CIRIMAT Toulouse

COnCOrD GdR 2081
COuplage méCanique Oxydation Diffusion

Journées Annuelles 2021
7-9 juillet, La Rochelle

Oxydation d'un alliage de titane sous différents chargements mécaniques

Dominique Poquillon, Kevin Cavé, Sylvain Vallot, Damien Texier, Daniel Monceau, Nicolas Chanfreau, Moukrane Dehmas, Benoit Malard

ICA INSTITUT CLÉMENT ADER

SAFRAN

DESY.

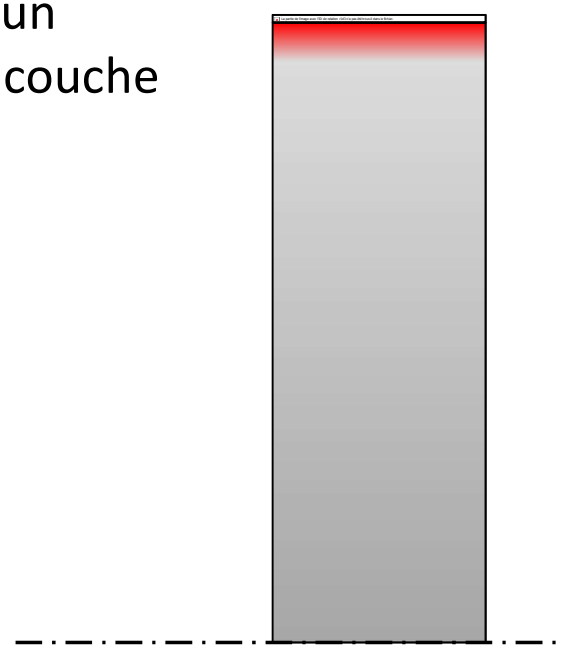
Centre de microcaractérisation Raimond CASTAING

Plan

- Contexte et motivations
- Expérimentations
  - Oxydations
  - Caractérisations
- Simulations EF
- Discussion et perspectives

Motivations

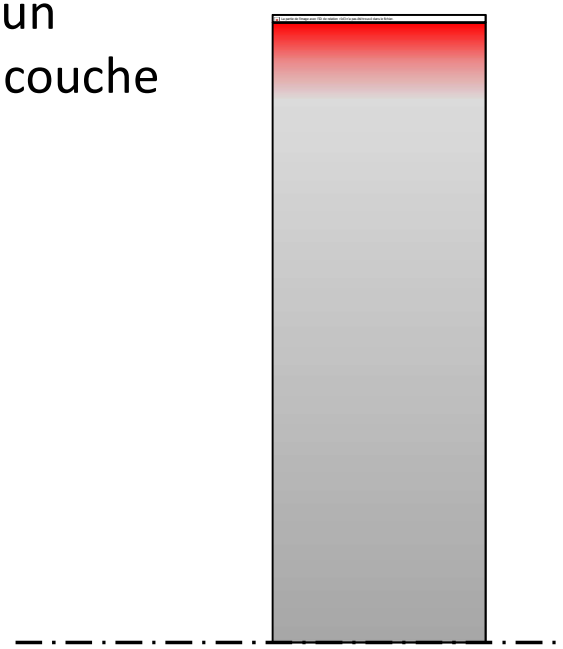
- Alliages de titane : bonne résistance à la corrosion, module spécifique élevé.
- Au-dessus de 450°C, l'oxydation doit être prise en compte pour améliorer l'évaluation de la durée de vie des composants.
- En particulier pour les expositions à long terme, l'oxydation entraîne la formation d'une couche d'oxyde ainsi qu'un enrichissement en oxygène dans le métal sous cette couche d'oxyde.



Motivations

- Alliages de titane : bonne résistance à la corrosion, module spécifique élevé.
- Au-dessus de 450°C, l'oxydation doit être prise en compte pour améliorer l'évaluation de la durée de vie des composants.
- En particulier pour les expositions à long terme, l'oxydation entraîne la formation d'une couche d'oxyde ainsi qu'un enrichissement en oxygène dans le métal sous cette couche d'oxyde.
- Améliorer le design des pièces peu épaisses

=> Fabrication additive > paroi mince

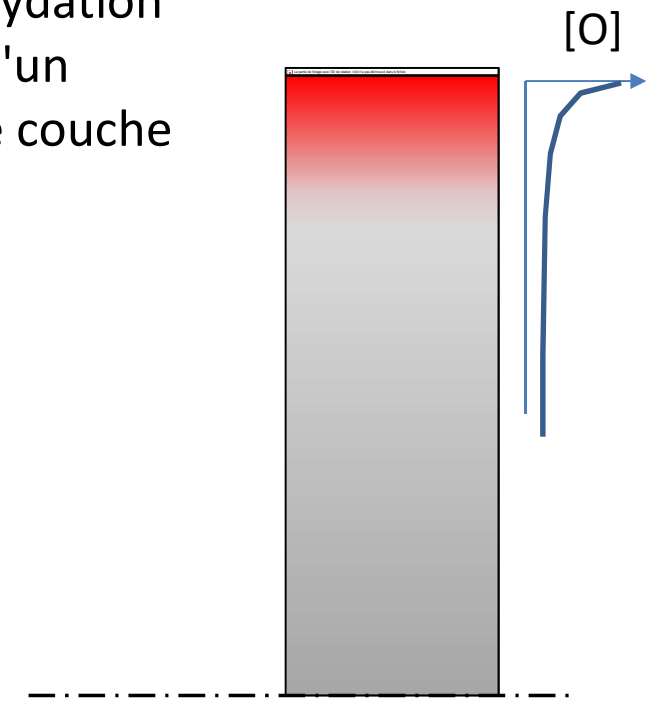


Motivations

- Alliages de titane : bonne résistance à la corrosion, module spécifique élevé.
- Au-dessus de 450°C, l'oxydation doit être prise en compte pour améliorer l'évaluation de la durée de vie des composants.
- En particulier pour les expositions à long terme, l'oxydation entraîne la formation d'une couche d'oxyde ainsi qu'un enrichissement en oxygène dans le métal sous cette couche d'oxyde.
- Améliorer le design des pièces peu épaisses

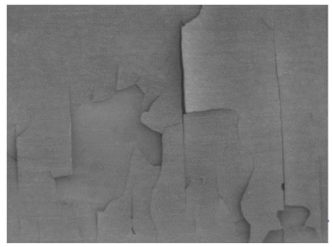
⇒ Fabrication additive > paroi mince

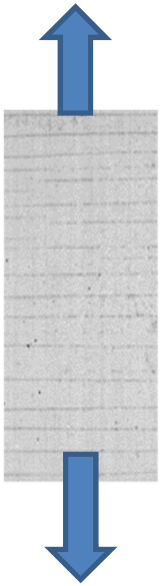
- Impact sur les propriétés mécaniques
  - Elasticité
  - Fatigue
  - Plasticité et visoplastiité
  - Ténacité
- Couplage oxidation - durabilité



Motivations

- Effet d'environnement connu en fatigue-fluage mais pas de modification rapportée de la profondeur de la zone enrichie sous sollicitation mécanique par rapport à celle observée sans contrainte
- Effet sur l'adhérence et la fissuration de l'oxyde
  - Singularité géométrique
  - Cyclage thermique
  - Thermomécanique





Motivations

- Des études antérieures centrée sur l'effet des contraintes sur la croissance de la couche d'oxyde (oxydation d'éprouvettes en flexion)

- Game de température (450 - 650°C) rendant difficile l'observation dans les sollicitations couplée oxydation - traction même fluage

Contraintes hétérogènes

- Le module d'Young augmente avec la concentration d'oxygène, ce qui modifie la répartition des contraintes
- 1990: Lee & Welsch [1] dépendance linéaire (Ti-6Al-4V)
- 2015 Baillieux [2] Ti6242

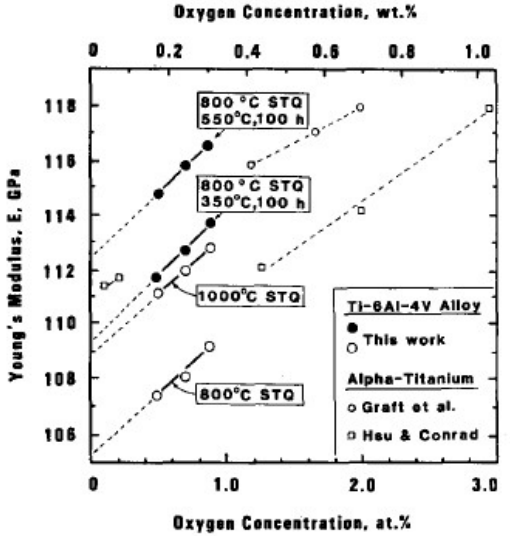


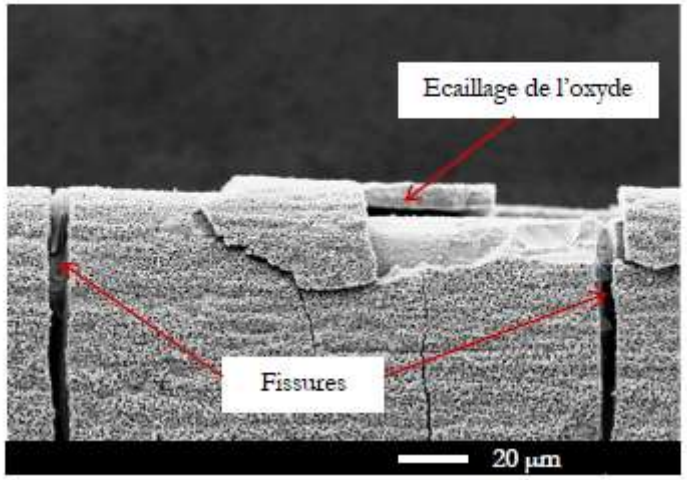
Fig. 12. The dependence of Young's modulus of Ti–6Al–4V alloy is shown as a function of oxygen concentration and heat treatments. The oxygen dependences of unalloyed α-Ti [5, 6] are shown for comparison.

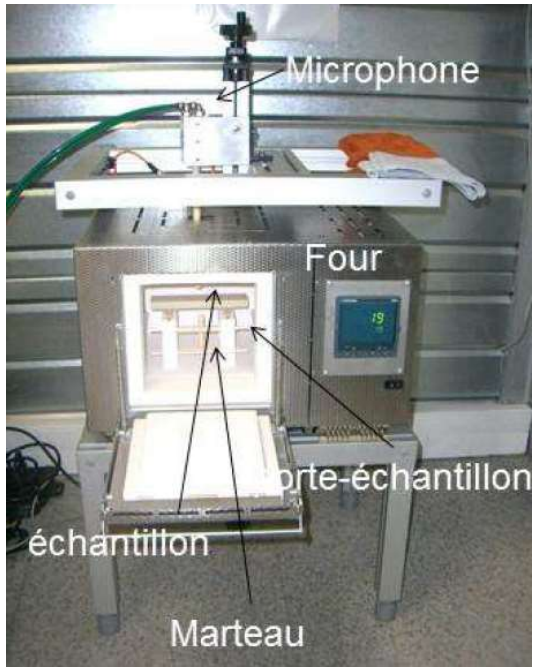
[1] LEE, Y. T. et WELSCH, G. Materials Science and Engineering: A, 1990, 128/1, 77-89
[2] J. BAILLIEUX Ph.D, 2015 Toulouse INP.

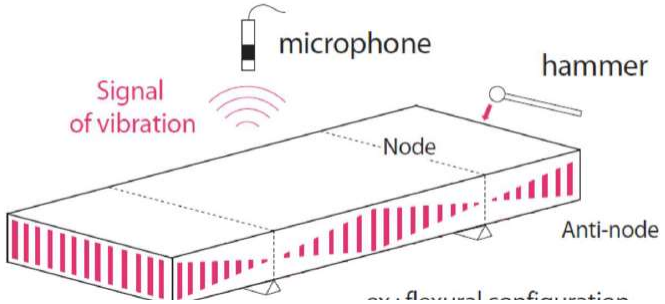
Contrainte sans fissure

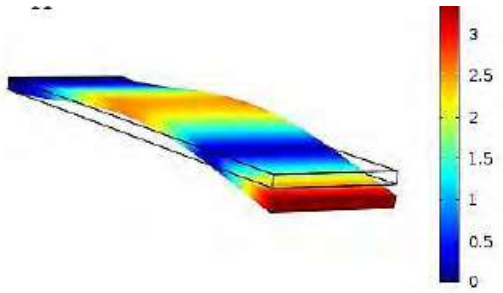
- Thèse J. Baillieux (INP 2015)
- RFDA 20-650°C (ASTM E 1876)
- Fluage

➢ ε limite





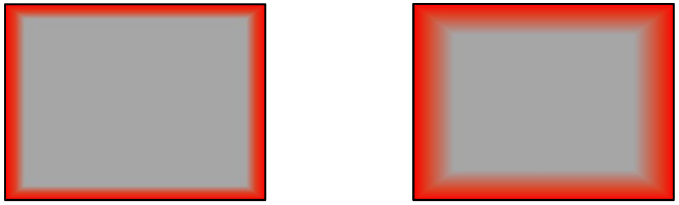


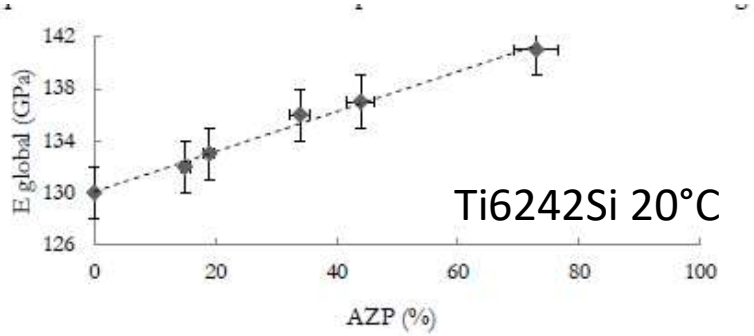


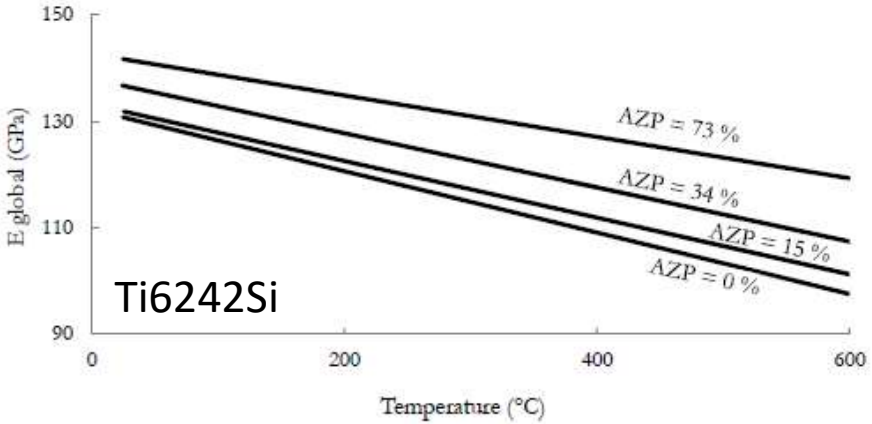
Données macroscopiques

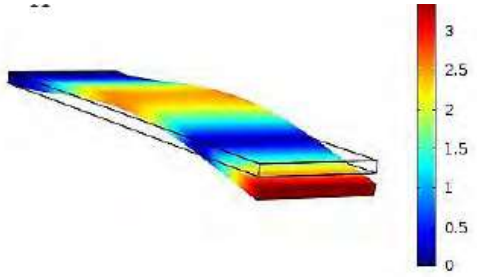
- Comportement élastique supposé isotrope
- AZP = proportion enrichie

(seuil via dureté)









$$E(GPa) = -5{,}81\ 10^{-2} \times T(°C) + 1{,}88 \times [O](\%\ at.) + 130{,}9$$

Hypothèse : profil [O] = diffusion classique Fick =>erfc

Données macroscopiques

⇒ Modélisation de E= E[O] via dépendance linéaire à la concentration locale en O

$$E(GPa) = -5{,}81\ 10^{-2} \times T(°C) + 1{,}88 \times [O](\%\ at.) + 130{,}9$$

⇒ Possibilité de faire une estimation, via un calcul élastique, des contraintes locales, en négligeant l'effet mécanique de la couche d'oxyde

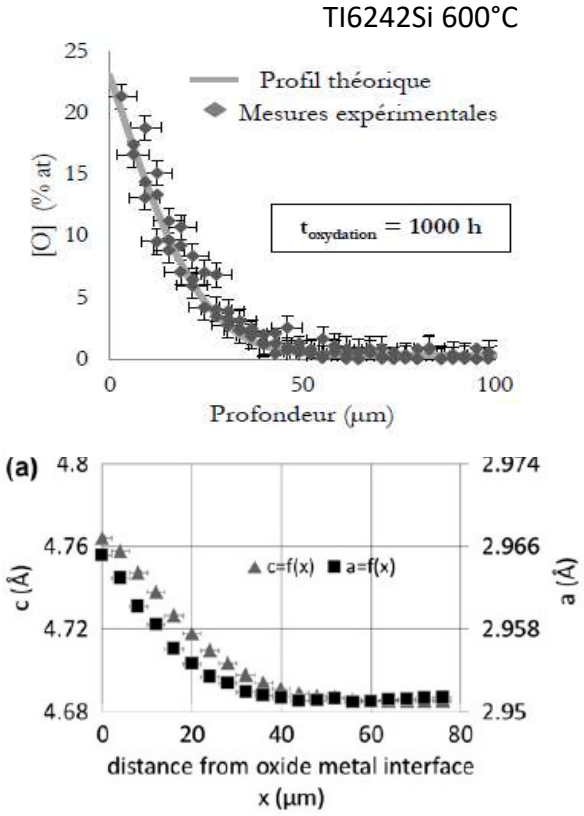
⇒ Fort effet de l'AZP

Echelle locale : le gradient

- Caractérisations croisées (Ti50A et Ti6242Si)
  - Microsonde de Castaing [2,3]
  - Microdureté [2 - 4]
  - DRX synchrotron [2,3]
- Sections transverses
  - Biais de préparation écrouissage + risque de modification de [O]
- Limite de résolution
- Analyse locale => dispersion

=> atout fort des DRX synchrotron (haute énergie, volume sondé, résolution spatiale)

O interstitiel sites octaédriques de la phase α [1]



[1] Wu et Trinkle,, Phys. Rev. Lett., 2011 vol. 107, no 4, p. 045504,
[2] Baillieux et al. Philos. Mag. Lett., 2015, vol. 95 (n° 5). pp. 245-252
[3] Baillieux et al. J.of Appl. Crystallogr., 2016, vol. 49 (n° 1). pp. 175-181.
[4] Vaché et al. Oxid. Met. 2020, 93 (1-2). 215-227.

Méthodologie

Jeudi 8 juillet 2021	
9h30-10h **C. Duhamel**	Effet d'un chargement mécanique sur l'oxydation intergranulaire d'alliages base nickel
10h-10h30 **A. Casadebaigt**	Influence de l'oxydation à 500 – 600 °C sur les propriétés mécaniques en traction de l'alliage de titane TA6V issu de fabrication additive
10h30-10h55 **T. Sanviemvongsak**	Développement d'une nouvelle plateforme d'essais destinée à étudier les phénomènes de corrosion chaude
10h55-11h15	**Pause**
11h15-11h40 **B. Malard**	Évaluation des gradients de paramètres de maille et de contraintes. Méthodologie et exemples d'application dans des matériaux **multicouches et des alliages de titane oxydés.**
11h40-12h05 **M.F. Slim**	Évaluation du gradient de contraintes résiduelles dans un acier austénitique inoxydable après exposition au sodium de carburation
Déjeuner	**Sachets déjeuner**
13h30-14h05 **G. Abadias**	Genèse et relaxation des contraintes lors de la croissance de films minces polycristallins
14h05-14h30 **J. Favergeon**	Identification de lois de comportement phénoménologiques à l'aide d'essais in-situ de déflexion de lames minces d'alliages métalliques oxydés à haute température
14h30-14h55 **B. Panicaud**	Genèse des déformations et dynamique des contraintes
15h	**Clôture du séminaire**

Effet cœur coquille

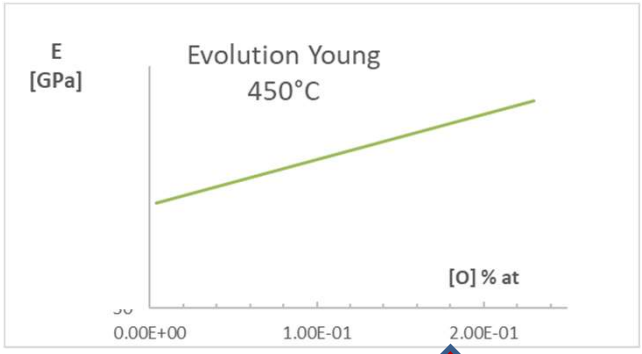
- Simulations EF
- D'autant plus marqué en surface en début d'oxydation

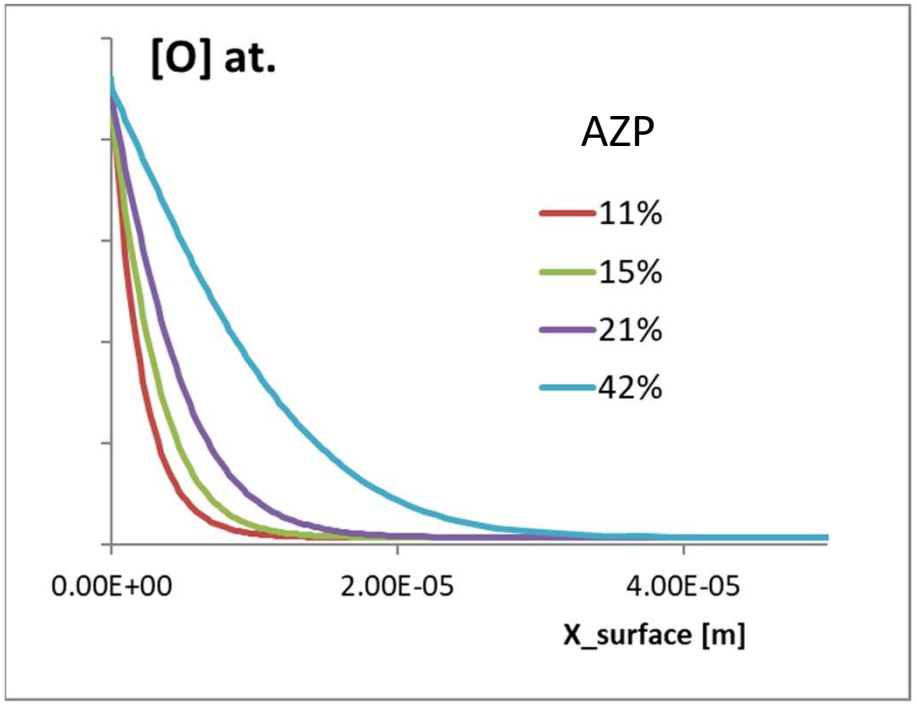
= > effet différent pour une même durée d'oxydation sur un composant de 0,2 mm 0,5 mm 1 mm

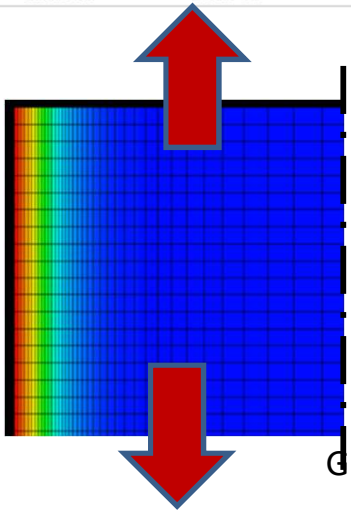
=> illustration

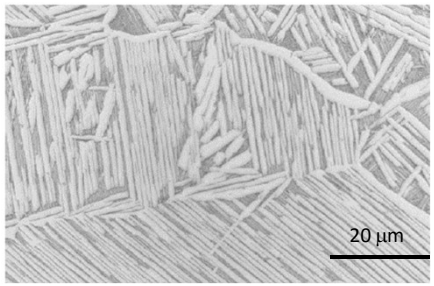
Ti6242S Thèse K Cavé

- Eprouvette de 100 µm sous différentes profils d'enrichissement en oxygène + 100 MPa
- EF iso-déformation



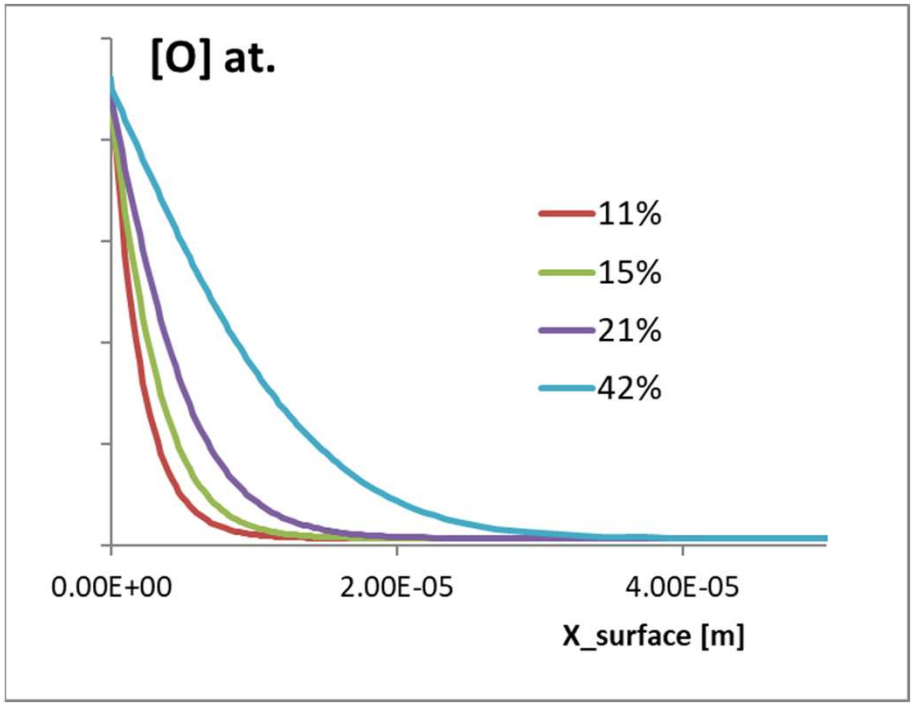


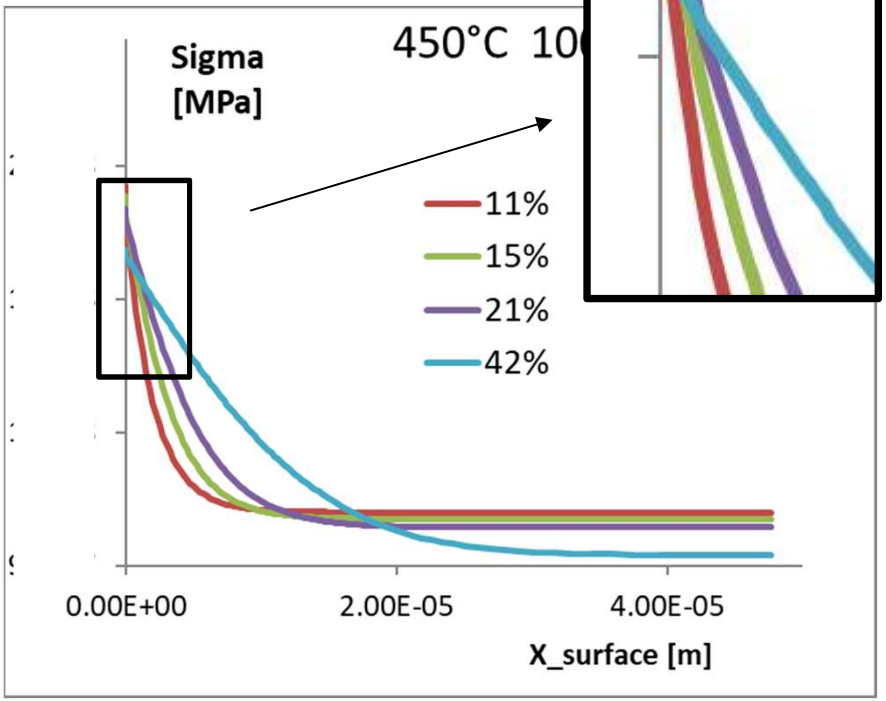




Ti6242 Thèse K Cavé

- Eprouvette de 100 µm sous différentes profils d'enrichissement en oxygène + 100 MPa
- EF iso-déformation



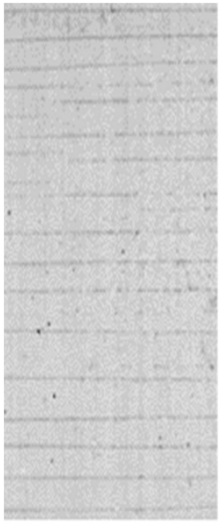


Objectif de l'étude

- Faire des oxydations iso durée 120 h à 650°C

= > Profondeur affectée 25-30 µm

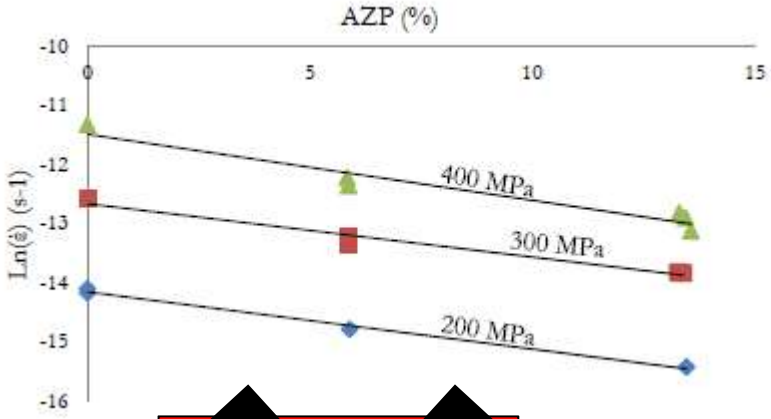
- Sur un banc de fluage
- Pour des chargements calculés pour ne pas initier de fissure
- Faire des mesures croisées
  - Microsonde de Castaing
  - Microdureté
  - DRX synchrotron

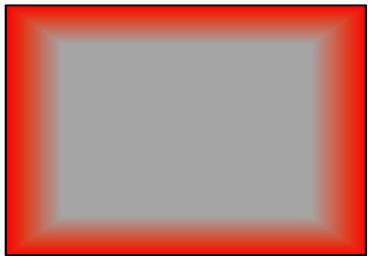


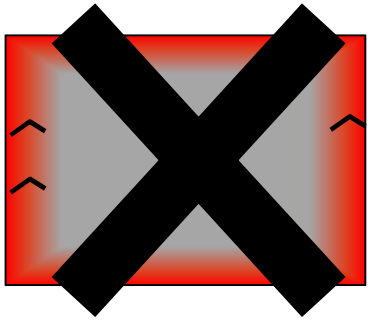
Le dimensionnement en fluage

- Les acquis de la thèse de J Baillieux
- Vitesses de fluage 500 550 600°C pour ≠ AZP
- Les courbes de traction en température du Ti6242 Thèse K Cavé

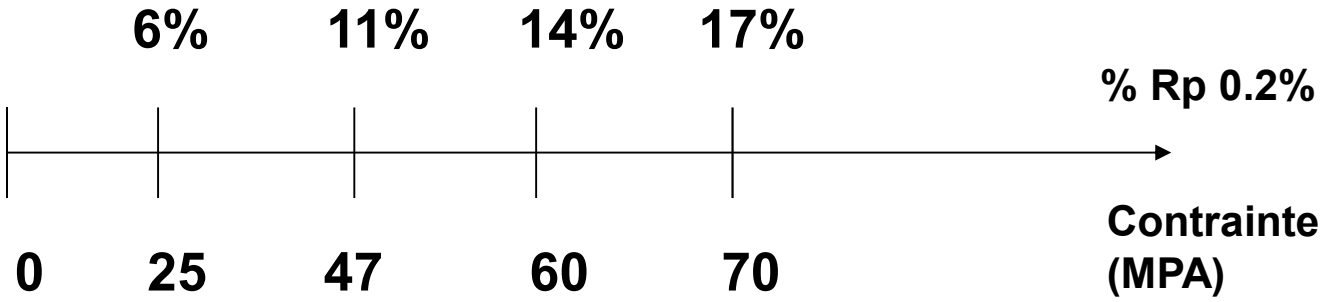
⇒Chargements calculés pour limiter la déformation en 120 h, front de dif. plan

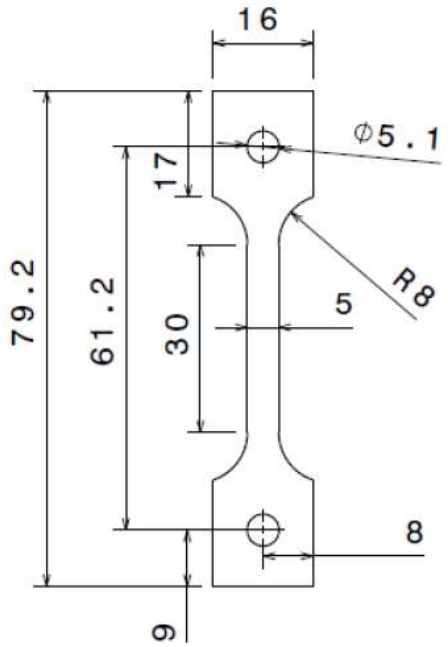






Le dimensionnement en fluage

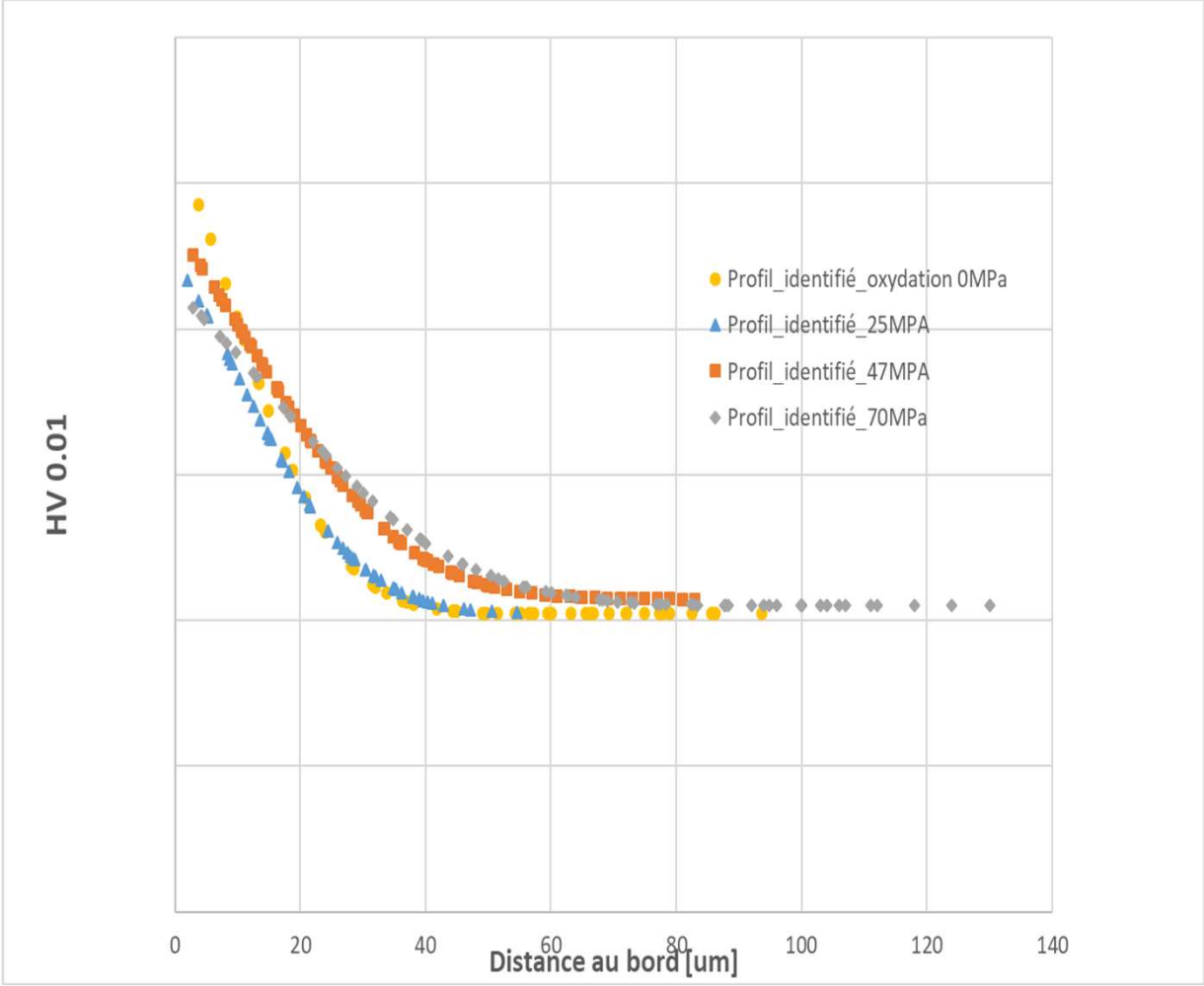




- Objectifs : fluage sans fissuration des éprouvettes
  - ε_tot < 1%
  - gamme de vitesses de fluage [10^{-9} s^{-1}; 10^{-8} s^{-1}]

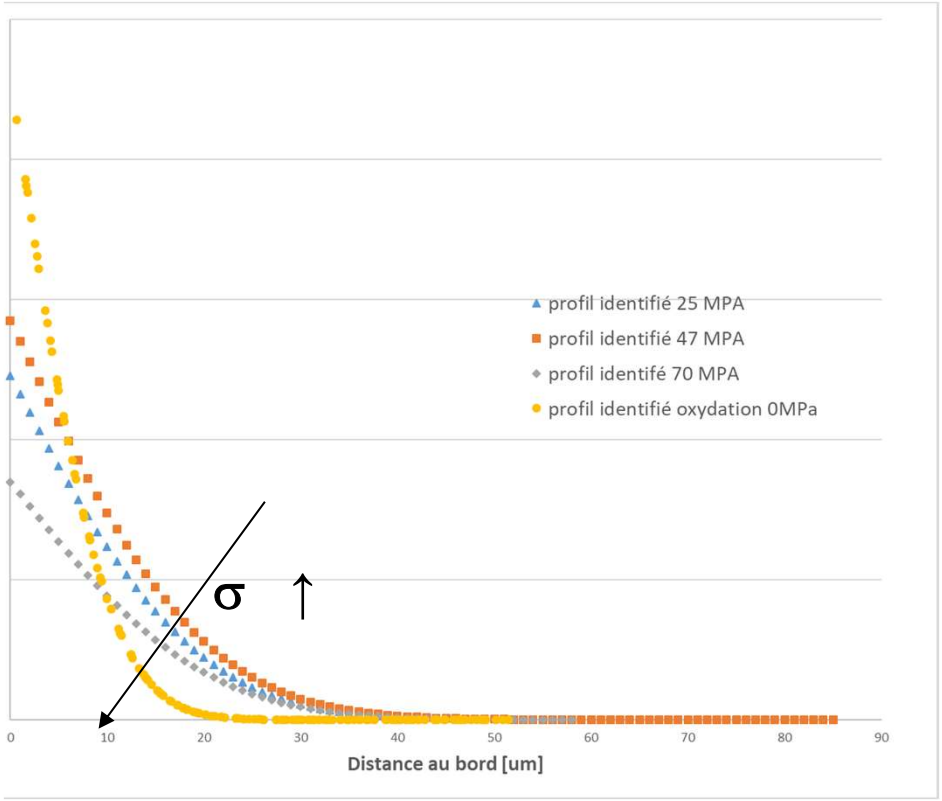
Microdureté

Effet de la contrainte sur la courbure du profil ?



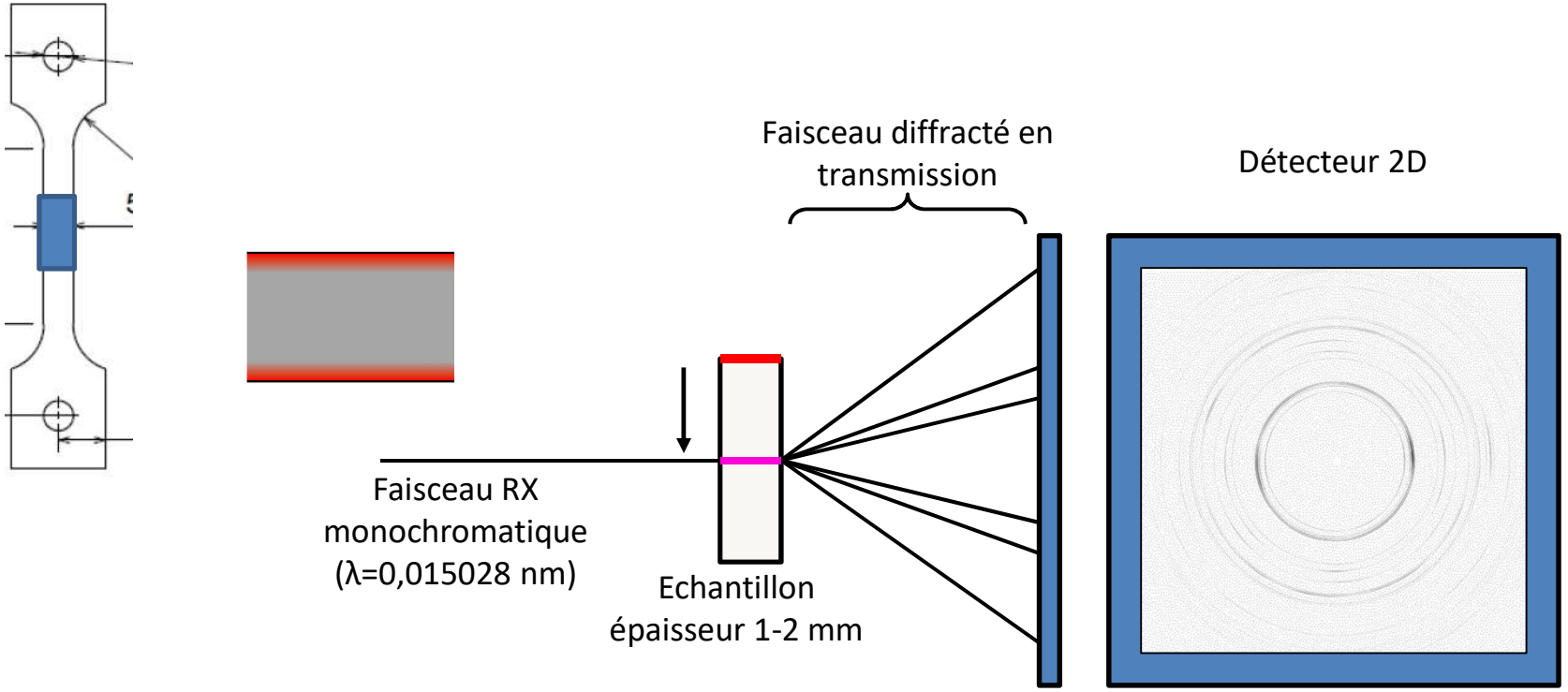
Microsonde

- Profils moyens (au moins 3 courbes reproductibles)
- 2 effets :
  - Sur le profil
  - Sur la concentration à l'interface Métal/oxyde



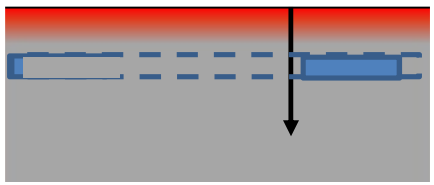
DRX Synchrotron

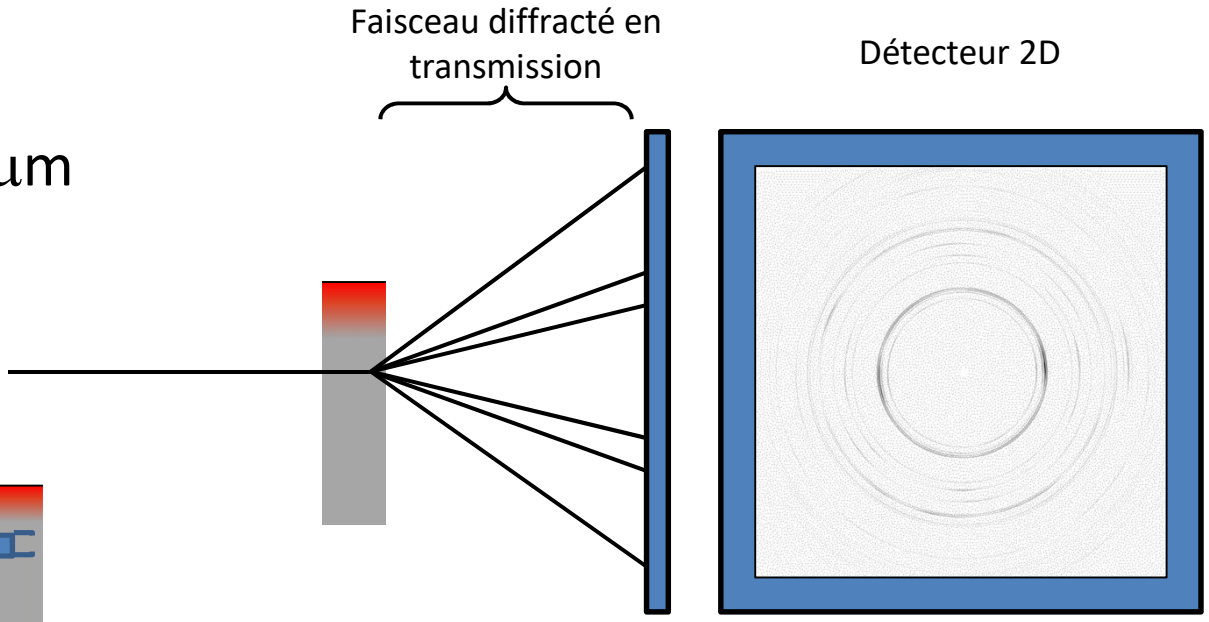
- Ligne P21.4 décembre 2020
- Nicolas Chanfreau & Guillaume Geandier



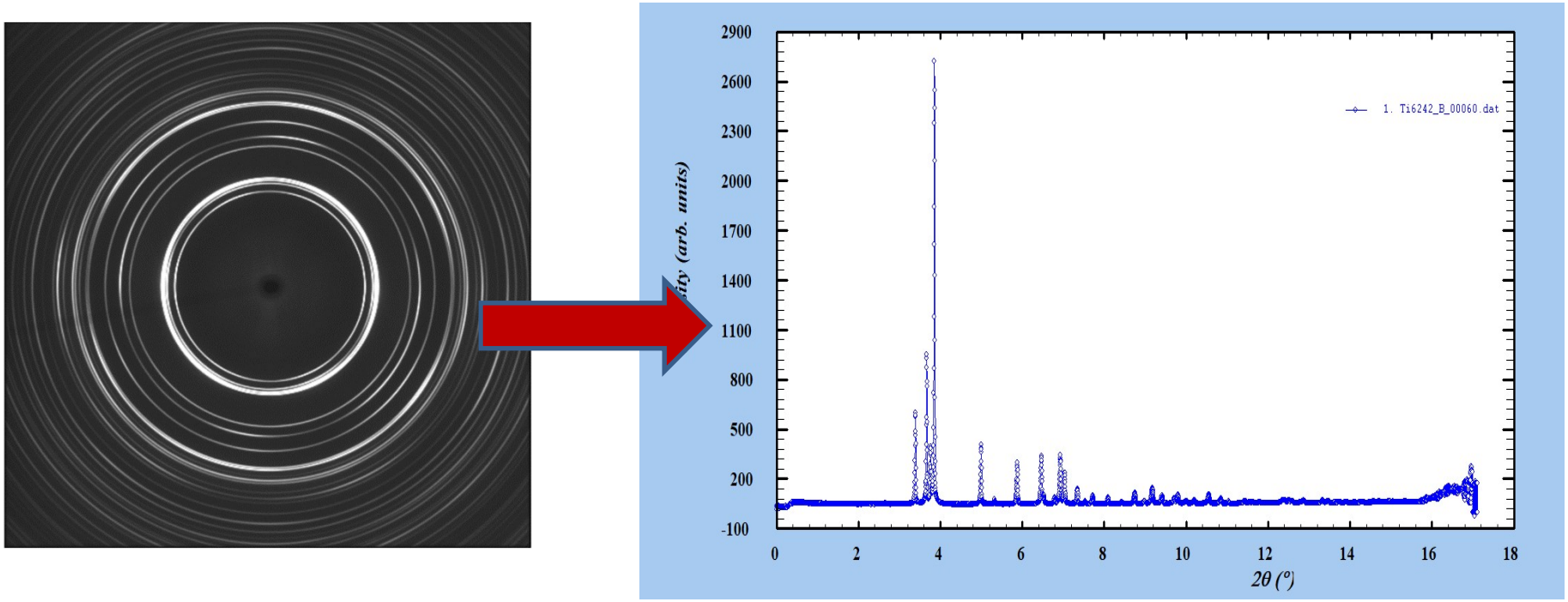
DRX Synchrotron

- Ligne P21.4 décembre 2020
- Nicolas Chanfreau & Guillaume Geandier
- Alignement
- Scans
  - Fenêtre 2 x 7µm
  - Balayage
  - Pas 1 µm





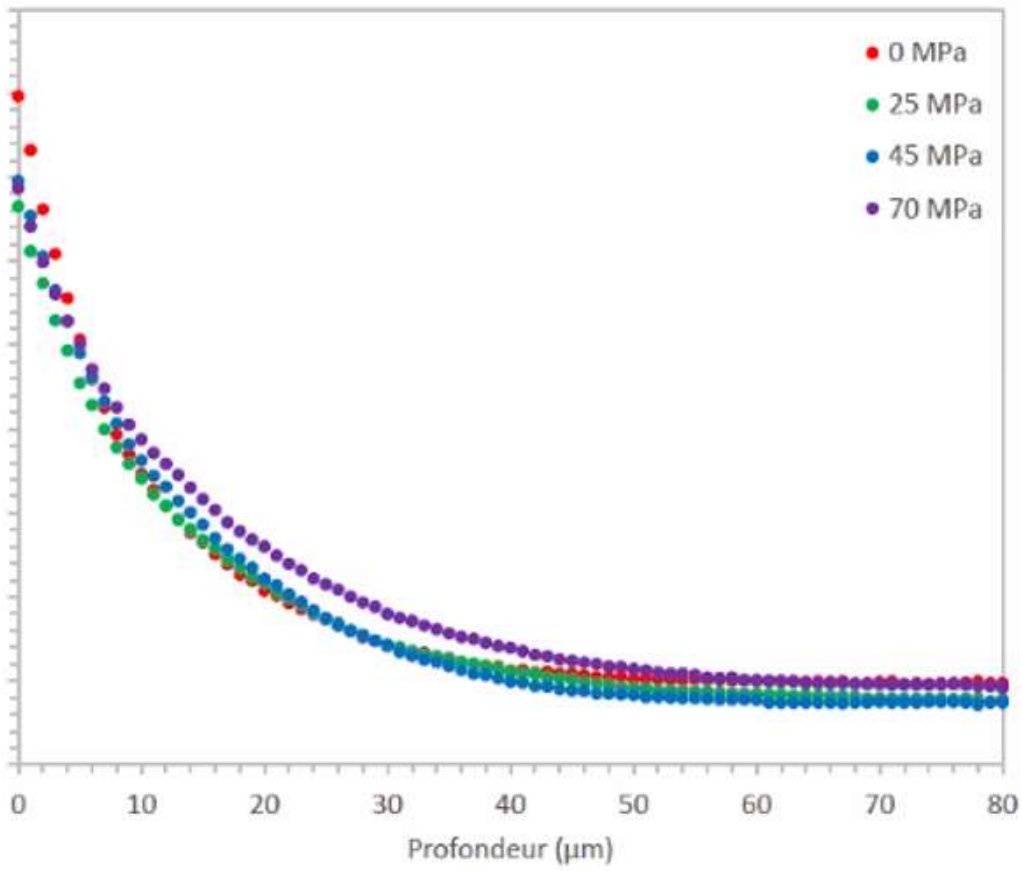
Cf. Benoit



Données exploitées par Sylvain dans son stage M2 en cours
Cf. Benoit jeudi

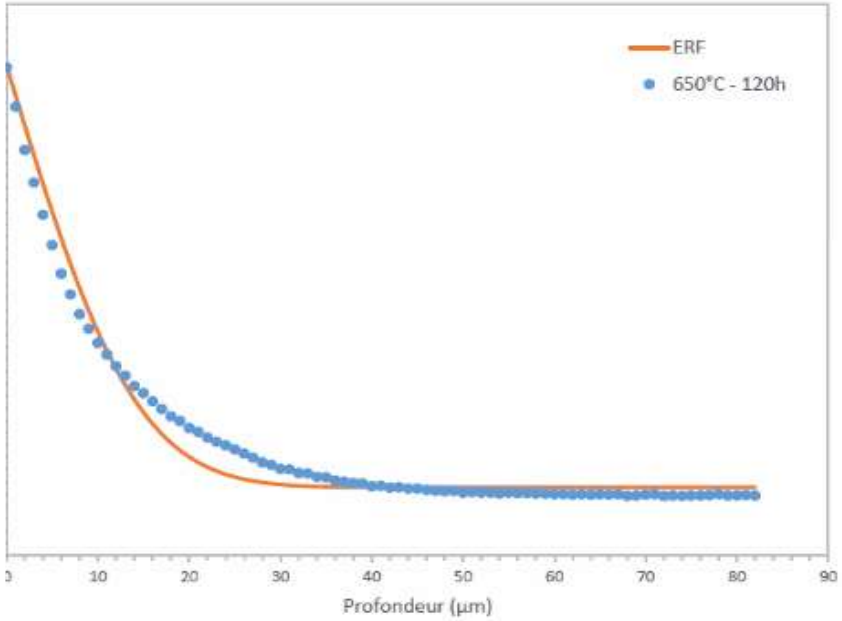
Volume maille α

- Ratio α/β stable
- Effet de σ sur le profil (idem a_α et c_α)
- Statistique
- Fick à enrichir



Volume maille α

- Ratio α/β stable
- Effet de σ sur le profil (idem a_α et c_α)
  - Effet sur la courbure du profil liée à l'application du
  - Effet sur la valeur en surf
- Statistique (VER)
- Fick à enrichir

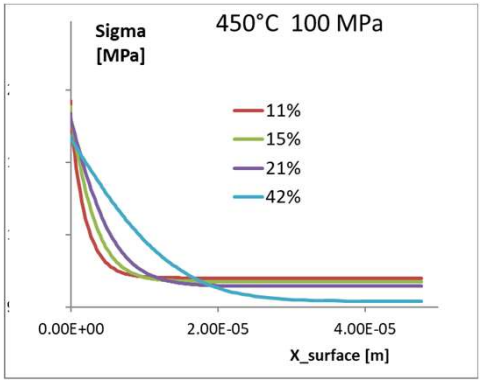


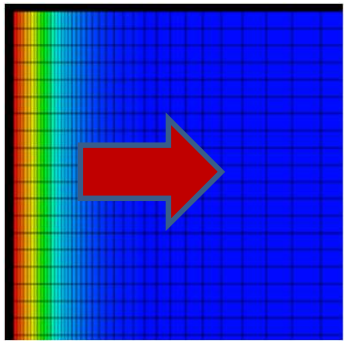
Simulations EF

- Jean Philibert : Diffusion et transport dans les solides

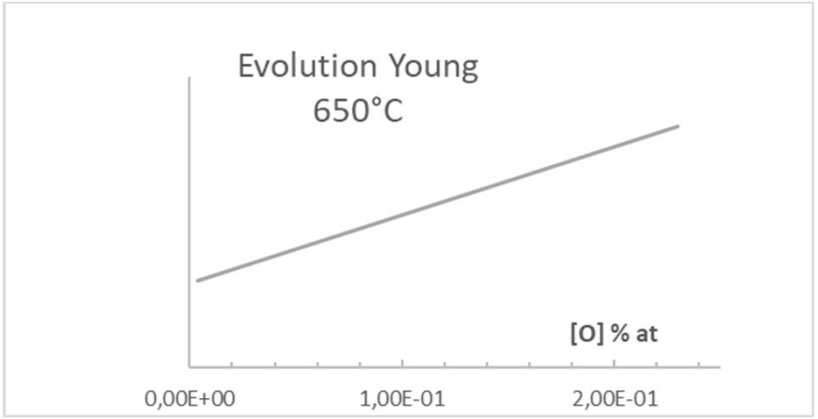
$$J = -D\,\frac{\partial c}{\partial c} + \frac{D}{kT}Fc$$

- Avec F force de transport ici liée au gradient d'énergie élastique U stockée $F = -A\,\frac{\partial U}{\partial x}$
- U=1/2 σ ε





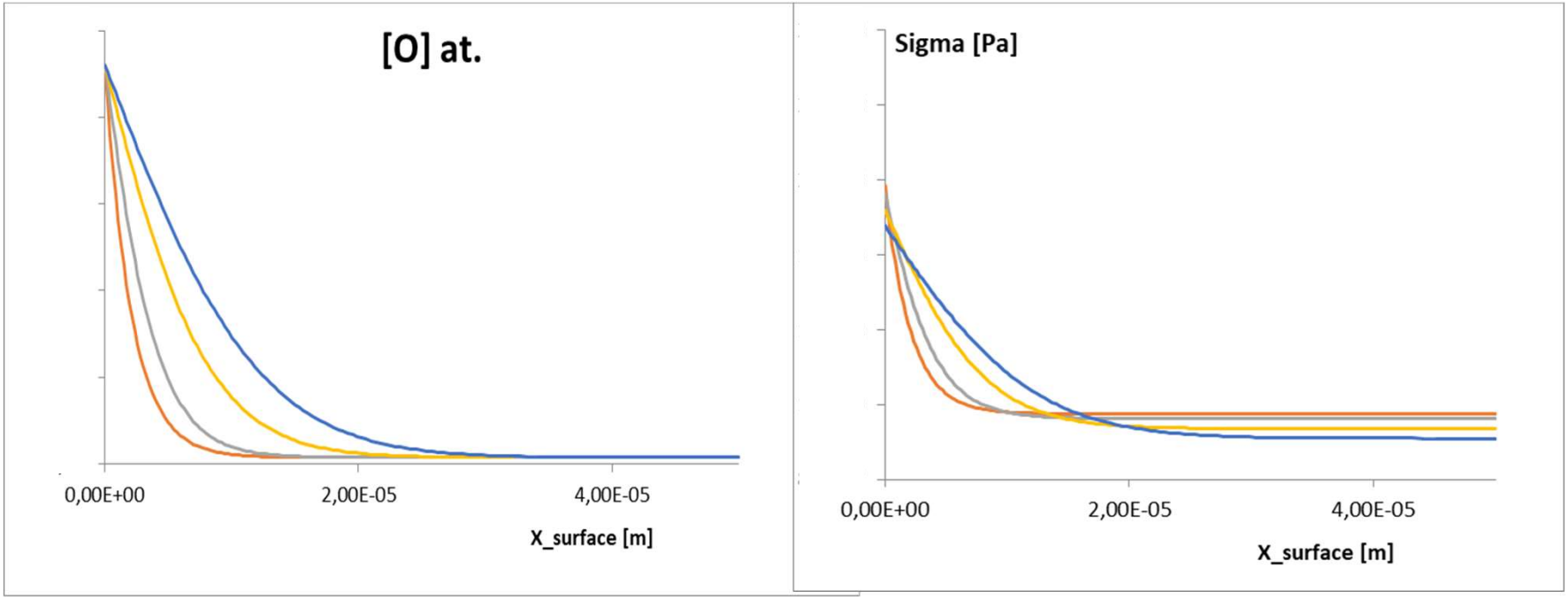
EF couplage faible



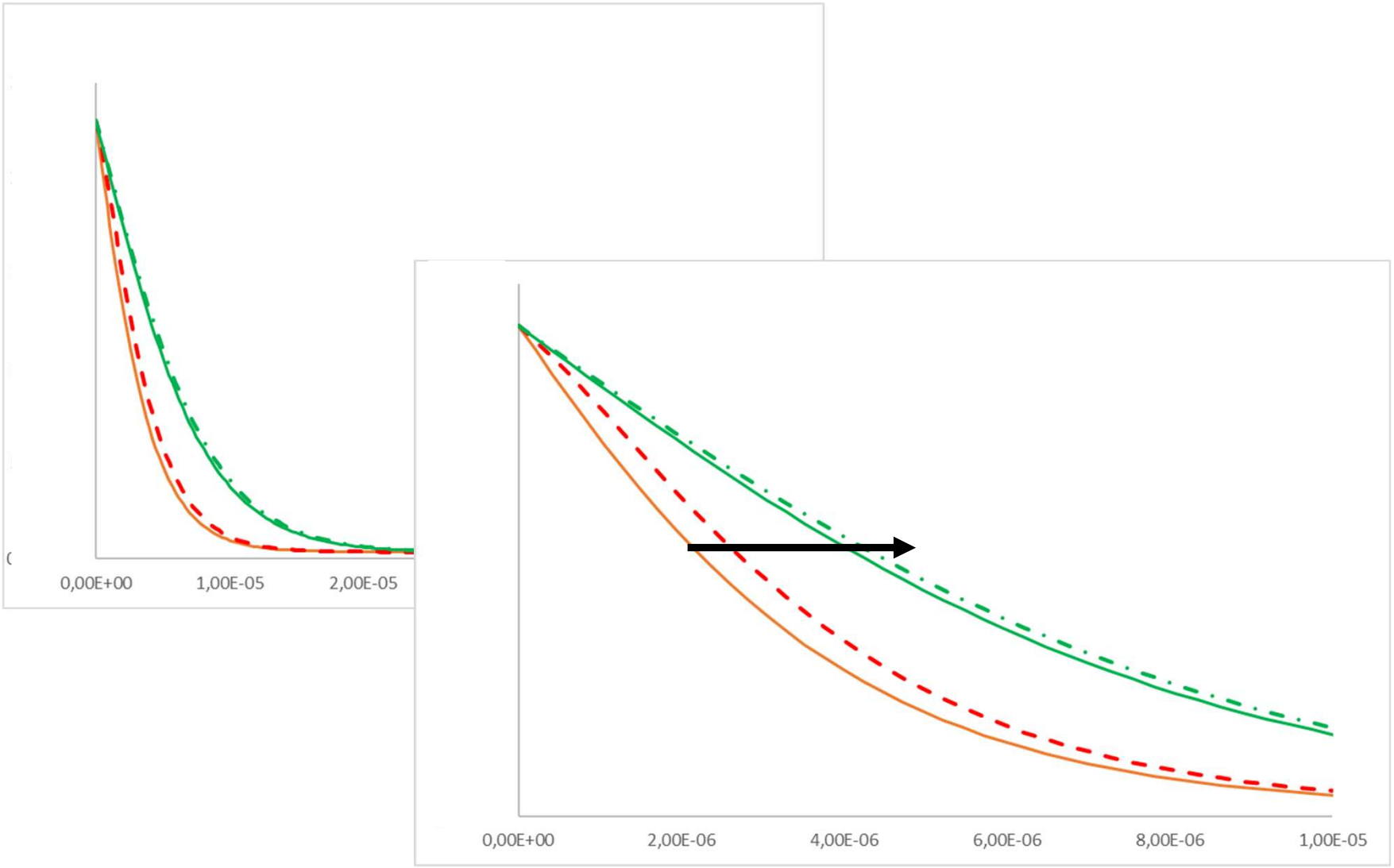
- Code Castem
- 100 µm
- 650°C
- Calcul de diffusion => profil en [O] à t(n)
- Profil en [O] => calcul élastique iso-déf à t(n)
- Calcul de U => J => profil modifié en [O]

Conditions Initiales pour calcul pas t(n+1)

Sans couplage



Avec couplage



Perspectives

- Affiner les simulations par comparaison aux conditions réelles
- Épaisseur
- Contraintes en élasticité + fluage
- D=D[O] ?
- Refaire des DRX DESY autres T σ