Estimation de l'énergie dissipée et de l'énergie stockée lors d'une sollicitation de fatigue à très grand nombre de cycles

Diffraction des rayons X résolue en temps

22 novembre 2018
Matériaux 2018 Strasbourg

Nicolas RANC[a], Vincent JACQUEMAIN[a], Taylan ORS[a], Vincent MICHEL[a], Véronique FAVIER[a], Olivier CASTELNAU[a], Dominique THIAUDIÈRE[b], Cristian MOCUTA[b]

[a] PIMM (UMR CNRS 8006), Arts et Métiers ParisTech, 75013 Paris, France
[b] Synchrotron Soleil, L'Orme de Merisiers, 91192 Gif-sur-Yvette, France

Contexte : fatigue à très grand nombre de cycles

Introduction
Fatigue des matériaux
Objectif scientifiques
Méthode scientifique
Resultats
Conclusion

Fatigue des Matériaux

- Responsable de 80% des ruptures dans le domaine des transports et de la production d'énergie
- Augmentation de la durée de vie : fatigue à très grand nombre de cycles
- Dimensionnement en fatigue : courbe SN (Normes ISO12107, ASTM-E739,...)
- Limitations :
  - Plus d'un mois pour tracer une courbe SN jusqu'à 10^7 cycles ; 3 ans pour un milliard de cycles (10 Hz)
  - Difficulté pour étudier des nombres de cycles au delà de 10^7 (domaine VHCF)

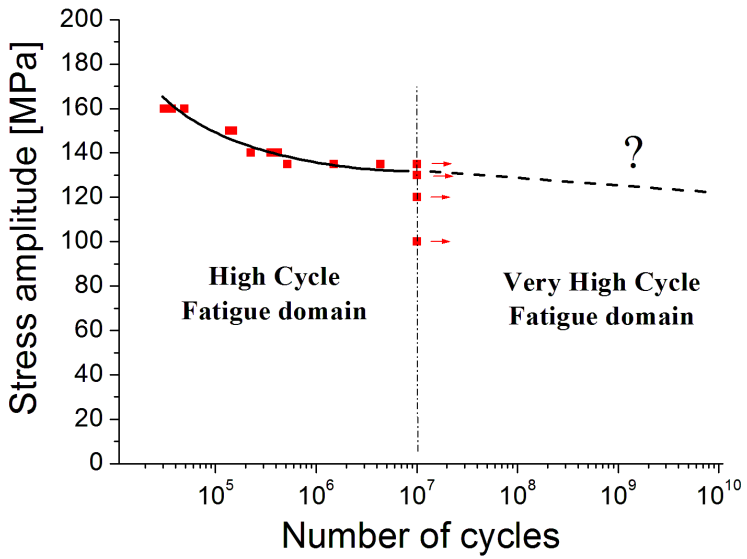


FIGURE – Exemple de courbe SN

Essai de fatigue ultrasonique

- Augmenter la fréquence de sollicitation : 20 kHz
- Durée d'essai : $\approx$ 14 h pour un milliard de cycles

Propriétés en fatigue au delà du milliard de cycles

Introduction
Fatigue des matériaux
Objectif scientifiques
Méthode scientifique
Resultats
Conclusion

Objectif du projet de recherche

- Challenges technologiques
  - réduction de la durée d'essai
  - explorer le domaine VHCF
- Cas des matériaux métalliques
- Developpement d'une nouvelle méthode de dimensionnemlent en fatigue :

Essais de fatigue interrompus + Mesures d'auto échauffement

Principales difficultées scientifiques

Auto échauffement

Dissipation Intrinsèque

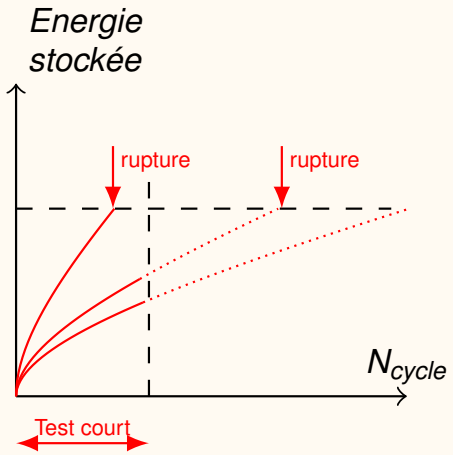
(Mouvement des dislocations)

$\overset{?}{\Longleftrightarrow}$

Endommagement en fatigue

Energie Stockée

(Irreversibilité du mouvement des dislocations)



Introduction
Fatigue des matériaux
Objectif scientifiques
Méthode scientifique
Resultats
Conclusion

Sommaire

1 Introduction
- Fatigue des matériaux
- Objectif scientifiques

2 Méthode scientifique
- Equilibre énergétique
- Mesure de la contrainte
- Estimation du travail mécanique

3 Resultats

4 Conclusion

Introduction
Méthode scientifique
Equilibre énergétique
Mesure de la contrainte
Estimation du travail mécanique
Resultats
Conclusion

Sommaire

1 Introduction

2 Méthode scientifique
- Equilibre énergétique
- Mesure de la contrainte
- Estimation du travail mécanique

3 Resultats

4 Conclusion

Introduction
Méthode scientifique
Equilibre énergétique
Mesure de la contrainte
Estimation du travail mécanique
Resultats
Conclusion

Estimation de l'énergie stockée

- Utilisation d'une machine de fatigue ultrasonique (20kHz)
- Eprouvette en cuivre pur
- Equilibre énergétique et estimation de l'énergie stockée ΔE

$$\Delta E = \mathcal{W} - D_{int}$$

- $D_{int} = \int_{\text{cycle}} d_{int} \mathrm{d}t$ estimé à partir de la mesure de la température et de l'inversion de l'équation de la chaleur :

$$\rho C \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} - \frac{hS}{V}(T - T_a) = d_{int}$$

- $\mathcal{W} = \int_{\text{cycle}} \sigma \dot{\varepsilon} \mathrm{d}t$ estimé à partir de l'évolution de la contrainte et de la déformation pendant un cycle (50 µs) ;
  - la déformation totale est mesurée à l'aide de jauges ;
  - la contrainte est mesurée par diffraction des rayons X.

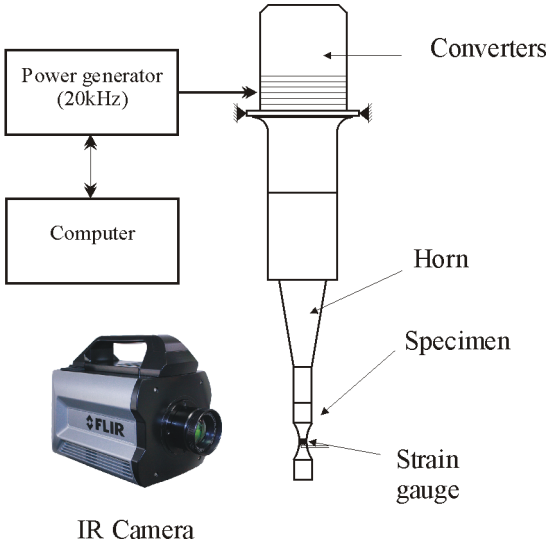


FIGURE – Dispositif experimental

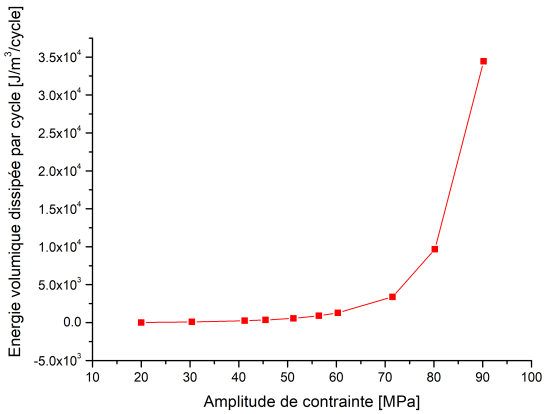


FIGURE – Estimation de la dissipation

Introduction
Méthode scientifique
Equilibre énergétique
Mesure de la contrainte
Estimation du travail mécanique
Resultats
Conclusion

Technique de diffraction des rayons X

- Estimation de la déformation élastique inter-réticulaire ε_{hkl} par mesure de déplacement des pics de Bragg :

$$\varepsilon_{hkl} = \frac{\Delta d_{hkl}}{d_{hkl}} = -\frac{1}{2}\frac{\Delta 2\theta}{\tan\theta}$$

avec θ l'angle de Bragg et d_{hkl} la distance inter-réticulaire entre deux plans adjacents (hkl).

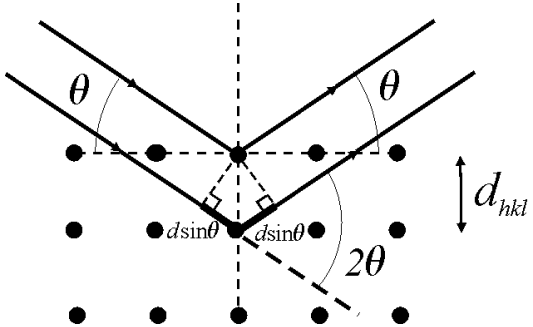


FIGURE – Diffraction des rayons X.

- Mise en place de la machine de fatigue ultrasonique sur le goniomètre 6 cercles de la ligne DiffAbs du synchrotron SOLEIL (énergie de photon :16keV, taille du faisceaux : 300 µm $\times$ 500 µm)
- Observation du cliché de diffraction avec le détecteur XPAD32

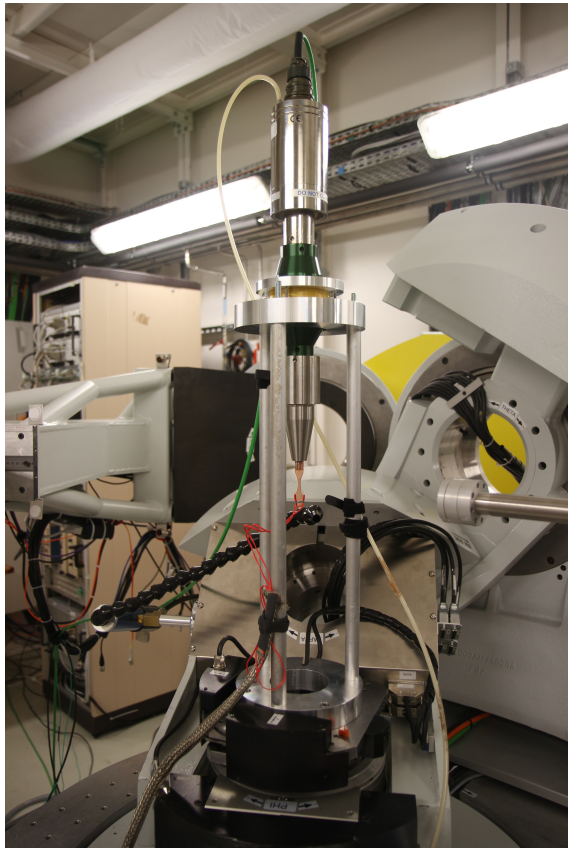
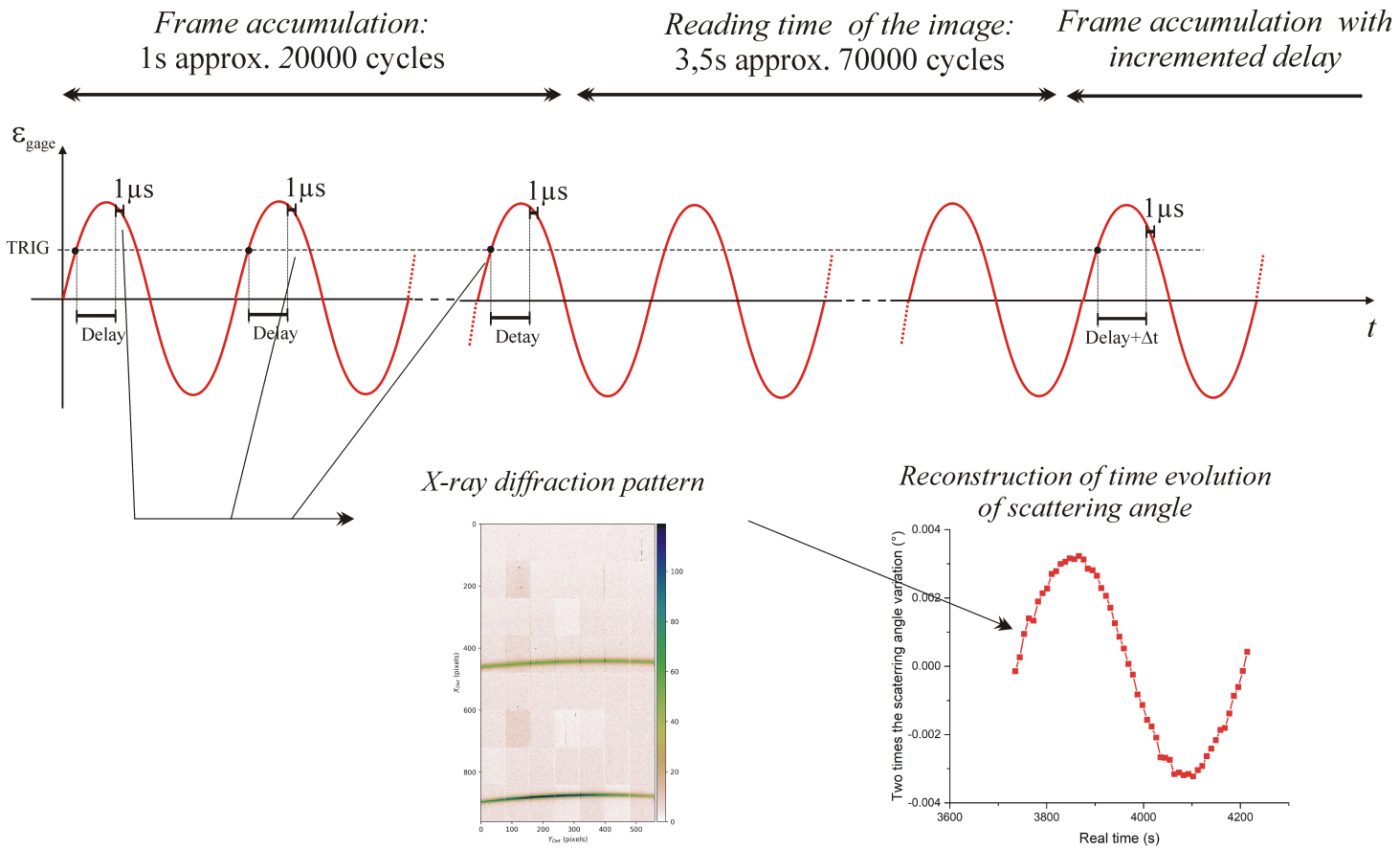


FIGURE – Dispositif expérimental.

Methode stromboscopique et accumulation

Introduction
Méthode scientifique
Equilibre énergétique
Mesure de la contrainte
Estimation du travail mécanique
Resultats
Conclusion



- Limitation de la résolution spaciale :
  - Temps d'ouverture de la caméra : 1 µs (100 ns)
  - Frequence d'acquisition : 500 ns
  - Jitter provenant du déclenchement sur le signal d'entré

Estimation de la contrainte

Introduction
Méthode scientifique
Equilibre énergétique
Mesure de la contrainte
Estimation du travail mécanique
Resultats
Conclusion

- Estimation de la contrainte par mesure du déplacement des pics de Bragg :

$$\sigma_{11} = -\frac{\varepsilon_{hkl}}{S_1} = -\frac{1}{S_1}\frac{\Delta 2\theta}{2\tan\theta}$$

avec S_1 une constante radio cristallographique et θ l'angle de Bragg.

- Les constantes radio-cristallographiques sont calculées en utilisant un modèle d'homogénéisation autocohérent avec un modèle élastique anisotrope à l'échelle des grains.

Materiau	Plan	S_1 [MPa^{-1}]	2θ [deg]
Cuivre	{220}	$2,55.10^{-6}$	35,517
Cuivre	{311}	$2,74.10^{-6}$	41,900

TABLE – Constantes radio-cristallographiques et angles de Bragg.

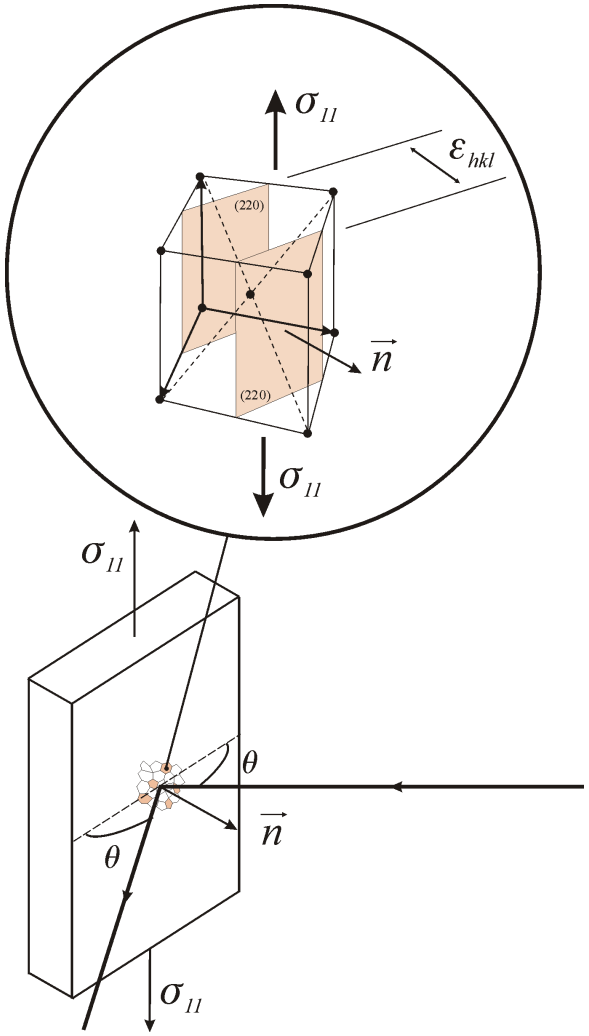


FIGURE – Constantes radio-cristallographiques.

Estimation du travail mécanique

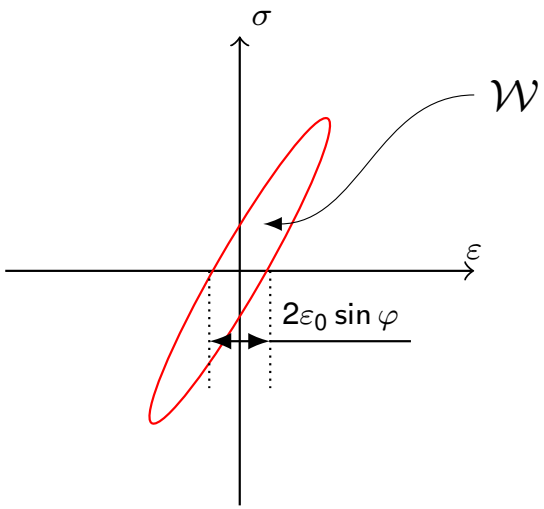
Introduction
Méthode scientifique
Equilibre énergétique
Mesure de la contrainte
Estimation du travail mécanique
Resultats
Conclusion

- Méthode d'estimation du travail
  - Si l'on suppose des évolutions harmoniques pour la contrainte et la déformation :

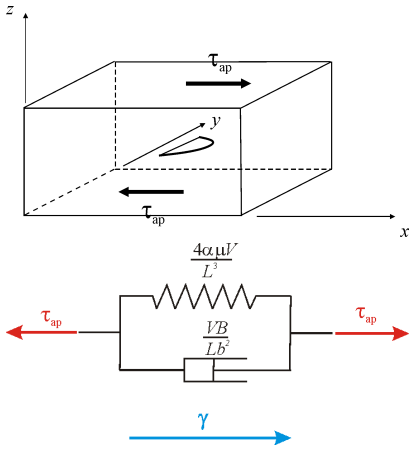
$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t \quad \text{et} \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

  - Le travail peut être estimé avec l'équation suivante :

$$\mathcal{W} = -\pi \sigma_0 \varepsilon_0 \sin \varphi$$



- Ordre de grandeur du décalage temporel et de la phase
  - Dans le cas d'un mouvement cyclique des dislocations



  - Estimation du décalage temporel :

$$\sin \phi = -4\tau f$$

avec f la fréquence de sollicitation et $\tau = \dfrac{BL^2}{\alpha \mu b^2}$ un temps caractéristique du mouvement cyclique des dislocations

  - Application numérique pour le cuivre pur $4\tau = 240$ ns et $\varphi = 0{,}27°$

Introduction

Méthode scientifique

Resultats

Conclusion

Sommaire

1 Introduction

2 Méthode scientifique

3 Resultats

4 Conclusion

Introduction
Méthode scientifique
Resultats
Conclusion

Resultats

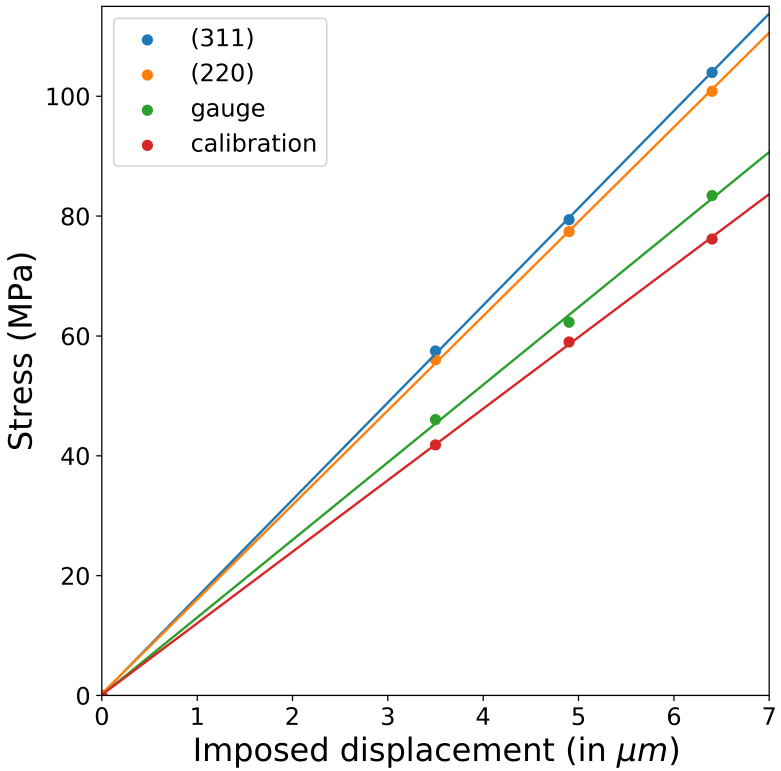


FIGURE – Estimation de l'amplitude de contrainte par différentes méthodes.

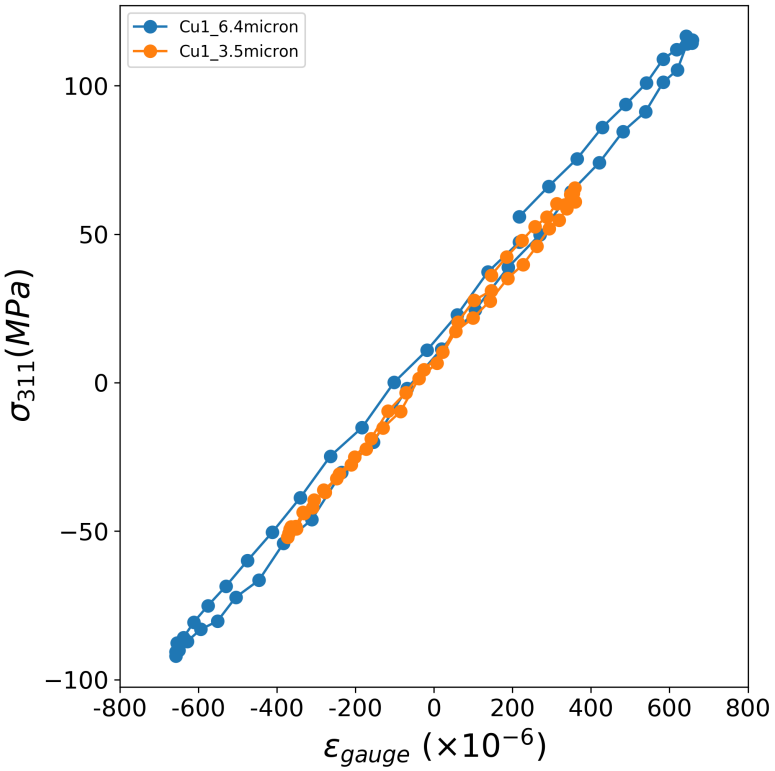


FIGURE – Evolution de la contrainte en fonction de la déformation.

- Très bonne linéarité
- Les deux pics donnent des résultats très proches.
- Sur-estimation des contraintes - estimation des constantes radio-cristallographiques ? effet de texture ?

- Faible déphasage contrainte - déformation (142 ns et 221 ns)
- Augmentation de l'aire de la boucle avec les contraintes.
- Améliorer la résolution temporelle ?

Introduction

Méthode scientifique

Resultats

Conclusion

Sommaire

1 Introduction

2 Méthode scientifique

3 Resultats

4 Conclusion

Conclusion

Introduction
Méthode scientifique
Resultats
Conclusion

Conclusion

- La DRX résolue en temps permet de reconstruire l'évolution de la contrainte pendant un cycle en fatigue ultrasonique et d'observer une ouverture du cycle dans un diagramme contrainte déformation.
- Les résultats montrent une mauvaise estimation des constantes radio-cristallographiques.
- Améliration de l'estimation des constantes radio cristallographiques et de la résolution temporelle.

Remerciements

- Cette étude a été menée dans le cadre du projet de recherche européen FastMat (fast determination of fatigue properties of material beyond one billion cycles).
- Le projet FasMat est financé par le European Research Council (ERC) de la Commission Européenne [programme de recherche et d'innovation Horizon 2020] (grant agreement No 725142)

European Research Council
Established by the European Commission