

**SAMATAN**  
**LE 18 OCTOBRE 2018**



# **INSTRUMENTATION OPTIQUE AUTOUR DE LA FA LASER : EXEMPLES D'APPLICATION**

# PRESENTATION DU LABORATOIRE PIMM

## ● QUATRE équipes de recherche

### COMET

Comportement et  
microstructure des métaux

### P&C

Polymères et composites

### DYSCO

Dynamique structure,  
systèmes et contrôles

### LASER

Procédés LASER

## ● HUIT centres de ressources (CR)

Groupement des moyens techniques autour d'un champ d'expertise donné (LASER, microscopies, essais mécaniques,...)

## ● Effectif de 140 membres

- 60 permanents ;
  - 69 doctorants ;
  - 11 post-docs / ATER.
- (~40 stagiaires par an)

P.1

# PRESENTATION DE L'EQUIPE LASER

## ● Effectif

- 5 chercheurs et enseignants chercheurs ;
- 4 IT ;
- 11 doctorants et 2 post-docs.

## ● Moyens expérimentaux du CR LASER : deux plateformes

- Plateforme procédés thermiques LASER (FA, soudage, découpe, combustion);
- Plateforme choc laser (test d'adhérence LASAT, grenailage photonique LSP).

## ● Thématiques

- Étude de l'interaction laser/matière (couplage laser/poudre/ZF);
- Maîtrise et amélioration des procédés ;
- Simulation des procédés ;
- Microstructures et propriétés mécaniques ;
- Élaboration de matériaux innovants (composites, bi-matériaux);
- Traitements thermiques et mécaniques des matériaux.

# PLATEFORME PROCÉDÉS THERMIQUES LASER : MACHINES DE FA

## SLM SLM125HL (SLM Solutions)



- Volume utile : 125x125x75mm
- Atmosphère neutre (Ar ou N<sub>2</sub>)
  - > %O<sub>2</sub> ~ 100ppm
- CFAO sous Magix

## SLM MACHINE PROTOTYPE (ILS)



- Reproduction du processus d'étalement des machines industrielles
- Intégration de 2 lasers
- Intégration d'instrumentation

## LMD LENS 850R OPTOMECH

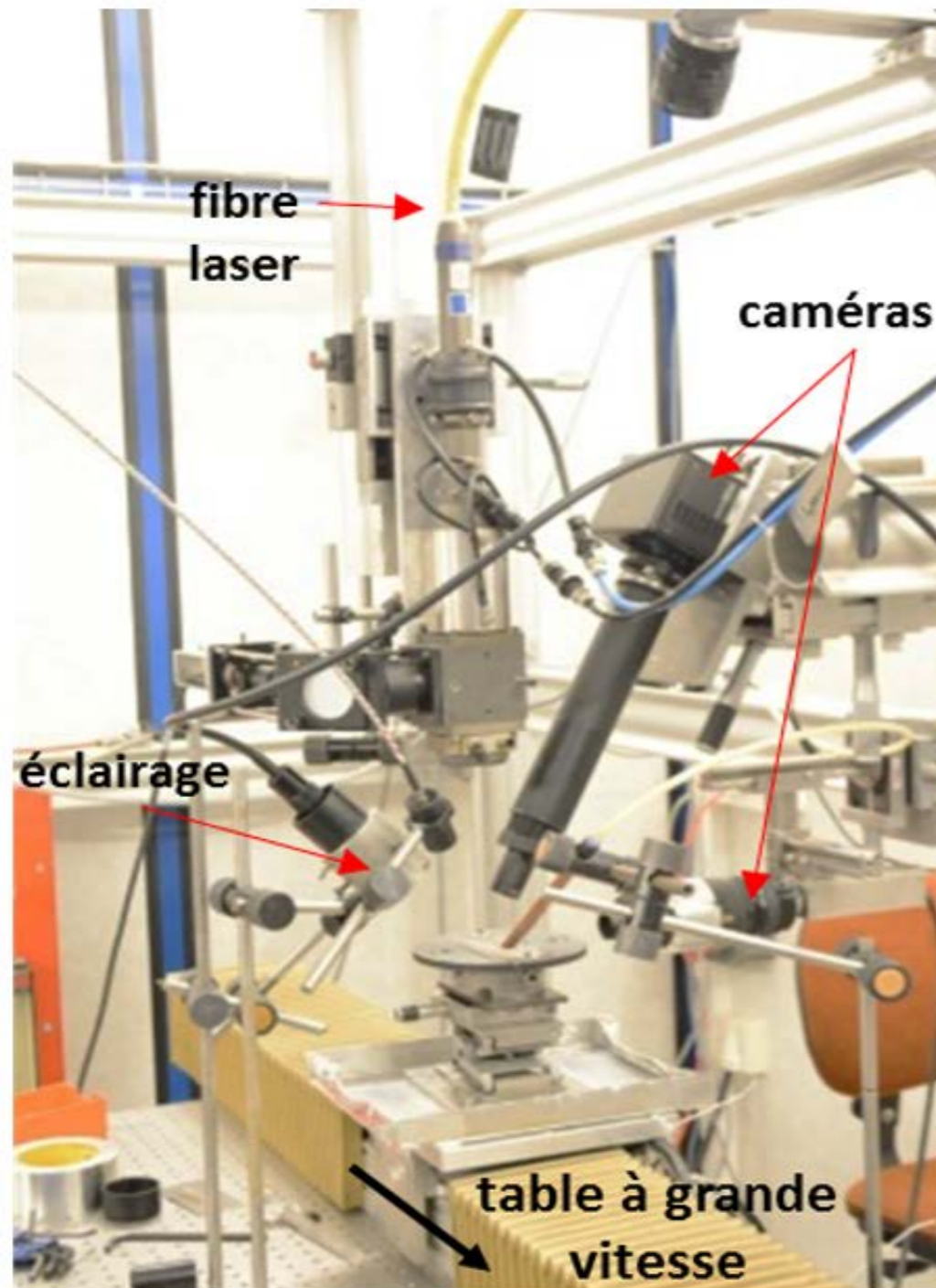


- Volume utile : 900x1500x900mm
- Atmosphère neutre (Ar)
  - > %O<sub>2</sub> < 50ppm (variation possible)
- 3 (X, Y et Z) + 2 axes (rotation et tilt)

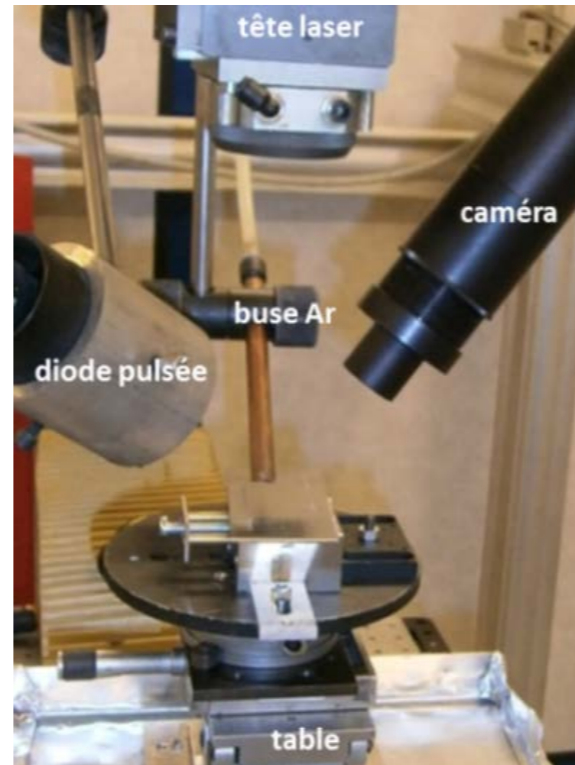
P.3

# PLATEFORME PROCÉDÉS THERMIQUES LASER : BANCS INSTRUMENTES DE SLM

## BANC SLM n°1



- Table à grande vitesse
- Protection locale



## BANC SLM n°2 (fin 2018)

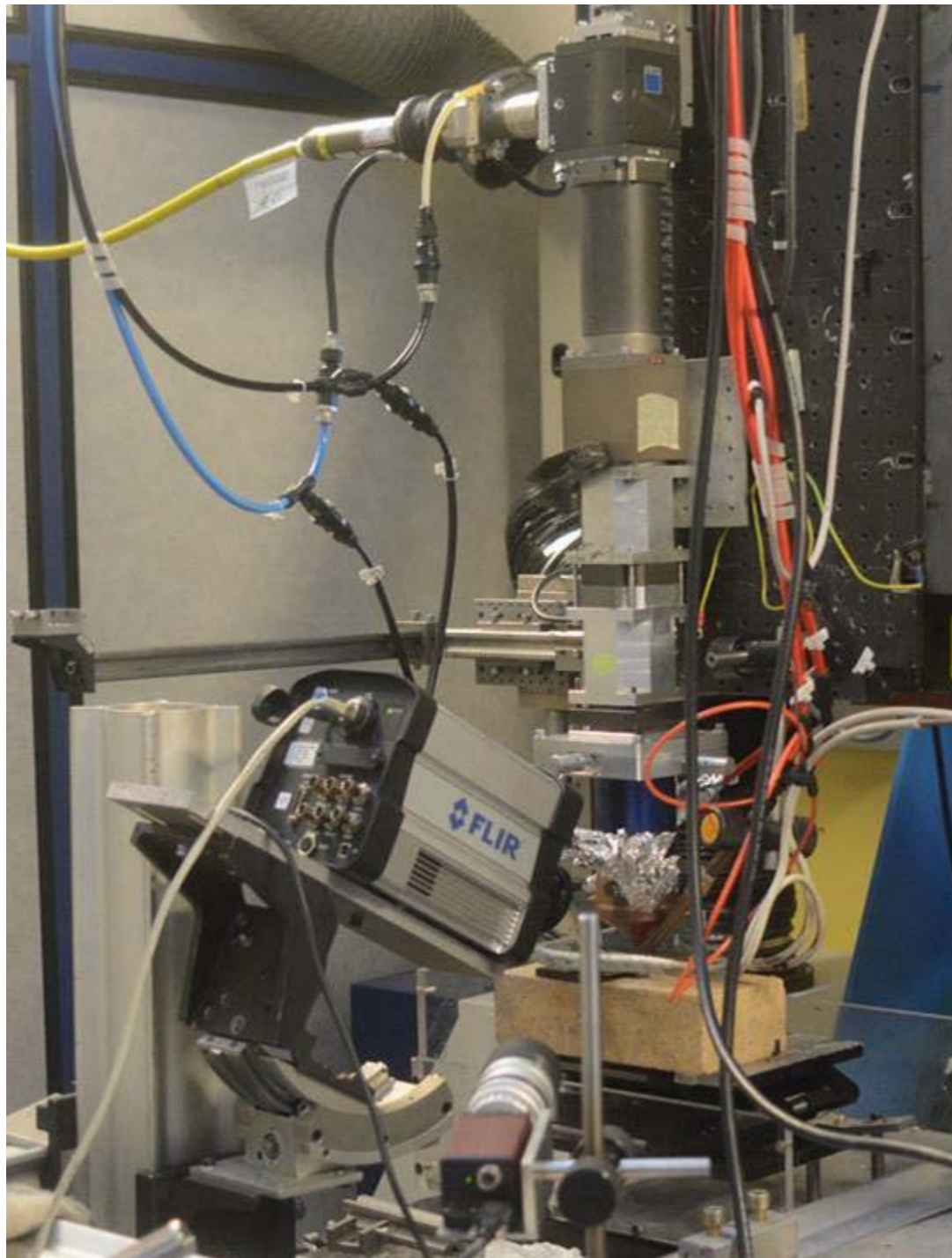
- Tête scanner proche IR
- Enceinte de protection avec hublots de visualisation

- Etude de l'interaction monocordon et multicordons
  - Etude matériaux
  - Test d'instrumentation
  - Recherche paramétrique

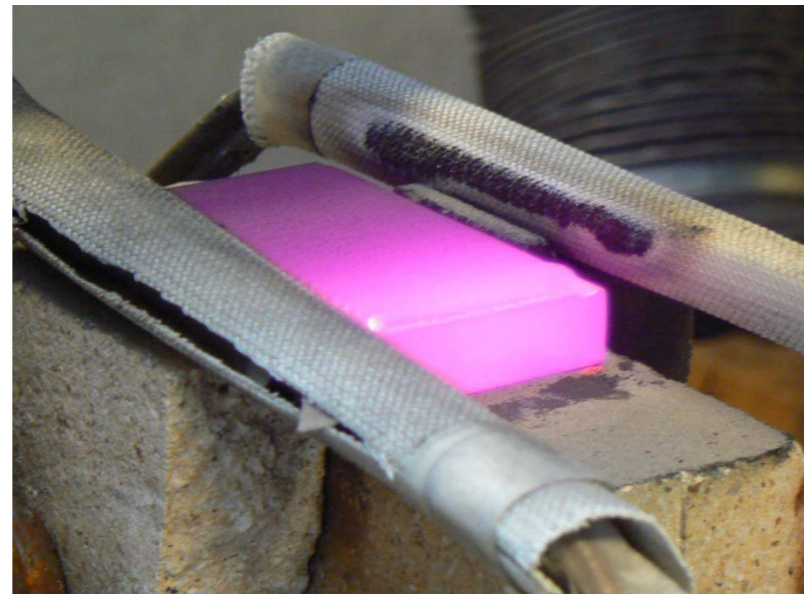
P.4

# PLATEFORME PROCÉDÉS THERMIQUES LASER : BANCS INSTRUMENTES DE LMD

## BANC LMD n°1



- 3 axes (X, Y et Z)
- Protection locale  
-> O<sub>2</sub> ~ 1000ppm
- Possibilité de chauffage par induction (> 400°C)



- Etude de l'interaction
- Etude et élaboration matériaux (composites, revêtements de surface)
- Test d'instrumentation
- Recherche paramétrique

## BANC LMD n°2 (2019)

Banc de caractérisation des buses de projection

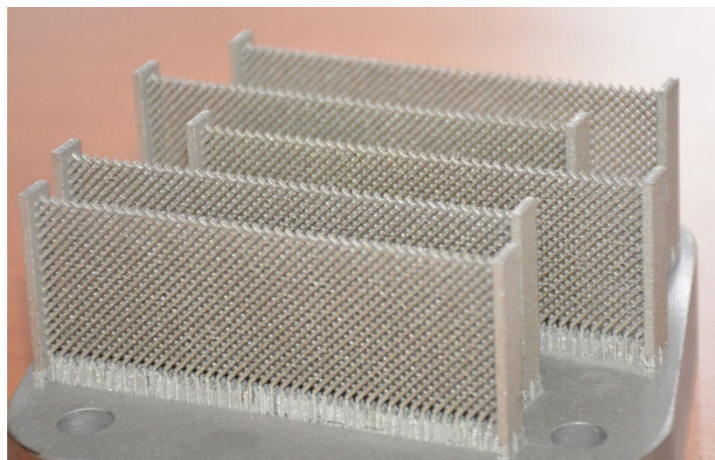
**P.5**

# PLATEFORME PROCÉDÉS THERMIQUES LASER : EXEMPLES DE REALISATIONS

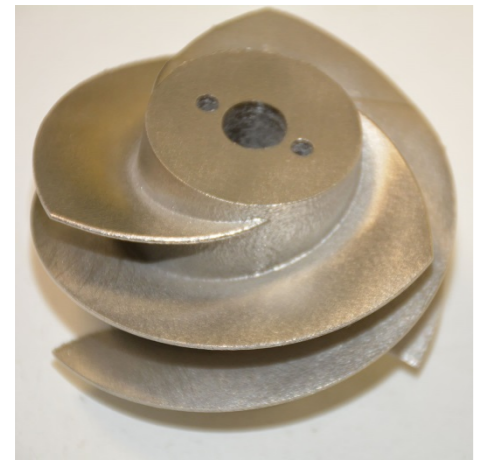
## ● SLM



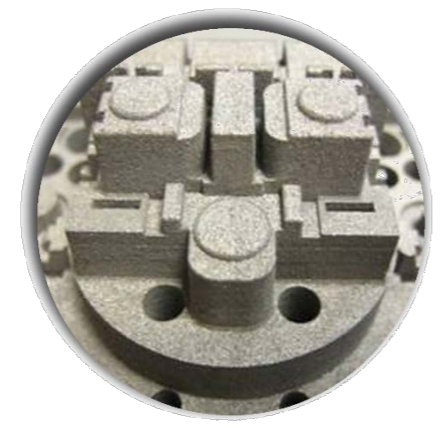
Fusée de « Tintin »



Murs architecturés en 316L  
(épreuves mécaniques)



Inducteur  
en 316L



Moules d'injection plastique  
avec canaux de refroidissement  
Matériaux : 904L  
Dimensions : 100x83mm

## ● LMD



Pièce composite à  
matrice titane  
(TA6V + 3% B<sub>4</sub>C)



Rehausse  
compresseur  
TA6V - Recalage 3D



Réparation sommet  
Aube en MC2  
(monocrystal)

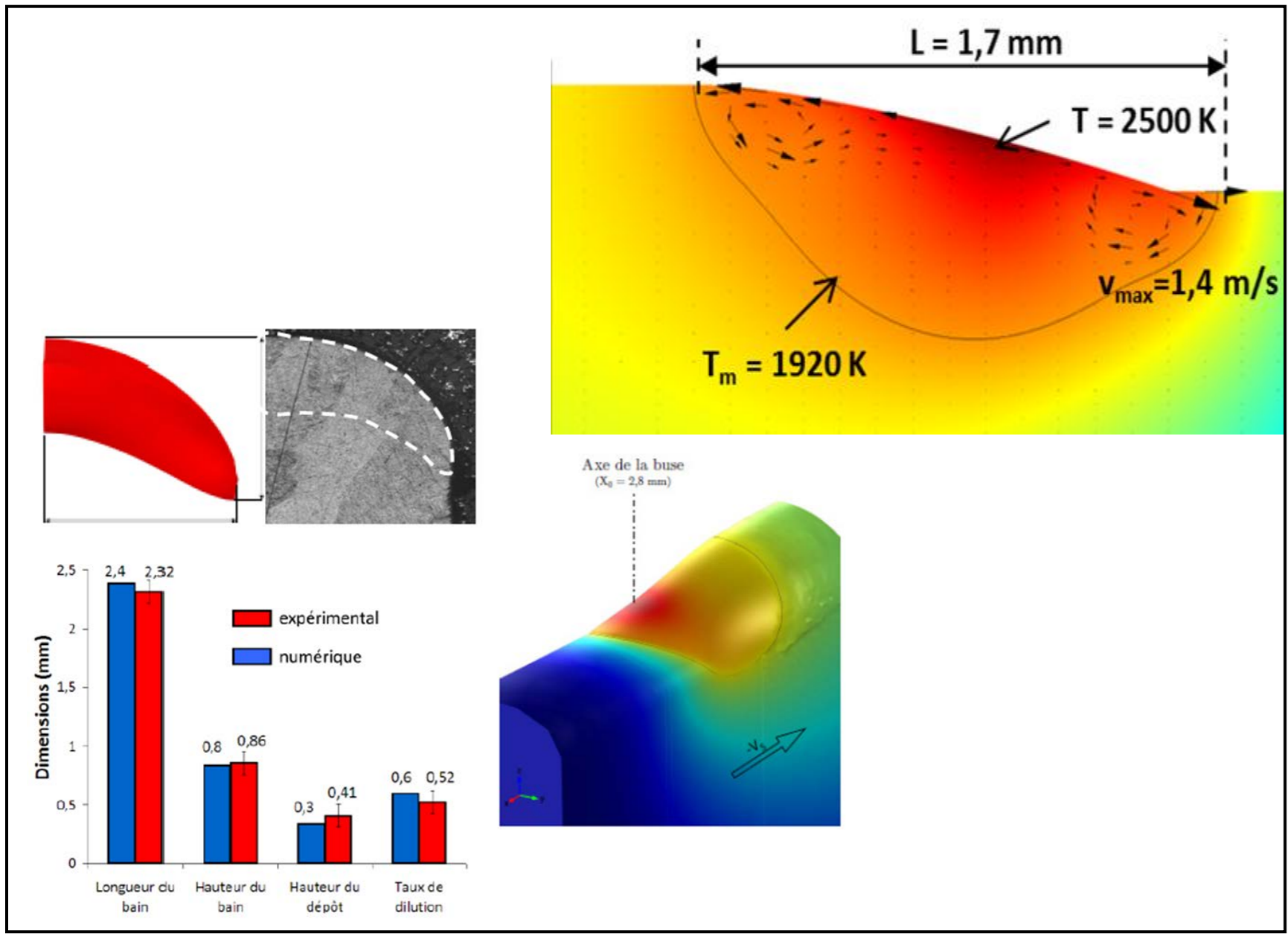


Dépôt aluminium / TA6V

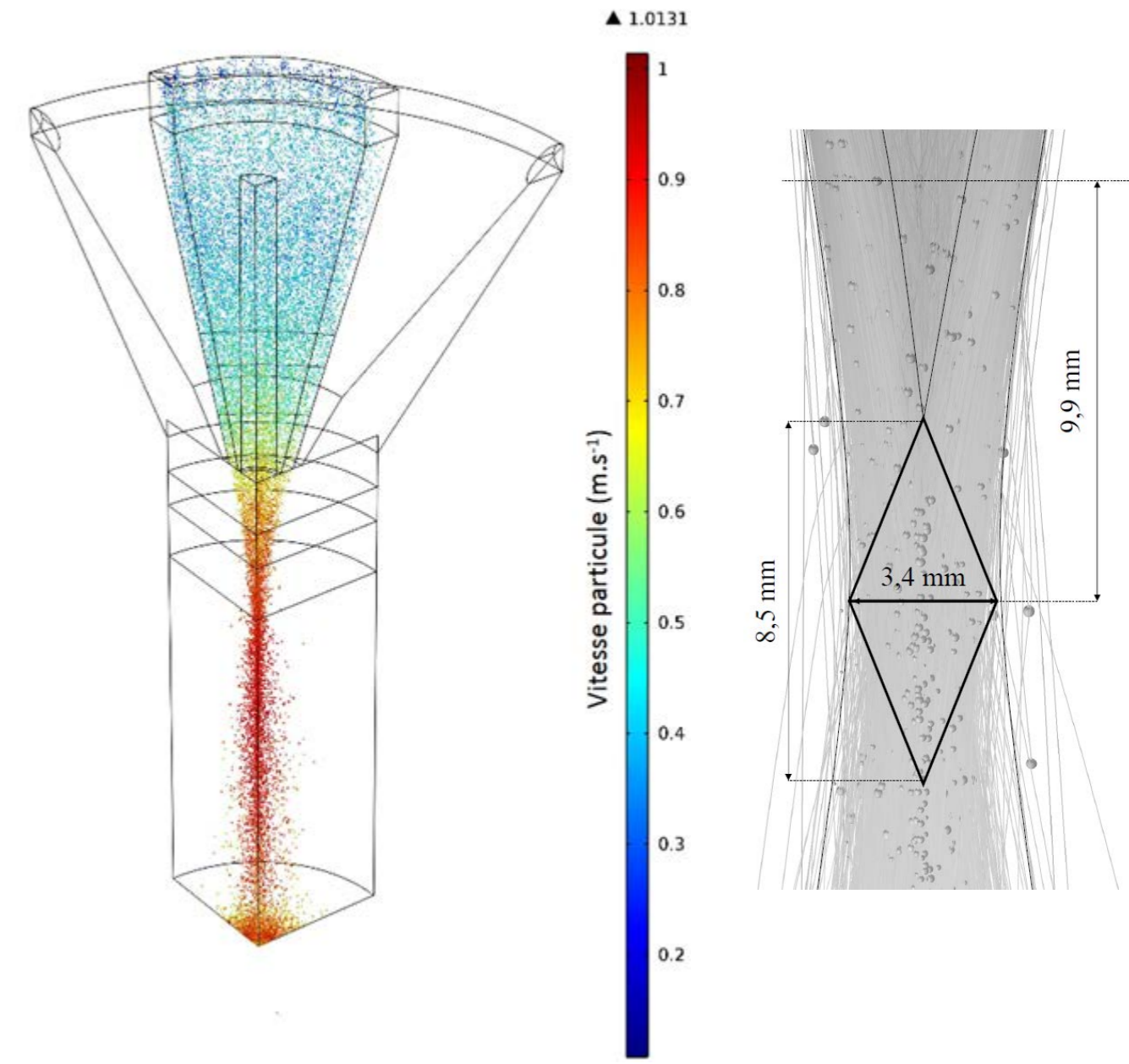


Dépôt TRIBALLOY700 / Inox  
(utilisation d'un préchauffage à 500°C)

# L'INSTRUMENTATION OPTIQUE POURQUOI FAIRE ?



Géométrie, champ de vitesse et température de la zone fondue



Simulation de la buse de projection

Sources : S.MORVILLE, COMSOL Int. Conf. (2010)  
S.MORVILLE, M. CARIN, J. Las.Appl. (2012)  
P.PEYRE, M.DAL, Icaleo'16 (2016)

- Implémentation de codes prédictifs
- Monitoring et contrôle procédé



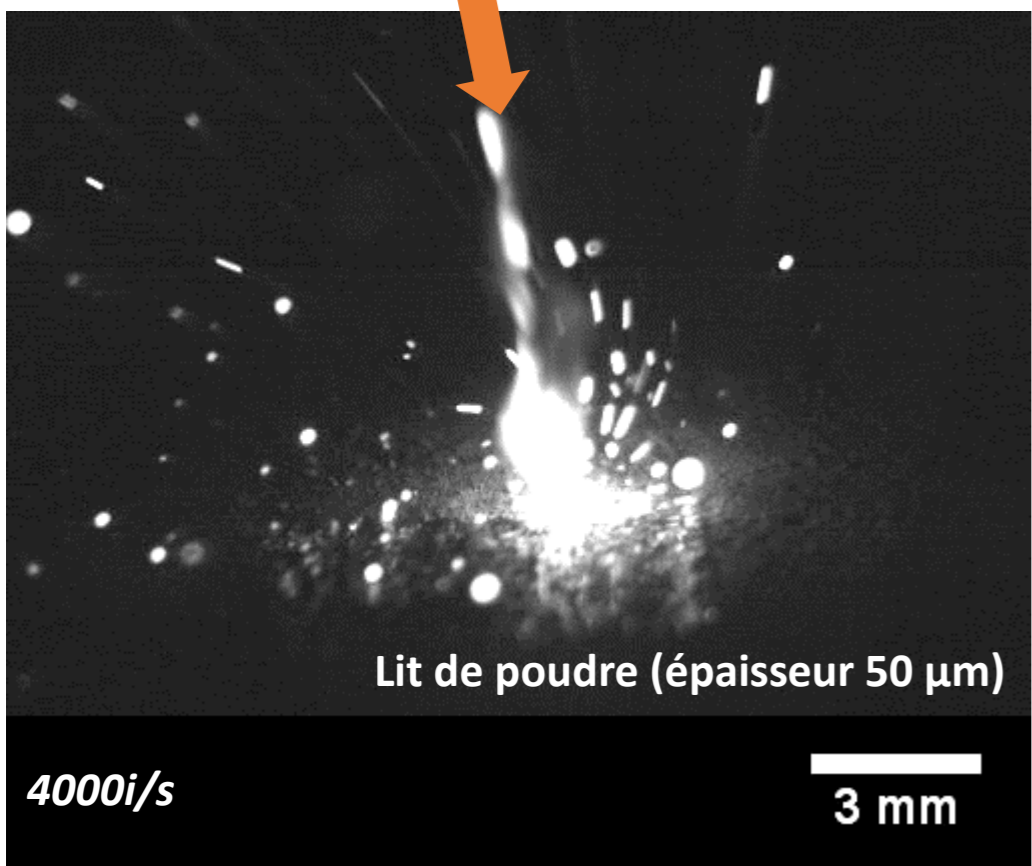
# OBSERVATION GENERALE DU PROCEDE SLM



*Vision à travers le hublot d'une machine SLM125HL*

# OBSERVATION DE LA ZONE FONDUE EN SLM (1)

Laser fibre  $\lambda = 1070 \text{ nm}$  ( $D_{\text{spot}} = 70\text{-}100 \mu\text{m}$ )

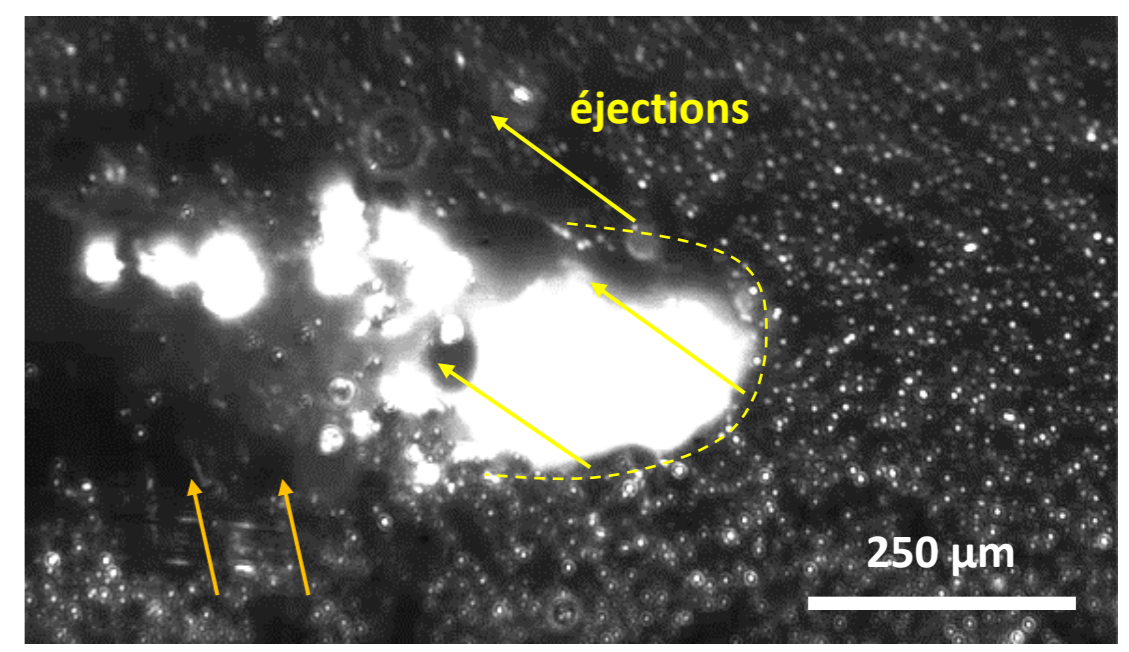


Fusion de 316L ( $P = 400\text{W} - V = 1\text{m/s}$ )  
dans une machine SLM125HL

A  $0^\circ$  d'inclinaison



A  $50^\circ$  d'inclinaison



$P = 520 \text{ W} - V = 0,33 \text{ m/s}$

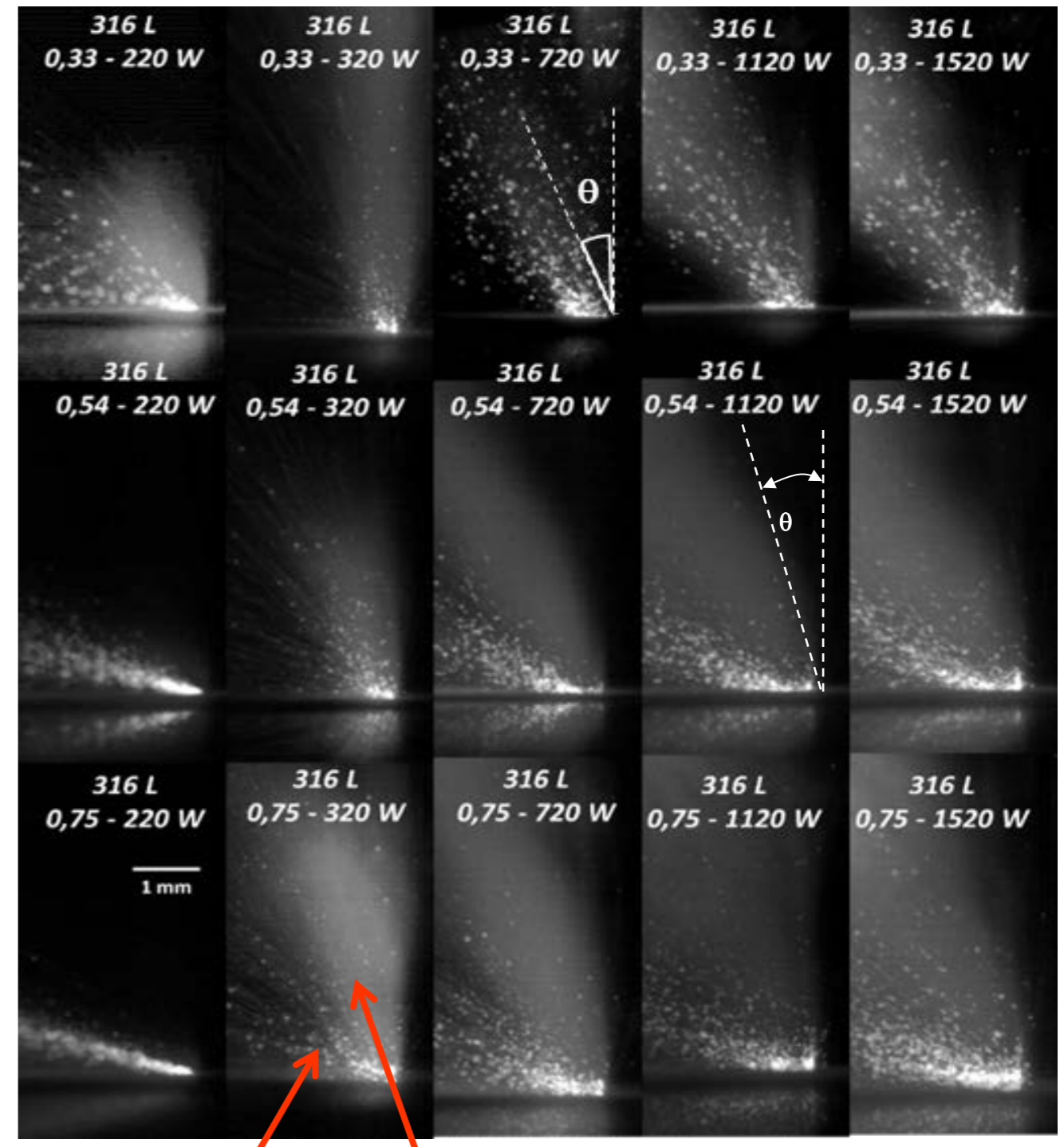
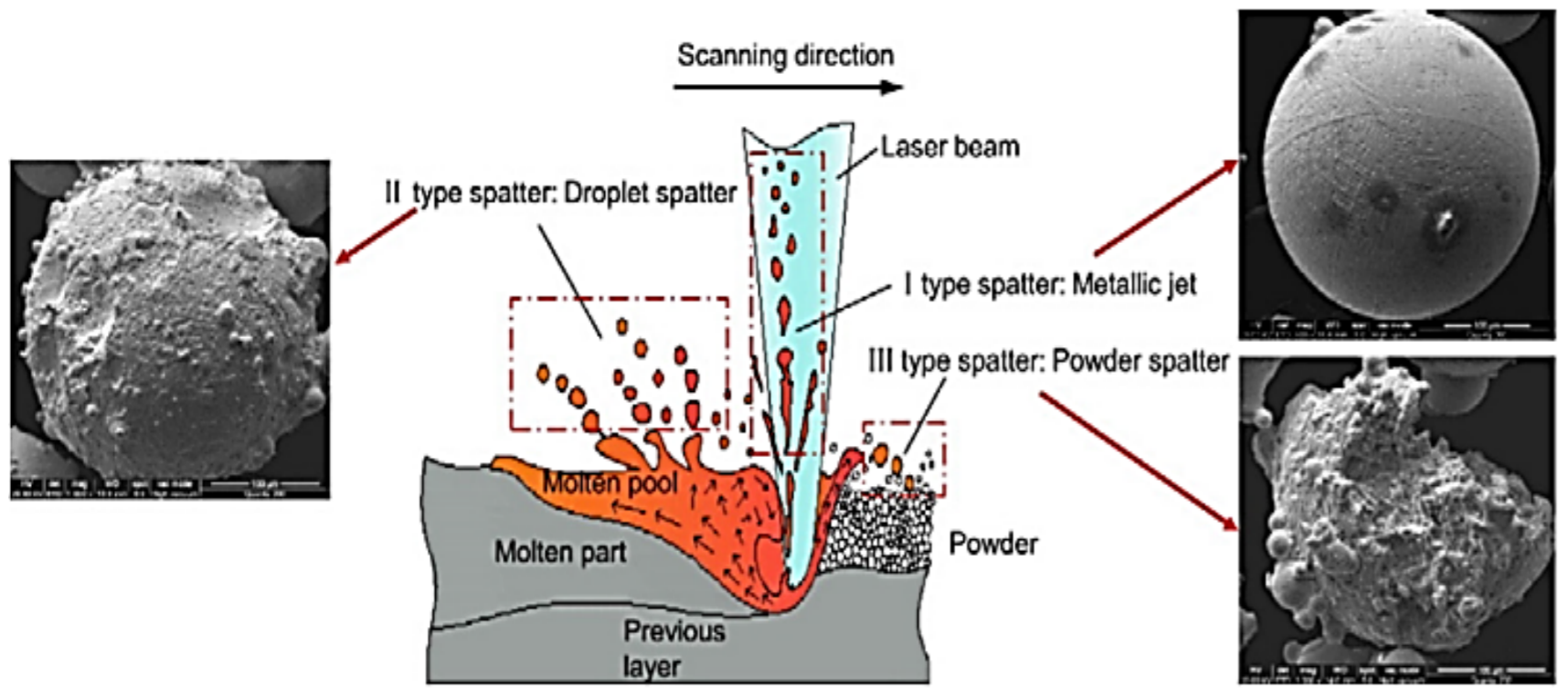
12500i/s

Visualisation sur banc instrumenté

Éjections + fumées + instabilités de la Zone Fondue  
→ Contamination du lit de poudre, dégradation des matériaux

Source : Thèse V. GUNENTHIRAM

# OBSERVATION DE LA ZONE FONDUE EN SLM (2)



éjections    vapeur

P ↗

Sources : Thèse V. GUNENTHIRAM  
WONG, Mat & Design (2017)

# DIAGRAMME DE STABILITE DE LA ZONE FONDUE EN SLM

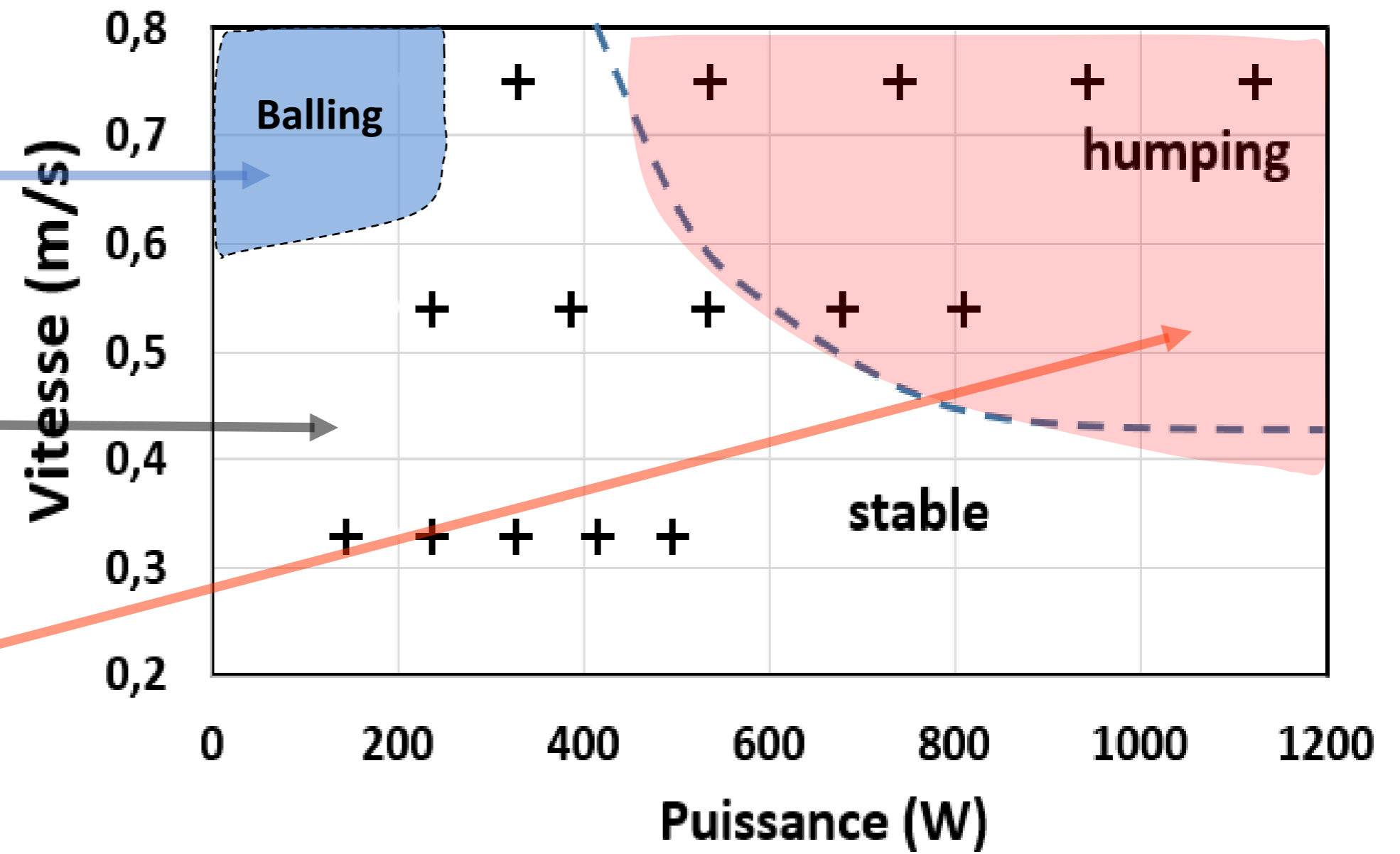
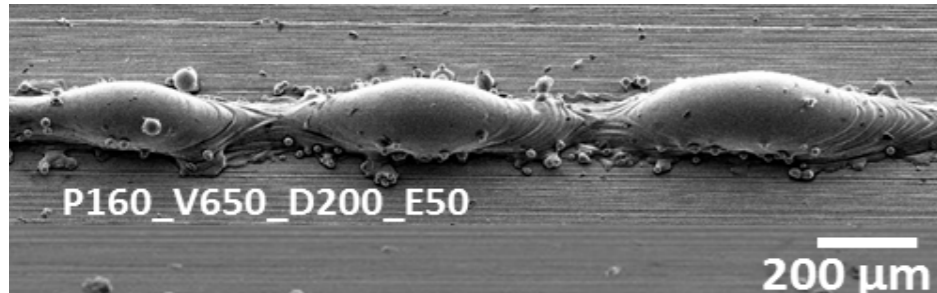
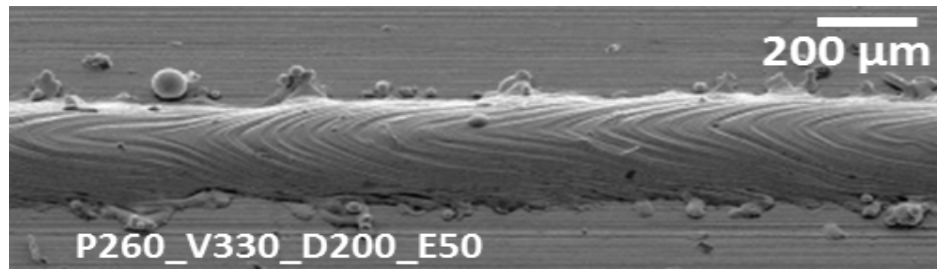
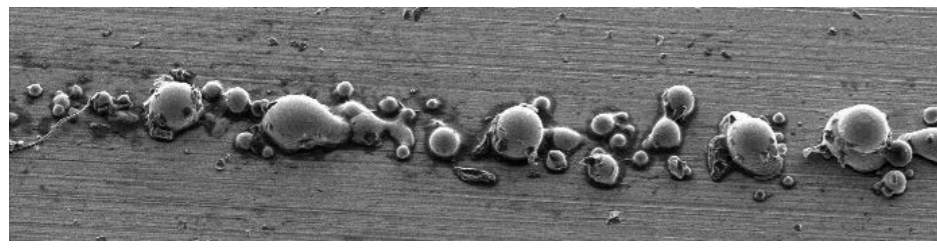
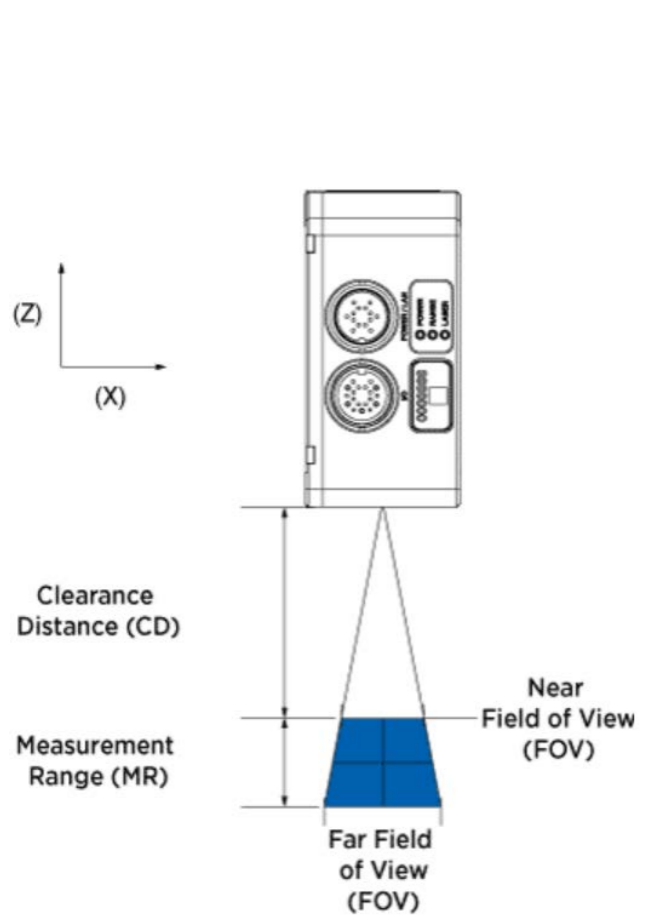


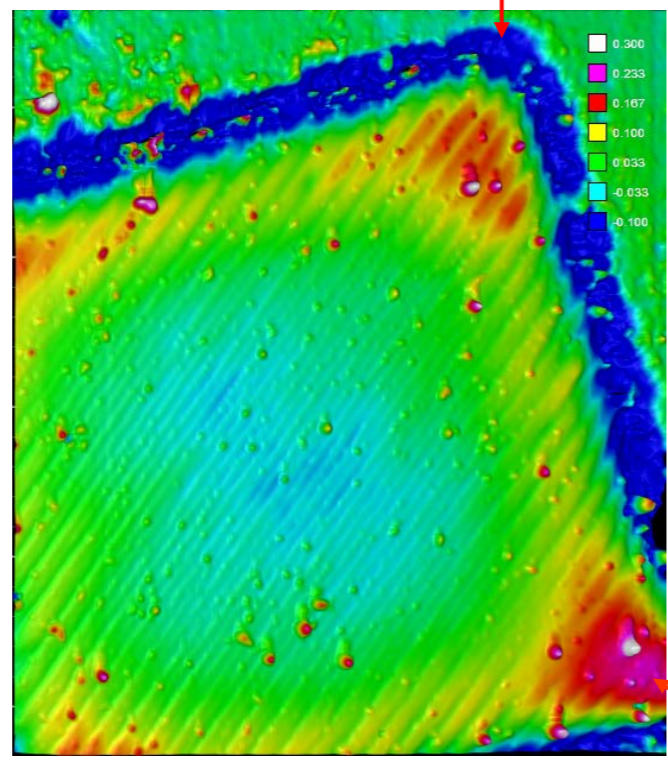
Diagramme pour un lit de poudre de 50μm

Rétrécissement de la zone stable si augmentation de l'épaisseur de poudre

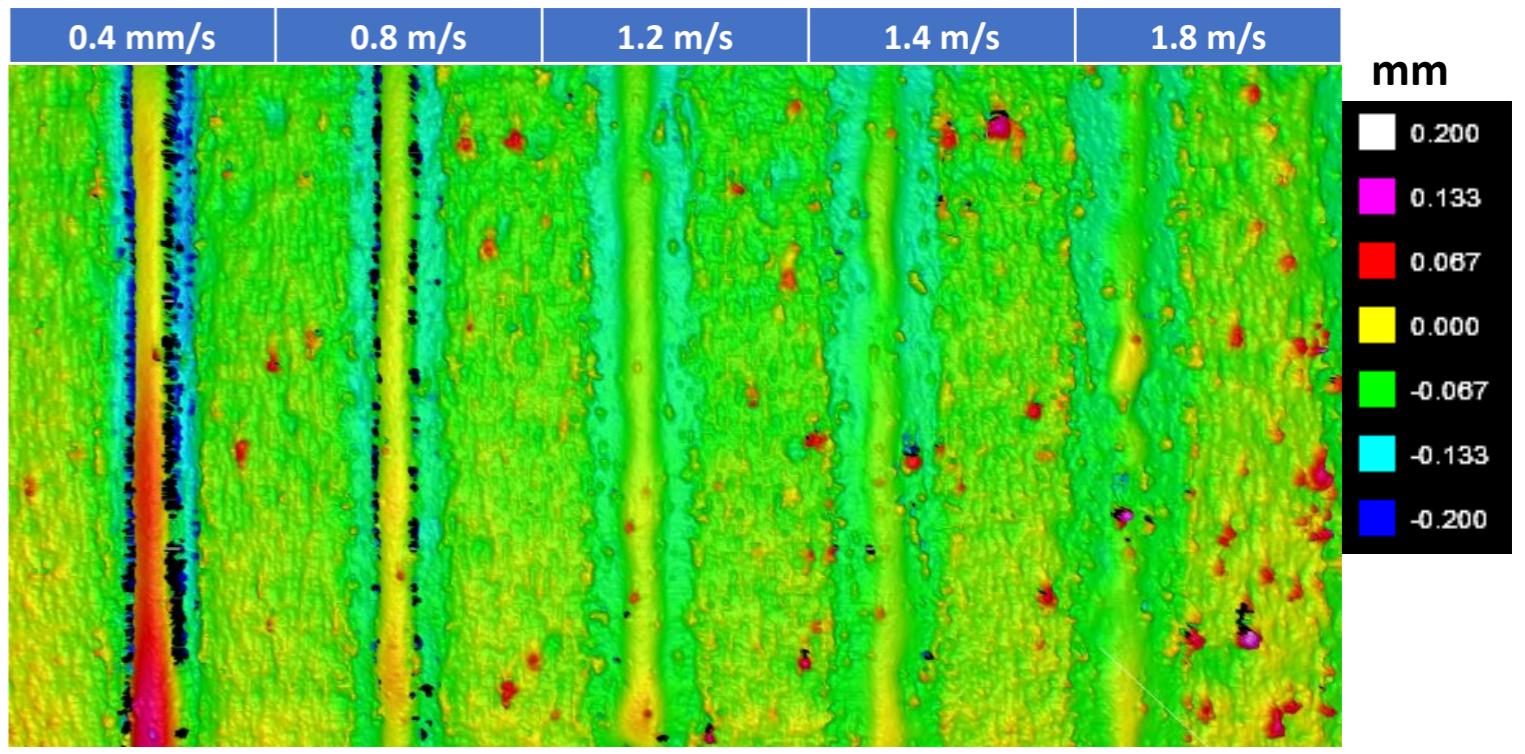
# CARACTERISATION DE SURFACE LIT DE POUDRE ET PARTIE FUSIONNEE



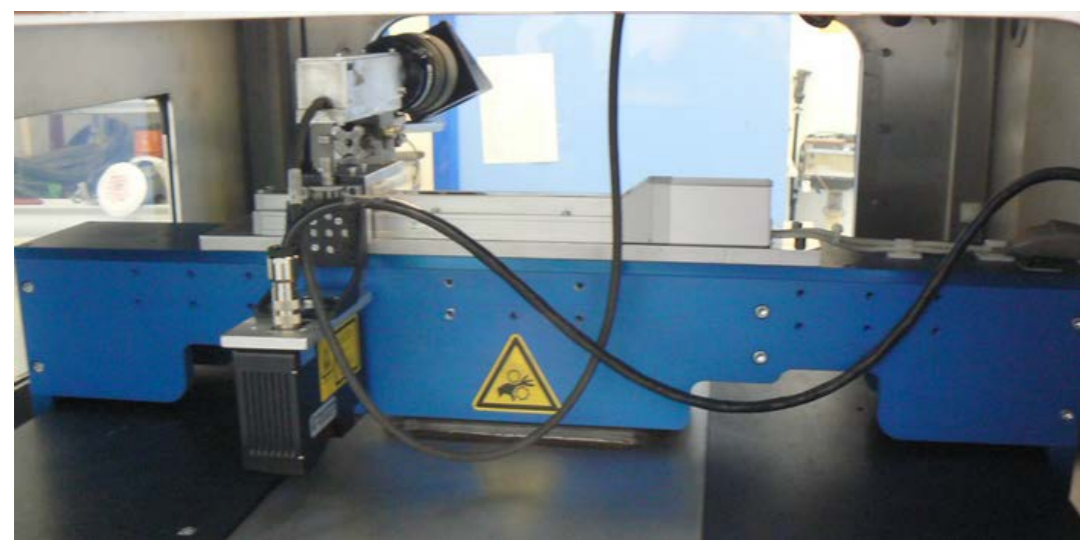
Dénudation



2kW



Surépaisseur



- Mise en évidence des zones dénudées
- Augmentation des projections avec l'augmentation de la VED
  - Phénomène de humping pour la VED la plus élevée
- Dispositif lent

# MESURE DE TEMPERATURE EN SLM (1)

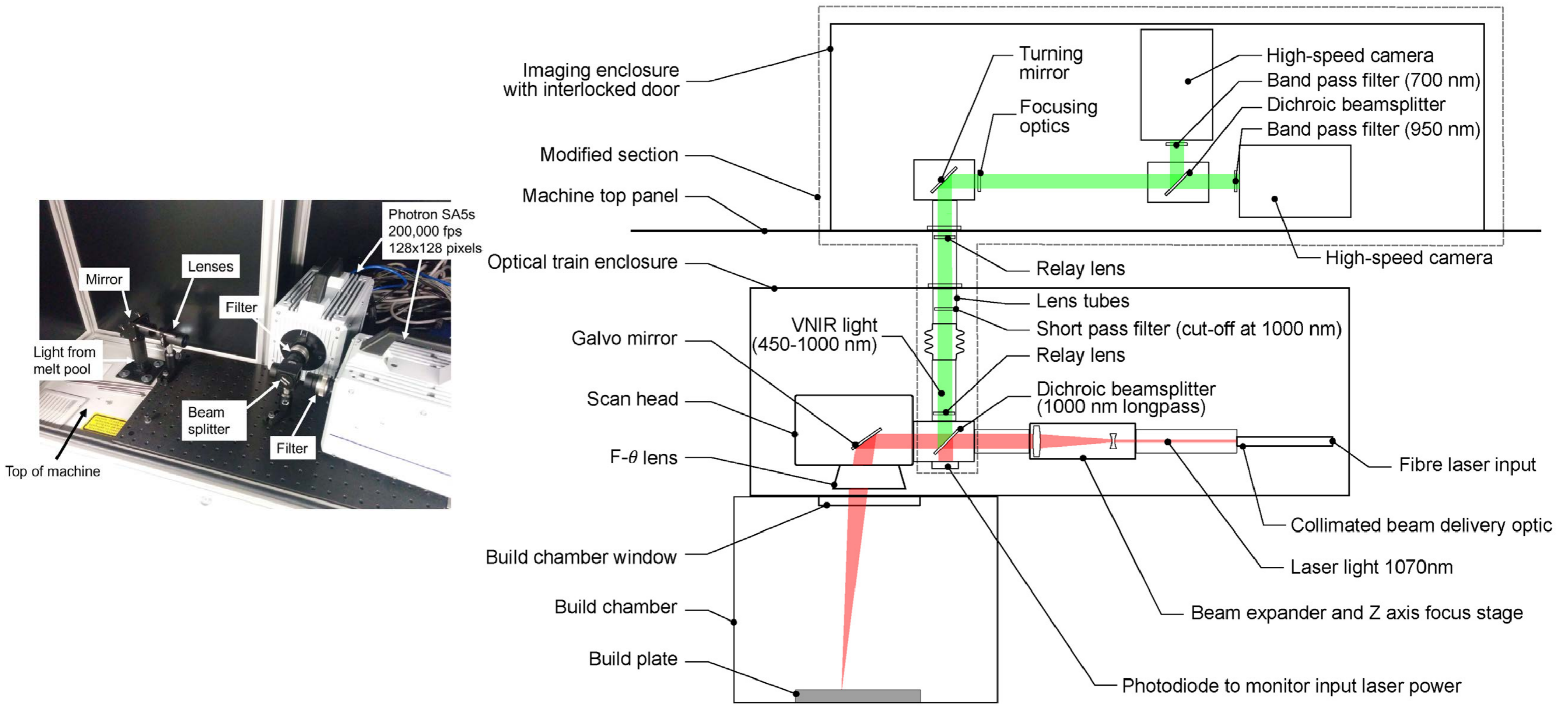
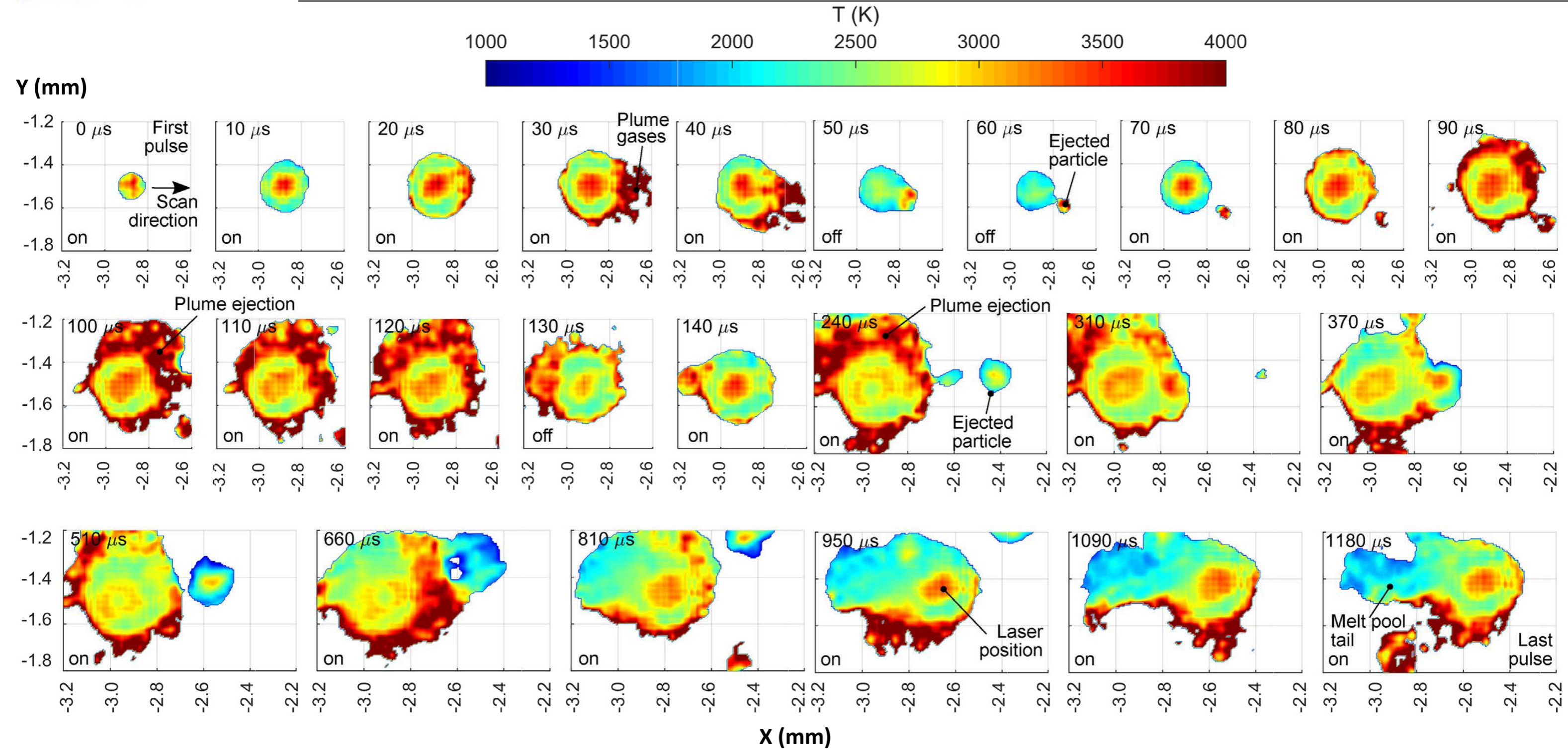


Schéma d'une tête scanner instrumentée équipant une Renishaw AM250

Source : PAUL A. HOPPER, Additive Manufacturing 22 (2018)

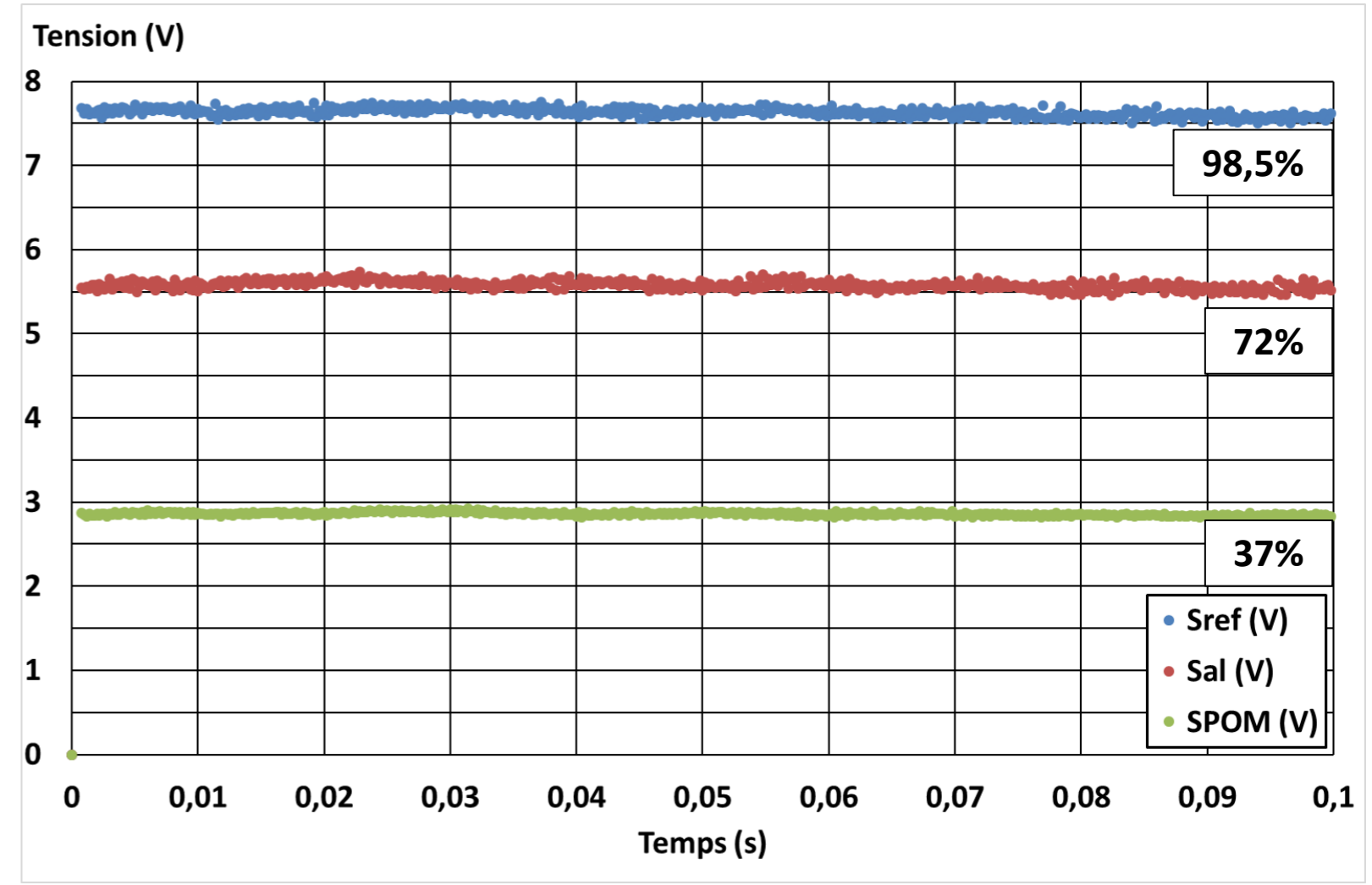
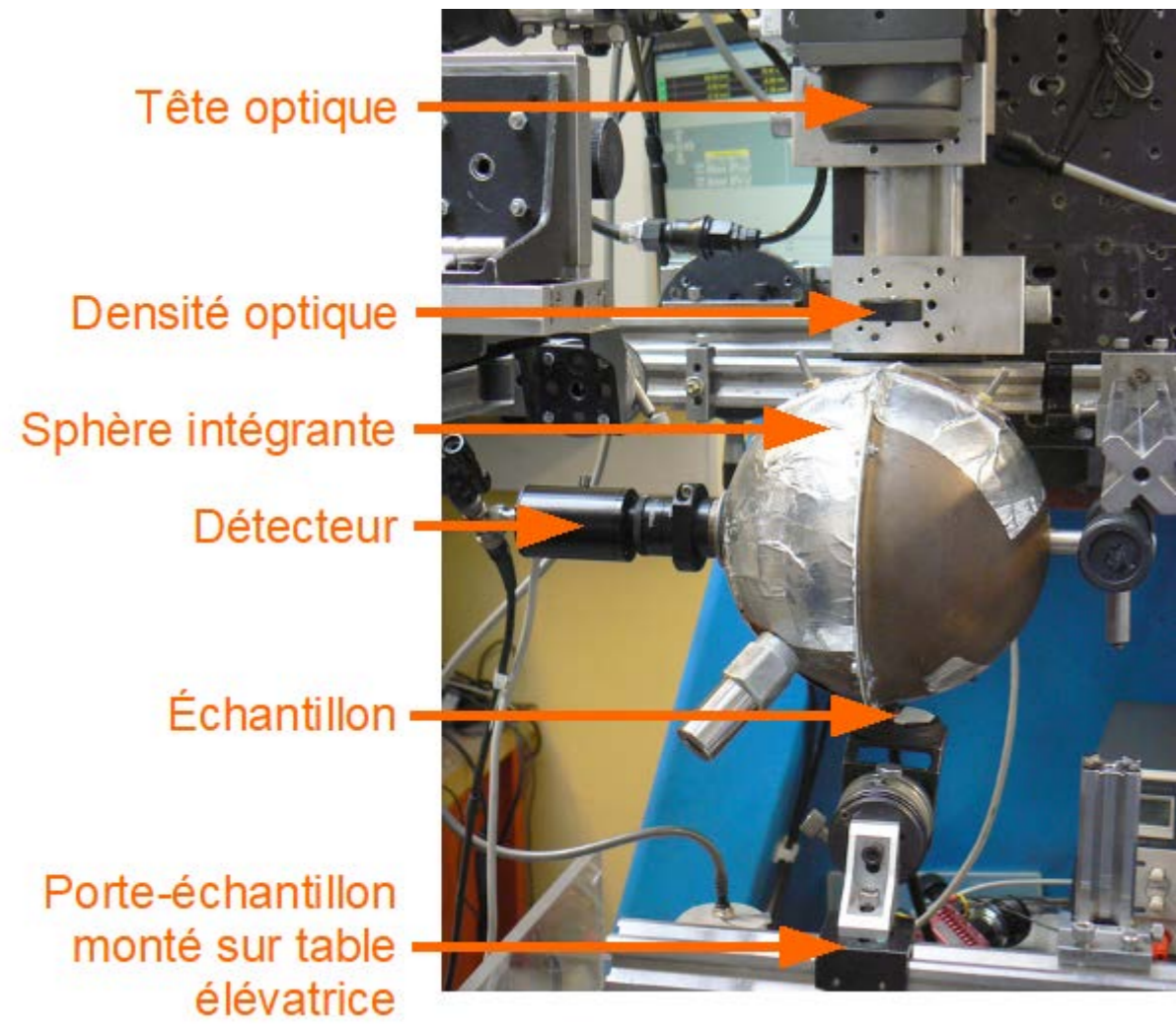
# MESURE DE TEMPERATURE EN SLM (2)



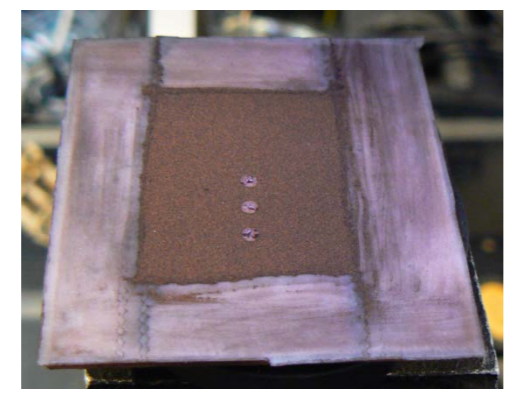
Chronogramme de la première ligne de remplissage de la couche 142 d'une forme rectangulaire

Source : PAUL A. HOPPER, Additive Manufacturing 22 (2018)

# PROPRIETES MATERIAU REFLECTIVITE DU LIT DE POUDRE



Signaux mesurés par la photodiode et réflectivités associées pour  $\lambda = 1030\text{nm}$



Exemple de lit de poudre à caractériser

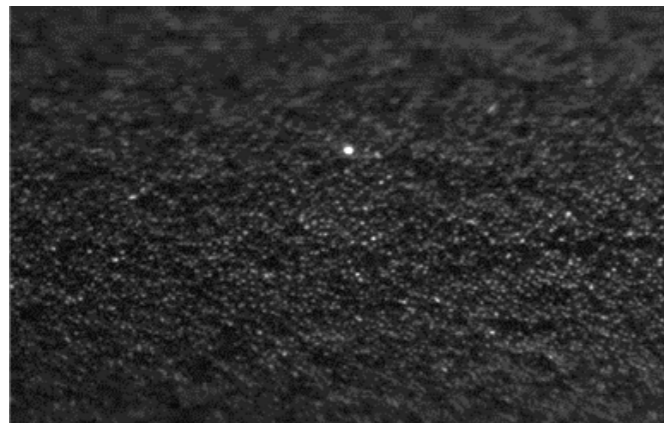
- Réflectivités aux états solide et/ou liquide avec une précision de l'ordre de 1%
  - Configuration en réflexion spéculaire + diffusée (configuration en réflexion spéculaire uniquement possible)



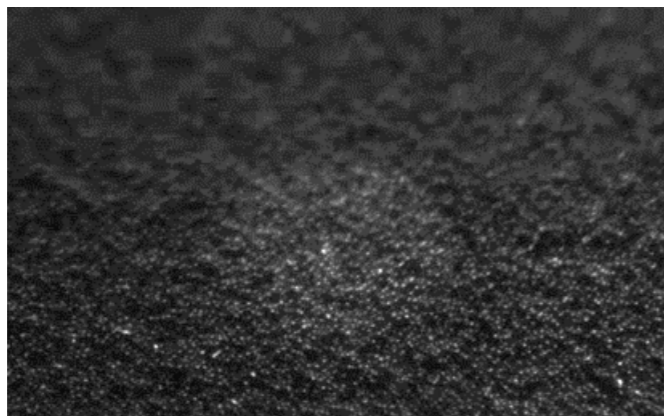
# COMPORTEMENT D'UN LIT DE POUDRE FACE AU RAYONNEMENT LASER

Tir statique : 280 W ( $D_{\text{spot}} = 200 \mu\text{m}$  @ 5500Hz)

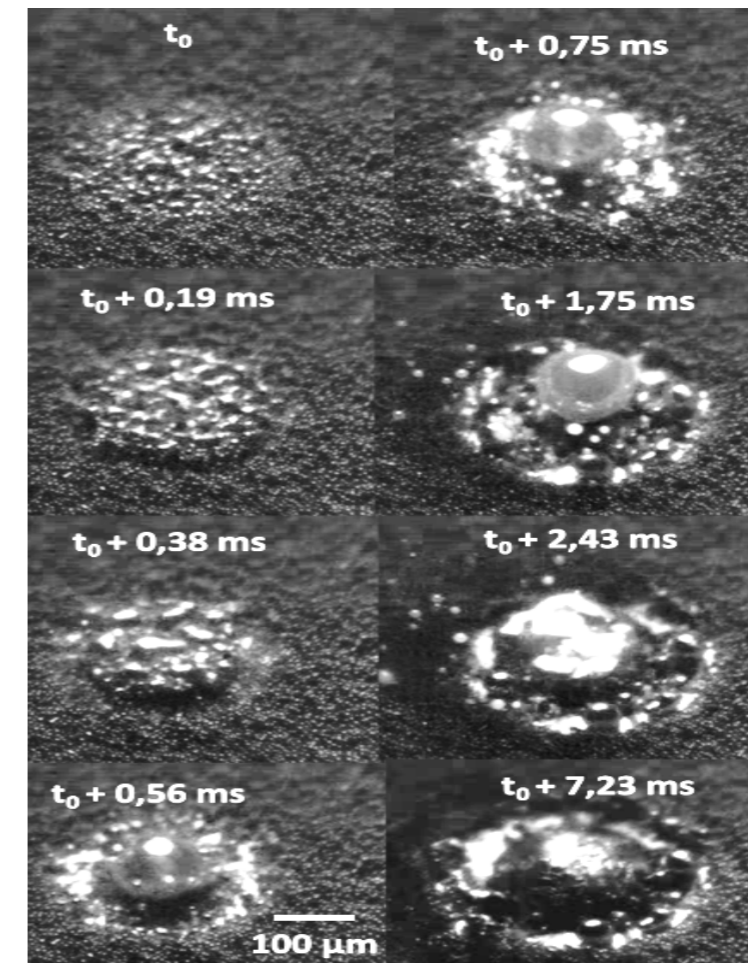
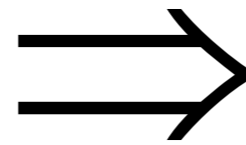
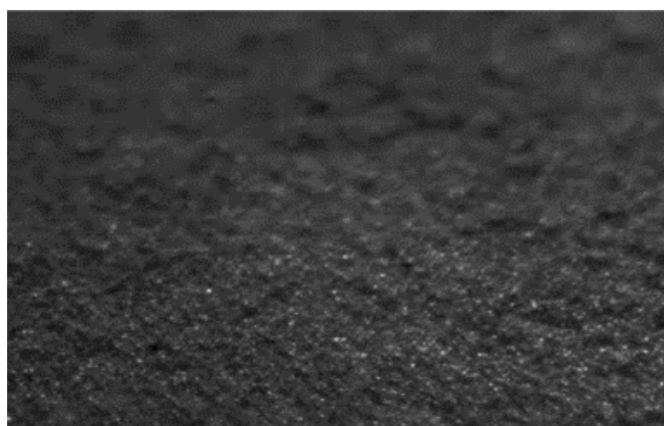
316 L



4047 (Al-12Si)



5086 (Al-4.5Mg)



Chronogramme de changement d'état

Alloy	$\rho^*$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$T_m$ (K)	$T_{\text{vap}}$ (K)	$\lambda^*$ (W/m.K)	$C_p^*$ (J/Kg.K)	$\alpha^*$ ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	$\Delta H_{\text{vap}}$ (kJ/kg)	$\eta$ (Pa.s)	$\sigma$ (N/m)
316L	7100	1700	2850	28	750	5.3	6300	0.007	1.7
A4047	2550	845	2700	68	1150	23	10900	0.0012	0.9

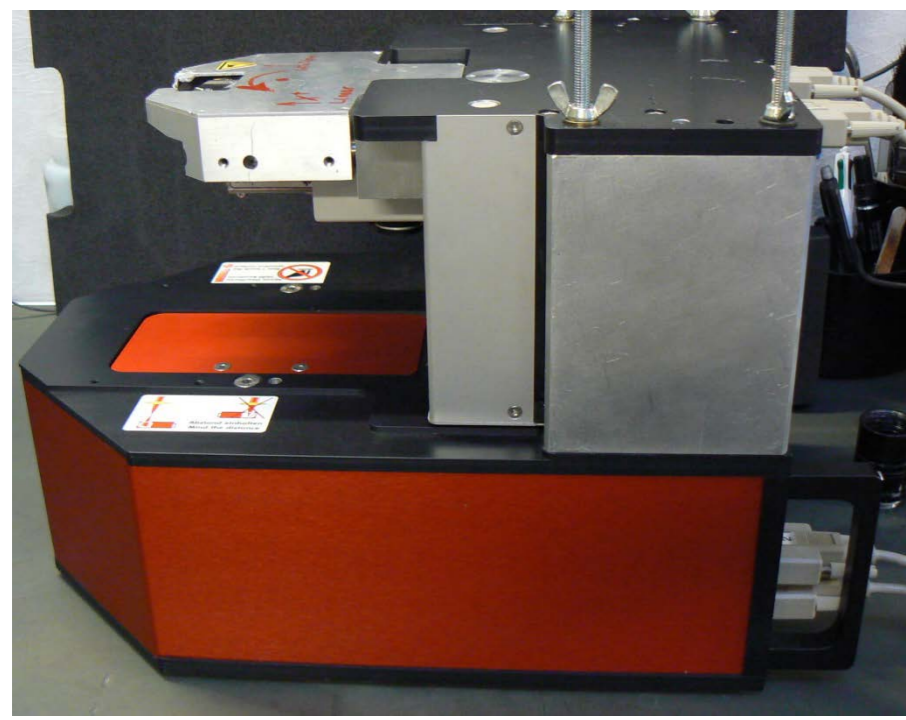
\*at the melting point

Source : Thèse V. GUNENTHIRAM

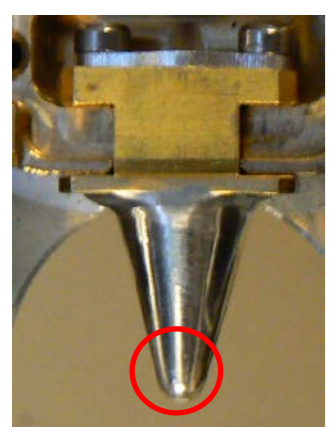
P.16

# ANALYSE DE FAISCEAU (1)

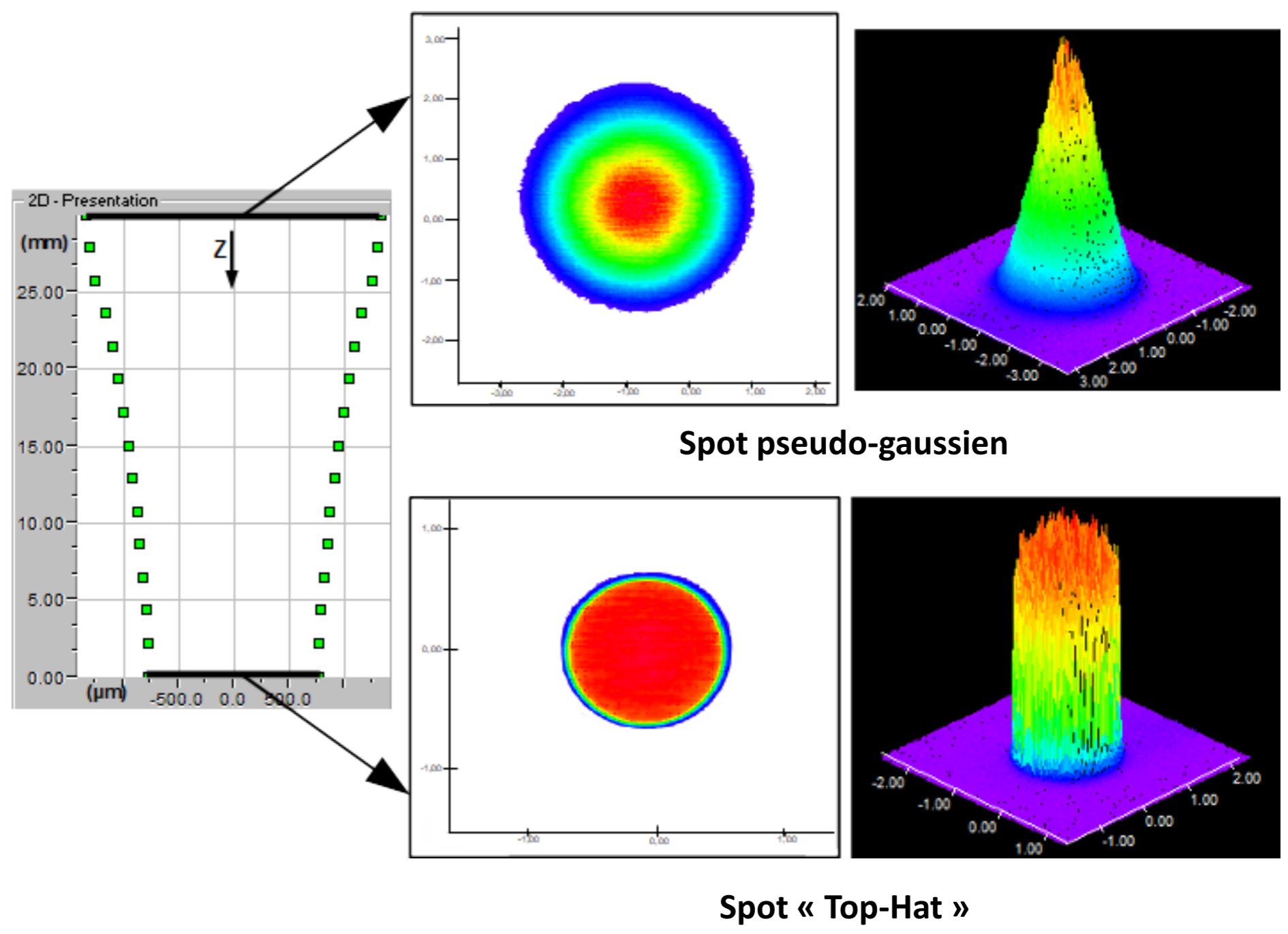
## EXEMPLE SUR UNE TÊTE OPTIQUE DE LMD



Analyseur de faisceau PRIMES

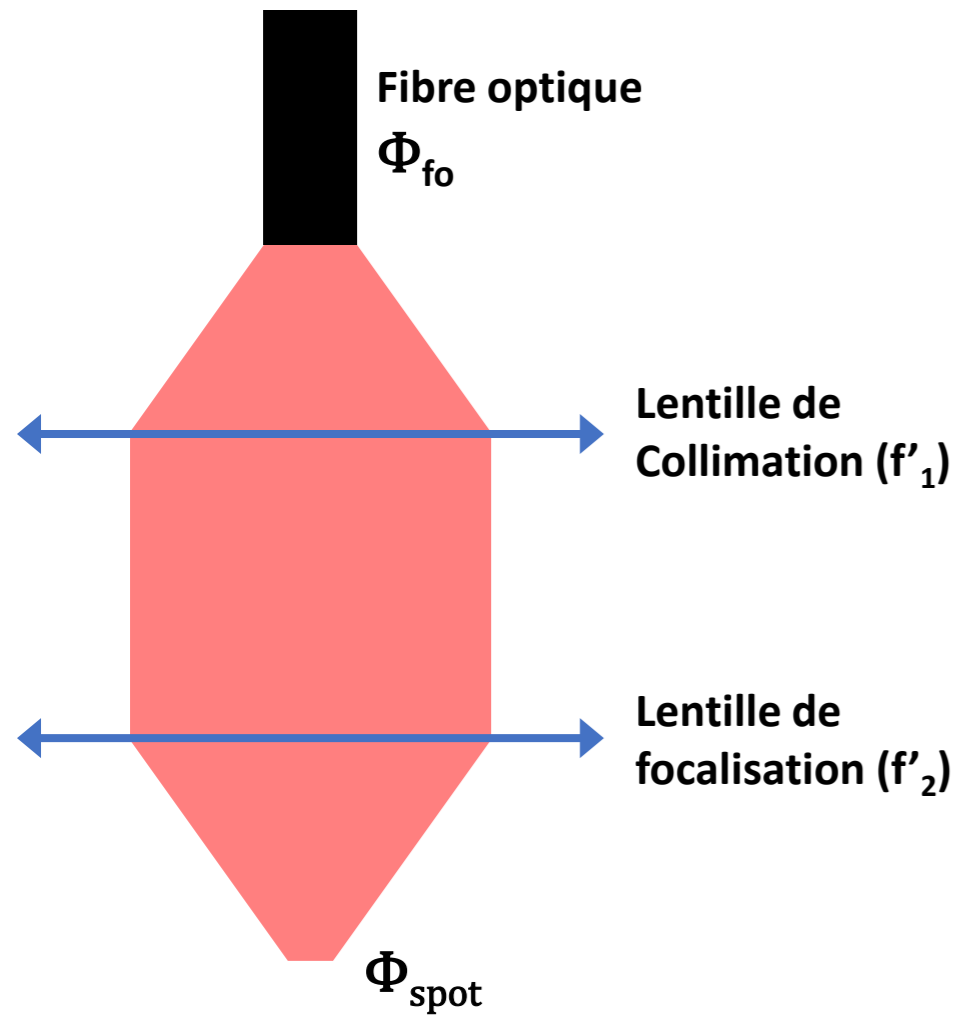


Doigt avec un pinhole de 17µm



# ANALYSE DE FAISCEAU (2)

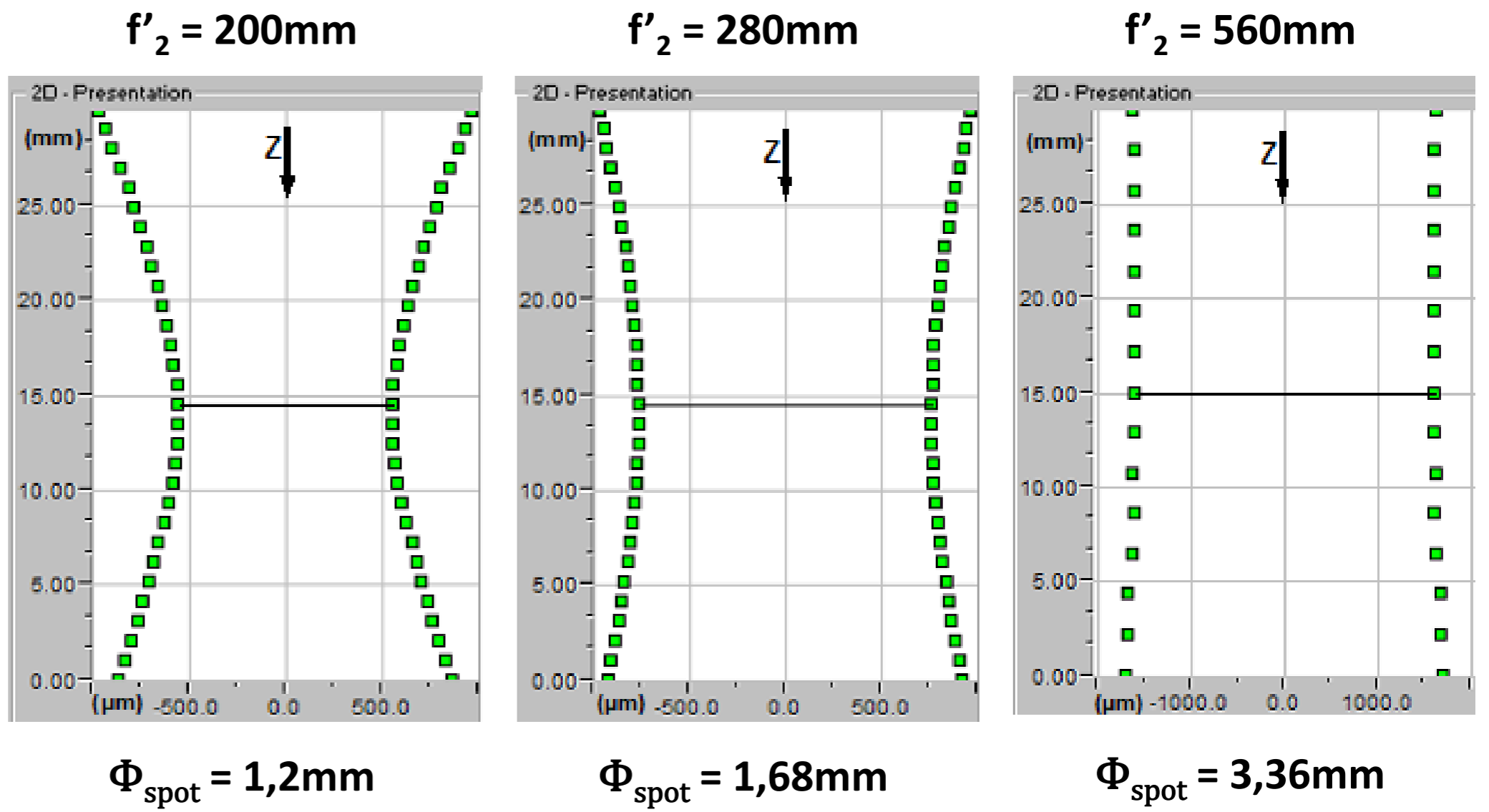
## EXEMPLE SUR UNE TÊTE OPTIQUE DE LMD



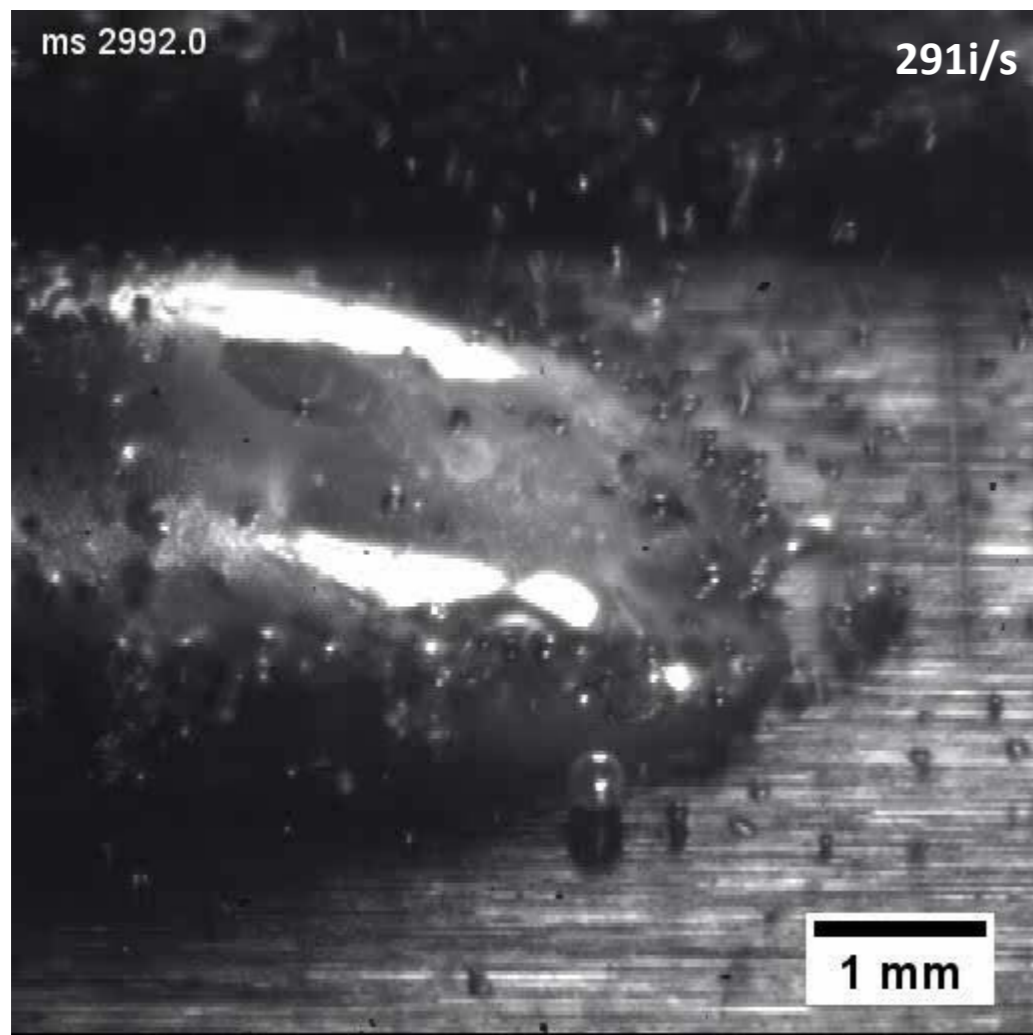
$$\Phi_{spot} = \Phi_{fo} \times \frac{f'_2}{f'_1}$$

Exemples à P = 1000W :

- Fibre optique de diamètre  $\Phi_{fo} = 600\mu\text{m}$
- Lentille de collimation de focale  $f'_1 = 100\text{mm}$

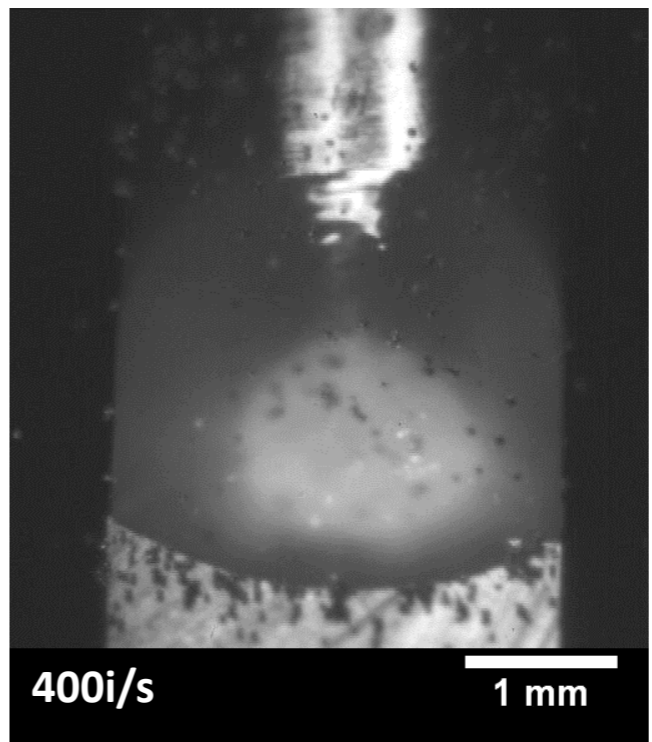


# OBSERVATION DE LA ZONE FONDUE EN LMD

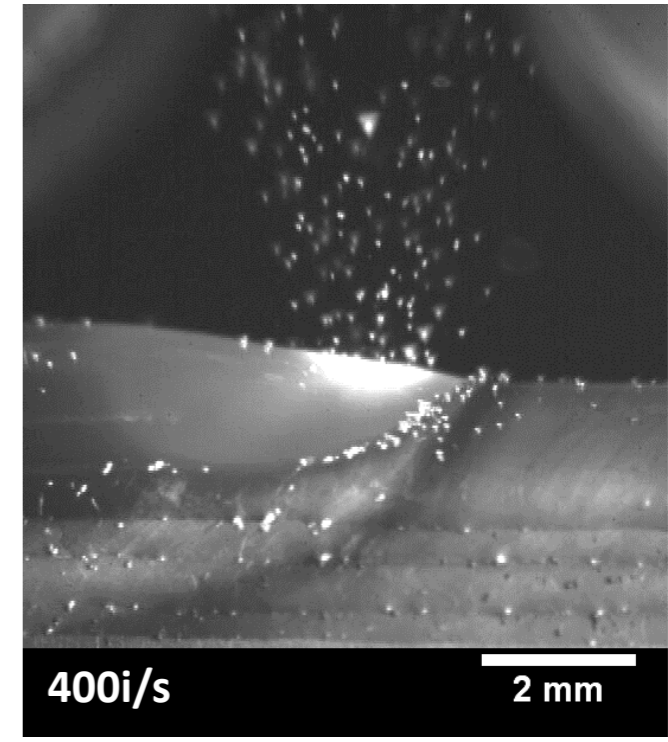


Dépôt d'un revêtement de surface base nickel sur substrat de 316L  
 $P = 600W - V = 3,33mm/s - D_m = 5g/min$

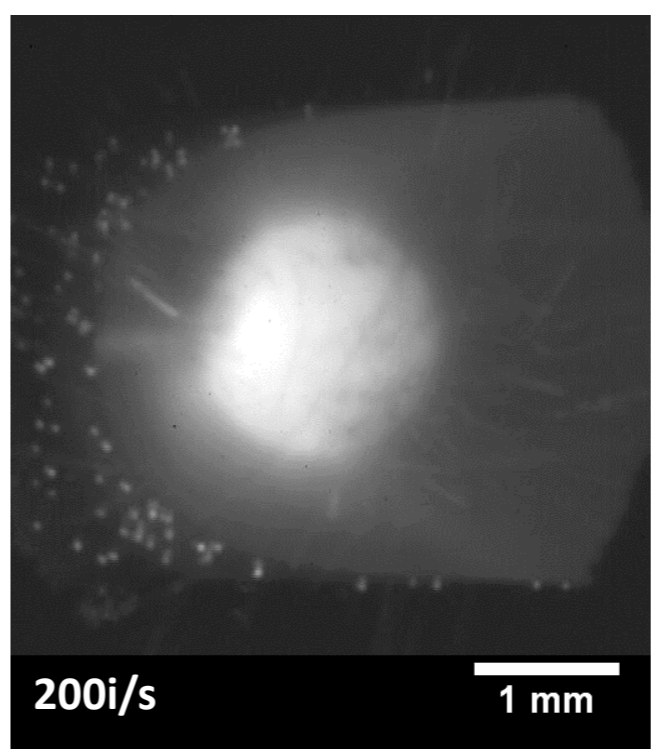
Vue inclinée à 35°



Vue latérale



Vue coaxiale

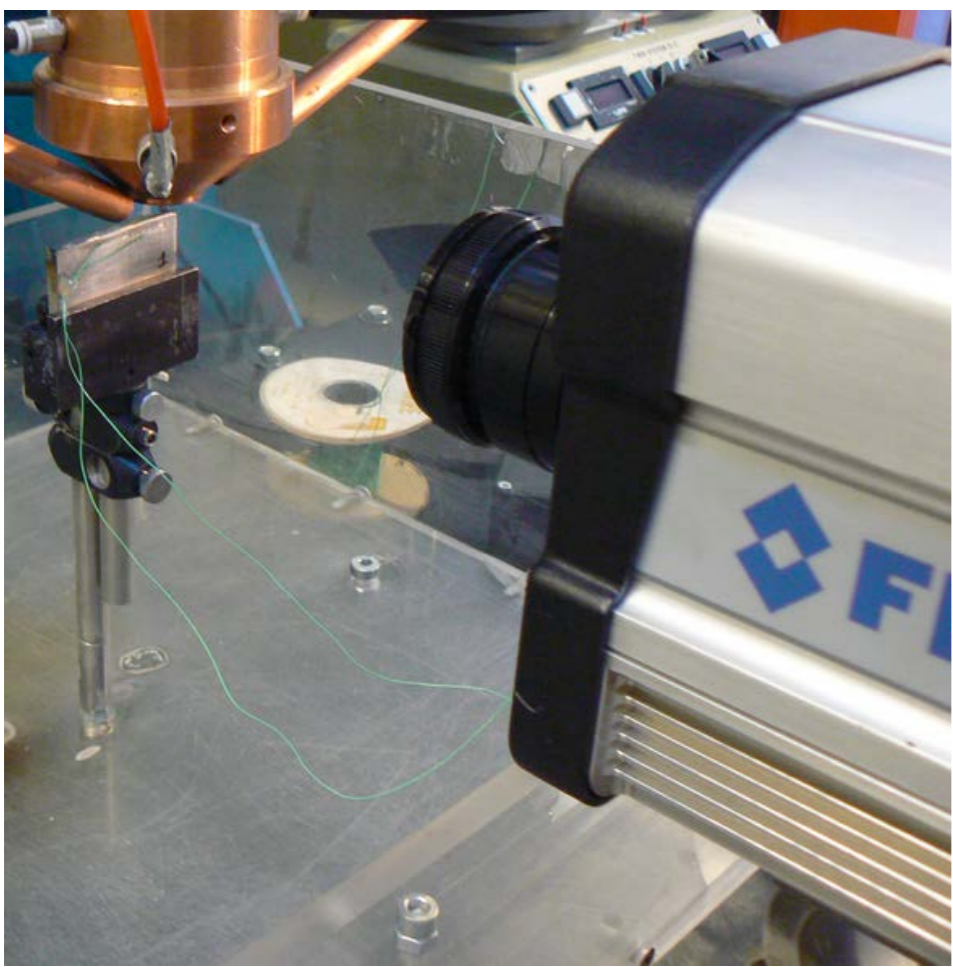


Rechargement  
 d'une structure plane en TA6V  
 $P = 600W - V = 3,33mm/s - D_m = 2,5g/min$

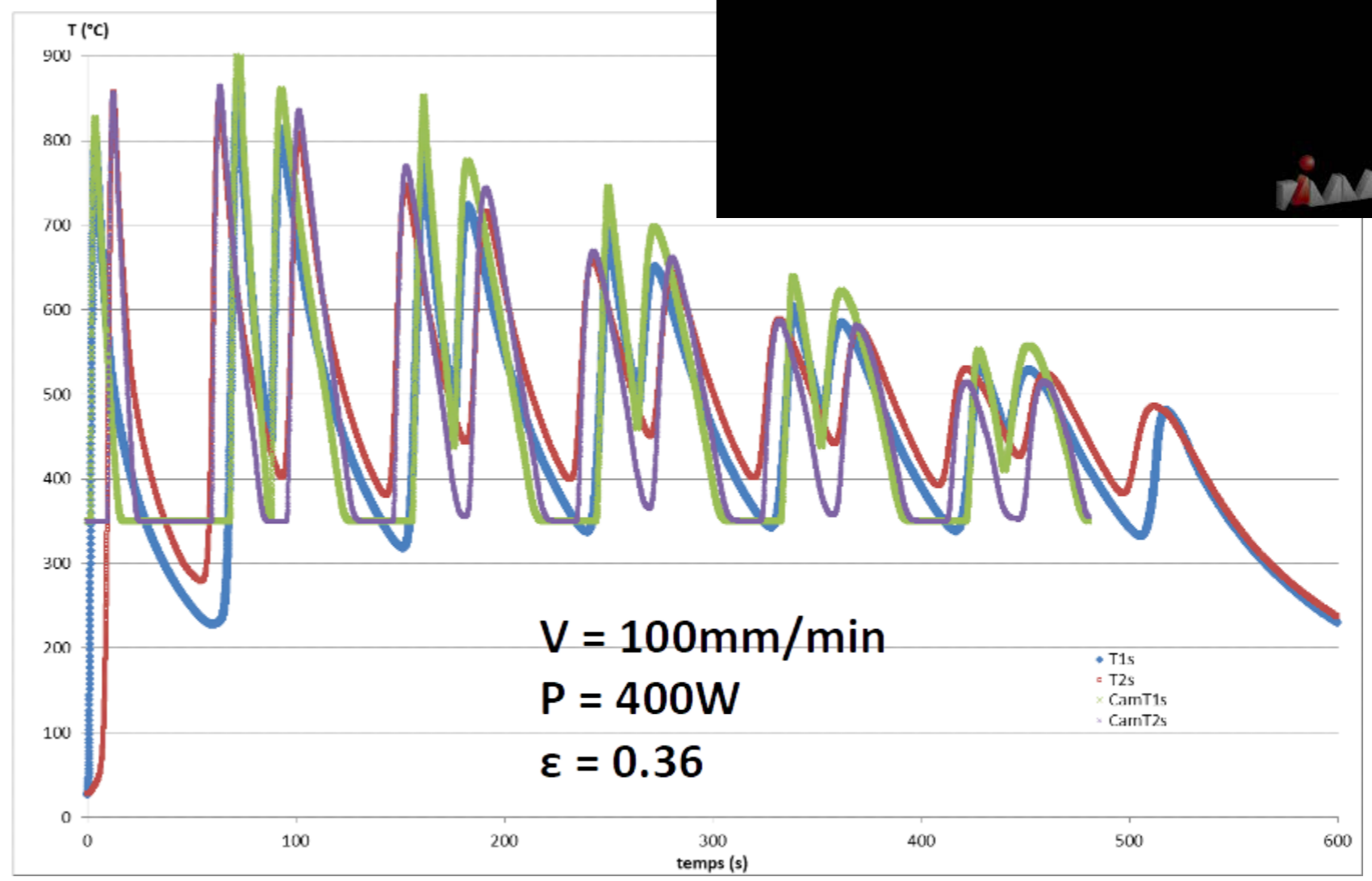
# MESURE DE TEMPERATURE EN LMD

## CYCLE THERMIQUE

Film issu de la caméra thermique  
( $f \sim 100\text{Hz}$ )

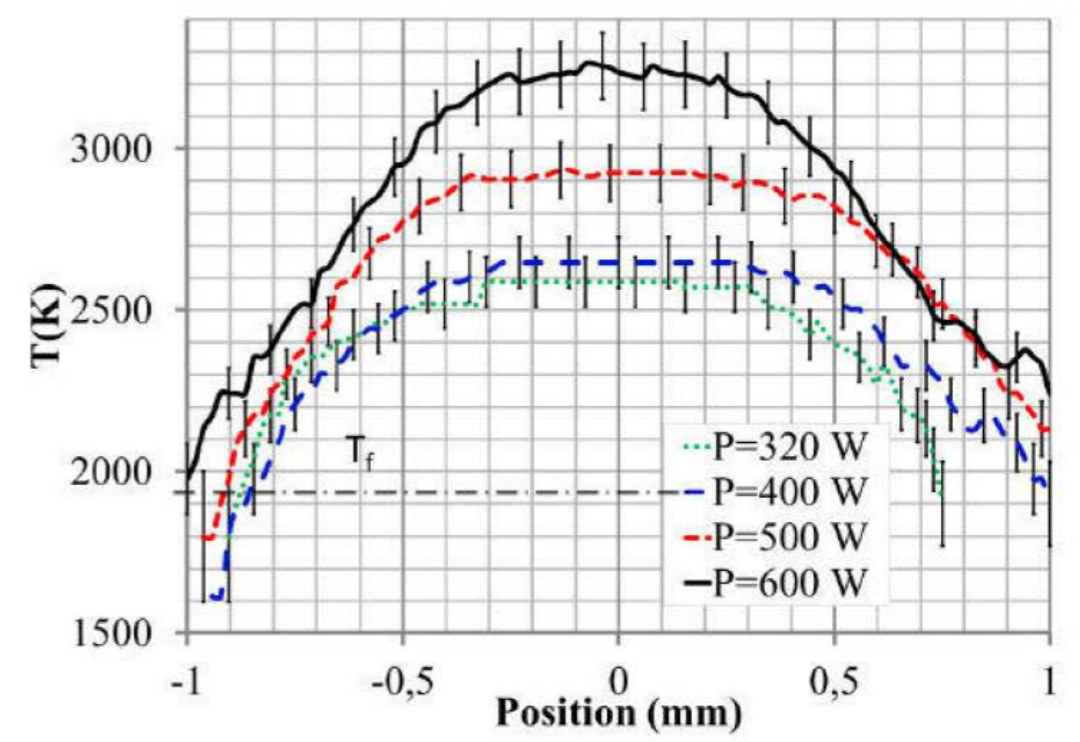
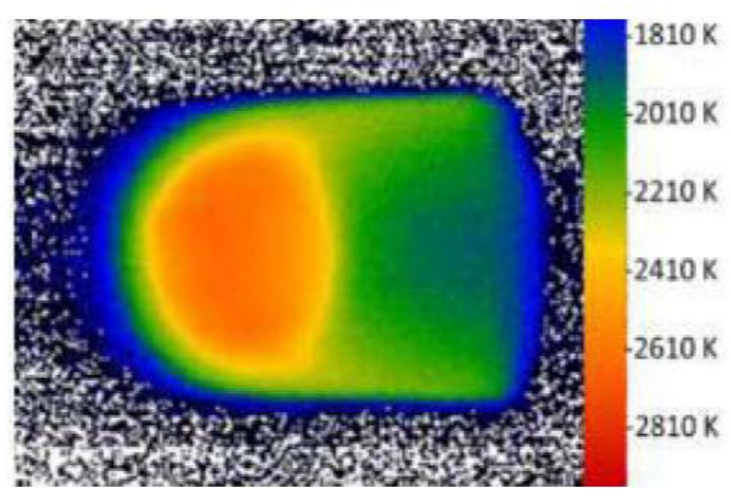
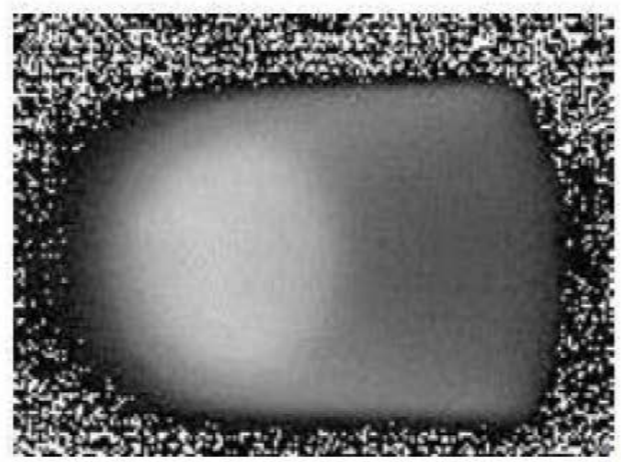
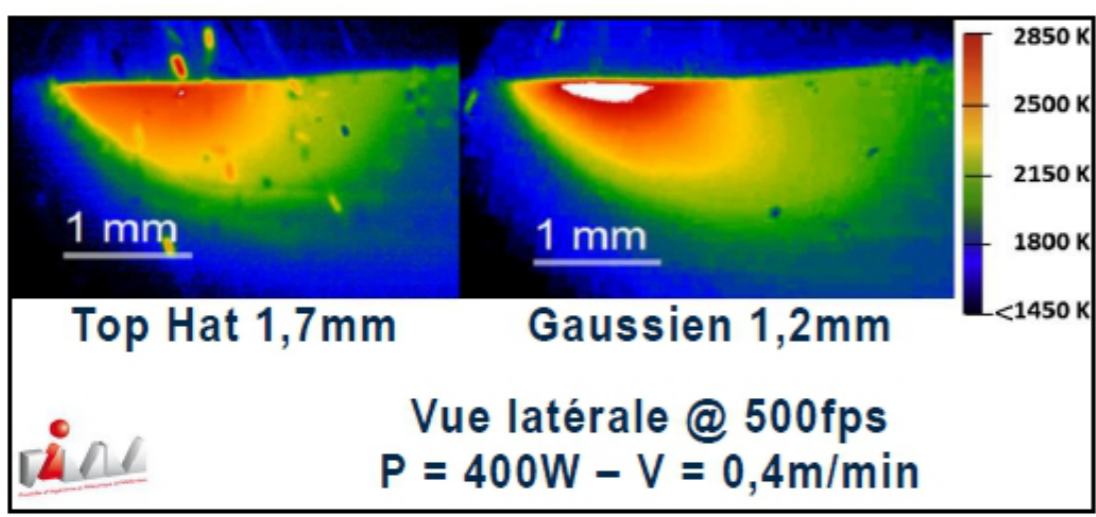


Utilisation d'une caméra FLIR SC4000  
+ thermocouples de type K



Cycle thermique pour un rechargement de 20 couches

# MESURE DE TEMPERATURE EN LMD TEMPERATURE DES ZONES FONDUES

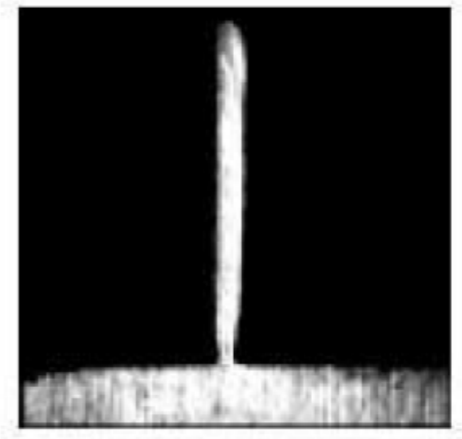
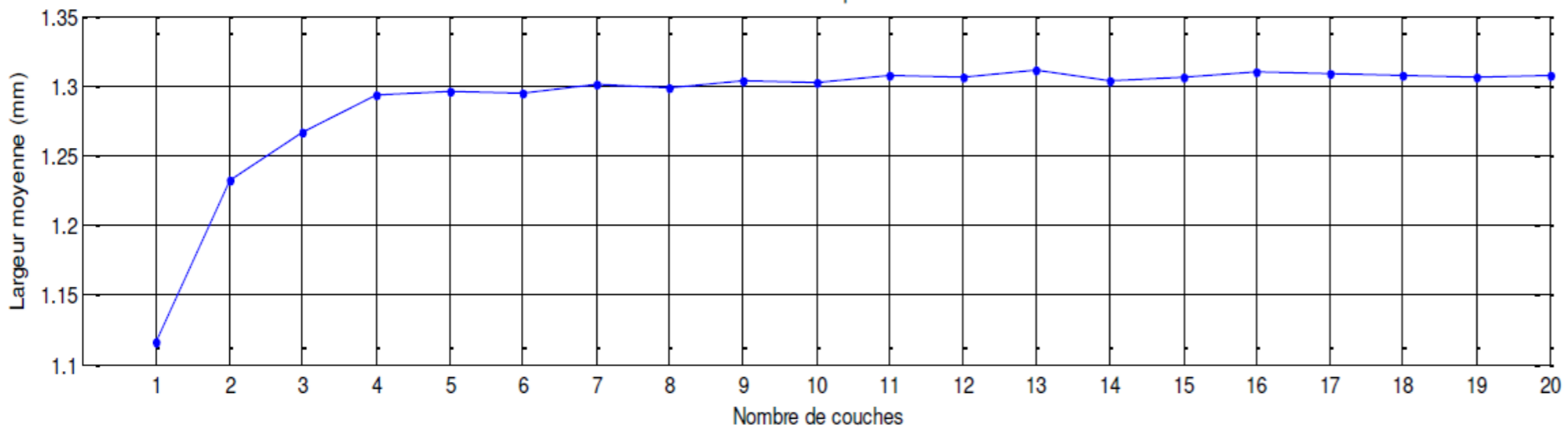


Vue Coaxiale avec profil de température (Top-Hat)

# CONTROLE PROCEDE EN LMD

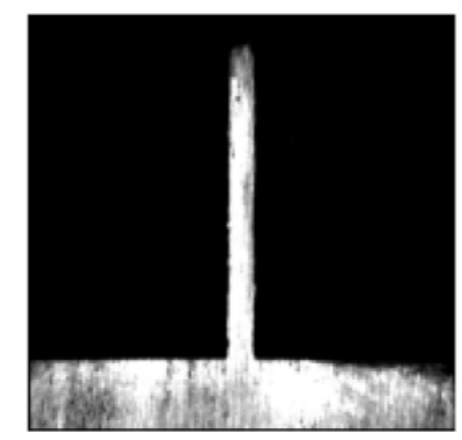
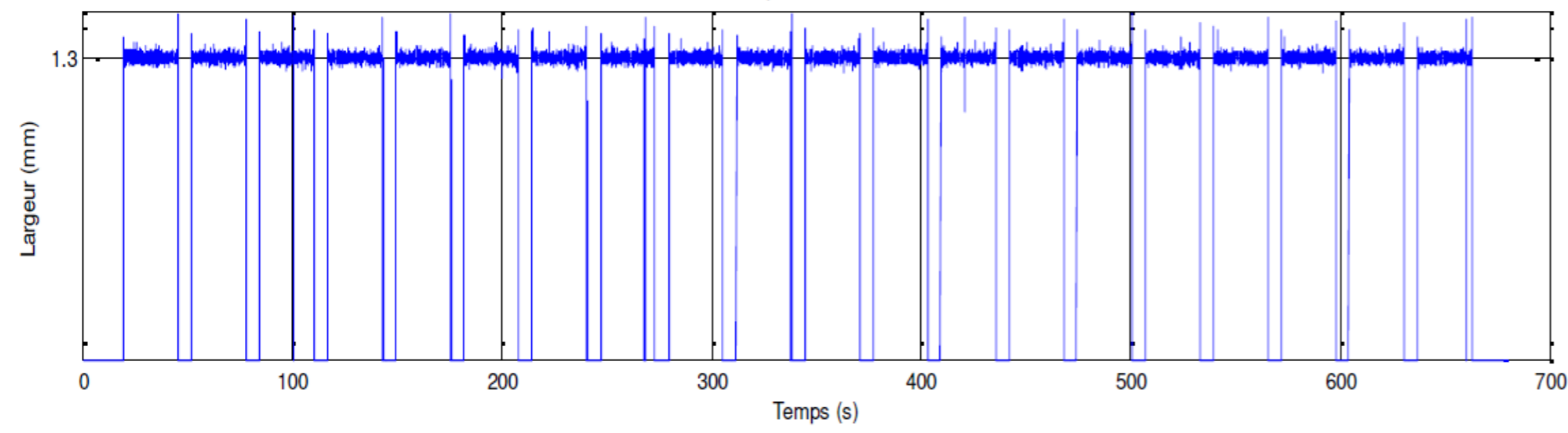
## EXEMPLE

Sans contrôle procédé

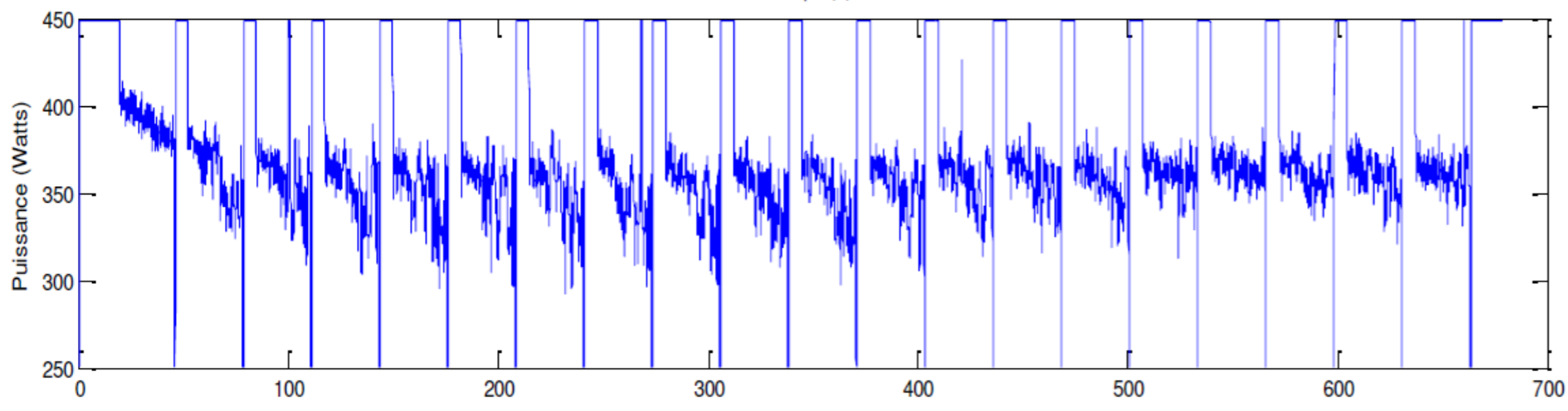


Stabilisation de la largeur après quelques couches

Avec contrôle procédé autour de 1.3mm



Stabilisation directe dès le début du process

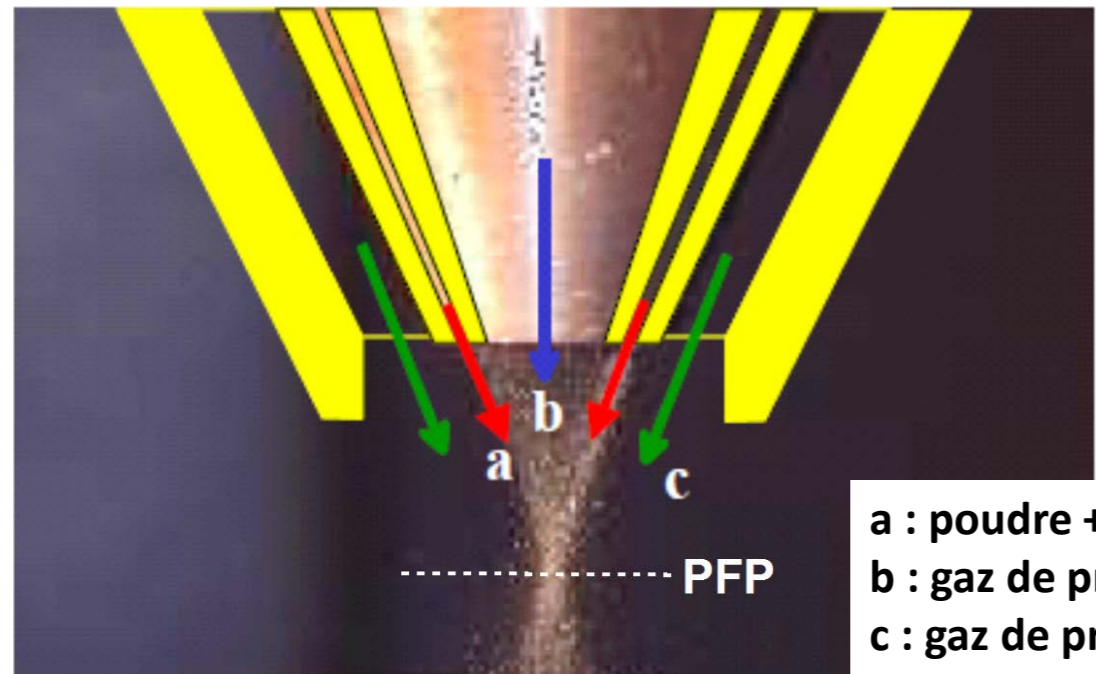


Action sur la puissance laser

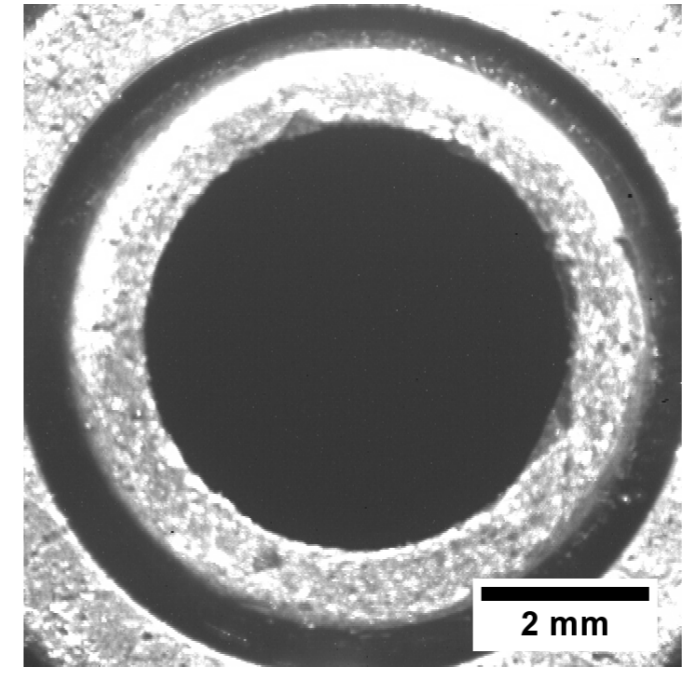
Source : Thèse R. MEZARI

# ANALYSE DU JET DE POUDRE (1)

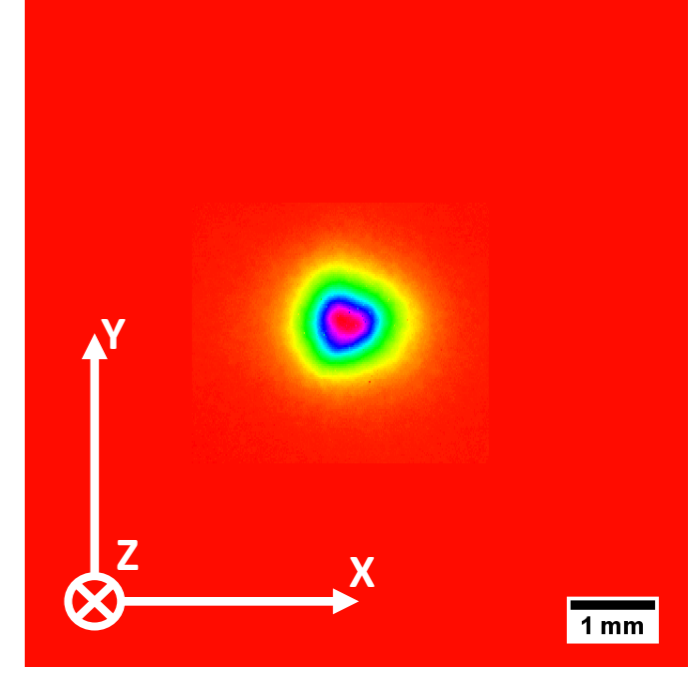
## REPARTITION SPATIALE



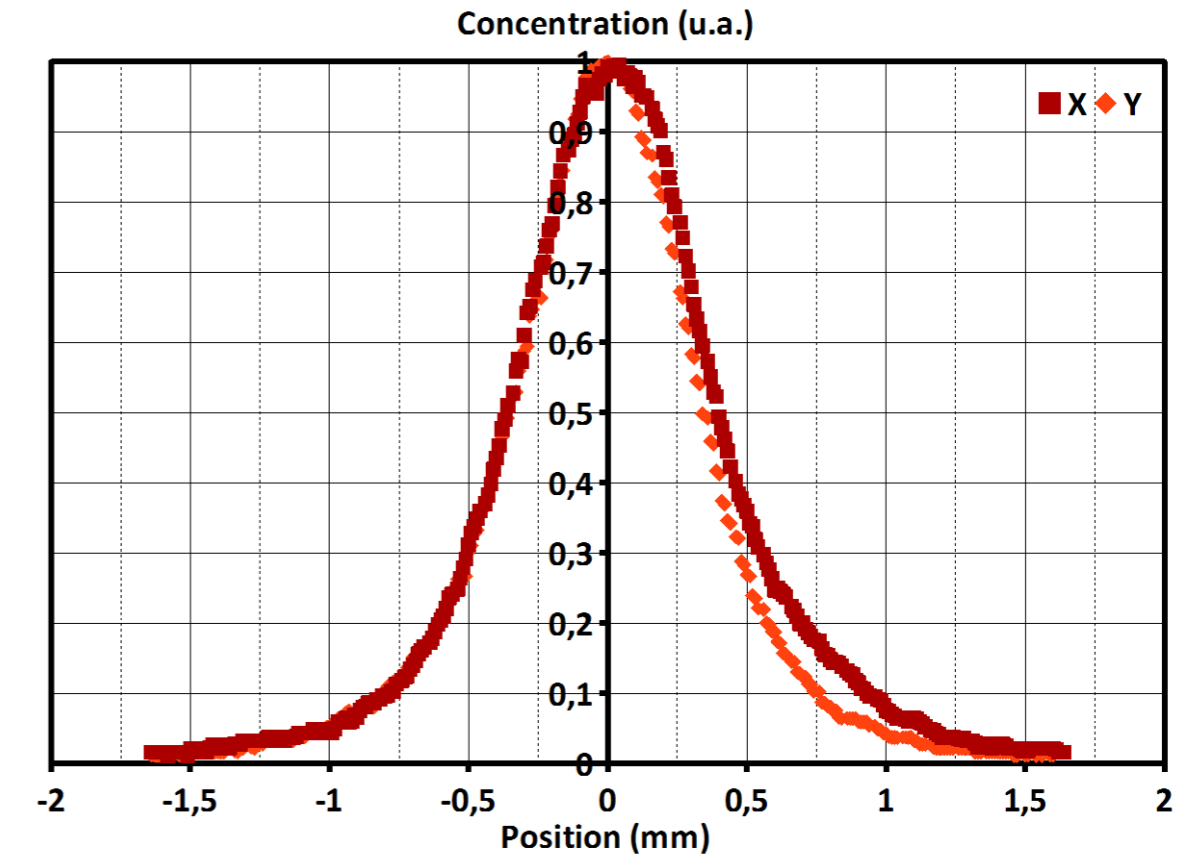
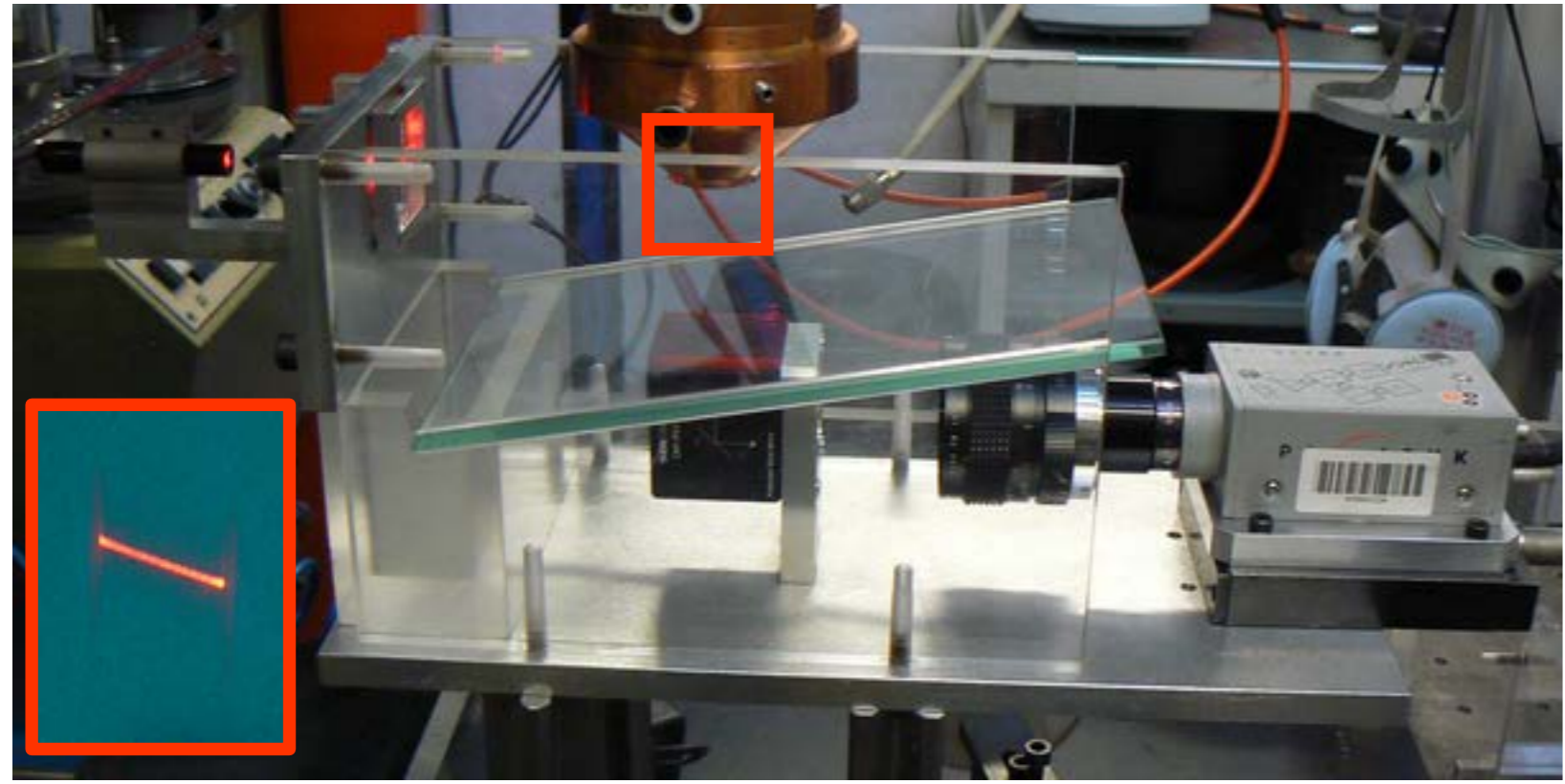
a : poudre + gaz porteur  
b : gaz de protection des optiques  
c : gaz de protection local



Vue de dessous de la buse



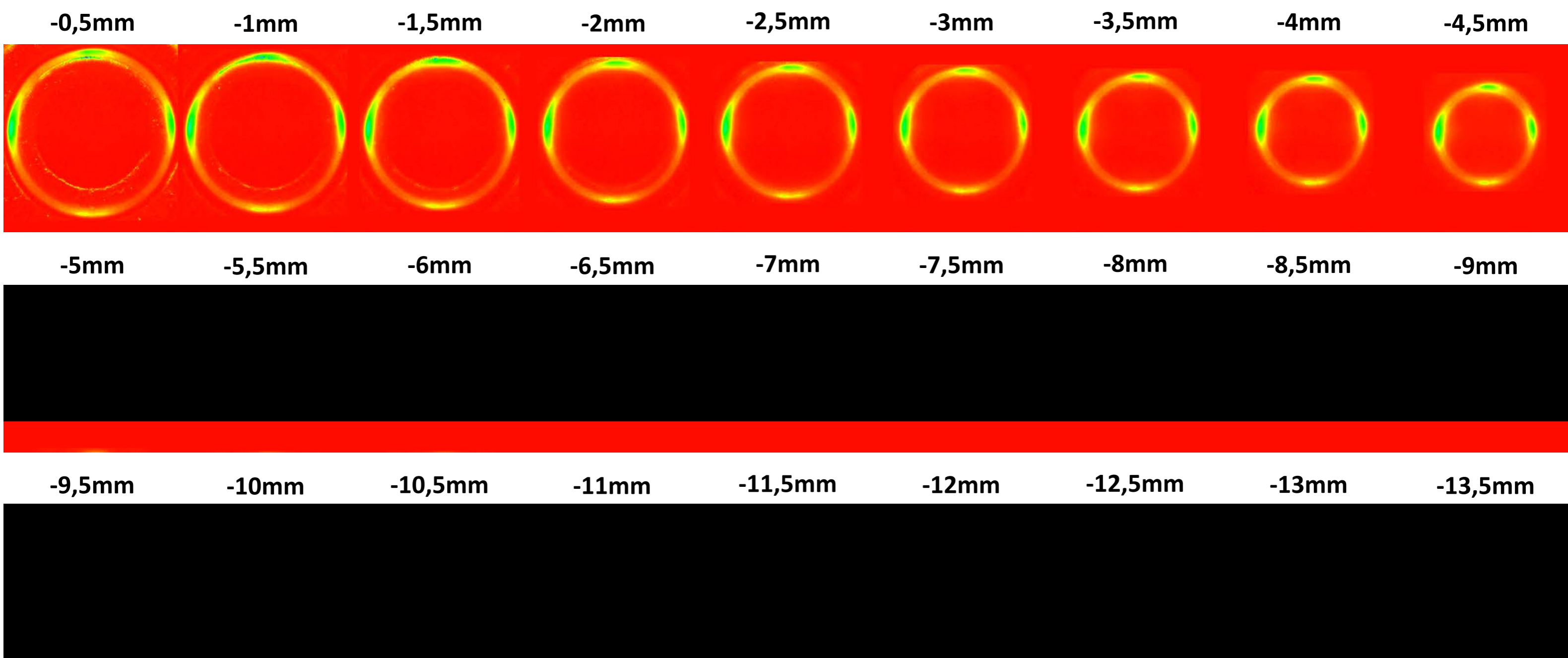
Forme du jet au PFP





# ANALYSE DU JET DE POUDRE (2)

## CARTOGRAPHIE EN Z

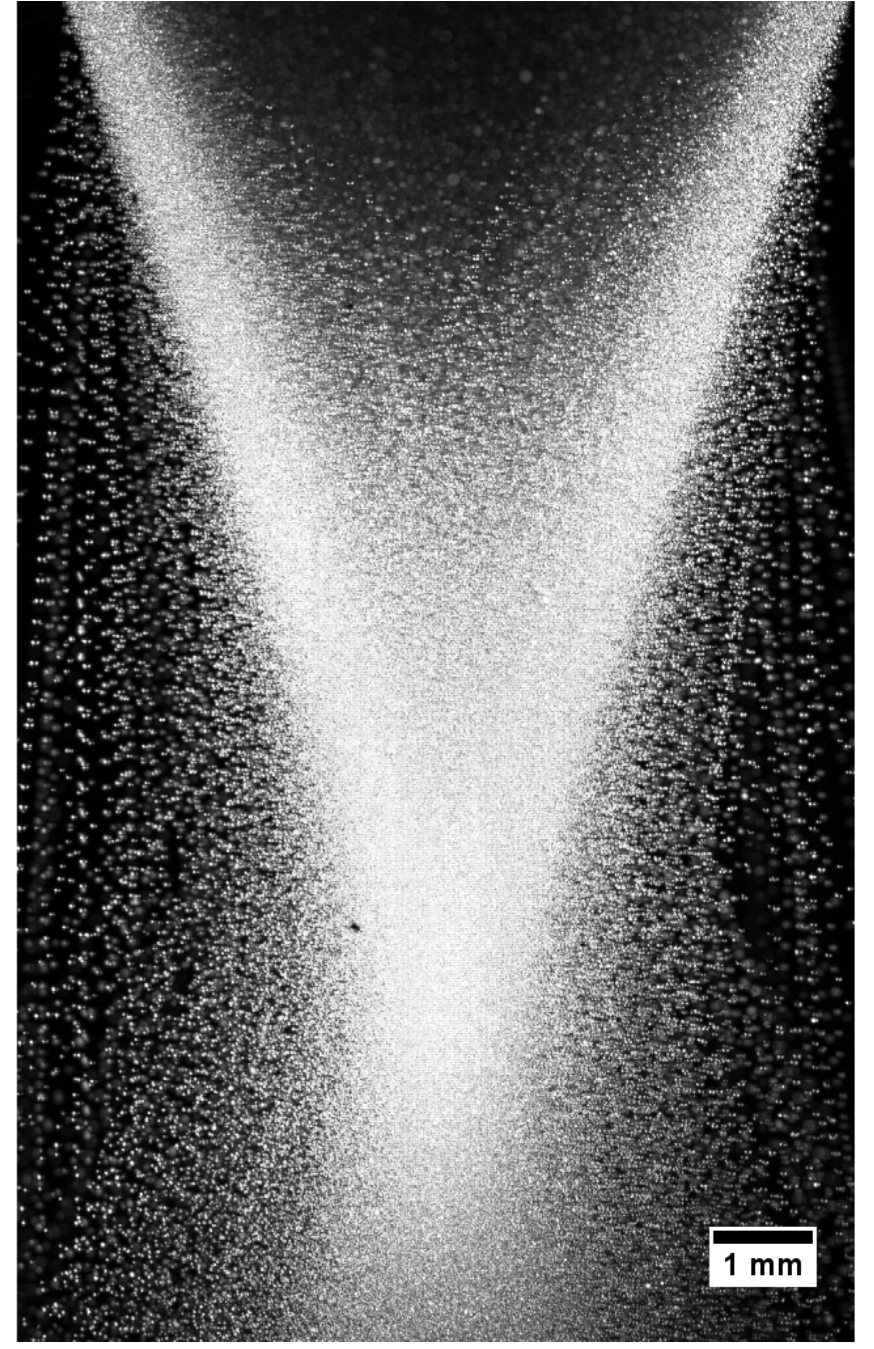
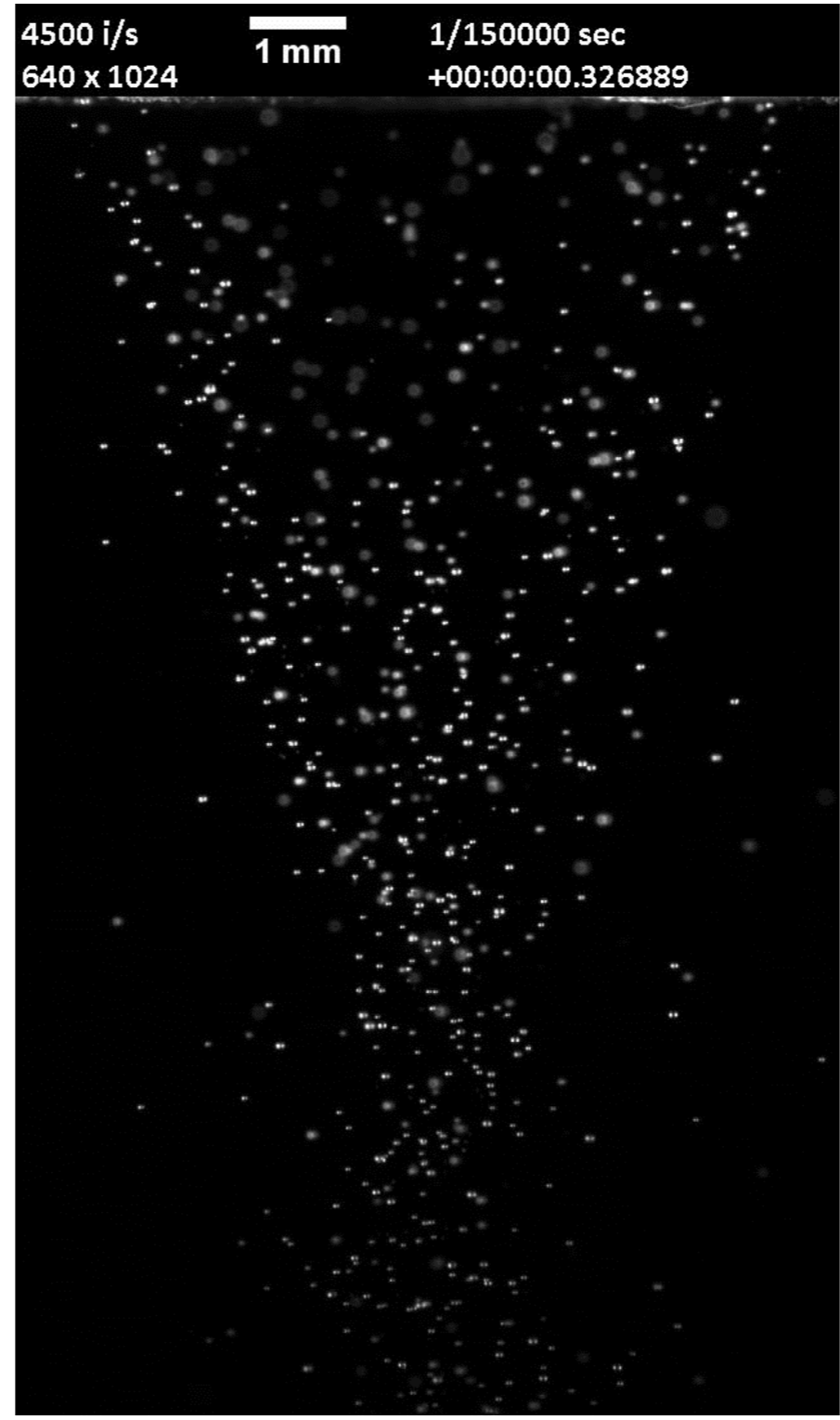


Matériau : TA6V / 45-75 $\mu$ m

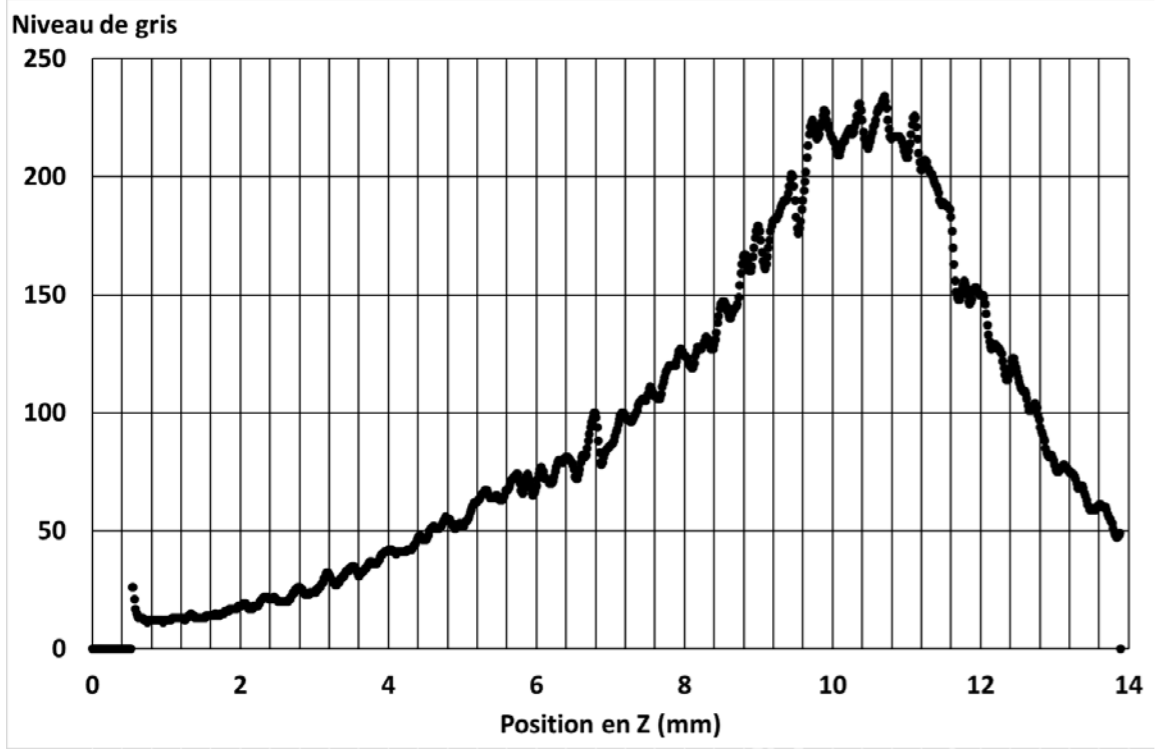
3 mm

P.24

# ANALYSE DU JET DE POUDRE (3) VITESSE DES PARTICULES



1000 images  
Maximum des intensités

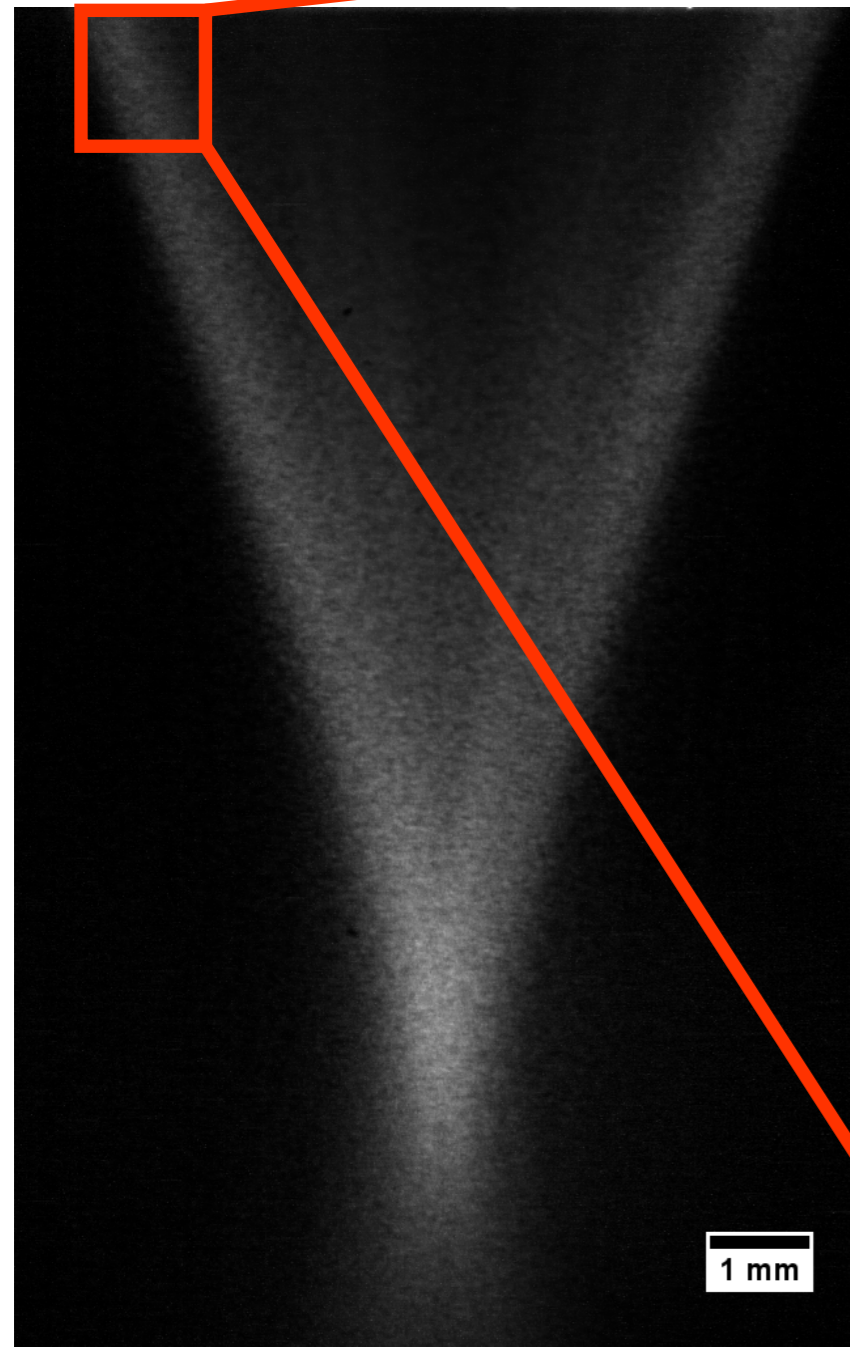


Détermination de la zone de convergence

Matériau : Inconel 718 / 45-105 $\mu$ m

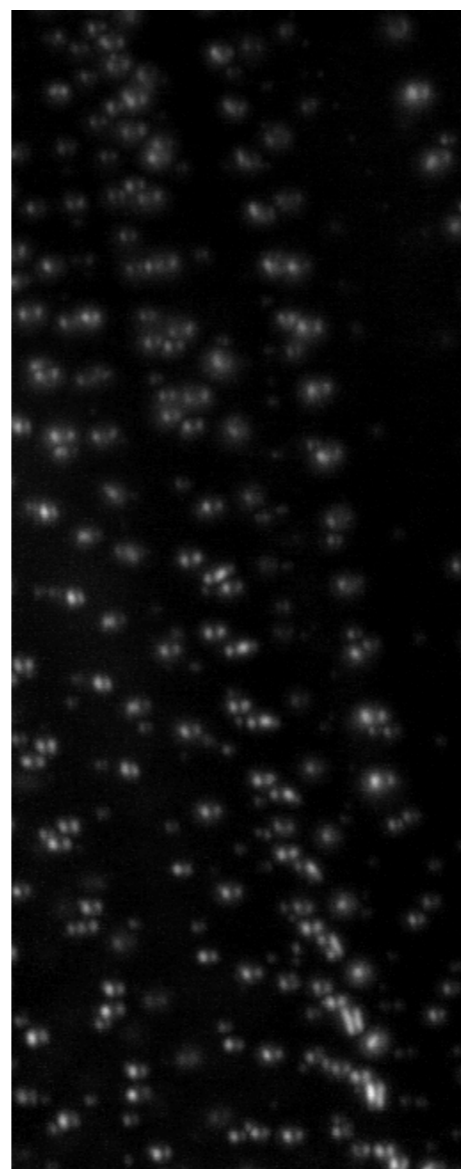
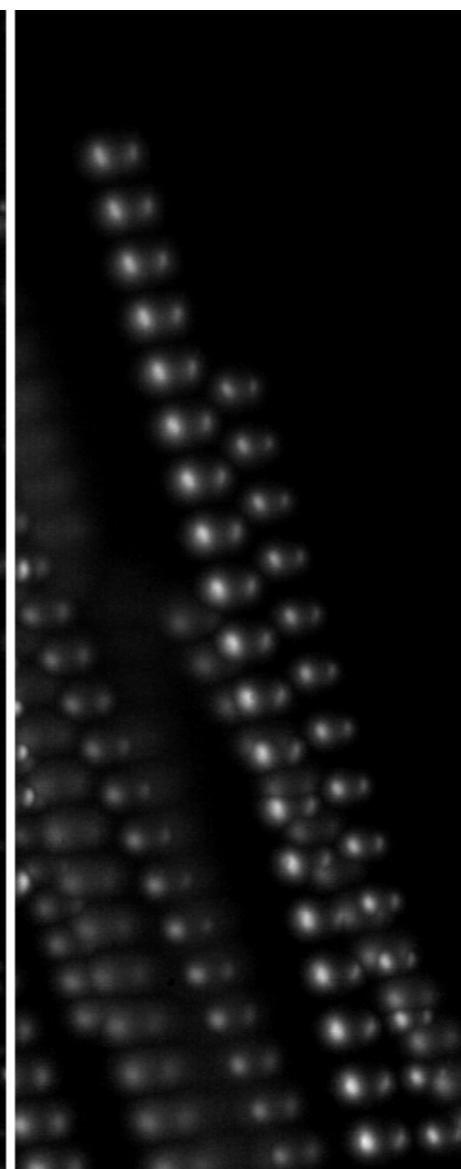
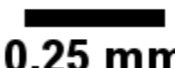
# ANALYSE DU JET DE POUUDRE (4)

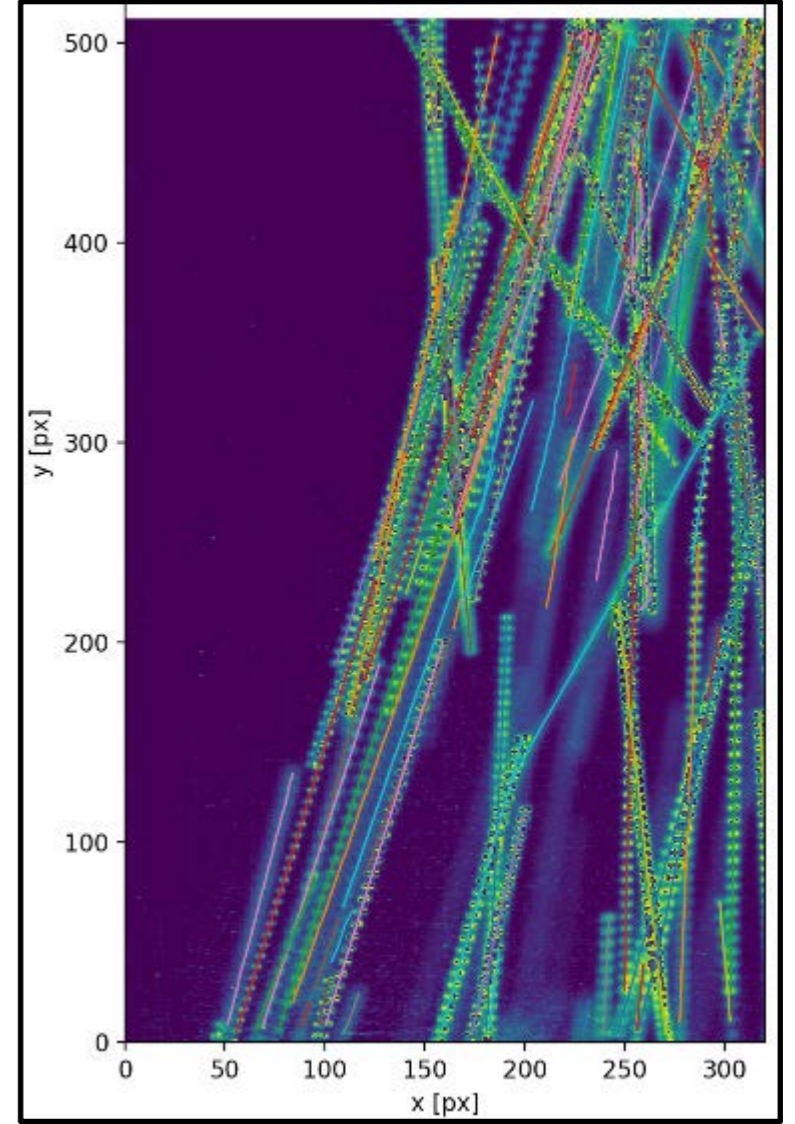
## VITESSE DES PARTICULES



Zoom sur la partie supérieure gauche du jet

Matériau : Inconel 718

20-60 $\mu$ m	60-150 $\mu$ m
	
12000i/s 256x656	1/150000sec $\Delta t = 83\mu$ s
	



Script Python de calcul des vitesses

Vitesse des particules  
autour de 1,5m/s  
(dépend de la taille)

## ● **Contacts scientifiques**

- Patrice PEYRE ([patrice.peyre@ensam.eu](mailto:patrice.peyre@ensam.eu))  
→ Interaction et matériaux en FA laser
- Morgane DAL ([morgane.dal@ensam.eu](mailto:morgane.dal@ensam.eu))  
→ Simulation des procédés
- Matthieu SCHNEIDER ([matthieu.schneider@ensam.eu](mailto:matthieu.schneider@ensam.eu))  
→ Interaction laser/matière

## ● **Contacts techniques**

- Frédéric Coste ([frederic.coste@ensam.eu](mailto:frederic.coste@ensam.eu))  
→ Instrumentation multiprocédés
- Corinne DUPUY ([corinne.dupuy@ensam.eu](mailto:corinne.dupuy@ensam.eu))  
→ Experte machine SLM125HL et Magix
- Thierry MALOT ([thierry.malot@ensam.eu](mailto:thierry.malot@ensam.eu))  
→ Expert machine OPTOMECH et LMD

## ● **Site internet du labo : [pimm.ensam.eu](http://pimm.ensam.eu)**



# MERCI !