08 Juillet 2021

GDR Concord

Antoine 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

Travaux encadrés par M. Daniel Monceau (CIRIMAT) et M. Jonathan Hugues (IRT Saint-Exupéry)

ANDDURO.

ANalysis of Defects and DURability Optimisation.

Master Powder Bed Processes for aerospace applications

Perform LBM benchmark

Support M&P specifications for industrial deployment

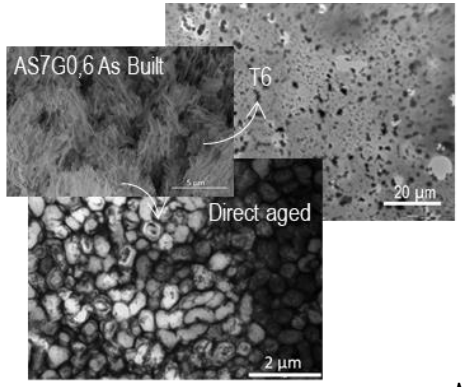
Increase knowledge on peculiar metallurgy of AM products

Develop in-situ process control

- 17,2 M€
- 1
  7

AIRBUS, DAHER, MECAPROTEC Industries, AIRBUS DEFENCE & SPACE, element materials technology, LIEBHERR, ALTRAN, FUSIA AEROADDITIVE, oerlikon, LAUAK, lisi AEROSPACE, LATÉCOÈRE, SAFRAN AEROSPACE·DEFENCE·SECURITY, Satys, STELIA AEROSPACE, CIRIMAT Toulouse, I2M BORDEAUX

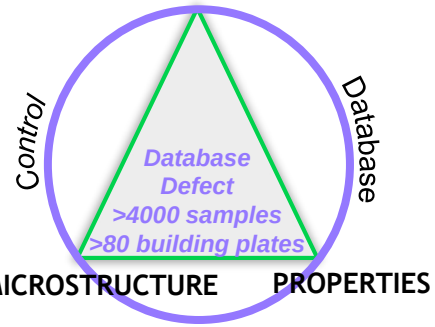
Main Activities

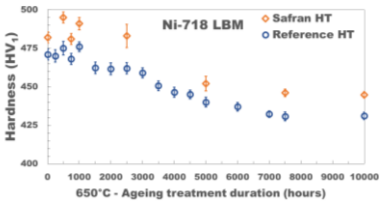


Post fabrication optimized heat treatment:Ti64, Ni718, AS7G

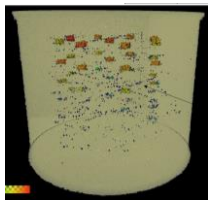
Properties evolution up to 10 000 h of thermal ageing

Machine benchmark
Parametric study

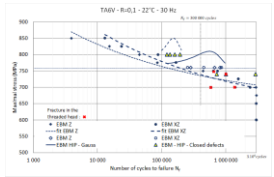




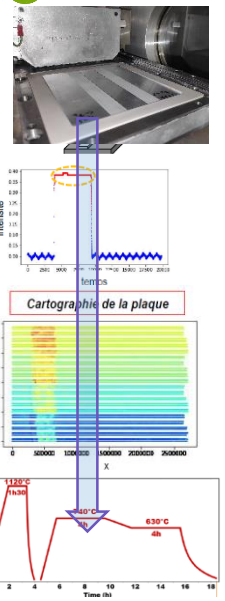
On-demand defect generation (size position)



Effect of defect on mechanical properties
HIP challenge



In-situ detection on OLLOPA IRT test bench

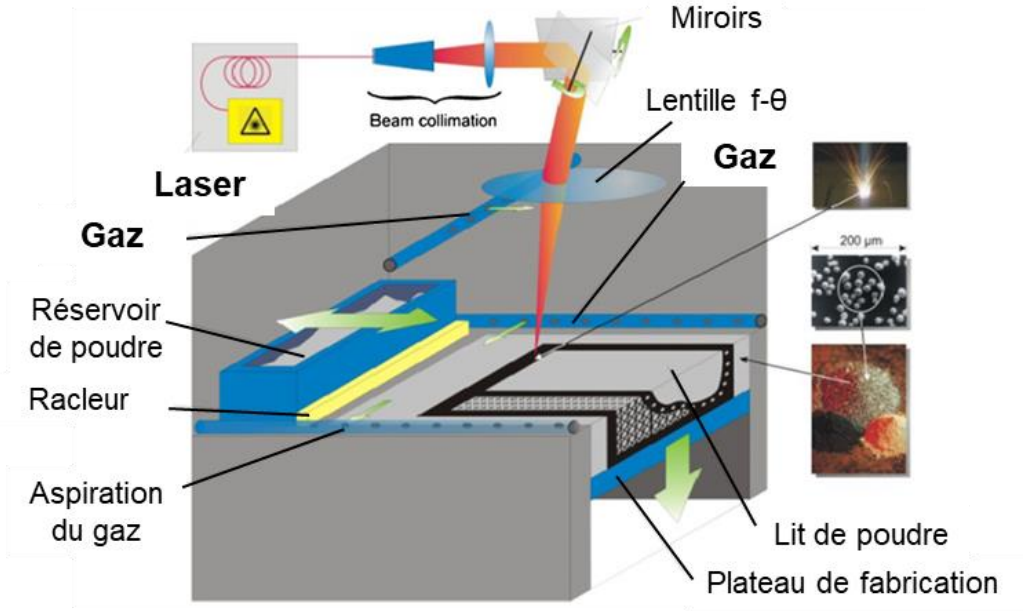


- Alloys considered
- **Ti64,**
- **718 alloy**
- **AlSi7Mg0.6,**
- **625 alloy,**
- **AA…**

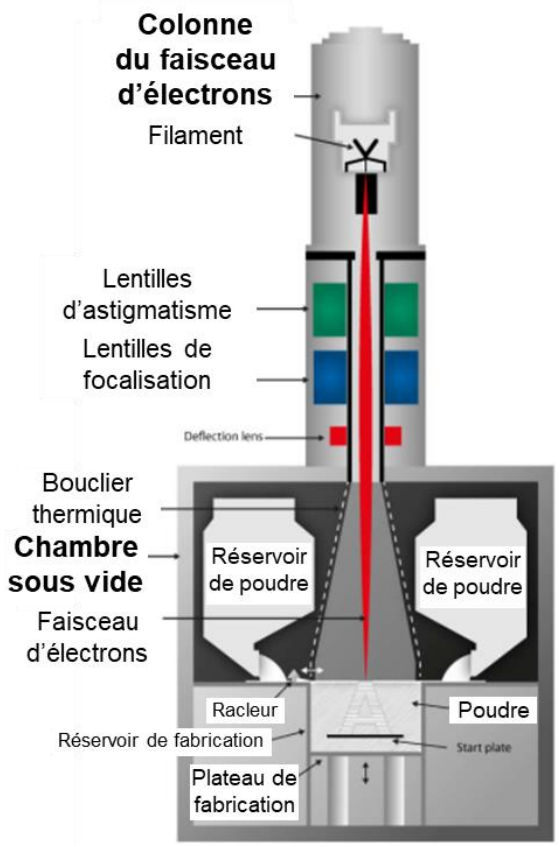
FRENCH INSTITUTES OF TECHNOLOGY

© IRT Saint Exupéry • All rights reserved • Confidential and proprietary document

Procédés par fusion de lit de poudre LBM et EBM



(1) Procédé Laser Beam Melting (LBM) **Sous flux d'argon**



(2) Procédé Electron Beam Melting (EBM)
Sous vide ≈ 1.10^{-5} bar

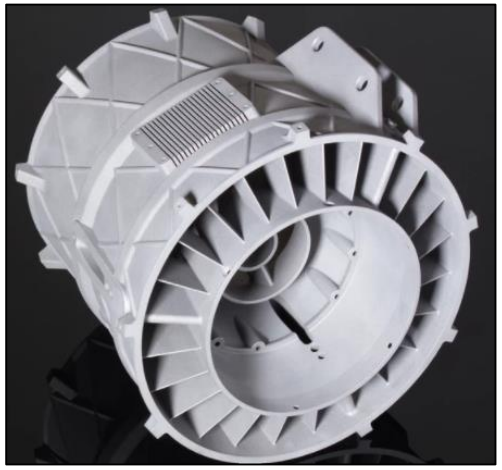
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

08/07/2021

(1) I. Tolosa, Int J Adv Manuf Technol, 51: 639-647, (2010)

(2) https://metalblog.ctif.com/2017/12/18/les-mysteres-de-la-fusion-par-faisceau-delectrons-ebm/, 24/09/2020

Intérêts des procédés FA

Fabrication de géométries complexes

(3) Pièces fabriquées par LBM



Pièce usinée

Gain de masse de 40 %



Pièce FA

(4) **Optimisation du design** par FA

Moins d'étapes de fabrication

Moins d'assemblages

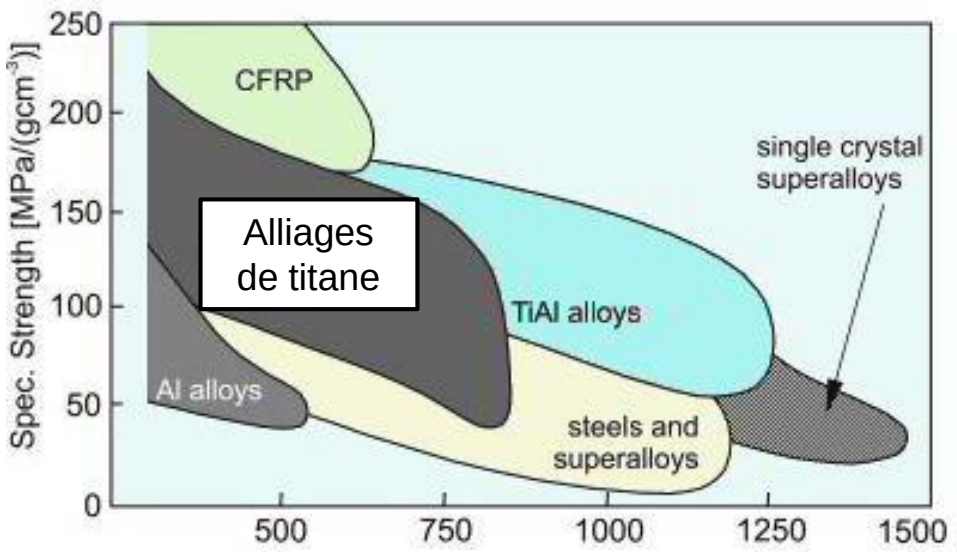
Moins de déchets

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

(3) https://www.fusia.fr/la-fusion-laser, 2020-10-23

(4) http://www.machine-outil.com/actualites/t685/a6819-repmo.html, 2020-07-31

Applications des alliages de titane



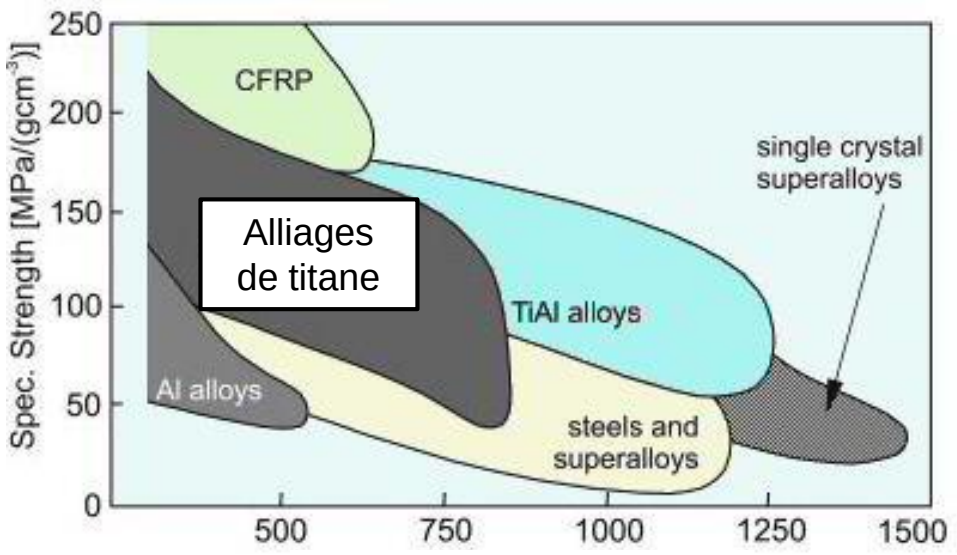
(5) Propriétés mécaniques spécifiques des alliages métalliques

Les alliages de titane sont utilisés dans l'aéronautique du fait de leurs bonnes propriétés mécaniques spécifiques

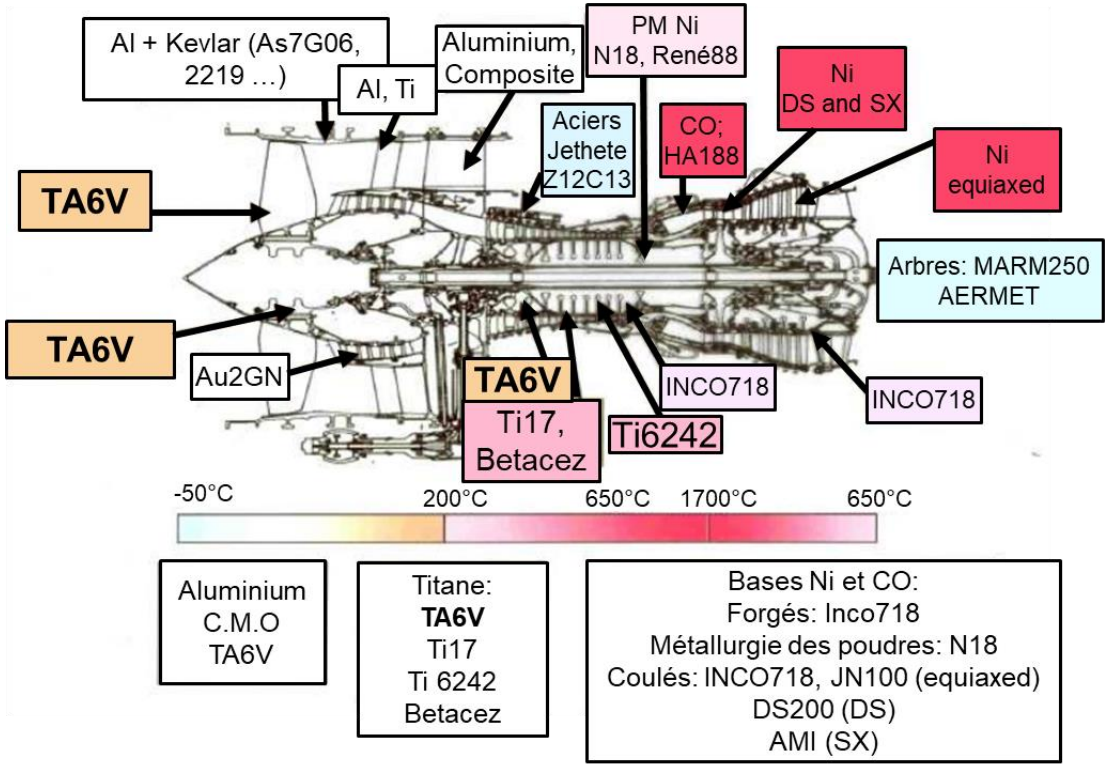
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

(5) C. Leyens, M. Peters, Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Application, 2004

Applications des alliages de titane



(5) Propriétés mécaniques spécifiques des alliages métalliques



(6) Alliages utilisés dans le CFM 56

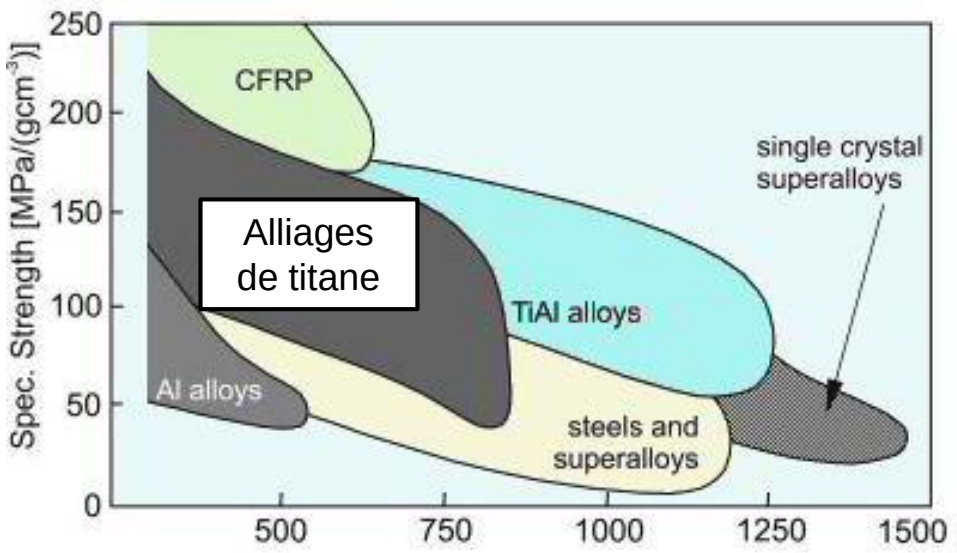
Les alliages de titane sont utilisés dans l'aéronautique du fait de leurs bonnes propriétés mécaniques spécifiques

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

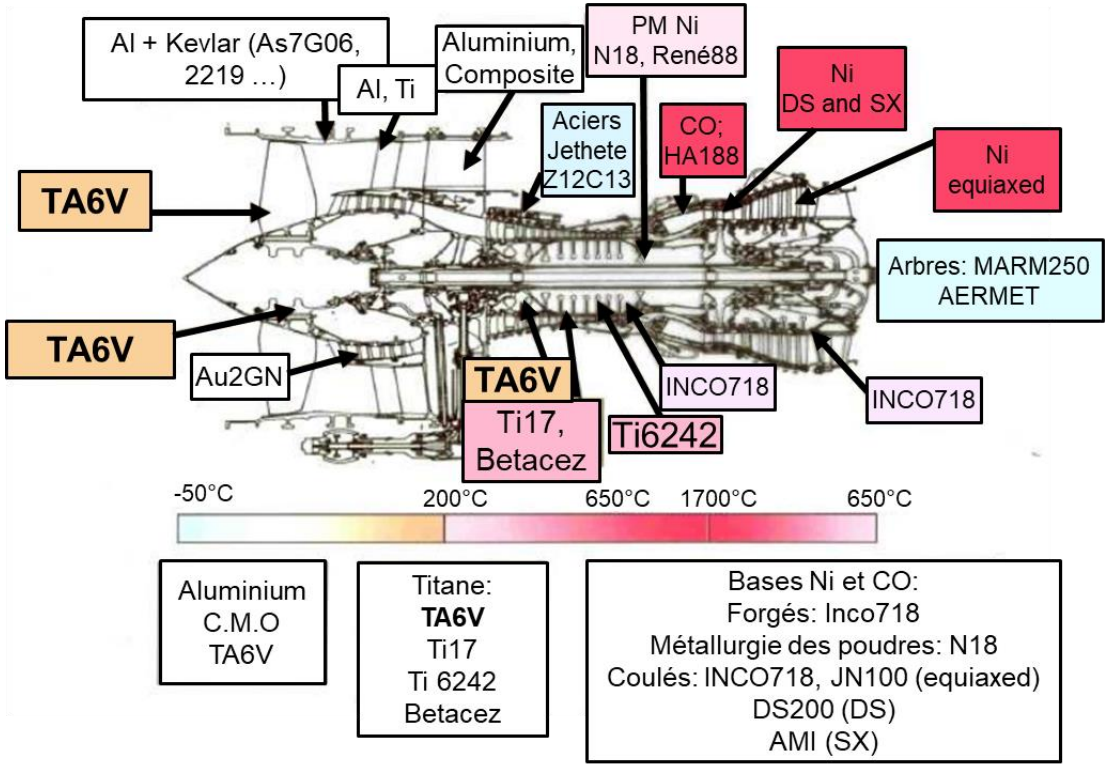
(5) C. Leyens, M. Peters, Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Application, 2004

(6) A.Pineau, Euromech 505, 7,8 ,9 Juillet 2010

Applications des alliages de titane



(5) Propriétés mécaniques spécifiques des alliages métalliques



(6) Alliages utilisés dans le CFM 56

Les alliages de titane sont utilisés dans l'aéronautique du fait de leurs bonnes propriétés mécaniques spécifiques

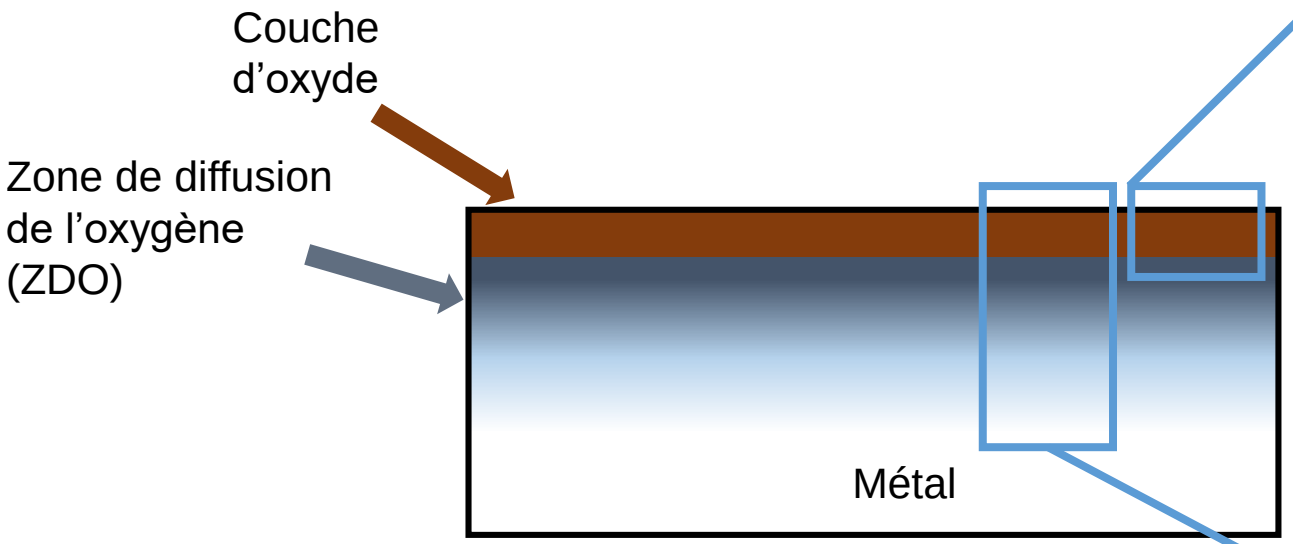
FA + alliages de titane = multiplication du gain de masse

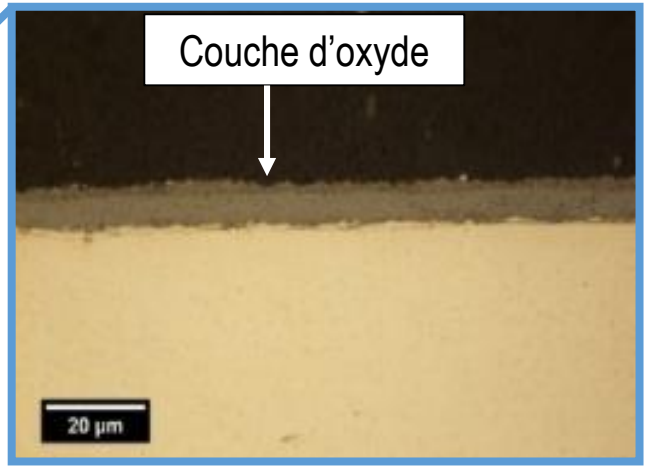
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

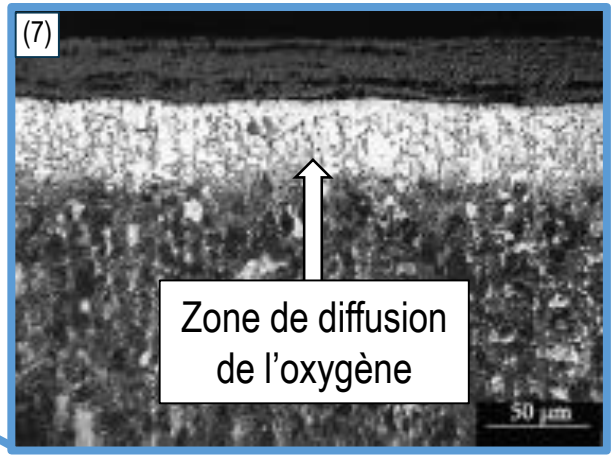
(5) C. Leyens, M. Peters, Titanium and Titanium Alloys, Fundamentals and Application, 2004

(6) A.Pineau, Euromech 505, 7,8 ,9 Juillet 2010

Oxydation du titane





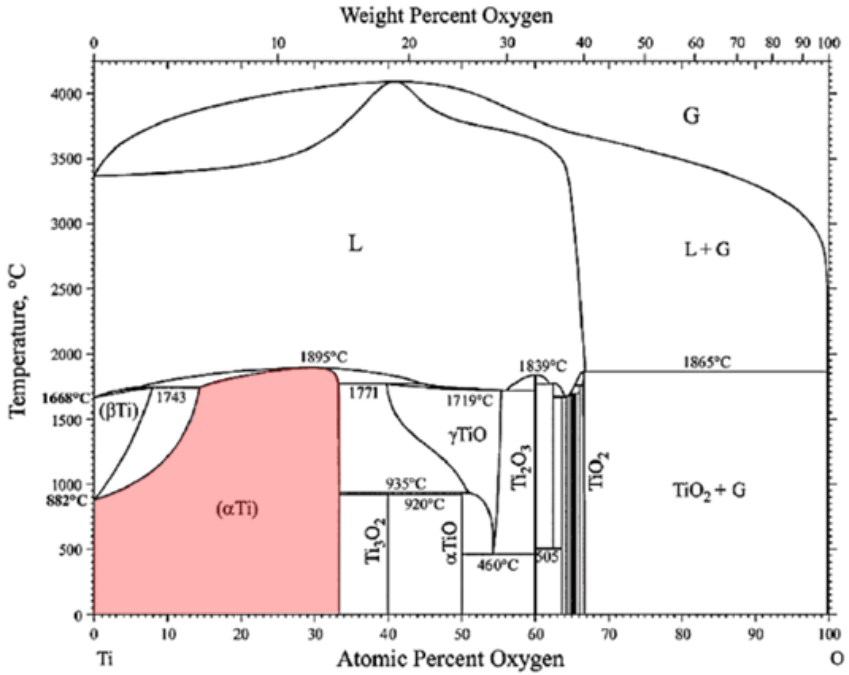


Formation d'une couche d'oxyde et d'une zone enrichie en oxygène dans le métal

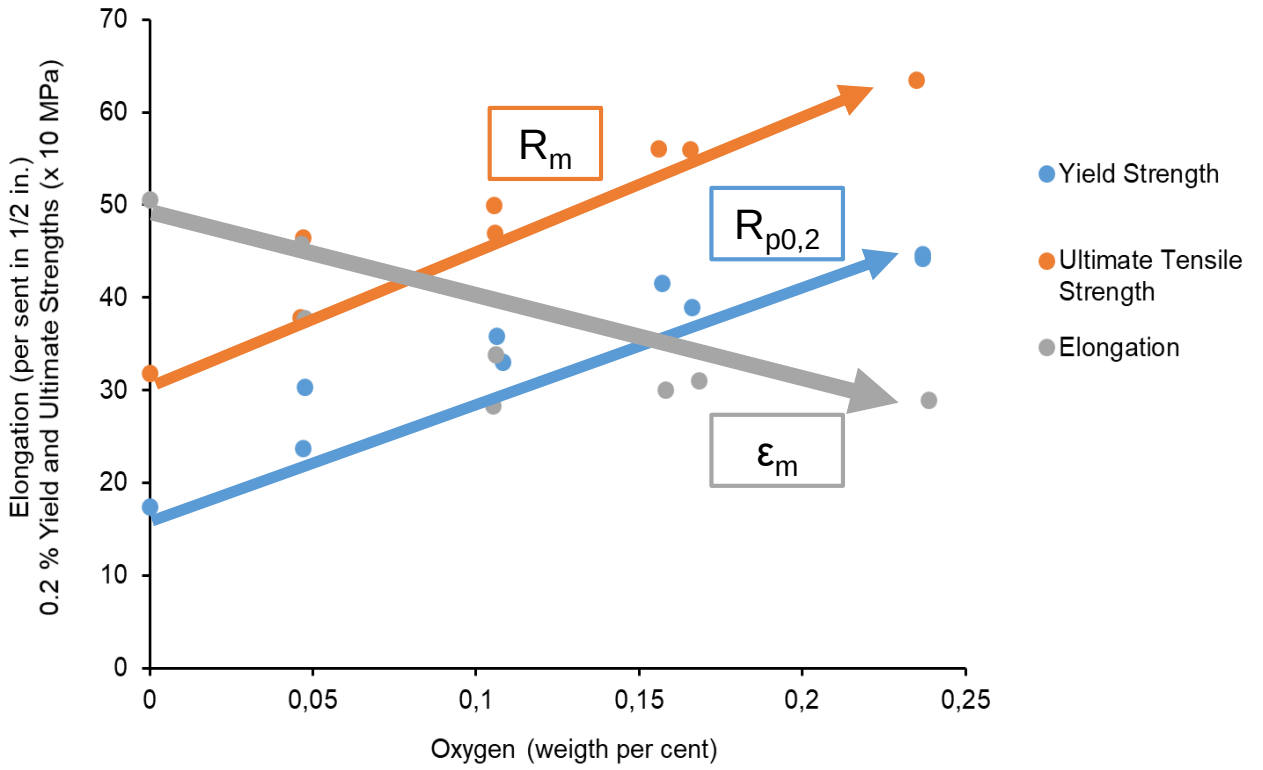
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

(7) H. Guleryuz et al., Journal of Alloys and Compounds, 472 (2009) 241-246

Fragilisation par l'oxygène



(10) Solubilité de l'oxygène dans la phase Ti-α ≈ 30 %at



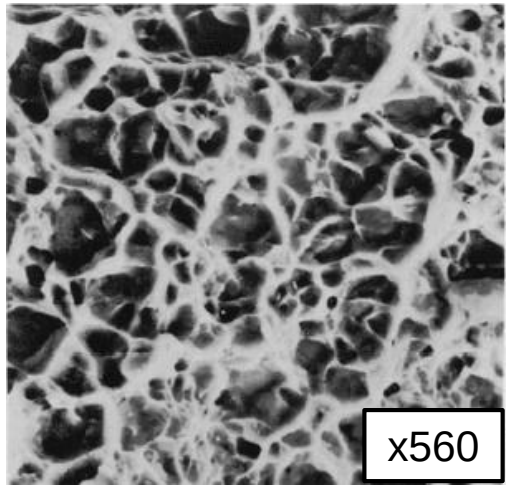
(11) Influence de l'oxygène sur les propriétés mécaniques en traction

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

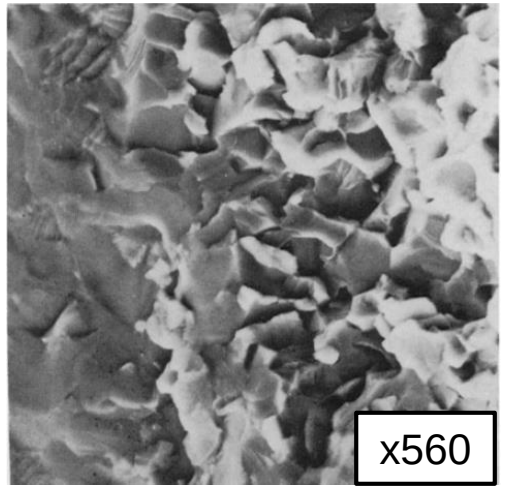
(10) H. Okamoto, Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 32 (2011) 473-474

(11) D'après W.L. Finlay et al., Journal of Metals, 188 (1950) 227-286

Fragilisation par l'oxygène de l'alliage de titane TA6V



FR ductile à cœur



FR fragile en surface

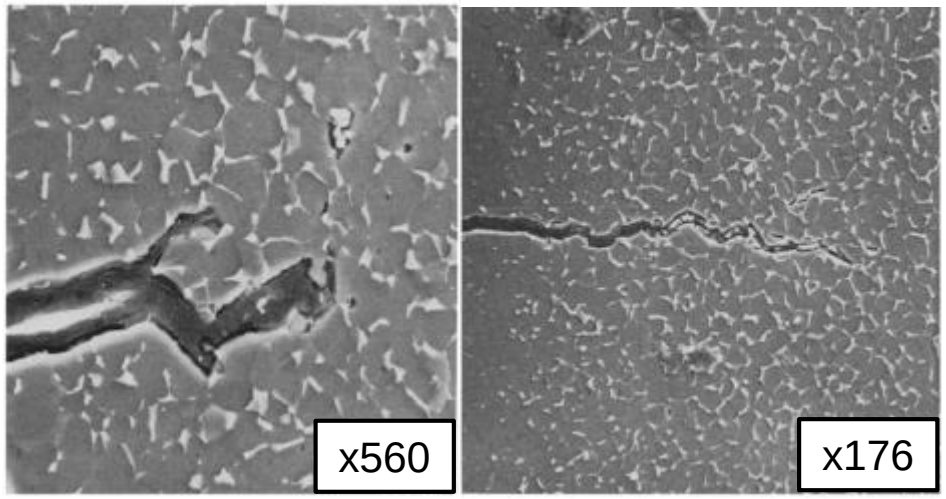
Faciès de rupture d'une éprouvette en TA6V oxydée 5 h à 900 °C

(12) Modification du mode de rupture en surface d'une éprouvette de traction oxydée

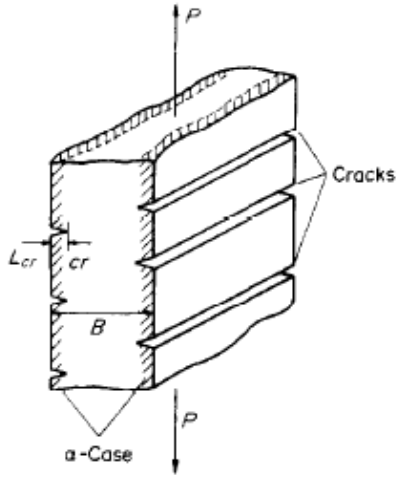
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

(12) L. Bendersky et al., Engineering Fracture Mechanics, 20 (1984) 303-311

Fragilisation par l'oxygène de l'alliage de titane TA6V



Oxydée 1 h à 900 °C Oxydée 22 h à 900 °C



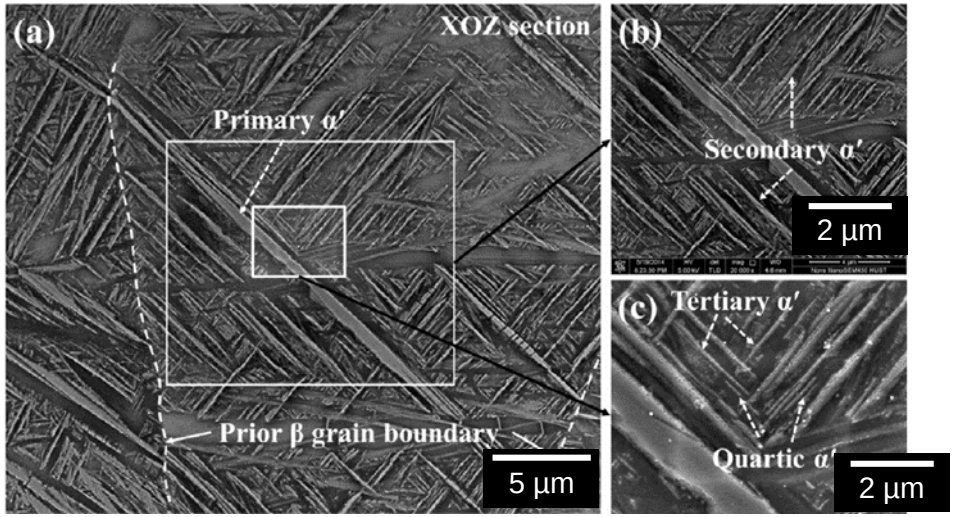
Fissures en surface d'éprouvettes en TA6V oxydées à 900 °C

(12) Formation de fissures en surface des éprouvettes de traction oxydées

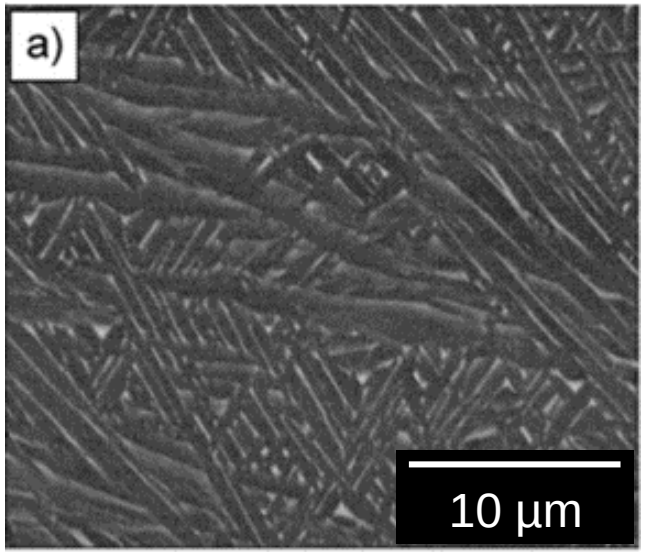
(12) L. Bendersky et al., Engineering Fracture Mechanics, 20 (1984) 303-311

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Alliages de titane fabriqués par LBM et EBM



(13) Microstructure martensitique α' fine d'un TA6V LBM



(14) Microstructure lamellaire α+β fine d'un TA6V EBM

Les procédés LBM et EBM permettent d'obtenir une microstructure très fine avec de nombreuses interfaces

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

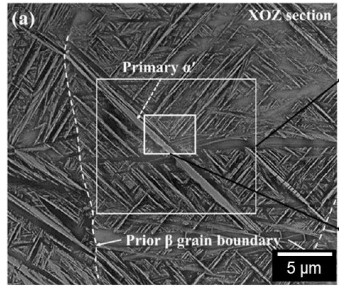
(13) J. Yang, Materials & Design, 108 (2016) 308-318

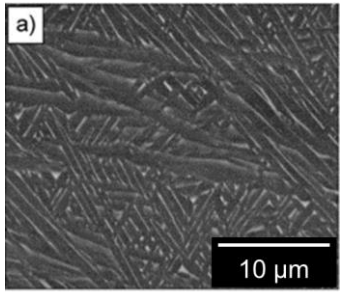
(14) T. Scharowsky, Advanced Engineering Materials, 17 (2015) 1573-1578

Oxydation d'alliages de titane fabriqués par LBM et EBM

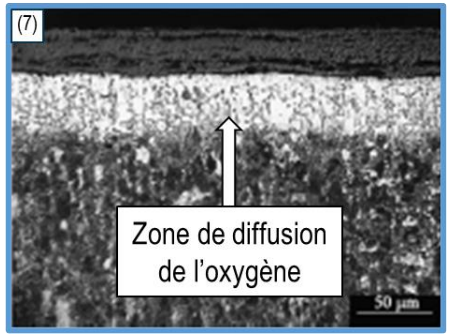


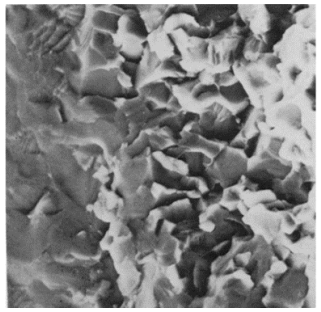
(4) Présence de **parois minces** Augmentation du ratio surface/volume





(13) (14) Microstructure très fine et densité d'interfaces importante







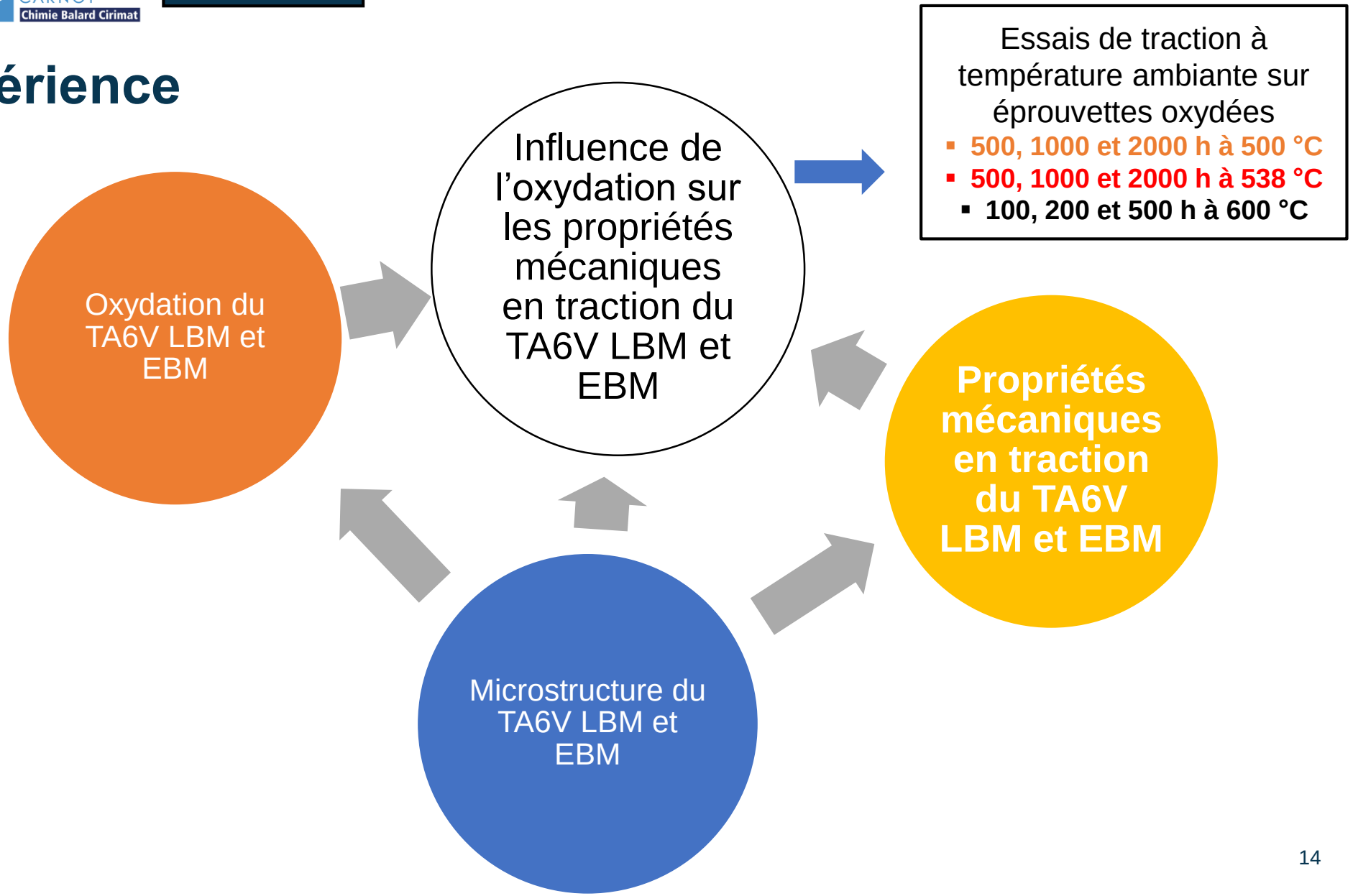
(7) (12) Oxydation du titane et fragilisation par l'oxygène

Quelle est l'influence de l'oxydation à haute température sur les propriétés mécaniques en traction de parois minces en TA6V fabriquées par LBM et EBM?

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

(4) https://www.fusia.fr/la-fusion-laser, 2020-10-23
(13) J. Yang, Materials & Design, 108 (2016) 308-318
(7) H. Guleryuz et al., Journal of Alloys and Compounds, 472 (2009) 241-246
(14) T. Scharowsky, Advanced Engineering Materials, 17 (2015) 1573-1578
(12) L. Bendersky et al., Engineering Fracture Mechanics, 20 (1984) 303-311

Plan d'expérience



© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

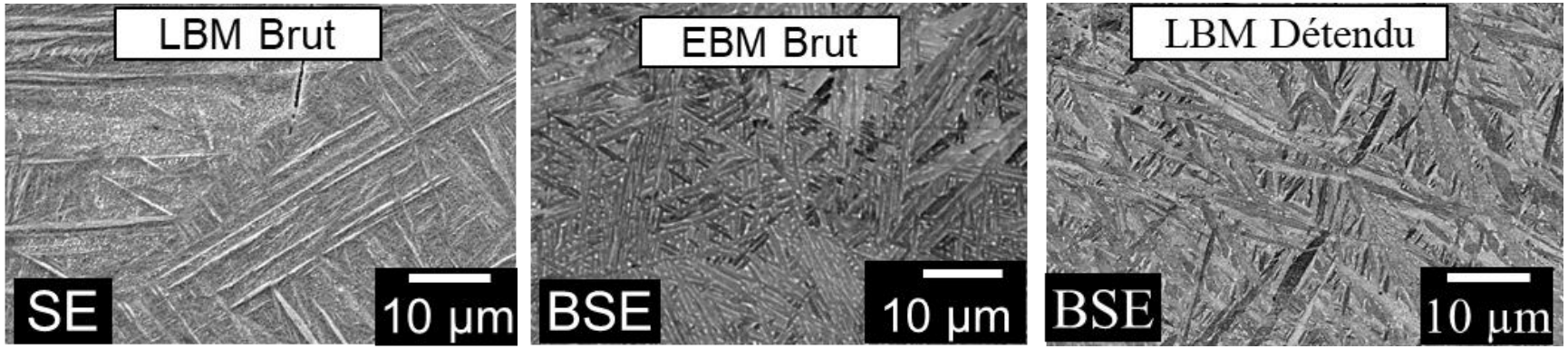
Oxydation des alliages TA6V LBM et EBM

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Microstructures de l'alliage TA6V

	Al	V	Fe	Cr	O	N	H	C	Autres	Ti
Échantillons LBM Brut (%m)	6,0	4,0	0,2	<0,05	**0,1**	0,01	0,003	0,01		Bal
Échantillons EBM Brut (%m)	5,6	4,0	0,19	<0,05	**0,08**	0,014	0,001	0,01		Bal
ASTM F 3001 TA6V ELI **grade 23** (%m)	5,5 – 6,5	3,5 – 4,5	<0,25	<0,1	**<0,13**	<0,05	<0,012	<0,08	<0,4	Bal

MEB



Détente
720 °C, 2h

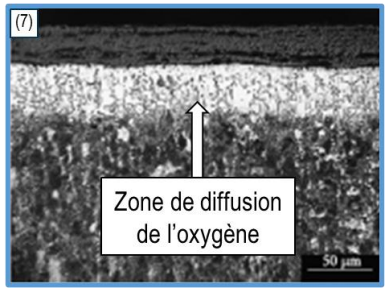
	LBM Brut	EBM Brut	LBM détendu
Lamelles α (µm)	Lamelles martensitiques α' (0,6 ± 0,1)	0,7 ± 0,2	0,5 ± 0,2

Microstructures très fines de l'alliage TA6V obtenues pas LBM et EBM

Merci à C. Josse pour les micrographies FEG

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Distribution de l'épaisseur oxydée



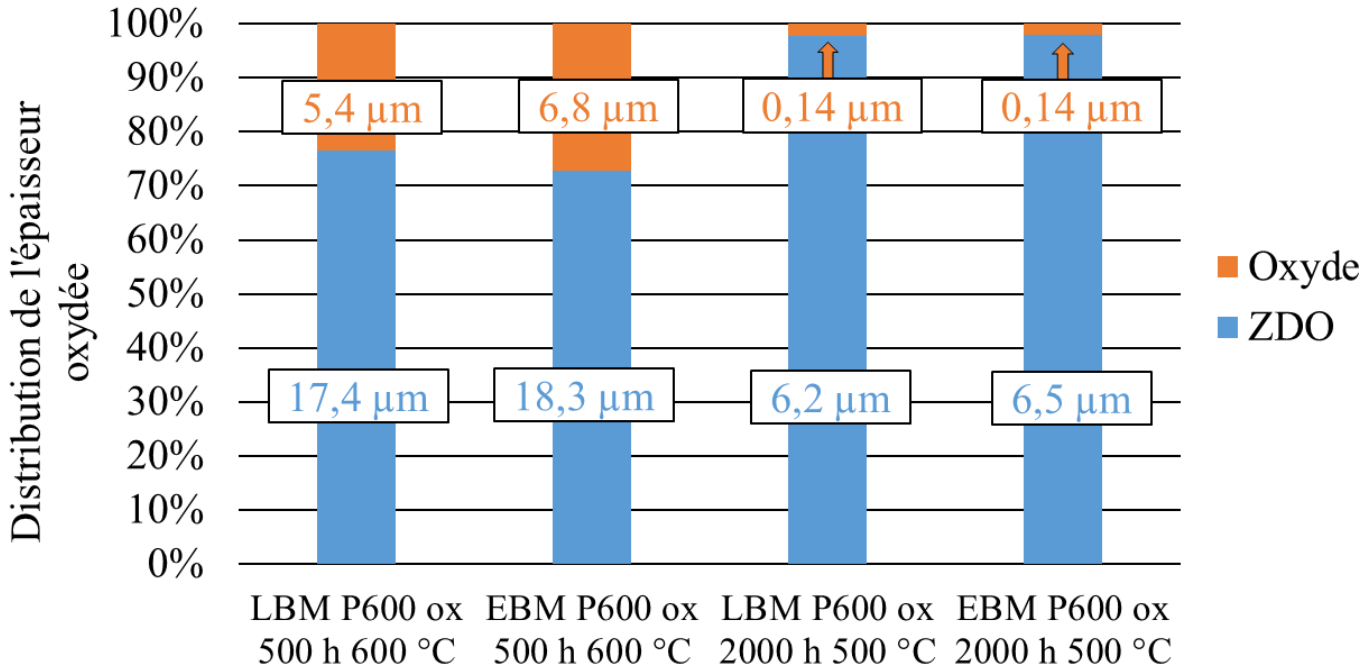
TA6V oxydé 6 h 800 °C

500 h 600 °C

Épaisseur ZDO (µm) / Épaisseur oxyde (µm)

17,4 µm / 5,4 µm = 3,2

18,3 µm / 6,8 µm = 2,7



2000 h 500 °C

6,2 µm / 0,14 µm = 44

6,5 µm / 0,14 µm = 46

La ZDO est beaucoup plus épaisse que la couche d'oxyde

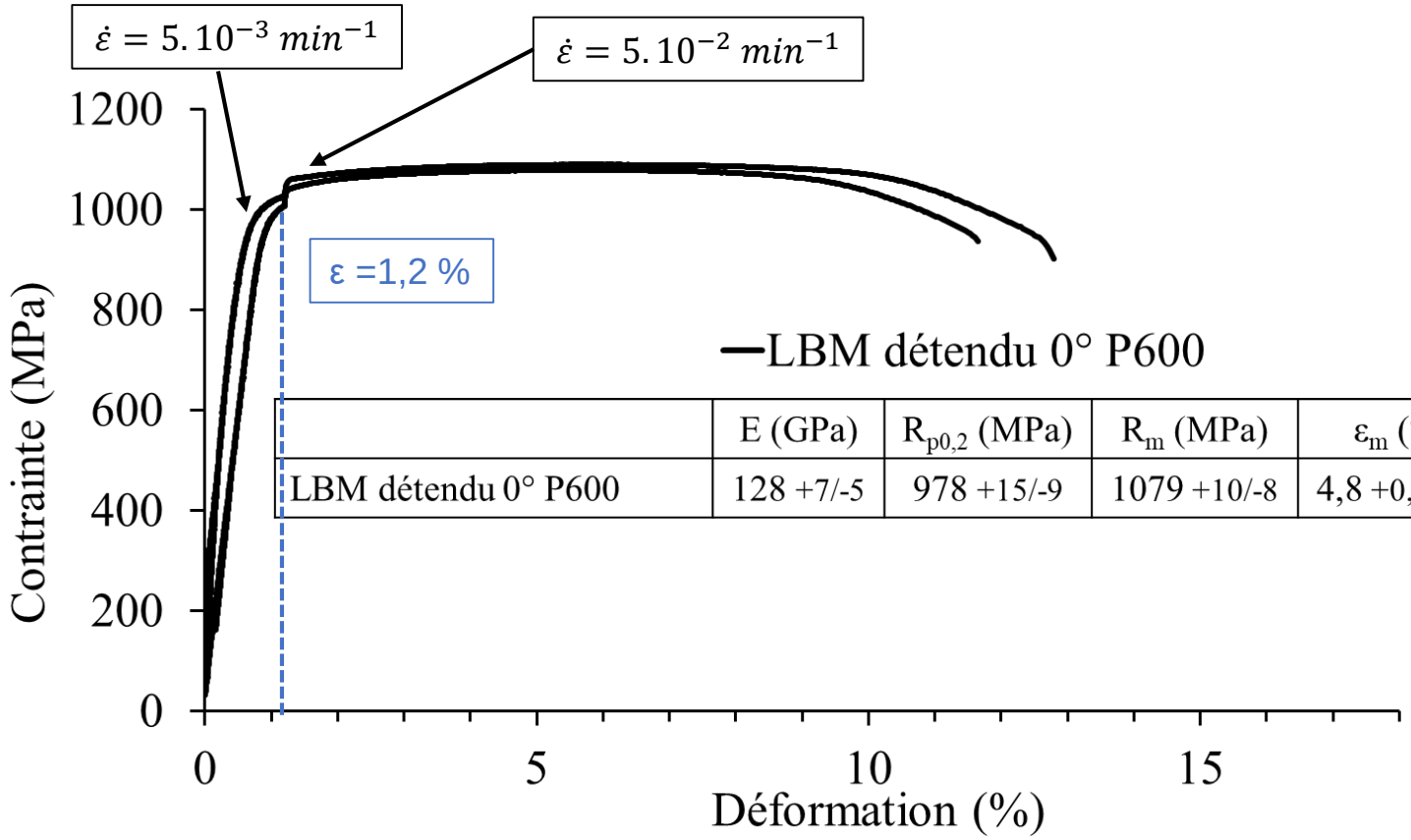
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

(7) H. Guleryuz et al., Journal of Alloys and Compounds, 472 (2009) 241-246

Influence de l'oxydation sur les propriétés mécaniques en traction des alliages TA6V LBM

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Essai de traction sur éprouvettes non oxydées



	E (GPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	ε_m (%)	ε_R (%)
LBM détendu 0° P600	128 +7/-5	978 +15/-9	1079 +10/-8	4,8 +0,1/-0,1	12,0 +0,8/-0,4

$R_{p0,2}$ = 978 +15/-9 MPa

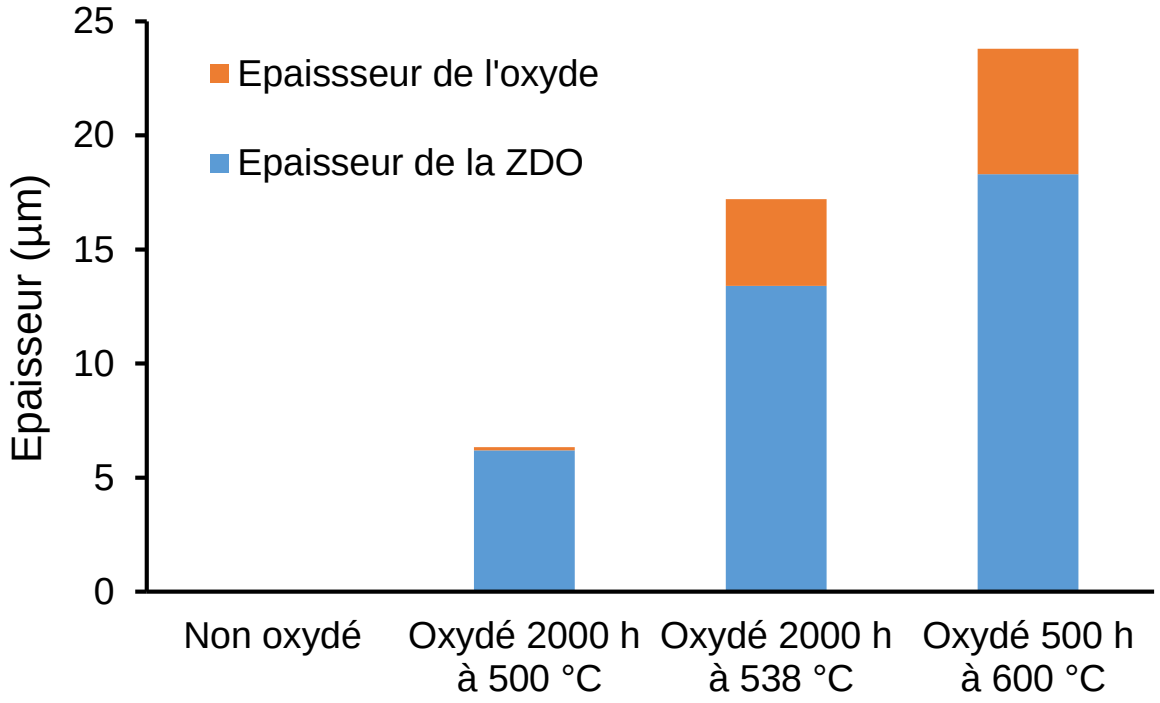
ε_R = 12,0 +0,8/-0,4 MPa

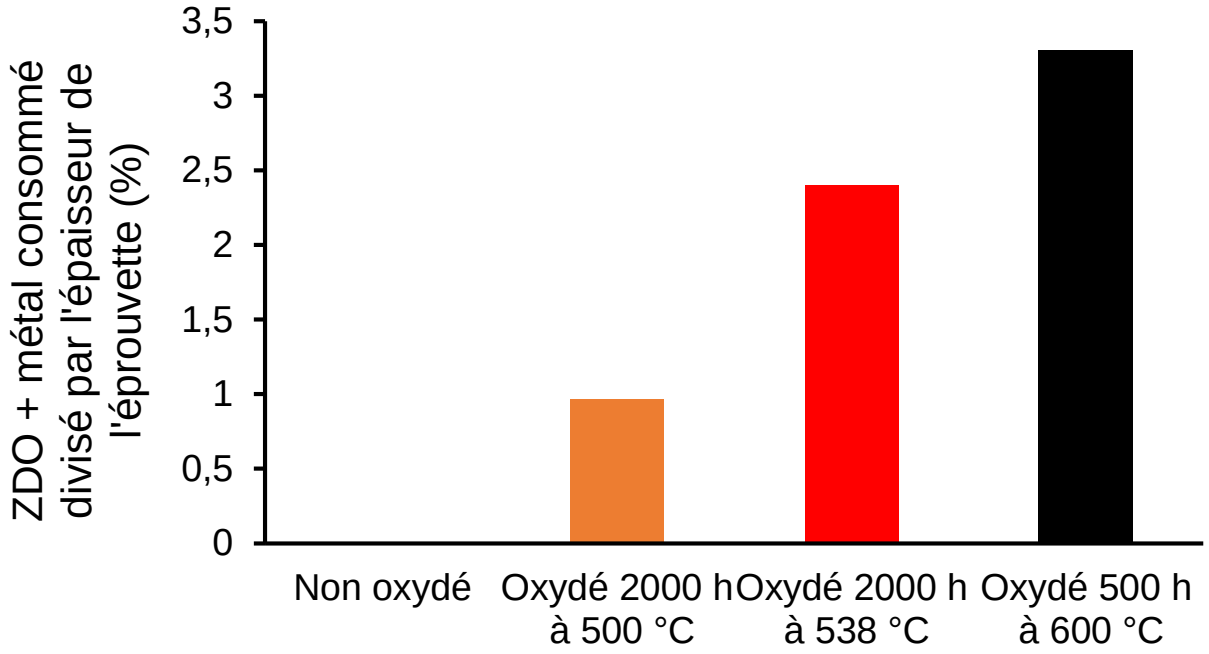
Changement de vitesse de déformation durant l'essai

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Merci à J.Milanese et J.B. Osio pour la formation aux essais de traction

Influence de l'oxydation sur les propriétés mécaniques

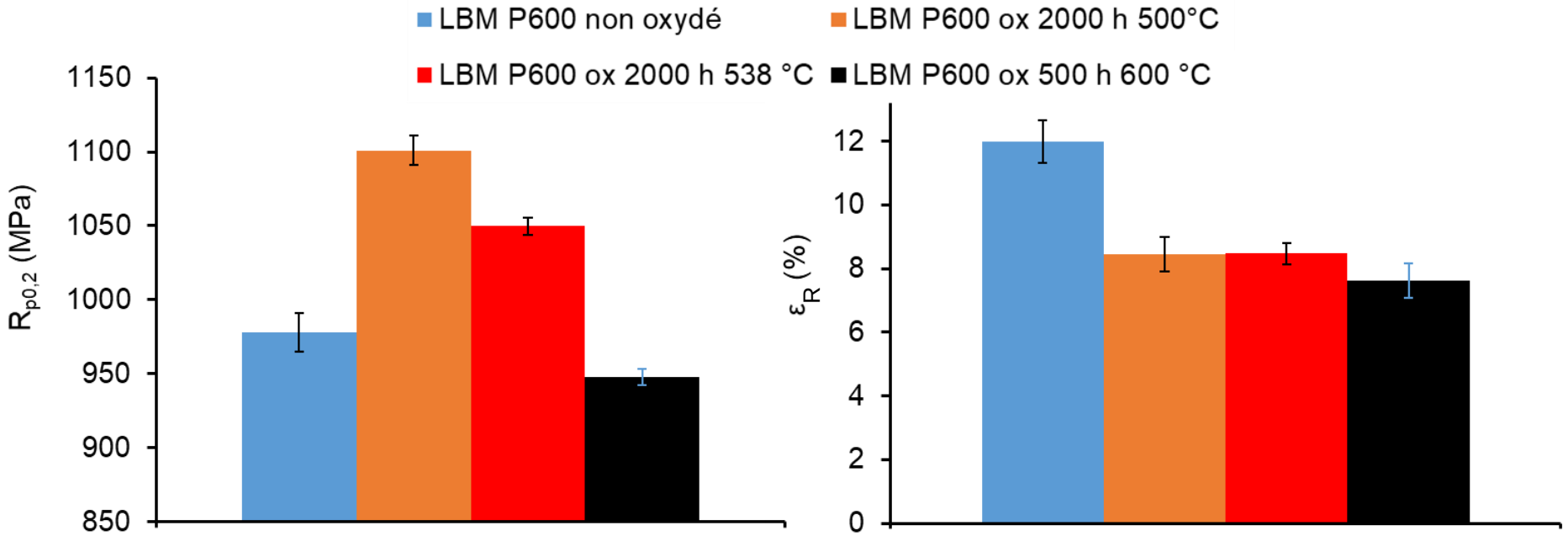




ZDO + métal consommé entre 1 et 3,3 % de l'épaisseur totale de l'éprouvette

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Influence de l'oxydation sur les propriétés mécaniques



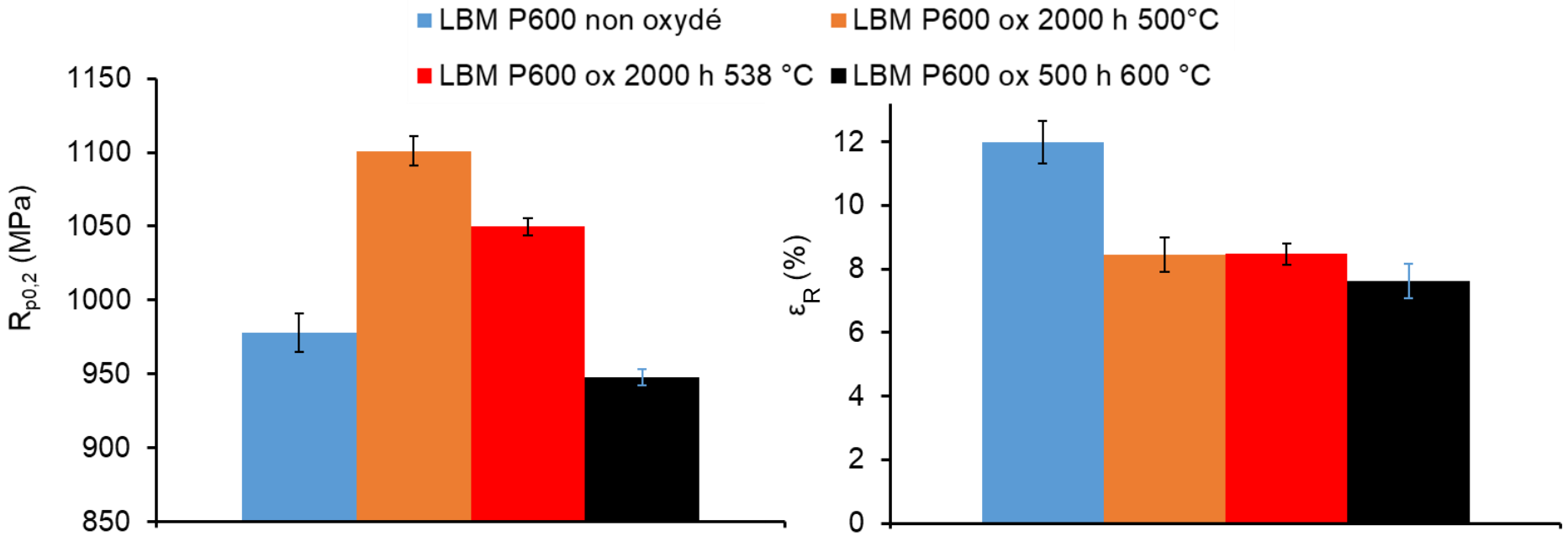
Augmentation du $R_{p0,2}$ lors d'oxydation à 2000 h 500 et 538 °C

Diminution du $R_{p0,2}$ lors d'oxydation à 500 h 600 °C

L'oxydation diminue la ductilité

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Influence de l'oxydation sur les propriétés mécaniques



Augmentation du $R_{p0,2}$ lors d'oxydation à 2000 h 500 et 538 °C

Diminution du $R_{p0,2}$ lors d'oxydation à 500 h 600 °C

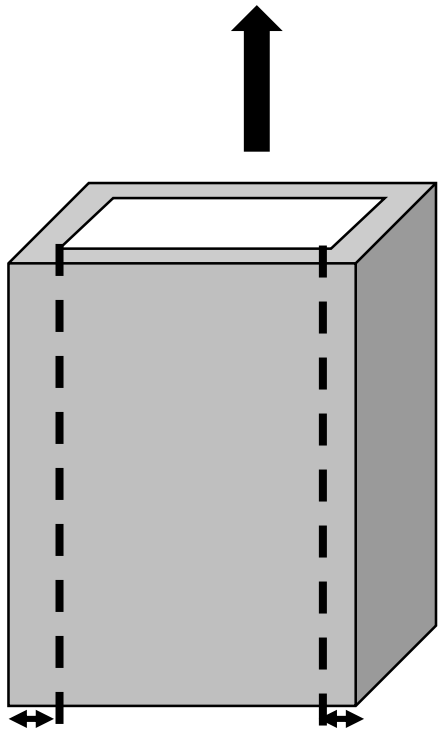
L'oxydation diminue la ductilité

D'où viennent ces évolutions de propriétés mécaniques?

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Essais de traction sur des éprouvettes vieillies sans ZAO à 500 et 538 °C

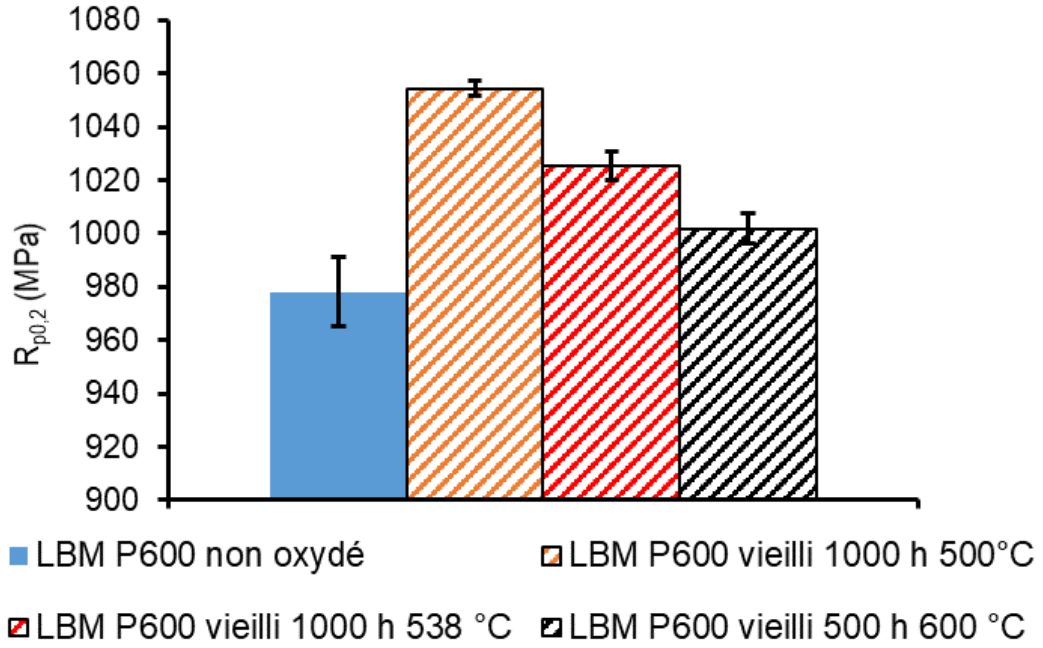
Traitement thermique en four puis polissage de la ZAO



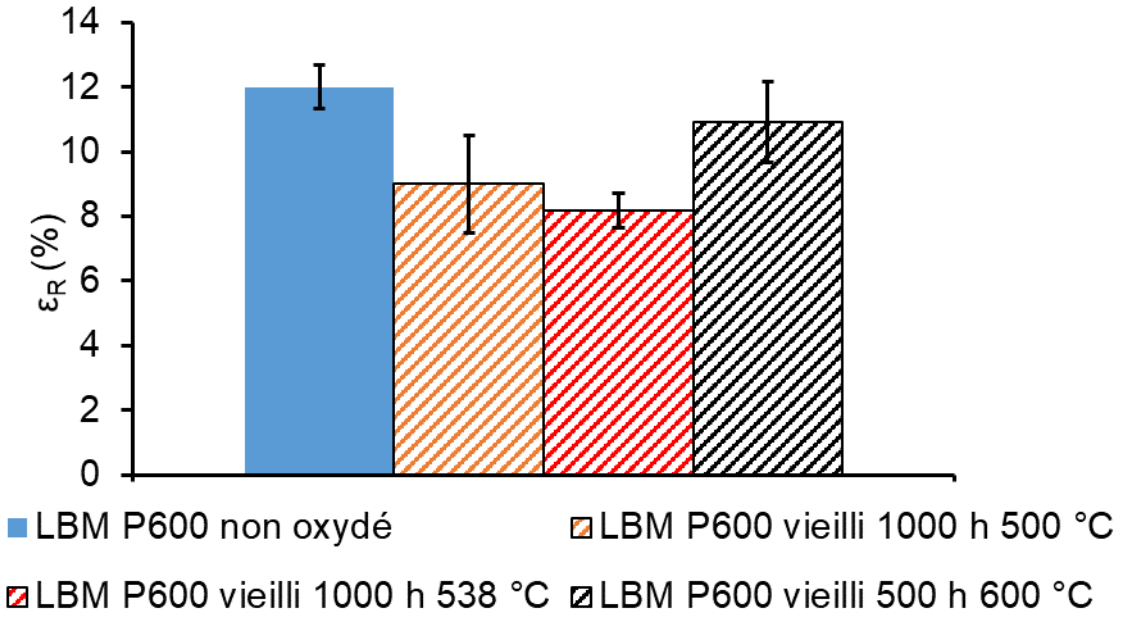
Objectif: Tester si le traitement thermique seul entraine une modification des propriétés mécaniques

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Essais de traction sur des éprouvettes vieillies sans ZAO à 500 et 538 °C



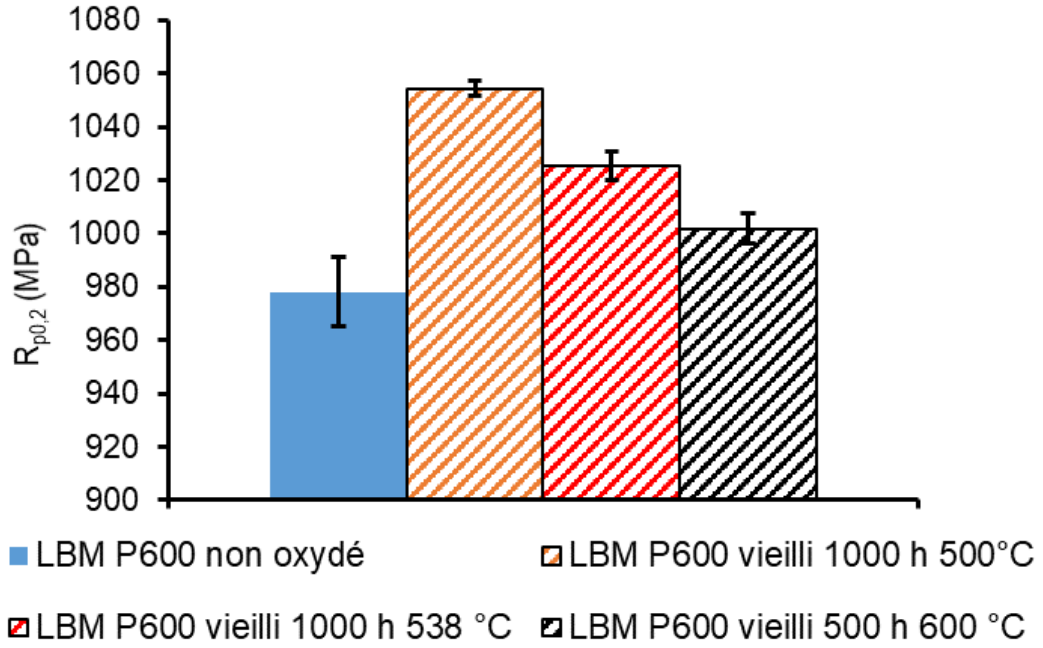
Augmentation du $R_{p0,2}$ plus importante pour 500 et 538 °C

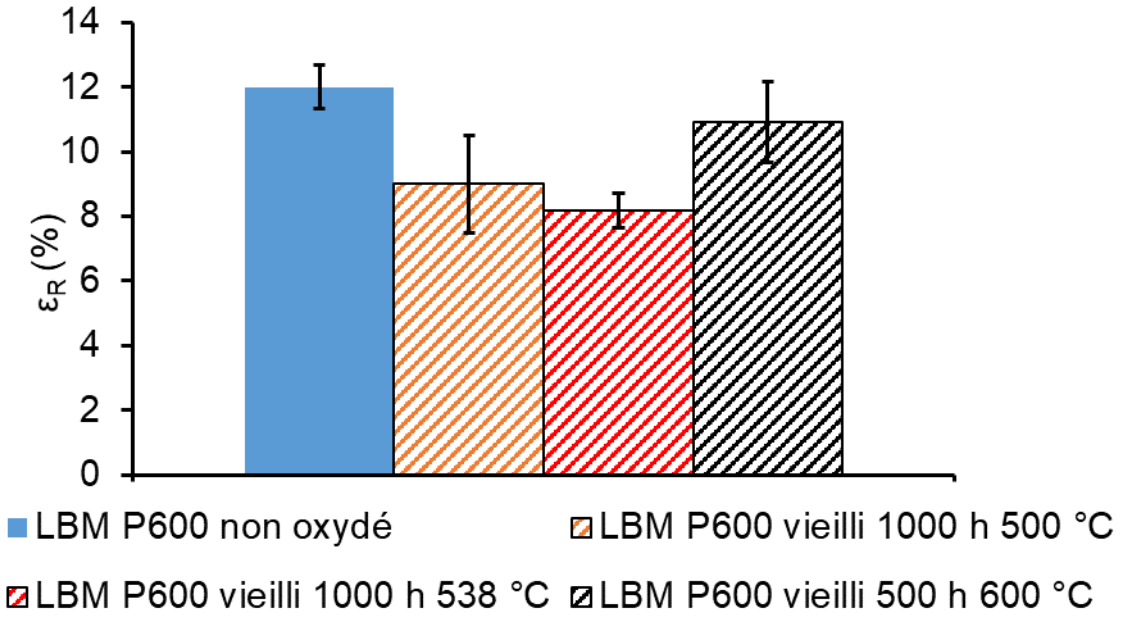


Baisse de la ductilité des éprouvettes plus importante à 500 et 538 °C

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Essais de traction sur des éprouvettes <u>vieillies</u> sans ZAO à 500 et 538 °C





Hypothèse: [15] [16] La formation de Ti_3Al durant les traitements thermiques à 500 et 538 °C augmenterait les résistances mécaniques et diminuerait la ductilité

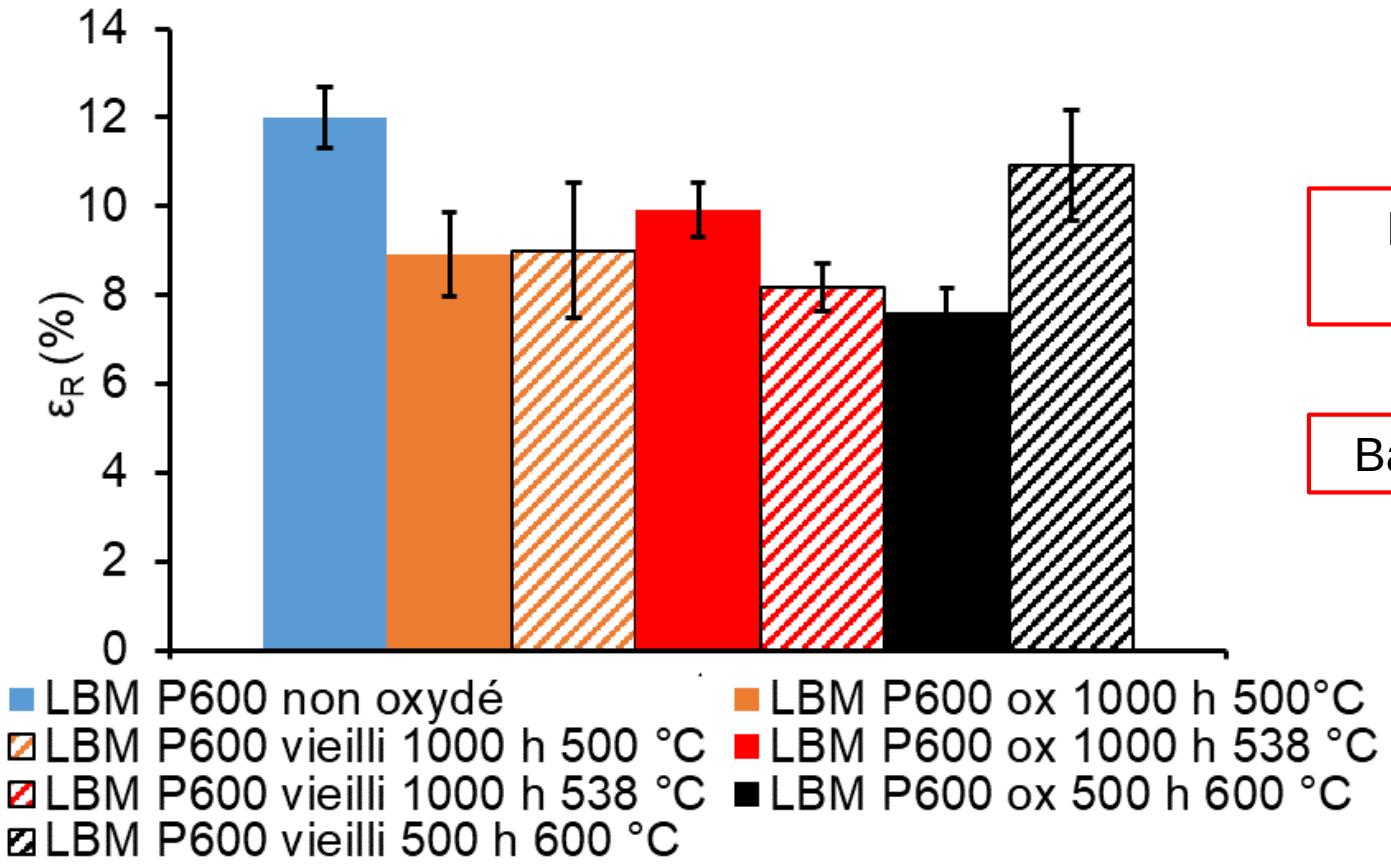
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

[15] G. Welsch et al., Metallurgical Transactions A, 8 (1977) 169-177.

[16] Calculs Thermocalc avec la base de données Ti-TCTI 1

Influence de l'oxydation et du vieillissement thermique sur la ductilité

*Essais effectués sur trois éprouvettes



Baisse de la ductilité à 500 et 538 °C due au vieillissement thermique

Baisse de la ductilité à 600 °C due à l'oxydation

Comment ?

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

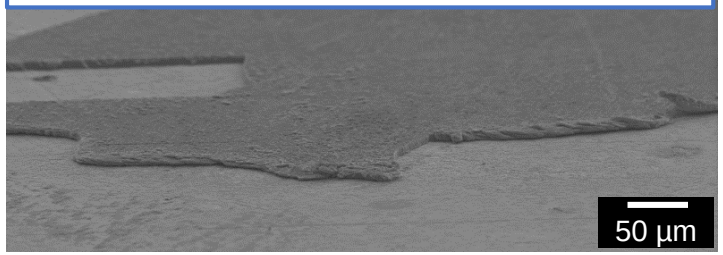
Merci à J.Milanese et J.B. Osio pour la formation aux essais de traction

Zone affectée mécaniquement par l'oxygène

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

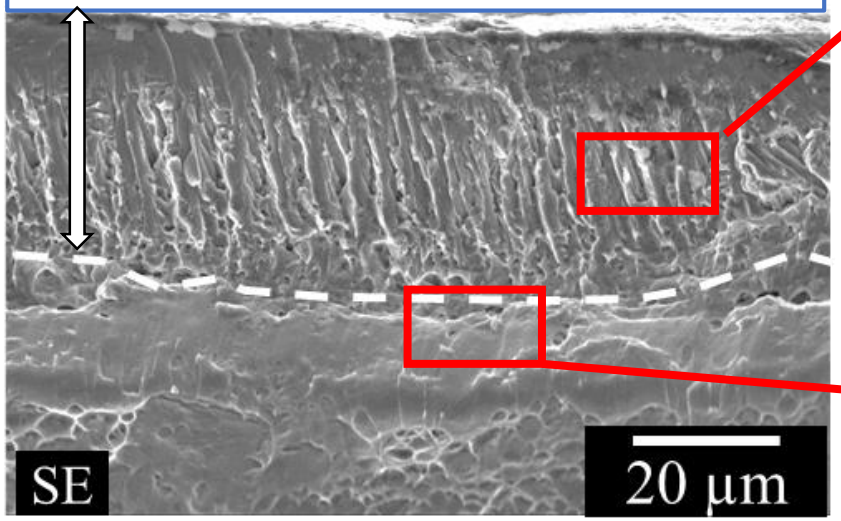
Modification du mode de rupture dans la zone oxydée

Ecaillage de la couche d'oxyde

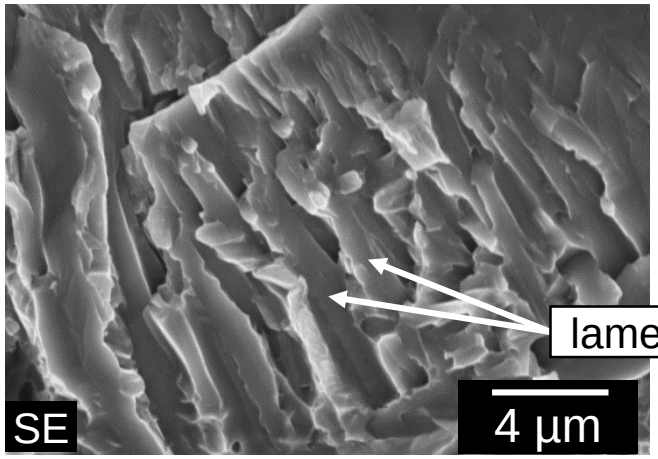


Modification du mode de rupture de ductile à fragile en surface

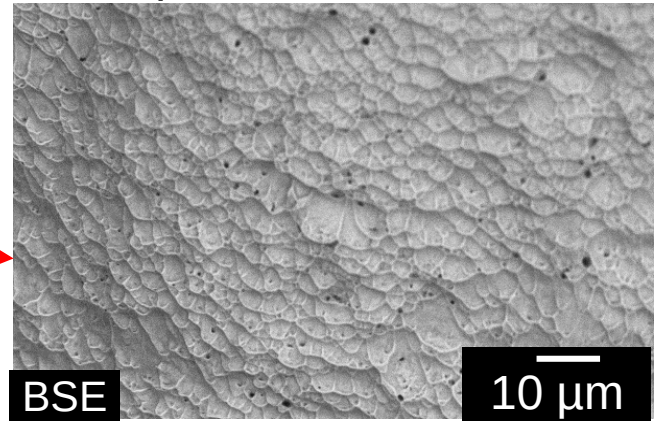
Mesure de la **ZAO_{FR}**



Rupture fragile en surface



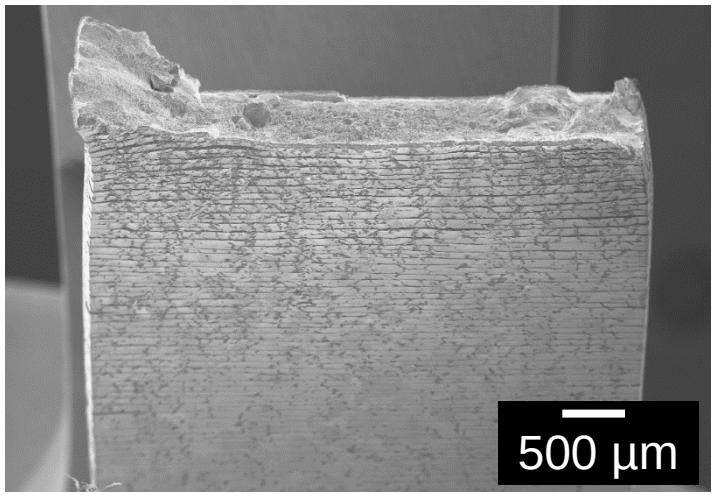
Rupture ductile à cœur

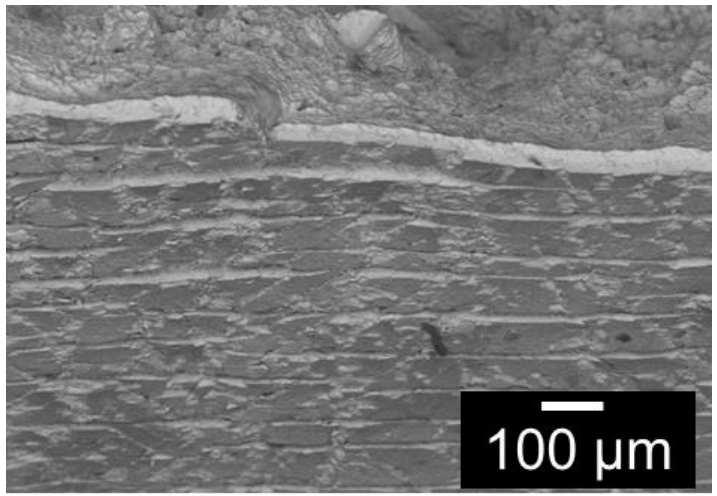


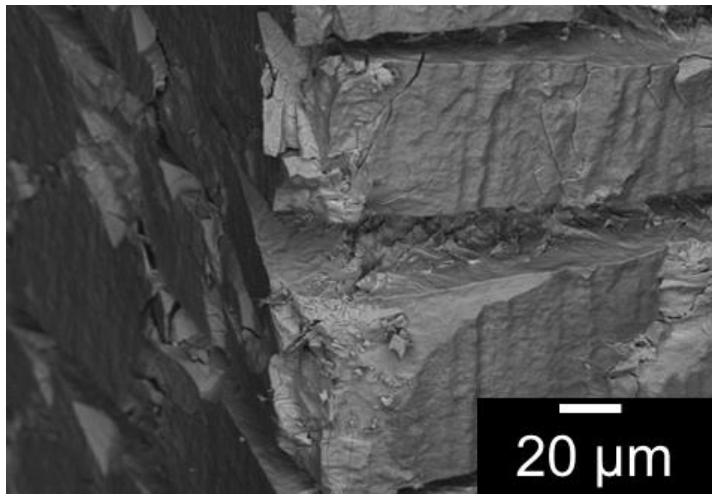
LBM P600 oxydé 500 h 600 °C

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Formation de fissures dans la zone oxydée



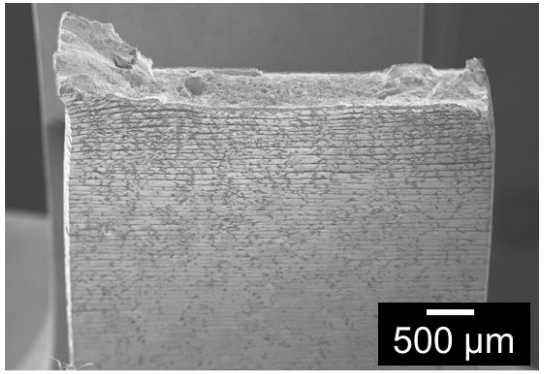


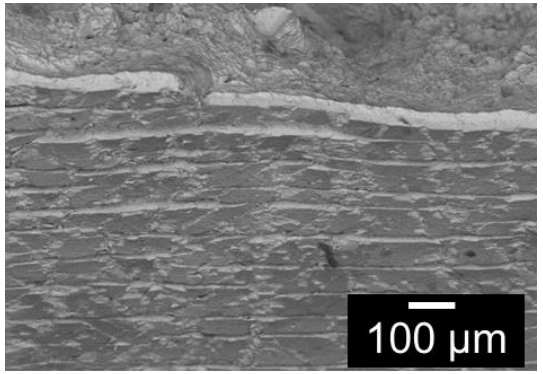


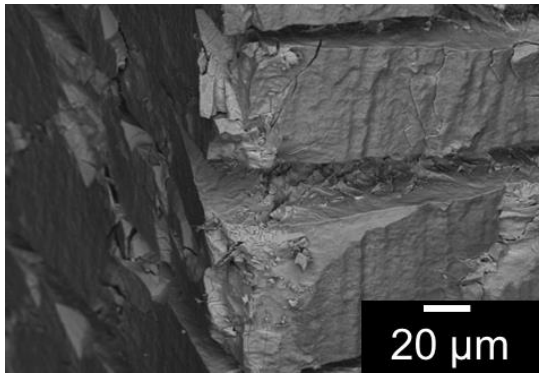
Formation de fissures en surface le long du fût d'éprouvettes oxydées durant les essais de traction

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

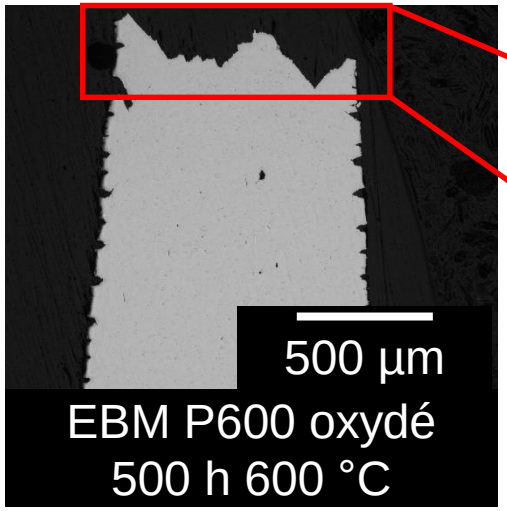
Formation de fissures dans la zone fragile

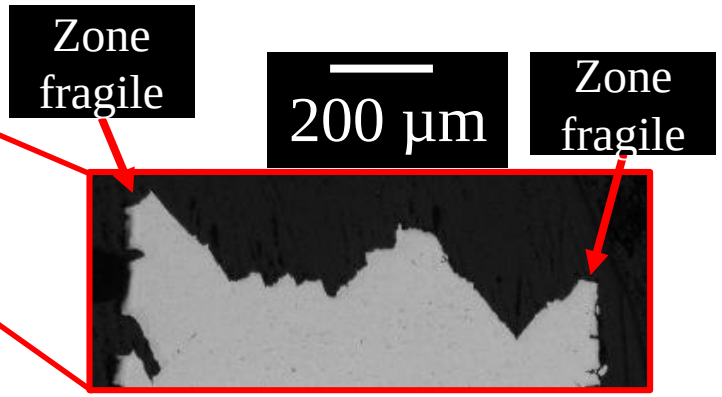






Formation de fissures en surface le long du fût d'éprouvettes oxydées durant les essais de traction

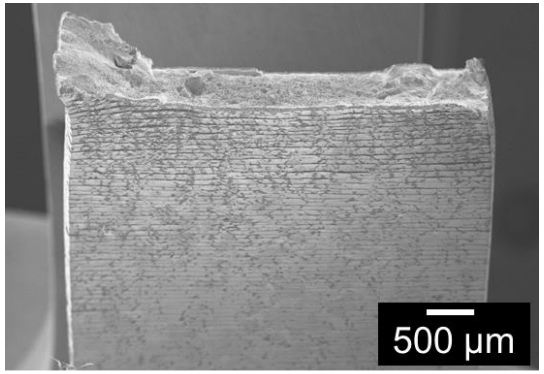


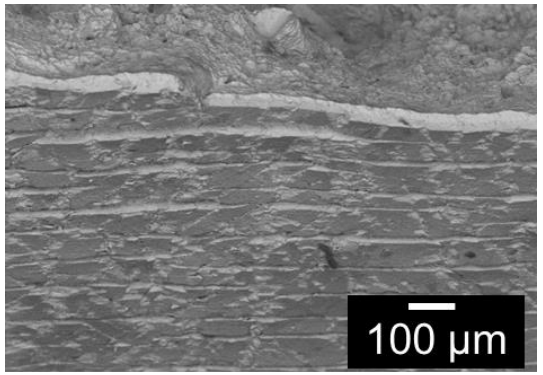


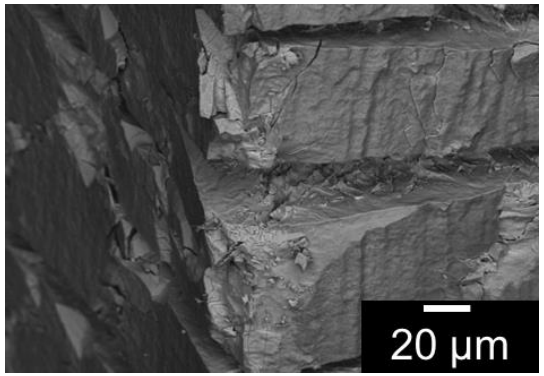
Fissures dans la zone fragile

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

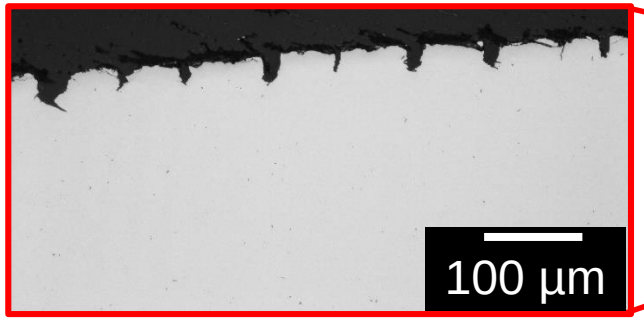
Formation de fissures dans la zone fragile



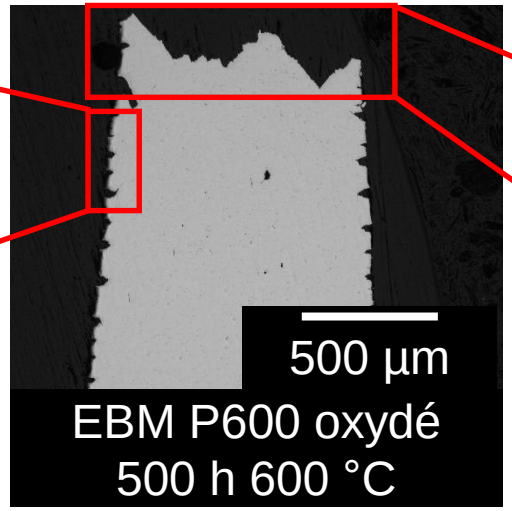


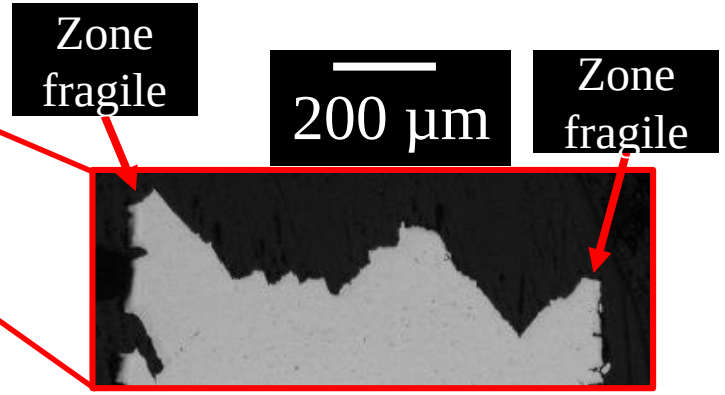


Formation de fissures en surface le long du fût d'éprouvettes oxydées durant les essais de traction



Mesure de la profondeur des fissures



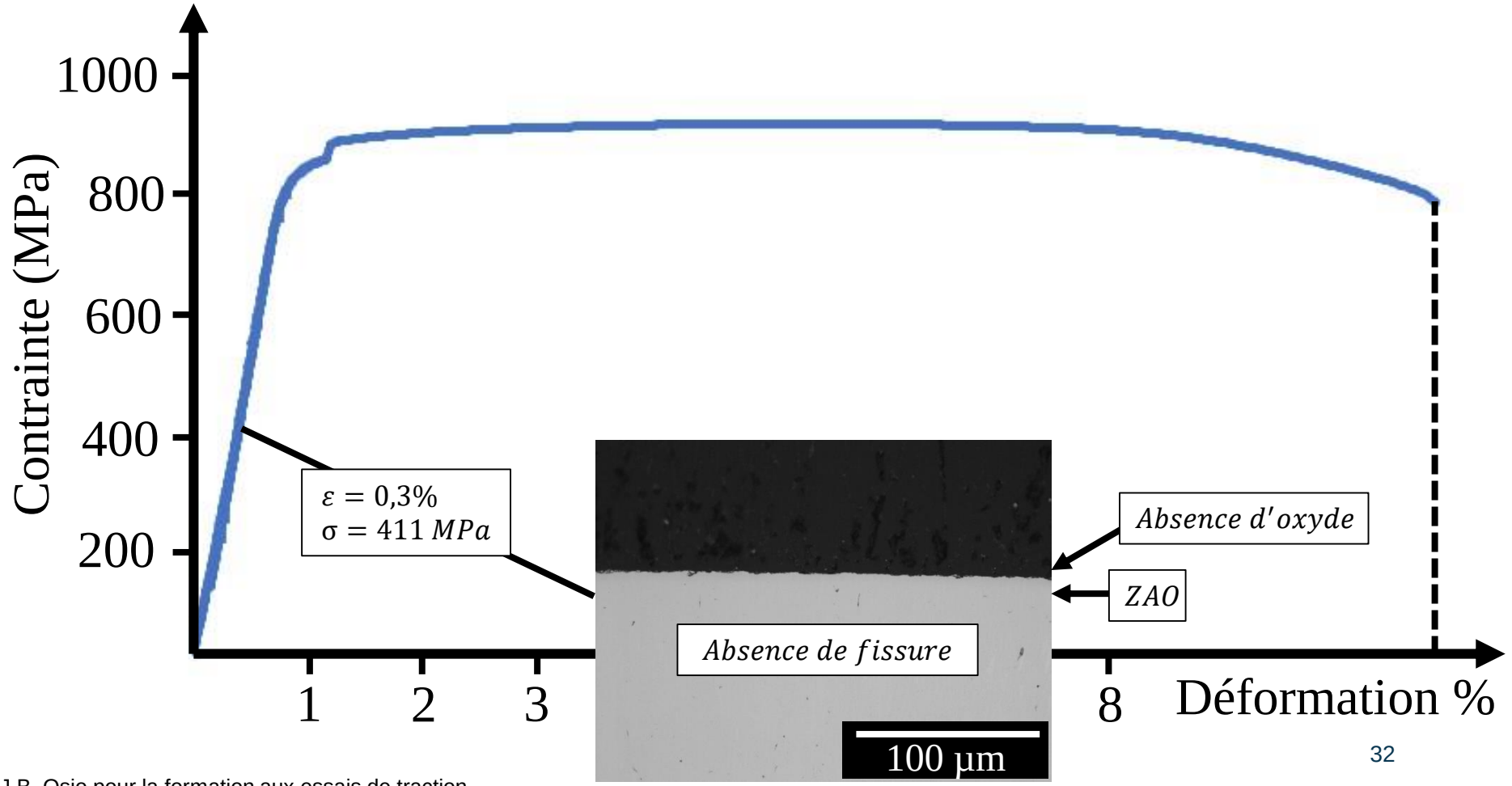


Fissures dans la zone fragile

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Amorçage des fissures pour une éprouvette oxydée 500 h à 600 °C

ε = 0,3% → Début de l'écaillage de l'oxyde



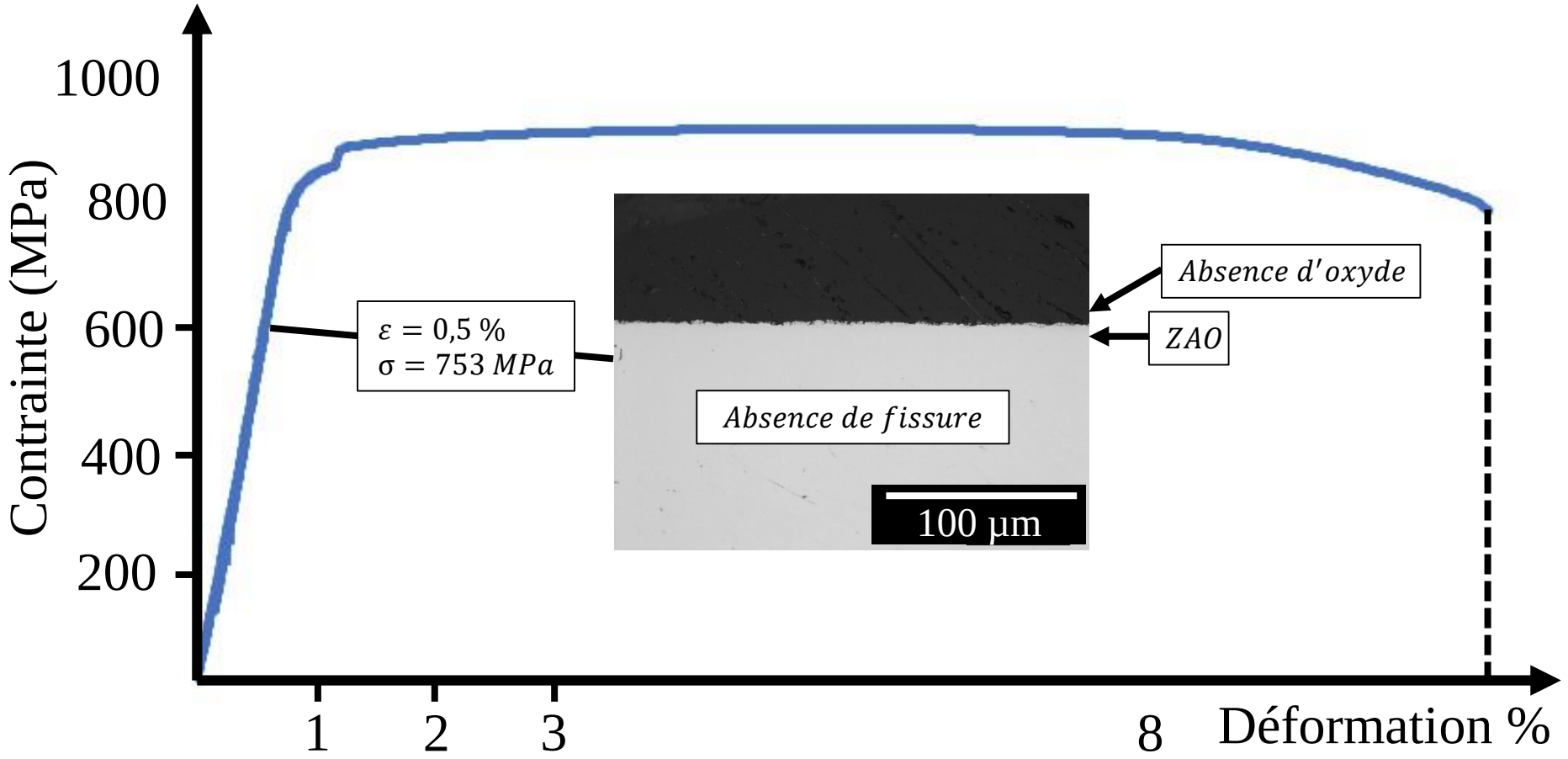
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Merci à J.Milanese et J.B. Osio pour la formation aux essais de traction

Amorçage des fissures pour une éprouvette oxydée 500 h à 600 °C

ε = 0,5% → Ecaillage de l'oxyde continue

ε = 0,3% → Début de l'écaillage de l'oxyde



© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

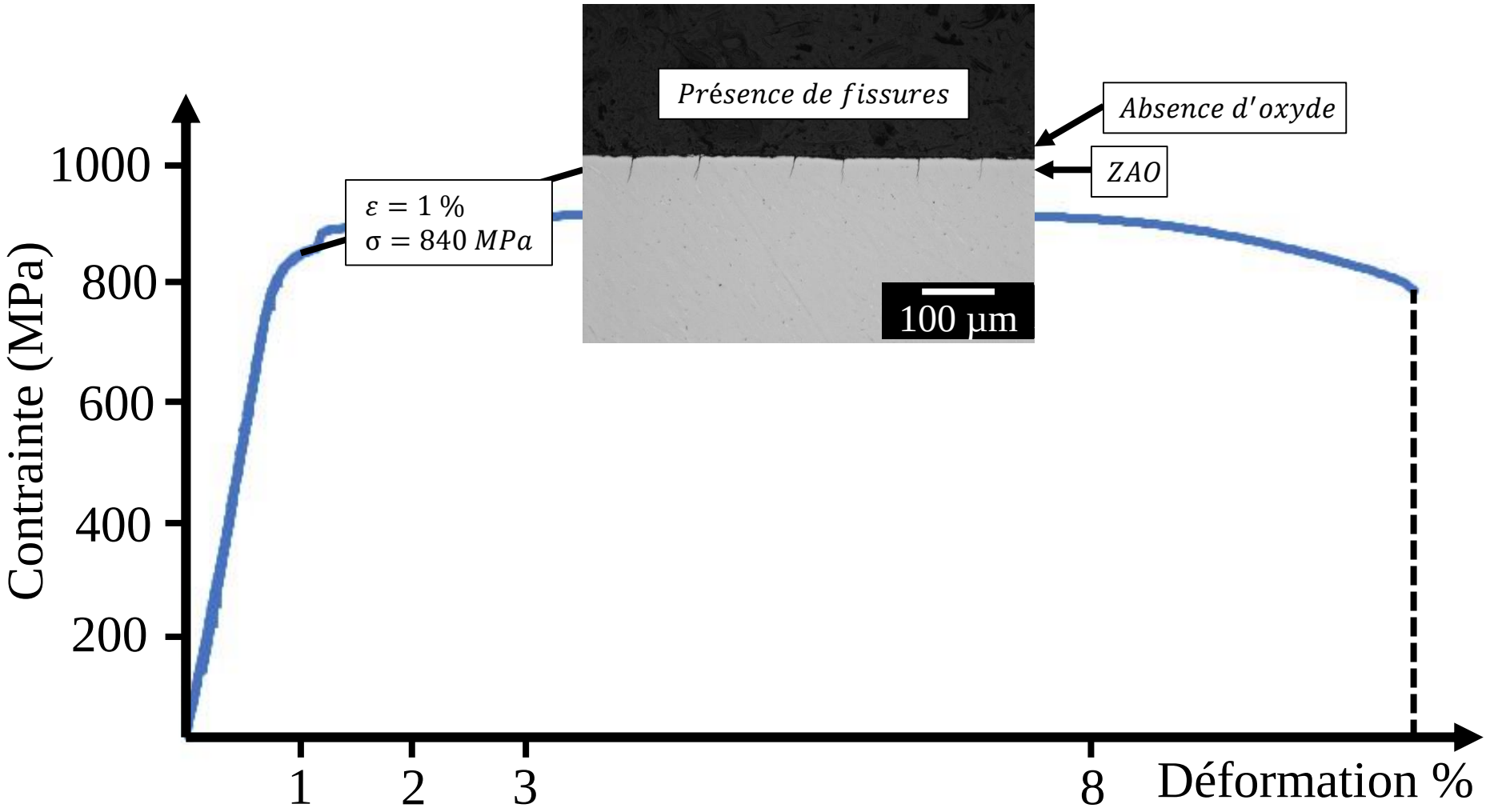
Merci à J.Milanese et J.B. Osio pour la formation aux essais de traction

Amorçage des fissures pour une éprouvette oxydée 500 h à 600 °C

ε = 1% → Oxyde totalement écaillé

ε = 0,5% → Ecaillage de l'oxyde continue

ε = 0,3% → Début de l'écaillage de l'oxyde



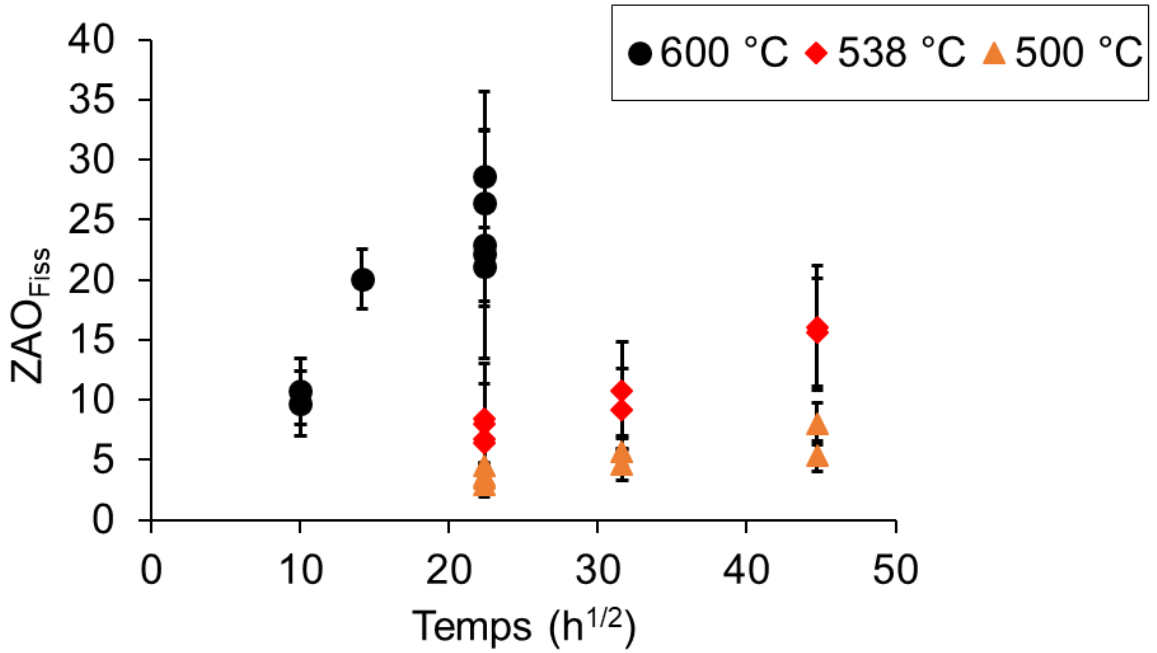
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

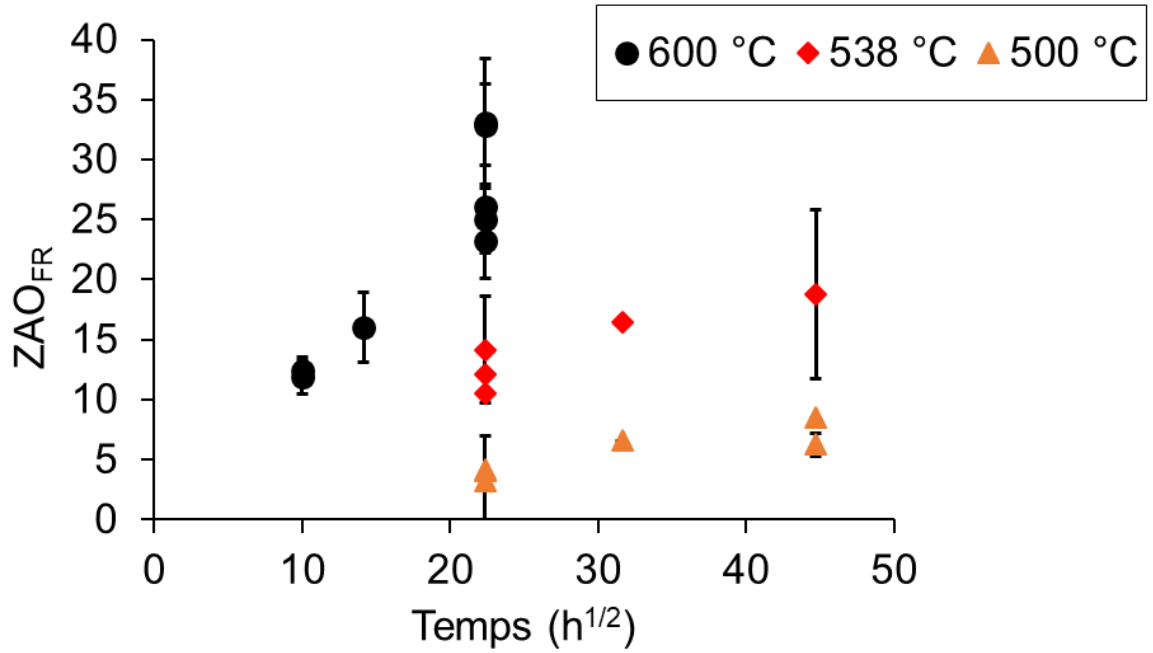
Merci à J.Milanese et J.B. Osio pour la formation aux essais de traction

Amorçage des fissures pour une éprouvette oxydée 500 h à 600 °C

Formation des fissures dans le domaine élastique pour $\varepsilon \leq 1\%$

Evolution de la ZAO_{FR} et ZAO_{Fiss} avec le temps et la température

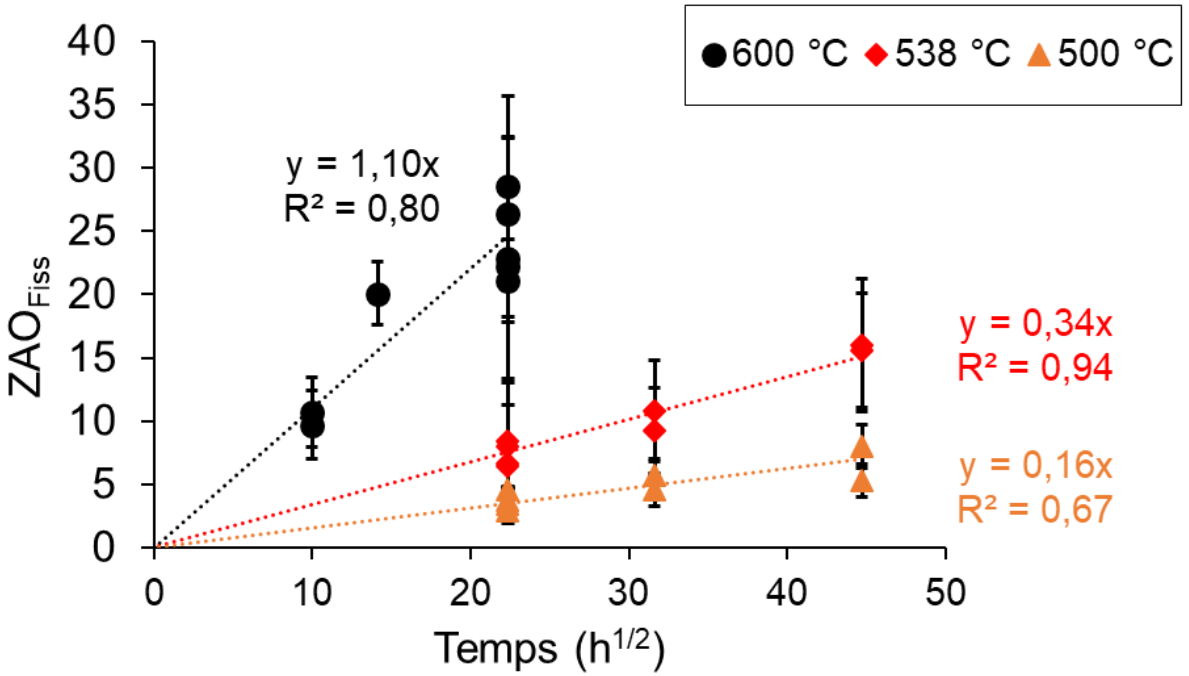


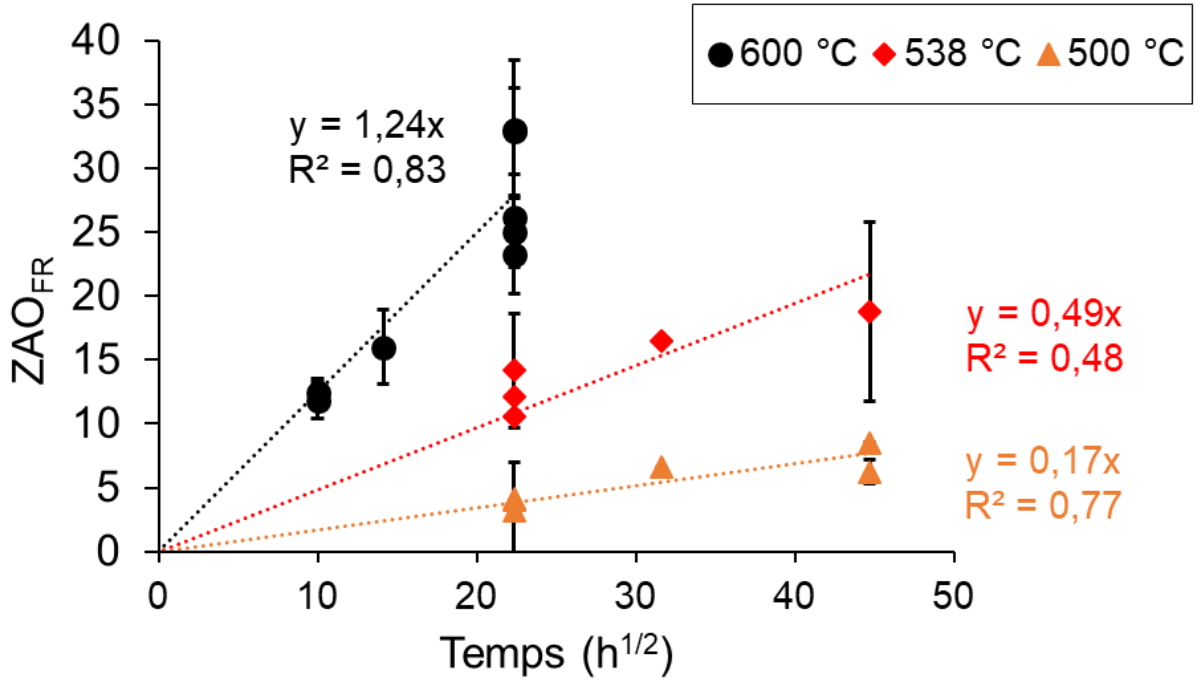


La microstructure n'a pas d'effet visible sur la zone fragile et la profondeur de fissure

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Evolution de la ZAO_{FR} et ZAO_{Fiss} avec le temps et la température

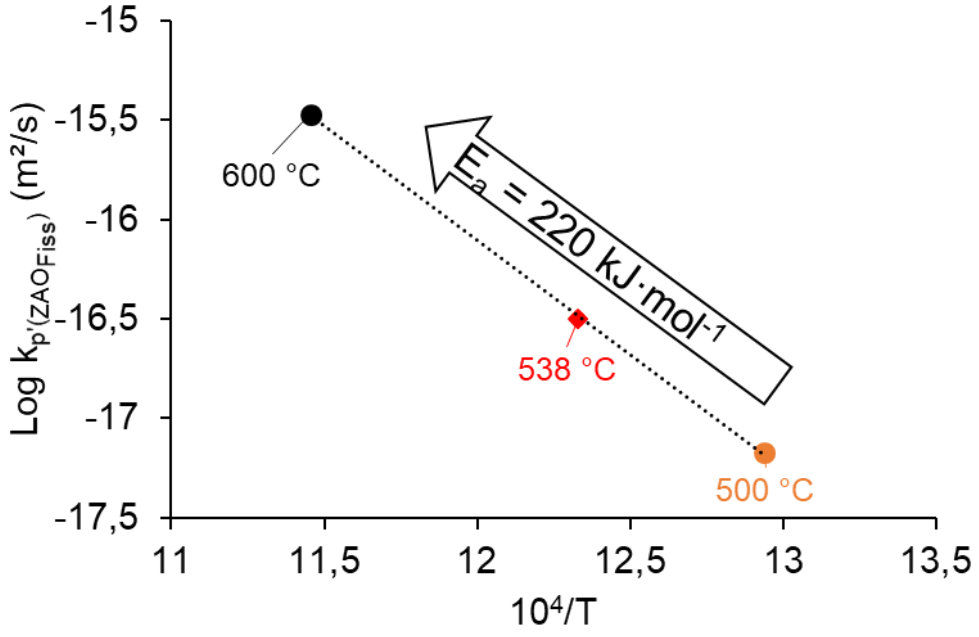


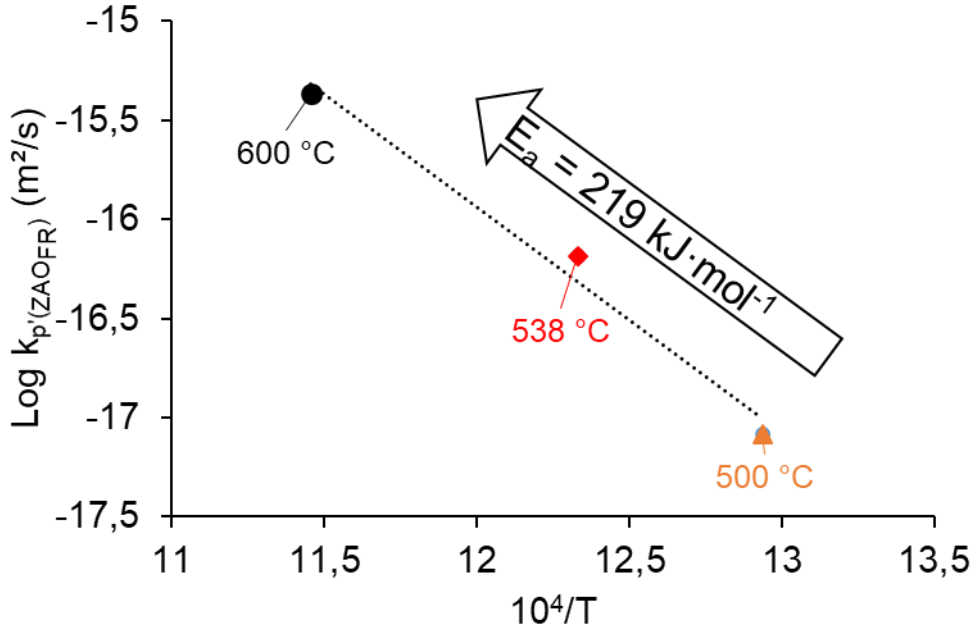


Evolution de la ZAO_{Fiss} et ZAO_{FR} en fonction du temps suit une loi parabolique

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Evolution de la ZAO_{FR} et ZAO_{Fiss} avec le temps et la température

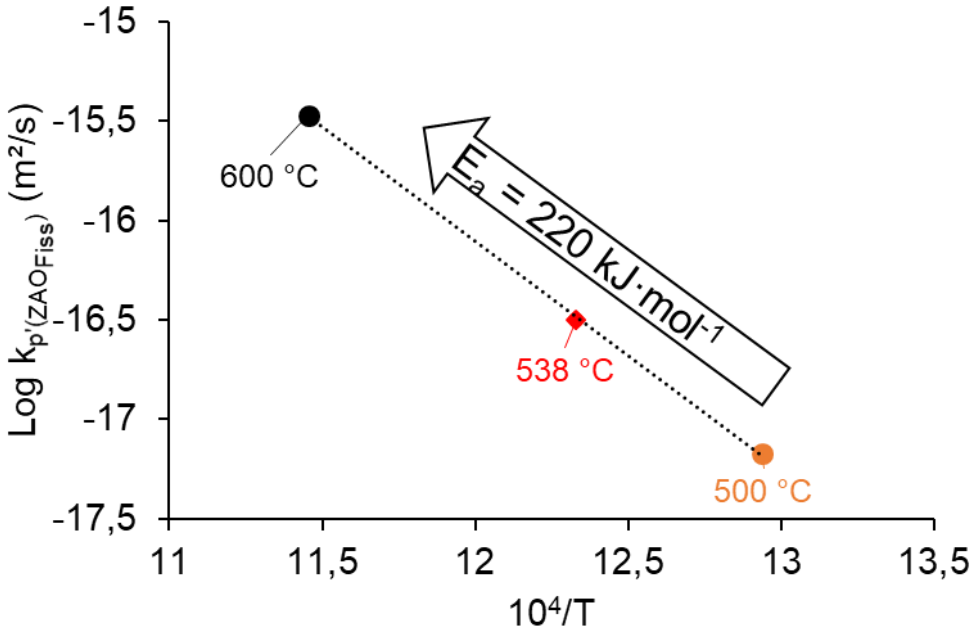


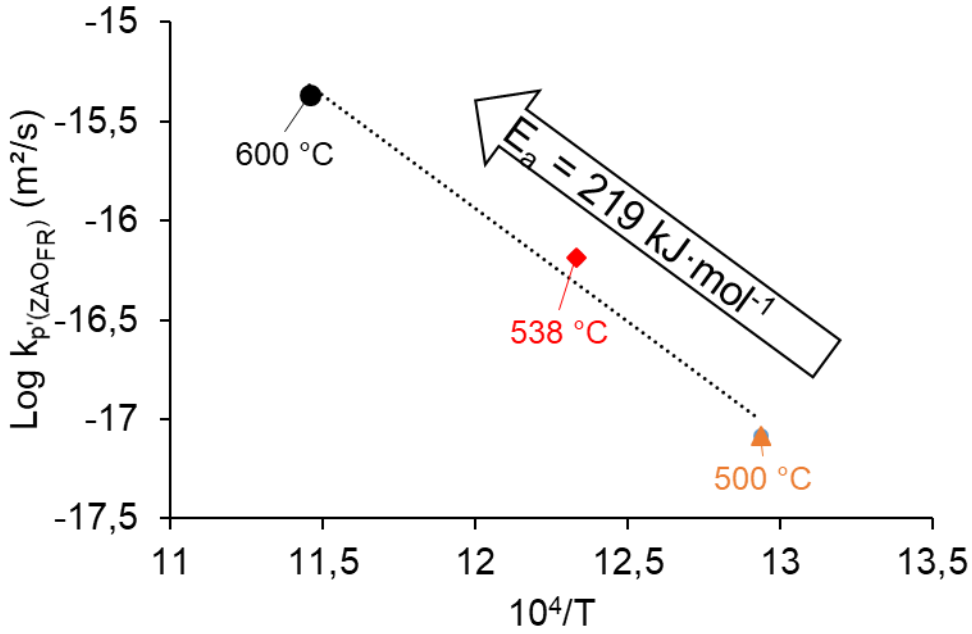


Evolution de la ZAO_{Fiss} et ZAO_{FR} en fonction de la température suit une loi d'Arrhenius

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Evolution de la ZAO_{FR} et ZAO_{Fiss} avec le temps et la température





$$ZAO_{Fiss} = \sqrt{4{,}9.10^{-3} \cdot e^{-\frac{220\,000}{R \cdot T}} \cdot t}$$

$$ZAO_{FR} = \sqrt{5{,}8.10^{-3} \cdot e^{-\frac{219\,000}{R \cdot T}} \cdot t}$$

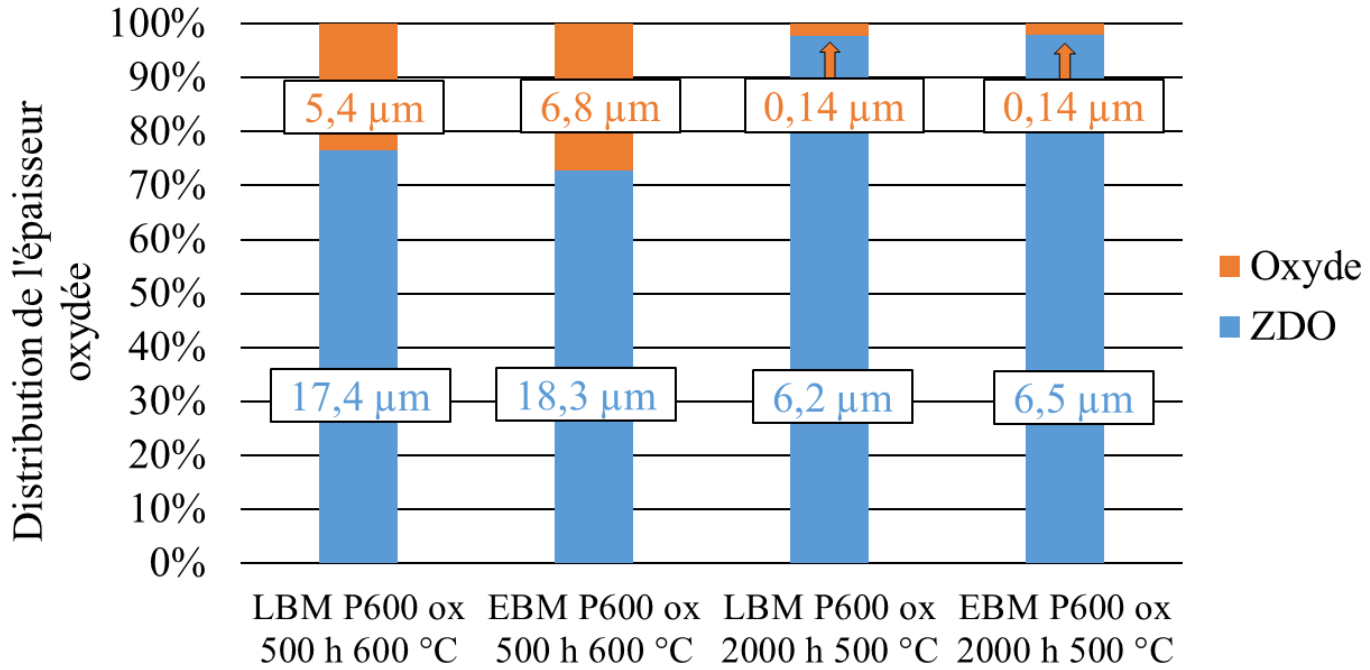
Modélisation de ZAO_{FR} et ZAO_{Fiss} pour [0 – 2000 h] d'oxydation à [500 – 600 °C]

E_a (ZDO_{EPMA}) = 223 kJ·mol^{-1} ➡ Energie d'activation de la diffusion de l'oxygène dans le TA6V

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Conclusions

Formation d'une couche d'oxyde et d'une zone de diffusion de l'oxygène lors de l'oxydation du TA6V



500 h 600 °C

Épaisseur ZDO = 2,7 - 3,2 · épaisseur oxyde

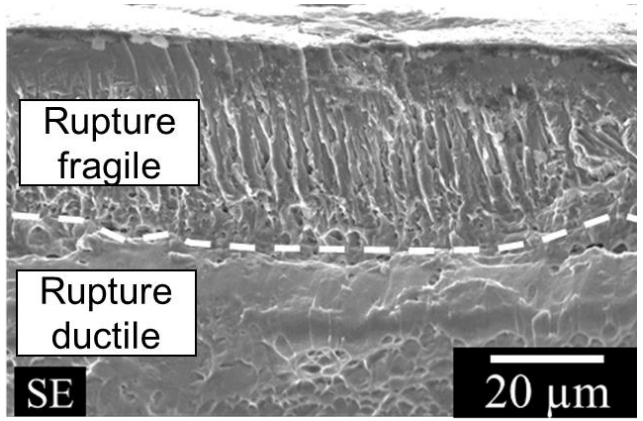
2000 h 500 °C

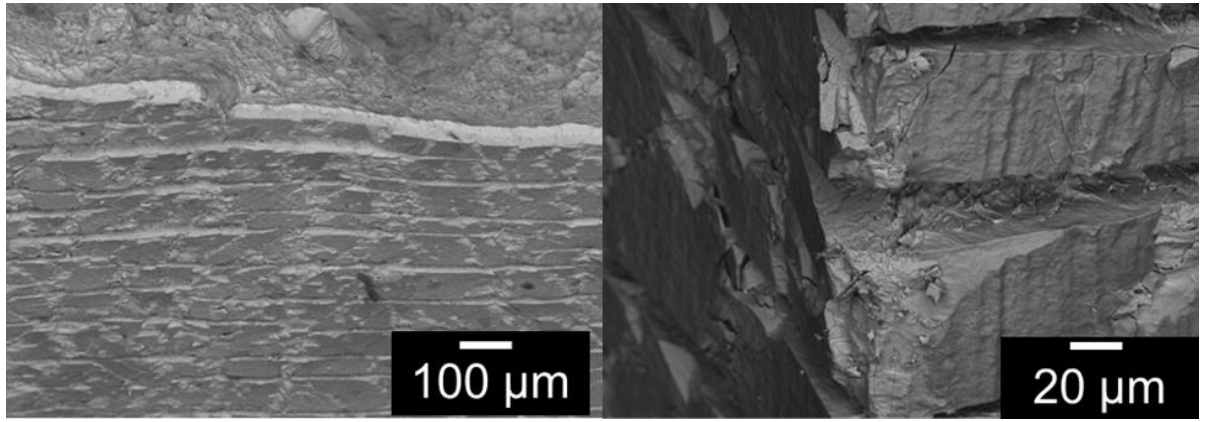
Épaisseur ZDO = 44 – 46 · épaisseur oxyde

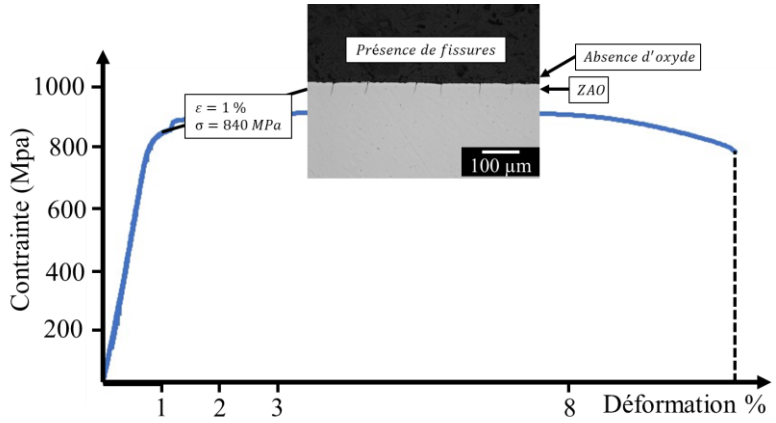
L'endommagement de la couche d'oxyde aura peu d'influence sur les propriétés mécaniques de l'alliage TA6V

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Conclusions



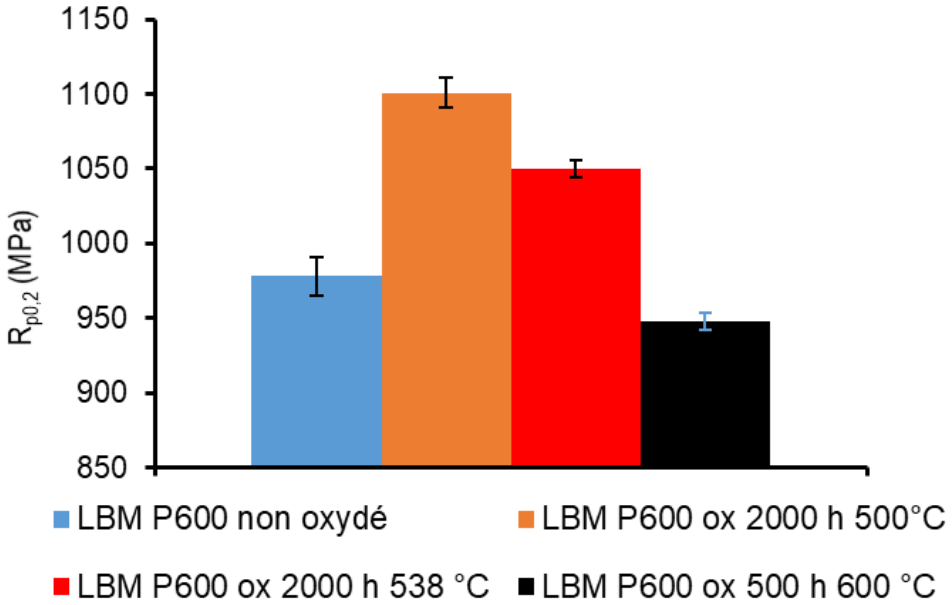


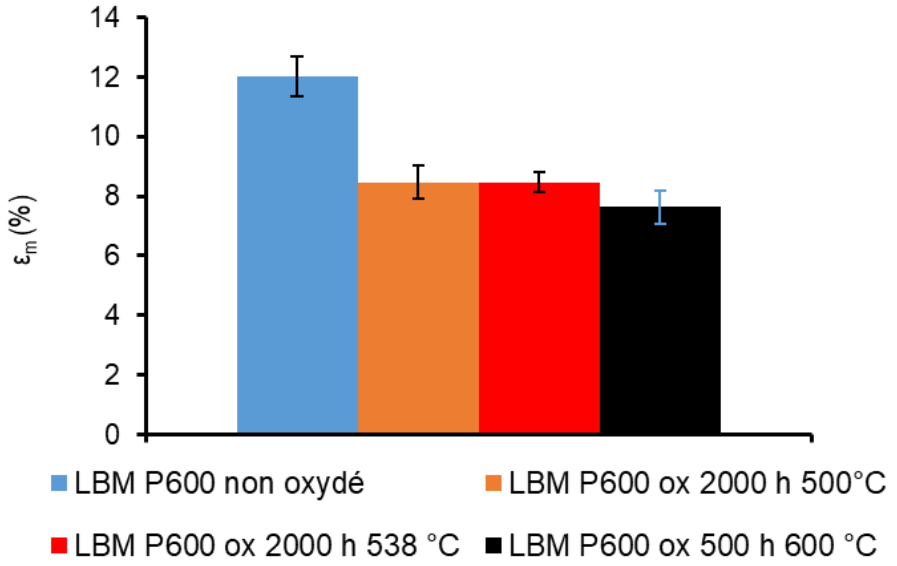


Formation de fissures et rupture fragile en surface des éprouvettes de traction pour une déformation ≤ 1% lors d'un essai de traction

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Conclusions





$R_{p0,2}$ ↗ et ε_R ↘ pour les éprouvettes oxydées 2000 h d'oxydation à 500 et 538 °C dues à la formation de Ti_3Al

$R_{p0,2}$ ↘ et ε_R ↘ pour les éprouvettes oxydées 500 h d'oxydation à 600 °C dues à la présence de fissures

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Conclusions

E_a (ZAO_{FR}) = 219 kJ·mol^{-1} E_a (ZAO_{Fiss}) = 220 kJ·mol^{-1} E_a (ZDO_{EPMA}) = 223 kJ·mol^{-1}

Les énergies d'activation de la zone fragile, la zone fissurée et la zone de diffusion de l'oxygène sont équivalentes

La cinétique de croissance de la ZAO_{FR} et ZAO_{Fiss} semblent contrôlées par la diffusion de l'oxygène dans le métal

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Perspectives

Ajouter des données aux modèles pour augmenter le domaine de températures et de durées

Déterminer l'influence des fissures sur le comportement mécanique

Caractériser la déformation à laquelle s'amorcent les fissures

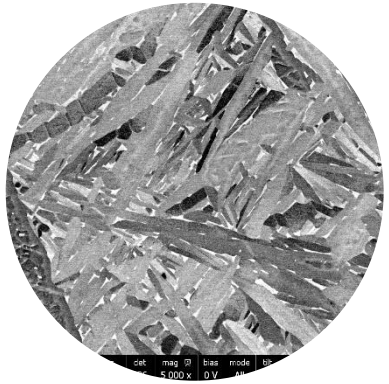
Faire des essais sur des éprouvettes où la section affectée par l'oxygène est plus importante

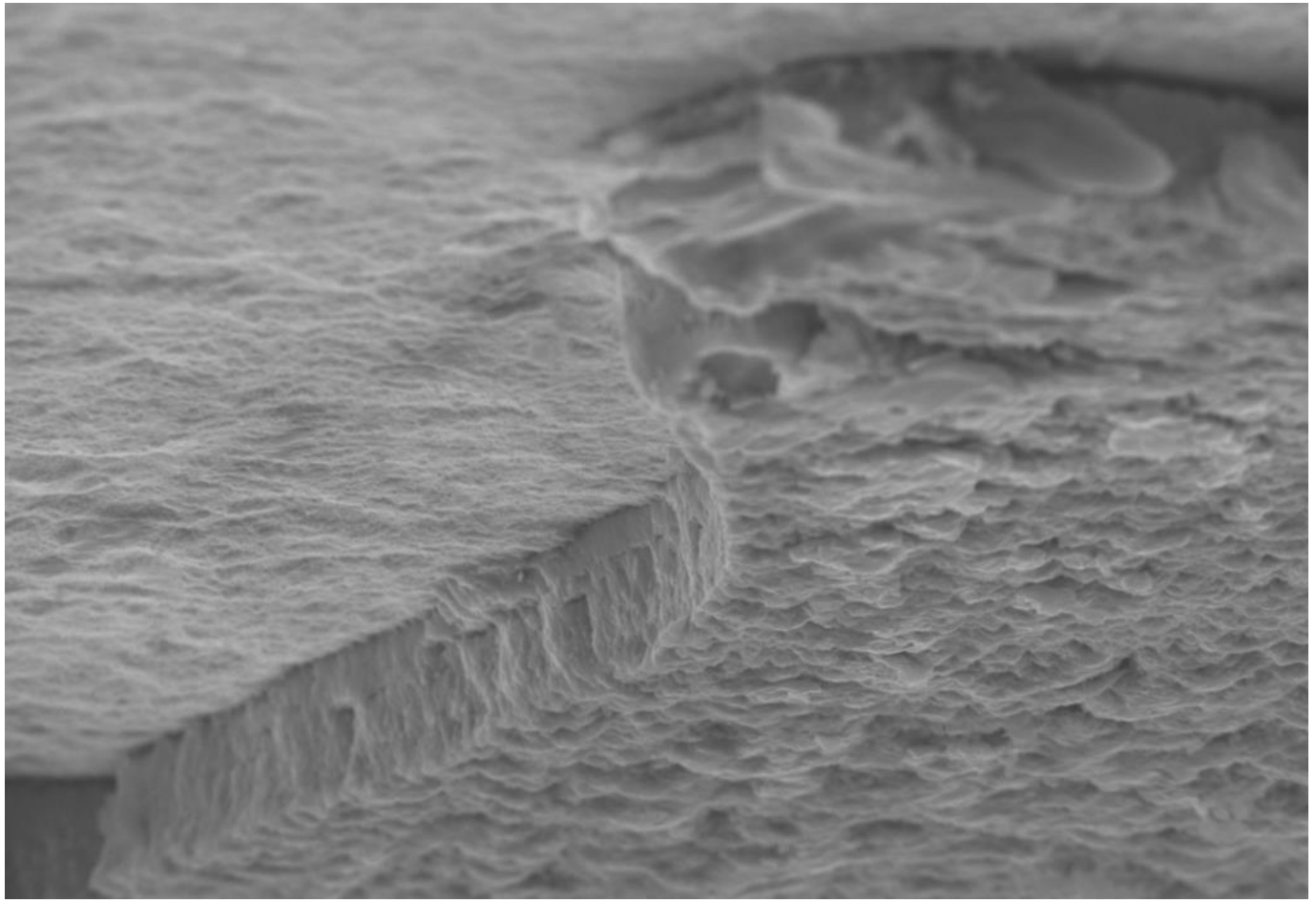
Faire des essais de fatigue, fluage et corrosion/oxydation sous contraintes

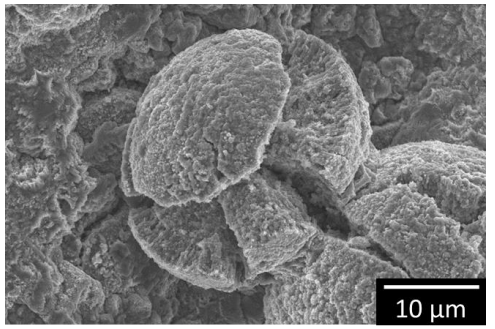
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

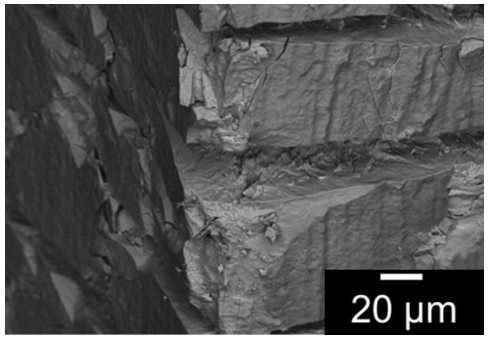
Merci de votre attention







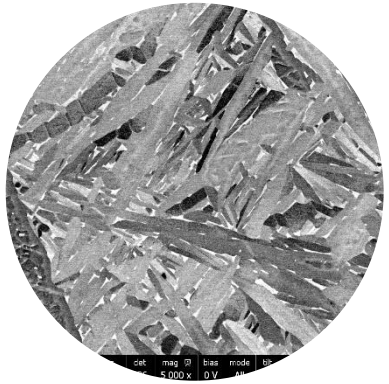


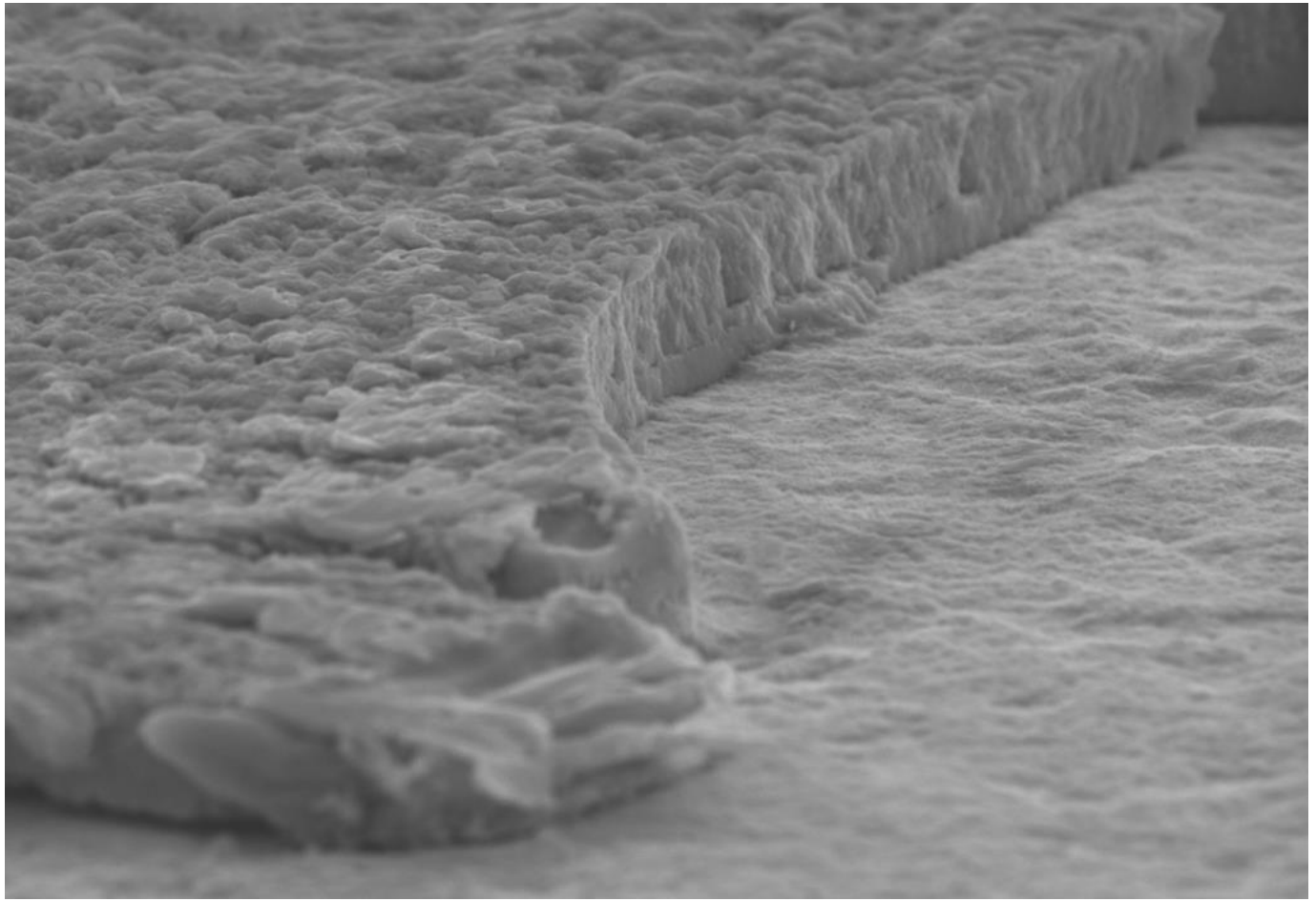


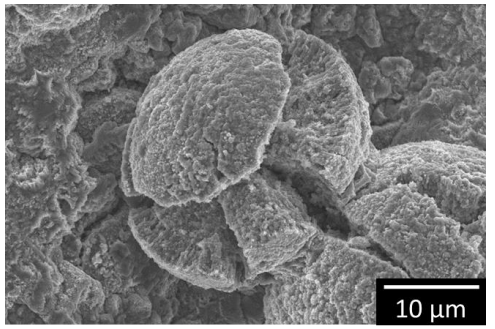
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

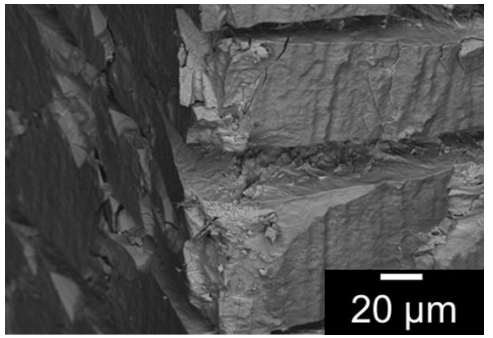
Merci de votre attention









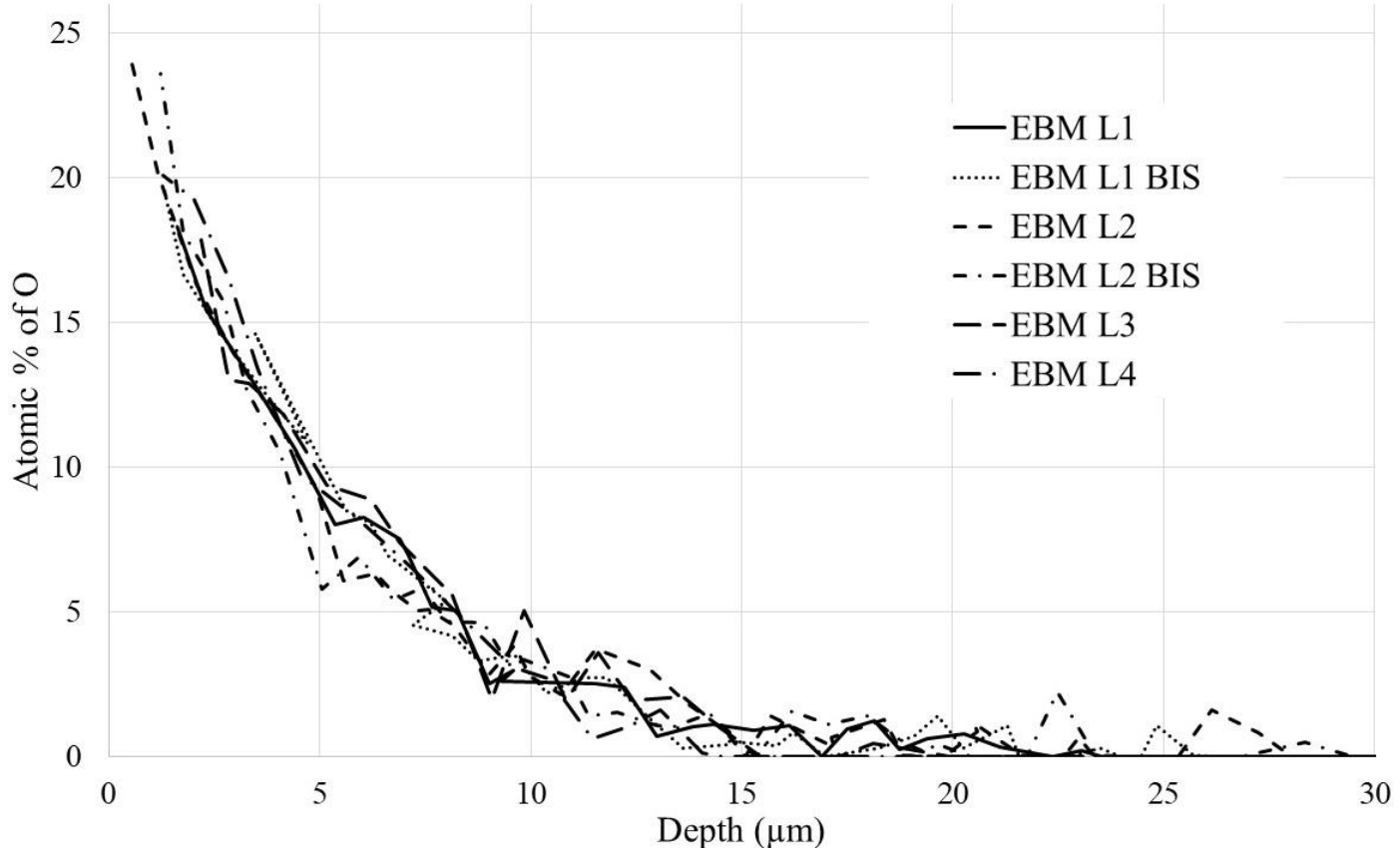


© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Annexes

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

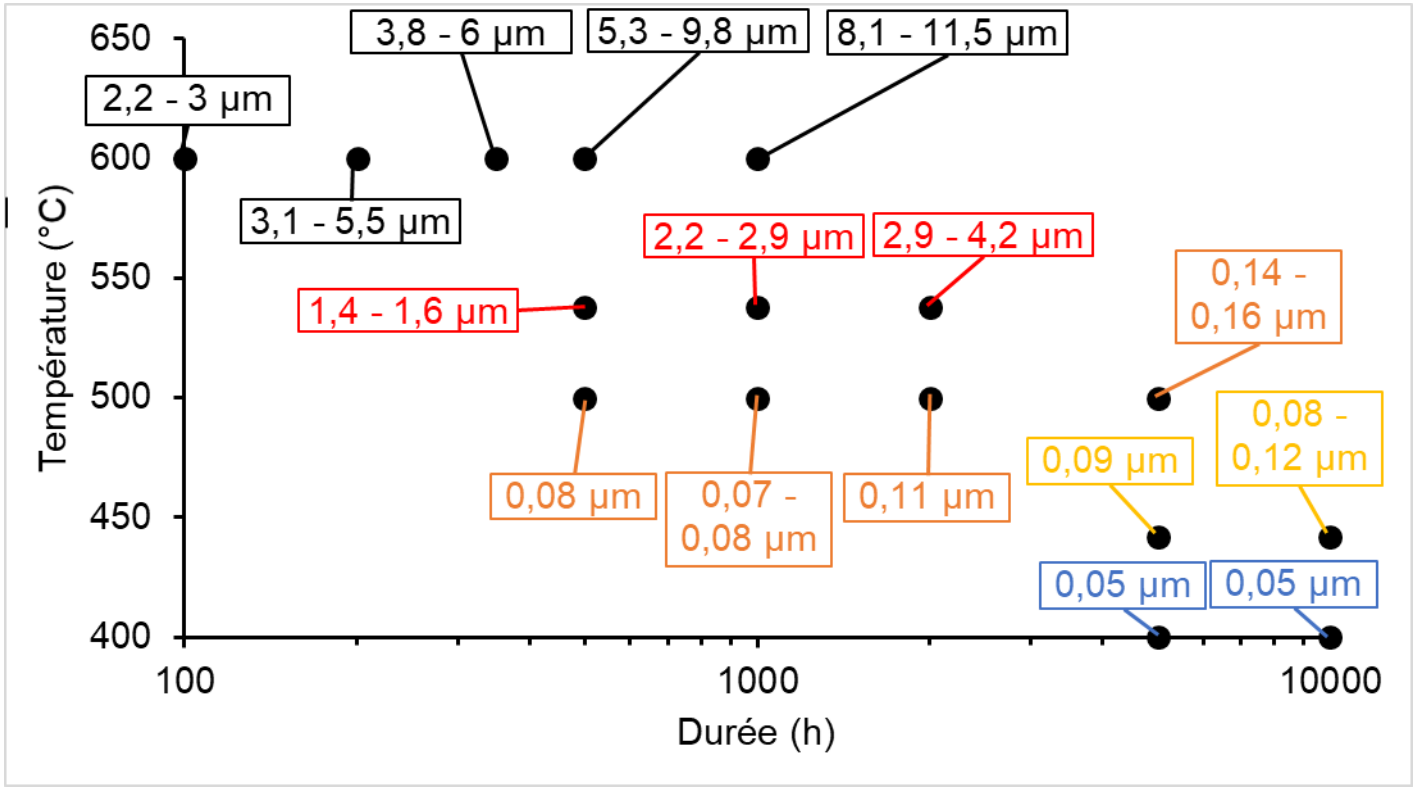
Répétabilité des profils de concentration en oxygène



Profils en oxygène d'un échantillon EBM P600 oxydé 500 h à 600 °C

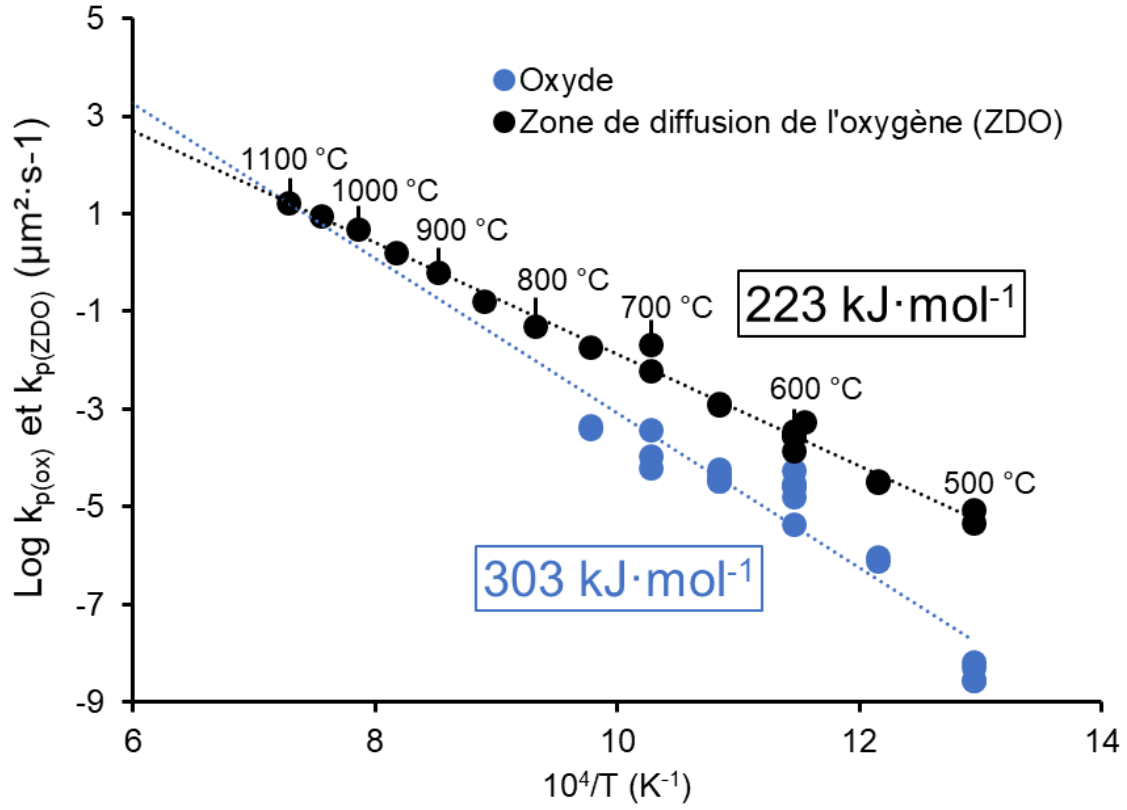
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

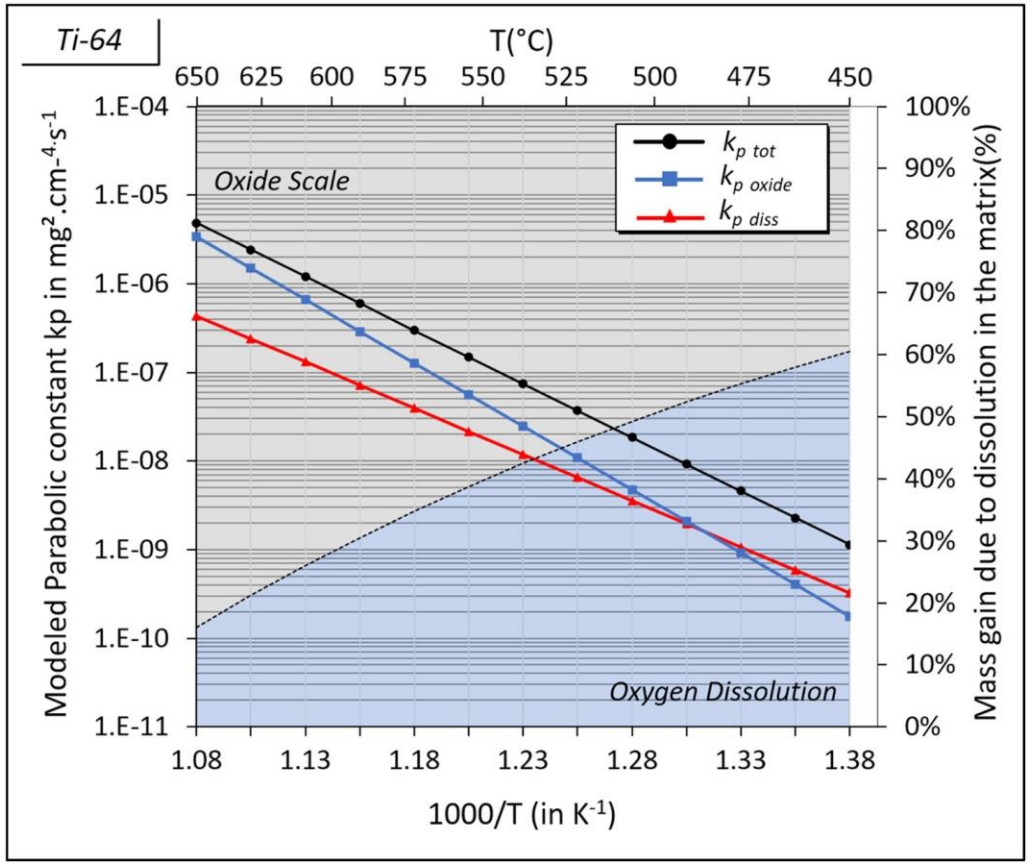
Tableau récapitulatif des épaisseurs de couche d'oxyde



© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Evolution du $k_{p(ox)}$ et $k_{p(ZDO)}$ en fonction de la température

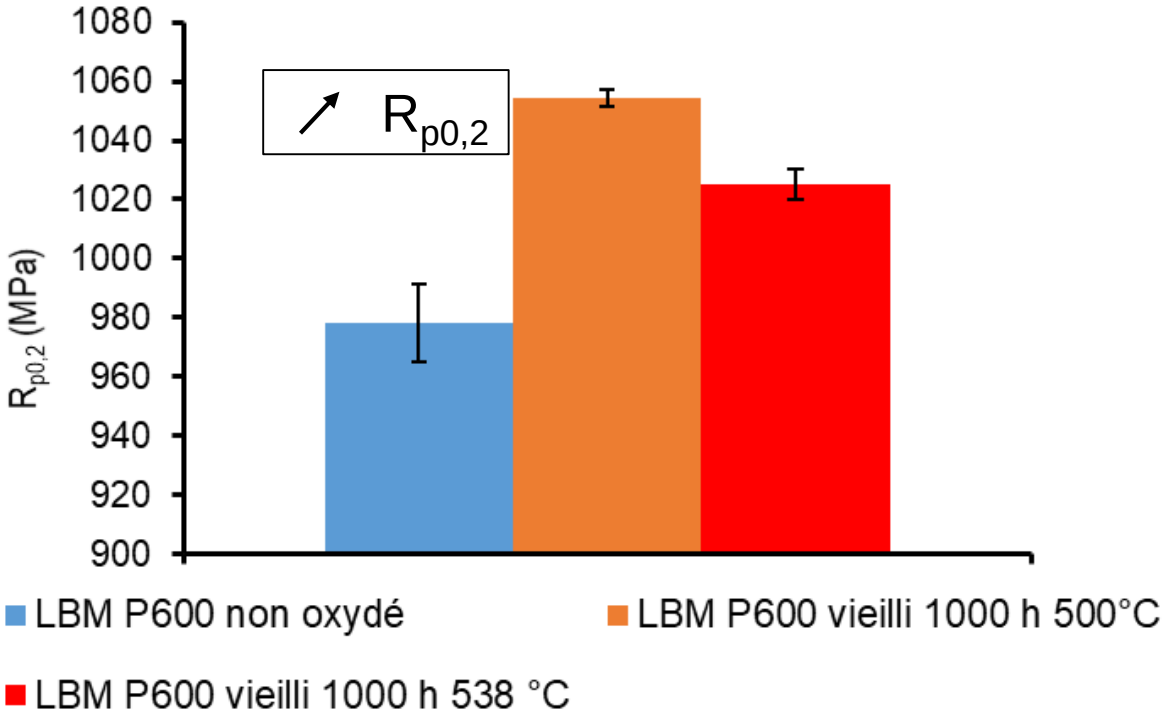


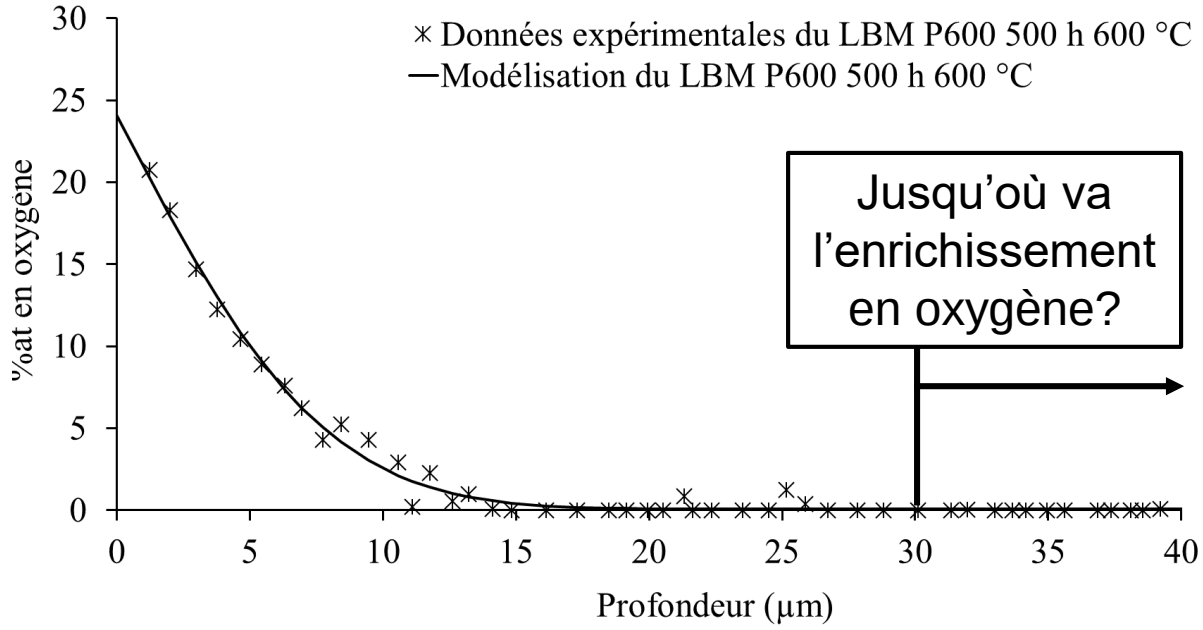


Vaché et al., Corrosion science(2020)

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Essai de traction sur des éprouvettes vieillies à 500 et 538 °C





Hypothèse 1: [16] [17] La formation de Ti_3Al durant les traitements thermiques à 500 et 538 °C augmenterait les résistances mécaniques

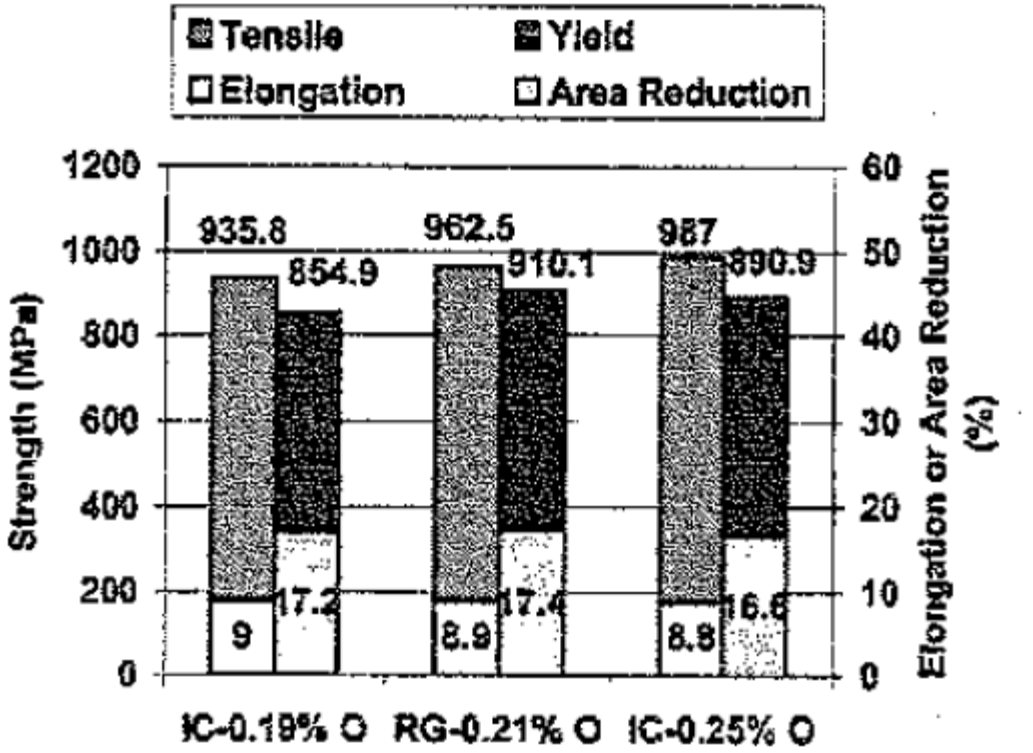
Hypothèse 2: La ZD0 n'a pas été entièrement retirée et l'enrichissement en oxygène augmente les résistances mécaniques

[16] G. Welsch et al., Metallurgical Transactions A, 8 (1977) 169-177.

[17] Calculs Thermocalc avec la base de données Ti-TCTI 1

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Enrichissement en oxygène, effet sur les propriétés mécaniques



F.H. (Sam) Froes, The Minerals, Mineral, Metals & Materials Society, 2004

Quand Δwt% O = 0,06%
Quand Δat% O = 0,18%
} ΔRp0,2% O = 51,2 MPa

En pointe de fissure [O] ≈ 1 at %

Donc Δat% O par rapport au cœur ≈ 0,5%

↳ ΔRp0,2% O = 142 MPa

Pour 2000 h à 500 et 538 °C l'épaisseur entre 1 at% et 0,5 at % est d'environ 5µm

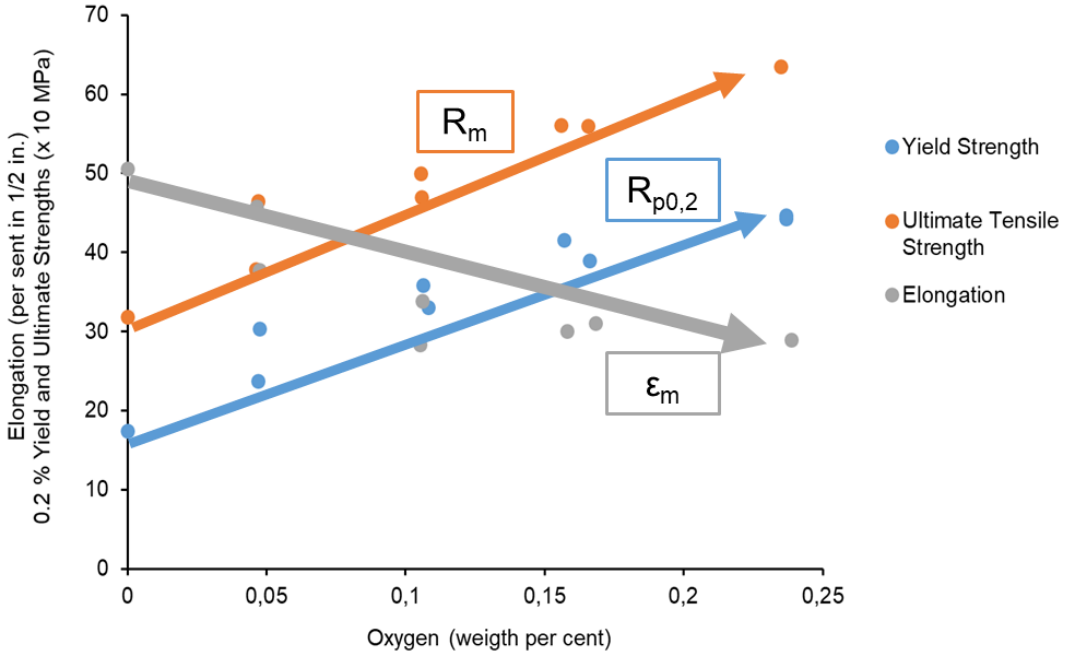
Épaisseur de l'éprouvette = 1,28 mm

$$\frac{1,27}{1,28} \cdot 978 + \frac{0,01}{1,28} \cdot (978 + 142) = 979 \text{ MPa}$$

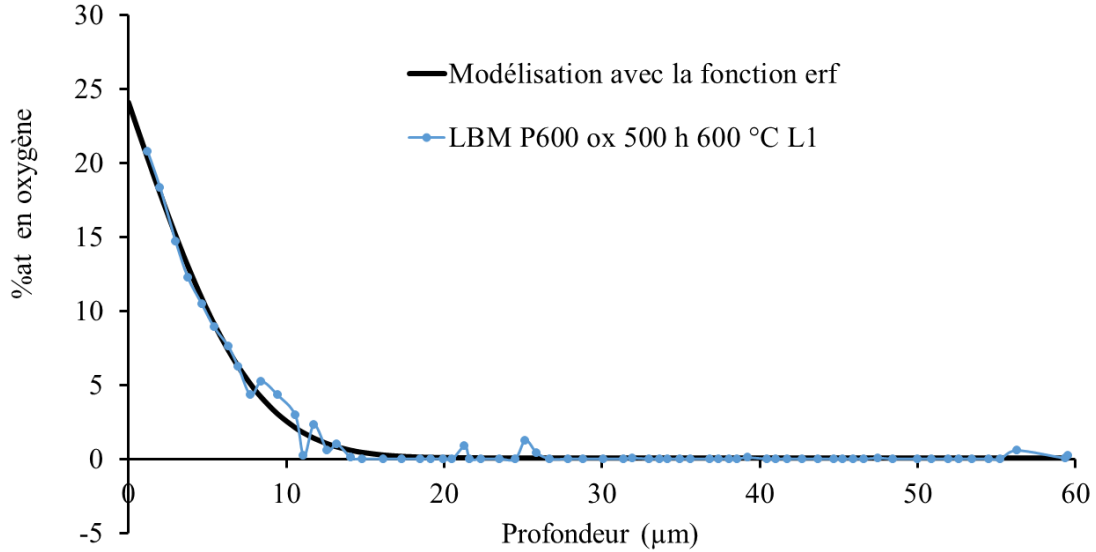
L'enrichissement en oxygène n'explique pas les Rp0,2 plus grands

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Quelle est la concentration en oxygène à 50 µm



D'après W.L. Finlay et al., Journal of Metals, 188 (1950) 227-286



[O] à 50 µm = 0,05919 %at

[O] à cœur = 0,05919 %at

Pour Δ[O] = 0,05 %m ≈ 0,15 %at → $\Delta R_{p0,2}$ = 70 MPa

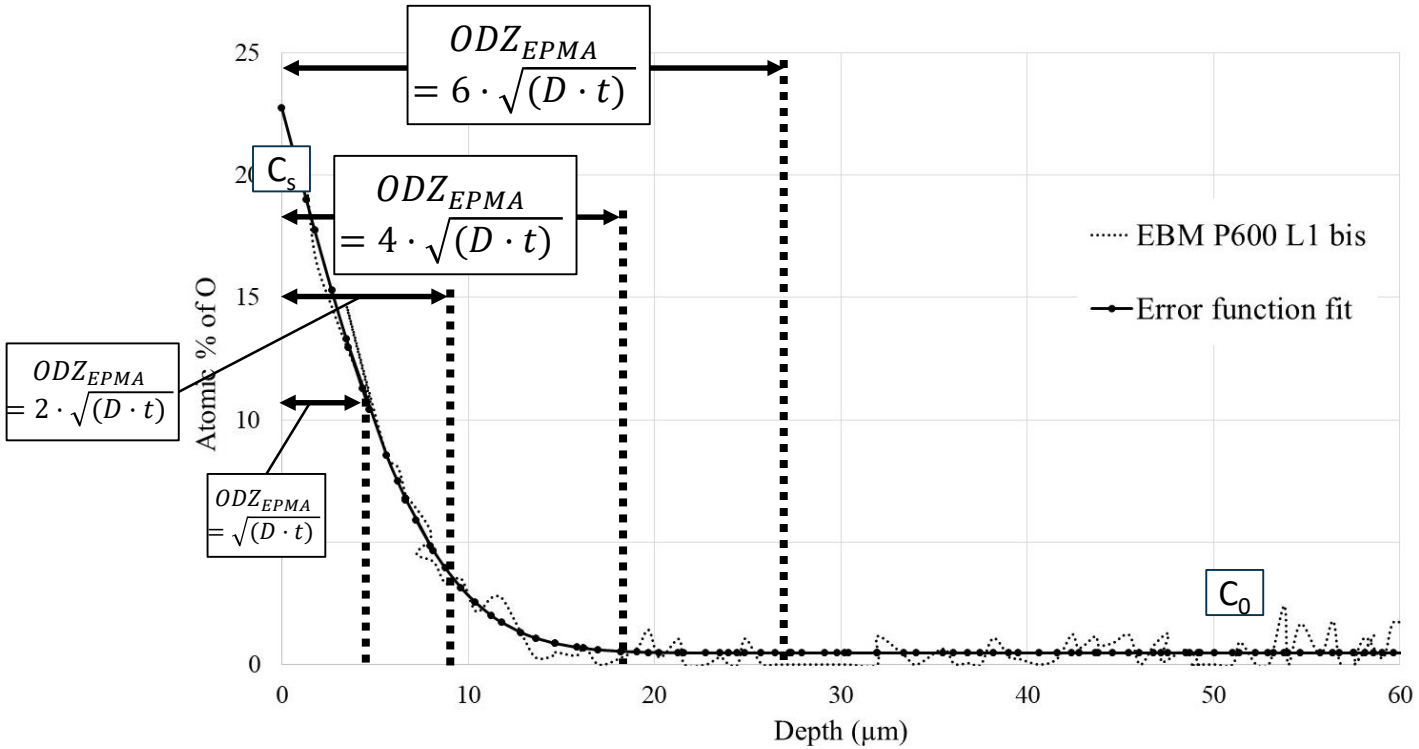
Donc $\Delta R_{p0,2}$ = 10 MPa pour Δ[O] = 0,02 %at

Δ[O] = 0,02 %at pour une profondeur de 21 µm

L'enrichissement en oxygène n'explique pas les $R_{p0,2}$ plus importants

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Critère pour déterminer la ZAO_{EPMA}



ODZ : Oxygen Diffusion Zone (µm)
C_0 : initial oxygen concentration in the metal (at.%)
C_s : oxygen concentration in the metal close to the oxide/metal interface (at.%)
D : effective oxygen diffusion coefficient of oxygen in the metal ($m^2 \cdot s^{-1}$)
t : time (s)

$ODZ = \sqrt{(D \cdot t)} \approx$ abscissa when $\frac{(C_x - C_0)}{(C_s - C_0)} = 1 - \mathrm{erf}\left(\frac{1}{2}\right) = \mathbf{0.48}$ → 0.48 · Cs-C0 = 10.7 at %O (ODZ minimized)

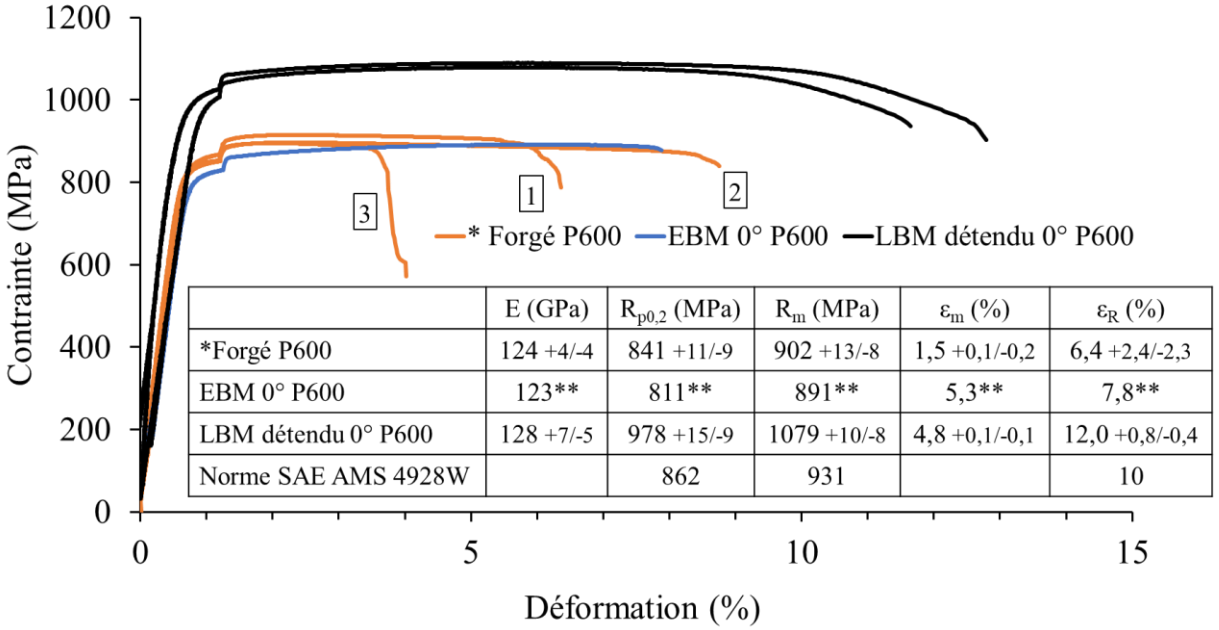
$ODZ = \mathbf{2} \cdot \sqrt{(D \cdot t)} \approx$ abscissa when $\frac{(C_x - C_0)}{(C_s - C_0)} = 1 - \mathrm{erf}(\mathbf{1}) = \mathbf{0.16}$ → 0.16 · Cs-C0 = 3.6 at %O (ODZ minimized)

$ODZ = \mathbf{4} \cdot \sqrt{(D \cdot t)} \approx$ abscissa when $\frac{(C_x - C_0)}{(C_s - C_0)} = 1 - \mathrm{erf}(\mathbf{2}) = \mathbf{0.005}$ → **0.005 · Cs-C0 = 0.1 at %O (Similar to visual characterization)**

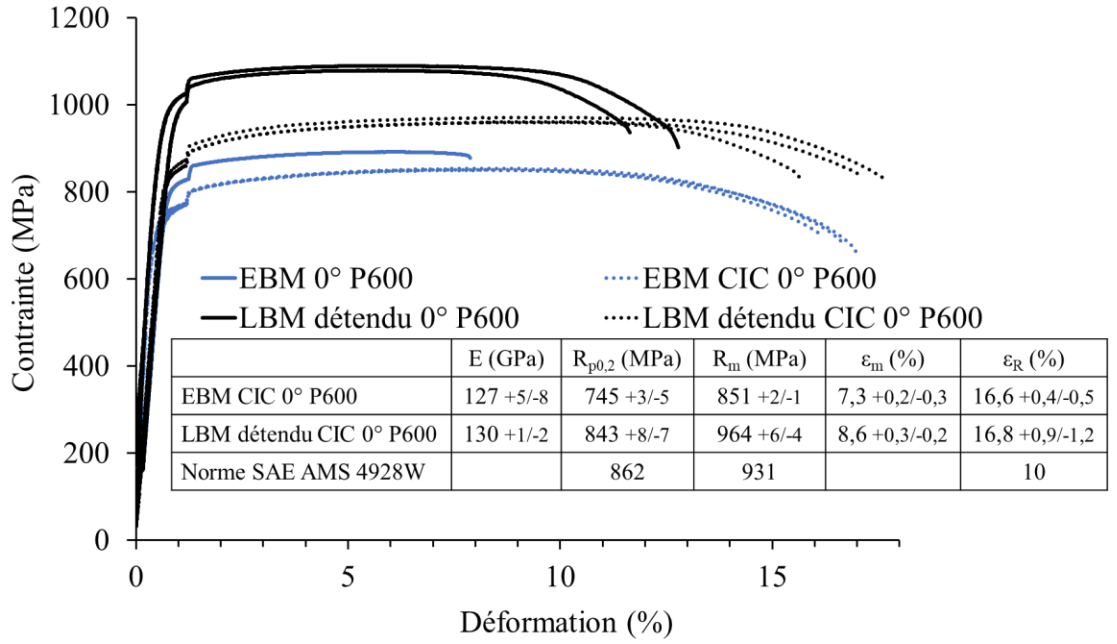
$ODZ = \mathbf{6} \cdot \sqrt{(D \cdot t)} \approx$ abscissa when $\frac{(C_x - C_0)}{(C_s - C_0)} = 1 - \mathrm{erf}(\mathbf{3}) = \mathbf{0.0001}$ → 0.0001 · Cs-C0 = 0.002 at %O (ODZ oversized)

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Propriétés des matériaux non oxydés



	E (GPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	ε_m (%)	ε_R (%)
*Forgé P600	124 +4/-4	841 +11/-9	902 +13/-8	1,5 +0,1/-0,2	6,4 +2,4/-2,3
EBM 0° P600	123**	811**	891**	5,3**	7,8**
LBM détendu 0° P600	128 +7/-5	978 +15/-9	1079 +10/-8	4,8 +0,1/-0,1	12,0 +0,8/-0,4
Norme SAE AMS 4928W		862	931		10



	E (GPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	ε_m (%)	ε_R (%)
EBM CIC 0° P600	127 +5/-8	745 +3/-5	851 +2/-1	7,3 +0,2/-0,3	16,6 +0,4/-0,5
LBM détendu CIC 0° P600	130 +1/-2	843 +8/-7	964 +6/-4	8,6 +0,3/-0,2	16,8 +0,9/-1,2
Norme SAE AMS 4928W		862	931		10

Propriétés du forgé et de l'EBM < Norme TA6V forgé

Propriétés du LBM > Norme TA6V forgé

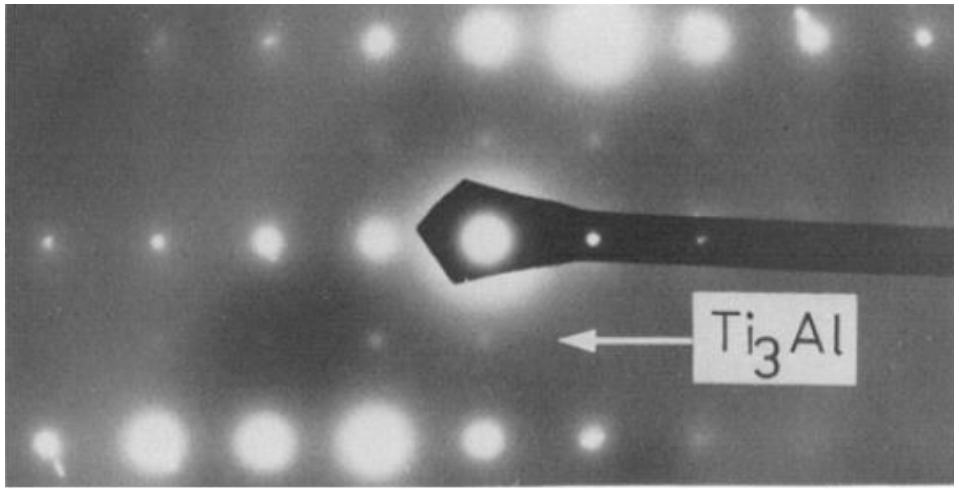
Récupération d'un allongement à rupture acceptable pour l'EBM CIC

$R_{p0,2}$ du LBM CIC < Norme TA6V forgé

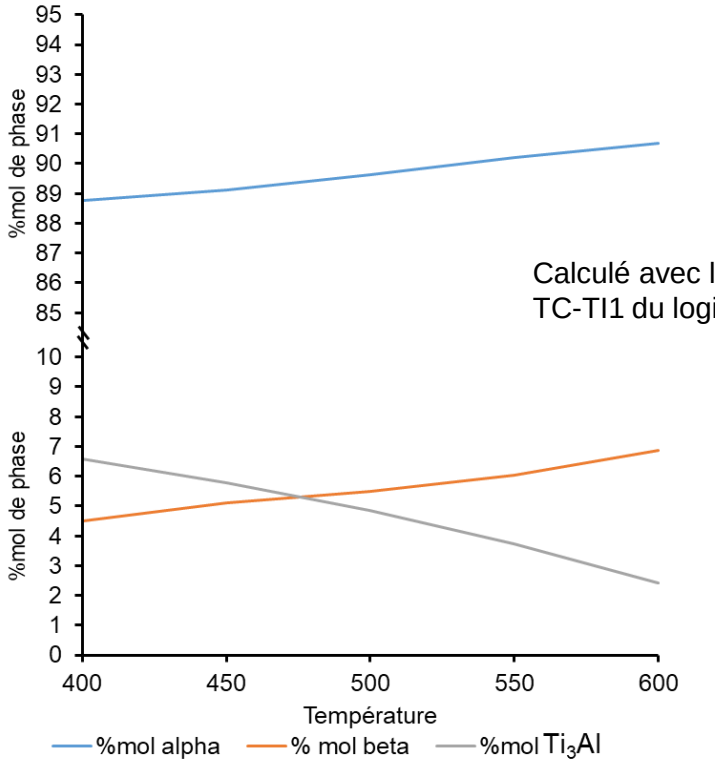
ε_m du LBM CIC >> Norme TA6V forgé

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Essai de traction sur des éprouvettes vieillies à 500 et 538 °C



[11] Formation de Ti_3Al dans un alliage TA6V durant un traitement thermique à 550 °C pendant 67 h



Calculé avec la base de données TC-TI1 du logiciel Thermocalc

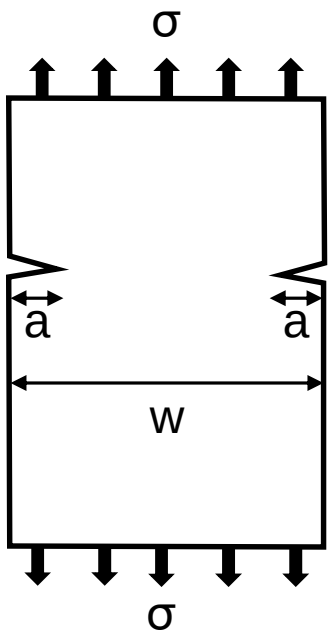
Présence de Ti_3Al dans l'alliage TA6V à l'équilibre thermodynamique de 400 à 600 °C

[11] G. Welsch, G. Lütjering, K. Gazioglu, W. Bunk, Deformation characteristics of age hardened Ti-6Al-4V, Metallurgical Transactions A, 8 (1977) 169-177.

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

La présence de fissures induit-elle une propagation instable de la fissure ?

Cas le plus critique de l'étude



w = 1,3 mm
a_{max} = 25 µm
σ = 1000 MPa

(12) Facteur d'intensité de contrainte

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi a}\left(\frac{w}{\pi a} tan \frac{\pi a}{w}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\rightarrow \quad K_I = \mathbf{8,9}\ \text{MPa} \cdot m^{\frac{1}{2}}$$

(13) Ténacité du TA6V

$$K_{Ic}(\text{TA6V LBM}) = \mathbf{50}\ \text{MPa} \cdot m^{\frac{1}{2}}$$

$$K_{Ic}(\text{TA6V LBM CIC}) = \mathbf{140}\ \text{MPa} \cdot m^{\frac{1}{2}}$$

La ténacité du matériau n'est pas atteinte

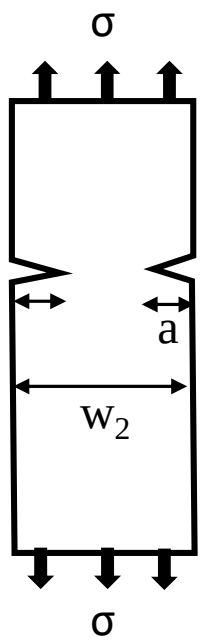
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

(12) A.P. D. François, A. Zaoui, Comportement Mécanique des Matériaux, I et II (1991).

(13) H. Zhang, Chinese Journal of Aeronautics, 32 (2019) 2383-2393.

La présence de fissures induit-elle une propagation instable de la fissure ?

Epaisseur la plus fine en FA avec les conditions les plus critiques de l'étude



w_2 = 200 – 500 µm

a_{max} = 25 µm

σ = 1000 MPa

(12) Facteur d'intensité de contrainte

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi a}\left(\frac{w}{\pi a} tan \frac{\pi a}{w}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$K_I = 8{,}9 \ - 9{,}1 \text{ MPa} \cdot m^{\frac{1}{2}}$$

(13) Ténacité du TA6V

$$K_{Ic}(\text{TA6V LBM}) = \mathbf{50} \text{ MPa} \cdot m^{\frac{1}{2}}$$

$$K_{Ic}(\text{TA6V LBM CIC}) = \mathbf{140} \text{ MPa} \cdot m^{\frac{1}{2}}$$

Même pour des épaisseurs très fines, les fissures ne risquent pas d'entrainer une propagation instable de la fissure

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

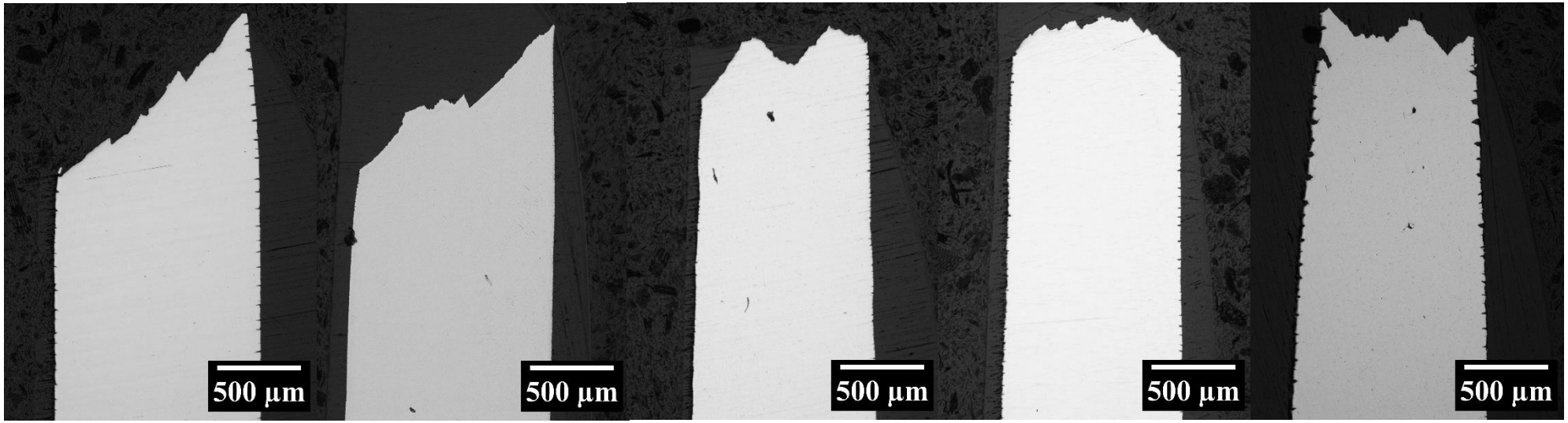
(12) A.P. D. François, A. Zaoui, Comportement Mécanique des Matériaux, I et II (1991).

(13) H. Zhang, Chinese Journal of Aeronautics, 32 (2019) 2383-2393.

Endommagement d'une éprouvette de traction oxydée

La fissure entrainant la rupture s'amorce-t-elle au cœur ou en surface ?

LBM P600 ox 500 h 600 °C	LBM P600 ox 1000 h 500 °C	LBM CIC P600 ox 500 h 538 °C	LBM P600 ox 2000 h 538 °C	EBM P600 ox 500 h 600 °C



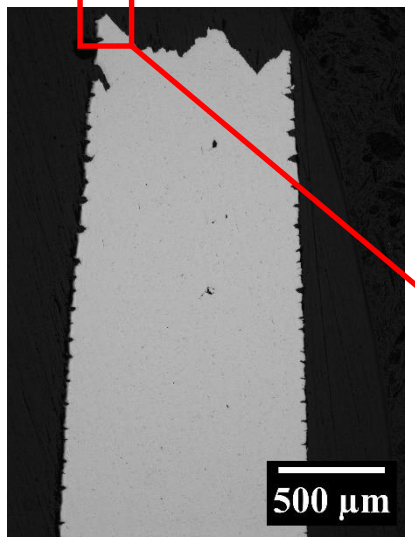
La fissure menant à la rupture ne semble pas s'amorcer en surface

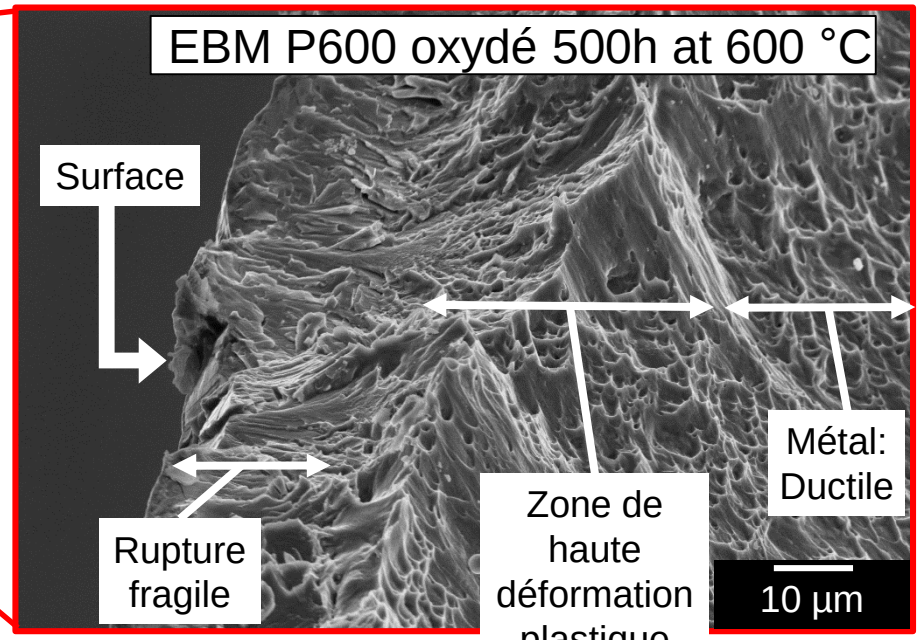
© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Endommagement d'une éprouvette de traction oxydée

La fissure entrainant la rupture s'amorce-t-elle au cœur ou en surface ?

EBM P600 ox 500 h 600 °C



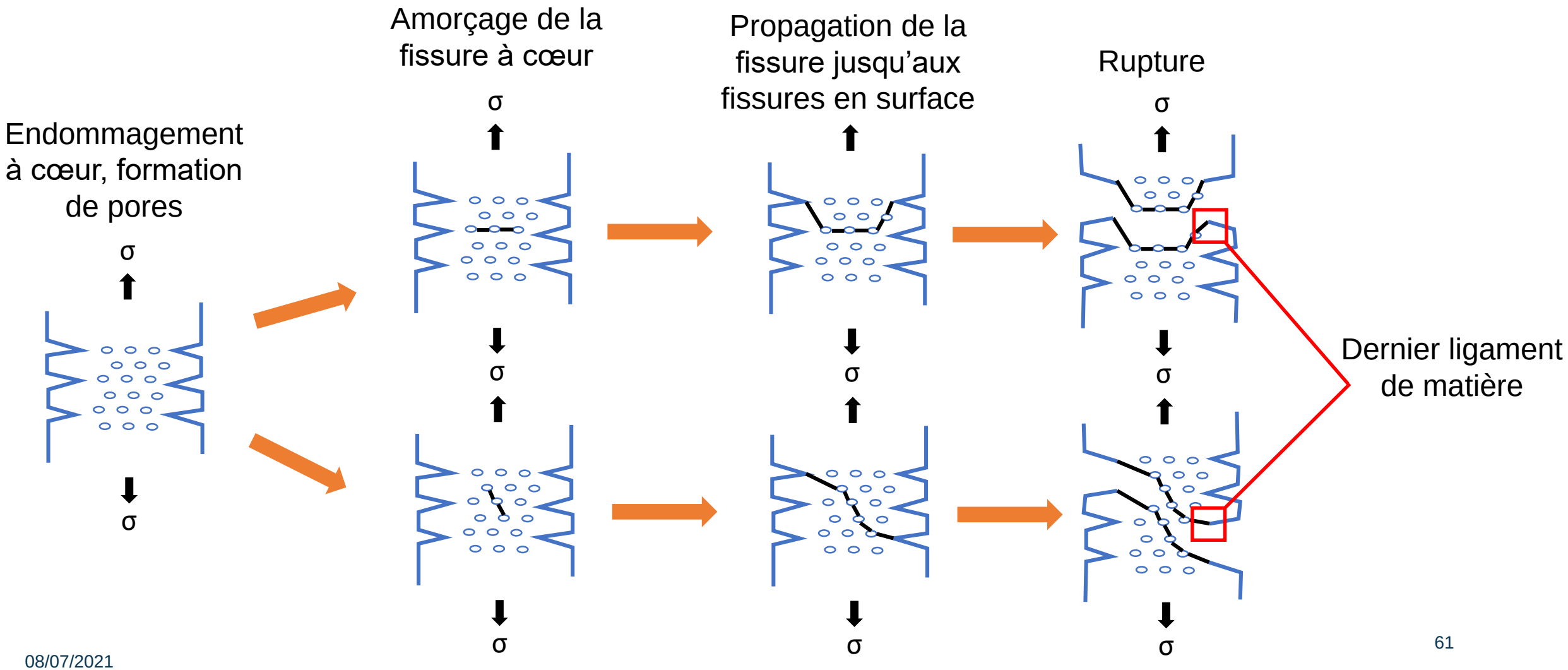


La zone de haute déformation plastique semble être le dernier ligament de matière

La dernière zone rompue semble être en pointe de fissure

© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document

Endommagement et rupture d'une éprouvette de traction oxydée



© IRT AESE "Saint Exupéry" - All rights reserved Confidential and proprietary document