

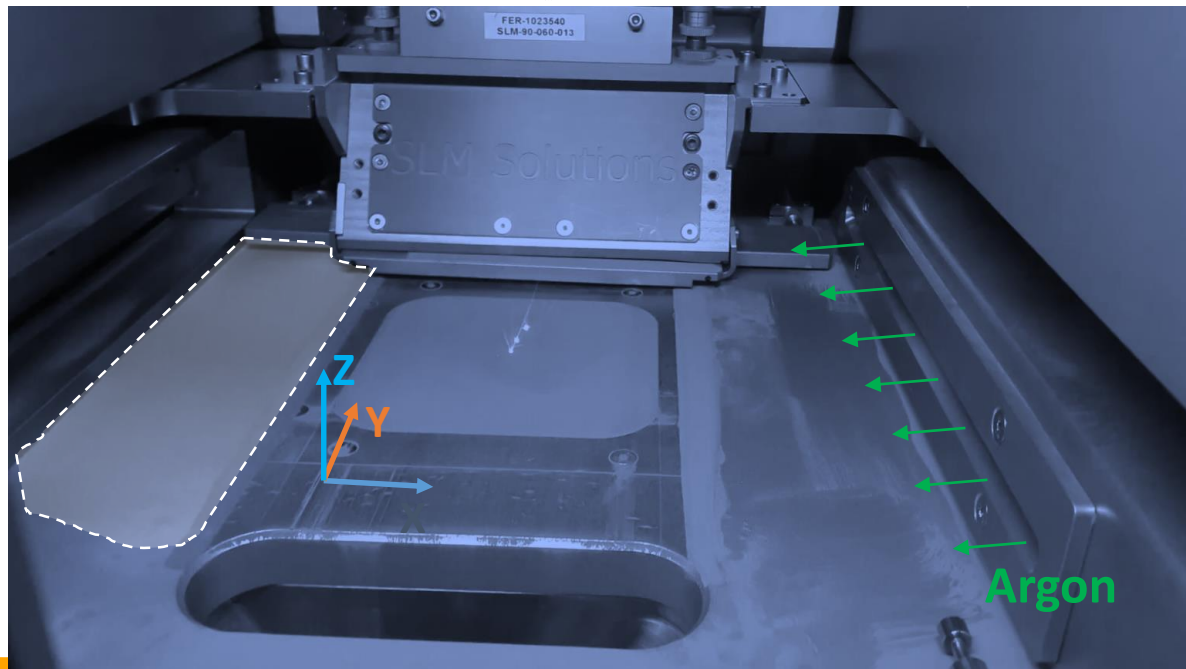
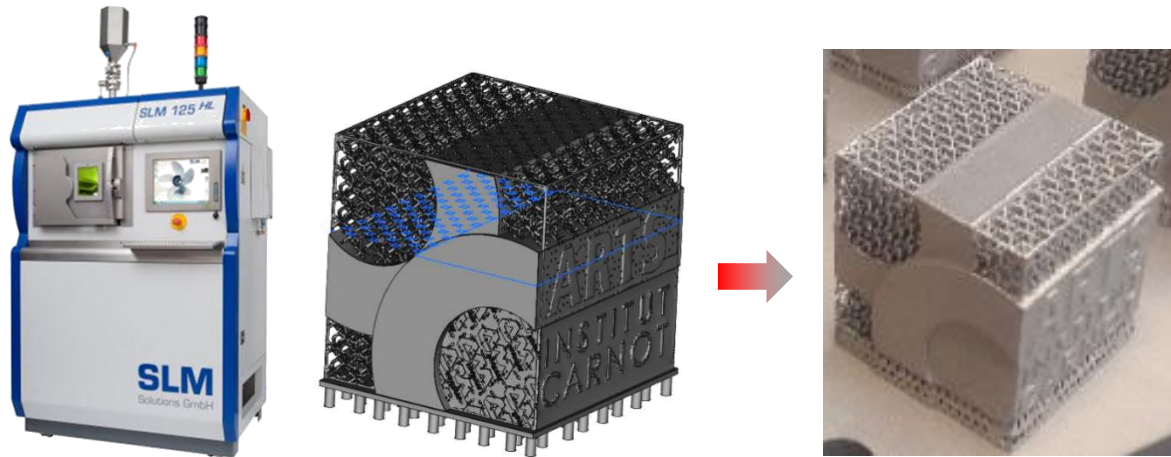
Impact des pores et de la microstructure sur la tenue en fatigue des pièces métalliques obtenues par Fabrication Additive

Etienne PESSARD avec l'aide de:

Viet Duc Le, Franck Morel, Daniel Bellett, Pierre Merot, Olivier Andreau, David Mellé, Marion Auffray, Camille Robert, Linamaria Gallegos Mayorga, Charles Mareau
et bien d'autres...

Le mercredi 24 janvier 2024

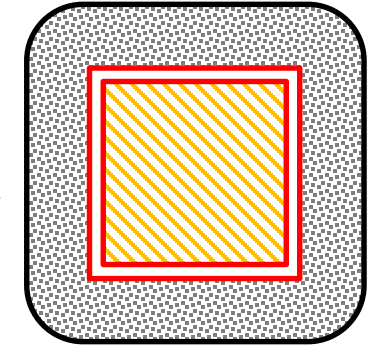
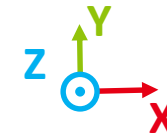
Principe du L-PBF (Laser Powder Bed Fusion)



Contour

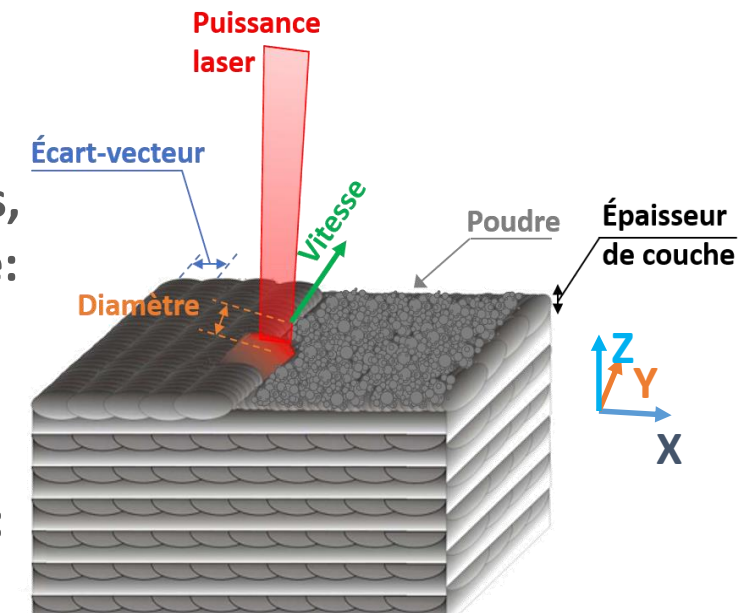
Remplissage

Poudre non fondue



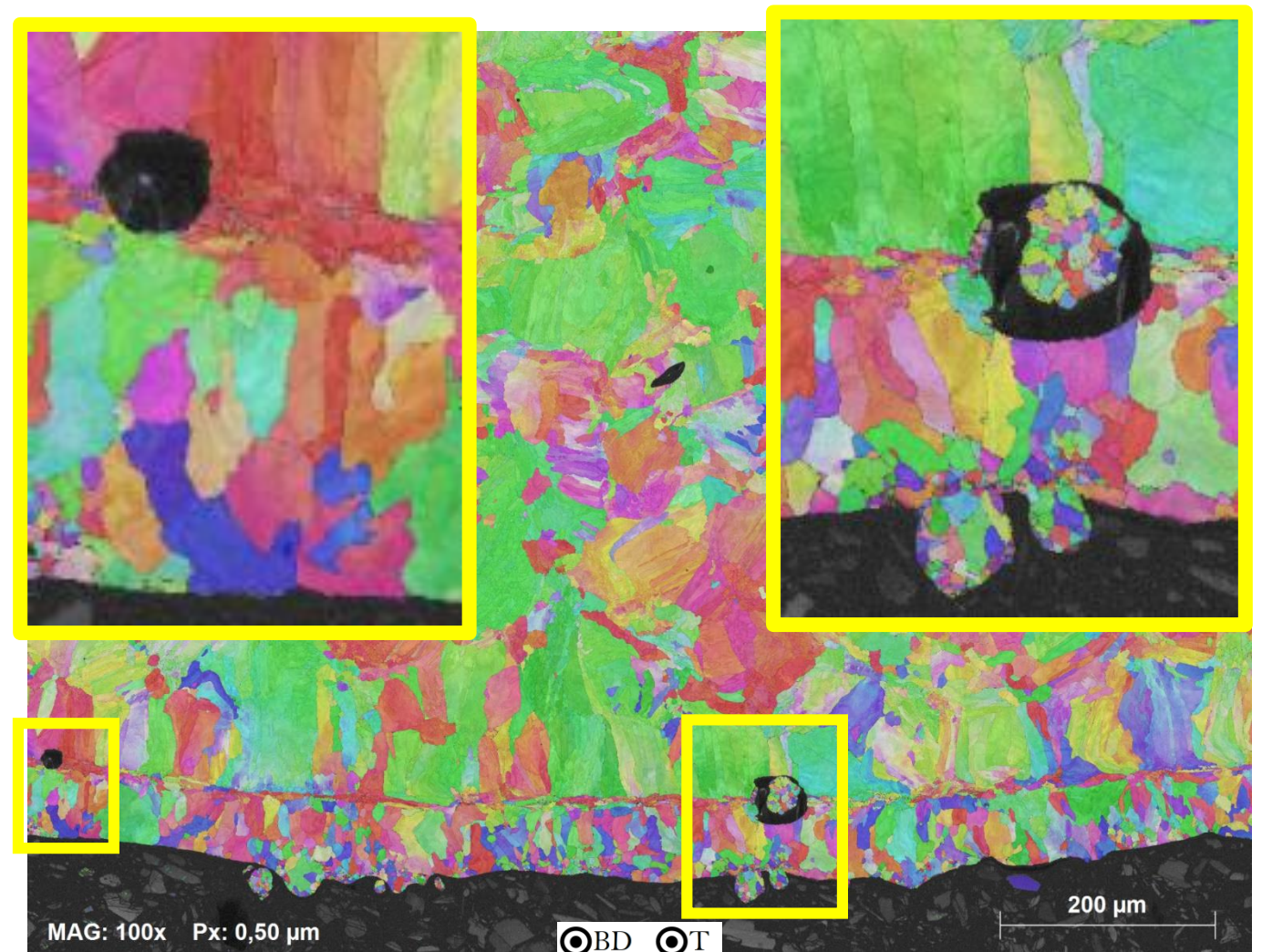
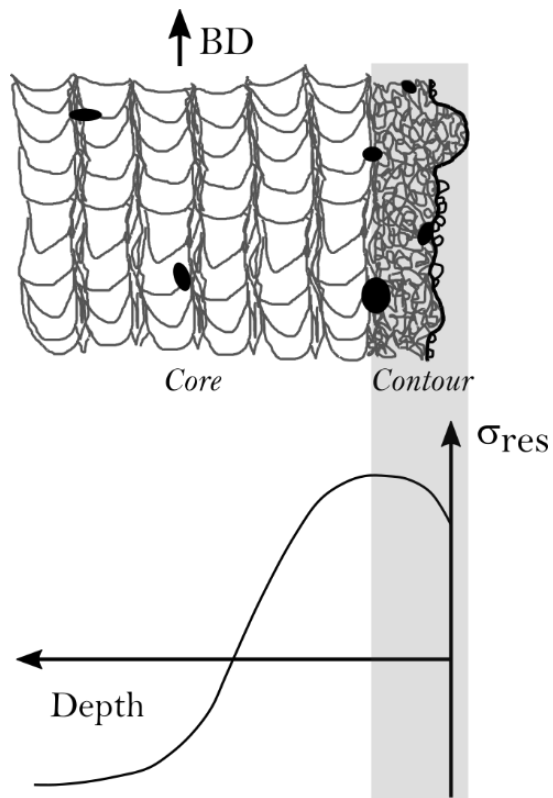
Superposition et juxtaposition de cordons, interaction laser matière: défauts

Vitesse de Refroidissement élevée : microstructure fine et colonnaire



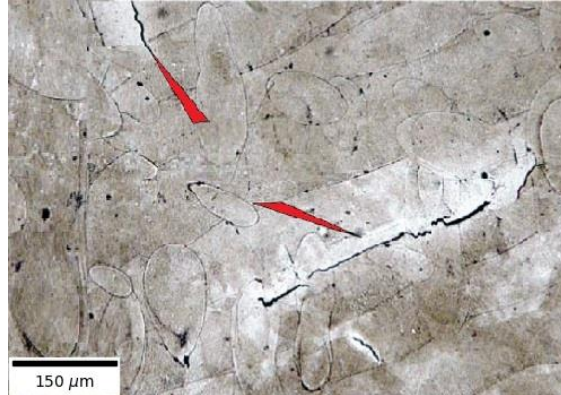
Spécificités des pièces L-PBF:

- Défaut en surface et à cœur
- Mauvais état de surface
- Gradient de microstructure
- Gradient de contraintes résiduelles

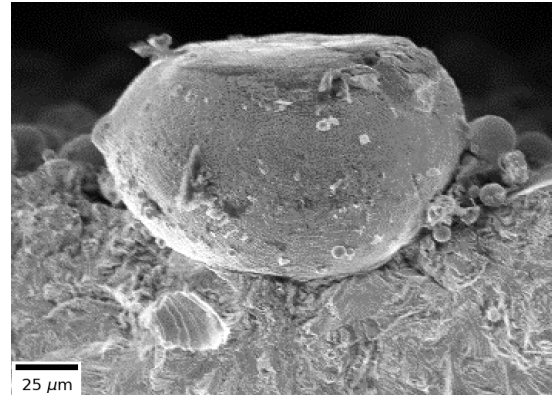


Défauts des pièces en L-PBF

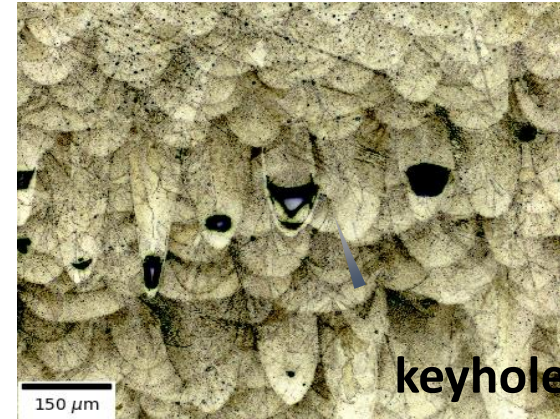
Fissures¹



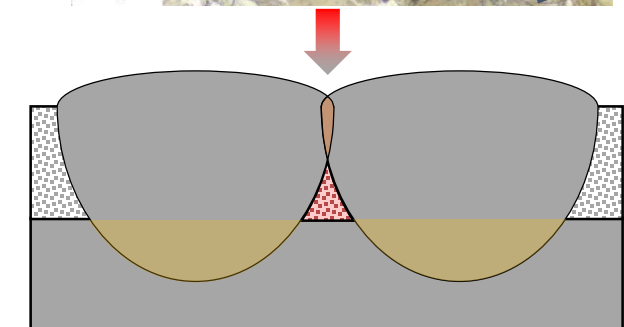
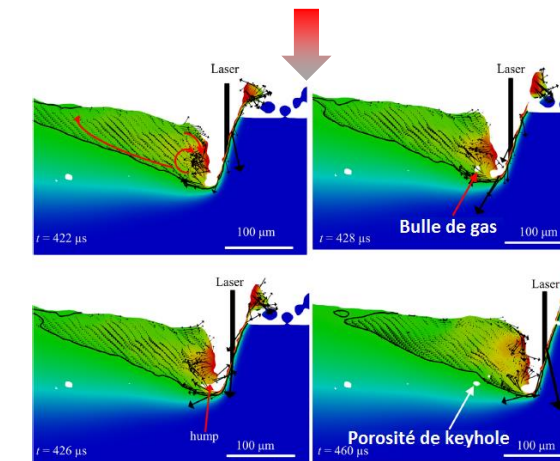
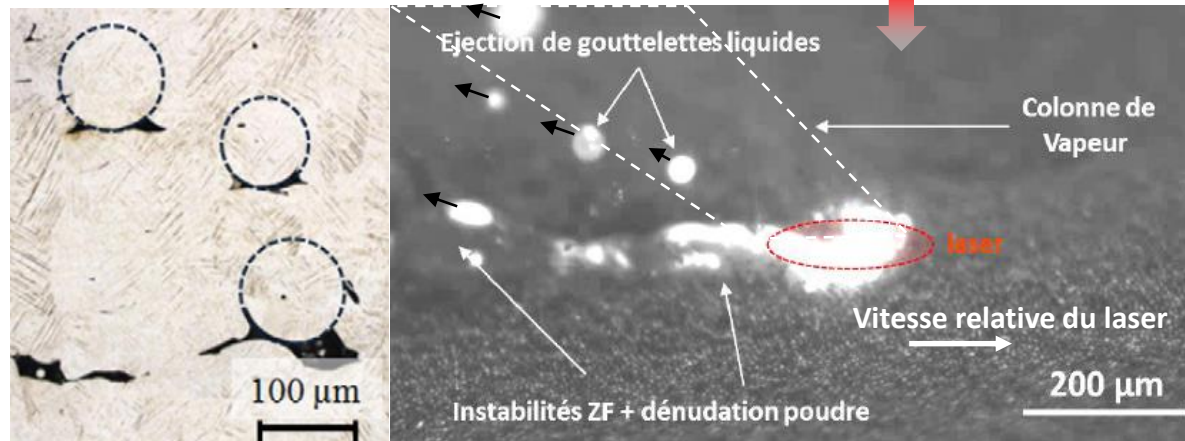
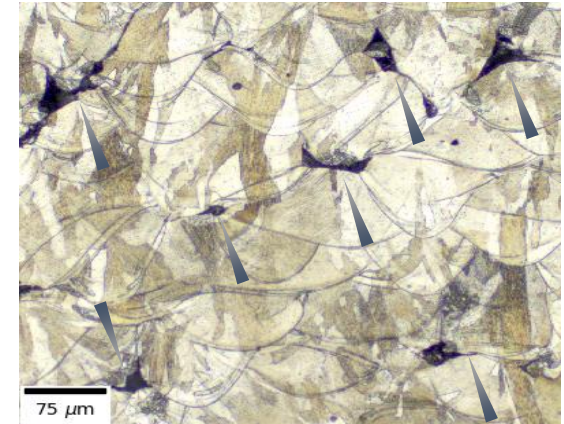
Éjectats²⁻⁴



Gaz Occlus⁵



Manques de fusion



- Poudre fondue
- Manque de fusion
- Poudre
- Recouvrement vertical
- Recouvrement latéral

¹[Zhang et al. 2017], P 251-61

²Credits: E. Pessard, LAMPA

³[Kasperovich et al.2016], P 160-170 ⁴Gunenthiram, Thèse ENSAM, 2018

⁵[Tang et al. 2018]

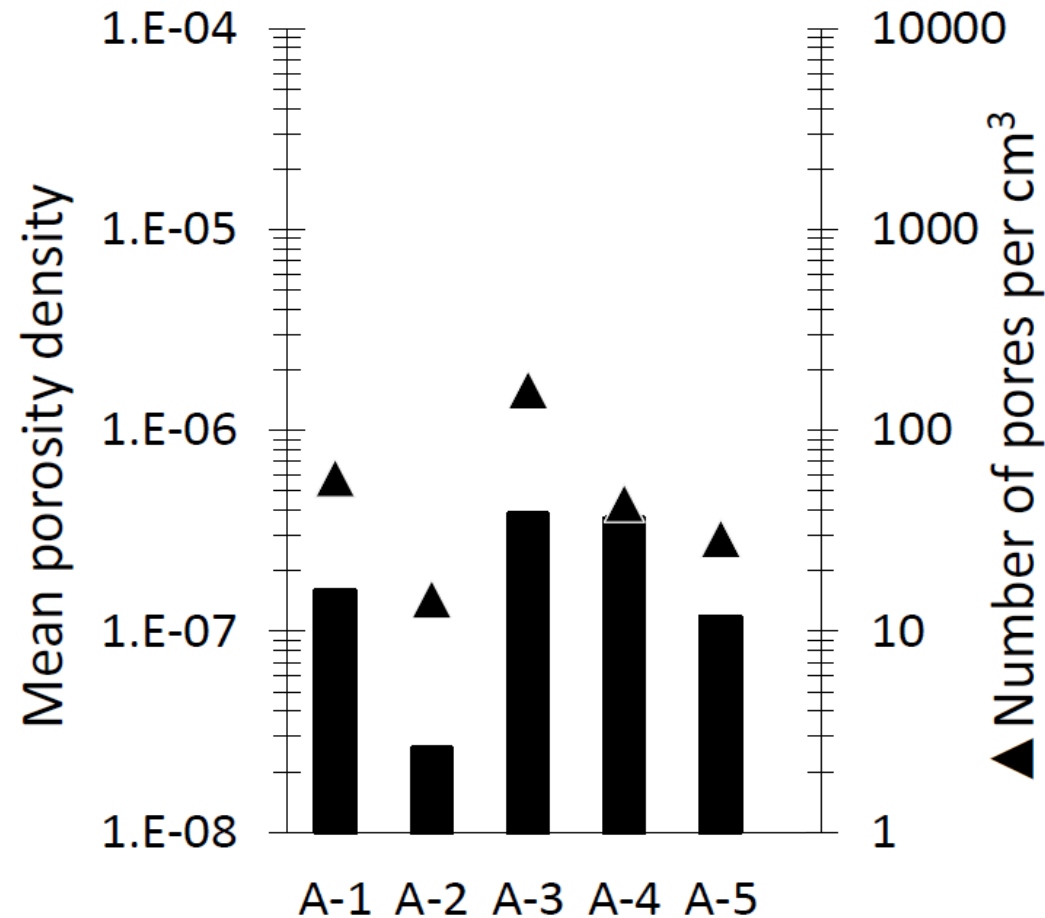
Porosités dans les pièces L-PBF

Fraction volumique de pore
très faible ($2.10^{-8} \rightarrow 5.10^{-7}$)

De 2 à 200 pores/cm³
(seuil utilisé = $3\mu\text{m}^3$)

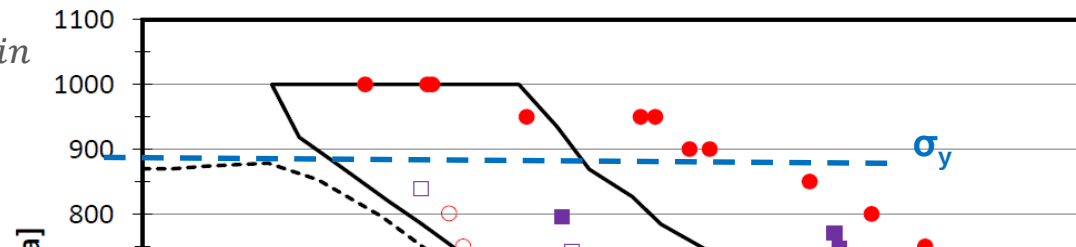
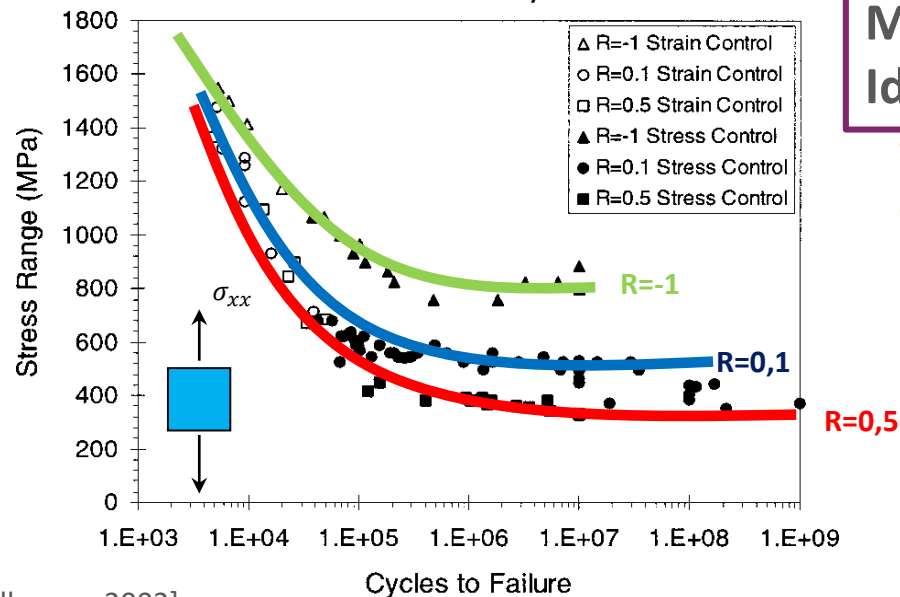
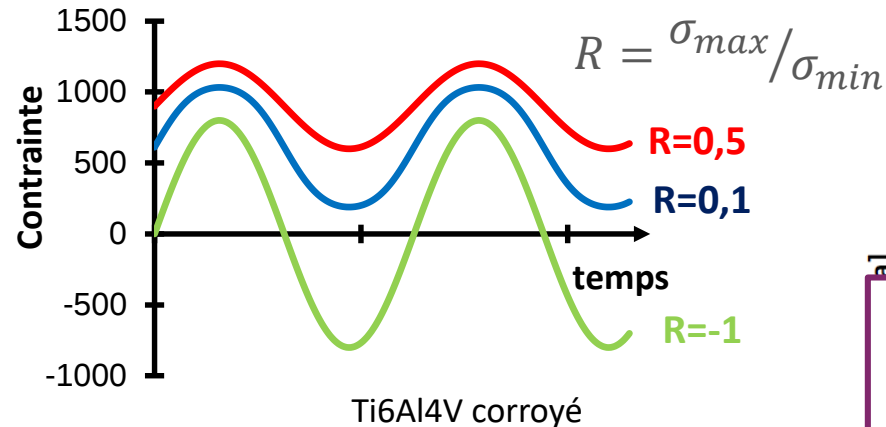


Ti6Al4V L-PBF



Tenue en fatigue des pièces en L-PBF

Diagramme de Wöhler du **Ti6Al4V L-PBF** pour différentes conditions en traction répétée (**Rapport de charge $R=0,1$**)

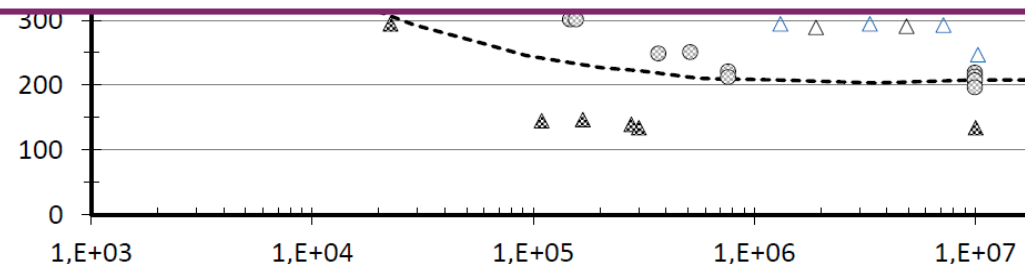


Variété de résultats (paramètres procédés)

Moins bons lots $\rightarrow$ alliages de fonderie

Meilleurs lots $\rightarrow$ alliages laminés

Idem pour les autres « procédé-matériau » les plus utilisés

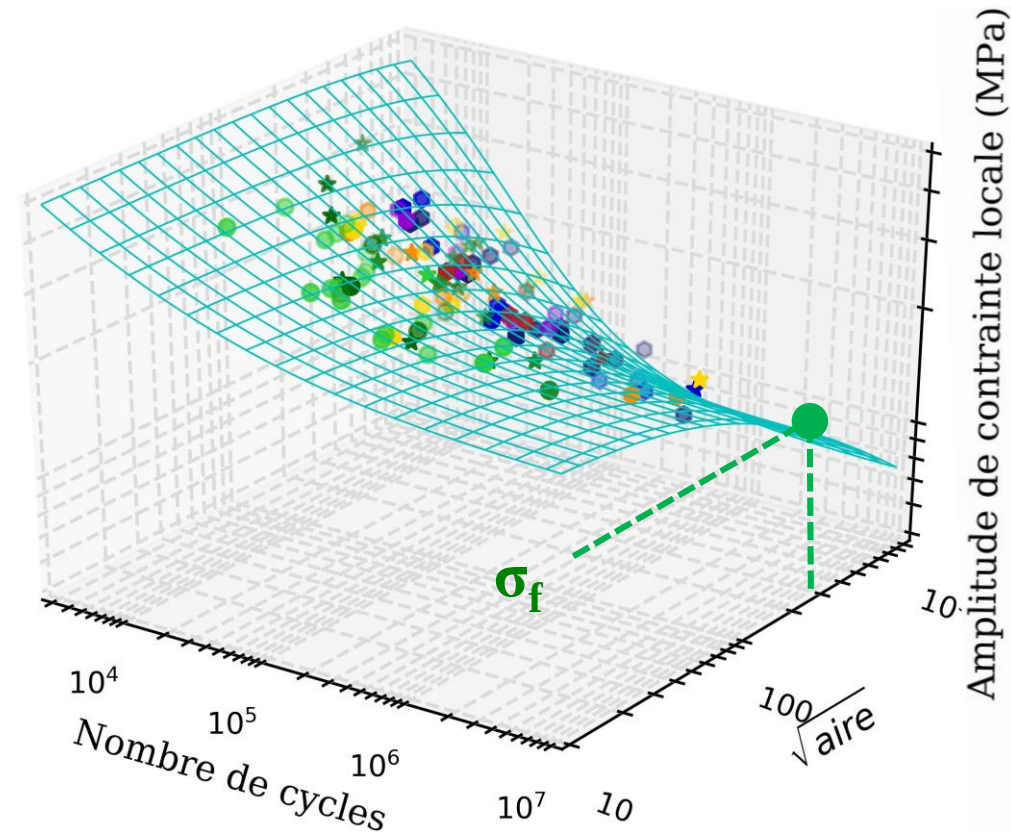


[Peyre 2022]

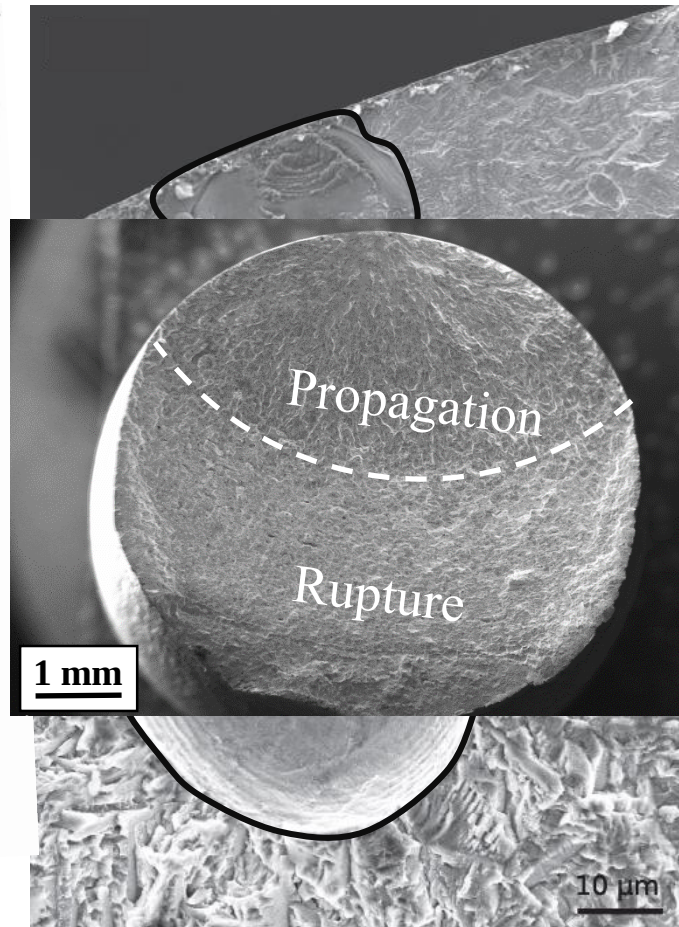
[Kallmeyer 2002]

Tenue en fatigue des pièces en L-PBF

Diagramme de Wöhler du Ti6Al4V L-PBF pour différentes conditions en traction répétée ($R=0,1$)

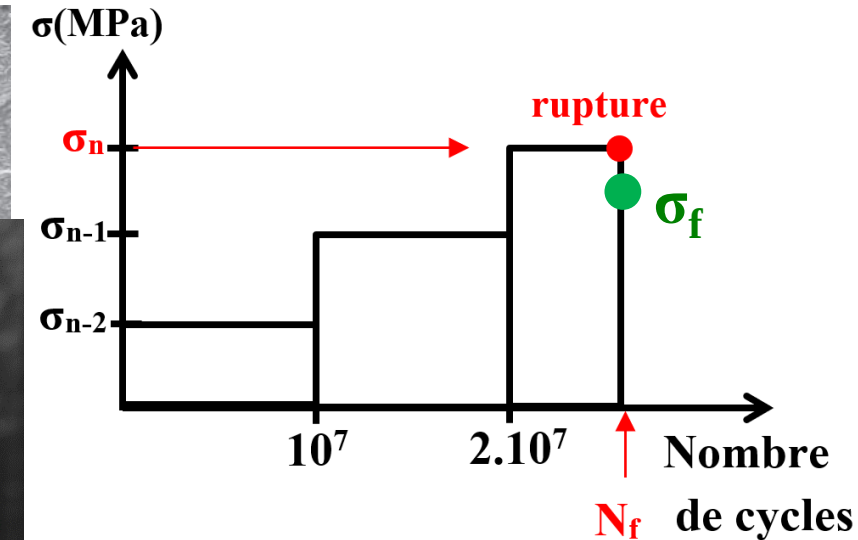


[Thèse David Mellé-2023]



$$Taille\ défaut = \sqrt{aire}$$

[Murakami 2002]

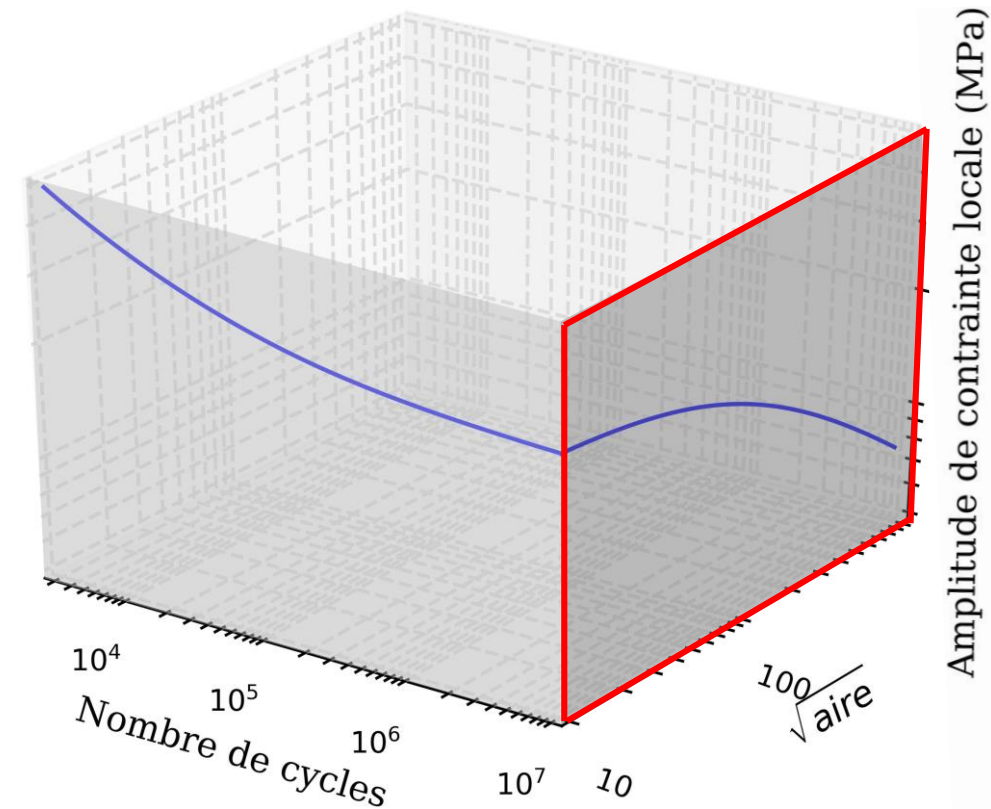


$$\sigma_f = (\sigma_n - \sigma_{n-1}) * \frac{N_f}{N_l} + \sigma_{n-1}$$

Identification de la tenue en fatigue de chacune des éprouvettes

Tenue en fatigue des pièces en L-PBF

Diagramme de Wöhler du **Ti6Al4V L-PBF** pour différentes conditions en traction répétée (**R=0,1**)

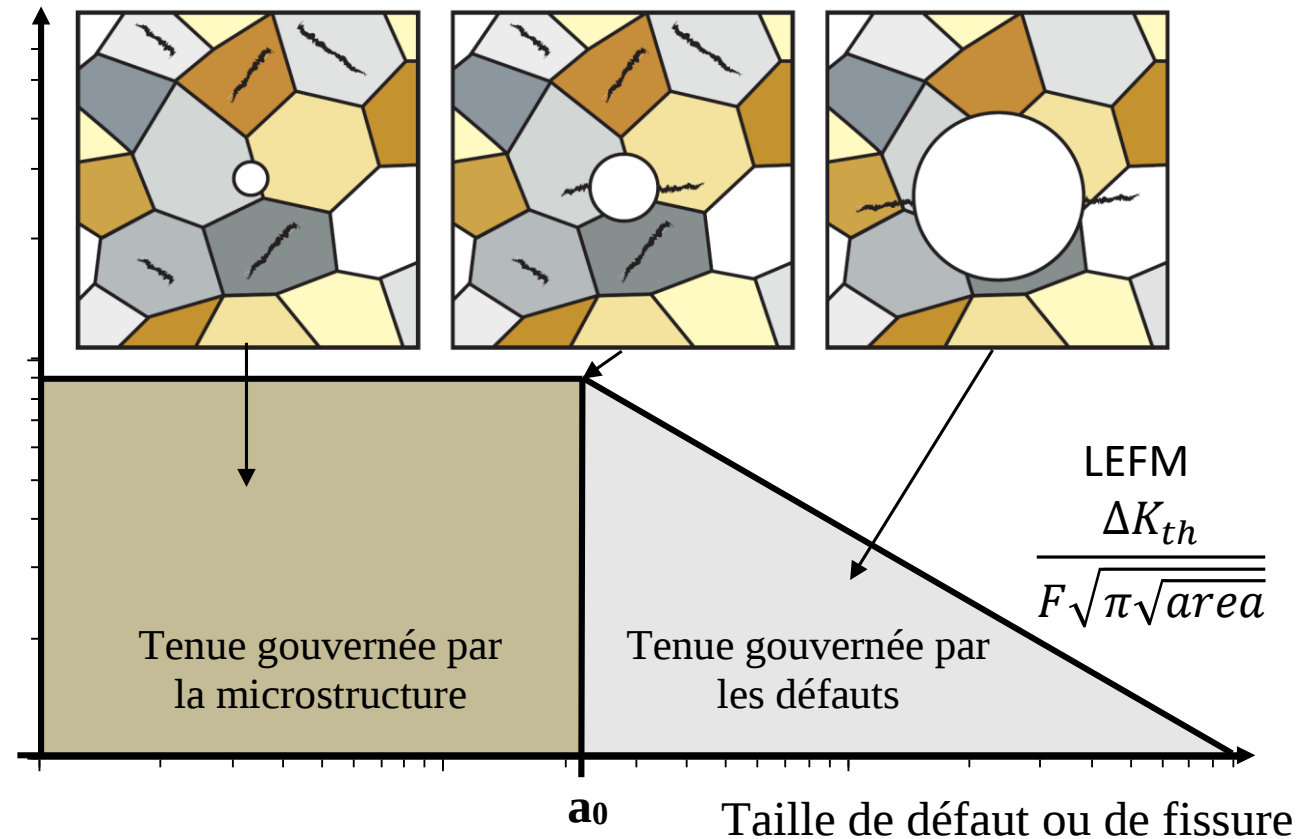


[Thèse David Mellé-2023]



Limite d'endurance

Diagramme de Kitagawa-Takahashi (1976)



[Pessard et al., 2013]

Plan de la présentation



- I. Introduction
- II. Compétition pores surface / cœur 316L L-PBF
 - A. Compétition **défaut de surface et défaut à cœur**
 - B. Impact de la **forme des défauts** et modélisation associée
- III. Impact de la microstructure Ti6Al4V L-PBF
 - A. Origine de l'**effet d'échelle** observé
 - B. Modélisation via une **approche probabiliste**
 - C. Microstructure et **état de surface**

Projet IRT- FASICOM



IV. Perspectives

[Thèse Olivier Andreau-2019]

INSTITUT DE
MÉCANIQUE
ET D'INGÉNIERIE

[Thèse Pierre Merot-2021]

[Thèse Marion Auffray-en cours]



[Thèse David Mellé-2023]



SAFRAN

[Master Manon Lavalie 2019]



Éprouvettes dégradées à cœur

316L-PBF (brut)

Éprouvettes de référence (7)

Ø3mm



Usinage
au tour



Fabrication de blocs

Éprouvettes usinées/polies

Éprouvettes poreuses (contour dense, 10/lot)



Polissage
au tour



Fabrication « near net-shape »

Éprouvettes polies

Traitement thermique (relaxation des σ_{res})

- 350 °C
- 2h
- Argon

- Pas de frittage de poudre
- Pas d'oxydation
- Pas de précipitation
- Même microstructure

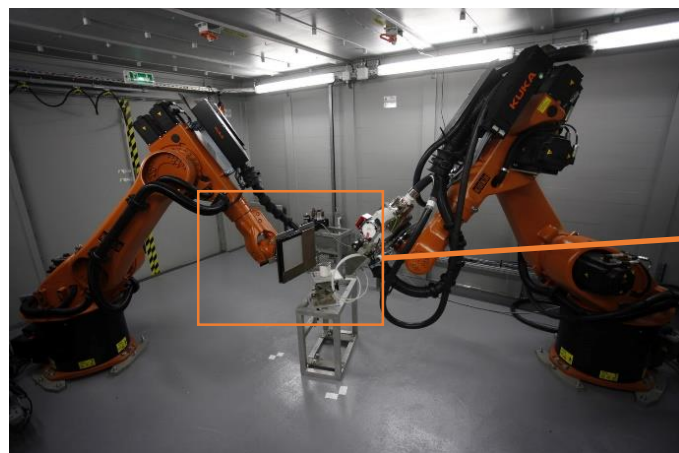
Essai de fatigue: méthode Locati

R=0,1 (pas d'échauffement constaté)
70 Hz (vibrophone)
+ $\Delta\sigma_{max} = 20$ MPa à chaque palier
10⁶ cycles par palier

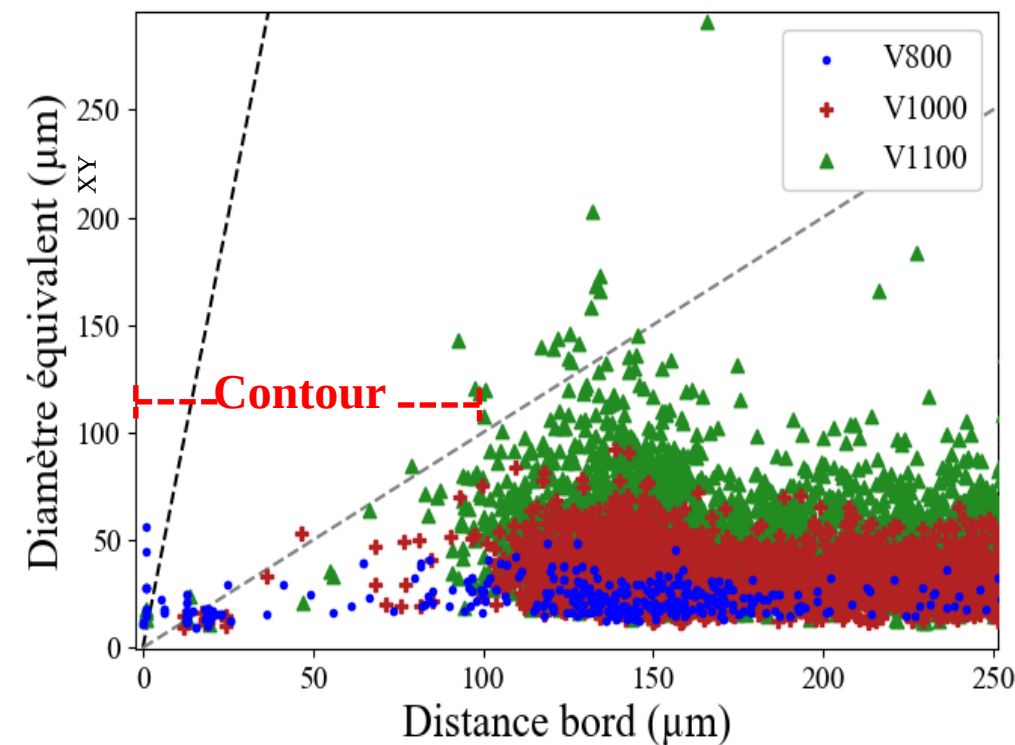
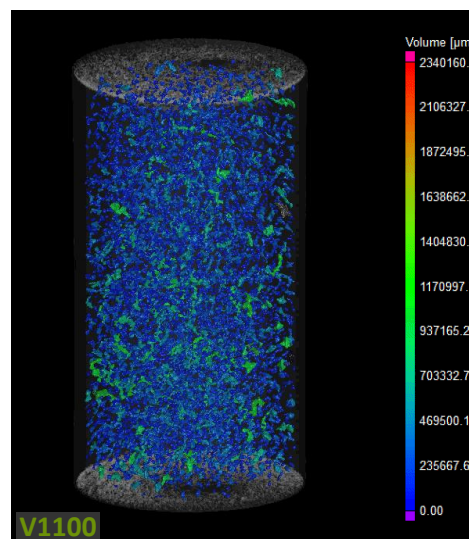
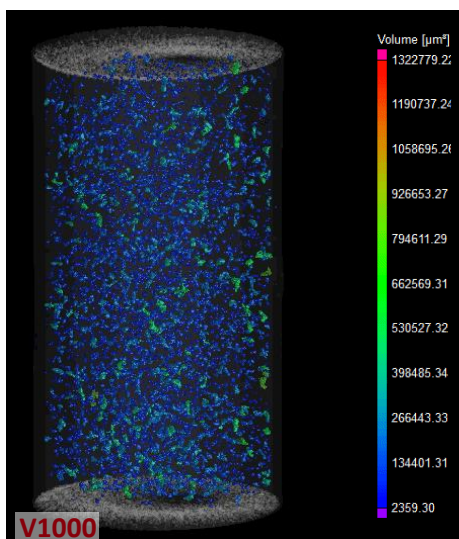
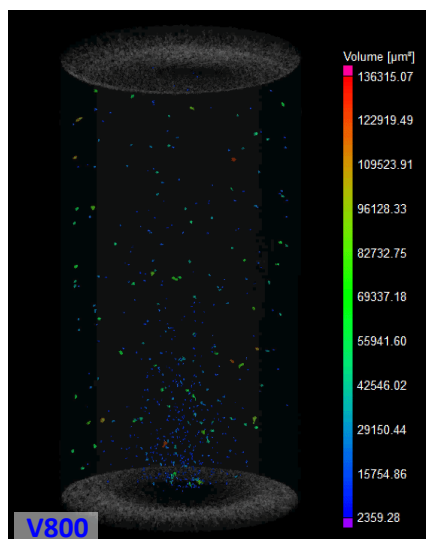


Eprouvettes dégradées à cœur

316L-PBF (brut)



➡ Tomographie X de la zone utile des 30 éprouvettes



- 3 populations internes de défauts
- Position et taille des défauts connue
- Peu/pas de défaut détecté dans le contour

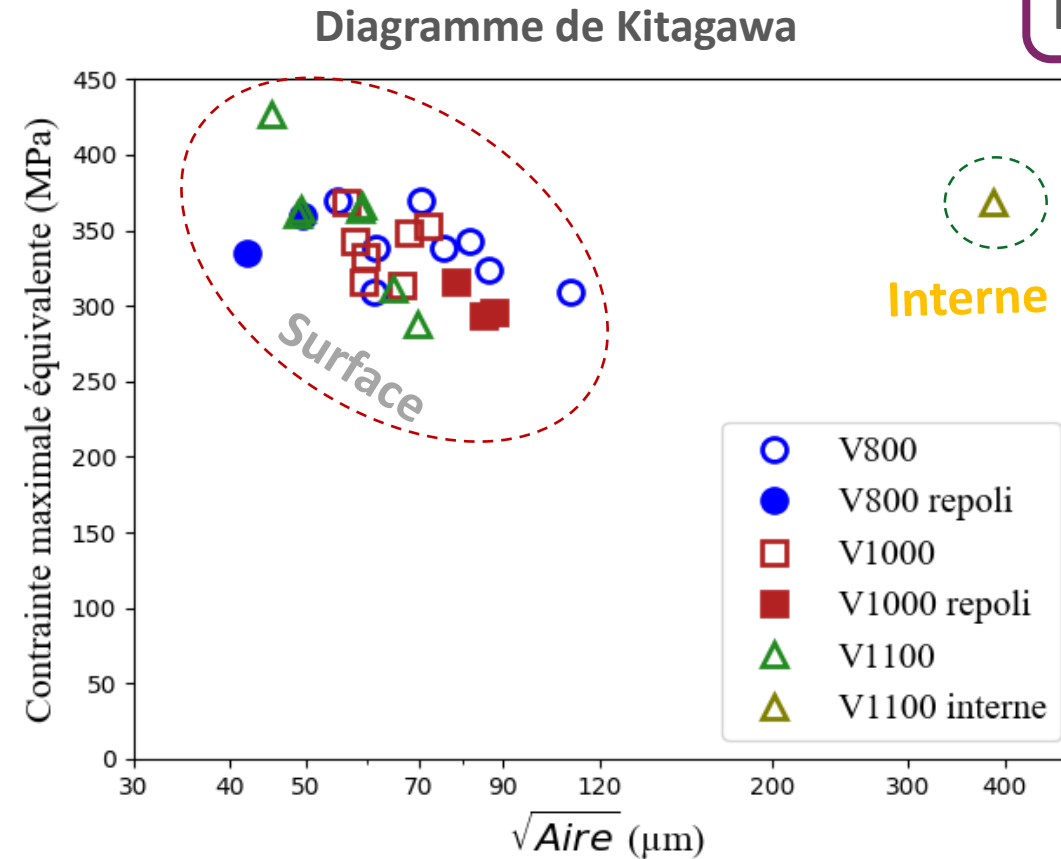
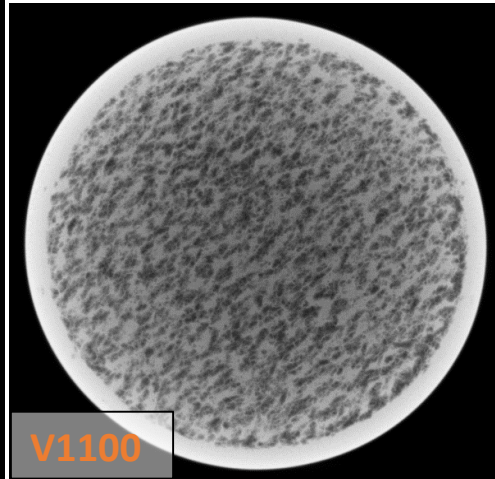
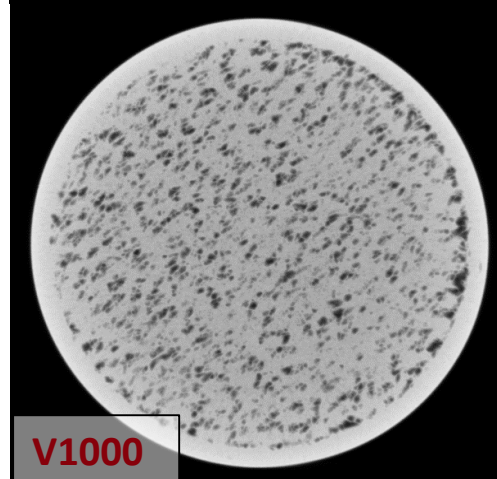
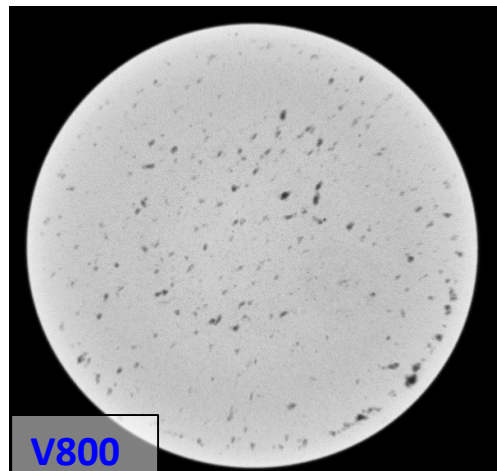
Eprouvettes dégradées à cœur: résultats

316L-PBF (brut)
R=0,1

Etude sur le 316L LPBF, traction R=0,1, $\varnothing_{\text{utile}}$ 3,5mm

3 taux de porosité:
(0.03, 0.5, 1.8)

1 pixel= niveau de gris
minimum sur 900 coupes
tomographiques



Défaut interne > 300 μ m

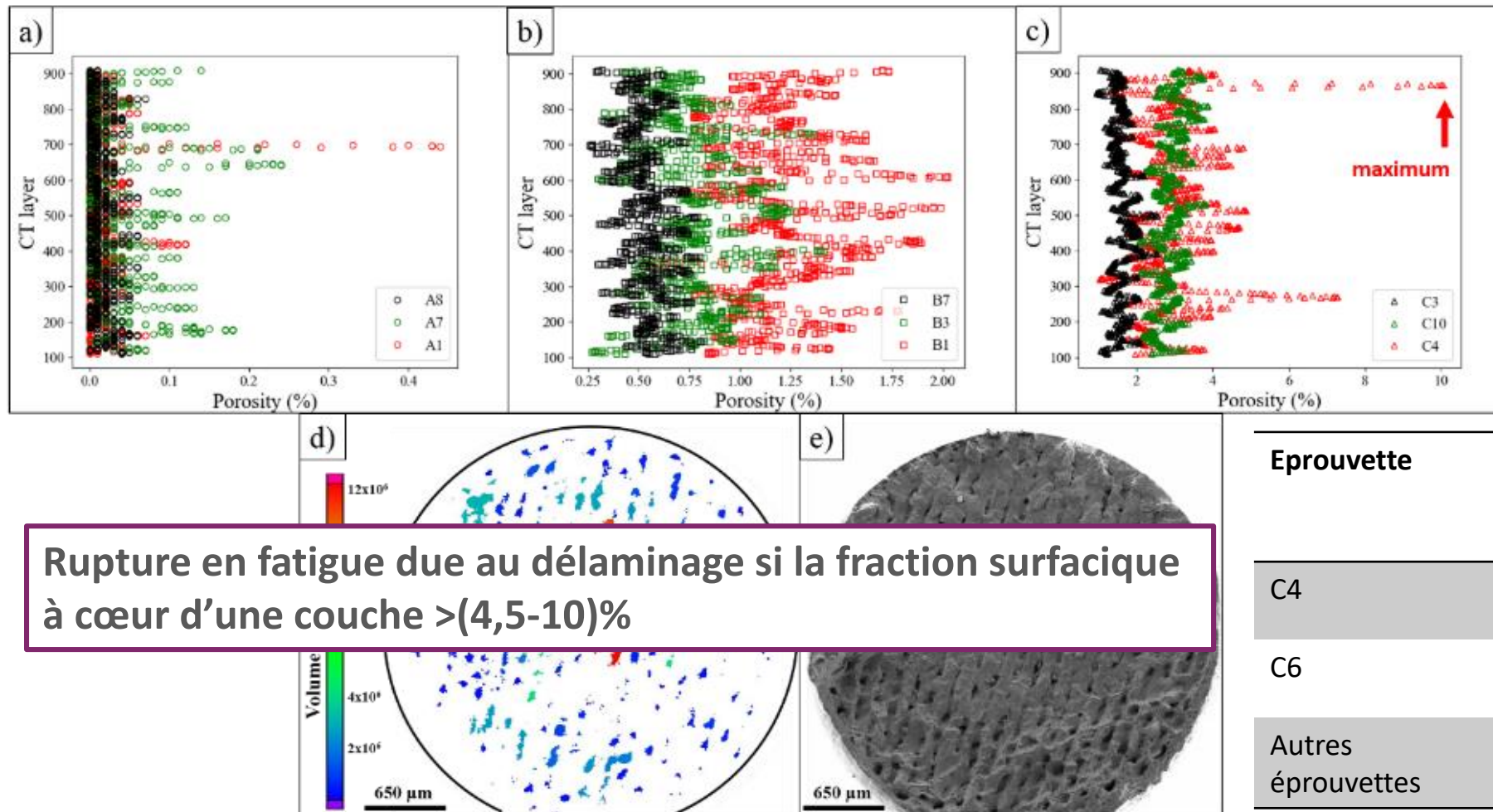
Amorçage sur défauts de 40-100 μ m en surface

Très faible nocivité des défauts internes!

Eprouvettes dégradées à cœur: délaminage

316L-PBF (brut)
R=0,1

Rupture en fatigue due au délaminage

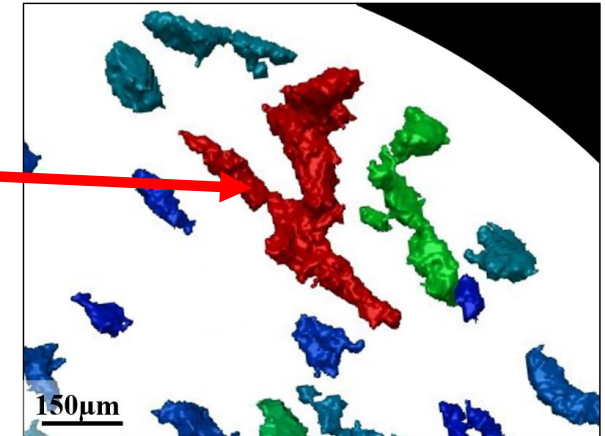
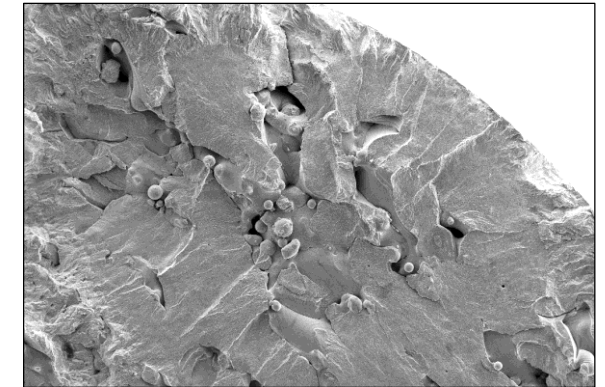
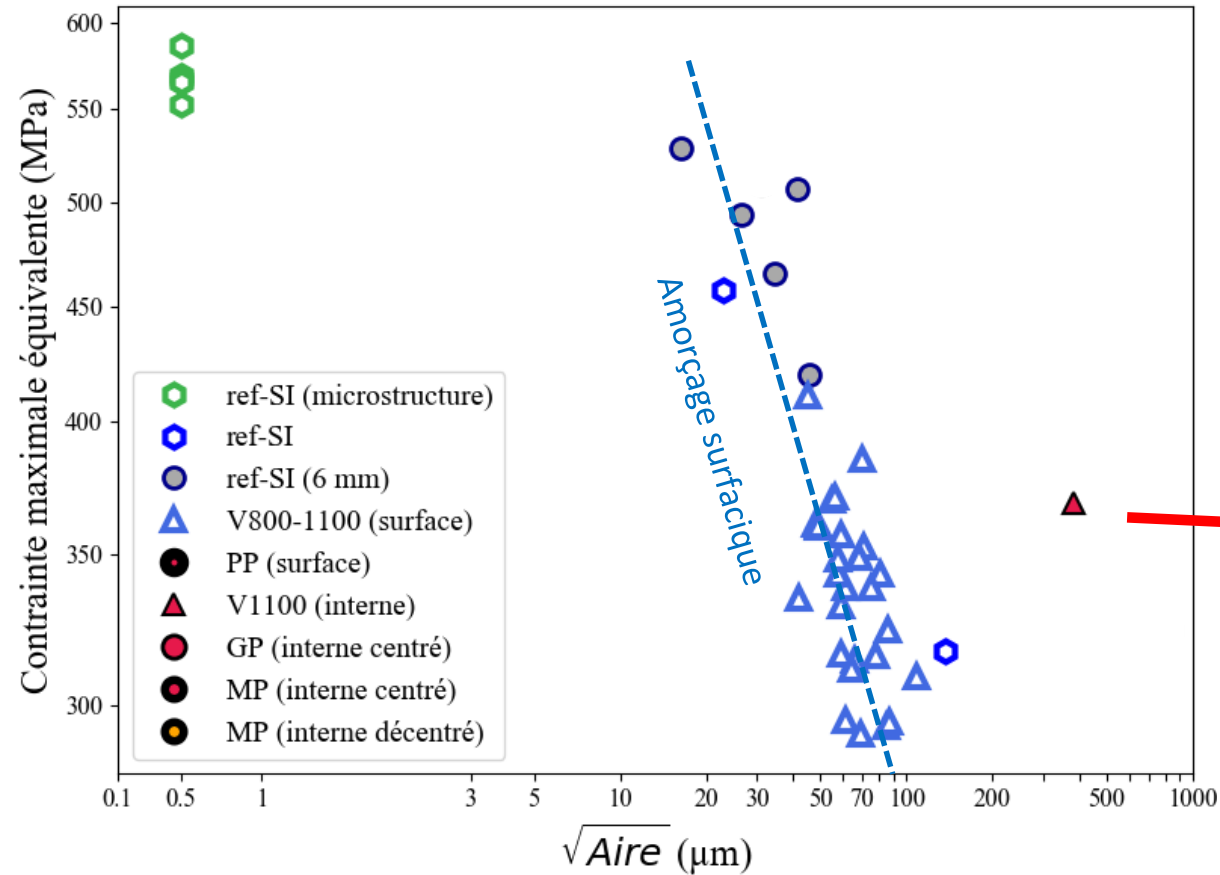
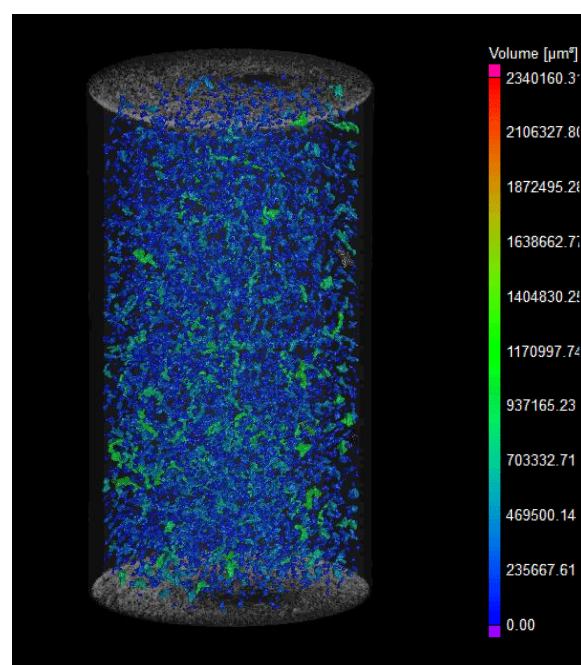


Rupture en fatigue due au délaminage si la fraction surfacique à cœur d'une couche >(4,5-10)%

Eprouvette	Fraction surfacique maximale %	délaminage
C4	10,1	délaminage
C6	15,3	délaminage
Autres éprouvettes	2,5-4,5	amorçage surface

Eprouvettes dégradées à cœur: délaminage

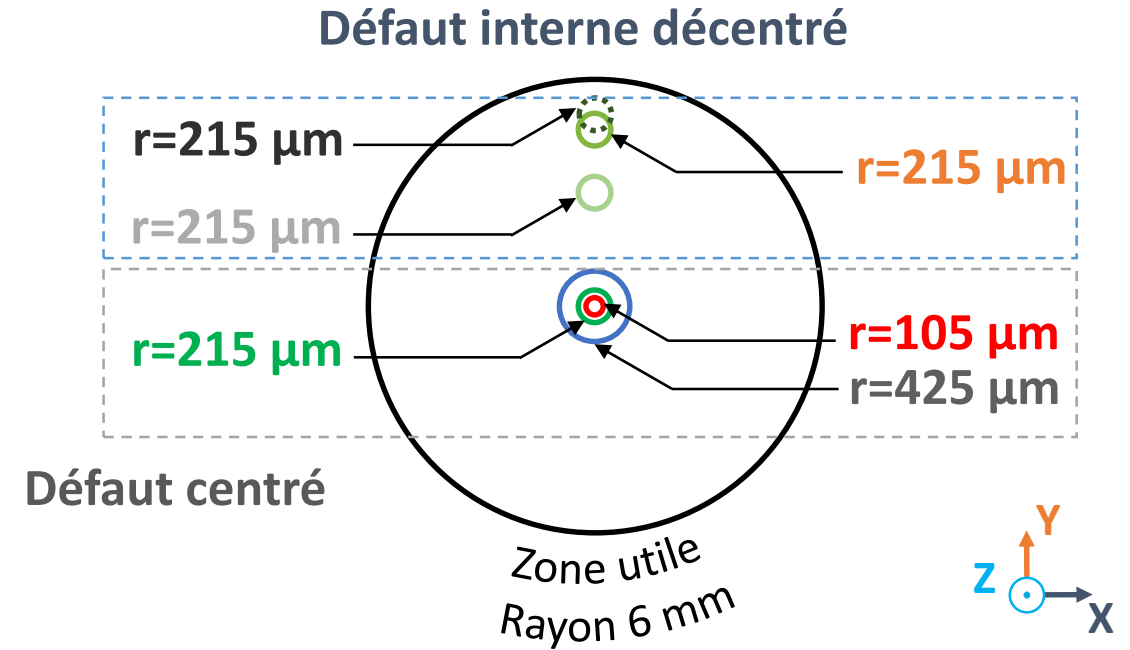
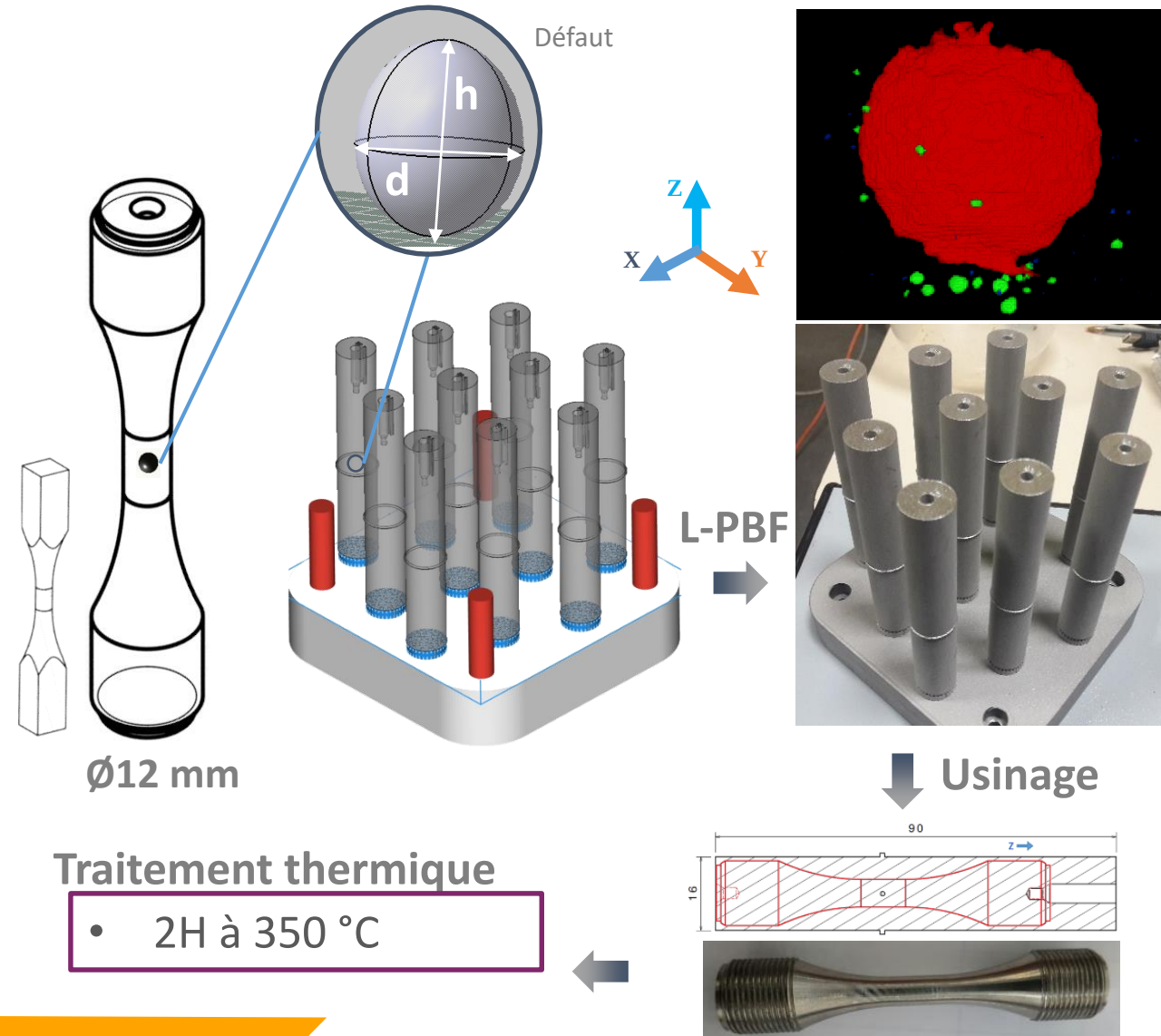
316L-PBF (brut)
R=0,1



1 éprouvette sur 50 testées

Eprouvettes avec défauts déterministes

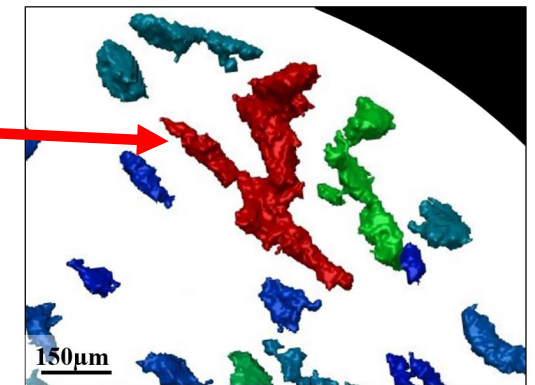
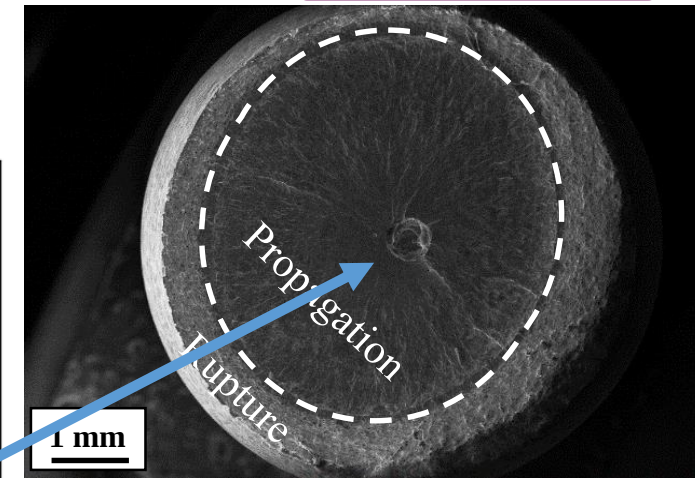
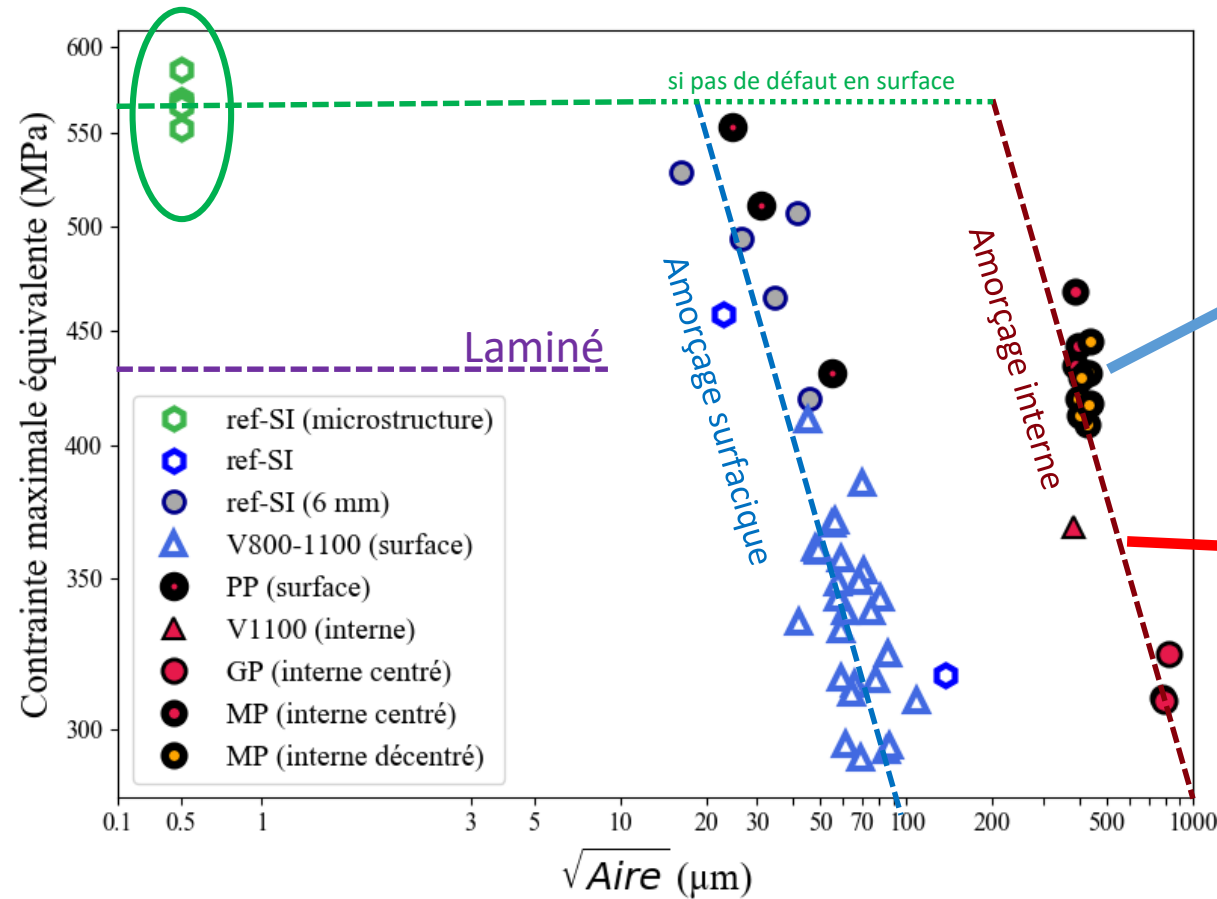
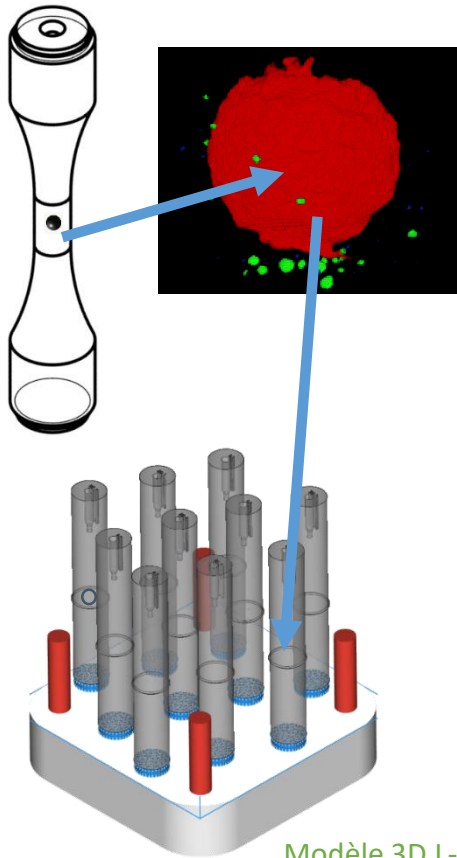
316L-PBF (brut)



- 3 tailles de défaut (+ ref)
- 3 distances au bord

Eprouvettes dégradées à cœur: délaminage

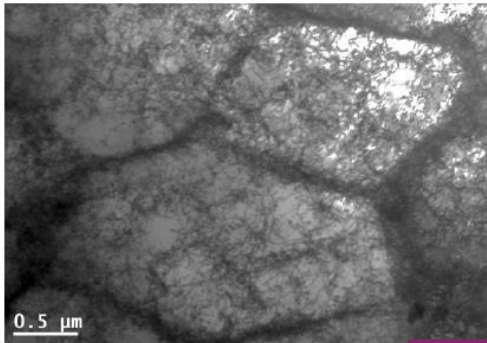
316L-PBF (brut)



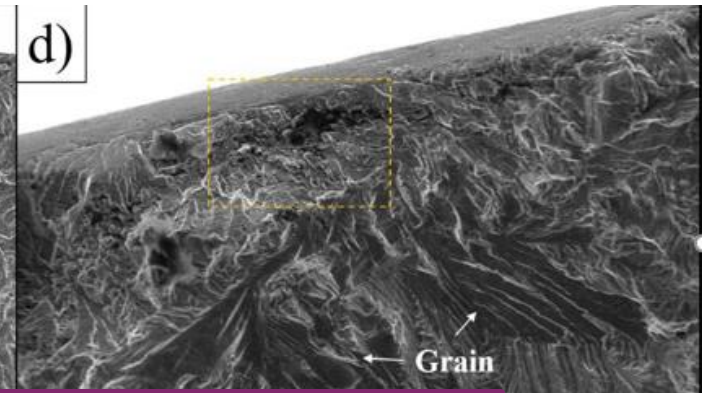
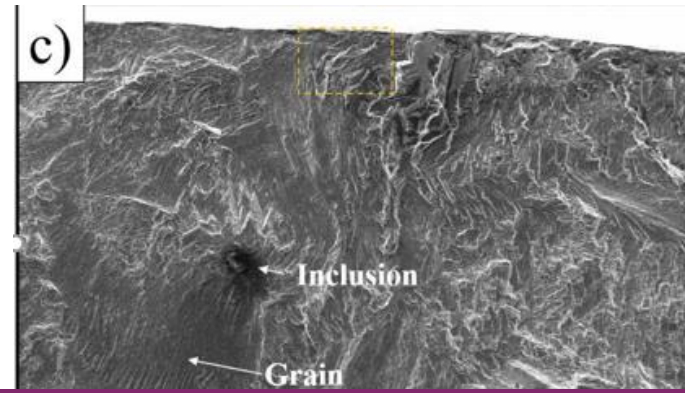
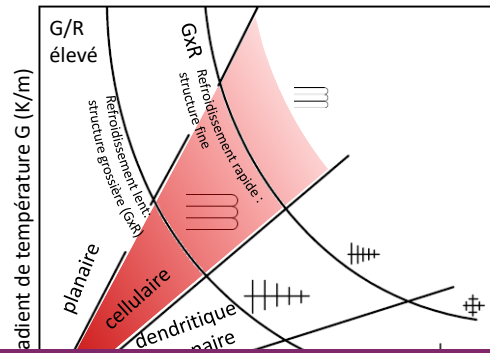
1 éprouvette sur 50 testées

Microstructure du 316L-PBF (brut)

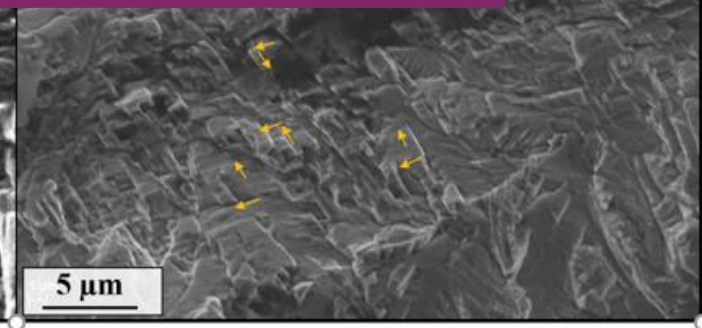
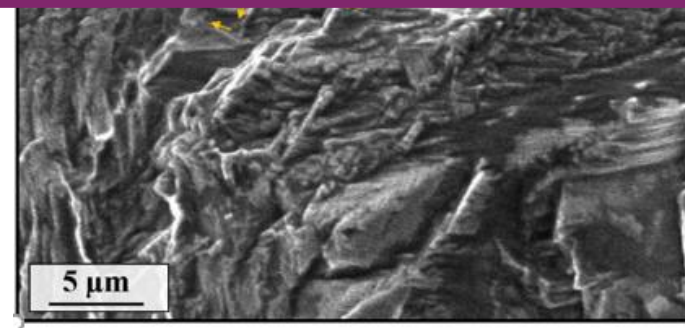
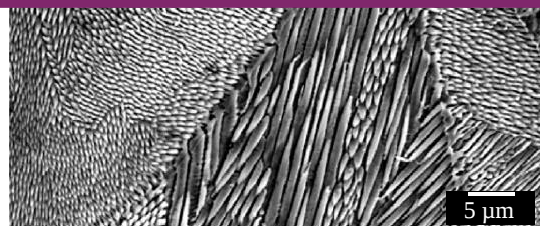
316L-PBF (brut)
R=0.1



Cellules de solidification et cellules de dislocation
l'acier 316L brut de LBM



Les cellules de solidification et de dislocation du 316L-PBF sont à l'origine d'une tenue très élevée (en l'absence de défaut)

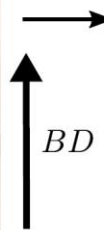
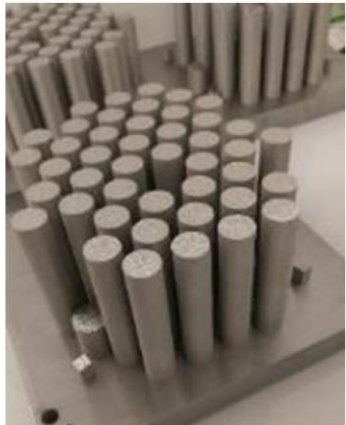


[Dépinoy et al. 2021]

Effet de la forme des défauts

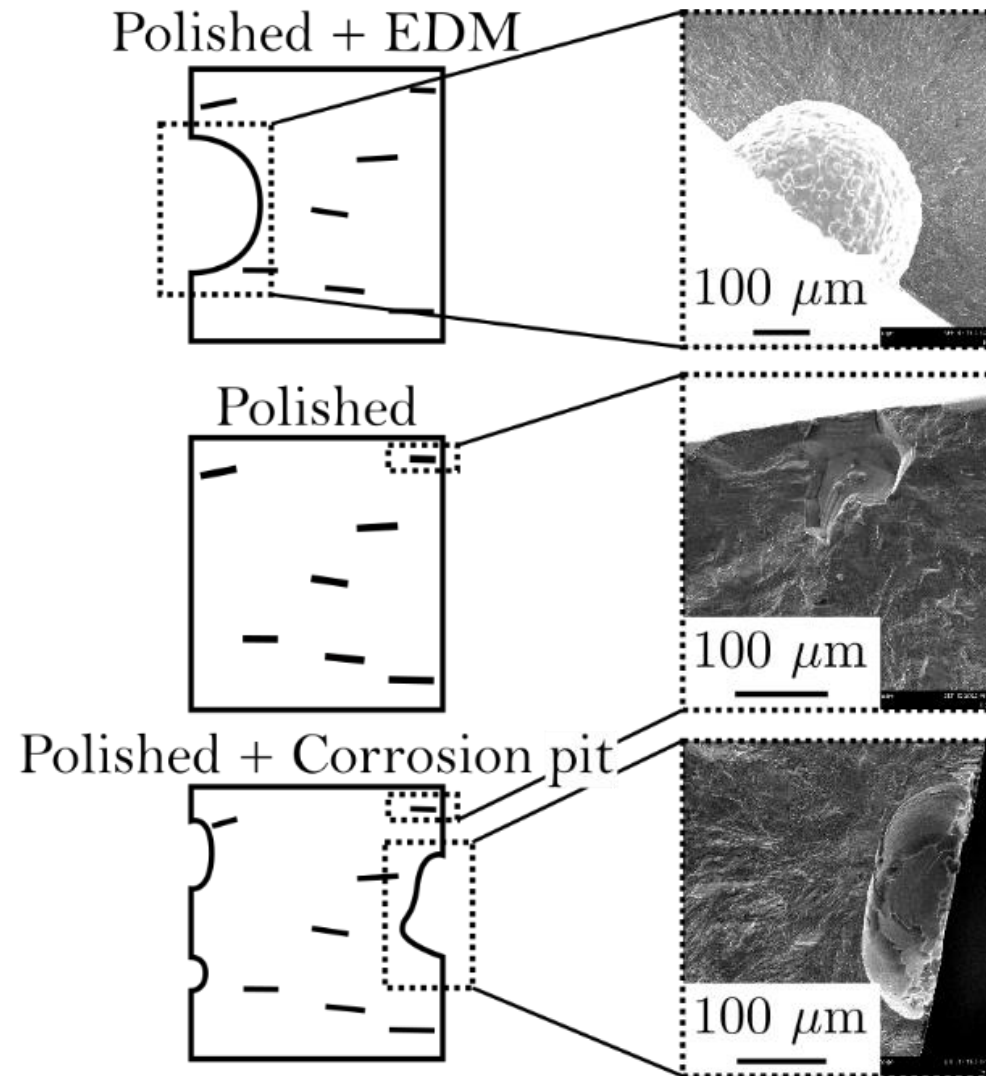
Effet de forme des défaut

316L L-PBF

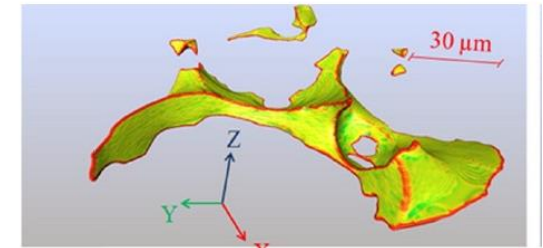


20 Hz (servo-hydraulique)
+ $\Delta\sigma_{\max} = 20$ MPa à chaque palier
 10^6 cycles par palier

316L-PBF (brut)
R=-1



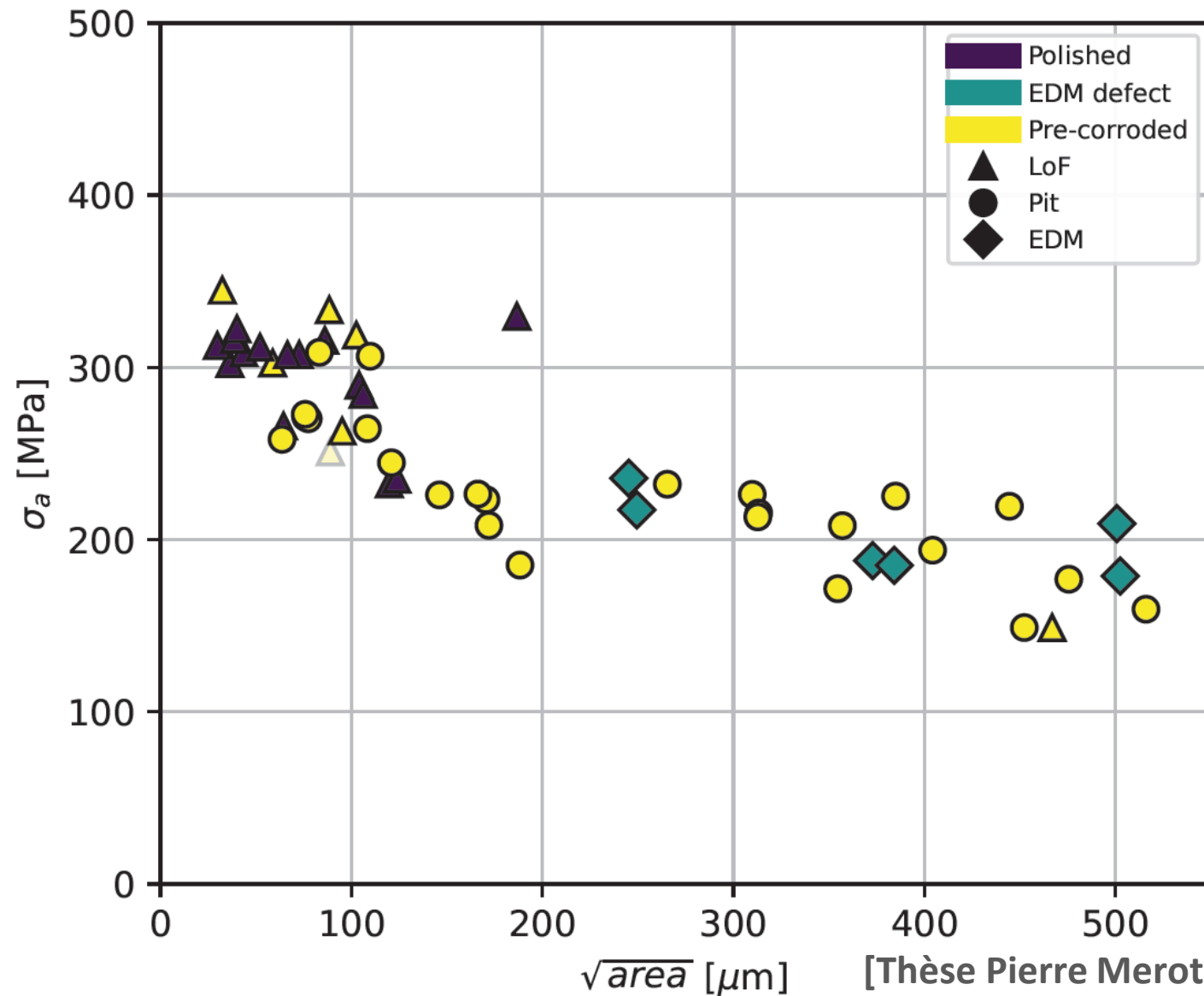
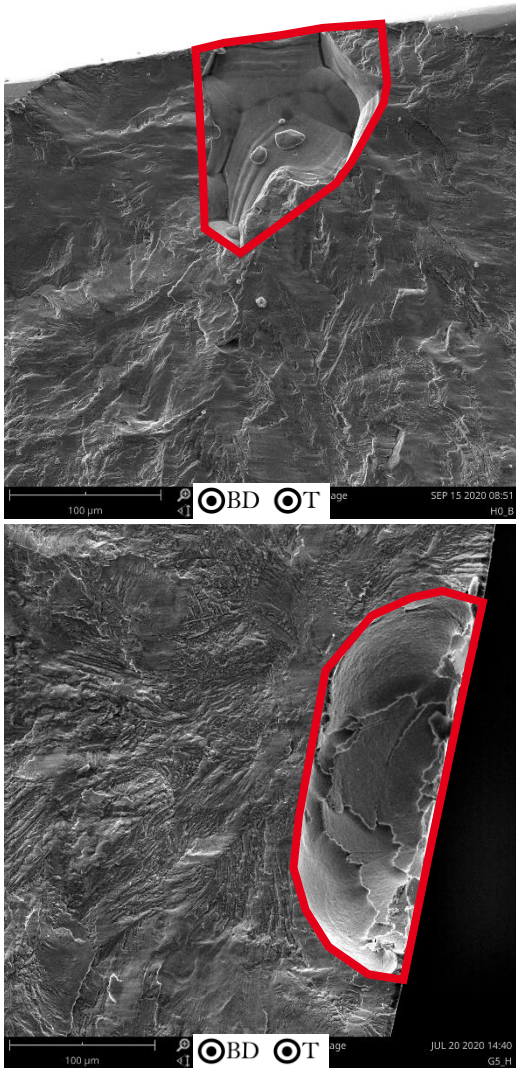
LoF



[Kasperovich – 2016]

Effet de la forme des défauts

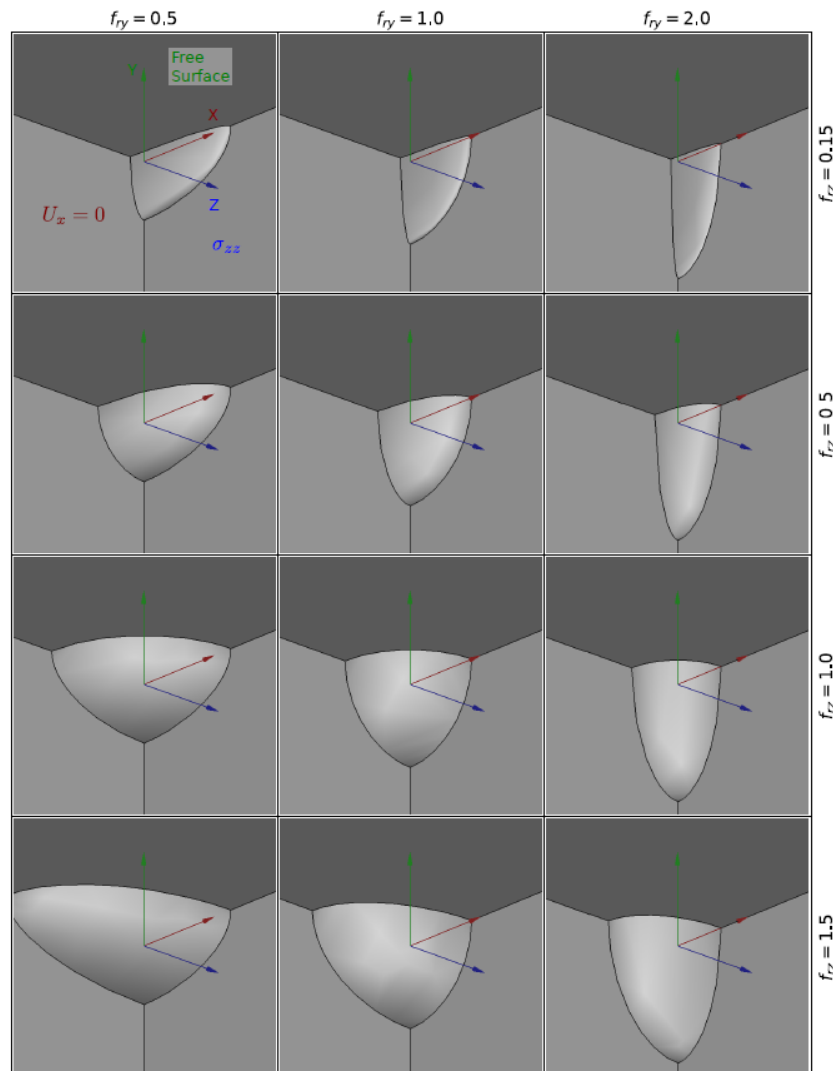
316L-PBF (brut)
R=-1



[Thèse Pierre Merot-2021]

Effet de la forme des défauts: simulations éléments finis

316L-PBF (brut)
R=-1

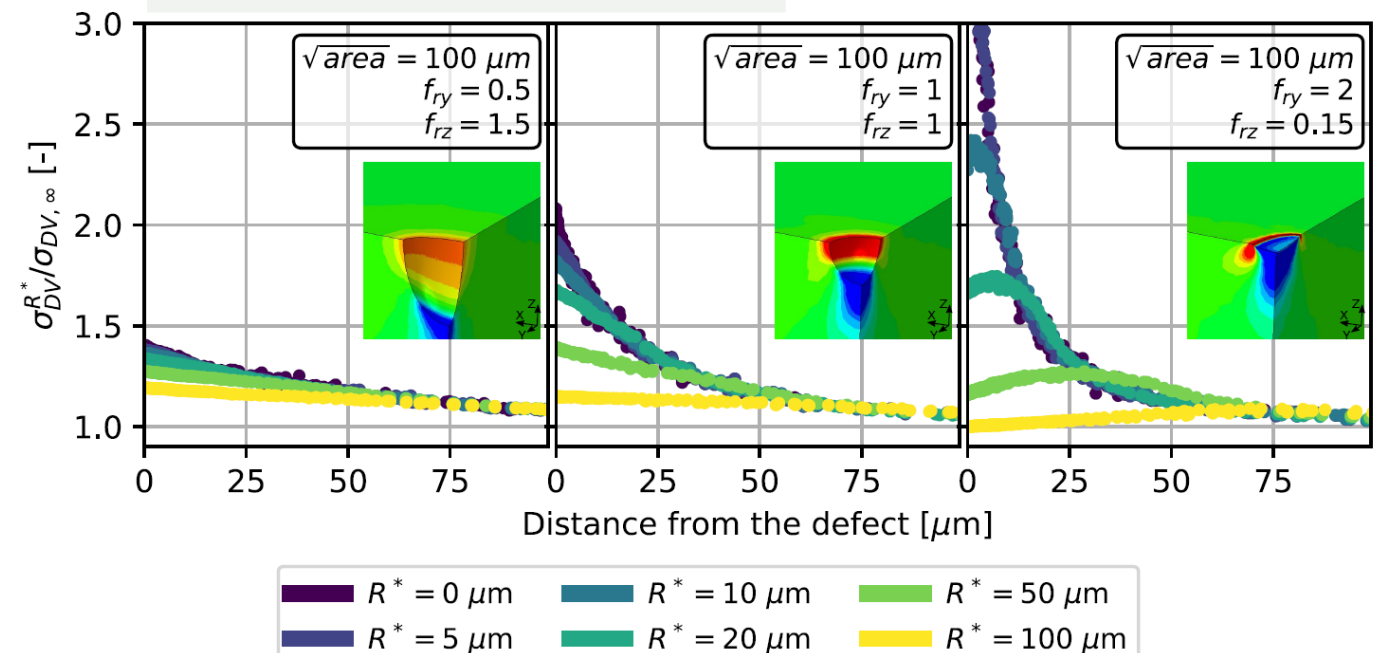


Dang Van Criteria [Dang-Van, 1993]

$$\sigma_{DV} = \max_{\underline{n}} \left\{ \max_{t \in T} [\|\underline{\tau}(t, \underline{n})\| + \alpha \sigma_H(t)] \right\} \leq \beta \quad (6)$$

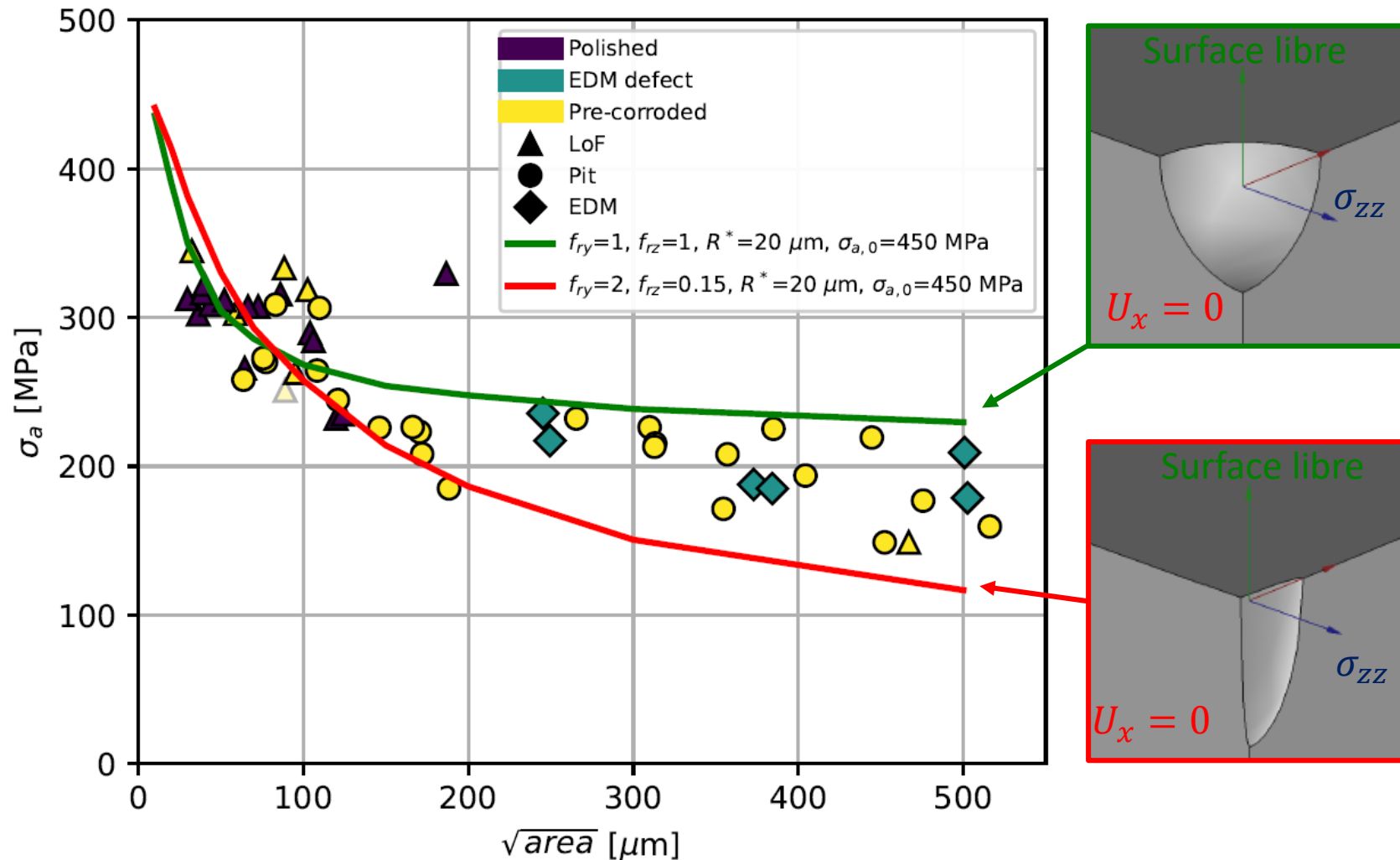
Non-local approach

$$\sigma_{DV}^* = \frac{1}{V^*} \int_{V^*} \sigma_{DV} dV \quad (7)$$



Effet de la forme des défauts: simulations éléments finis

316L-PBF (brut)
R=-1



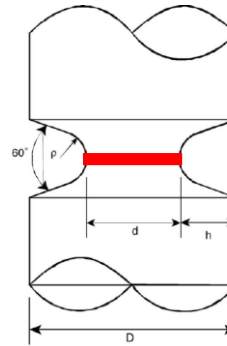
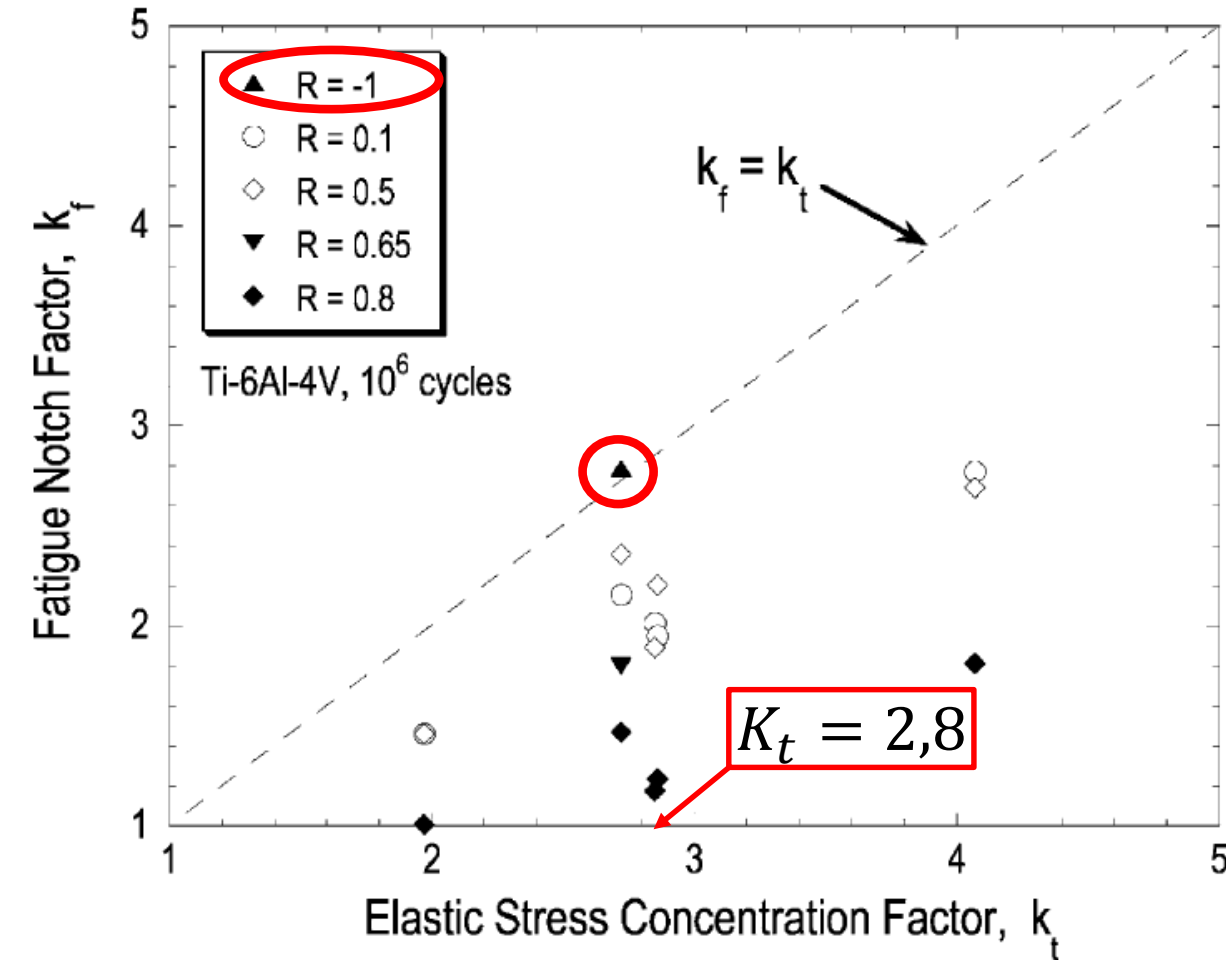
- Pas d'effet de morphologie pour les plus petits défauts $< 100\mu\text{m}$

Bilan

Compétition pores surface / cœur 316L L-PBF

- Si taille pore à cœur $> 10 \times$ taille pore en surface alors critique en fatigue
- Répartition spatiale non-homogène (en hauteur et *position sur le plateau*)
- La fraction surfacique à cœur d'une couche a peu d'impact (si $< 4,5\%$)
- Pour les tailles de défaut investiguées ($\sqrt{area} < 100\mu m$) la morphologie a peu d'impact
- Microstructure brute 316L-PBF *intéressante* en fatigue

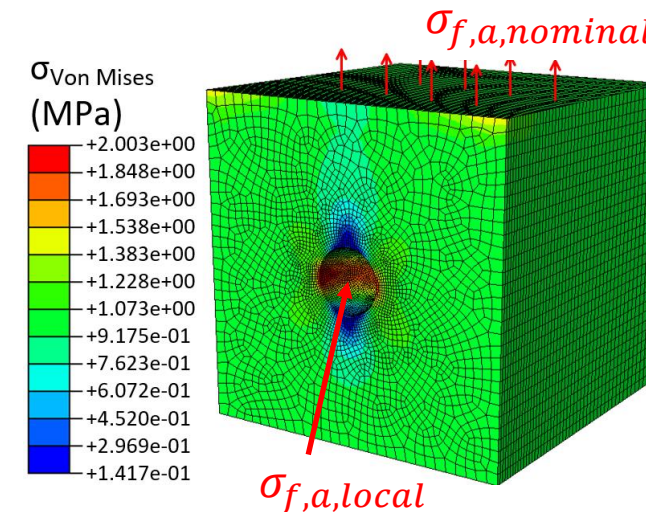
Objectif : limiter le volume sollicité sollicitée via une entaille



$$K_f = K_t$$

localisation du chargement par un défaut
hémisphérique $\varnothing 600\mu\text{m}$
→ Ti6Al4V en $R=-1$ (purement alterné)
→ Pas d'effet de gradient

$$\sigma_{f,a,local} = K_t \sigma_{f,a,nominal}$$



$$\sigma_{fatigue} = 2\sigma_{appliquée}$$

[Lanning et al., 2005]

Fabrication des éprouvettes

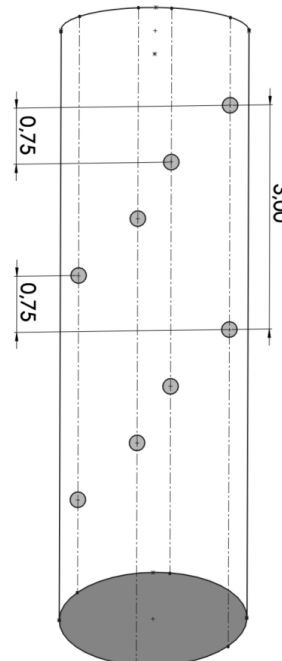
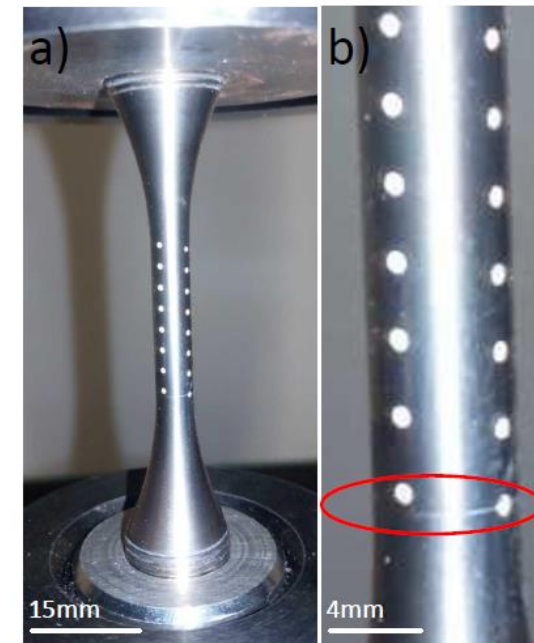
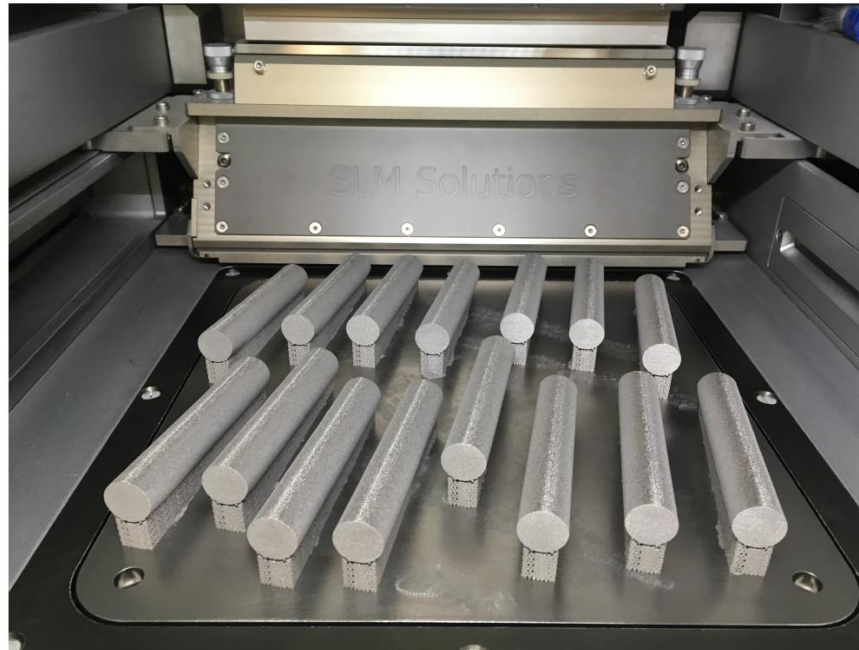
TA6V L-PBF Traitement Thermique (850 °C pendant 2 h) microstructure colonnaire ($\alpha+\beta$),
+ TTH de relaxation des $\sigma_{\text{résiduelles}}$ après usinage (600 °C pendant 4 h)

3 lots de 7 éprouvettes contenant 1, 8 et 32 défauts $\varnothing = 600 \mu\text{m}$

Ti6Al4V L-PBF ($\alpha+\beta$)

R=-1

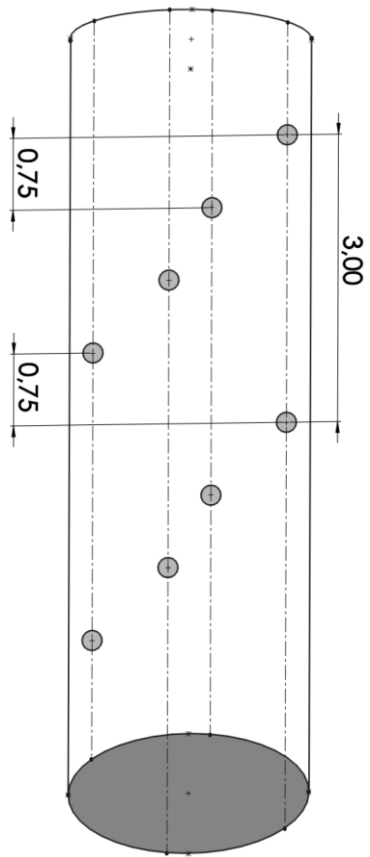
R=0,1
70 Hz (vibrophone)
+ $\Delta\sigma_{\text{max}} = 20 \text{ MPa}$ à
chaque palier
 10^6 cycles par palier



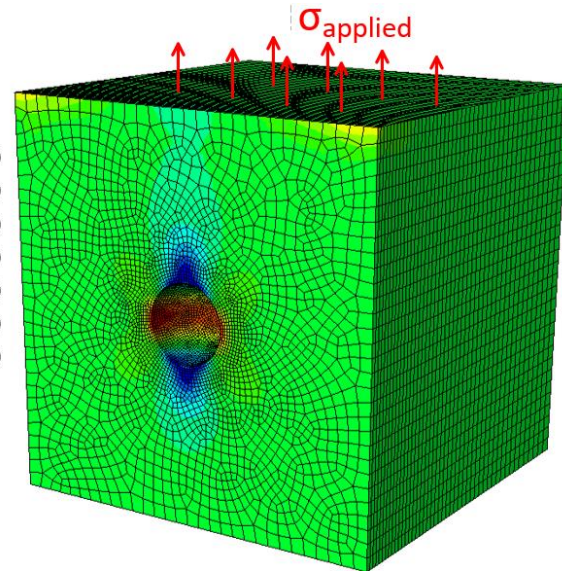
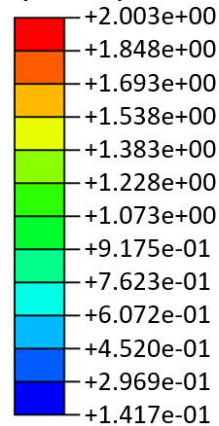
Fabrication horizontale pour limiter la nocivité des défauts

Modification du volume sollicité en changeant le nombre de trous hémisphériques usinés

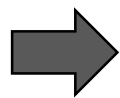
TA6V L-PBF ($\alpha+\beta$)
R=-1



$\sigma_{\text{Von Mises}}$
(MPa)

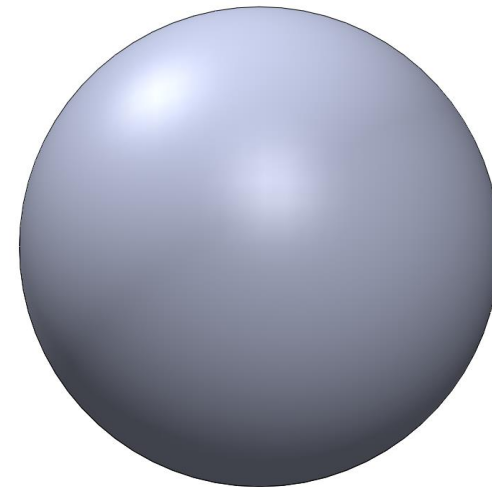
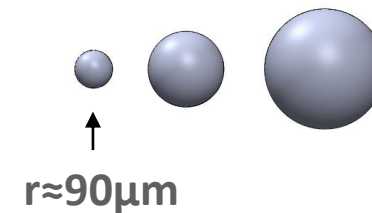


Number of Artificial Defect	1	8	32	0
HSV (10^{-2} mm^3)	0.215	1.72	6.89	440



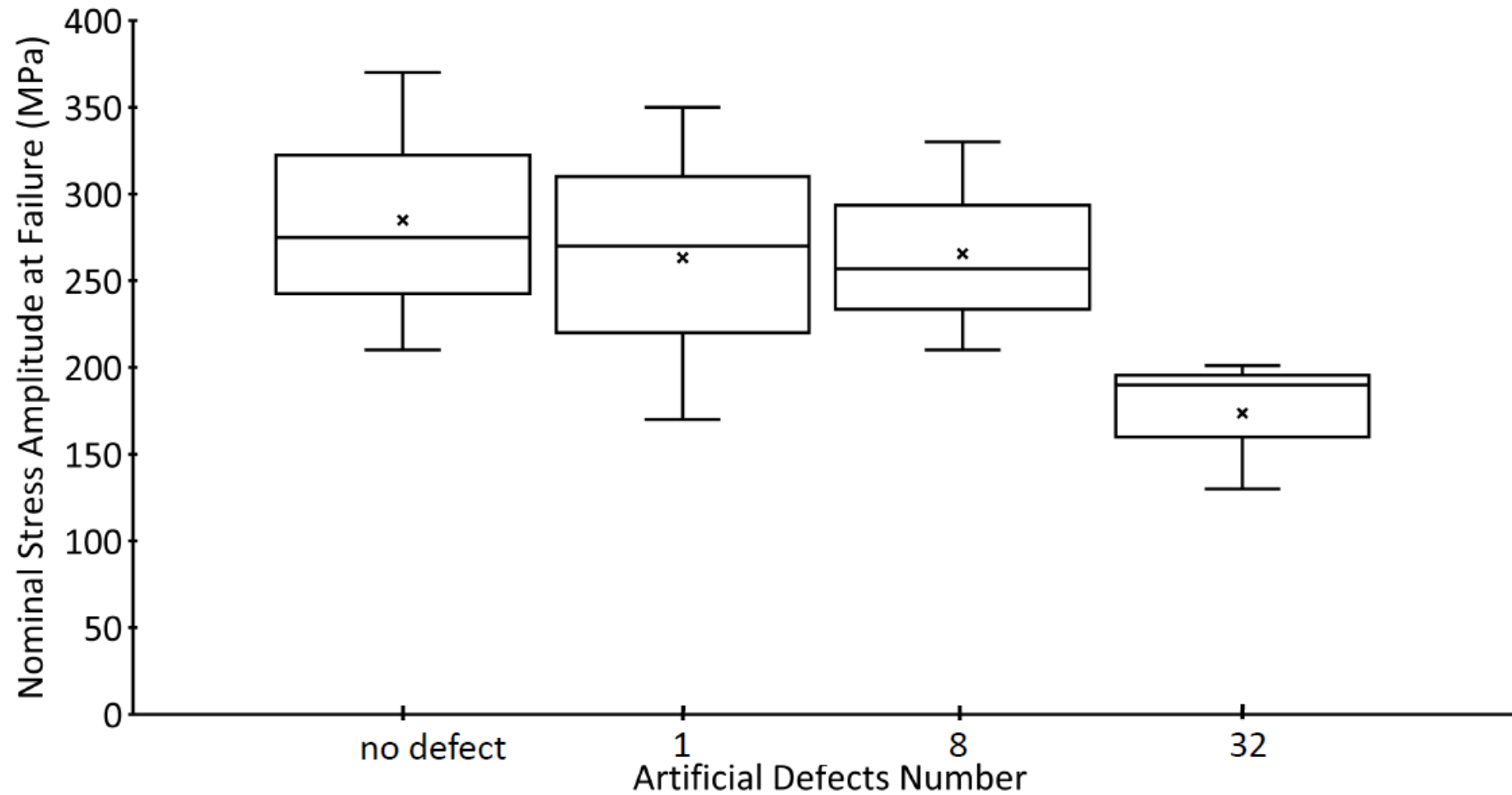
Volumes sollicités: Highly Stressed Volume HSV

$$\text{HSV} = V_{90\%}(\sigma_{\text{VM}} > 0,9\sigma_{\text{VM,maxi}})$$

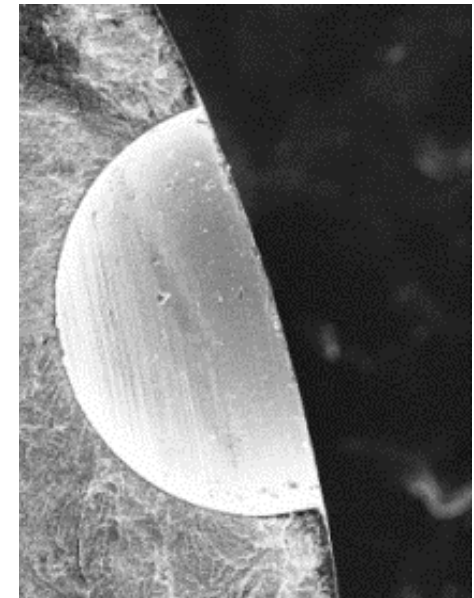


Résultats en fatigue

TA6V L-PBF ($\alpha+\beta$)
R=-1



Ø600 μ m

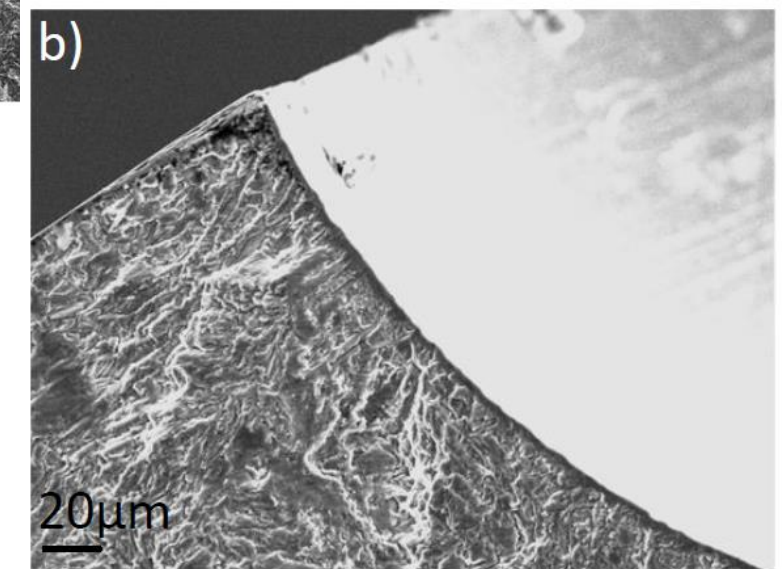
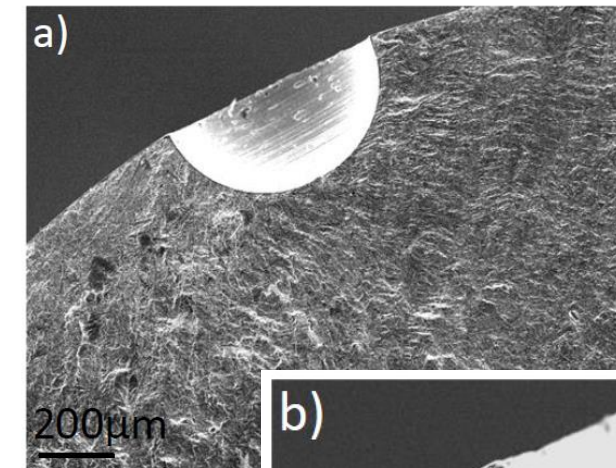
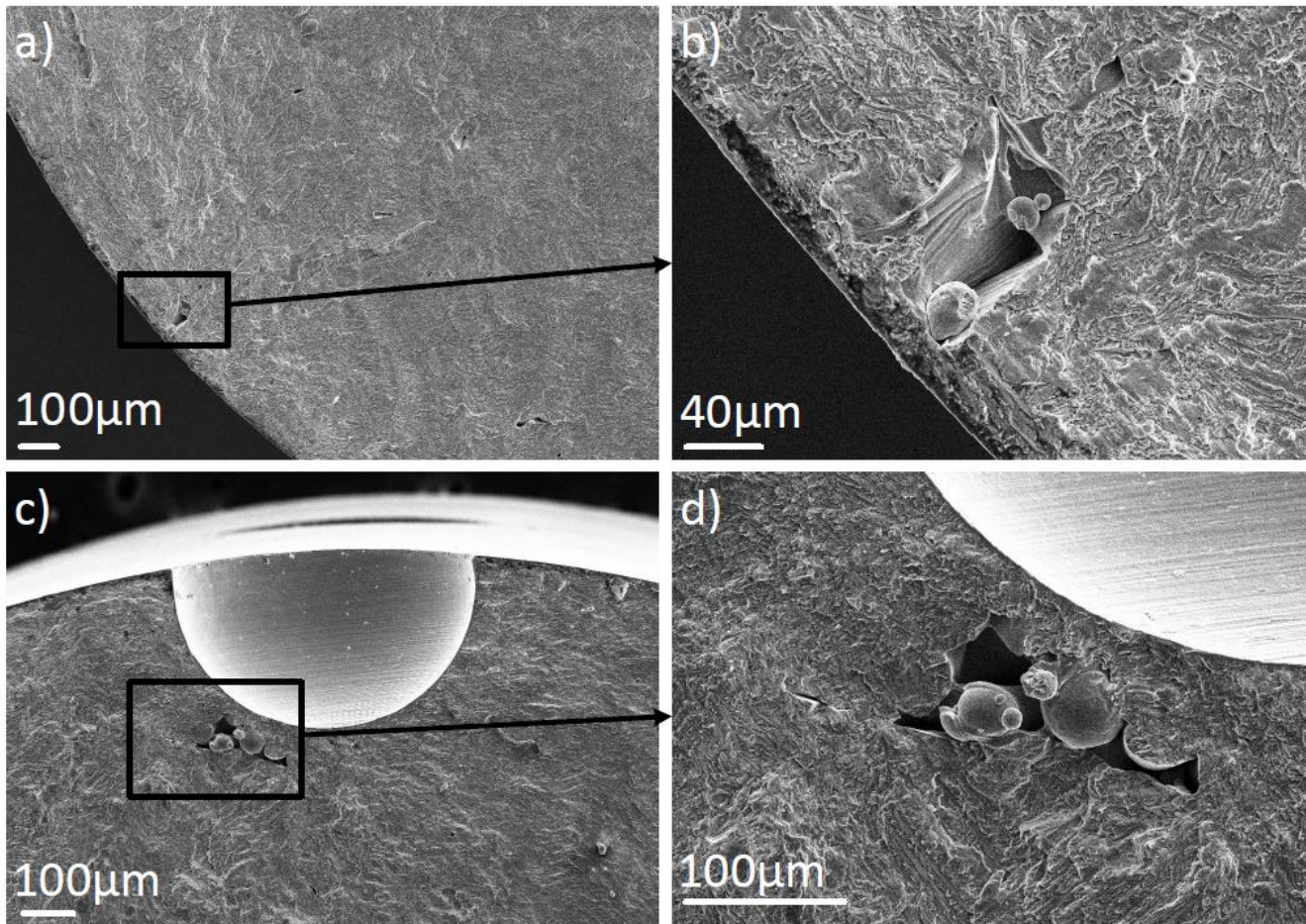


Mécanismes d'endommagement:

Amorçage avec présence ou non de pore

TA6V L-PBF ($\alpha+\beta$)
R=-1

7 éprouvettes avec
amorçage sans défaut



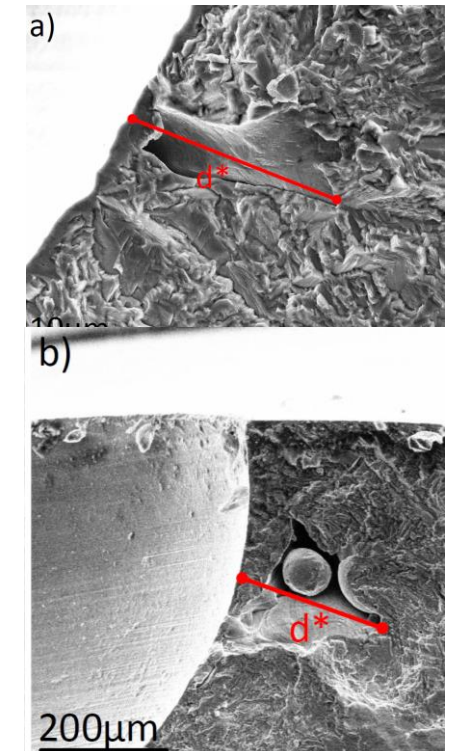
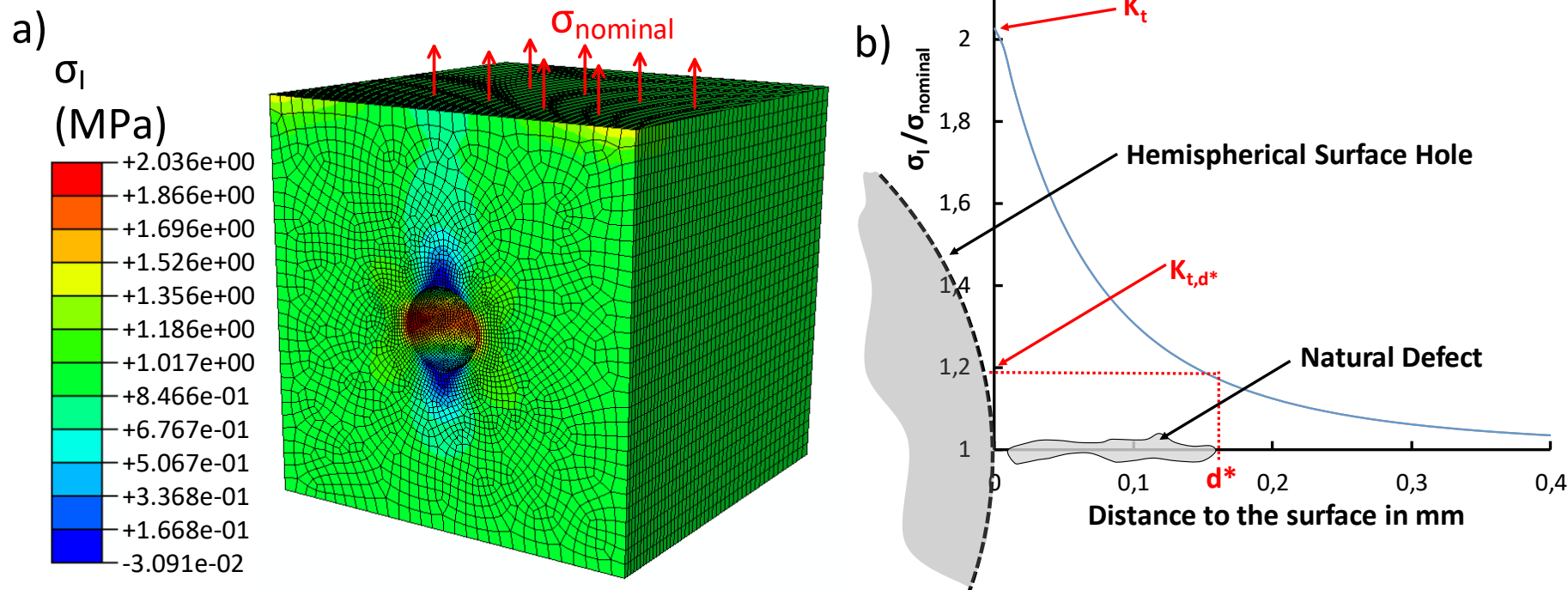
Calcul de la contrainte locale :

TA6V L-PBF ($\alpha+\beta$)
R=-1

Amorçage défaut naturel: $\sigma_{f,a,local} = \sigma_{f,a,nominal}$

Amorçage trou hémisphérique : $\sigma_{f,a,local} = K_t \sigma_{f,a,nominal}$

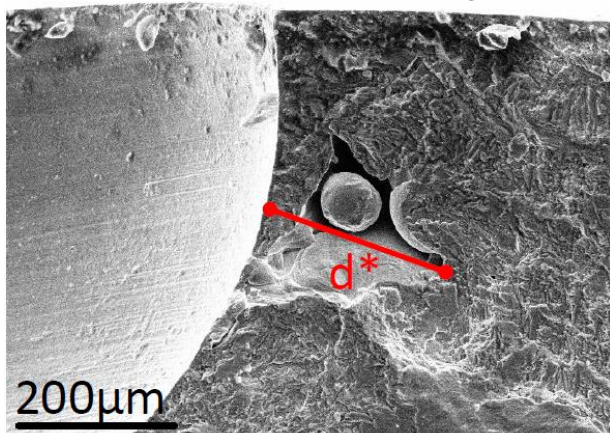
Amorçage trou hémisphérique + défaut naturel : $\sigma_{f,a,local} = K_{t,d^*} \sigma_{f,a,nominal}$



Résultats en fatigue :

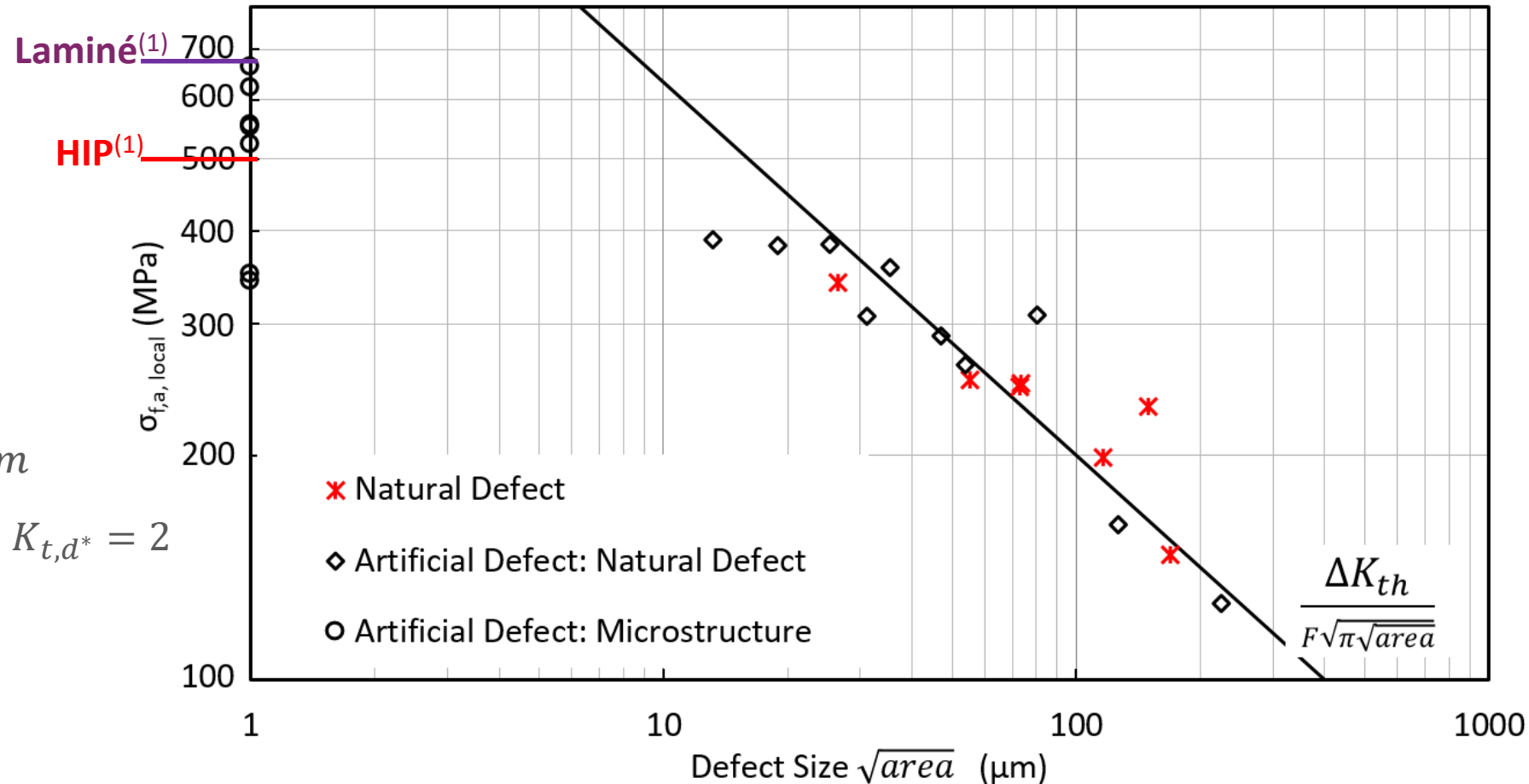
Etude du TA6V L-PBF, traction-compression $R=-1$

TA6V L-PBF ($\alpha+\beta$)
 $R=-1$



$$\sigma_{f,a,local} = K_{t,d^*} \sigma_{f,a,nom}$$

Si pas de défaut naturel $K_{t,d^*} = 2$

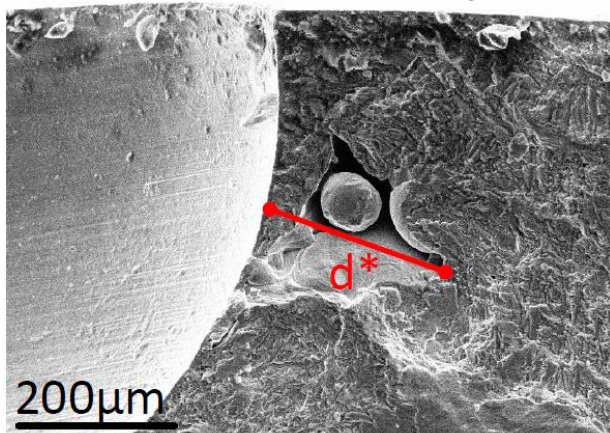


⁽¹⁾[Vayssette 2019]
[Pessard, 2021]

Résultats en fatigue :

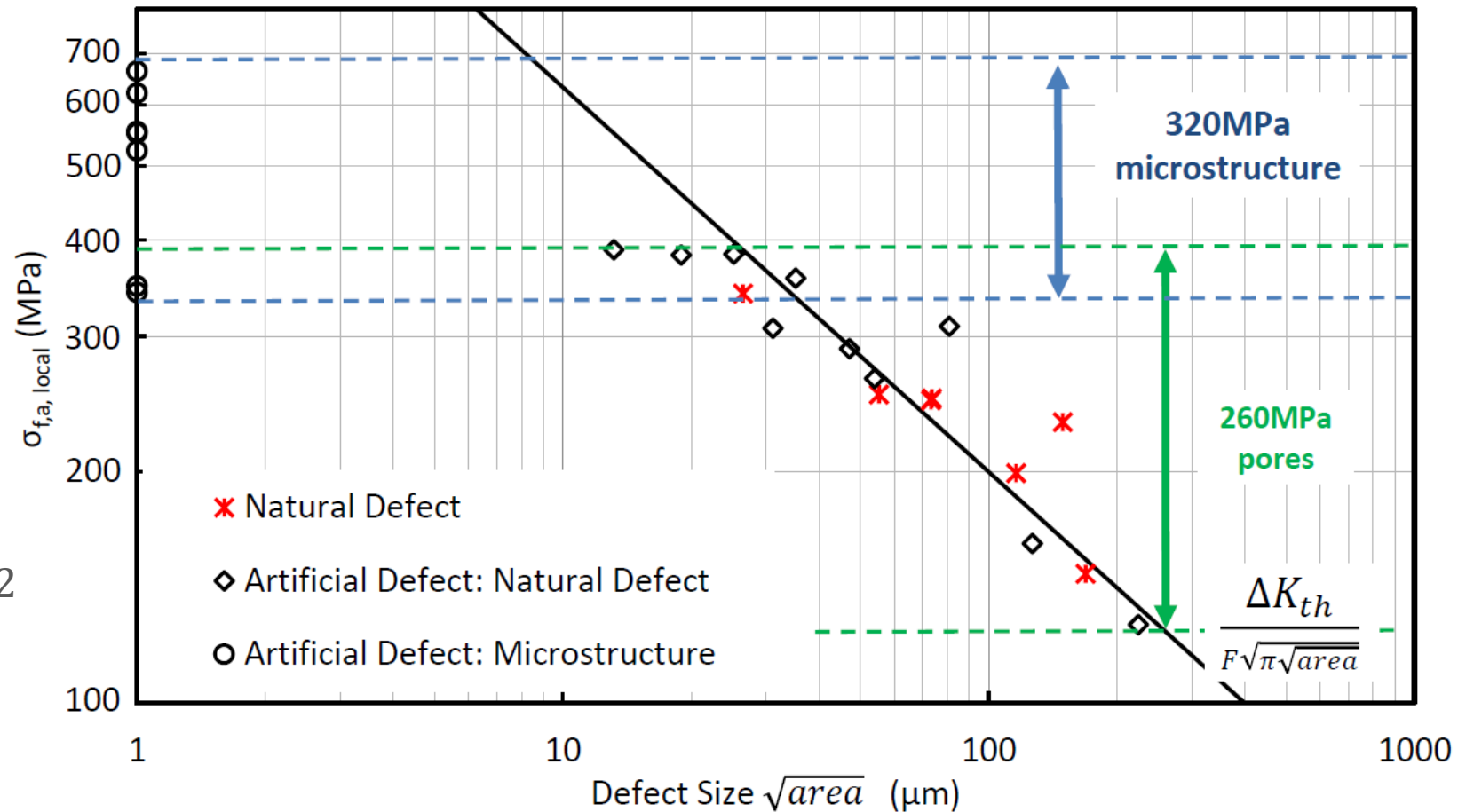
Etude du TA6V L-PBF, traction-compression $R=-1$

TA6V L-PBF ($\alpha+\beta$)
 $R=-1$



$$\sigma_{f,a,local} = K_{t,d^*} \sigma_{f,a,nom}$$

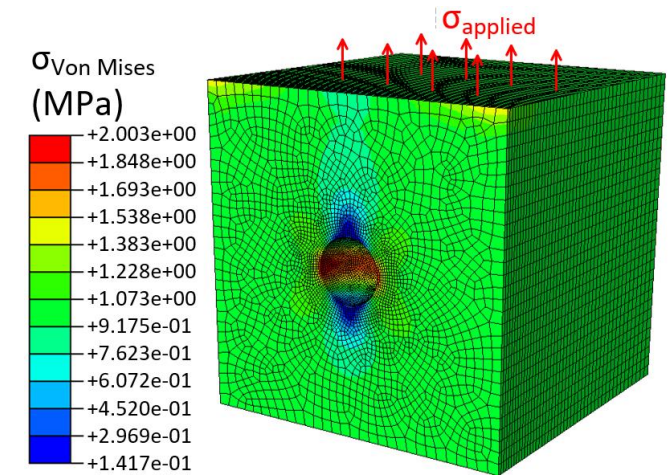
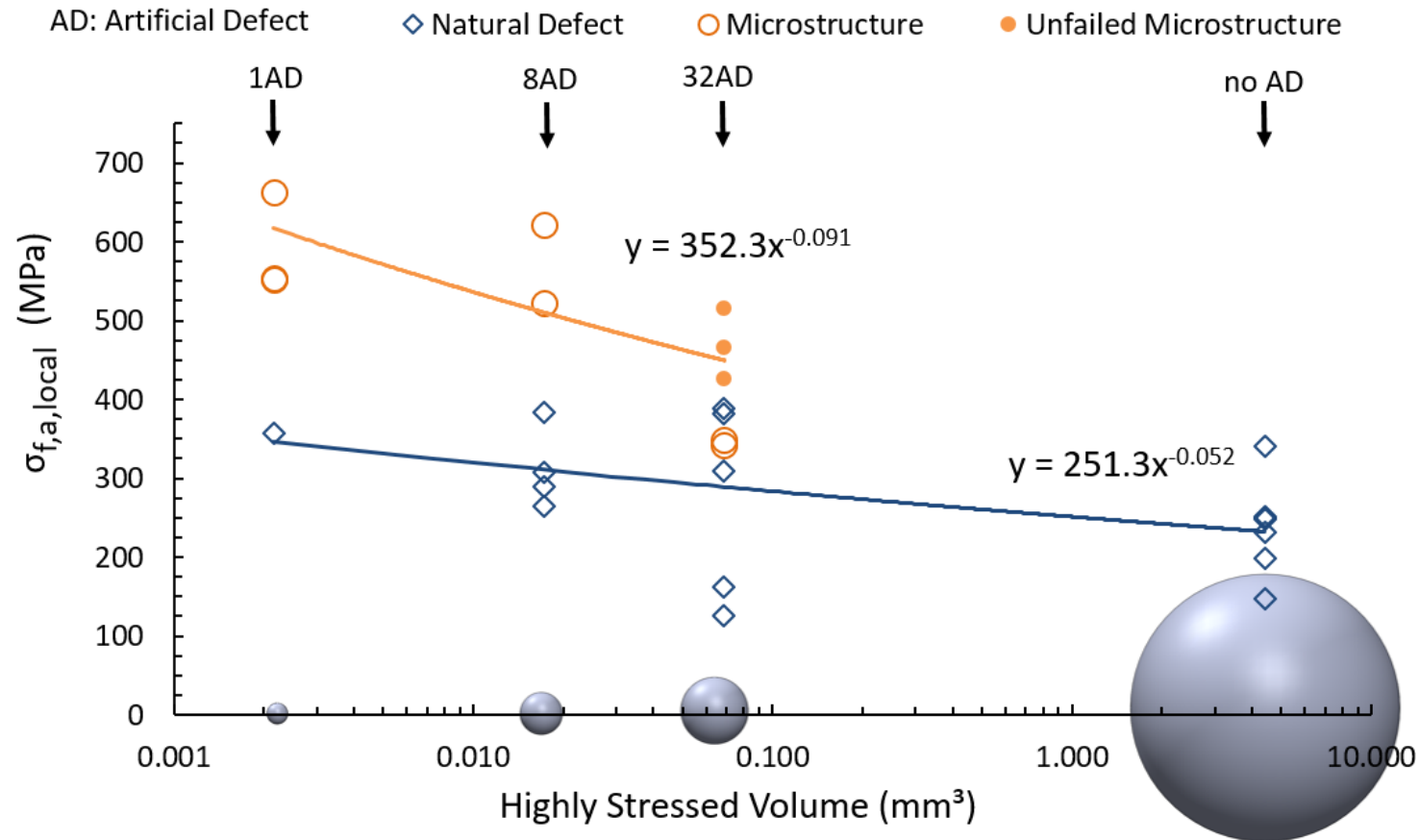
Si pas de défaut naturel $K_{t,d^*} = 2$



Résultats en fatigue :

Etude du TA6V L-PBF, traction-compression R=-1

TA6V L-PBF ($\alpha+\beta$)
R=-1

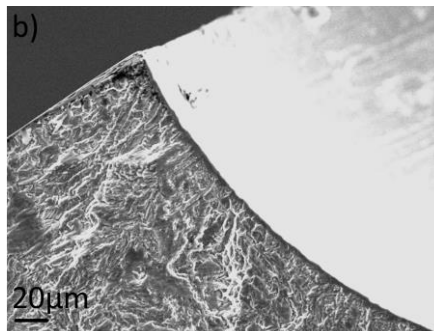
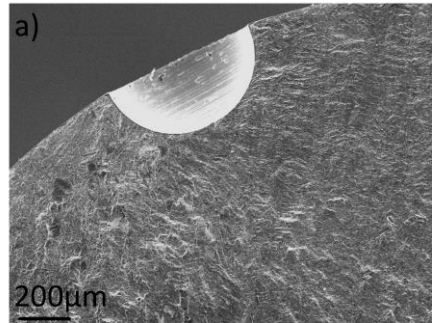


$$HSV = V_{90\%}(\sigma_{VM} > 0,9 \sigma_{VM,maxi})$$

Number of Artificial Defect	1	8	32	0
HSV (10^{-2} mm^3)	0.215	1.72	6.89	440
average pore size (μm)	35	39	92	95
failure without pores (%)	42	33	25	0

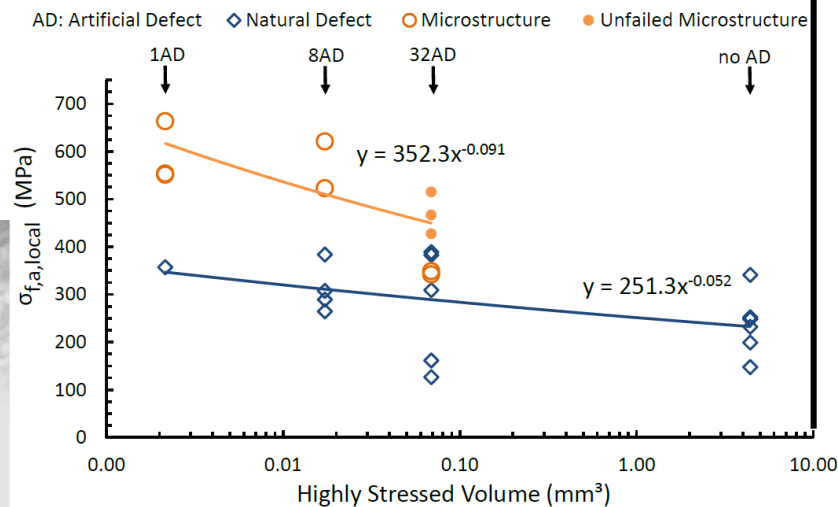
Modélisation du comportement en fatigue

TA6V L-PBF (α+β)
R=-1



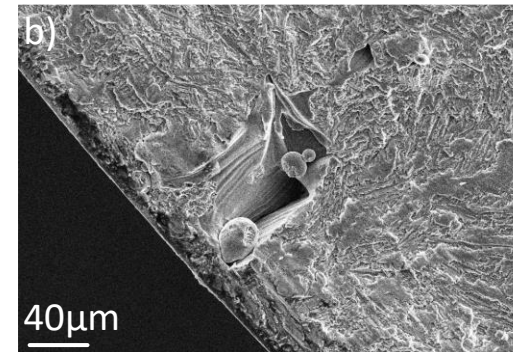
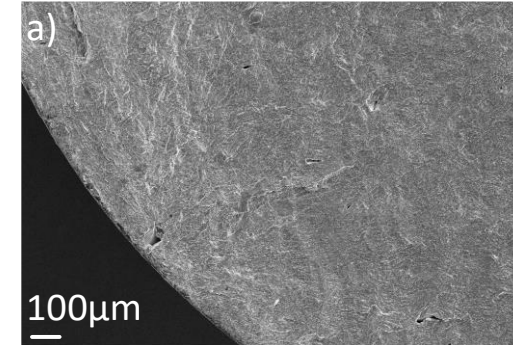
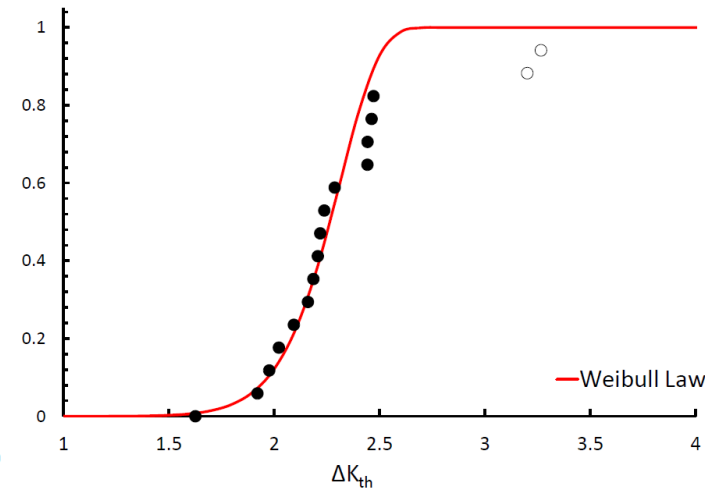
Amorçage microstructure

$$P_{F_1} = 1 - \exp \left[- \frac{V_{\Omega}}{V_0} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{th0}} \right)^{m_1} \right]$$



Propagation à partir d'un défaut

$$P_{F_2} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\Delta K_I}{\Delta K_{th0}} \right)^{m_2} \right]$$



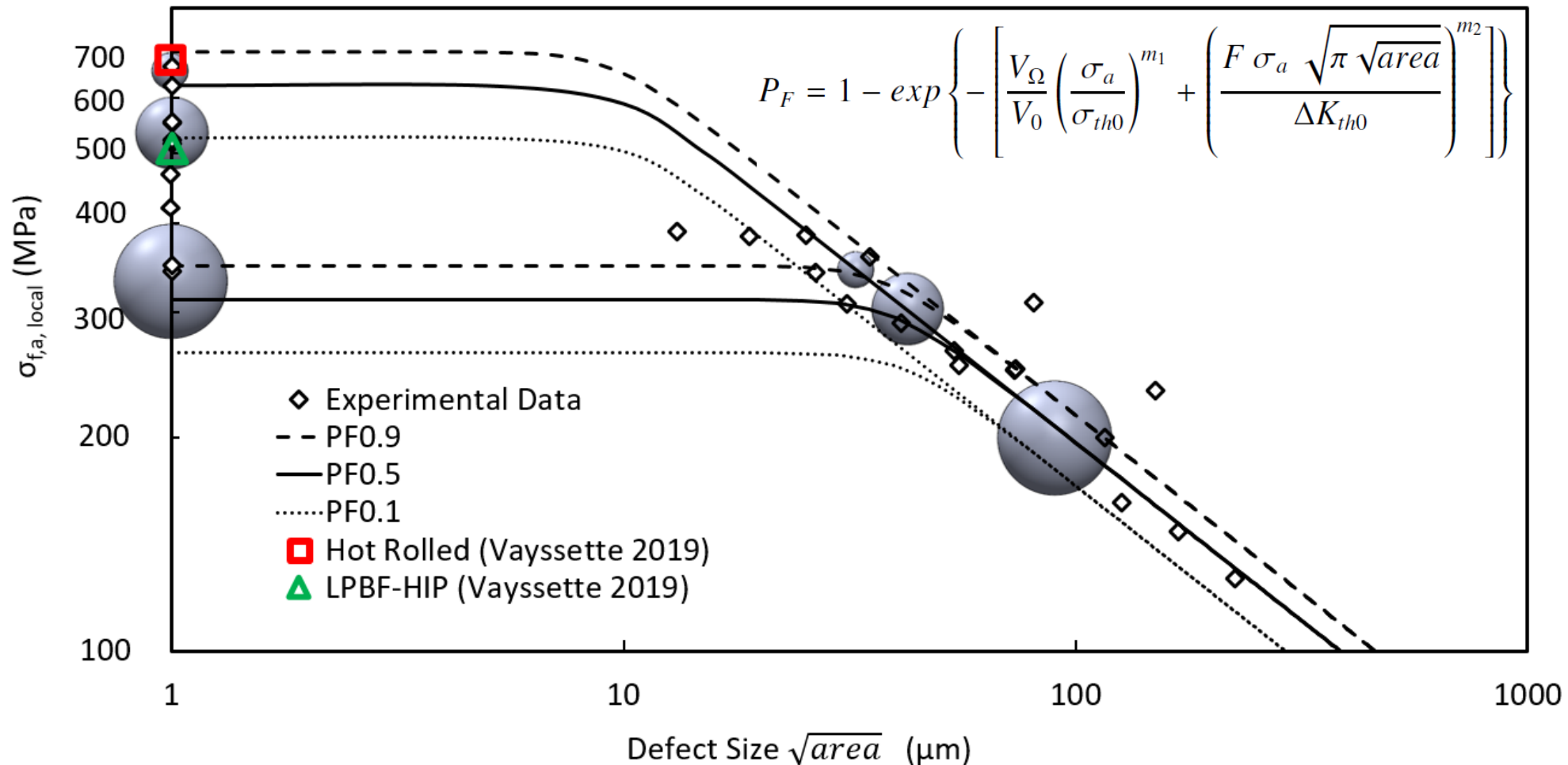
Hypothèse du maillon le plus faible $1 - P_F = (1 - P_{F_1})(1 - P_{F_2})$

$$P_F = 1 - \exp \left\{ - \left[\frac{V_{\Omega}}{V_0} \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{th0}} \right)^{m_1} + \left(\frac{F \sigma_a \sqrt{\pi \sqrt{area}}}{\Delta K_{th0}} \right)^{m_2} \right] \right\}$$

Modélisation du comportement en fatigue

TA6V L-PBF ($\alpha+\beta$)
R=-1

Etude du TA6V L-PBF, traction-compression R=-1



Impact de l'état de surface des pièces L-PBF sur la tenue en fatigue

TA6V L-PBF ($\alpha+\beta$)
R=0.1

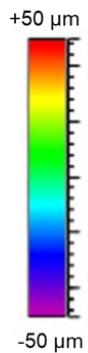
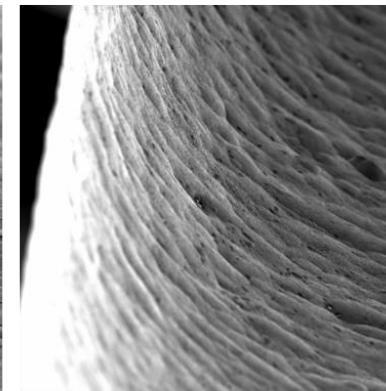
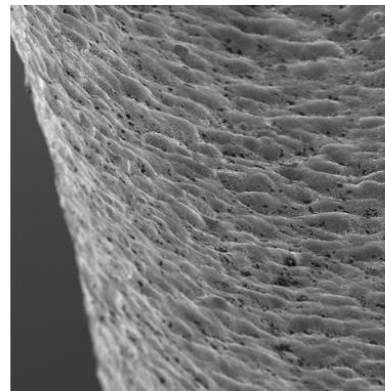
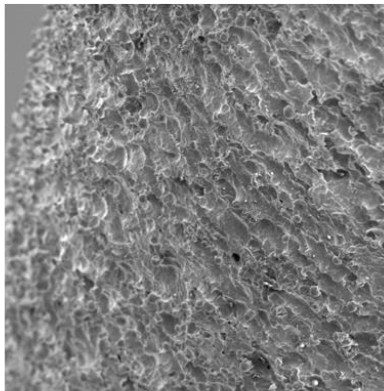
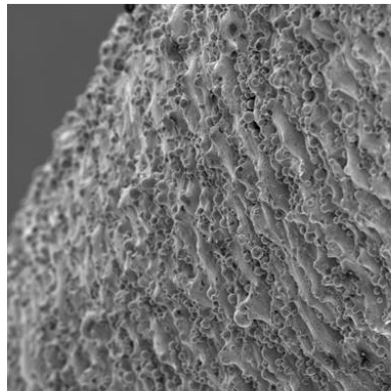
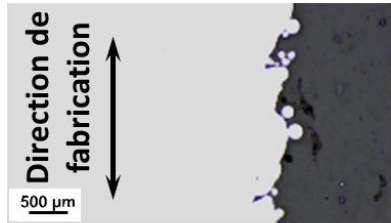
Net-Shape

Parachevé 2 min.

Parachevé 10 min.

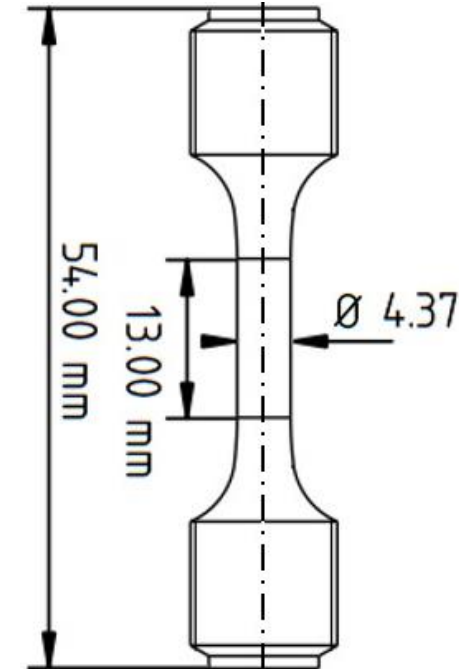
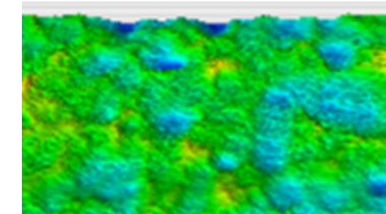
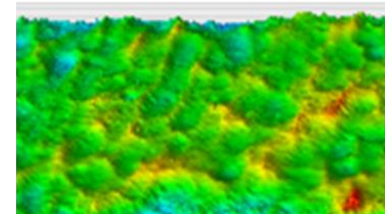
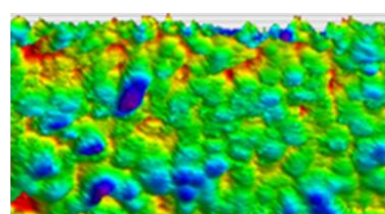
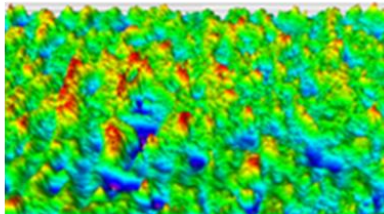
Parachevé 20 min.

Parachevé 30 min.



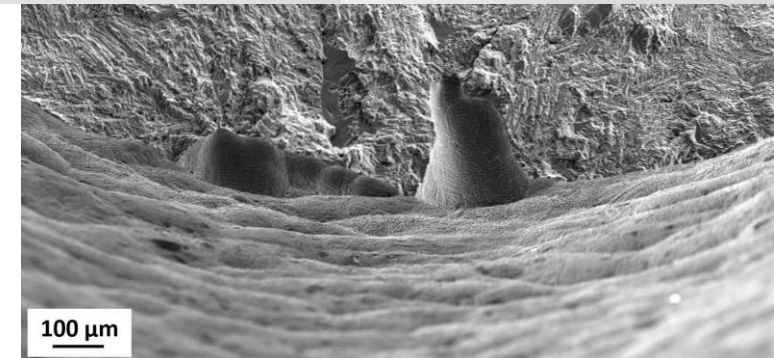
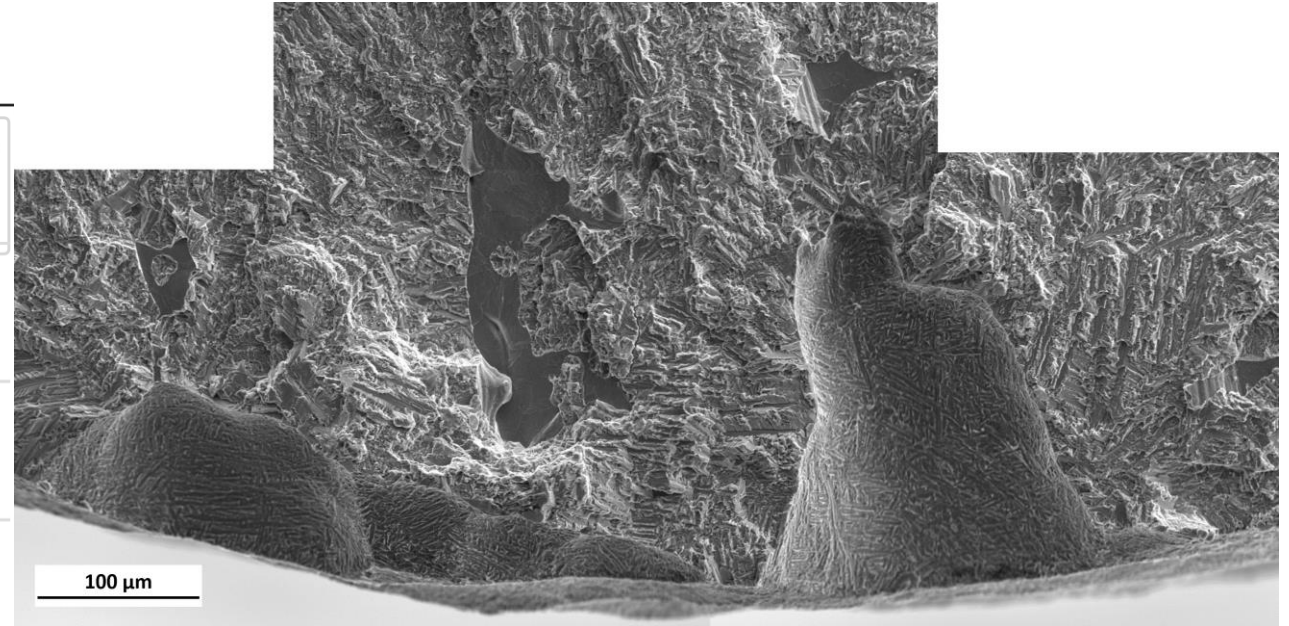
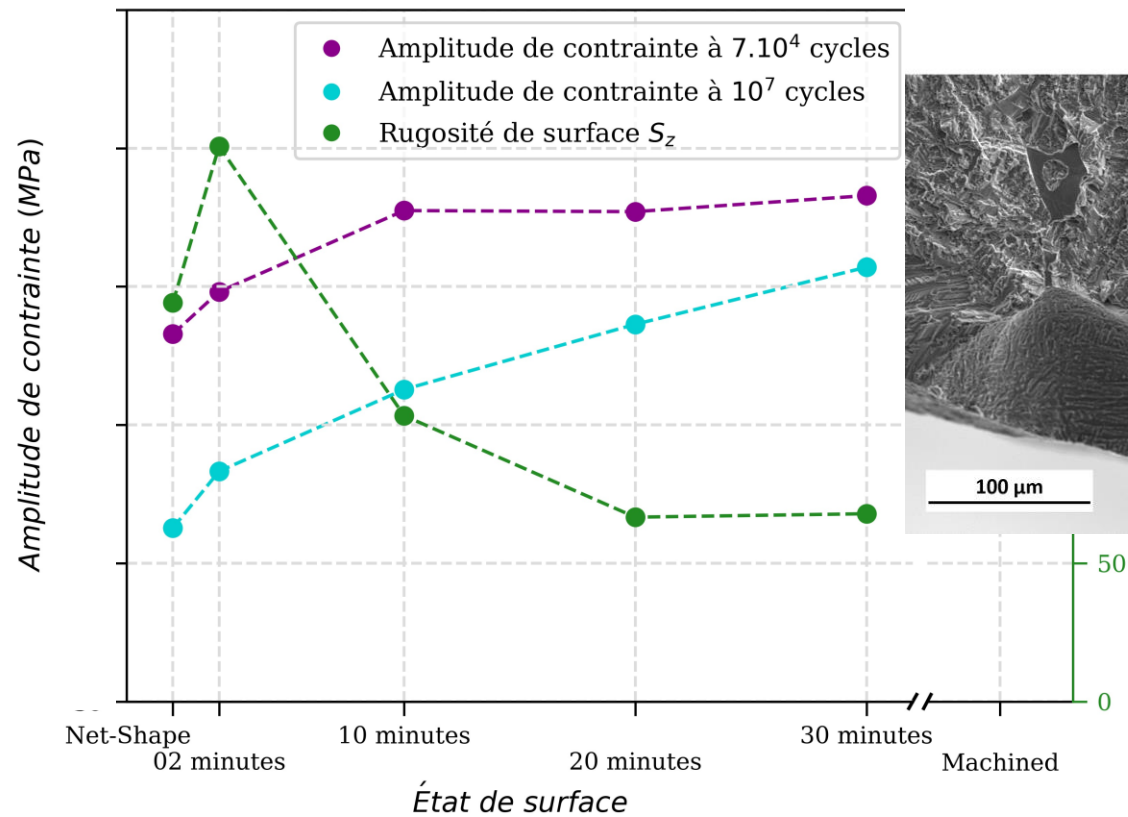
Direction de fabrication

1 mm

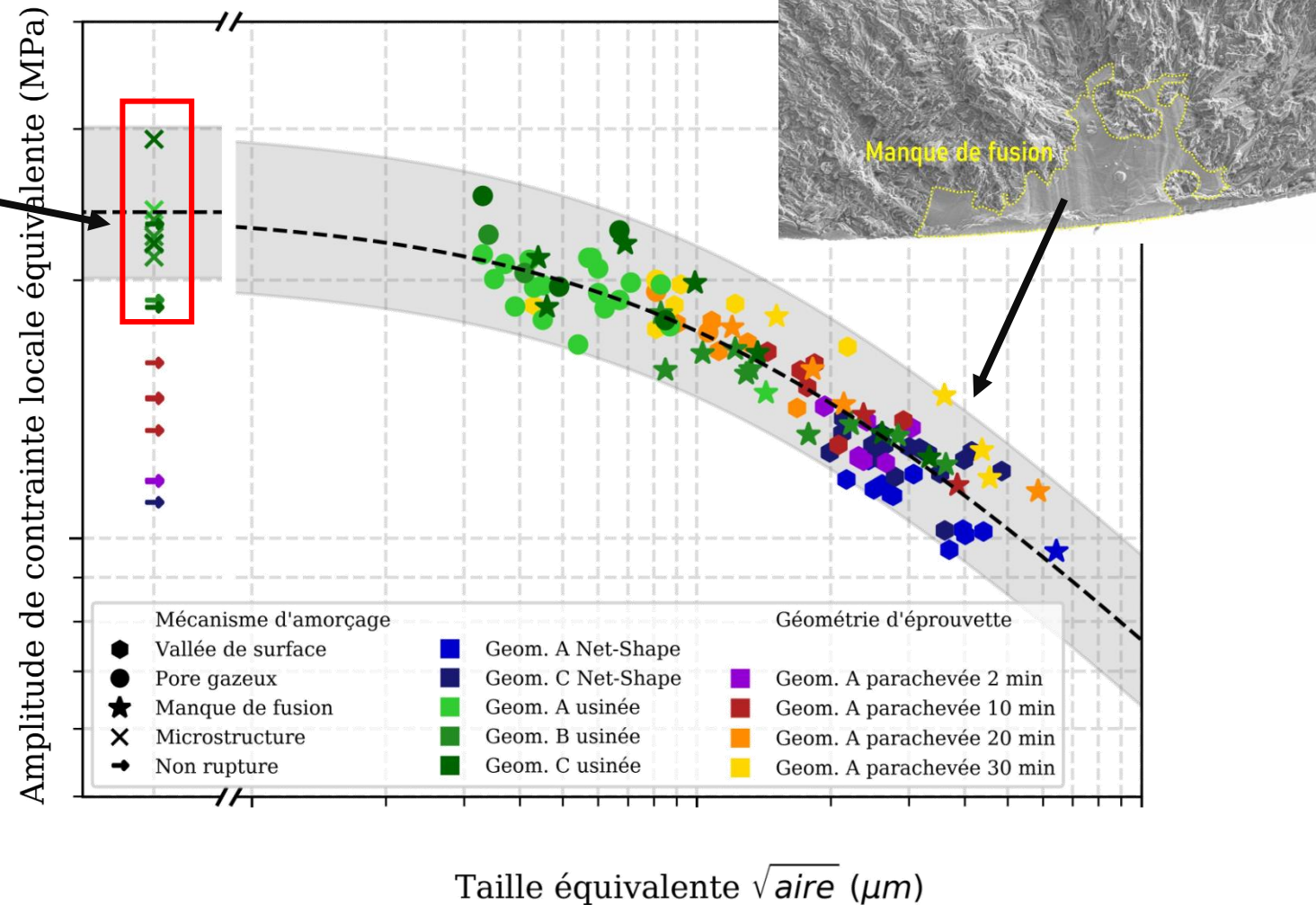
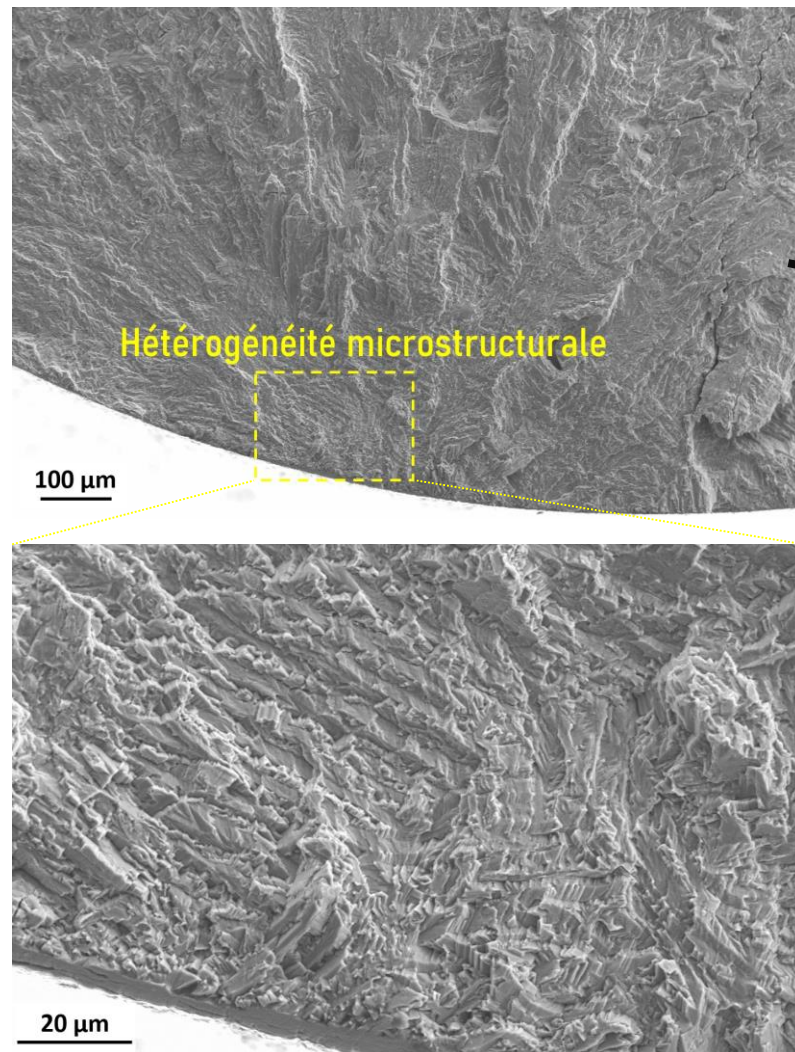


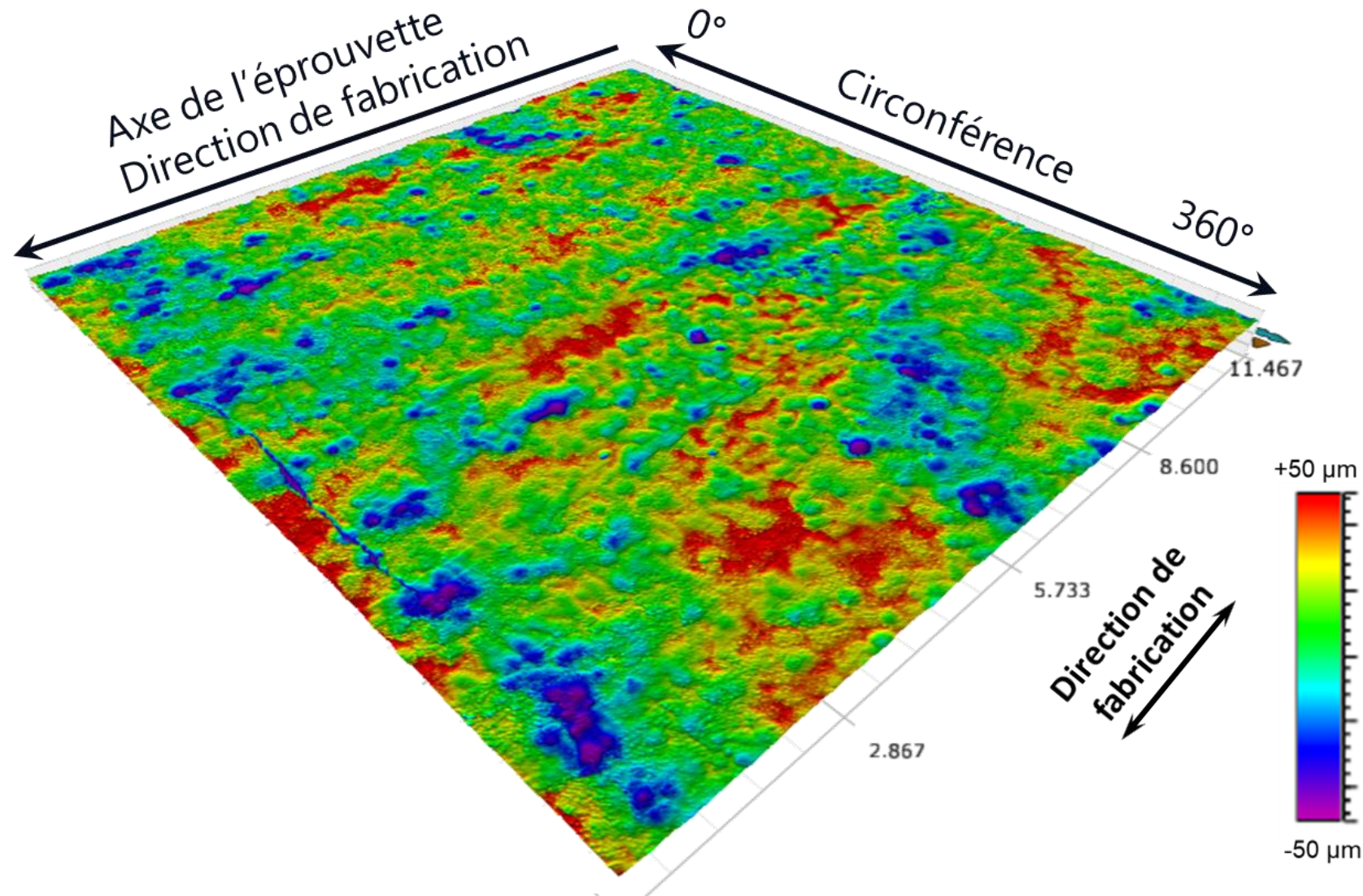
Impact de l'état de surface des pièces L-PBF sur la tenue en fatigue

TA6V L-PBF ($\alpha+\beta$)
R=0.1



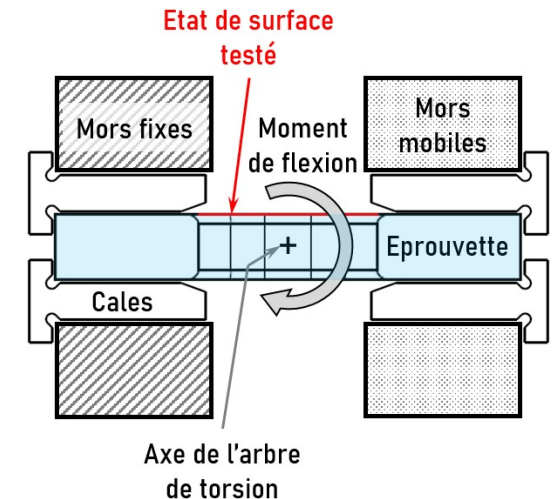
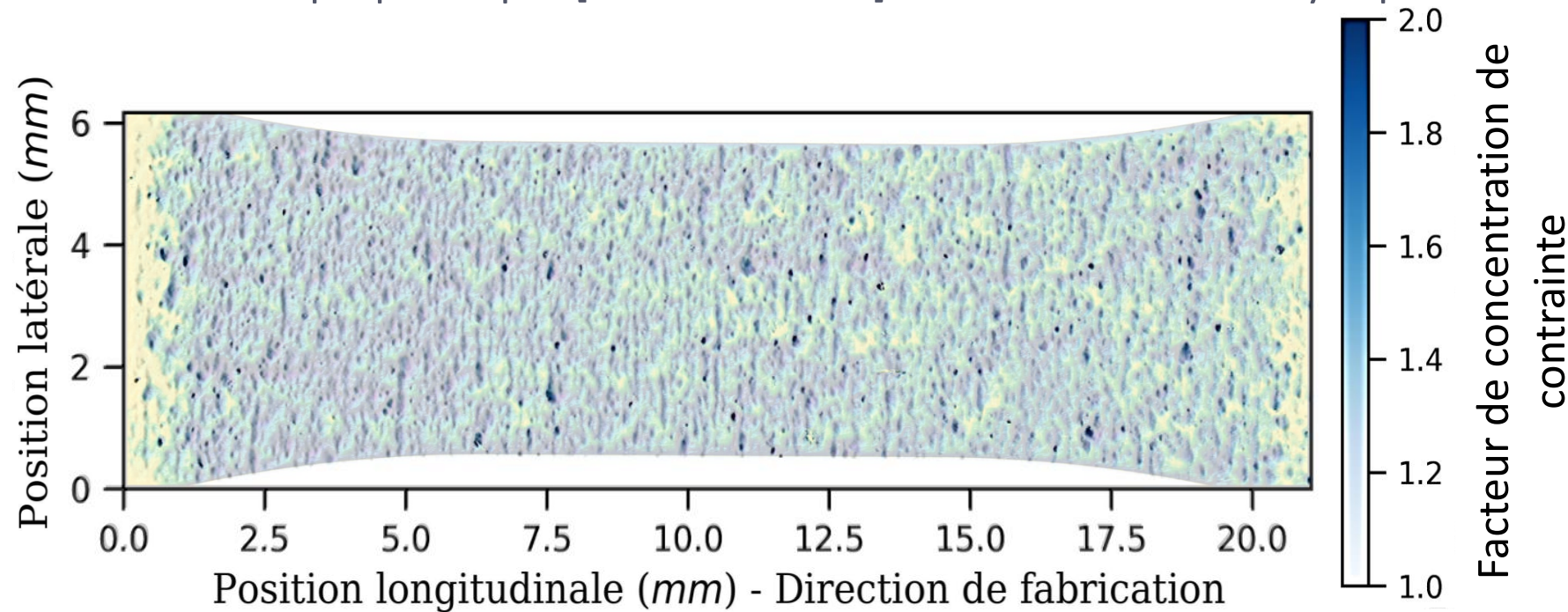
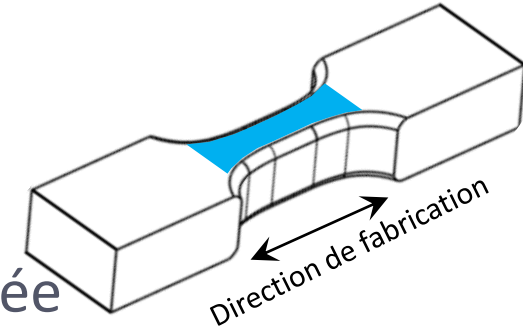
Impact de l'état de surface des pièces L-PBF sur la tenue en fatigue





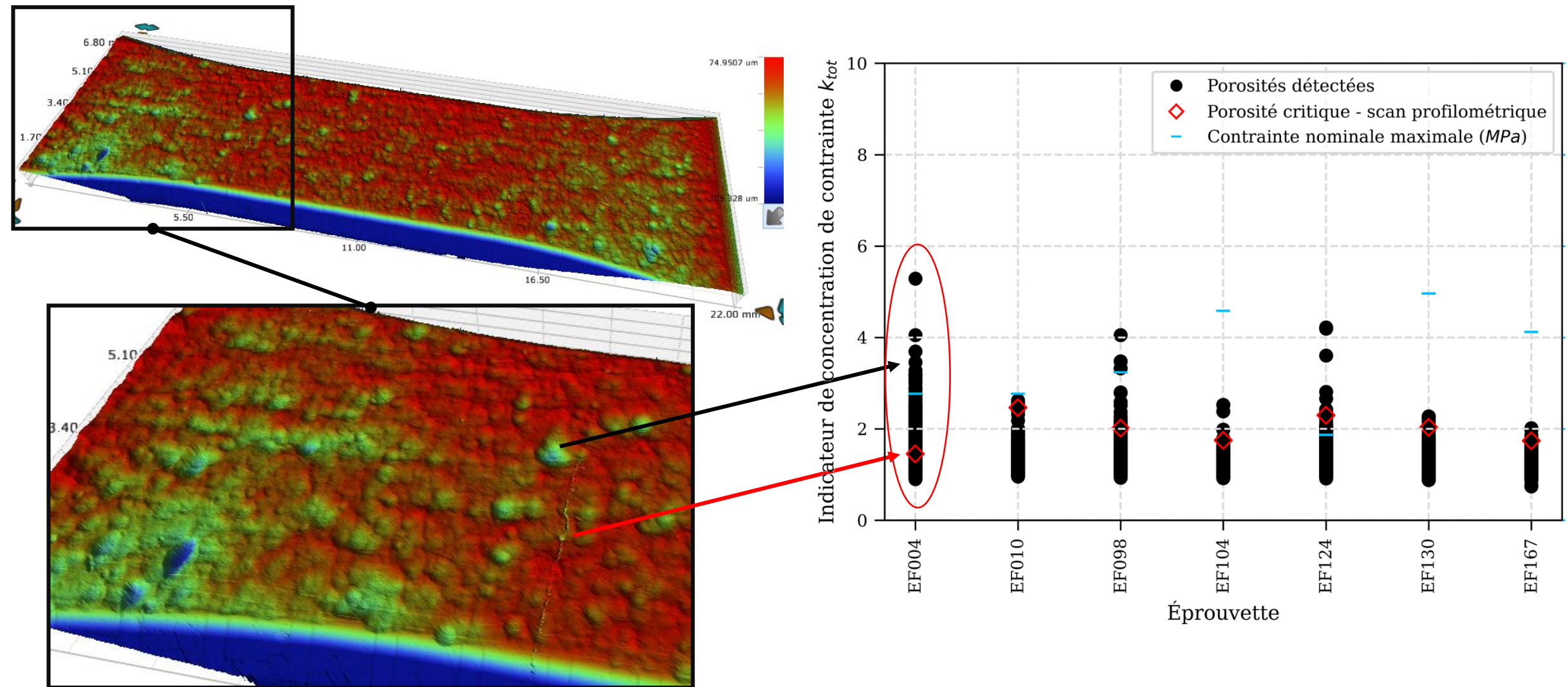
Impact de l'état de surface des pièces L-PBF sur la tenue en fatigue

- La zone utile de toutes les éprouvettes est scannée par interféromètre
 - Avant et après essai (localisation et mesure de la singularité critique)
- Taille des singularité mesurée et concentration de contrainte locale calculée
 - méthode proposée par [Kim et al. 2020] et basée sur une analyse par FFT

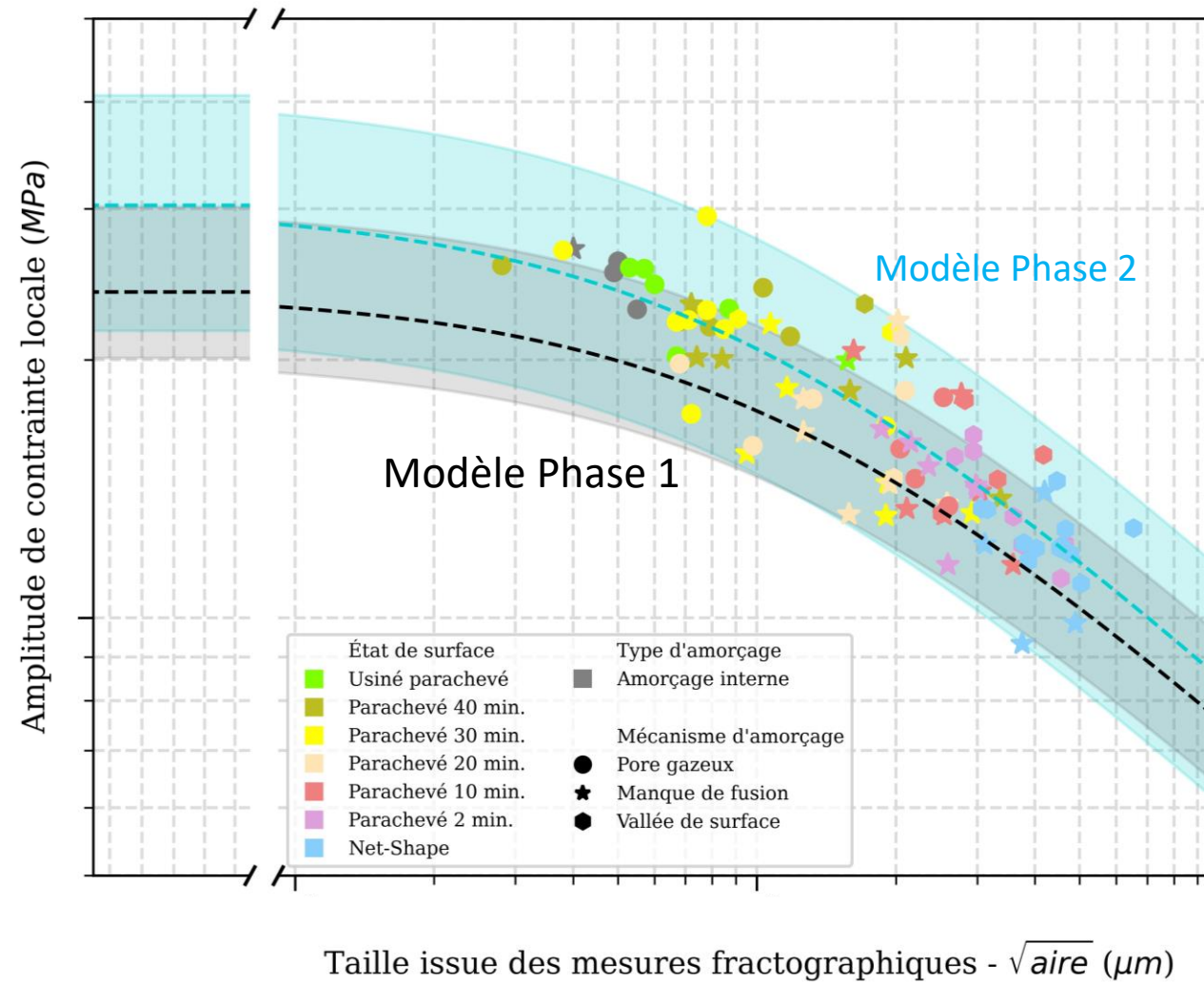


Essais en flexion plane $R=0.1$
 Machines à résonance – ~ 80 Hz
 Essais par paliers croissants
 Pas de 25 MPa – Censure à 10^7 cycles

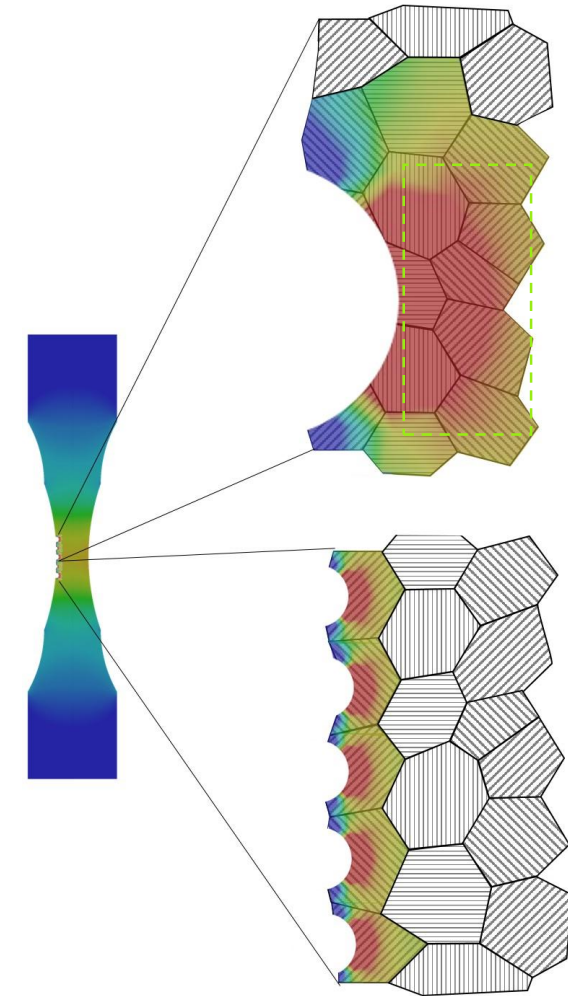
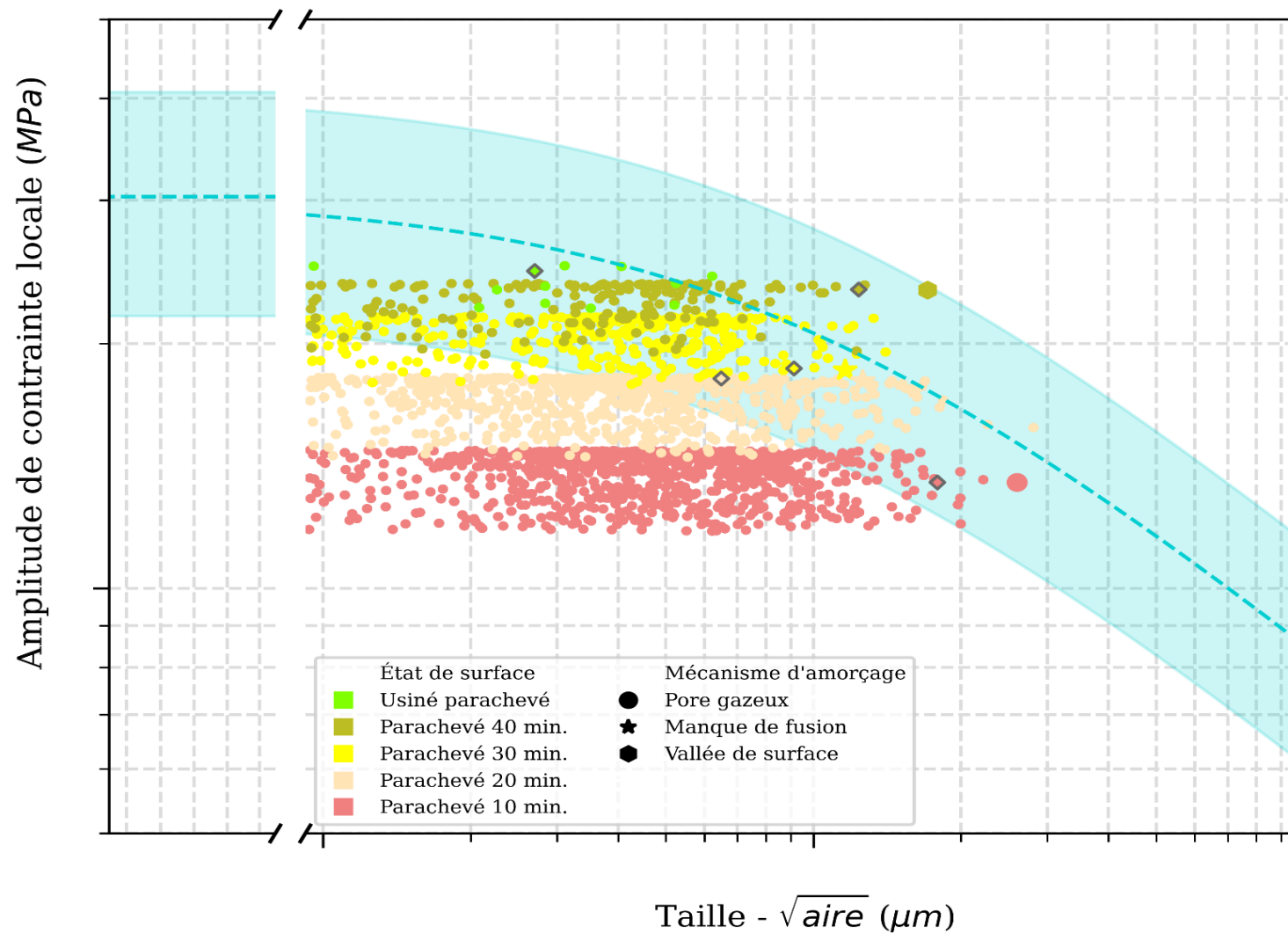
Évaluation de la concentration de contrainte induite par chacune des singularité



Évaluation de la concentration de contrainte induite par chacune des singularités



Évaluation de la concentration de contrainte induite par chacune des singularités



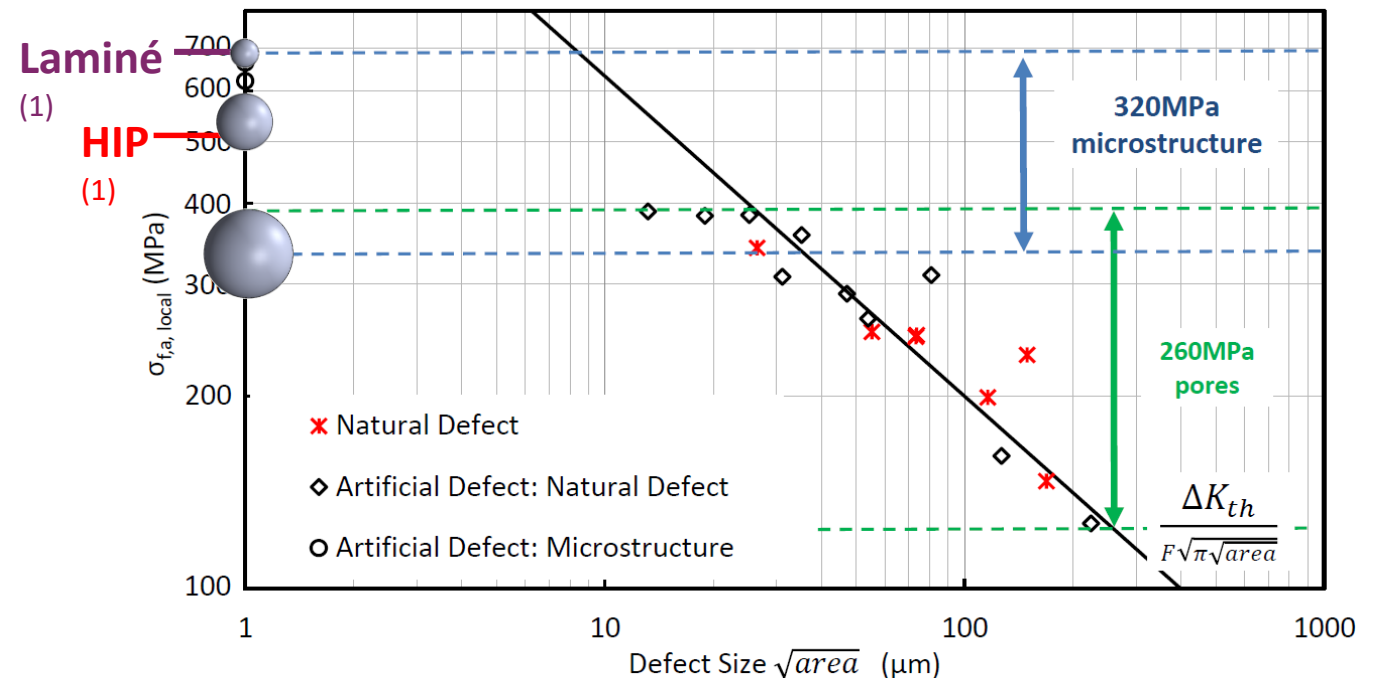
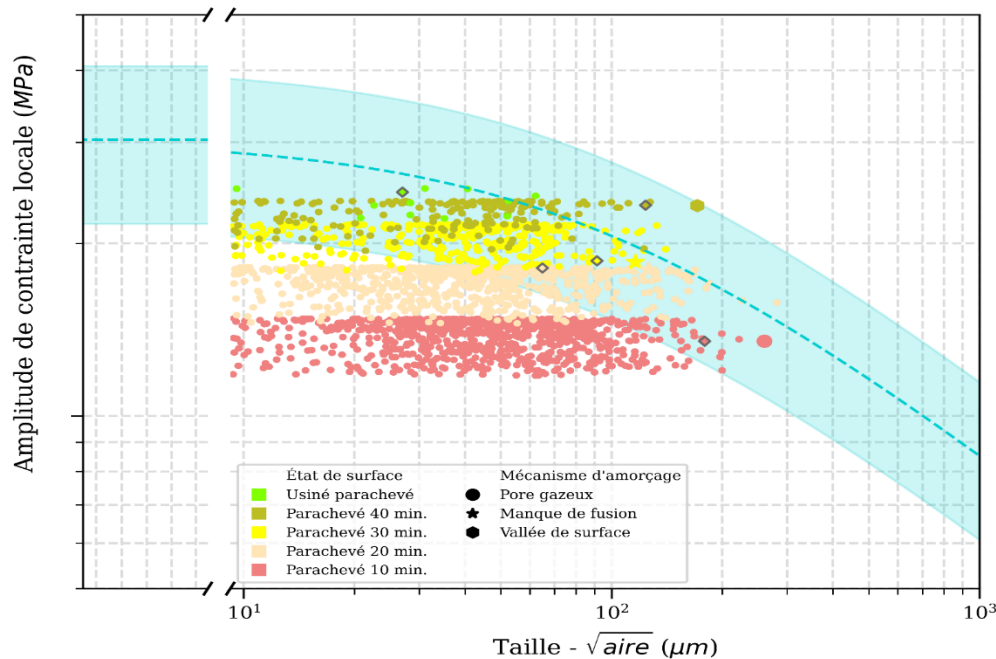
Conclusion

La tenue en fatigue du Ti6Al4V L-PBF est très dispersée

- taille des singularités (de surface ou sous couche)

Nécessité de prendre en compte la variabilité de la microstructure en dimensionnement

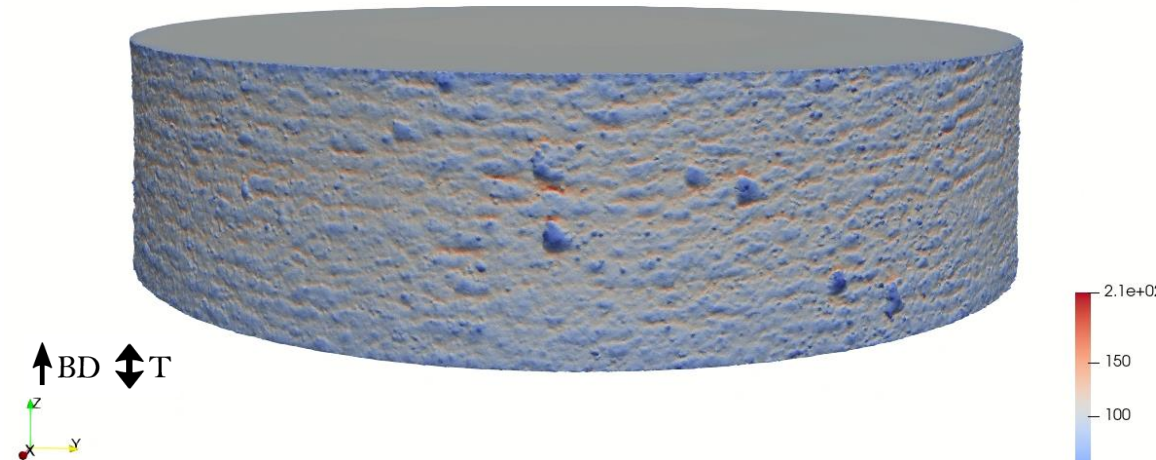
La microstructure du Ti6Al4V doit encore être optimisée pour atteindre la tenue des matériaux laminés



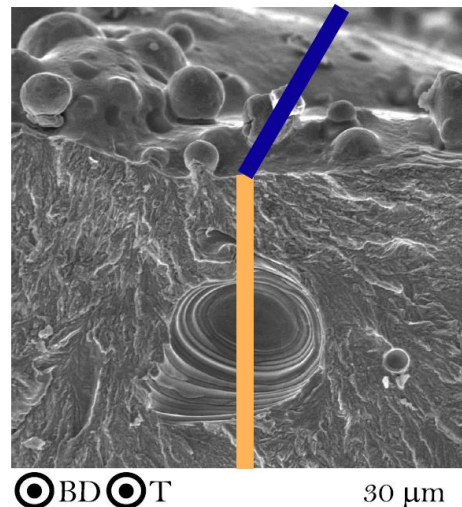
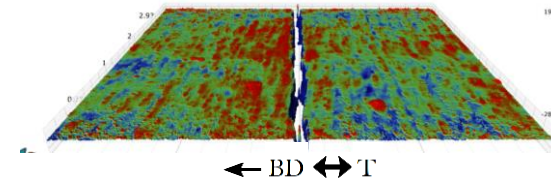
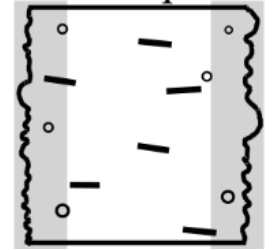
Perspectives

Ongoing development by Dr Camille Burton on the HPC platform Cassiopee (ENSAM, France)

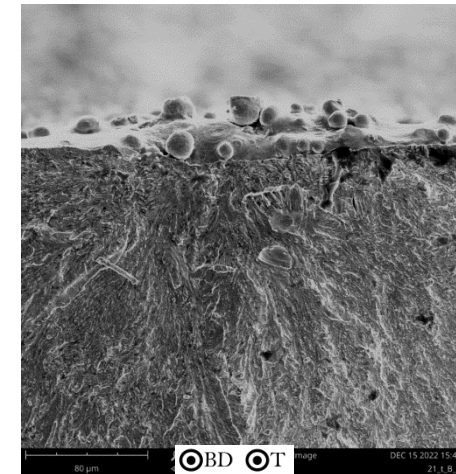
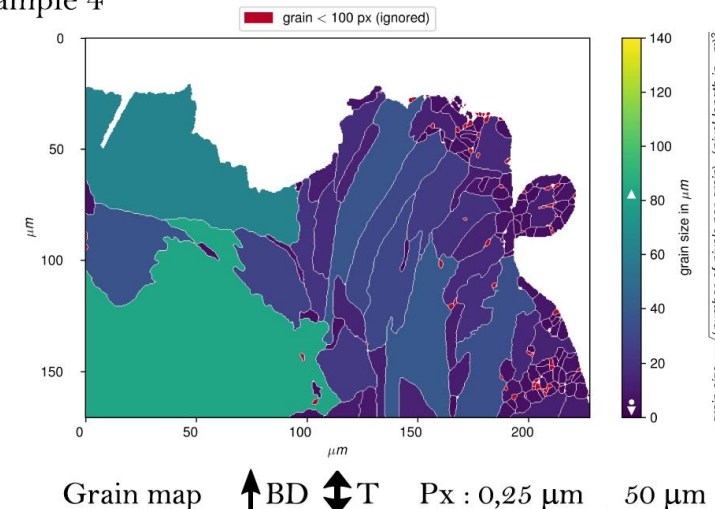
- Simulation à partir de CT Scans
- Caractérisation de la microstructure autour du défaut critique
- Prise en compte des contraintes résiduelles
- Défis avec les nouvelles machines:
 - plus de 10 lasers
 - environnement contrôlé
 - monitoring



Net-shape 1C



Sample 4



Ti6Al4V-DLD

20µm

200µm

Merci pour votre attention

Références bibliographiques

- [Zhang, 2017] Zhang et al., Materials Science and Engineering A, 703, 2017, P 251-61
- [Kasperovich, 2016] Kasperovich et al., Materials and Design, 105, 2016, P 160-170
- [Tang, 2018] Tang et al., International Journal of Heat and Mass Transfer, 126, 2018, 957-68
- [Kallmeyer, 2002] Kallmeyer et al., P. J Eng Mater – T ASME 2002;124:229–37
- [Murakami, 2002] Murakami, Y. (2002). Metal Fatigue : Effects of Small Defects and Non metallic Inclusions. London : Elsevier
- [Andreau, 2019] Andreau et al., Materials Science and Engineering A, 757, 146–159, 2019
- [Andreau, 2021] Andreau et al., International Journal of Fatigue, 143, 1059304, 2021
- [Dépinoy, 2021] Dépinoy et al, Scripta Materialia Volume 194, 15 March 2021, 113663
- [Kasperovich, 2016] Kasperovich et al. Materials & Design, 105 :160–170, sep 2016.
- [Lanning, 2005] Lanning et al. 2005, International Journal of Fatigue 27 (1) (2005) 45–57
- [Vayssette, 2019] Vayssette et al, International Journal of Fatigue, 123, 1180-195, 2019
- [Pessard, 2021] Pessard et al., International Journal of Fatigue, 149, August 2021, 106206
- [Lanning, 2005] Lanning et al, International Journal of Fatigue 27 (1) (2005) 45–57
- [Kim, 2020] Kim et al., Engineering Failure Analysis, Volume 115, September 2020, 104612



ALMA

Alliages métalliques par/pour
la fabrication additive
CNRS GDR 2089

[Peyre 2022]

