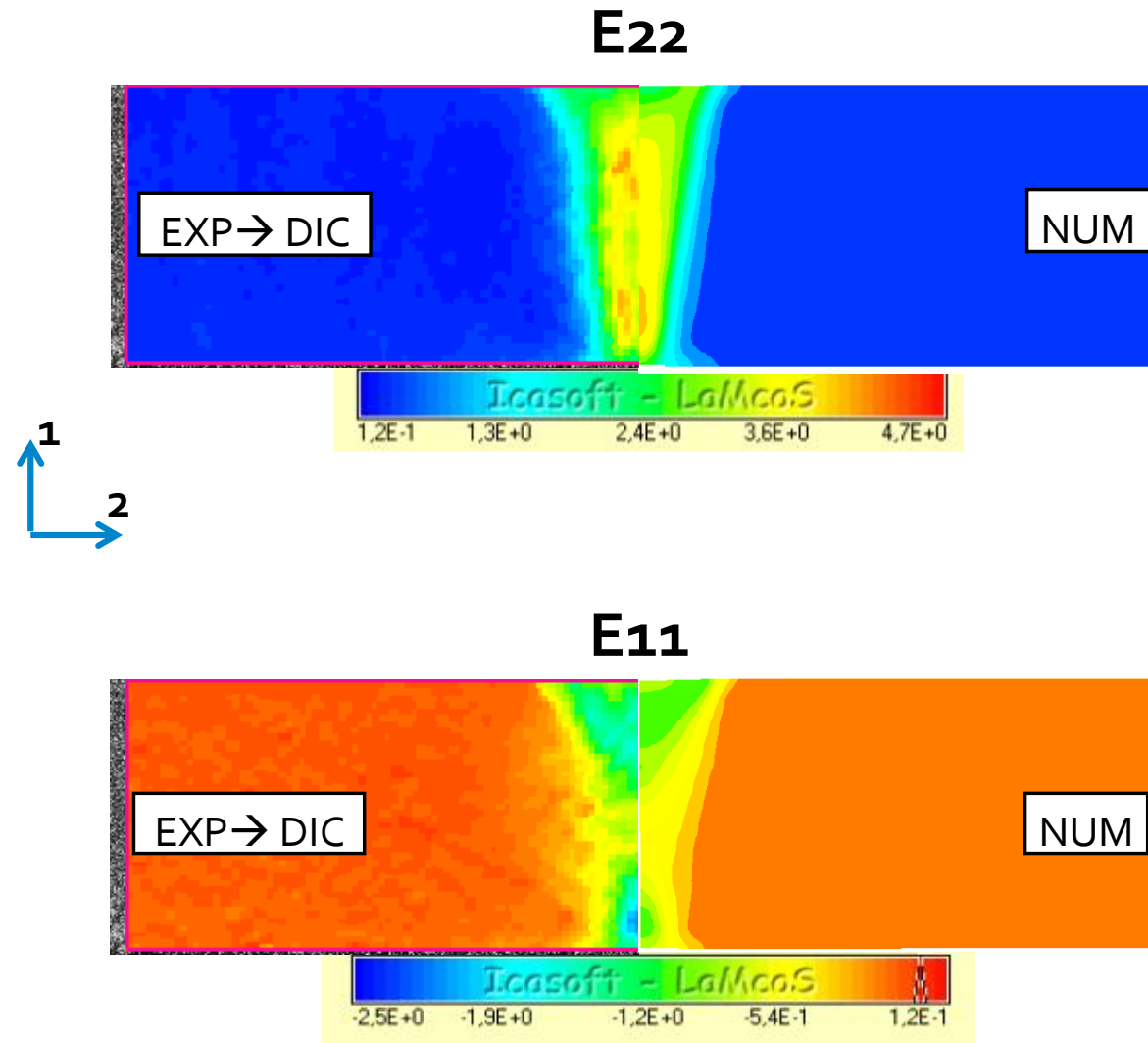
(b)

(b) for the MT=560°C treatment as a function of the cycle number.

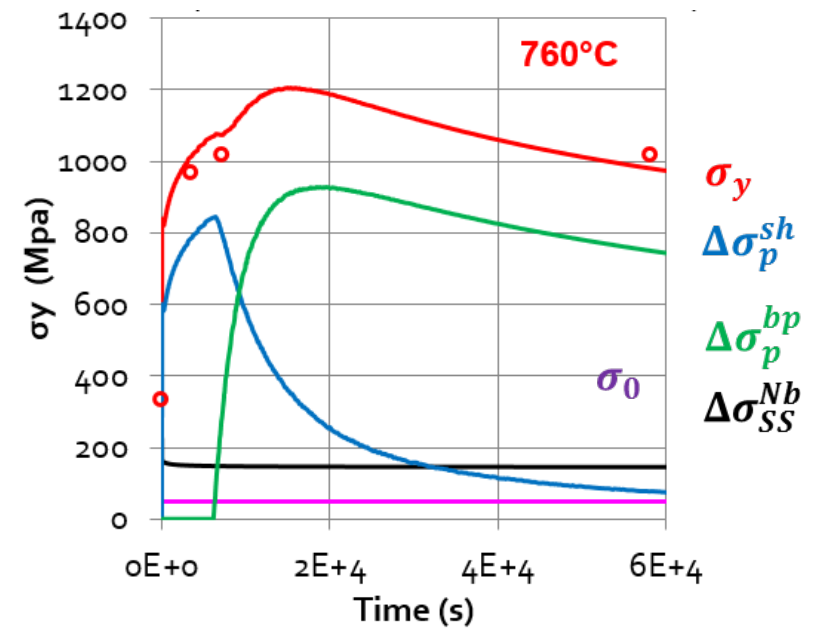
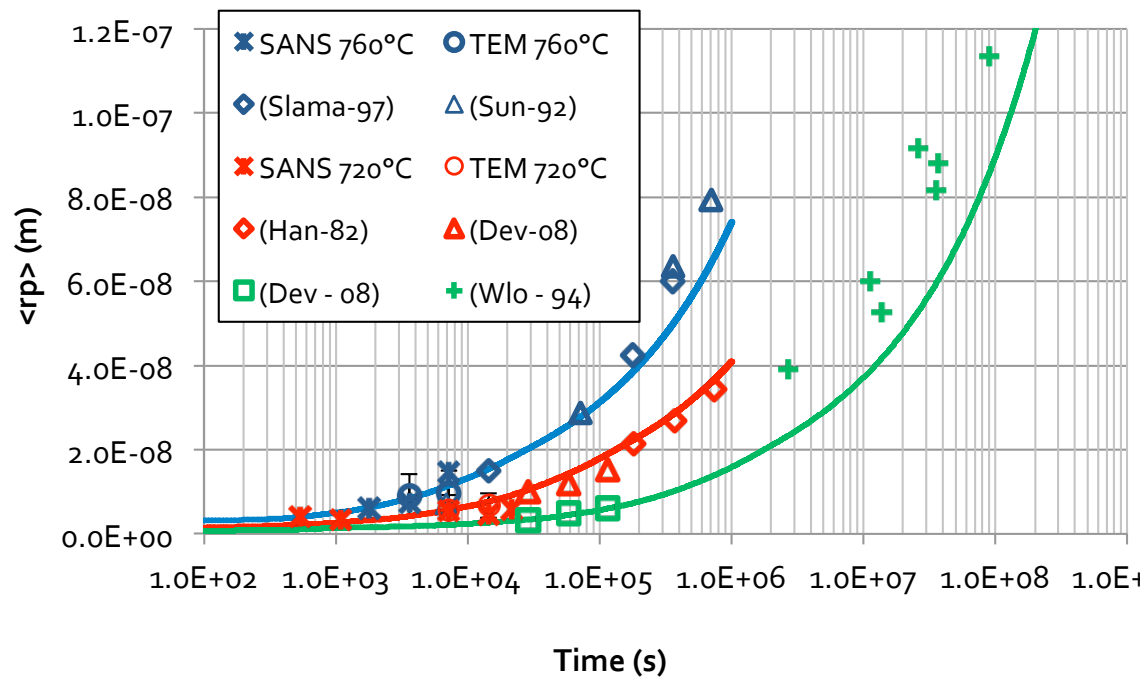
Tensile test on a weld joint (AA6061-T6)



[Acta2016]



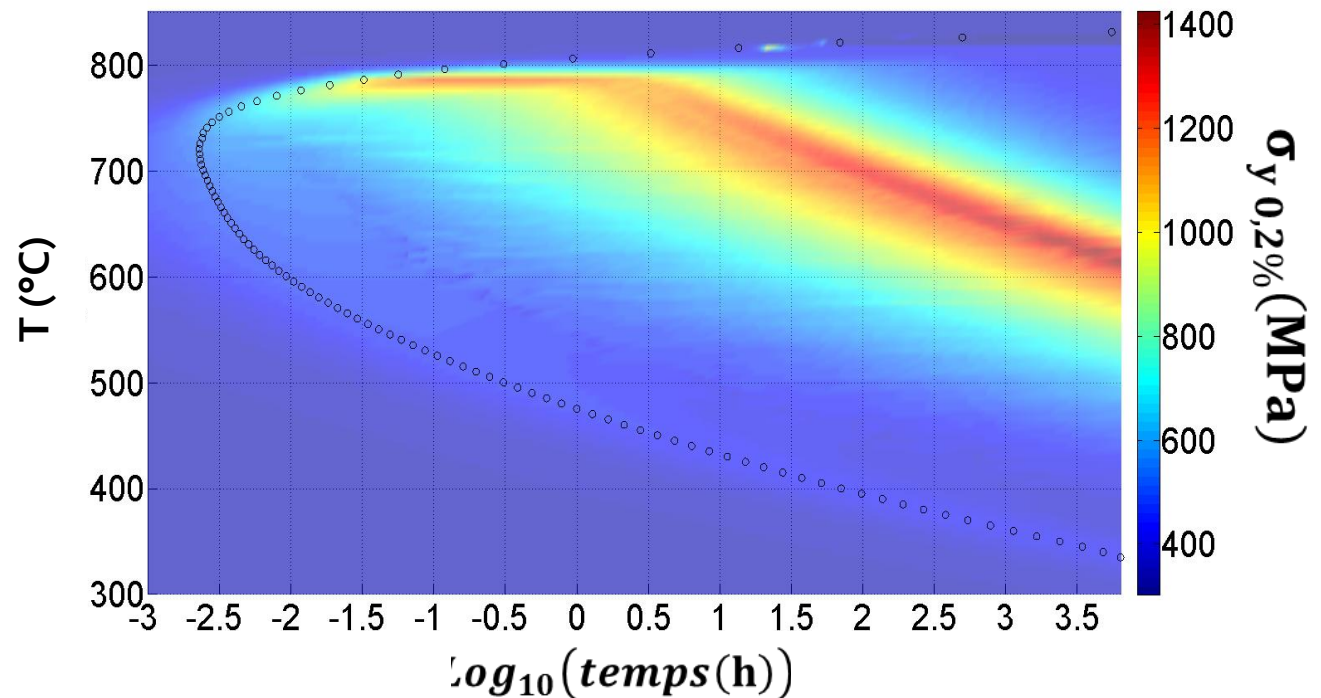
Inconel 718 [Thèse Alexandre Balan – INSA, LaMCoS/Mateis]



Résultats de simulation confrontés aux résultats expérimentaux

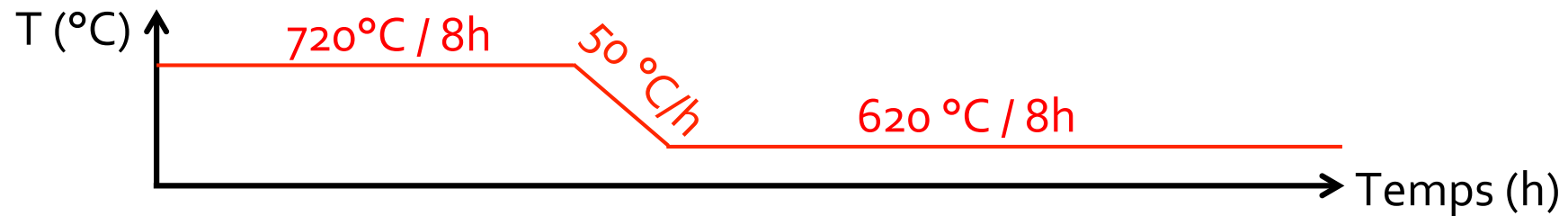
- Inconel 718 connu pour durcissement lent [*Lingenfeler-89*]
- Précipitation rapide mais durcissement lent
- Pic de précipitation à 720°C (≈ 8s) mais durcissement max ≈ 40h

■ Diagramme TTT avec σ_y en chaque point :



Application à un cas industriel : soudage TIG et plasma

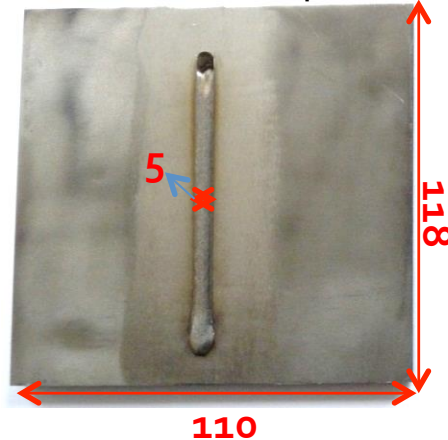
- 2 plaques en Inconel 718 prélevées dans le lopin de base (état ER) + **950°C/1h/air**
- TT de pré-soudage :



- Soudage :
(mesures en mm)

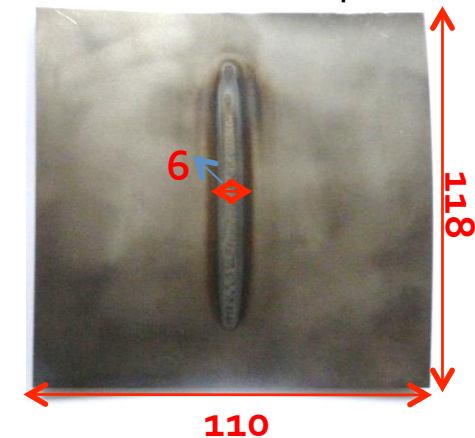
Soudage par
plasma

Tôle de 5 mm d'épaisseur



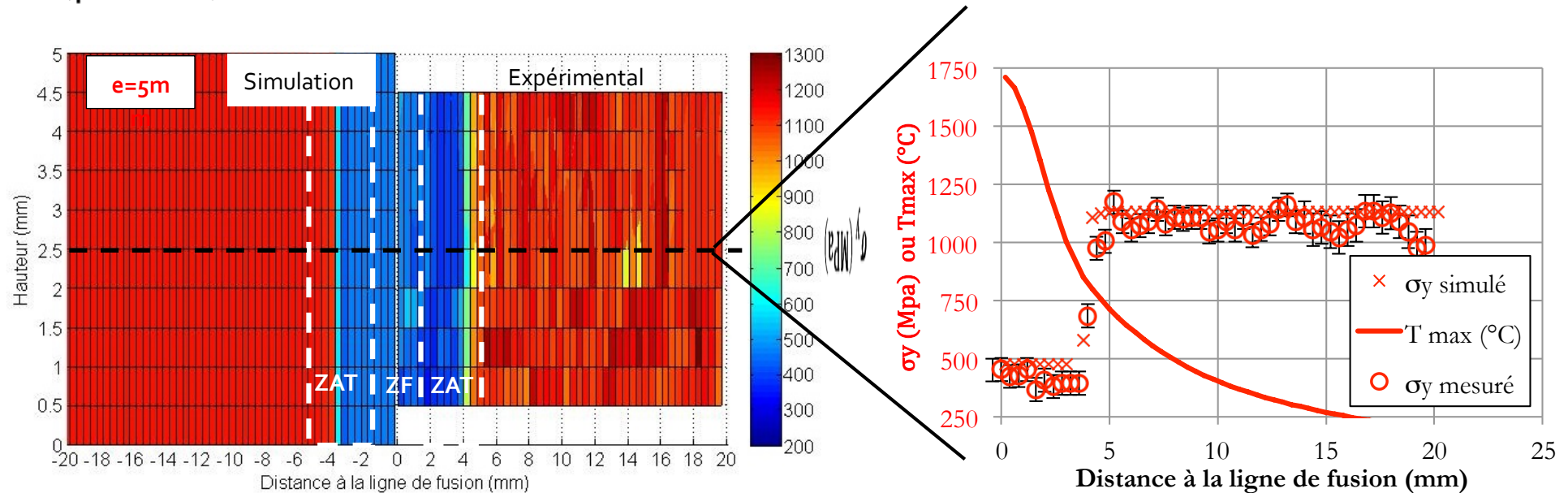
Soudage TIG

Tôle de 2 mm d'épaisseur



Application à un cas industriel : soudage TIG et plasma

- Résultats de simulation Vs mesures de dureté : plaque de 5mm d'épaisseur (plasma)



- Très bonne prédiction de l'évolution de σ_y

Conclusions

- Modélisation métal-mécanique
 - Mise en place modèle physique de limite d'élasticité
 - Confrontation à des essais de duretés sur joints soudés
 - Validation du modèle par corrélations d'images sur essais de traction sur joint soudé

- Comportement cyclique
 - Réalisation d'un dispositif experimental pour essais cycliques après traitements anisothermes
 - Mise en place d'une loi de comportement à écrouissage mixte sur base physique
 - Application et validation sur des traitements anisothermes variés

