

# Techniques innovantes de mise en forme 3D et de frittage des matériaux céramiques

## Fabrication hybride

Enrique JUSTE

Belgian Ceramic Research Centre

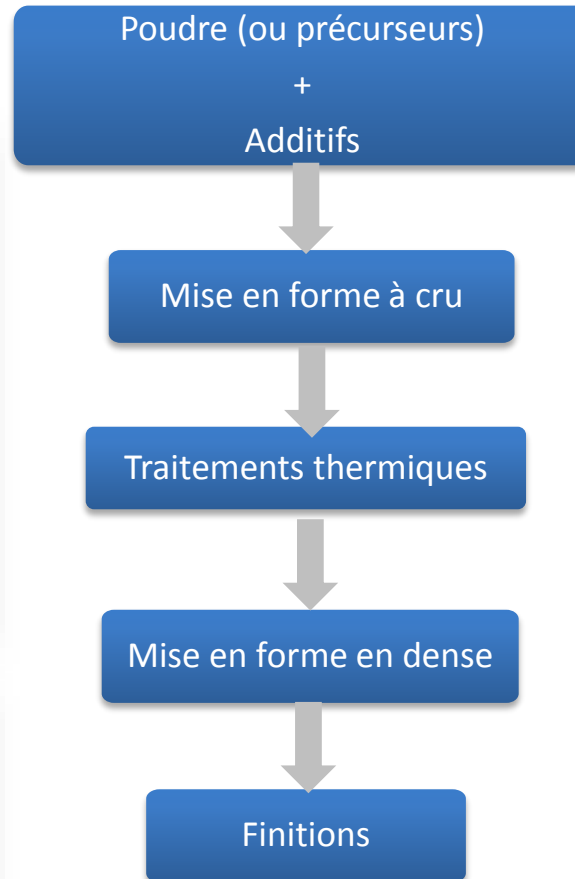
e.juste@bcrc.be

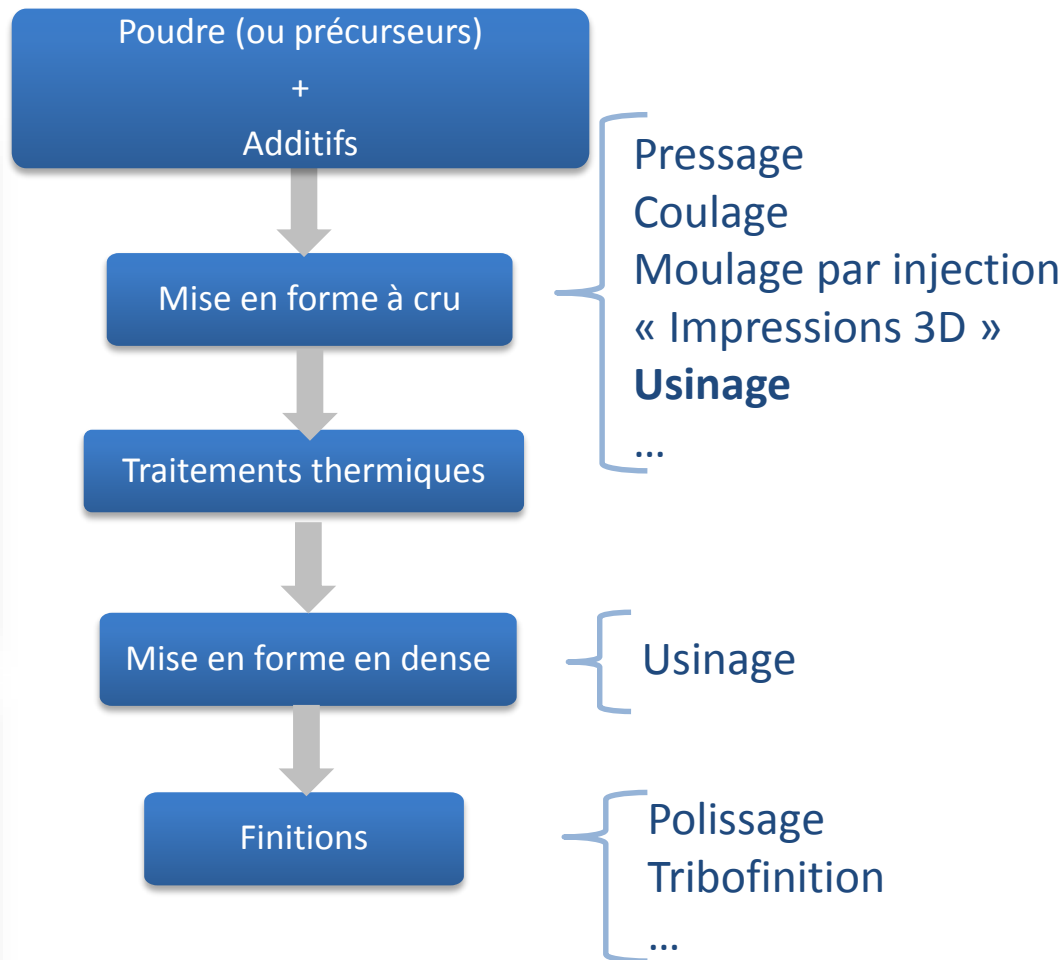
[www.bcrc.be](http://www.bcrc.be)

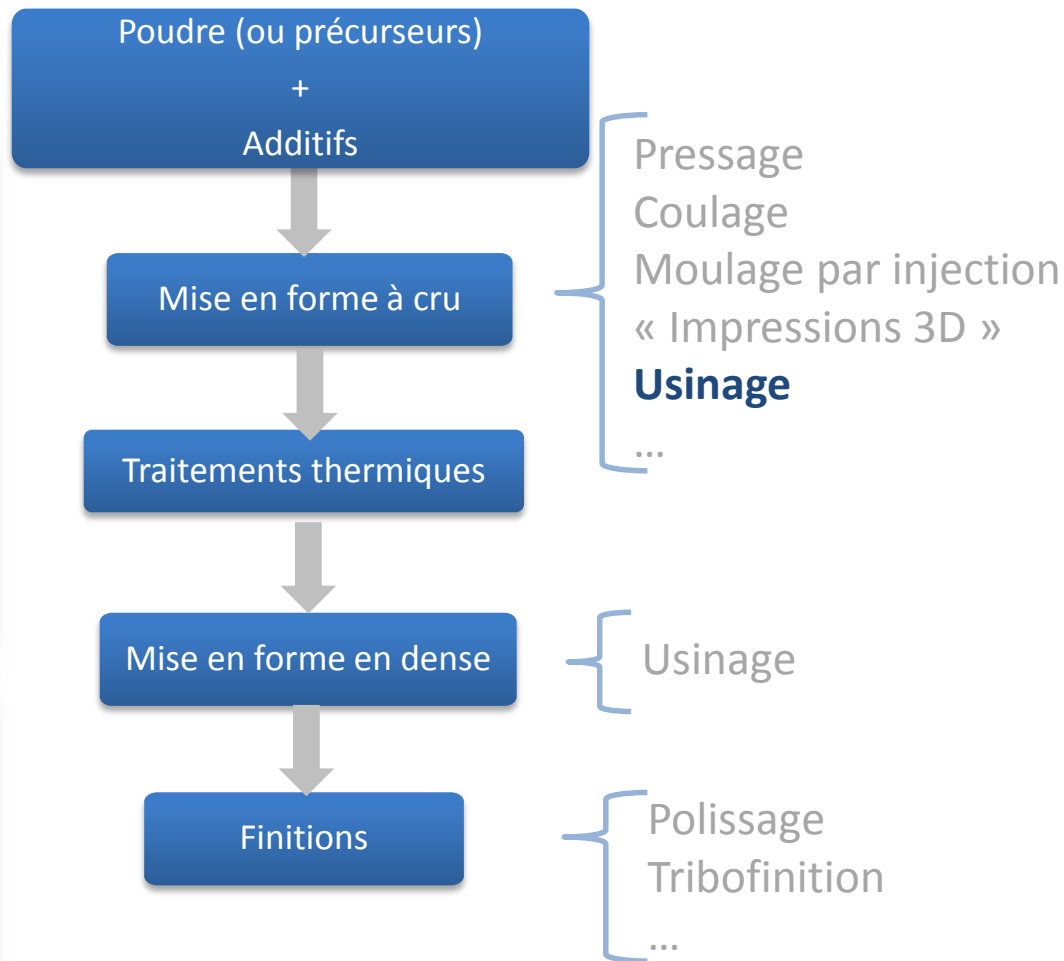




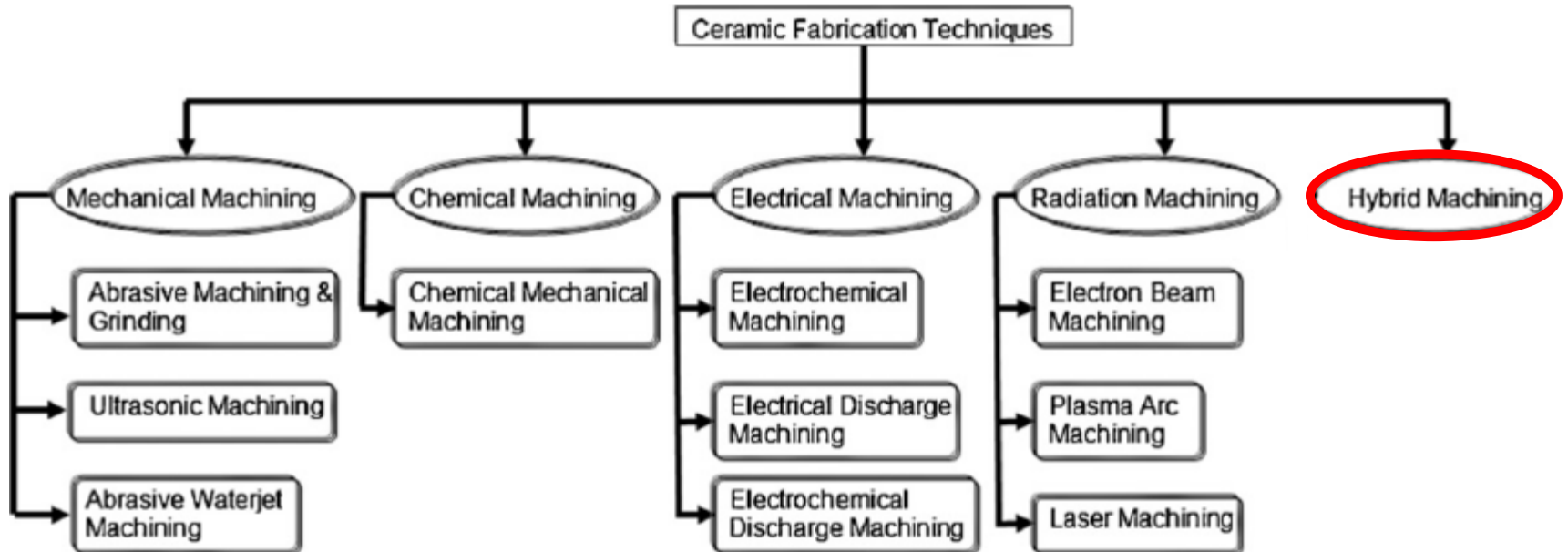
Avantages	Inconvénients
<p>Dureté élevée</p> <p>Réfractarité élevée</p> <p>Inertie chimique</p> <p>Résistance à la rupture élevée</p> <p>Résistance à l'usure par abrasion</p> <p>Fonctionnalités particulières</p> <p>...</p>	<p><b>Matériau fragile</b></p>



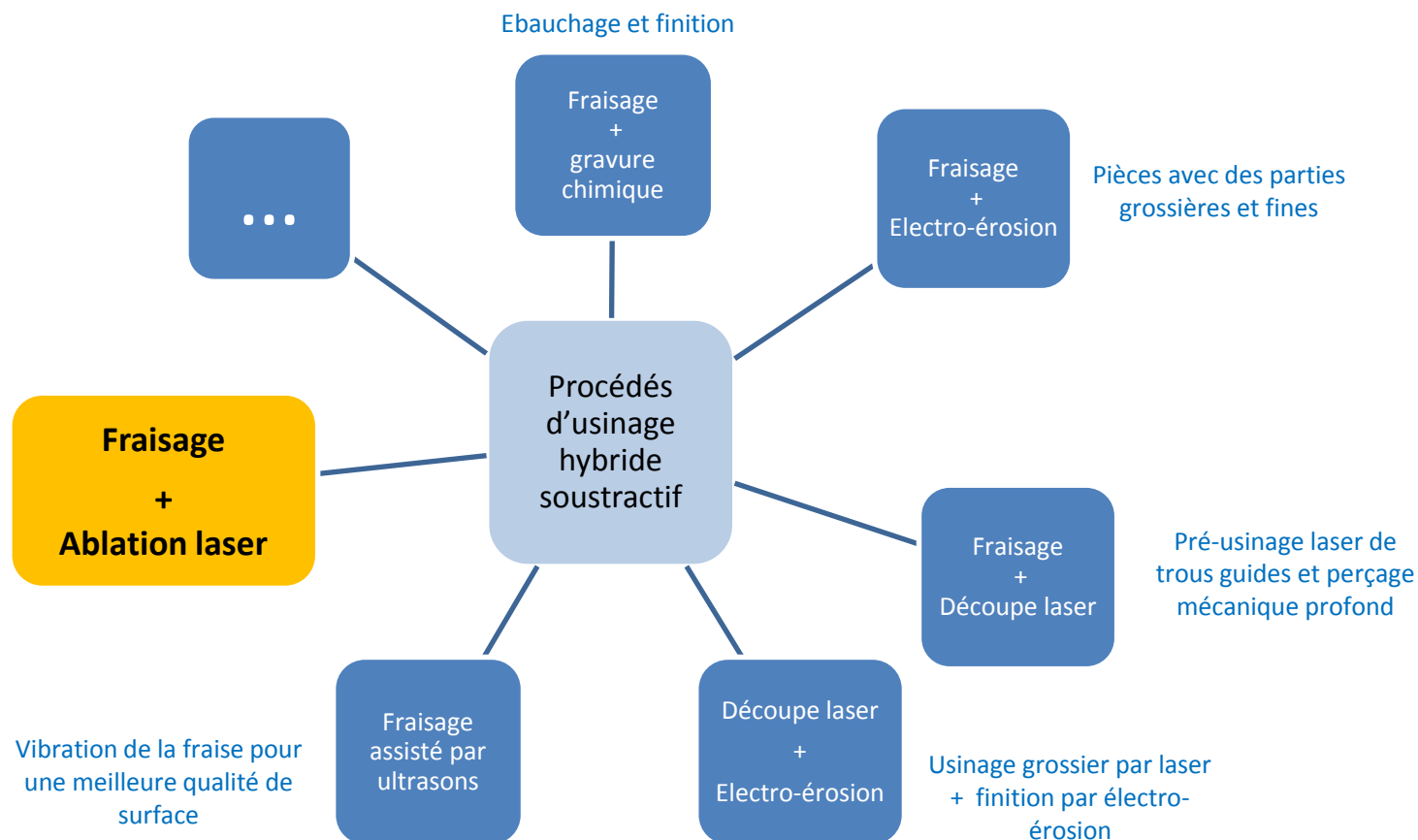








Association de plusieurs processus de fabrication établis dans une nouvelle configuration combinée permettant d'exploiter de manière synergique les avantages de chaque procédé discret



2 approches :

## Fraisage CAD/CAM

### Avantages

- Technologie industrielle mature pour les céramiques
- Taux d'ablation élevé
- Bon fini de surface

### Limitations

- Grande perte de bonne matière
- Usure / casse des outils diamantés
- Risque d'endommagement de la pièce

**Cru**



**Préfritté**



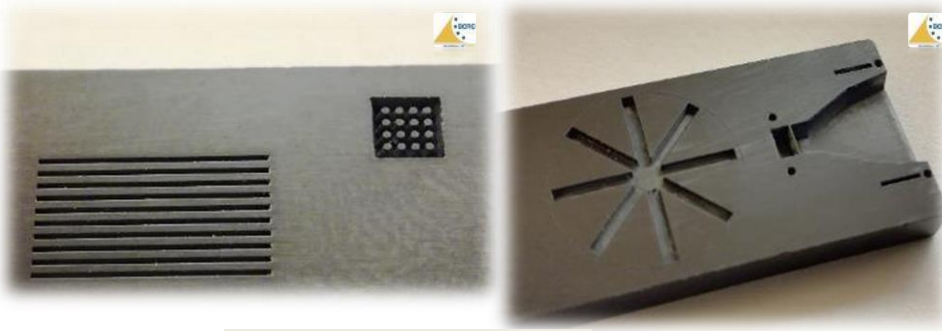
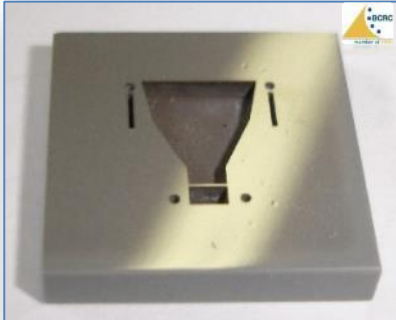
**Dense**





## 2 approches :

Machining of dense  $\text{Si}_3\text{N}_4$



Machining of dense SiC

## Ablation Laser

### Avantages

- Adaptée aux matériaux difficilement faisable
- Usinage sans contact
- $\varnothing$  spot laser jusqu'à 20  $\mu\text{m}$

### Limitations

- Faible taux d'ablation sur les pièces denses
- Zone affectée thermiquement

2 approches :

## Fraisage CAD/CAM

### Avantages

- Technologie industrielle mature pour les céramiques
- Taux d'ablation élevé
- Bon fini de surface

Limitations

## Ablation Laser

### Avantages

- Adaptée aux matériaux difficilement faisable
- Usinage sans contact
- Ø spot laser jusqu'à 20 µm

Limitations

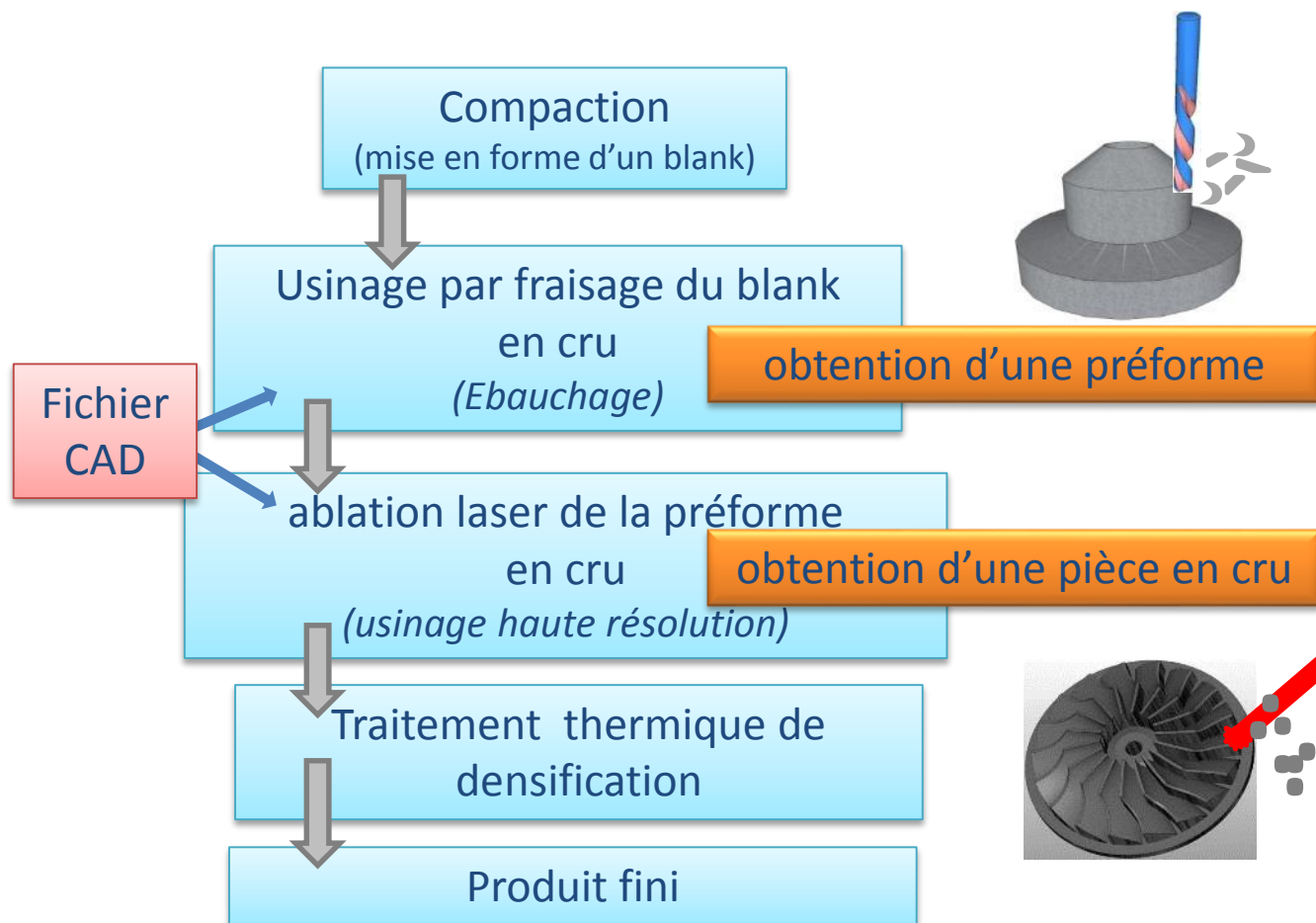
## **Fabrication hybride soustractive (Fraisage CAD/CAM + Ablation laser)**

- Combinaison des avantages des deux techniques
- Développement de blanks

## 2X Soustractif

1. Fraisage CAD/CAM
2. Ablation laser

## Hybridation



Compaction  
(mise en forme d'un blank)

↓  
**Usinage par fraisage du blank  
en cru  
(Ebauchage)**

↓  
ablation laser de la préforme  
en cru  
(usinage haute résolution)

↓  
Traitement thermique de  
densification

↓  
Produit fini



## Principales caractéristiques

- Puissance 2200 W/ jusqu'à 20 000 tr/min
- Couple à 18 000 tr/min = 1,26 Nm
- Chargeur de 4 outils

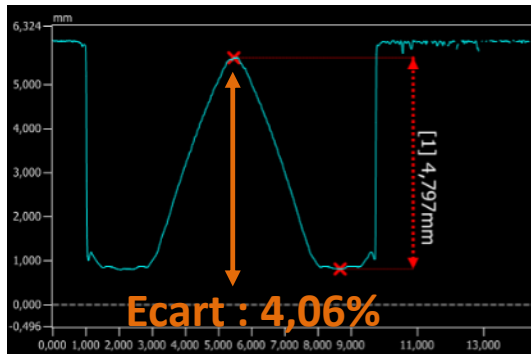
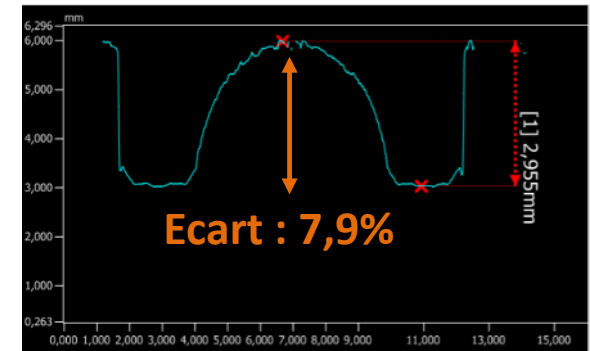
Compaction  
(mise en forme d'un blank)

**Usinage par fraisage du blank  
en cru  
(Ebauchage)**

ablation laser de la préforme  
en cru  
(usinage haute résolution)

Traitement thermique de  
densification

Produit fini



**Endommagements**

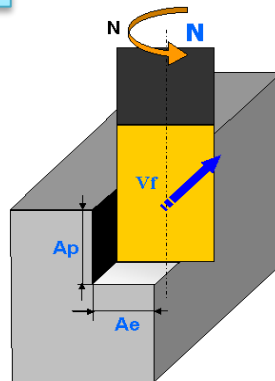
Compaction  
(mise en forme d'un blank)

**Usinage par fraisage du blank  
en cru  
(Ebauchage)**

ablation laser de la préforme  
en cru  
(usinage haute résolution)

Traitement thermique de  
densification

Produit fini



- Adaptation du type d'outil
- Optimisation des paramètres de coupes
- Optimisation de la profondeur de pénétration
- Optimisation des stratégies d'usinage

**Avance par dent**

$$fz = \frac{V_f}{z \times N} \text{ [mm]}$$

**Nombre de tours**

$$N = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times \phi} \text{ [tr/min]}$$

**Vitesse de coupe**

$$V_c = \frac{\pi \times \phi \times N}{1000} \text{ [m/min]}$$

**Avance**

$$V_f = fz \times z \times N \text{ [mm/min]}$$



Compaction

(mise en forme d'un blank)

**Usinage par fraisage du blank  
en cru  
(Ebauchage)**

ablation laser de la préforme  
en cru  
(usinage haute résolution)

Traitement thermique de  
densification

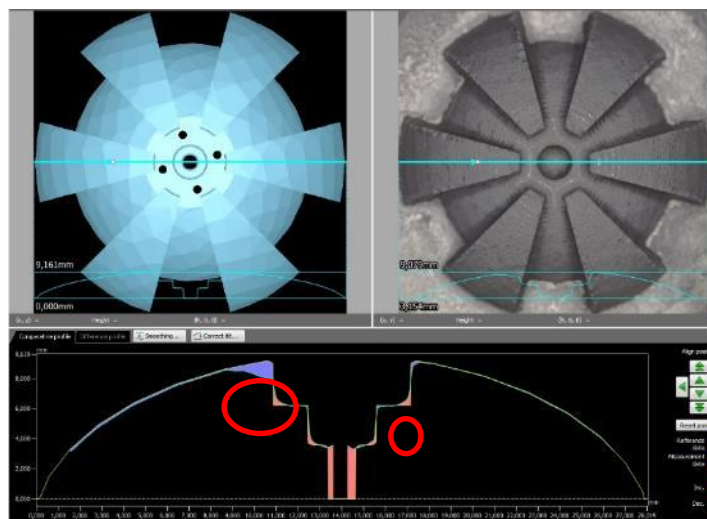
Produit fini

obtention de pièces usinées en cru



Ø = 27 mm

Endommagement des angles  
et des détails les plus fins



Compaction  
(mise en forme d'un blank)

usinage par fraisage du blank  
en cru  
(Ebauchage)

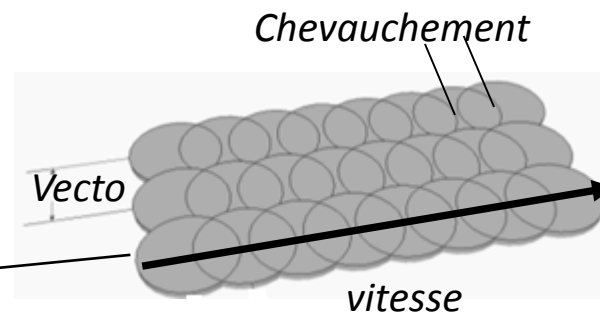
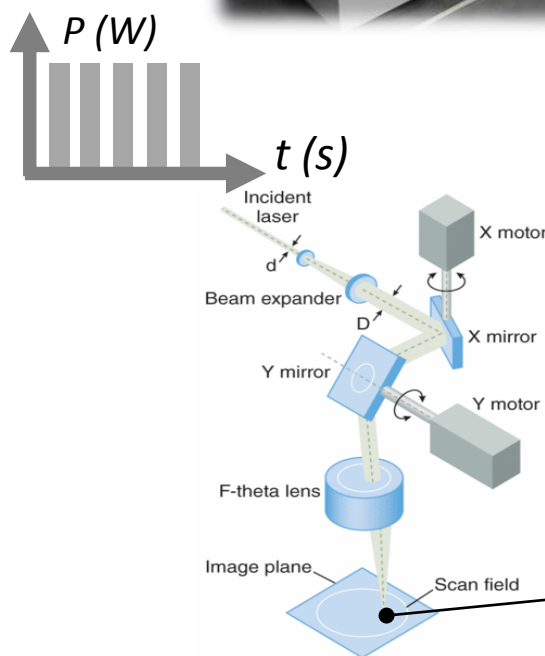
**Ablation laser de la préforme  
en cru**  
(usinage haute résolution)

Traitement thermique de  
densification

Produit fini



- $P_{max} \sim 100 \text{ W (cw)}$
- $\lambda \sim 1 \mu\text{m}$
- $\Phi \text{ spot min} \sim 80 \mu\text{m}$
- $1 \text{ mm/s} < v < 2000 \text{ mm/s}$
- 3 axes cartésien + 2 axes de rotation



Compaction  
(mise en forme d'un blank)

Usinage par fraisage du blank  
en cru  
(Ebauchage)

**Ablation laser de la préforme  
en cru**  
(usinage haute résolution)

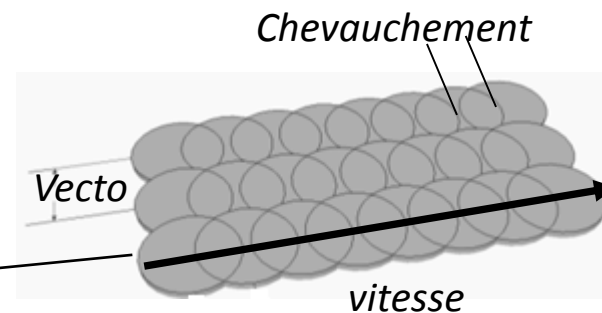
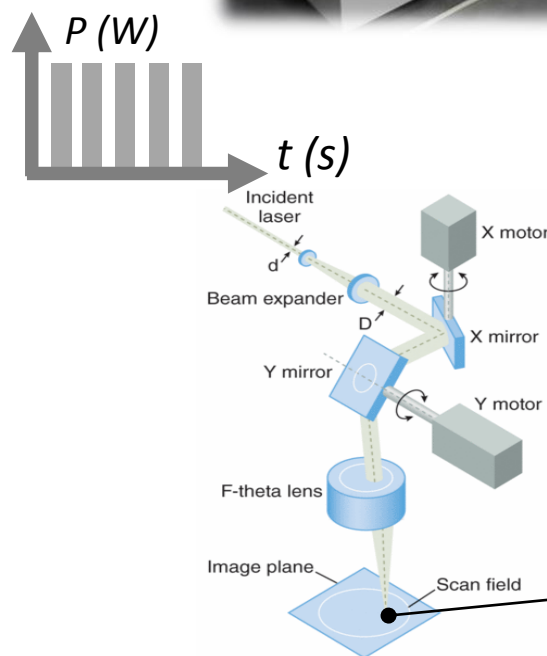
Traitement thermique de  
densification

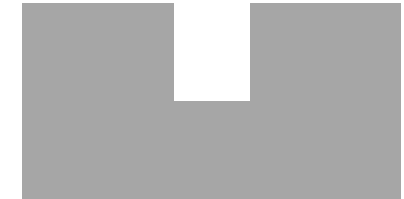
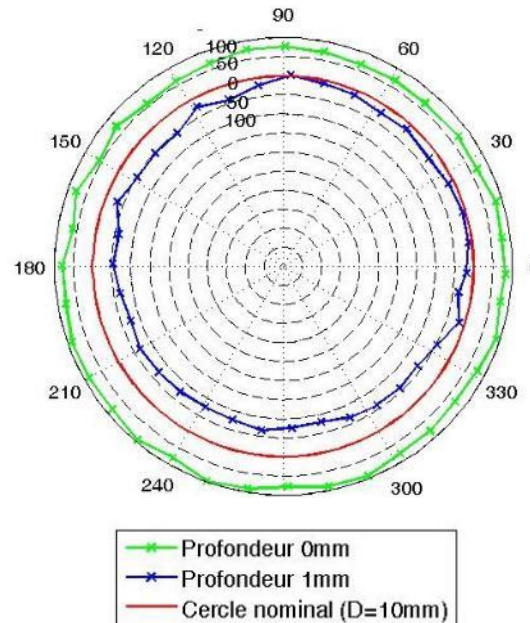
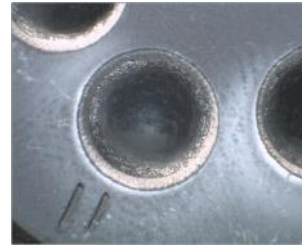
Produit fini



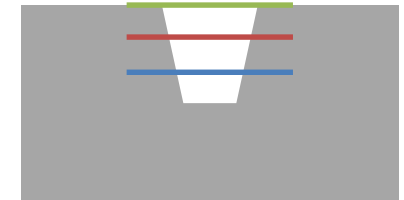
## Paramètres laser influents

- $P_{\text{laser}}$
- Vitesse de balayage
- Fréquence de répétition
- Stratégie d'ablation laser
- Taux de compaction de la poudre
- Nature et quantité des additifs



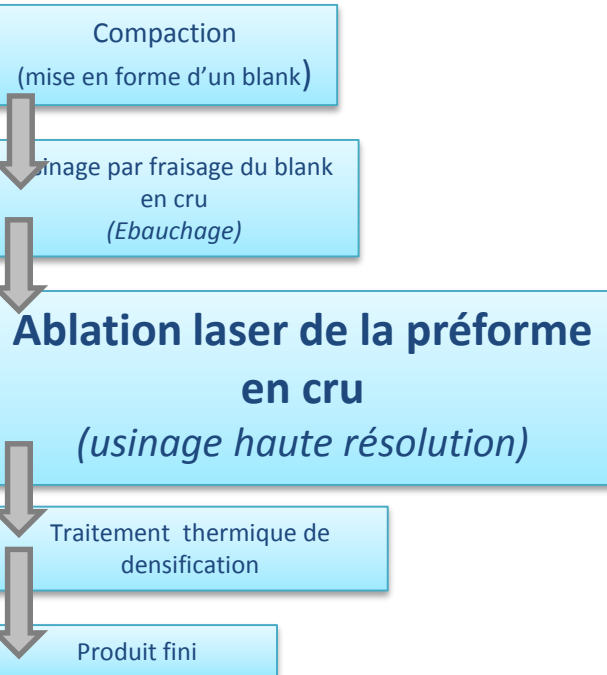


## Forme souhaitée



### Forme obtenue

→ Cavité conique



## Capabilité à usiner des parois verticales

- Ablation laser = Faible

• Fraisage = Elevée

Compaction  
(mise en forme d'un blank)

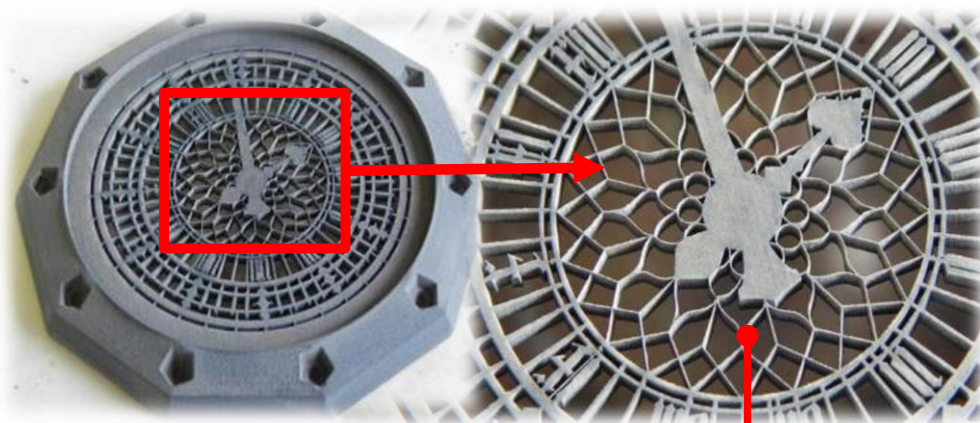
usinage par fraisage du blank  
en cru  
(Ebauchage)

**Ablation laser de la préforme  
en cru**  
(usinage haute résolution)

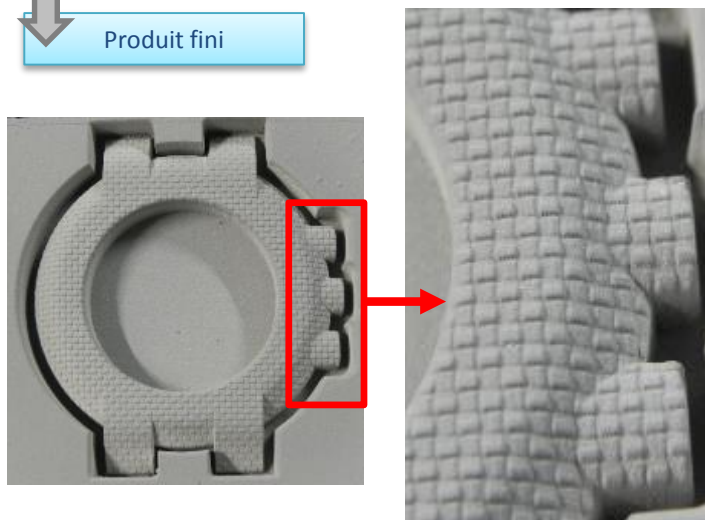
Traitement thermique de  
densification

Produit fini

obtention d'une pièce en cru



Épaisseur de paroi ~ 120µm  
Hauteur paroi ~ 2mm



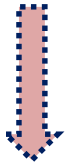


## Fabrication hybride soustractive

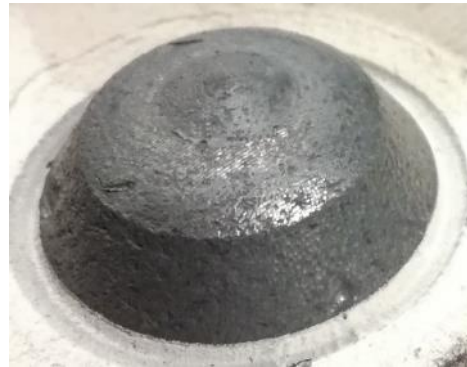


### 2X Soustractif

1. Fraisage CAD/CAM
2. Ablation laser



### Hybridation



1. Fraisage CAD/CAM



2. Ablation laser

Procédé séquentiel aujourd'hui à l'étape pré-industrielle



Lab machine designed by BCRC & built by OPTEC (Belgium)

## Mechanics

- 5 mechanical axis for part positioning and machining
- 3 optical axis (xy and fast z focusing)

## Optics

- High res. numerical camera

## Milling tools

- 1 ns laser source (IPG 100 W average)
- 1 fs laser source (Amplitude systems 10 W average)
- 1 milling tool (400 W, 30 000 rpm)

## Scanner for 3D reconstruction

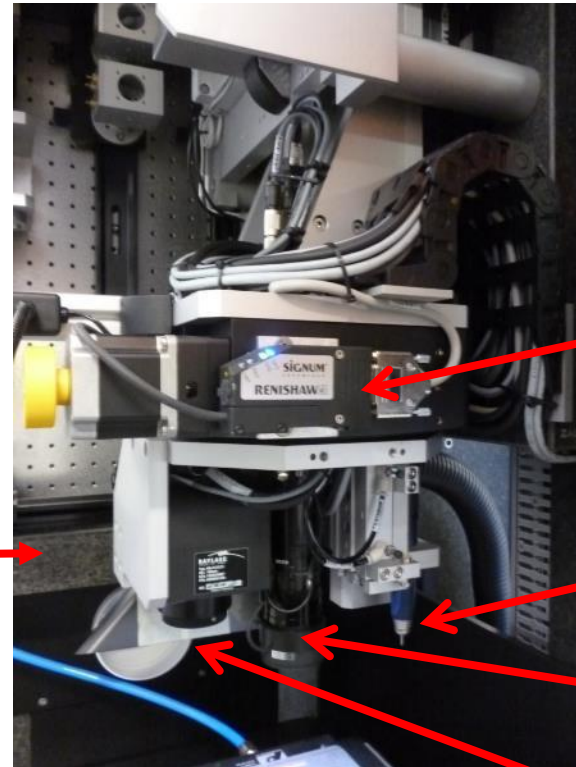
- 1 integrated line-laser scanner (micro-epsilon)



+ Possibilité de passer d'un outil à l'autre ...

**Tools area**

**Machining area**

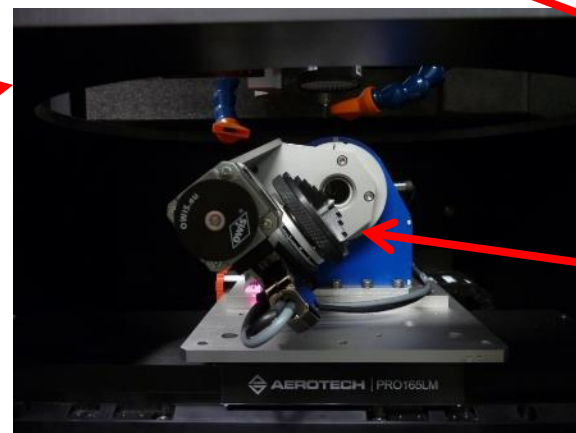


**Laser scanner**

**Milling tool**

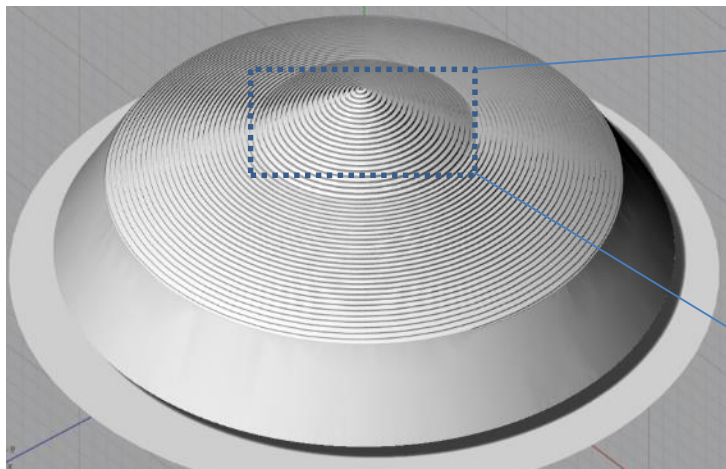
**Microscope**

**Galvo head (ns & fs lasers)**

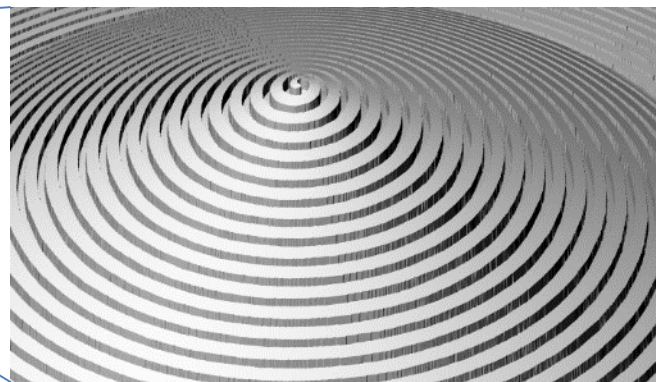


**2 rotary axis + xyz cartesian axis**

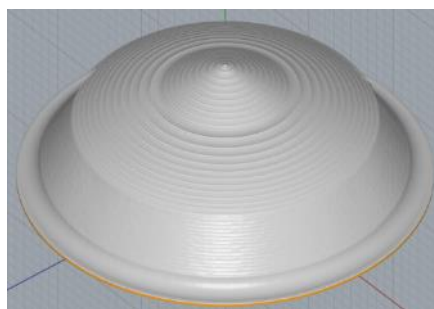
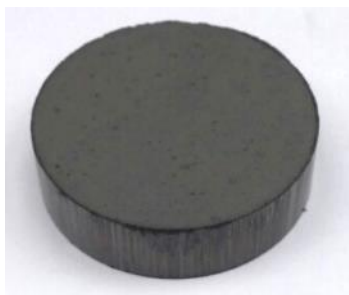
## Pourquoi l'usinage hybride : un exemple de pièce à réaliser



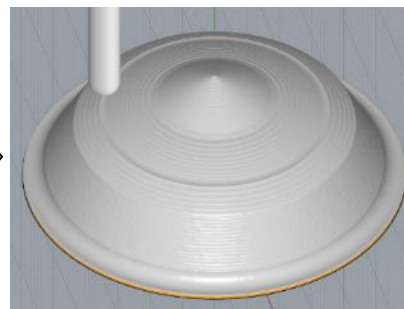
*Modèle 3D d'une pièce de forage avec une texture hélicoïdale ( $\varnothing \sim 30$  mm)*



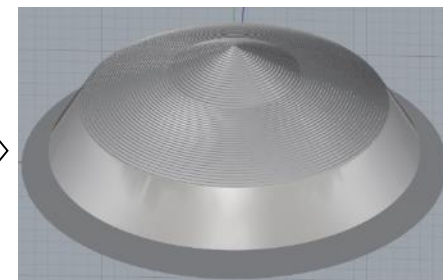
*Zoom sur la partie à réaliser par micro-usinage. Les rainures ont une profondeur et une largeur de  $100\mu\text{m}$ .*



*après ébauchage  
(fraise 2,7mm, 5min)*



*Pré-finition en cours  
(fraise de 2,7mm, 3min)*

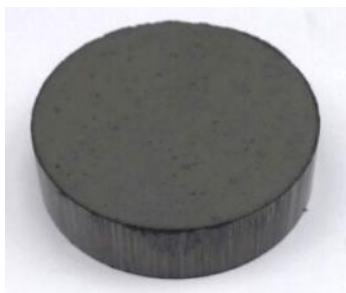


*finition à la fraise de 0,08mm  
(temps d'usinage > 48h !!!)*

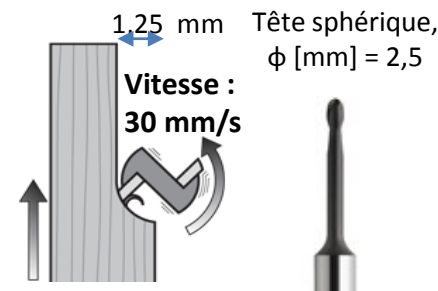
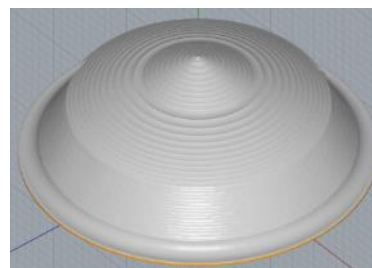
*Compact (WC-Co 12%)*

## Pourquoi l'usinage hybride: taux d'enlèvement de matière en fonction de l'outil

Compact (WC-Co 12%)

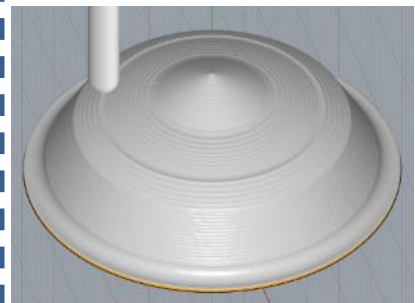


### Phase d'ébauchage



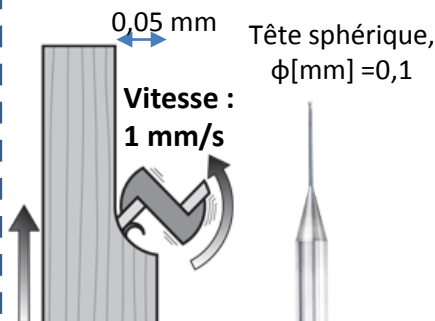
Taux d'ablation :  $2,5 \times 0,625 \times 30 = 46 \text{ mm}^3/\text{s}$

### Phase de pré-finition

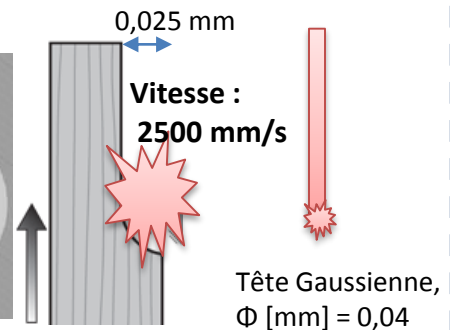


Taux d'ablation :  
 $1,0 \times 0,25 \times 10 = 2,5 \text{ mm}^3/\text{s}$

### Phase de finition (micro-usinage)



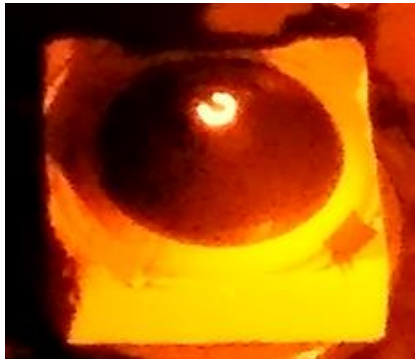
Taux d'ablation :  $0,1 \times 0,025 \times 1 = 0,0025 \text{ mm}^3/\text{s}$



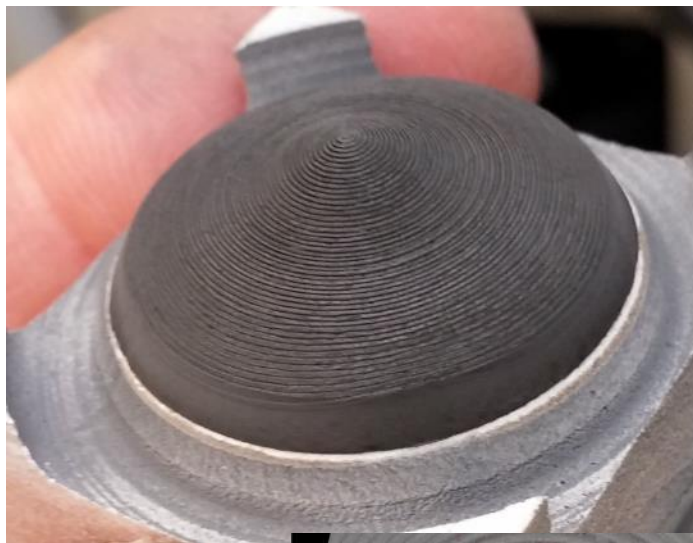
Taux d'ablation :  $0,040 \times 0,025 \times 2500 = 2,5 \text{ mm}^3/\text{s}$   
Taux d'ablation :  $0,040 \times 0,025 \times 1000 = 1 \text{ mm}^3/\text{s}$



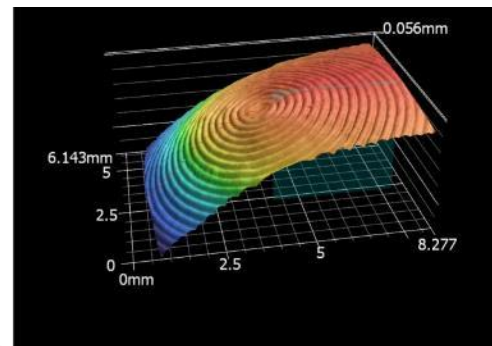
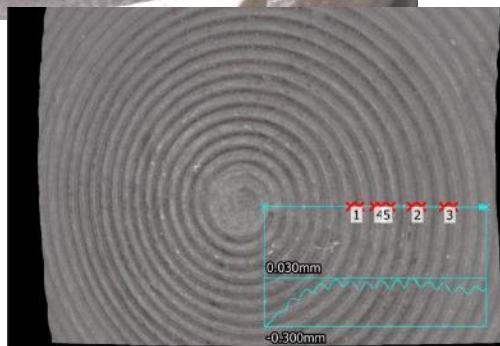
## Pourquoi l'usinage hybride: phase de finition effectuée par un laser



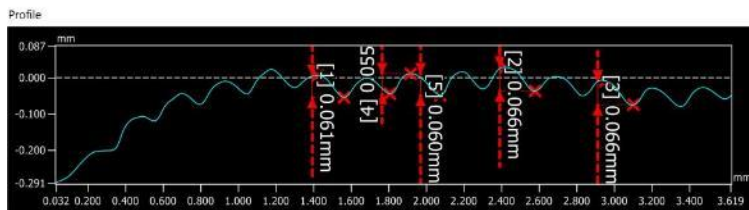
Usinage laser en cours  
après la phase de  
finition mécanique.



Pièce finie avant frittage. La phase de  
finition laser a duré **12 minutes**.



Après frittage  
Pièce dense à 99%  
détails de ~60μm  
Absence de déformations



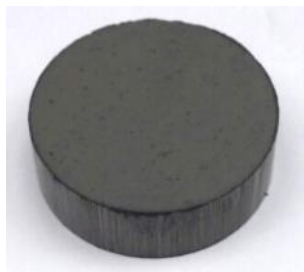
Measurement result

No.	Measurement name	Measured value	Unit
1	Point - Point (Vert)11	0.061	mm
2	Point - Point (Vert)12	0.066	mm
3	Point - Point (Vert)13	0.066	mm
4	Point - Point (Vert)14	0.055	mm
5	Point - Point (Vert)15	0.060	mm

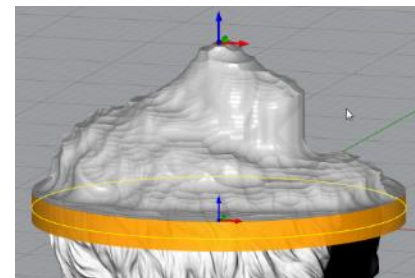
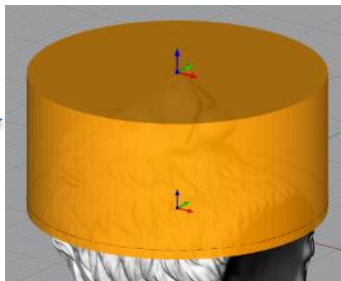
## Exemple d'usinage hybride: une tête de lion (détails < 80 microns)



Compact (WC-Co 12%)



*Phase d'ébauchage*



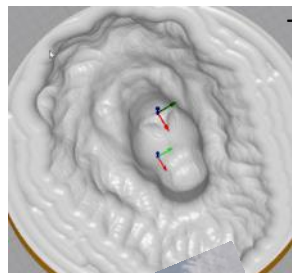
Tête sphérique,  
 $\phi$  [mm] = 2,5



Vitesse :  
30 mm/s

Temps d'usinage: ~12 minutes

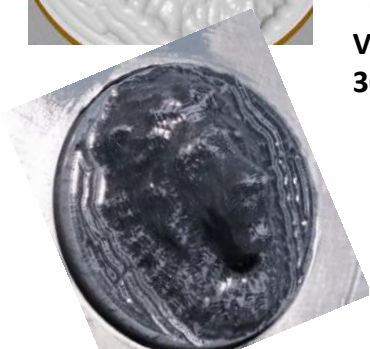
*Phase de pré-finition*



Tête sphérique,  
 $\phi$  [mm] = 2,5



Vitesse :  
30 mm/s



*Phase de finition (micro-usinage laser)*



Vitesse :  
1500 mm/s



Tête Gaussienne,  
 $\Phi$  [mm] = 0,07

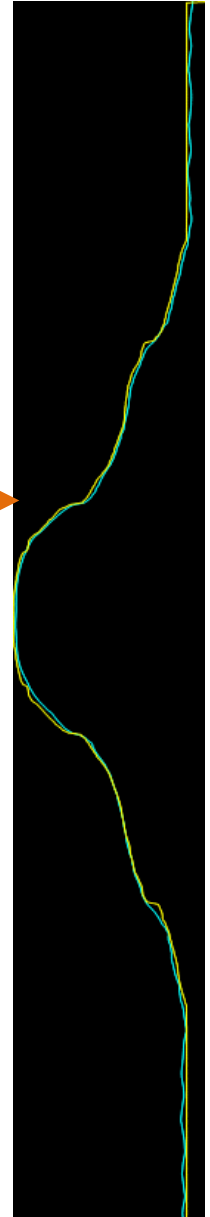
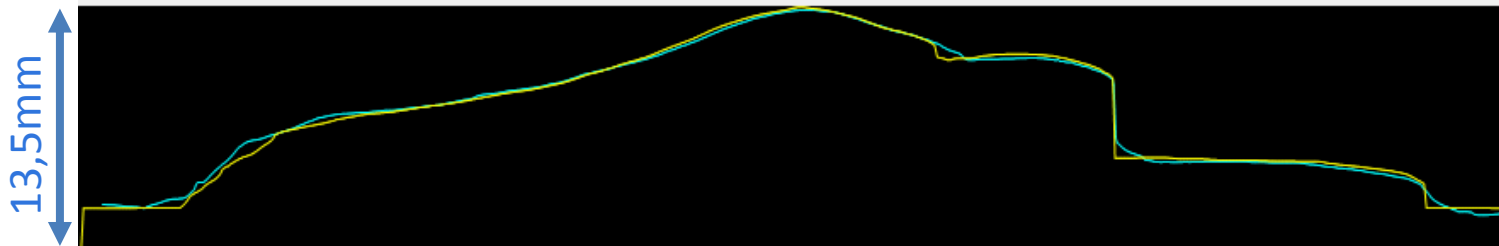
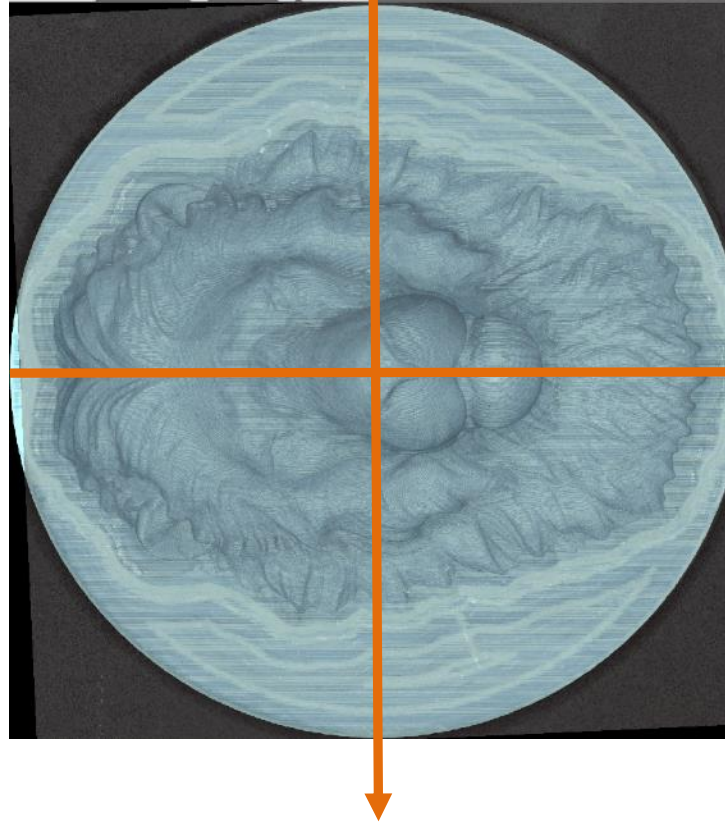
Temps d'usinage:  
~4 minutes

Temps d'usinage: ~4 minutes

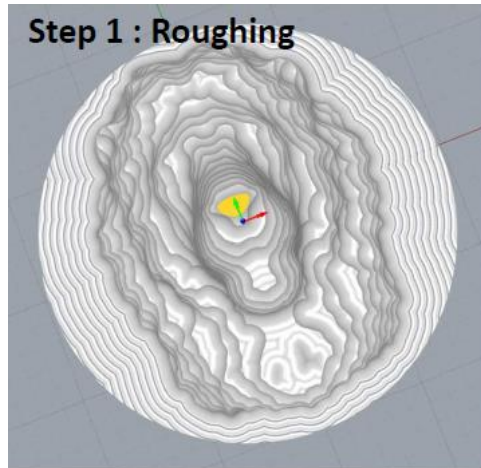


## Exemple de réalisation

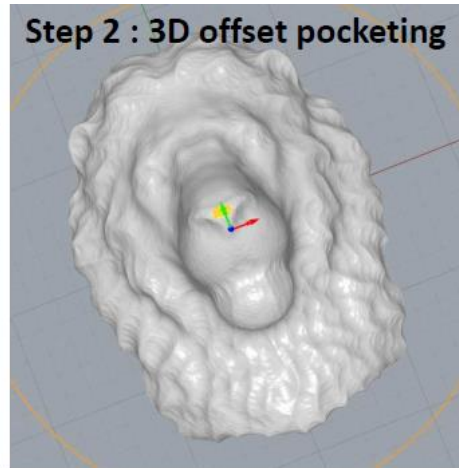
- Détails < 80 microns
- Modèle 3D = scan pièce réelle



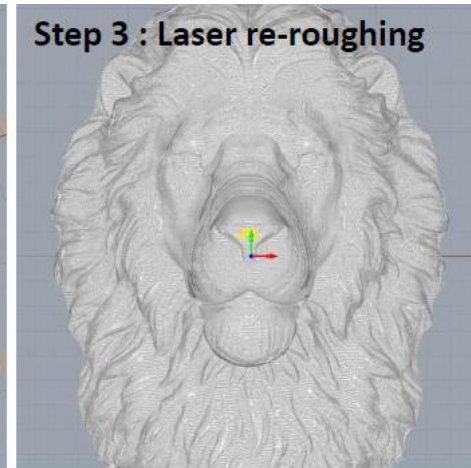
## Autre matériau : $\text{ZrO}_2$



Temps ~10 min



Temps ~1 min

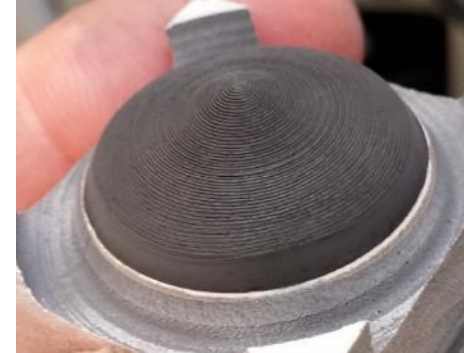


Temps ~4 min

Temps d'usinage total sans hybridation avec un outil de 50 $\mu\text{m}$  ~25 h

## ***Les valeurs ajoutées:***

- Temps d'usinage très fortement réduits,
- Pas d'usure d'outil,
- Diminution des coûts unitaires,
- Possibilité de réaliser des pièces très complexes en matériaux durs.



## ***Les coûts de ces valeurs ajoutées:***

- Maîtriser l'interaction laser/matière,
- Machines plus complexes,
- Travail de préparation plus complexe et plus long.



# Remerciements

- Collègues : Fabrice Petit, Nicolas Preux, Grégory Martic, Dominique Hautcoeur, Cédric Ott
- Partenaires projets : Anthonin Demarbaix (UMons),  
Aude Simar, Geoffrey Roy, Valentin Marchal- Marchant (UCL)



# Merci pour votre attention

## Questions?



**CRIBC (chef de file)**

[www.bcrc.be](http://www.bcrc.be)  
Mons  
+32 (0)65 40 34 34



**Materia Nova**

[www.materianova.be](http://www.materianova.be)  
Mons  
+32 (0) 65 55 49 02



**UVHC-LMCPA**

[www.univ-valenciennes.fr](http://www.univ-valenciennes.fr)  
Maubeuge  
+33 (0) 3 27 51 16 76



**CRITT-MDTS**

[www.critt-mdts.com](http://www.critt-mdts.com)  
Charleville-Mézières  
+33 (0) 3 24 37 89 89



**Matikem**

[www.matikem.com](http://www.matikem.com)  
Villeneuve d'Ascq  
+ 33 3 61 76 02 45



**POM Oost-Vlaanderen**

Gent  
+32 (0) 9 267 86 33



**Wallonie**

