Augmentation de la durée de vie de pièces en alliage de titane issue de la fabrication additive

Improved durability of laser powder bed fusion (L-PBF) parts made of titanium alloy

Cyril RAMSEIER & Randoald MULLER

HEIG-VD/HES-SO

Pierre-Antoine GAY

HE-Arc/HES-SO

Colmar, 30 novembre 2022, conférence A3TS

Presentation of the schools

Carte d'identité de la HEIG-VD

9 FILIÈRES D'ÉTUDES BACHELOR HES	**12'111** DIPLÔMES DÉLIVRÉS DEPUIS 1956	**1'608** ETUDIANT-E-S IMMATRICULÉ-E-S EN BACHELOR HES
394 ETUDIANT-E-S EN FORMATION CONTINUE	**40** ETUDIANT-E-S EN MOBILITÉ IN	**19** ETUDIANT-E-S EN MOBILITÉ OUT
597 COLLABORATRICES ET COLLABORATEURS	**24** START-UP ISSUES DES INSTITUTS DE LA HEIG-VD	**287** PROJETS DE RA&D EN COURS EN 2021

Statistiques au 31.12.2021

haute école neuchâtel berne jura arc ingénierie www.he-arc.ch

La HE-ARC travaille avec différentes industries

Ingénierie des surfaces pour :

- Estétisme
- Protection de la corrosion
- Résistance à l'usure
- Lubrification
- Conductivité électrique
- Biocompatibilité, bioactivité

Project summary

Surface defects (roughness and cracks) and internal defects (porosity, lack of fusion) are weak points of Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) parts produced nowadays.

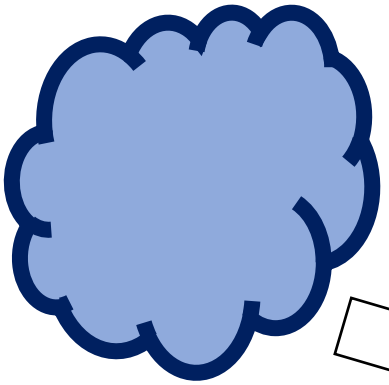
Started in January 2022, our project is focused on the fatigue behavior of Ti6Al4V parts manufactured with L-PBF technology:

- Work on real industrial parts (medical screws and nautical system);
- Impact of size and geometry on parts quality;
- Improvement of :
    - microstructure using heat treatments (e.g., HIP)
    - surface finish by electropolishing

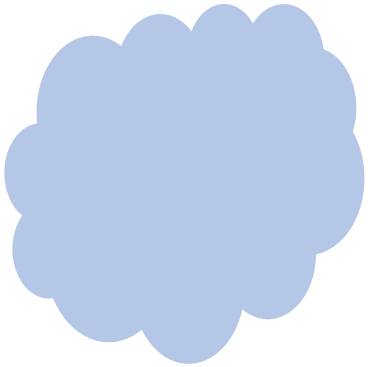
for higher global fatigue properties (longer durability).

Our goal is to provide practical answers to the industrial actors on the optimal manufacturing and finishing processes to obtain better L-PBF components according to their specific needs.

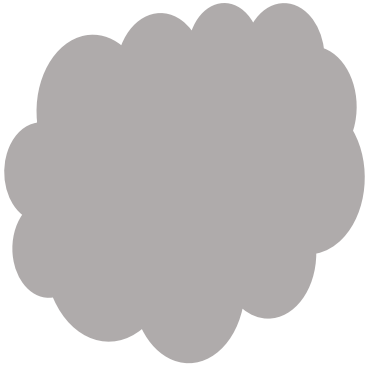
Project schematic



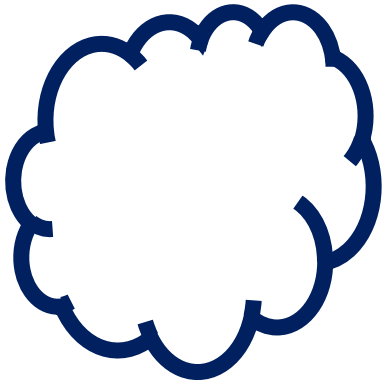
Product made by **L-PBF (Laser Powder Bed Fusion)**

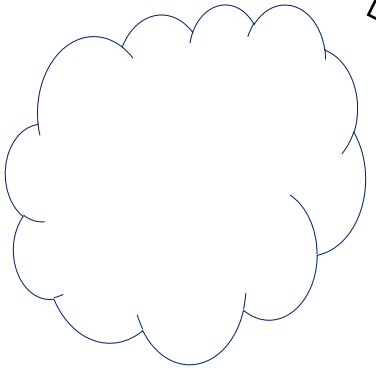


Volume and surface analysis



Microstructure and surface modification





Impact on the global dynamic behavior ?

TRUMPF machine & Ti6Al4V datasheet

Chemical composition of the built parts [wt%]

Al	V	Fe	O	C	N	H
5.5 - 6.50	3.5 - 4.5	≤ 0.25	≤ 0.13	≤ 0.08	≤ 0.05	≤ 0.012

Ti
Balance

HE VD | AddiPole

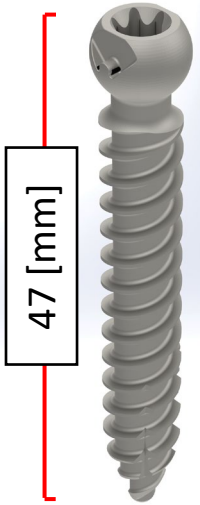
https://heig-vd.ch/rad/groupes-transversaux/addipole

Parameter:
TruPrint 1000 (Spot: 30 µm) Surface

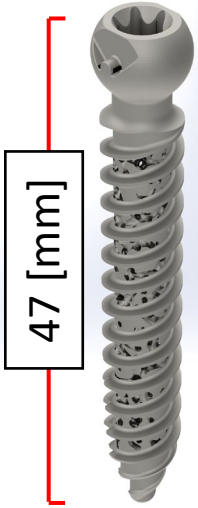
Sample state[3]	Orientation[4]	Tensile strength R_m[5] [MPa]	Yield strength $R_{p0.2}$[5] [MPa]	Elongation at break A[5] [%]	Young's modulus E[5] [GPa]	Hardness[6] [HV]
MR, without HT	0°	1180 ± 60	1000 ± 60	8 ± 2	120 ± 10	390 ± 20
	90°	1360 ± 40	1220 ± 40	6 ± 2	125 ± 5	390 ± 20
MR, with HT[7]	0°	960 ± 10	800 ± 15	14 ± 2	135 ± 5	345 ± 25
	90°	990 ± 20	850 ± 25	8 ± 2	130 ± 5	345 ± 25

Industrial pieces produced by L-PBF

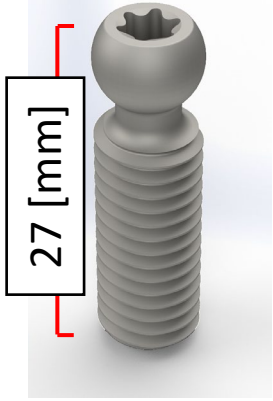
Medical screw

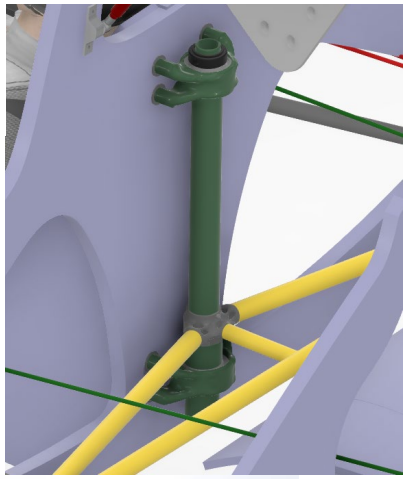


Optimized screw

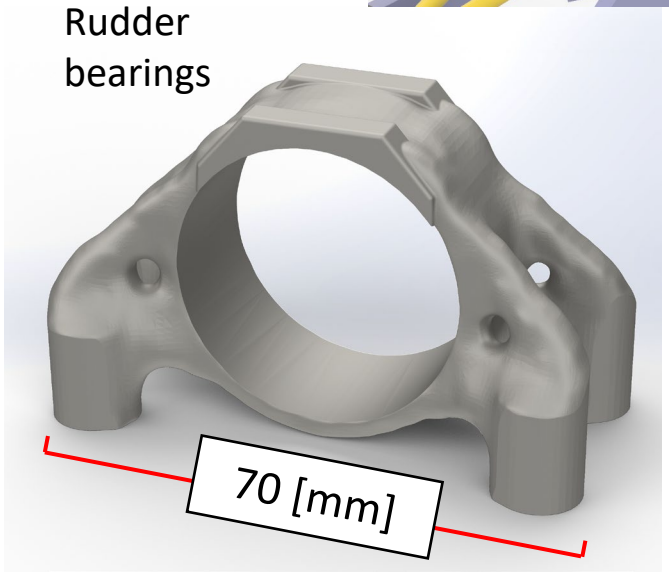


M8 screw



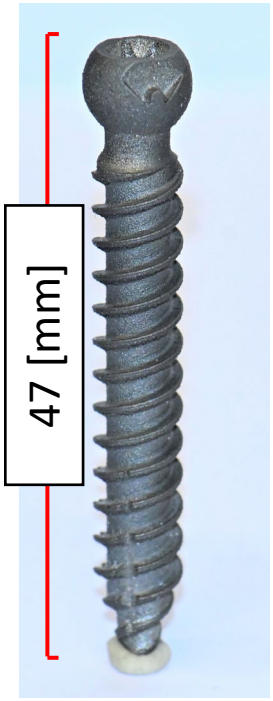


Rudder bearings

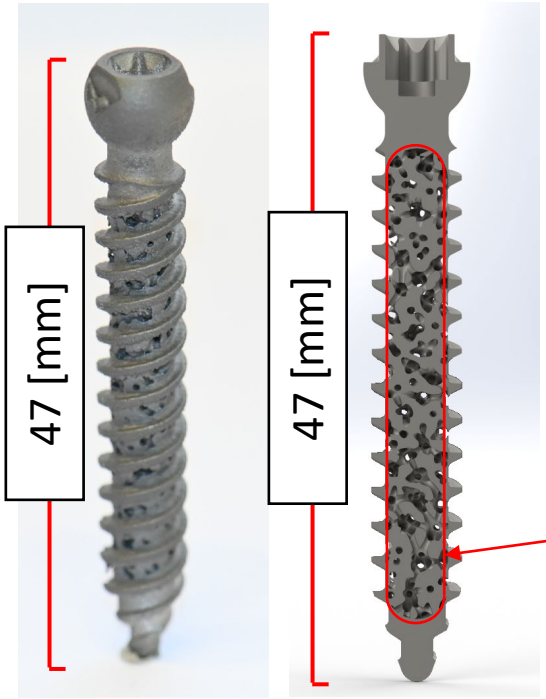


Screw lightening by managed porosity

Medical screw



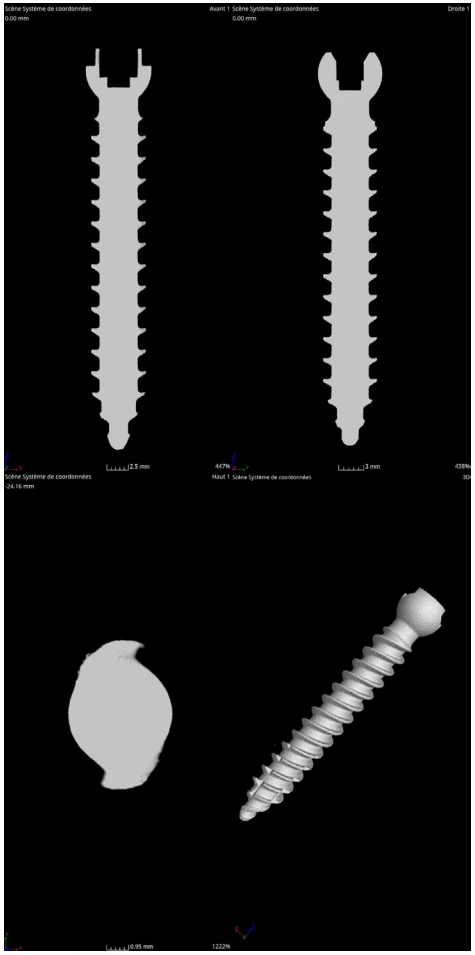
Optimized screw



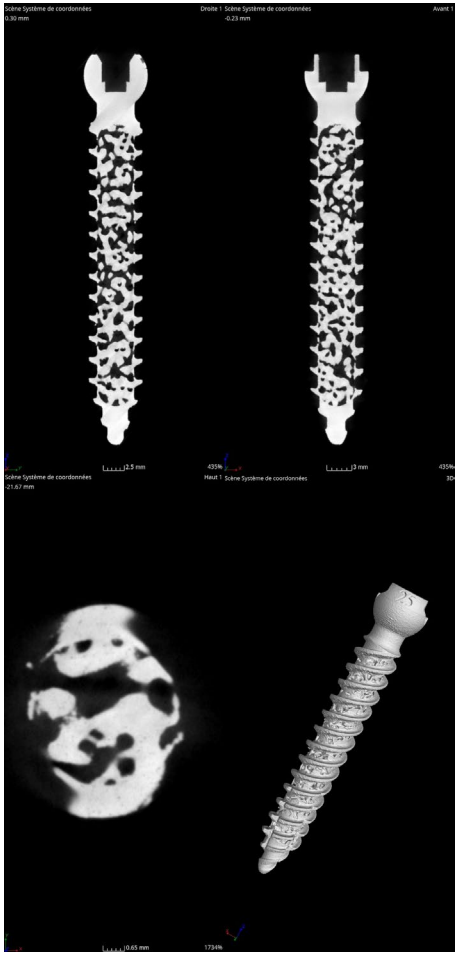
Medical screw	Optimized screw
4,14 [g]	**3,14 [g]**
Weight reduction	**24 [%]**
Porosity (CAO) *Internal zone*	**49 [%]**

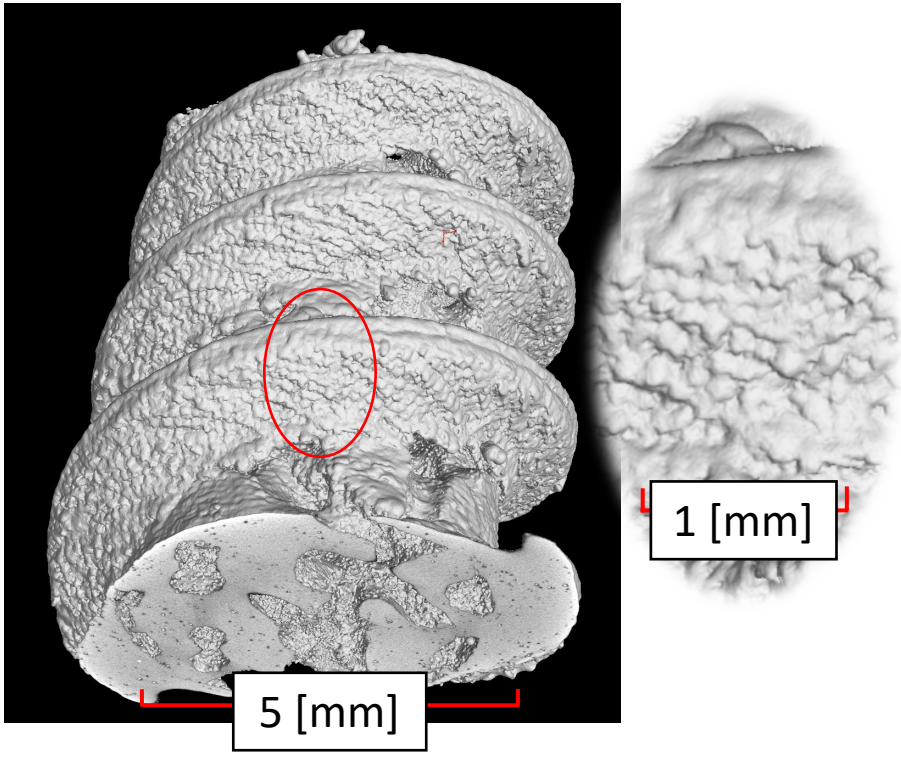
Tomography on medical and optimized screws

Medical screw

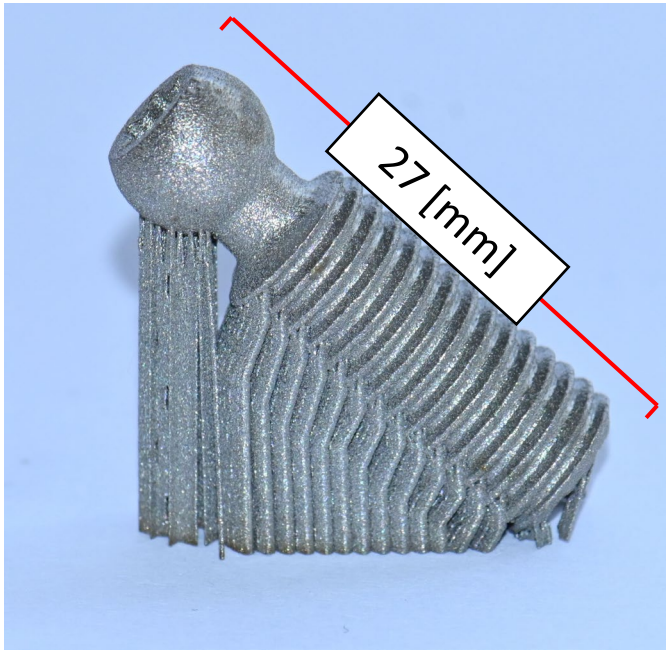


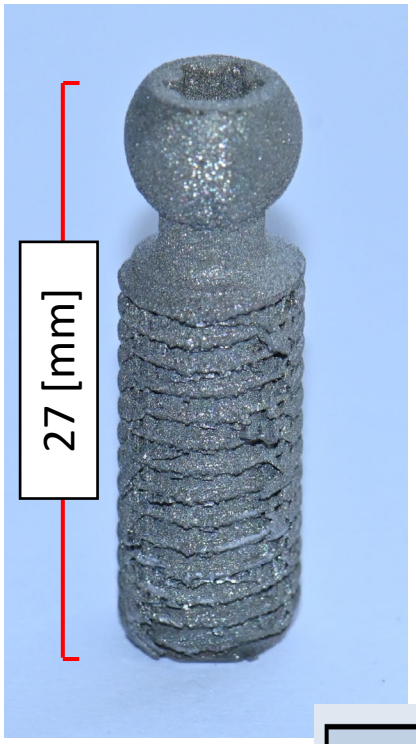
Optimized screw

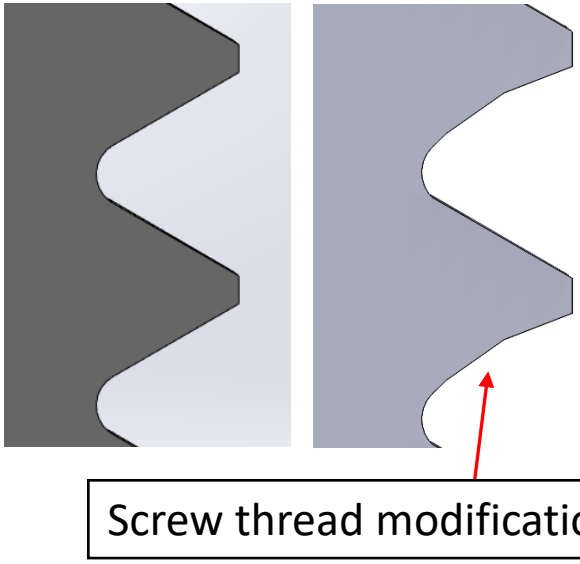




Screw 45° manufacturing issues and 90° design modification







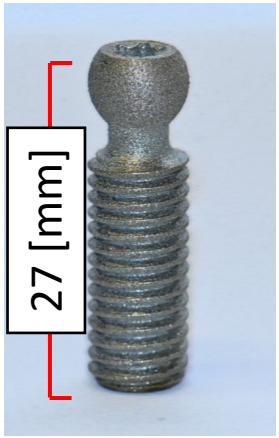
	L-PBF	
	45°	90°
R_m [MPa]	**1250 ± 80**	**1150 ± 120**
HV20	**440 ± 10**	**420 ± 10**

Sample state[3]	Orientation[4]	Tensile strength R_m[5] [MPa]	Hardness[6] [HV]
MR, without HT	0°	1180 ± 60	390 ± 20
	90°	1360 ± 40	390 ± 20

from Trumpf datasheet…

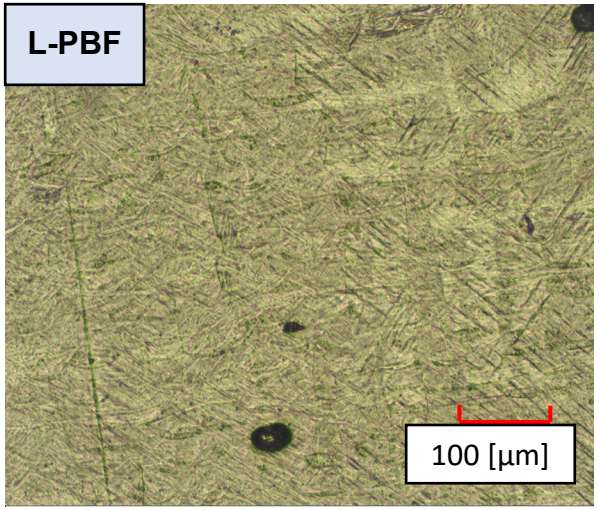
Residual porosity before and after HIP

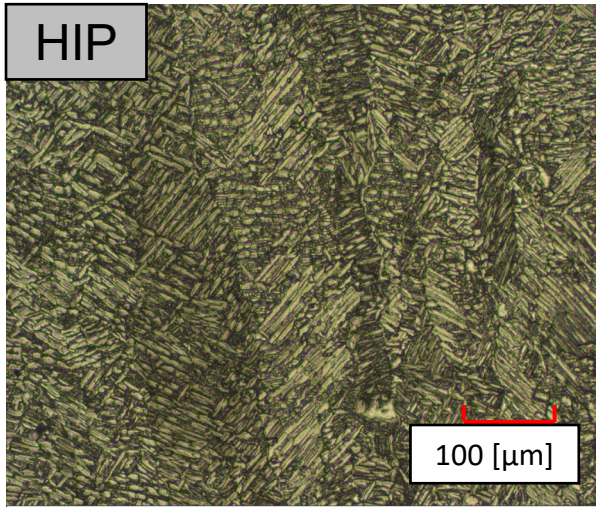
Our parameters	HIP
Temperature [°C]	**920**
Time [min]	**120**
Pressure [bar]	**1000**

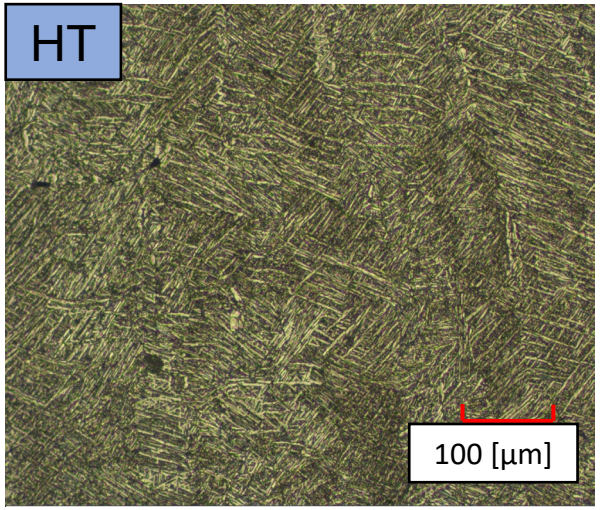


	L-PBF		HIP	
Weight [g]	**3,97**	**±0,02**	**3,96**	**±0,02**
Density [g/cm³]	**4,35**	**±0,04**	**4,41**	**±0,01**
Porosity [%]	**1,65**	**±0,94**	**0,23**	**±0,23**

Microstructure before and after treatments







Tensile strength R_m [MPa]		
L-PBF 90°	HIP	HT
1150 ± 120	**1100 ± 20**	**960 ± 40**

Vickers hardness HV20 [-]		
L-PBF 90°	HIP	HT
420 ± 10	**340 ± 10**	**350 ± 10**

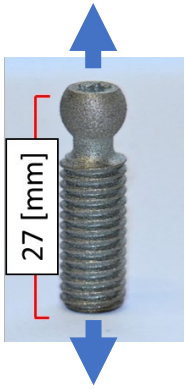
Our parameters	HIP	HT
Temperature [°C]	**920**	**920**
Time [min]	**120**	**120**
Pressure [bar]	**1000**	**~ 0**

from Trumpf datasheet…

Sample state[3]	Orientation[4]	Tensile strength R_m[5] [MPa]	Hardness[6] [HV]
MR, without HT	0°	1180 ± 60	390 ± 20
	90°	1360 ± 40	390 ± 20
MR, with HT[7]	0°	960 ± 10	345 ± 25
	90°	990 ± 20	345 ± 25

Fatigue machine and tests

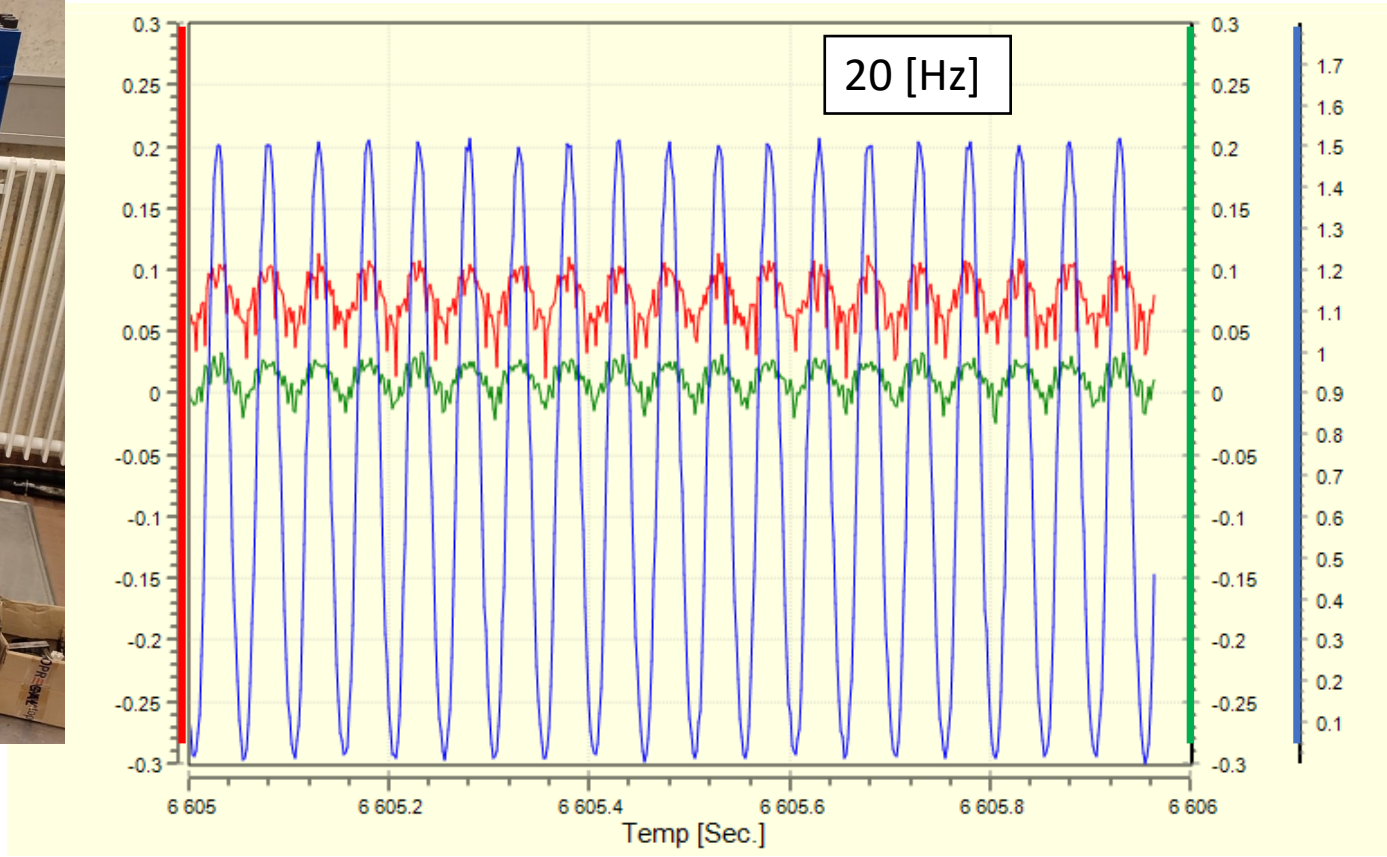
Schenk 40kN
hydraulic actuation



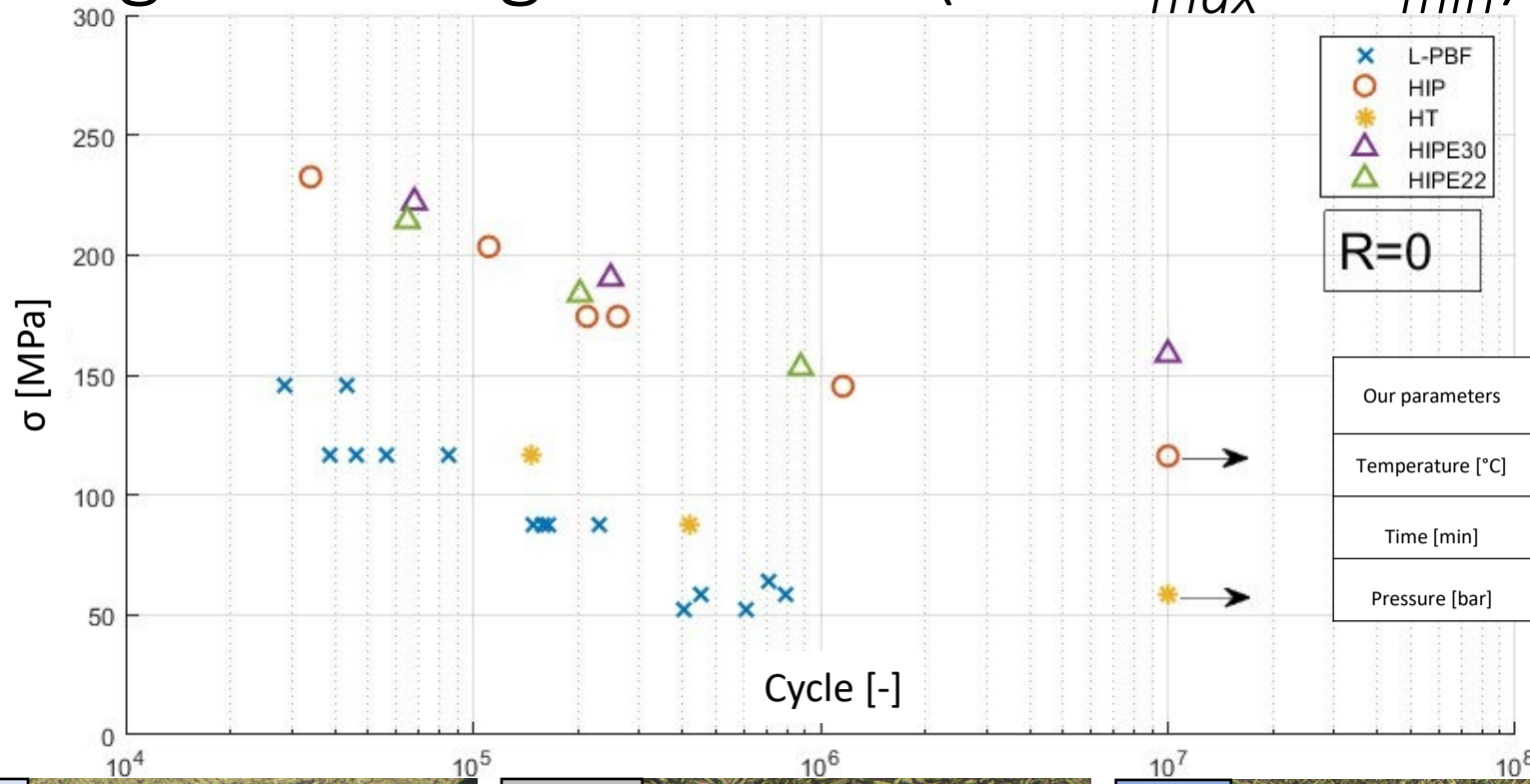
Force [kN]

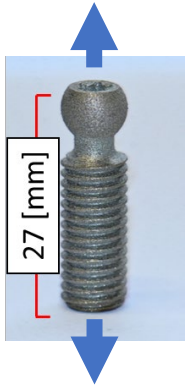
Deformation [mm] (extensometer)

Displacement [mm] (piston)

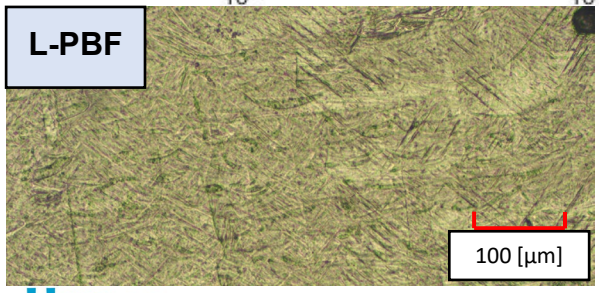


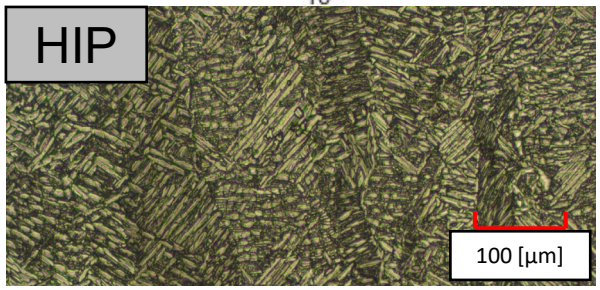
Fatigue testing – Results ($\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$)

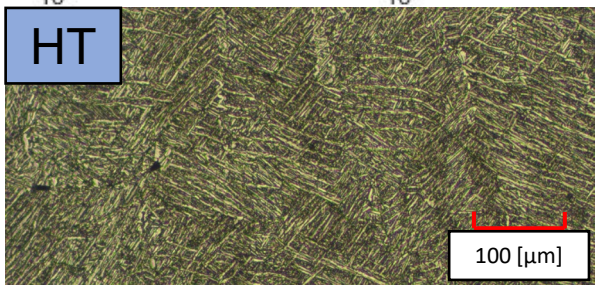




Our parameters	HIP	HT
Temperature [°C]	**920**	**920**
Time [min]	**120**	**120**
Pressure [bar]	**1000**	**~ 0**







Conclusions on volume behaviour

1. L-PBF microstructure is clearly not recommended for fatigue behavior.
2. HIP is the best volume post-treatment, but not easy to perform.
3. Electropolishing seems to increase fatigue strength (endurance limit @ 10^7 cycles).
4. 45° building gives slightly better mechanical results, but poor design geometry.
5. Production of managed porous network is possible with L-PBF technology ; it allows to reduce the weight, the E modulus and leads to continuous porosity.

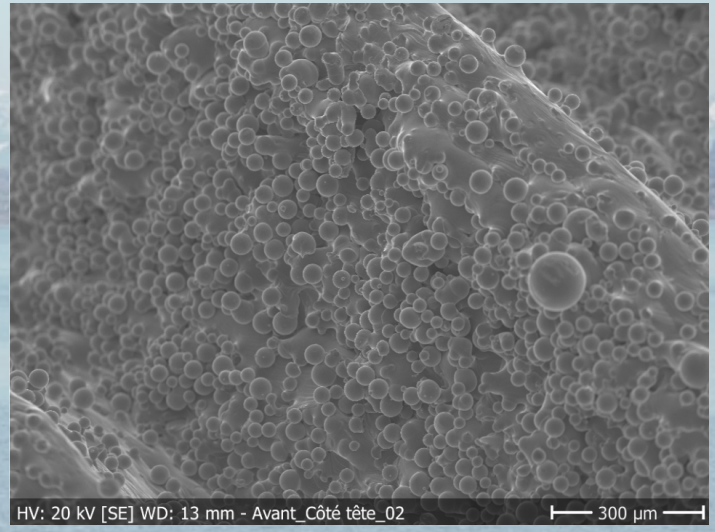
Perspectives and continuation of the project

1. Confirmation of electropolishing benefit on fatigue behavior with additional trials.
2. Improvement of L-PBF parameters to decrease residual porosity.
3. Application of Laser Shock Peening (LSP) to see if fatigue behavior is improved.
4. Development of the optimal process for rudder bearings application (production, treatments and mechanical testing).
5. Theoretical tool predicting endurance limit in function of geometry, roughness, etc.

Contexte de l'étude

Problématique : état de surface des pièces issues de AM

- Risque de **décrochage de particules**
- **Rugosité importante** de l'ordre de 20 à 30 microns



Objectifs : Améliorer l'état de surface par électropolissage
Supprimer un maximum de **particules**
Réduire la rugosité

L'électropolissage, c'est quoi?

- Dissolution anodique contrôlée du métal de manière à enlever une fine couche en surface en maitrisant une compétition entre oxydation de la surface et du solvant …
- En maitrisant cette compétition, on agit soit :

→Réduction de rugosité

→Augmentation de la brillance

Conditions opératoires

- Nature de l'électrolyte utilisé → contrôle en tension/courant
- Température de travail.
- Agitation de la solution.

Nature de l'électrolyte utilisé

Un électrolyte adapté à l'électropolissage doit contenir un ou des composés permettant :

- d'oxyder la surface métallique et notamment le film passif.
- de dépassiver et d'empêcher la formation et le développement (stabilité et épaisseur) d'un film d'oxyde en surface.
- Eventuellement d'un agent viscosant permettant d'aider à la création de la couche visqueuse.

Nature du bain d'électropolissage

- L'étude porte principalement sur la ***non utilisation*** des mélanges oxydants à base de différents acides ou sels métalliques traditionnels …

Généralités

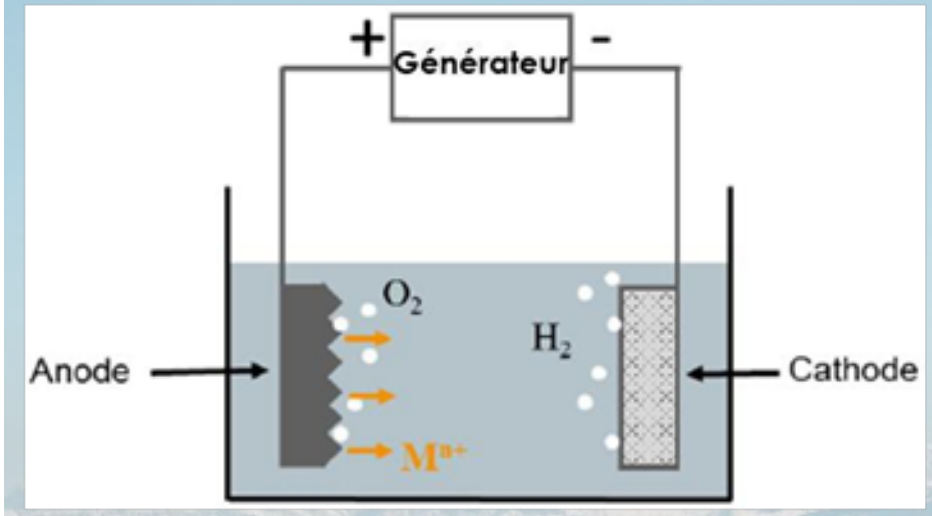


Figure 1 : Principe de fonctionnement de l'électropolissage

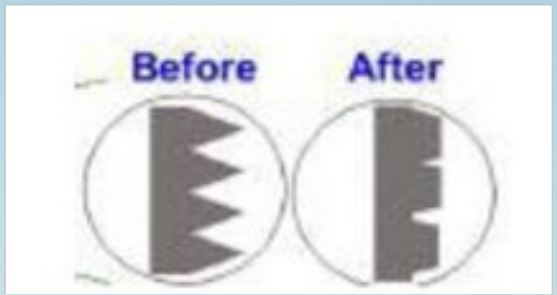
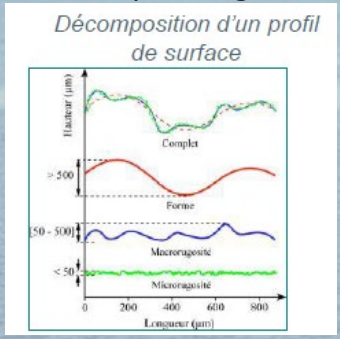
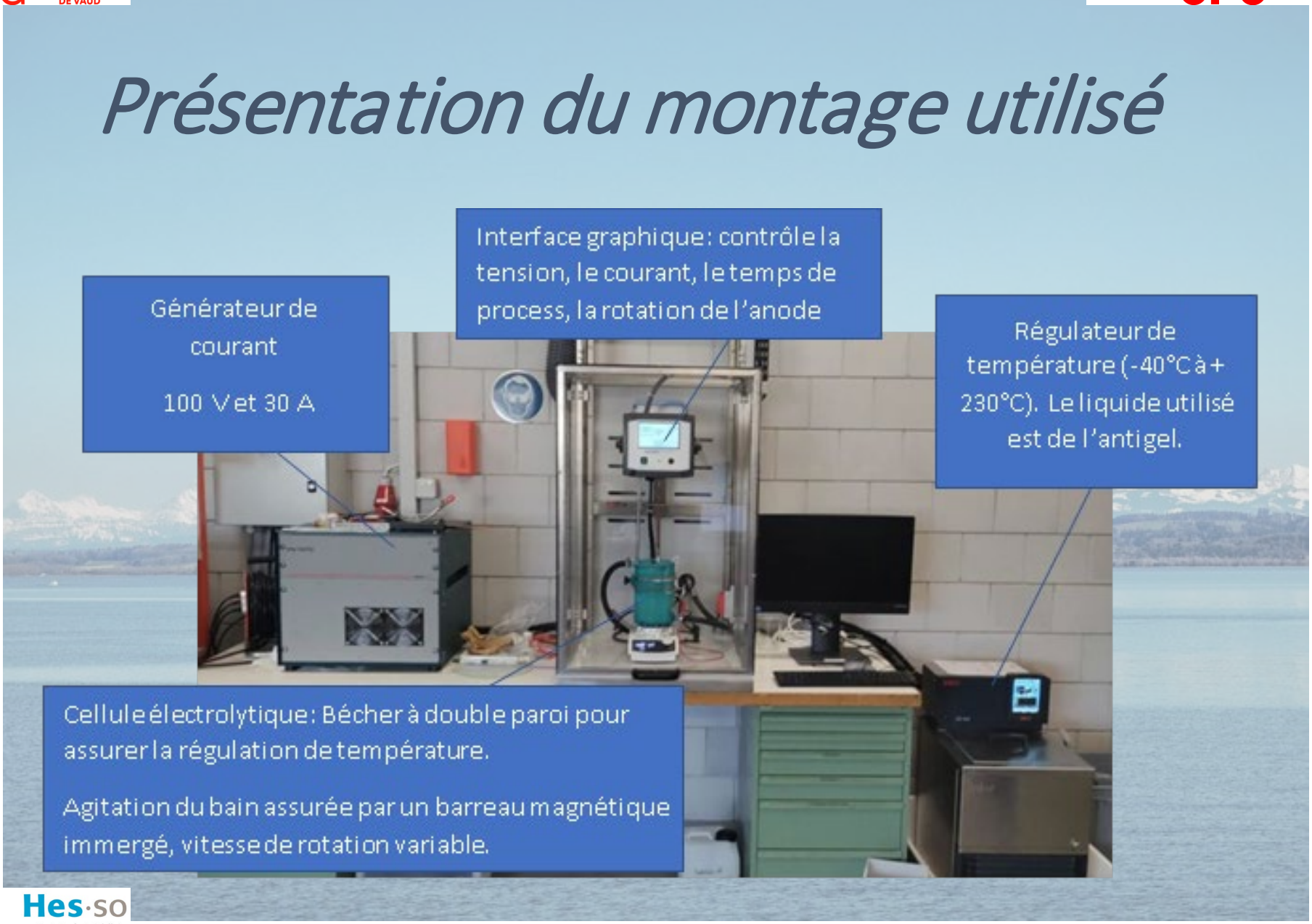


Figure 2 : Etat de surface avant/après EP



- Nivelage : Réduction des irrégularités de surface > 1µm
- Brillantage : Action sur les rugosités ≤ à 1 µm (Ra < λ light)

Présentation du montage utilisé



Travaux réalisés sur les vis

L'objectif ici est d'évaluer l'impact de la tensions, du temps d'électropolissage et de la température sur l'enlèvement de matière de la pièce ainsi que sur l'état de surface final.

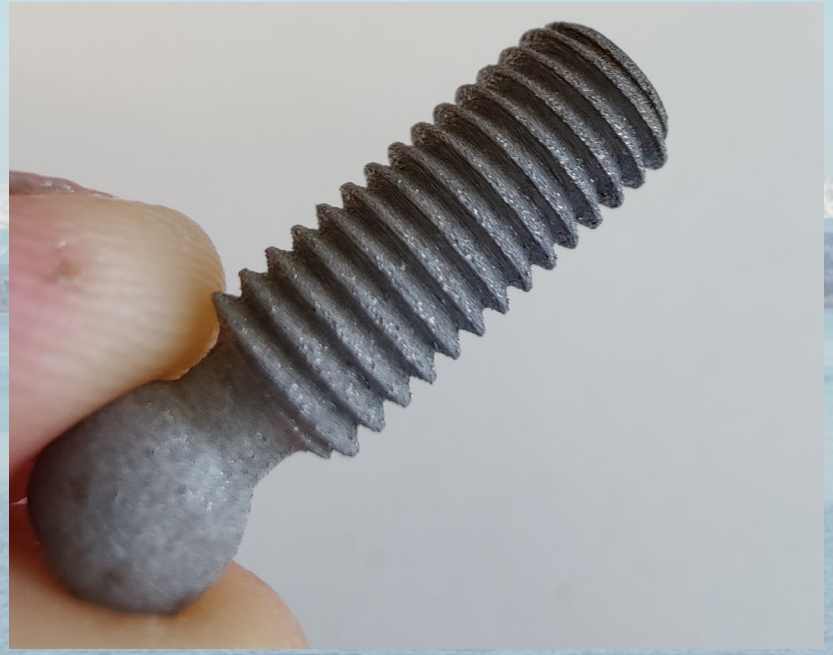
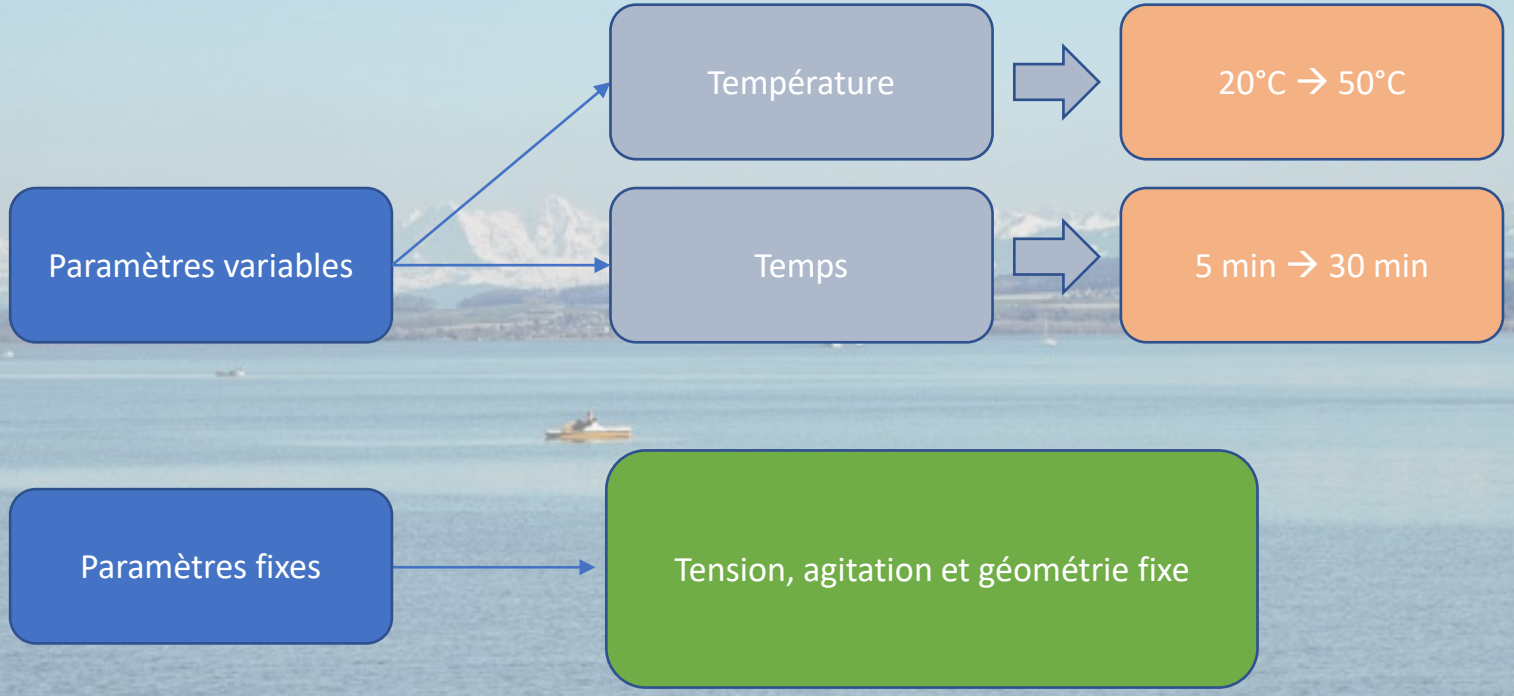


Figure 3 : Vis en titane obtenue par AM "grade 5" brut

ETUDE de EP


Paramètres variables
Température
20°C → 50°C
Temps
5 min → 30 min
Paramètres fixes
Tension, agitation et géométrie fixe

Résultats et discussions

- Les analyses sont réalisées de manière à discuter avec une première approche visuelle puis à quantifier les résultats obtenus en termes de rugosités.
- **Résultat macroscopique** (La pièce brute AM se trouve à gauche de chaque photo)

Figure 4 : Vis en titane AM 20°C, 30V brut, 5, 15 et 30 min EP

Figure 5 : Vis en titane AM 30°C, 30V brut, 5, 15 et 30 min EP

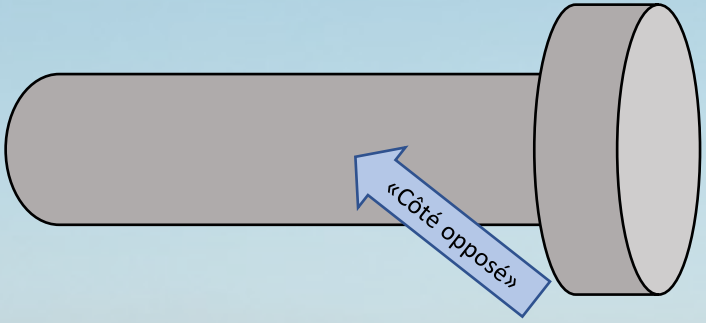
Résultats et discussions

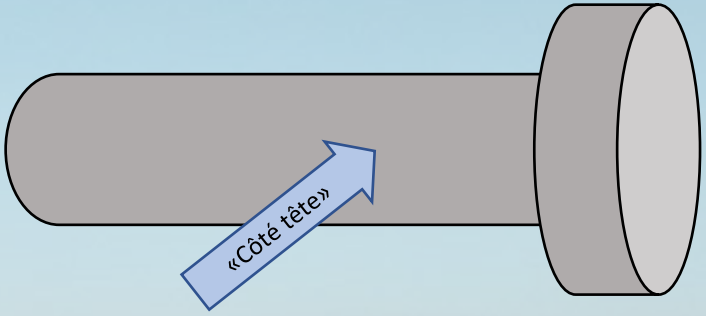
- **Résultat macroscopique** (La pièce brute AM se trouve à gauche de chaque photo.)

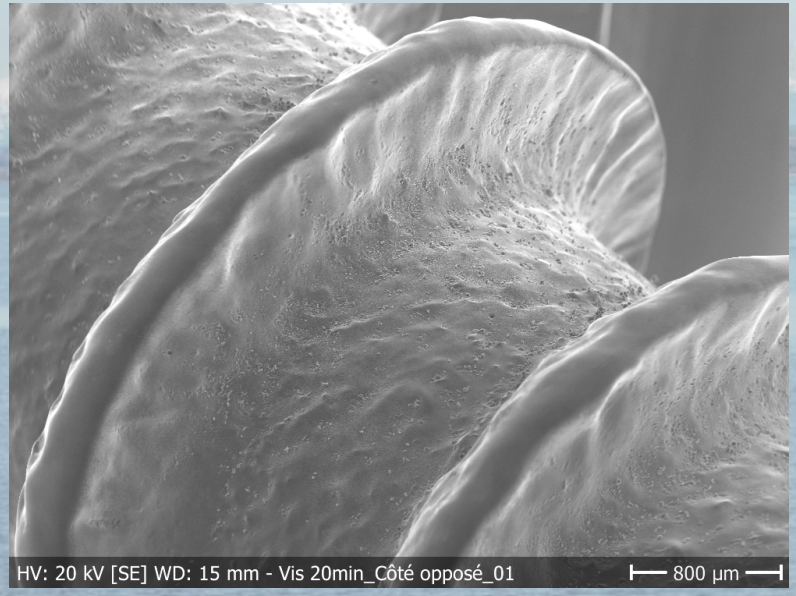
Figure 6 : Vis en titane AM 40°C, 30V brut, 5, 15 et 30 min EP

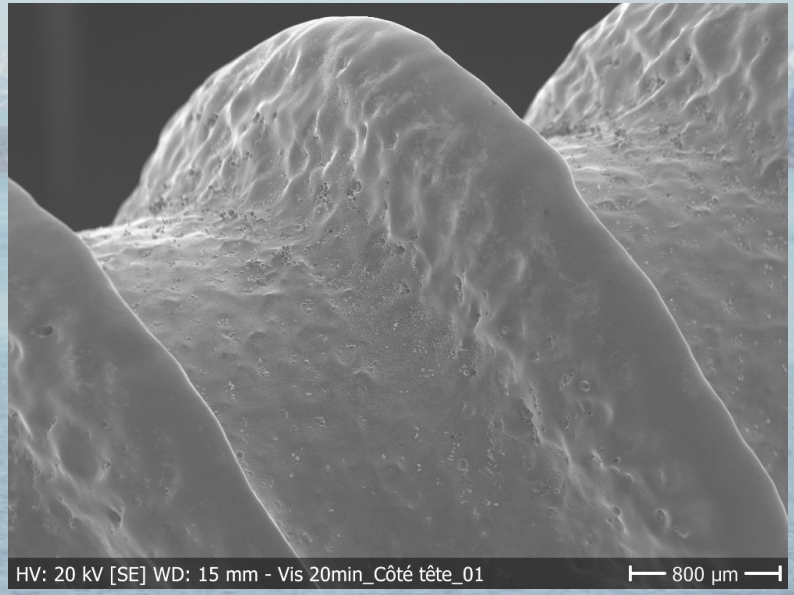
Figure 7 : Vis en titane AM 50°C, 30V brut, 5, 15 et 30 min EP

Angle de vue au MEB









Résultats et discussions

- **Résultat microscopique MEB**

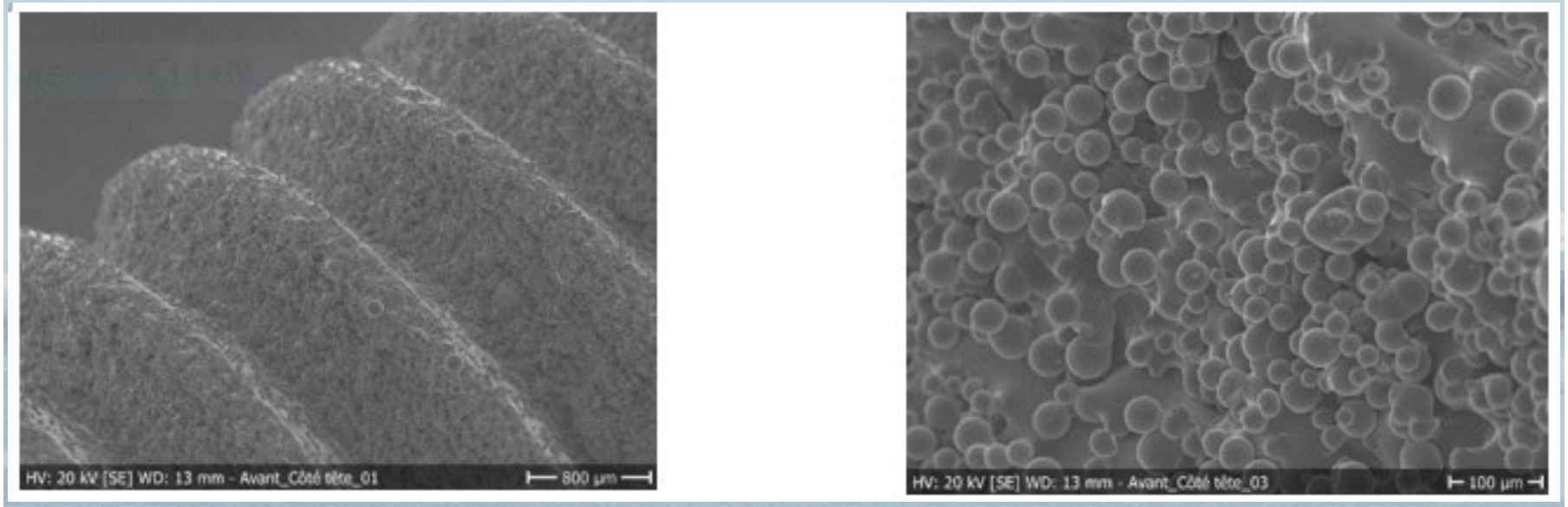


Figure 8 : Vis en titane AM brut image MEB

Résultats et discussions

- **Résultat microscopique MEB**
- **(influence de la température et du temps de traitement)**

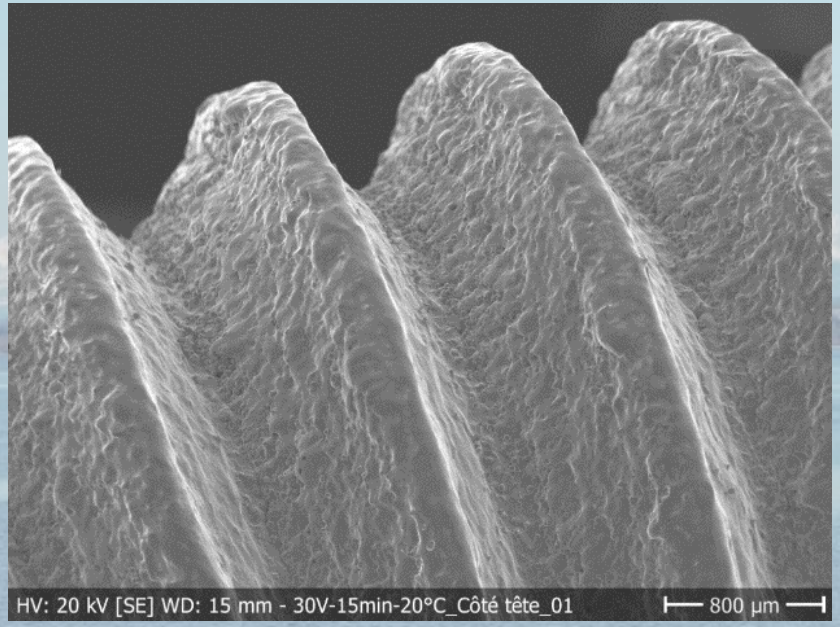


Figure 9 : Vis en titane AM 20°C, 15min 30V

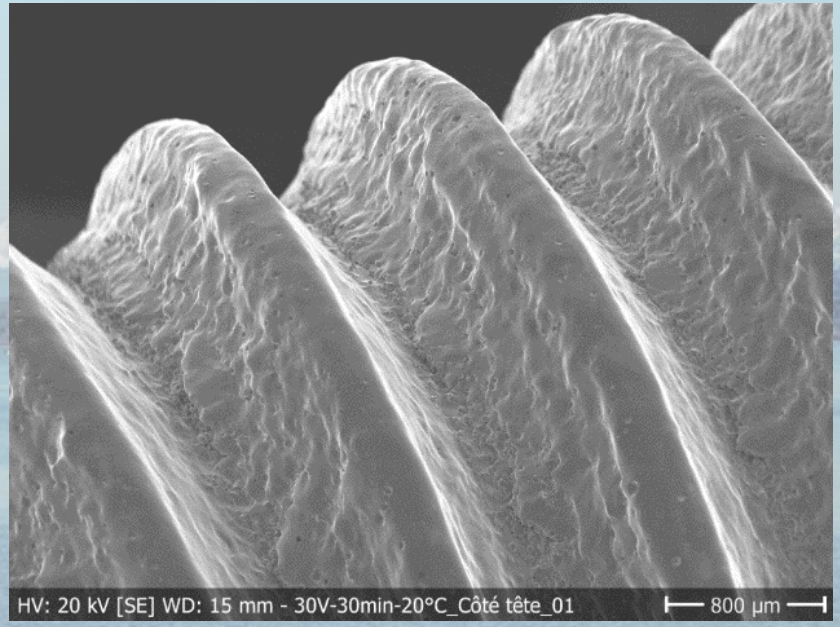


Figure 10 : Vis en titane AM 20°C, 30min 30V

L'augmentation du temps montre que EP est plus homogène sur la pièce et sur le filet

Résultats et discussions

- **Résultat microscopique MEB**

(influence de la température et du temps de traitement)

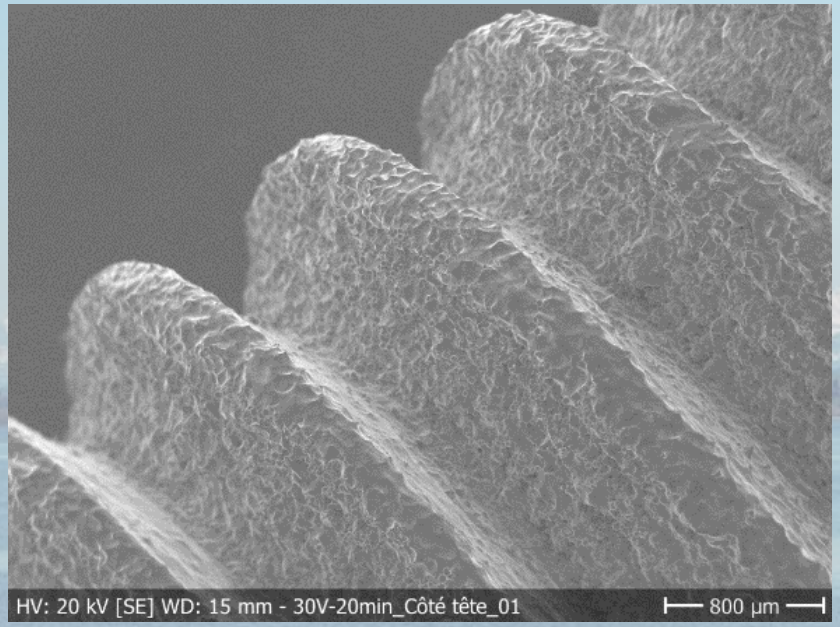


Figure 10 : Vis en titane AM30°C, 20min 30V

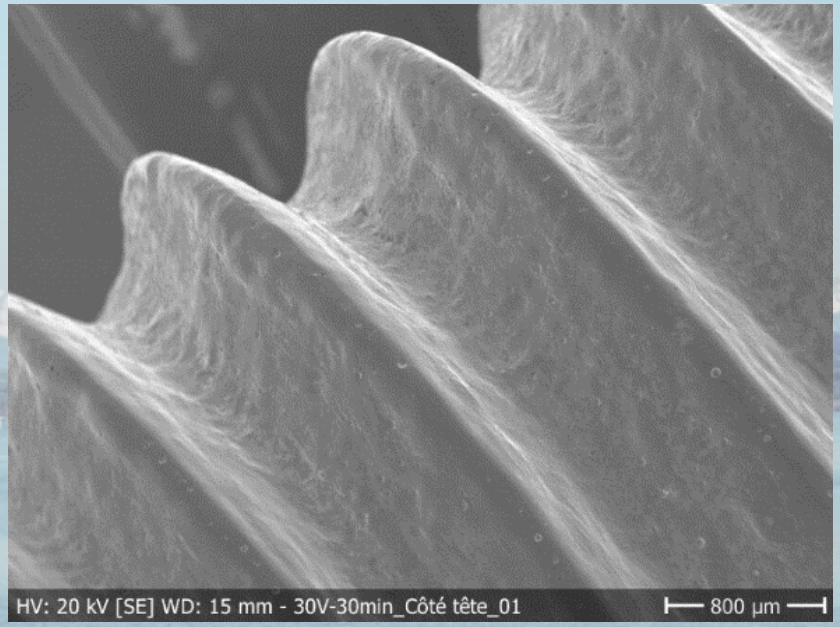


Figure 11 : Vis en titane AM 30°C, 30min 30V

L'augmentation du temps montre que EP est plus homogène sur la pièce et sur le filet

Résultats et discussions

- **Résultat microscopique MEB**

  (influence de la température et du temps de traitement)

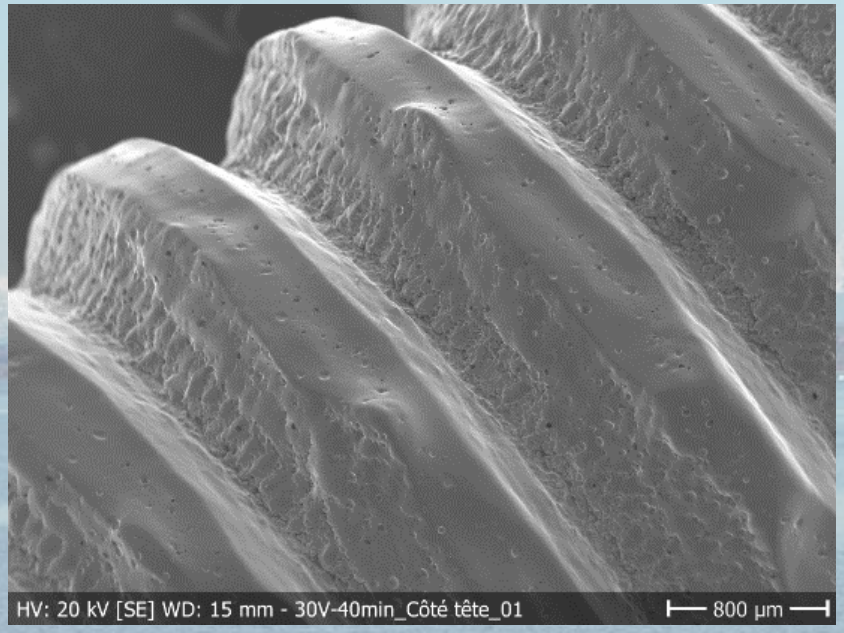


Figure 11 : Vis en titane AM 30°C, 40min 30V

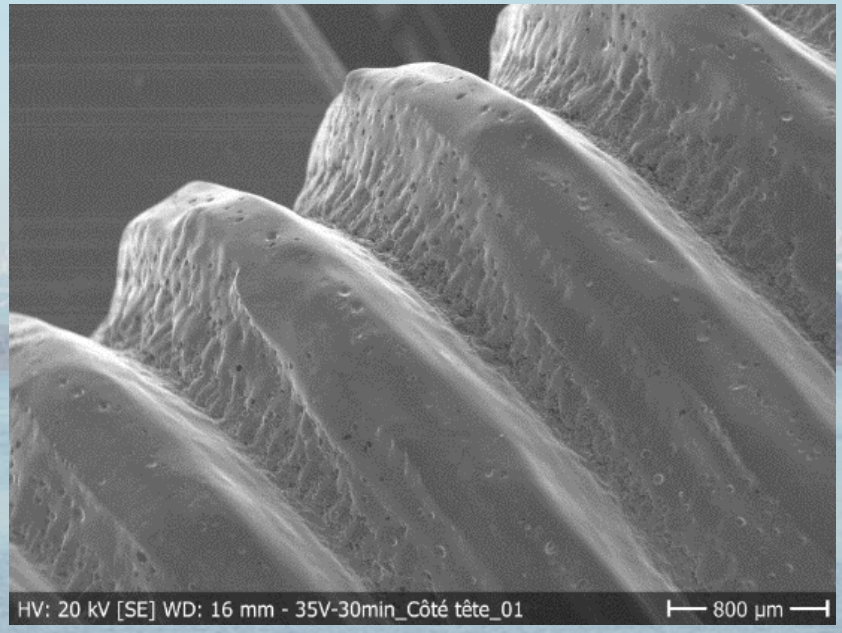
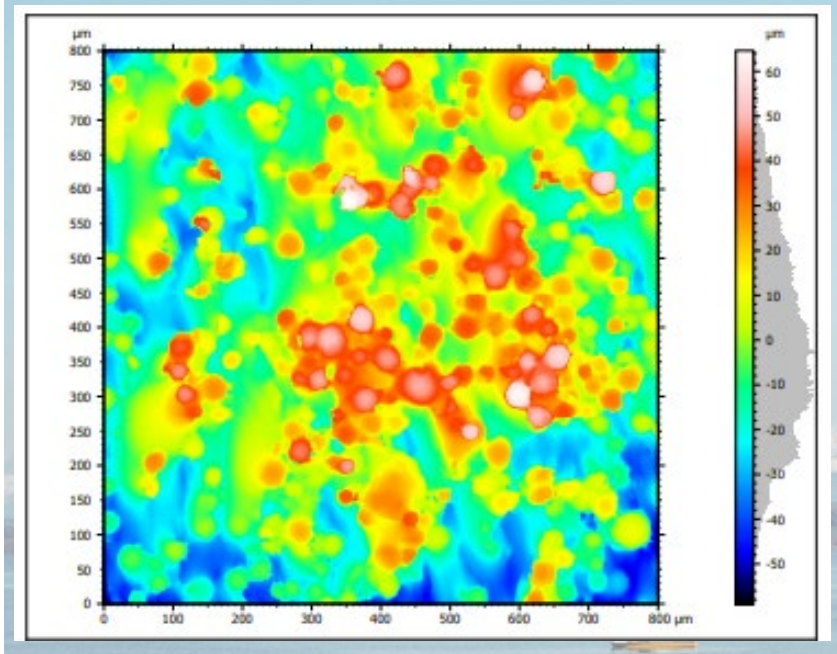


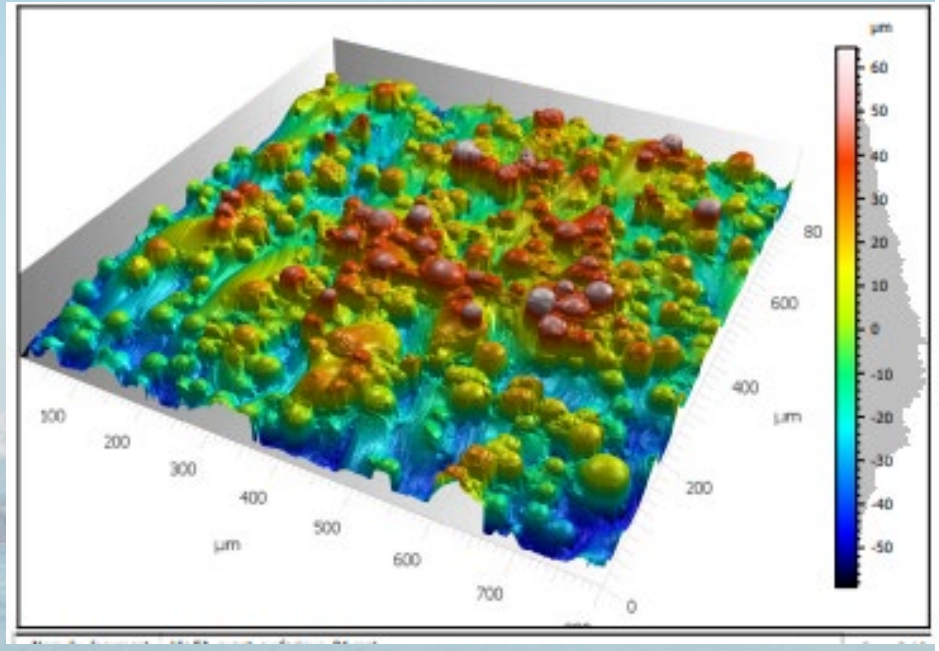
Figure 12 : Vis en titane AM 30°C, 30min 35V

L'augmentation du temps ou de la tension endommage passablement le filet

Ex. Analyse surfacique avant EP

5 mm (GE) et 400microns (PE), filtre gaussien λL=0.8

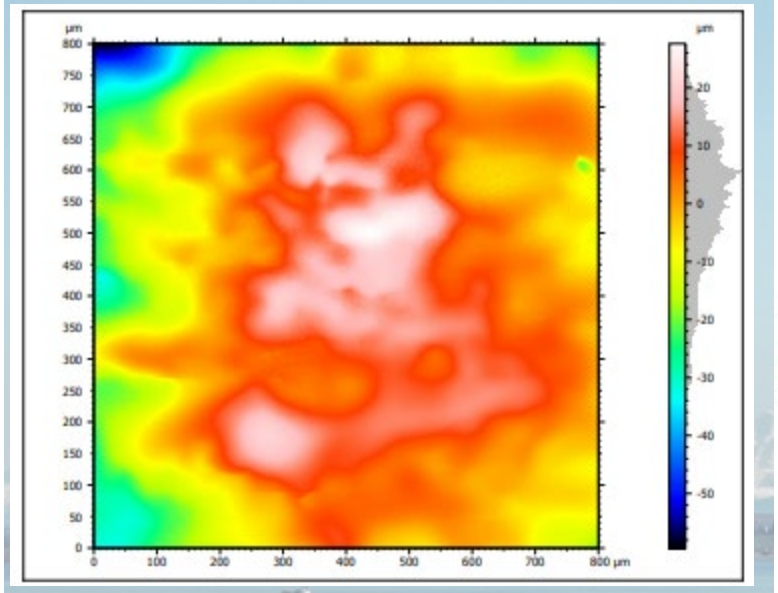


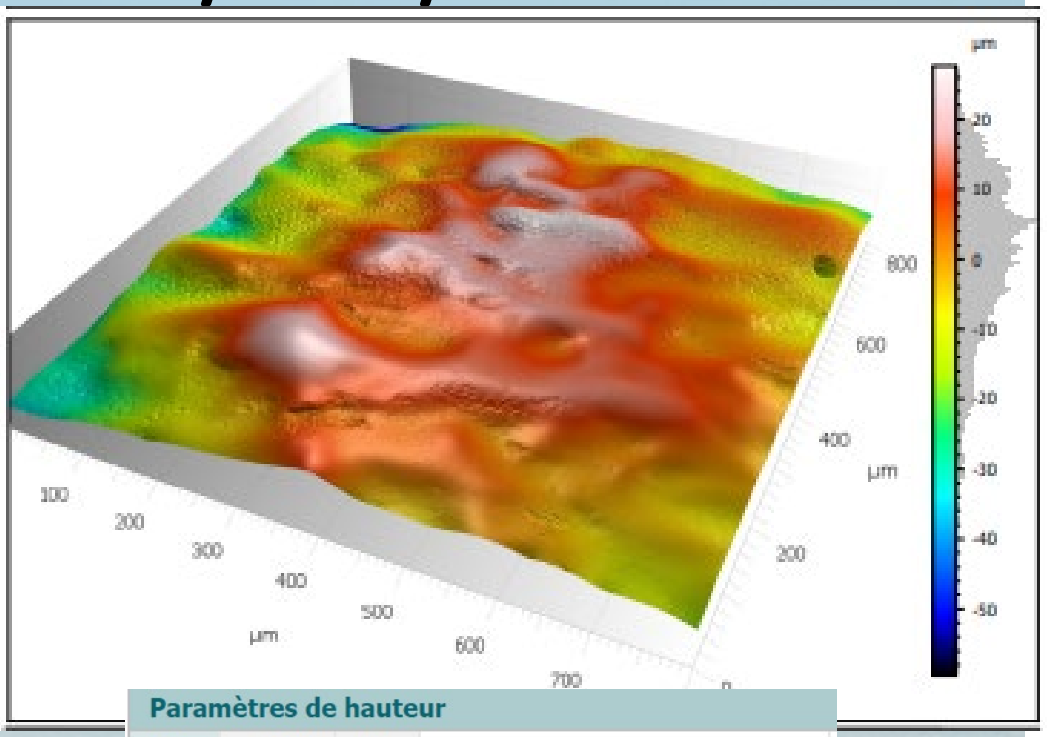


Paramètres de hauteur			
Rq	16.6	µm	*Hauteur moyenne quadratique*
Rsk	0.243		*Facteur d'asymétrie*
Rku	2.69		*Kurtosis (facteur d'aplatissement)*
Rp	45.3	µm	*Hauteur de colline moyenne*
Rv	37.0	µm	*Profondeur de vallée moyenne*
Rz	82.3	µm	*Hauteur moyenne*
Ra	13.7	µm	*Hauteur moyenne*

Paramètres de hauteur			
Sq	17.2	µm	*Hauteur quadratique moyenne*
Ssk	0.393		*Facteur d'asymétrie*
Sku	2.60		*Kurtosis*
Sp	55.6	µm	*Hauteur maximale des pics*
Sv	40.4	µm	*Profondeur maximale de creux*
Sz	96.1	µm	*Hauteur maximale*
Sa	14.2	µm	*Hauteur arithmétique moyenne*

Ex. Analyse surfacique après EP





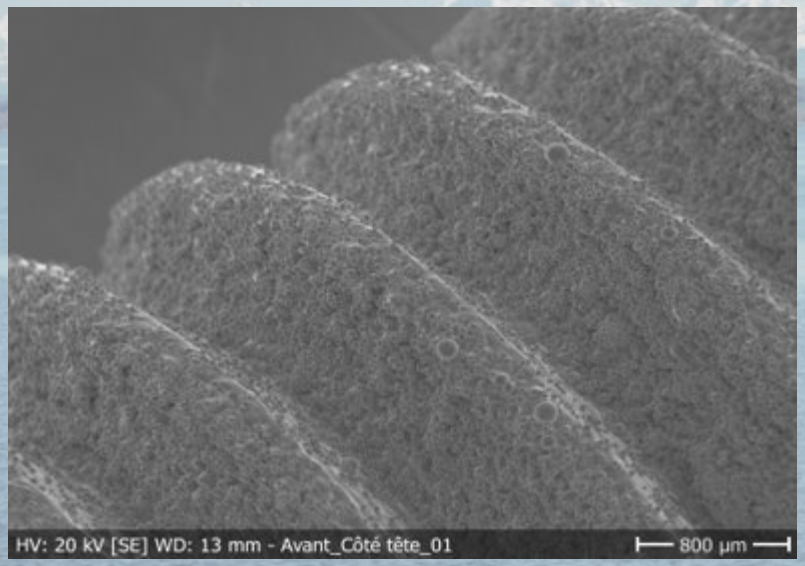
Paramètres de hauteur			
Rq	2.90	µm	*Hauteur moyenne quadratique*
Rsk	-0.82		*Facteur d'asymétrie*
Rku	4.39		*Kurtosis (facteur d'aplatissement)*
Rp	6.88	µm	*Hauteur de colline moyenne*
Rv	10.8	µm	*Profondeur de vallée moyenne*
Rz	17.7	µm	*Hauteur moyenne*
Ra	2.24	µm	*Hauteur moyenne*

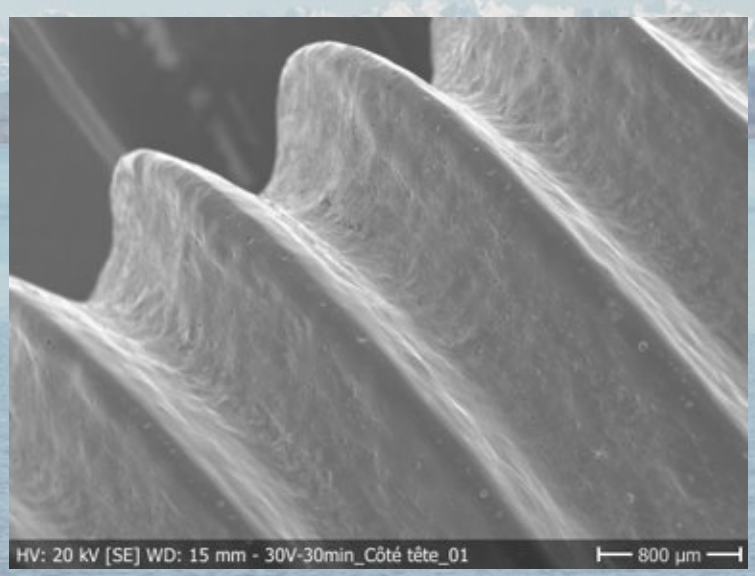
Paramètres de hauteur			
Sq	5.09	µm	*Hauteur quadratique moyenne*
Ssk	0.147		*Facteur d'asymétrie*
Sku	3.24		*Kurtosis*
Sp	15.2	µm	*Hauteur maximale des pics*
Sv	19.5	µm	*Profondeur maximale de creux*
Sz	34.7	µm	*Hauteur maximale*
Sa	3.98	µm	*Hauteur arithmétique moyenne*

Analyse surfacique

Désignation	Ra (4,5mm)	Ra (400 µm)
Miroir référence	5 nm	2 nm
Ti6AlV4 bulk	140 à 220 nm	2 nm
Ti6AlV4 AM	700nm	80 nm

En conclusion…

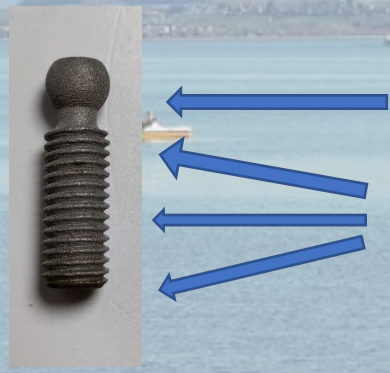




Résultats et discussions

Vitesse EP en fonction des conditions opératoires

De manière à évaluer la vitesse EP sur les vis en fonction des conditions opératoires, il a été réalisé 3 mesures autour de la tête (~120°) et 3 mesures sur la longueur du corps corps.

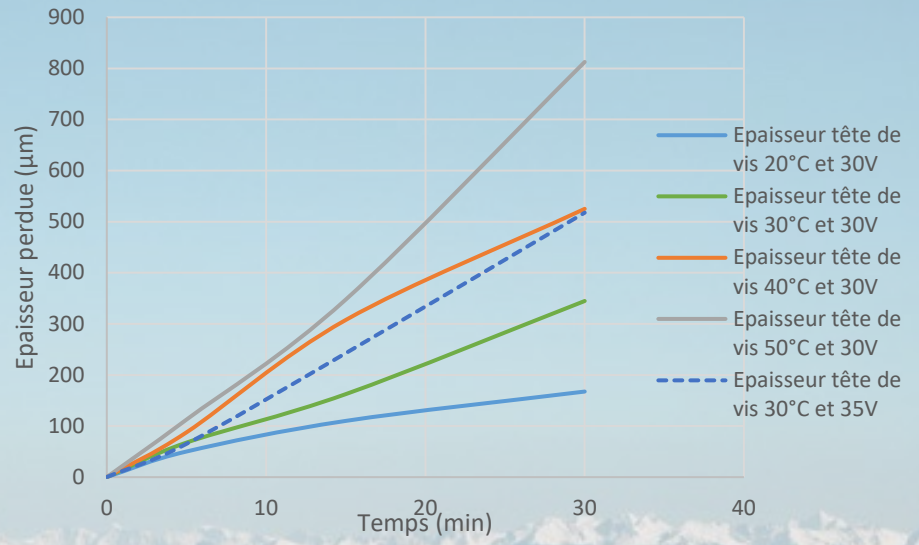


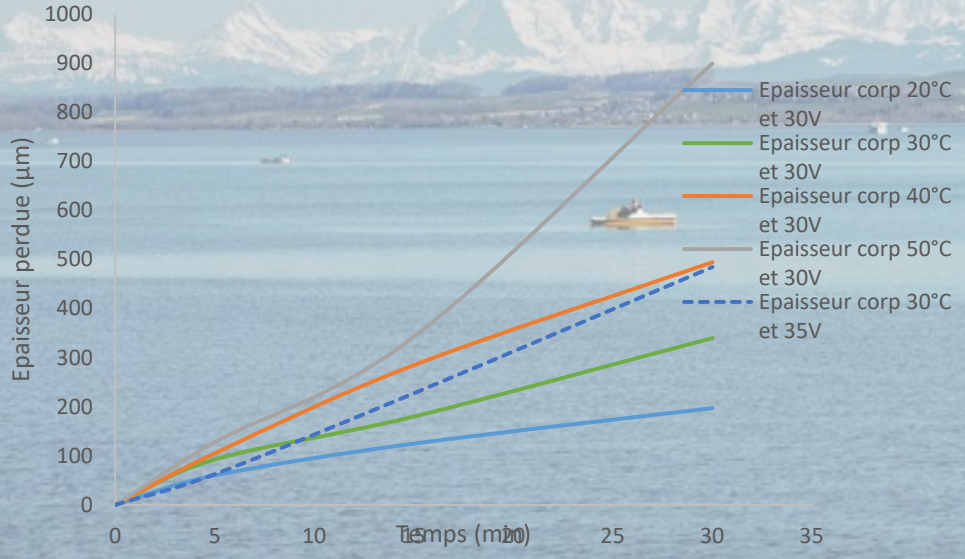
3 mesures réalisées sur la tête

3 mesures sur la longueur de la vis

Analyse épaisseur

La vitesse EP augmente en fonction de la température pour passer de 340 à plus de 1600 microns par heure





Une augmentation de la tension semble montrer une effet similaire a l'augmentation de la température

En règle générale la vitesse EP est proportionnelle à celle de température

Conclusions et perspectives

Conclusions

- Polissage électrolytique avec une solution exempt d'acides ou de sels toxiques
- ↳mise en œuvre avec **succès** sur alliage de Ti issu de AM
- ⇨*Absence de particules détachables après 15min. de polissage*
- ⇨*Diminution de la rugosité globale*
- Etude de l'influence de la **tension appliquée** et du **temps de traitement**

- Mise en évidence du lien entre la micro rugosité et les conditions opératoires
- ↳mise en place d'une **méthode de caractérisation** de la **micro rugosité**

Perspectives

- Mise en place d'une cuve de 50L
- **Etude sur pièce de géométrie complexe**
- **Etude en CP**

Merci pour votre attention !

Questions ?