



# Enjeux scientifiques de la fabrication additive : Le procédé Selective Laser Melting / Sintering (SLM/SLS)

**Gilles Régnier**

Denis Defauchy

Patrice Peyre

Yann Rouchausse

Louness Illoul

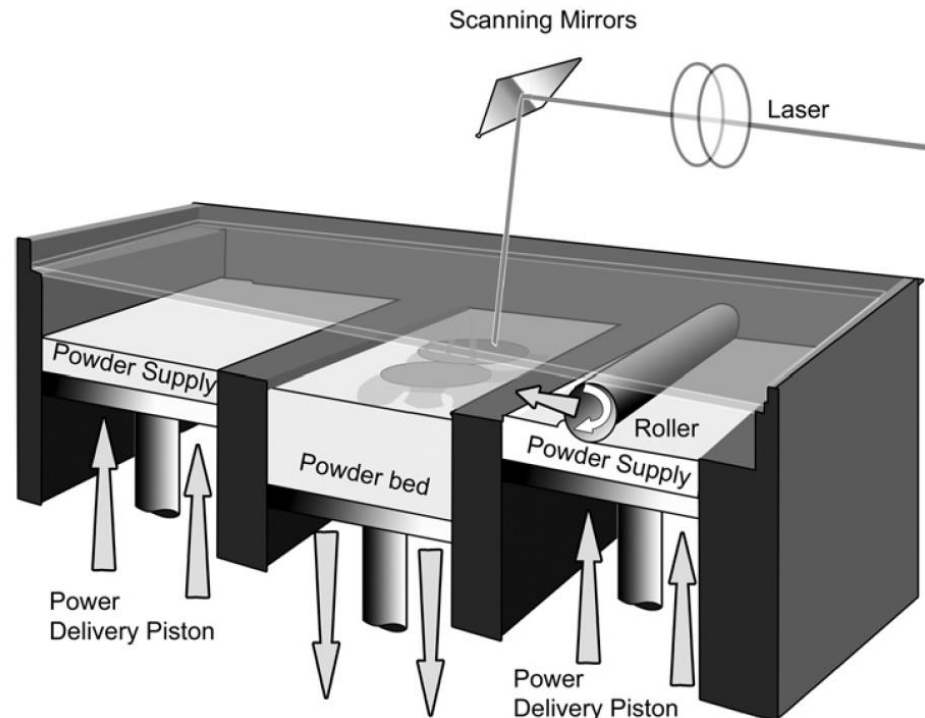


# Le principe du procédé SLM

20 à 50h



Ø 20 à 200  $\mu\text{m}$



*Hopkinson et al., 2006*

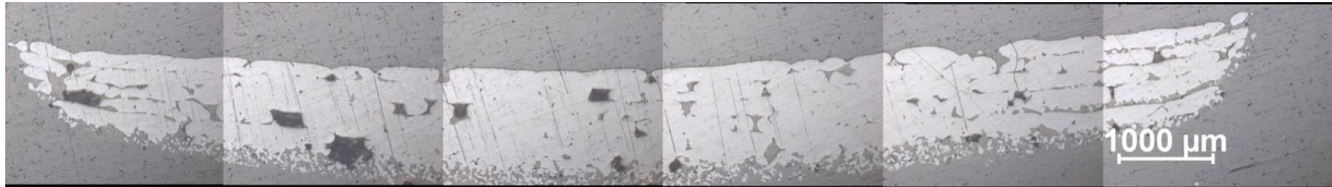


*Dassault Aviation*

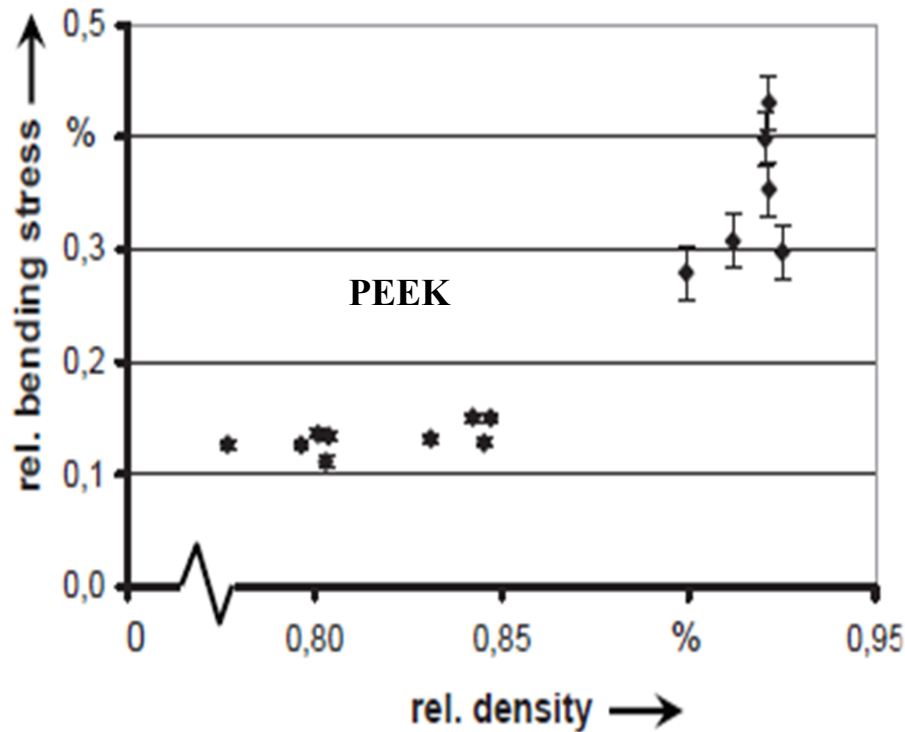


*Thales Alenia Space*

# Densification de la poudre



Microscopie d'un échantillon de PEEK obtenu par SLM, Peyre et al, 2015



Schmidt et al, Manufacturing Technology, 2007

## Projet FUI

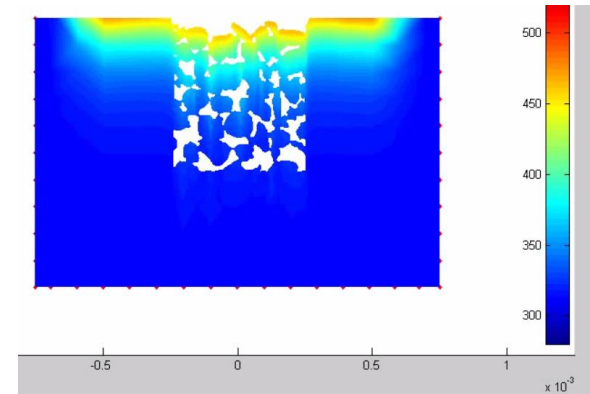


## Phénomènes physiques mis en jeu dans le procédé :

- Interaction Laser / Polymer
- Coalescence des grains de poudre
- Diffusion moléculaire aux interfaces
- Diffusion de l'air dans le fondu

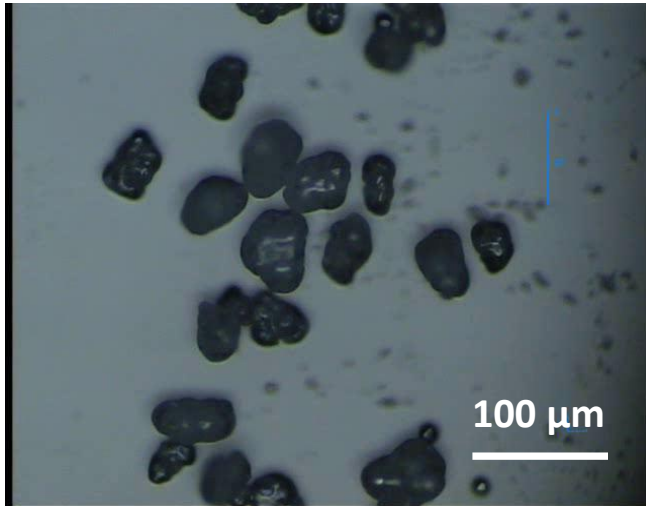


*Conception d'un banc SLM*



*Simulation numérique du procédé SLM*

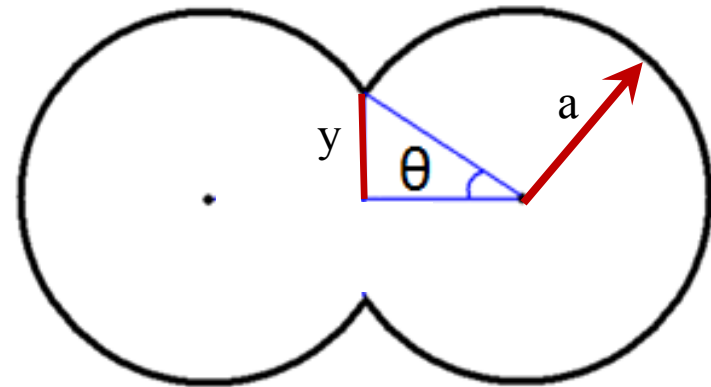
# Coalescence de deux sphères



PA12 – Heating 3° C/min

Forces en présence :

- Tension de surface (motrice)
- Viscosité (dissipation)

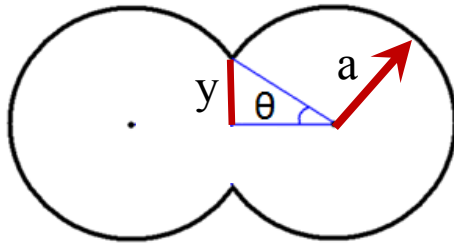


*Frenkel (1945), Eshelby (1949)*



# Coalescence de deux sphères visqueuses

## Résolution



Taylor en 0 : *Frenkel (1945), Eshelby (1949)*

$$\frac{y}{a} = \tau^{1/2} \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{t \Gamma}{\eta a_0}$$



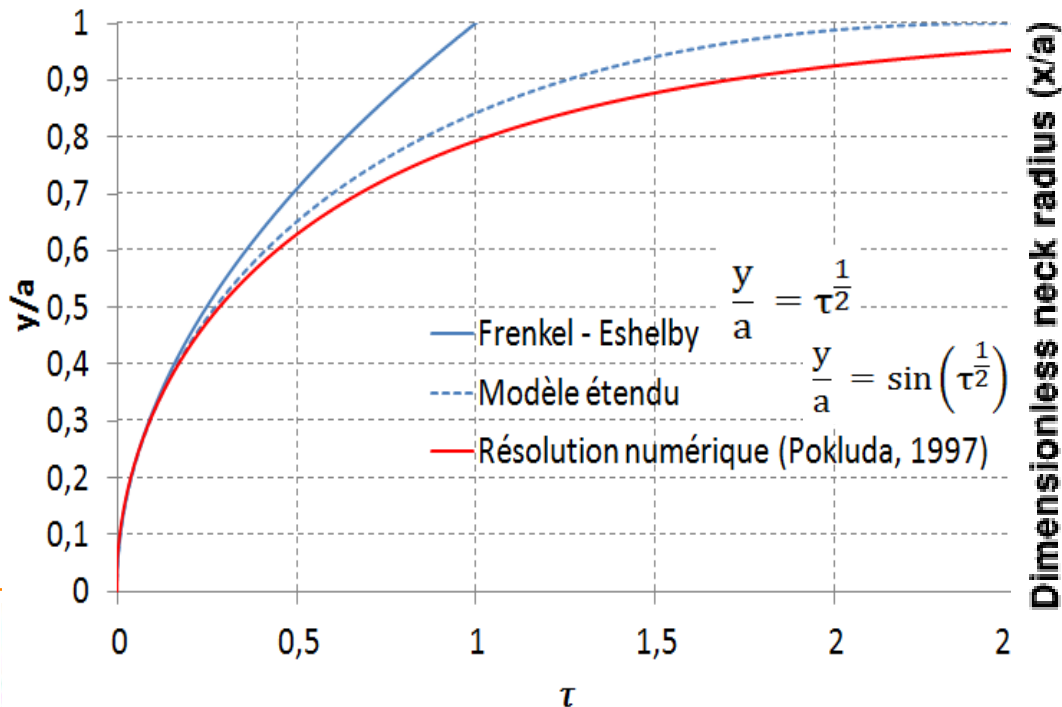
Solution améliorée  
(*Defauchy, 2013*)

$$\frac{y}{a} = \sin(\tau^{1/2})$$

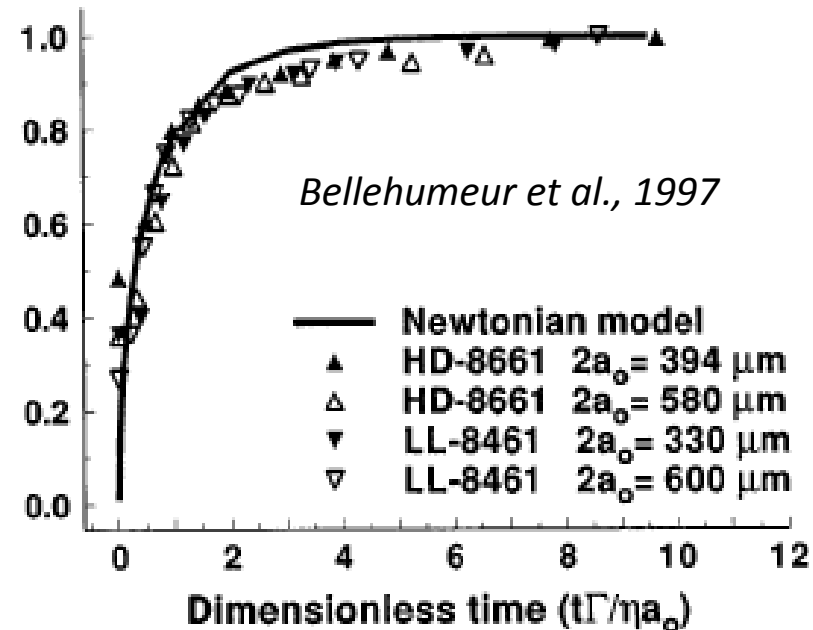


Solution numérique

*Pokluda et al. (1997)*



Dimensionless neck radius (x/a)



# Physics of coalescence

- Peu de différences de cinétique de coalescence entre (Defauchy, 2013) :
  - 2 cylindres (Hopper, *Journal of Fluid Mechanics*, 1992)
  - 2 sphères
- Peu d'influence de la viscoélasticité (éventuellement au début)  
(Lin et al., 2001 / Scriben et al., 2006)
- La cinétique de coalescence est pilotée par le nombre Capillaire :

$$C_a = \frac{\Gamma}{\eta a_0} (s^{-1})$$

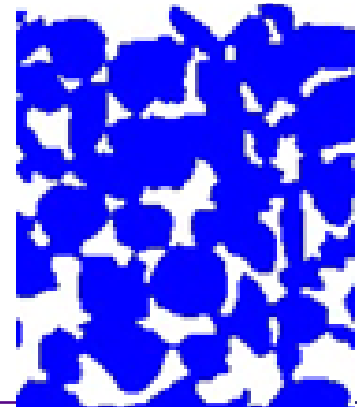
$\Gamma$  Surface tension

$\eta$  viscosity

$a_0$  radius of entities

- Coalescence anisotherme d'un lit de poudre :

➡ Besoin d'une simulation

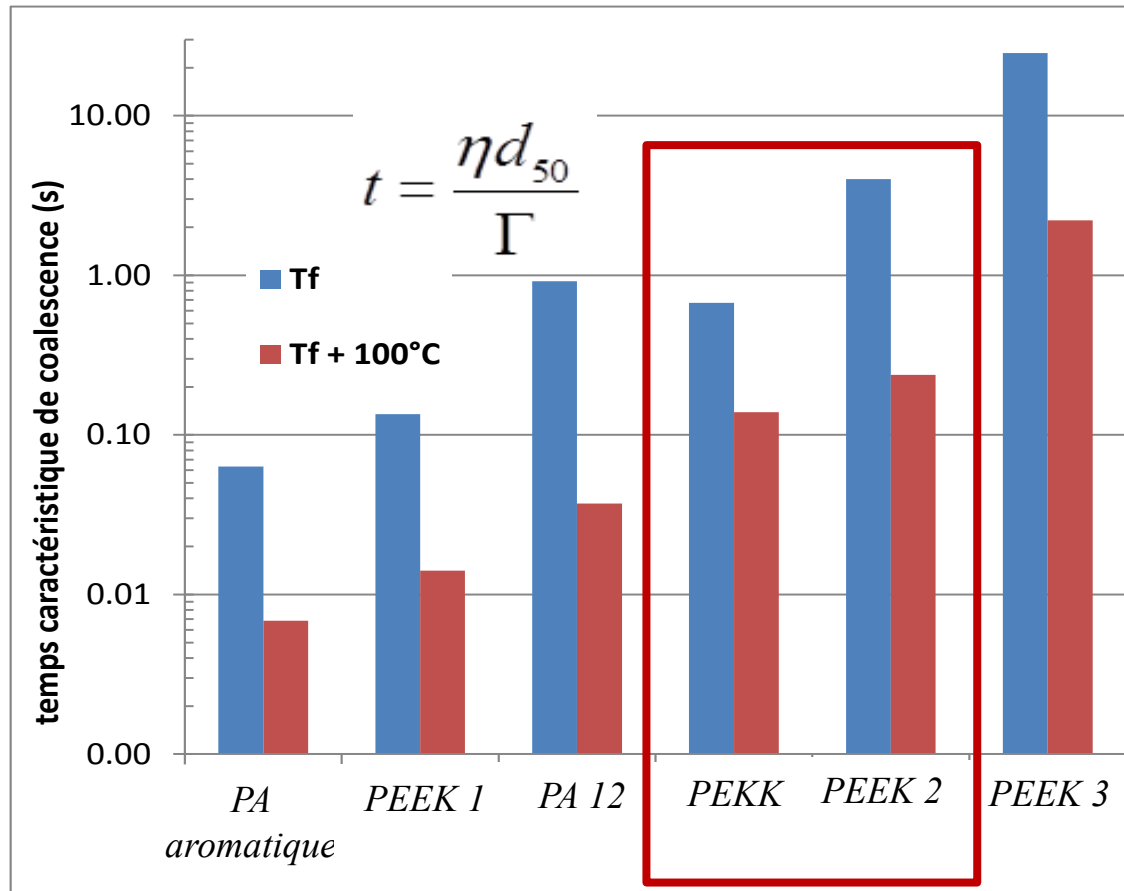


# Aptitude des poudres thermoplastiques pour le procédé SLM

La tension de surface varie entre 25 and 50 mN/m

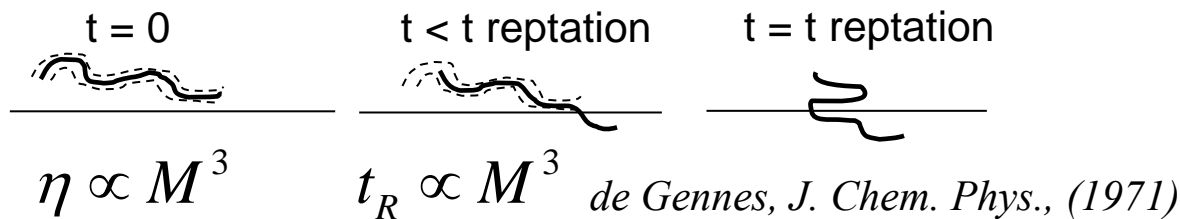
$d_{50}$  varie entre 10 à 100  $\mu\text{m}$

$\eta$  peut varier de plusieurs décades (masse moléculaire et température)





## Cicatrisation des interfaces



## Résistance à la rupture pour les polymères amorphes

$$\frac{G_C(t)}{G_{C\infty}} \propto \left( \frac{t}{t_R} \right)^{1/2} \quad (t < t_R)$$

## Polymères semi-cristallins ?

Très complexe avec le phénomène de co-crystallisation aux interfaces

(Deplancke et al., *Macromolecules*, 2014)

$$\frac{G_C(t)}{G_{C\infty}} < 1 \quad (t < t_R)$$

# Estimation de la qualité du soudage

## Procédés anisothermes

Yang and Pitchumani, Macromolecules (2002)

$$W_{\text{criterium}} = \int_{t_{\text{contact}}}^{t_{\text{solidification}}} \frac{dt}{t_R(T(t))}$$

$W_c > 1 \Rightarrow \text{interface cicatrisée}$

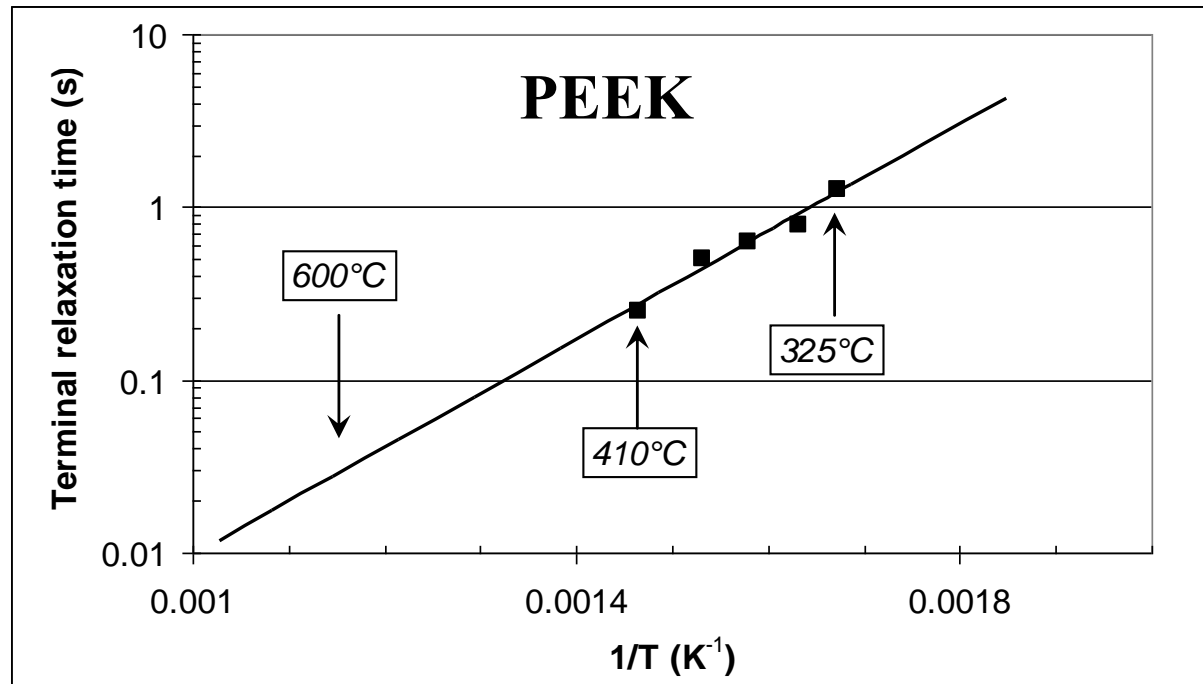
Détermination du  
temps de reptation time  $t_R(T)$   
 $\Rightarrow$  rhéométrie

PEEK

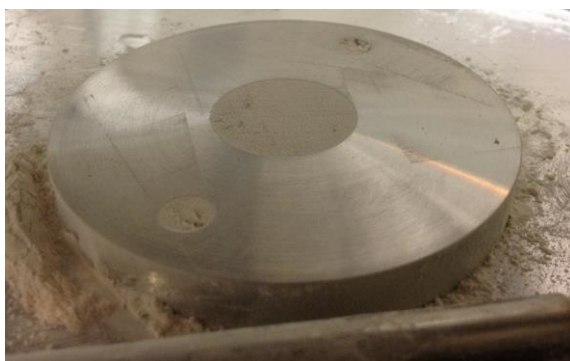
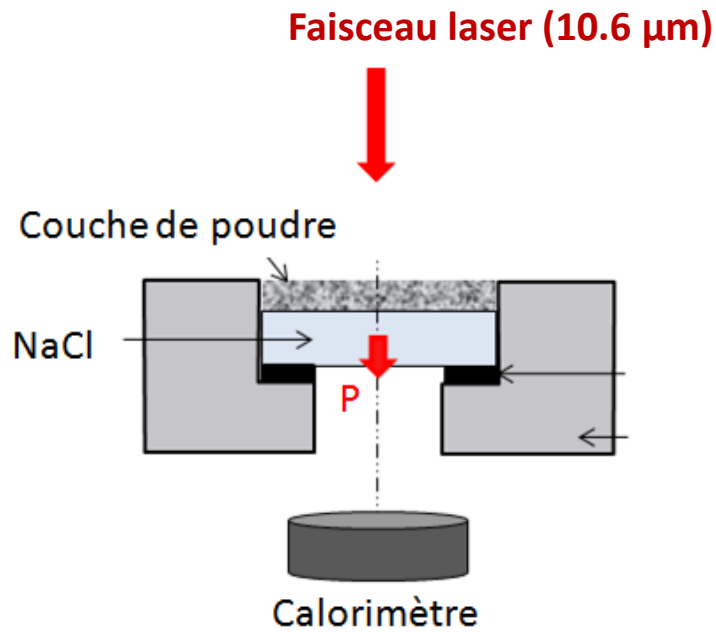
$$tr(s) = 2.1 \cdot 10^{-5} \exp(60000 / RT)$$

PEKK

$$tr(s) = 1.1 \cdot 10^{-5} \exp(65000 / RT)$$

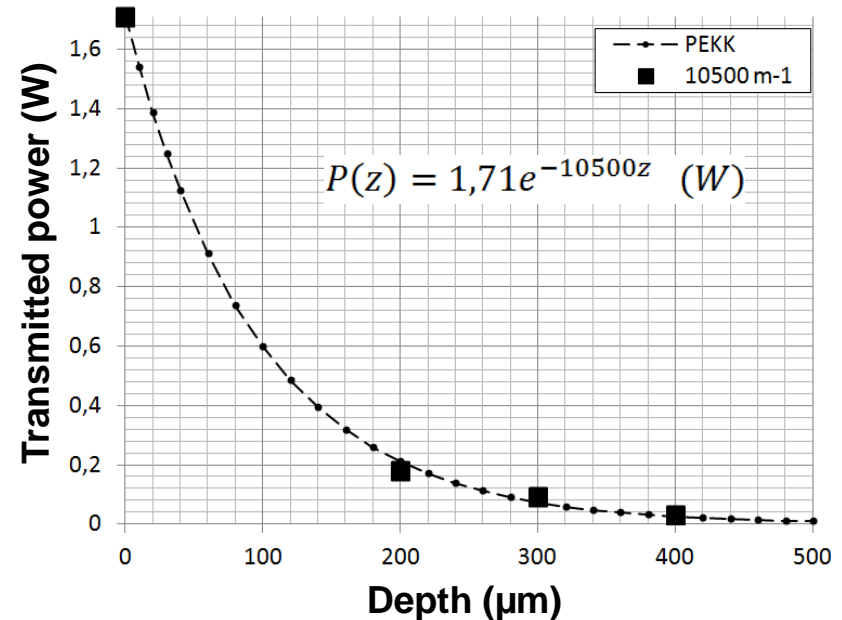
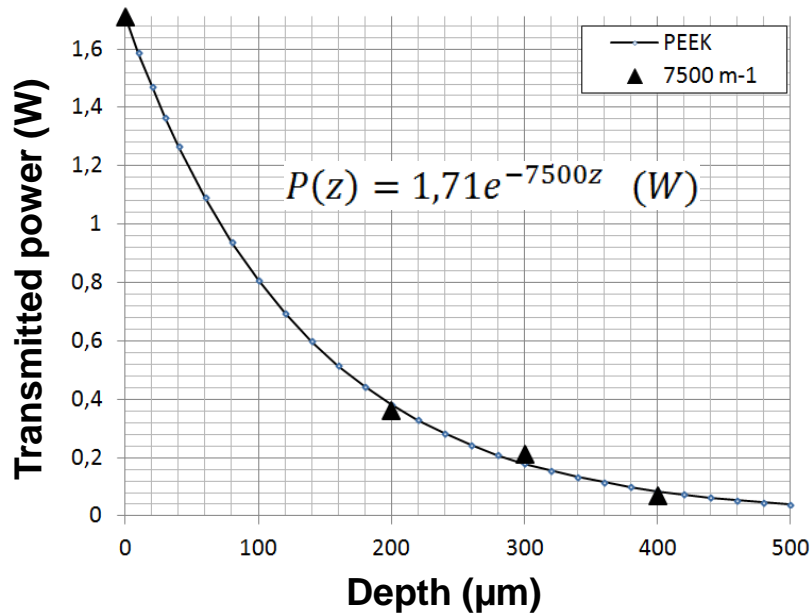


# Interaction laser / poudre de polymère



# Interaction laser / polymer powder

## Identification d'une loi de Beer-Lambert



Poudre	$\alpha \text{ (m-1)}$
PEEK 1	15000
PEEK 2	7500
PEEK 3	1300
PEKK 1	10500
PEKK 2	8700

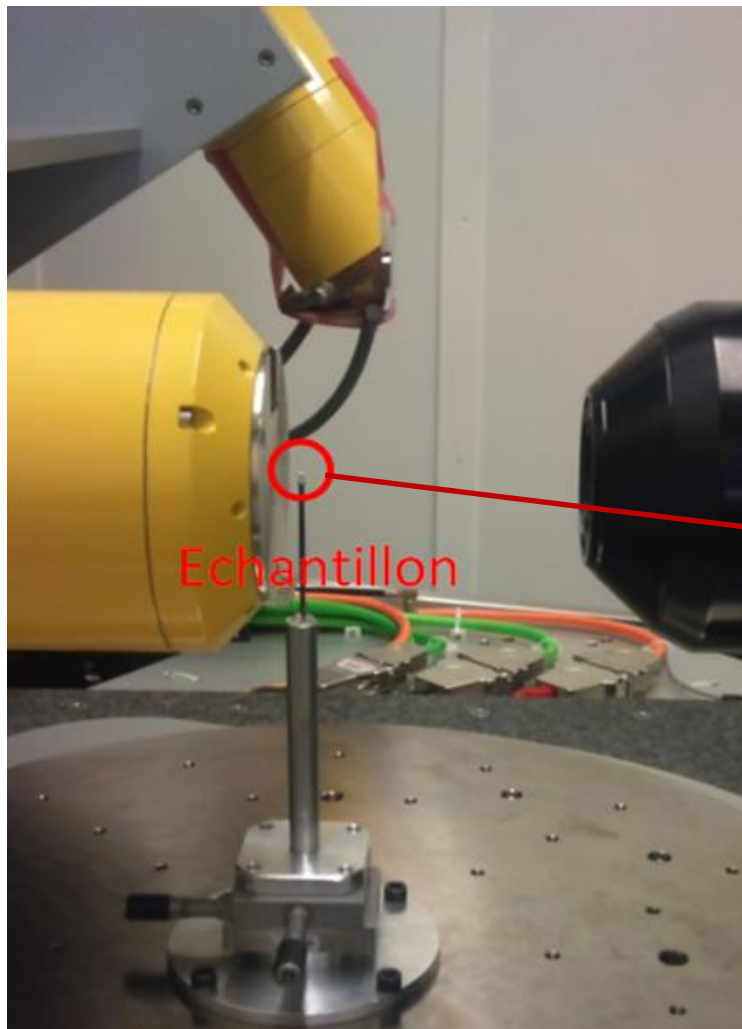
Diffusion de Mie

$\lambda = 10,6 \text{ μm}$  / granulométrie 10 à 50 μm

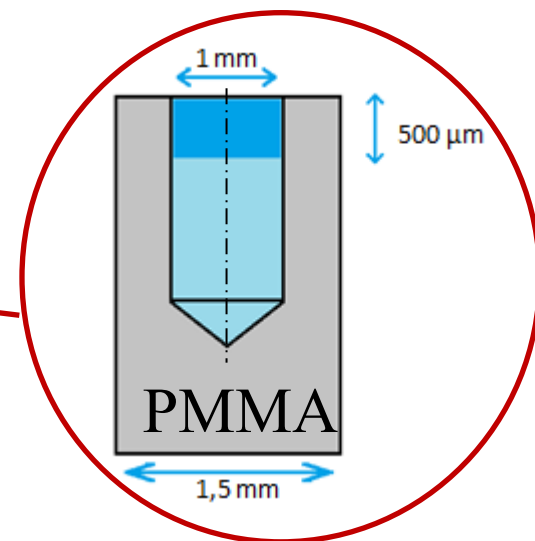
Phénomène complexe de  
**réflexion – diffusion - absorption**

# Géométrie des poudres par tomographie X

*Microtomographie (F2M)*

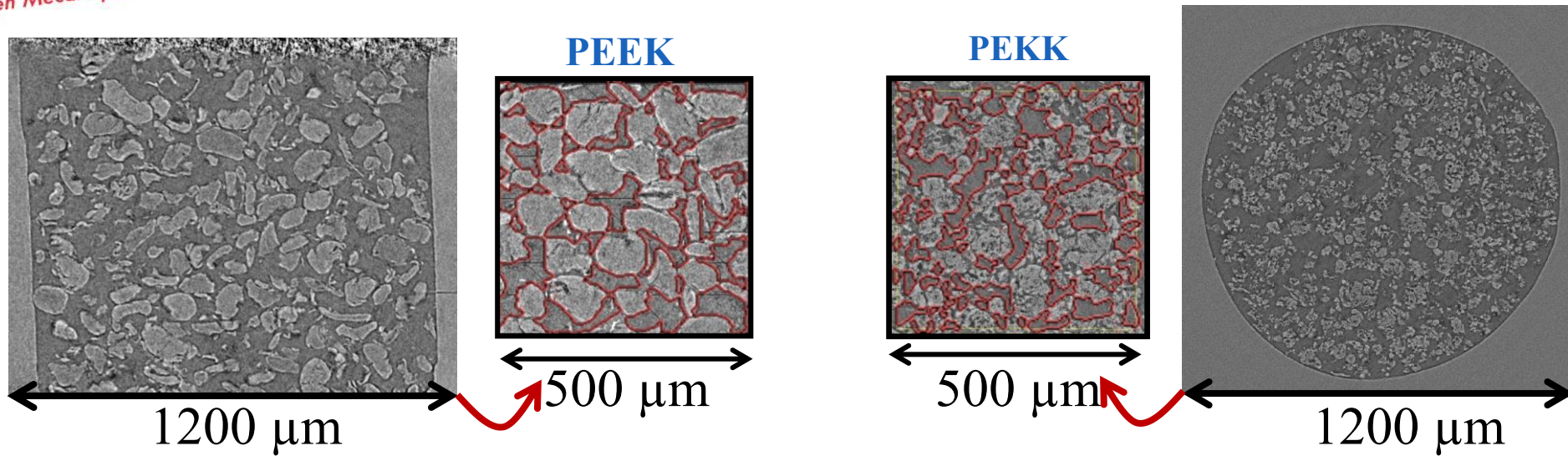


Echantillon

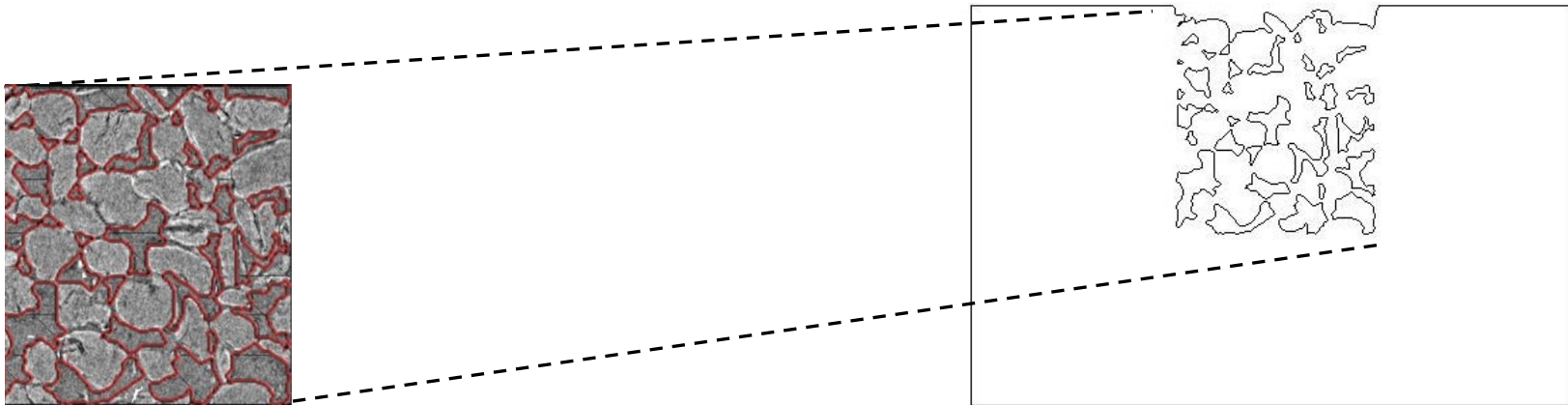




# Modélisation de la géométrie des poudres



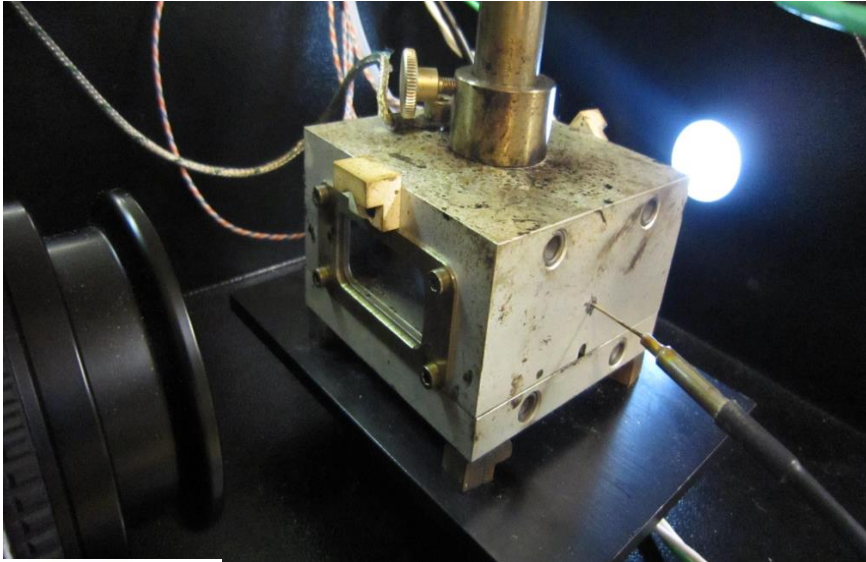
*CAD software CATIA DS – Module « Sketch Tracer »*



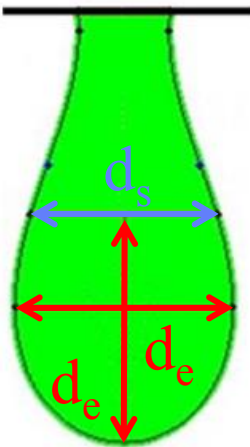
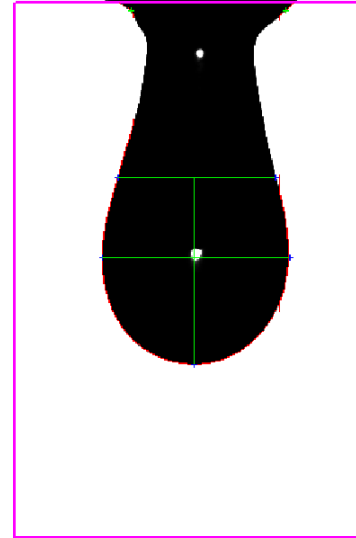


# Measure de la tension de surface

## Appareil Digidrop de GBX



Tension: 34.8 [mN/m] Temps: 28.000s



(Stauffer, 1965)

Equation de Young-Laplace

$$\Delta P = \Gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

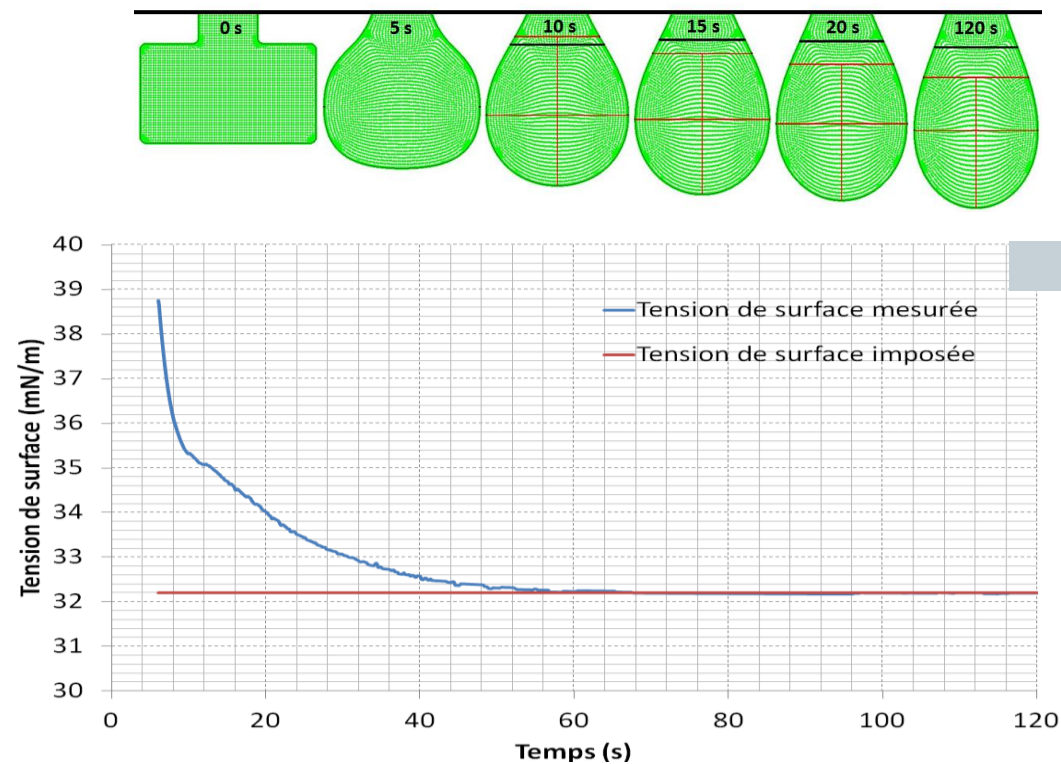
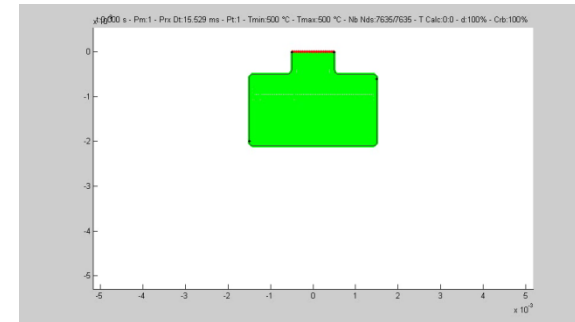
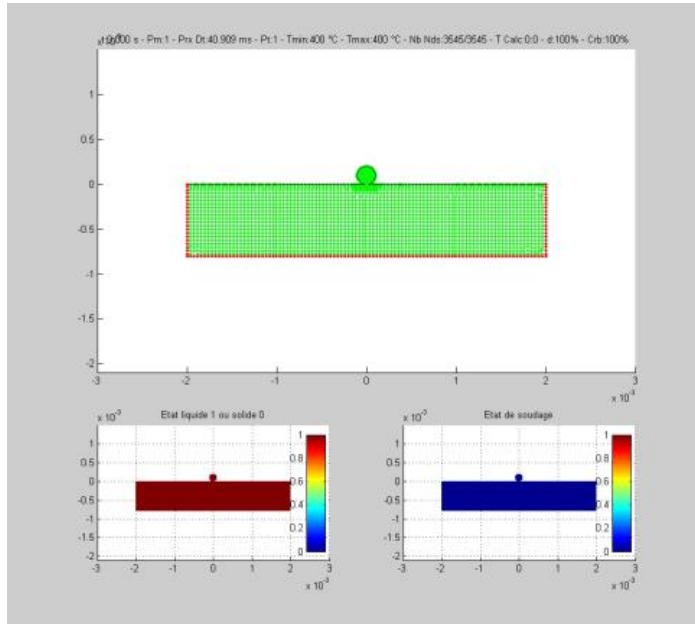


$$\Gamma = \frac{\rho g d_e^2}{H(d_s)}$$

Mean PEEK and PEKK values	32 mN/m
STD	2.5 mN/m

# Validation de la simulation numérique

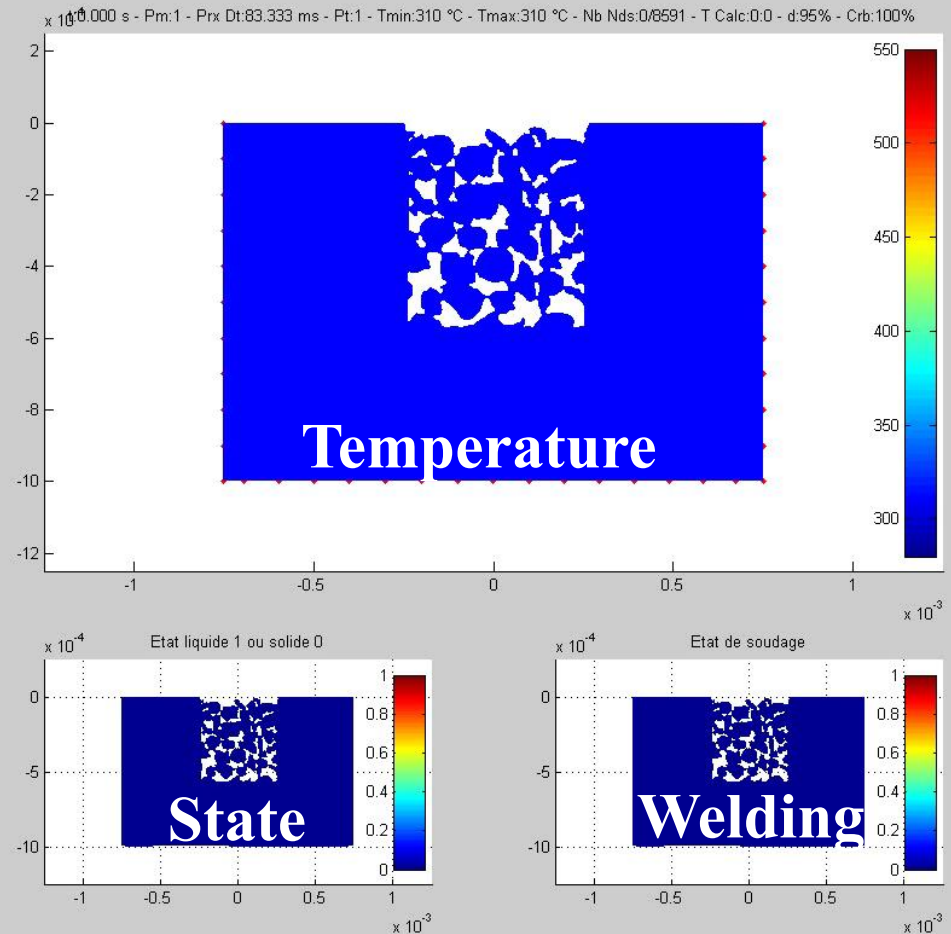
## Simulation numérique Méthode CNEM



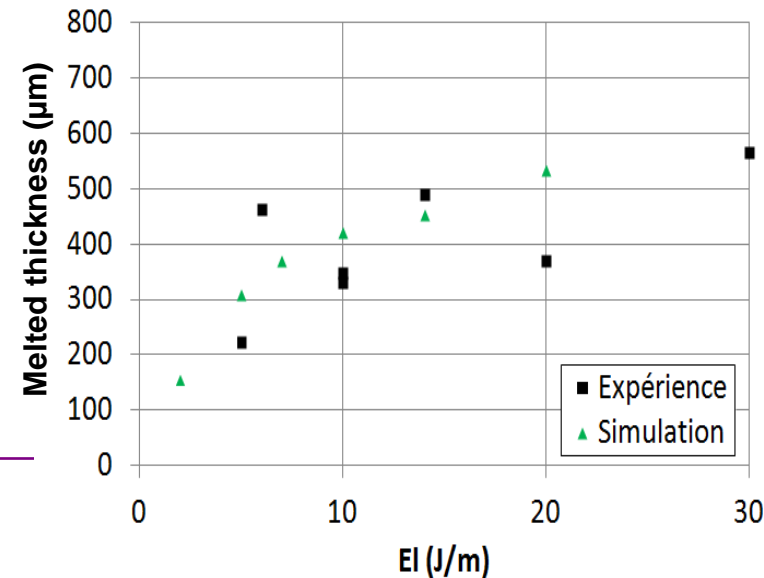
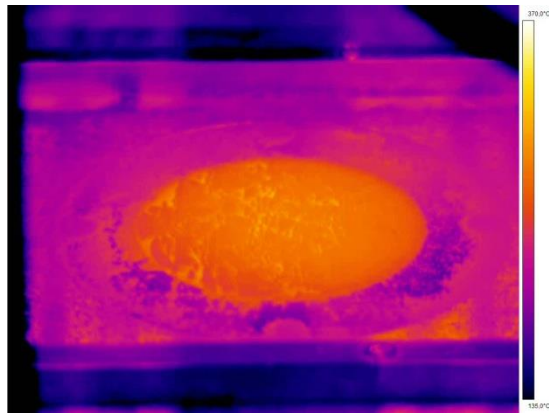
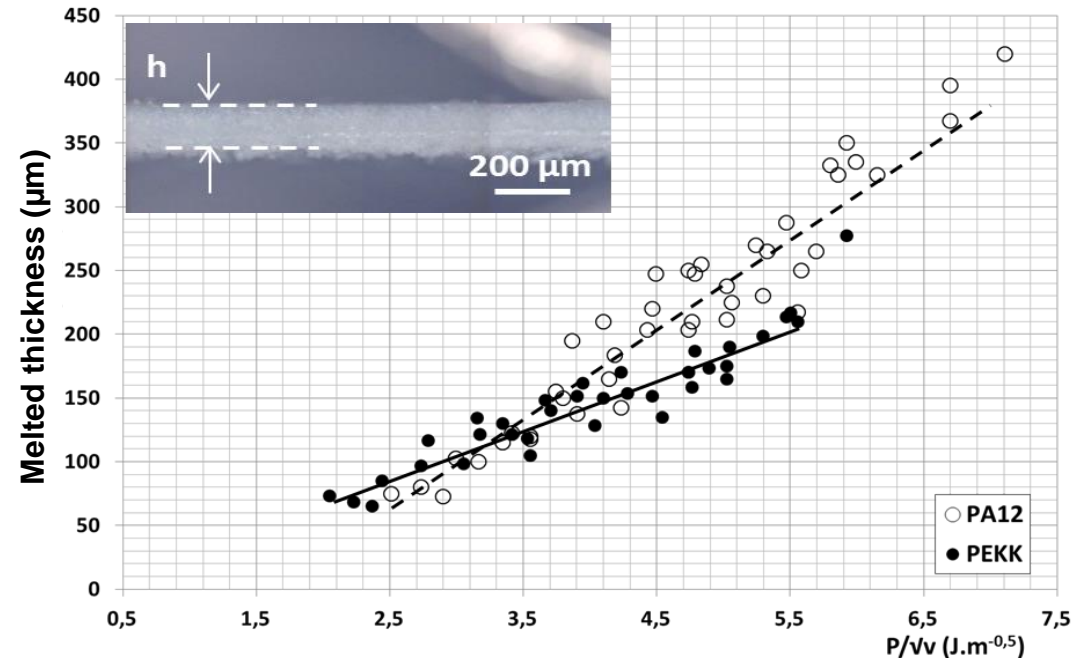
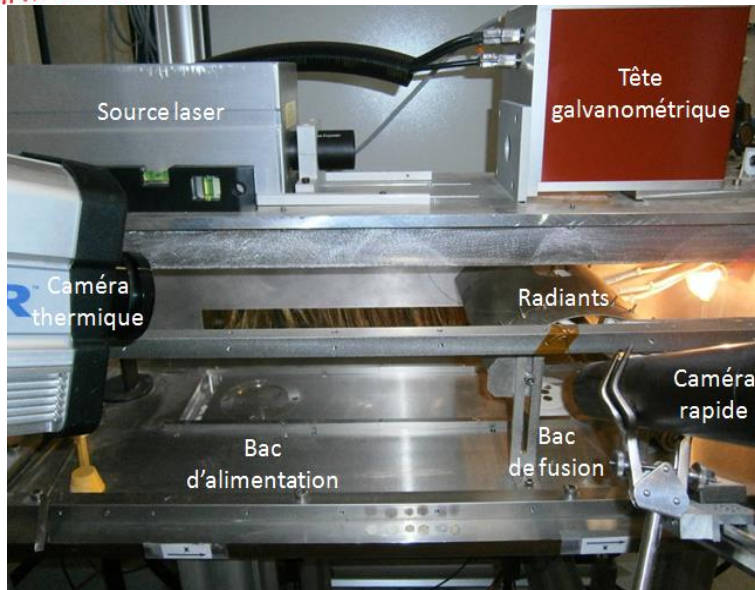
# Simulation de la coalescence d'un lit de poudre

Polymer	PEEK
Température de préchauffage	310 °C
Vitesse de déplacement laser	1 m/s
Puissance du laser	5 W
Energie linéique déposée El (P/V)	5 J/m

Durée de la simulation : 30 s  
 Durée du balayage laser : 1,2 ms  
 Vidéo temps réel  
 Temps de calcul : 25 h



# Recalage et validation des simulations : Comparaison de l'épaisseur fondue



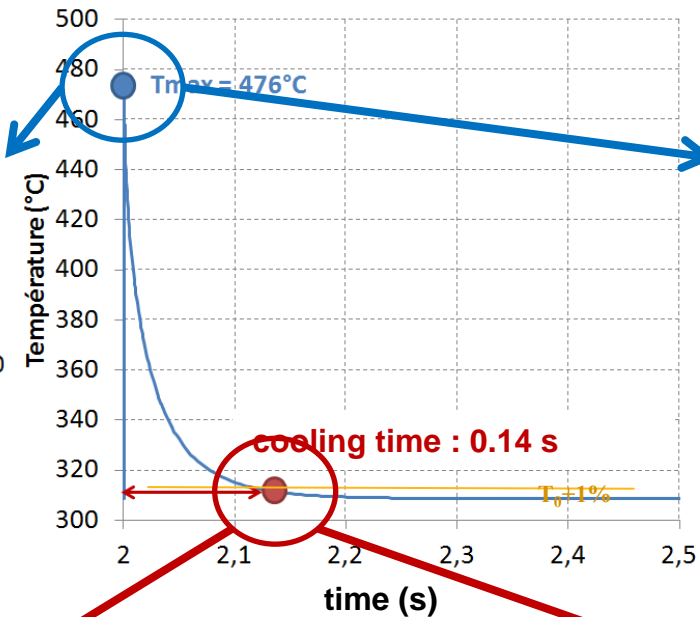
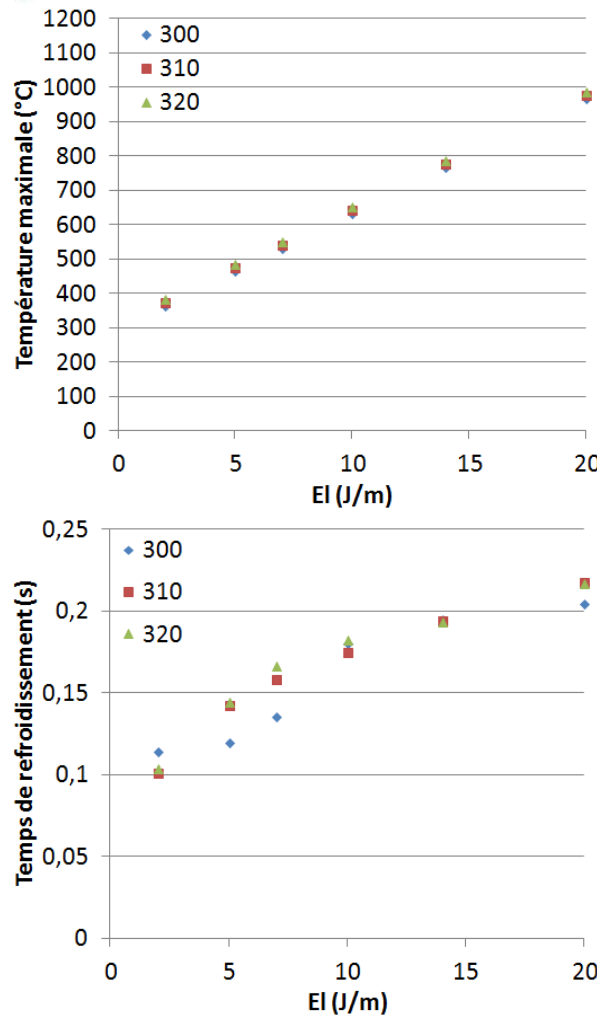




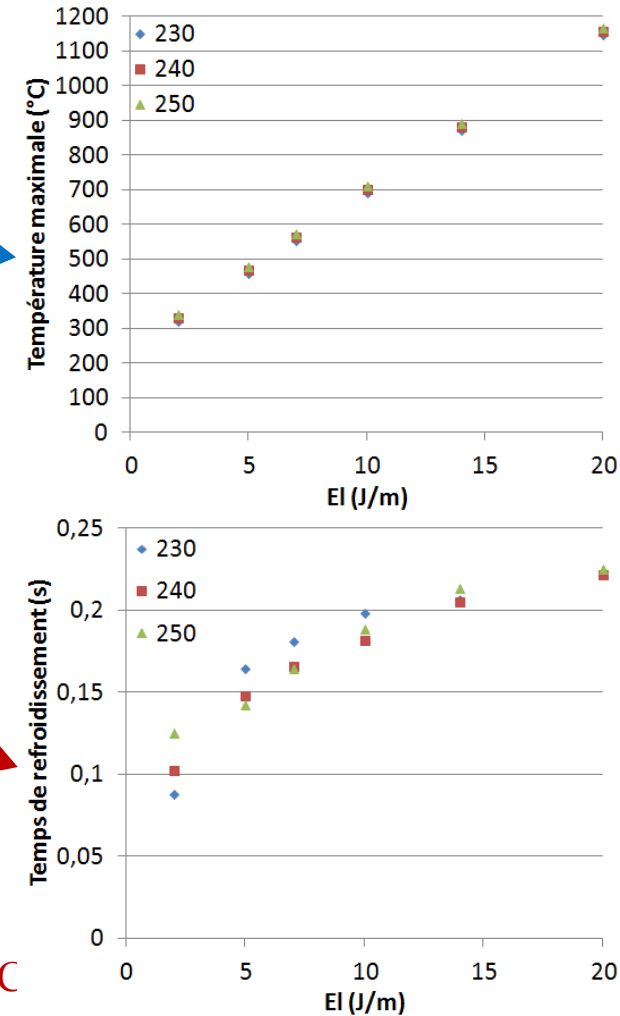
# Simulation results

## Knowledge of thermal cycles

PEEK



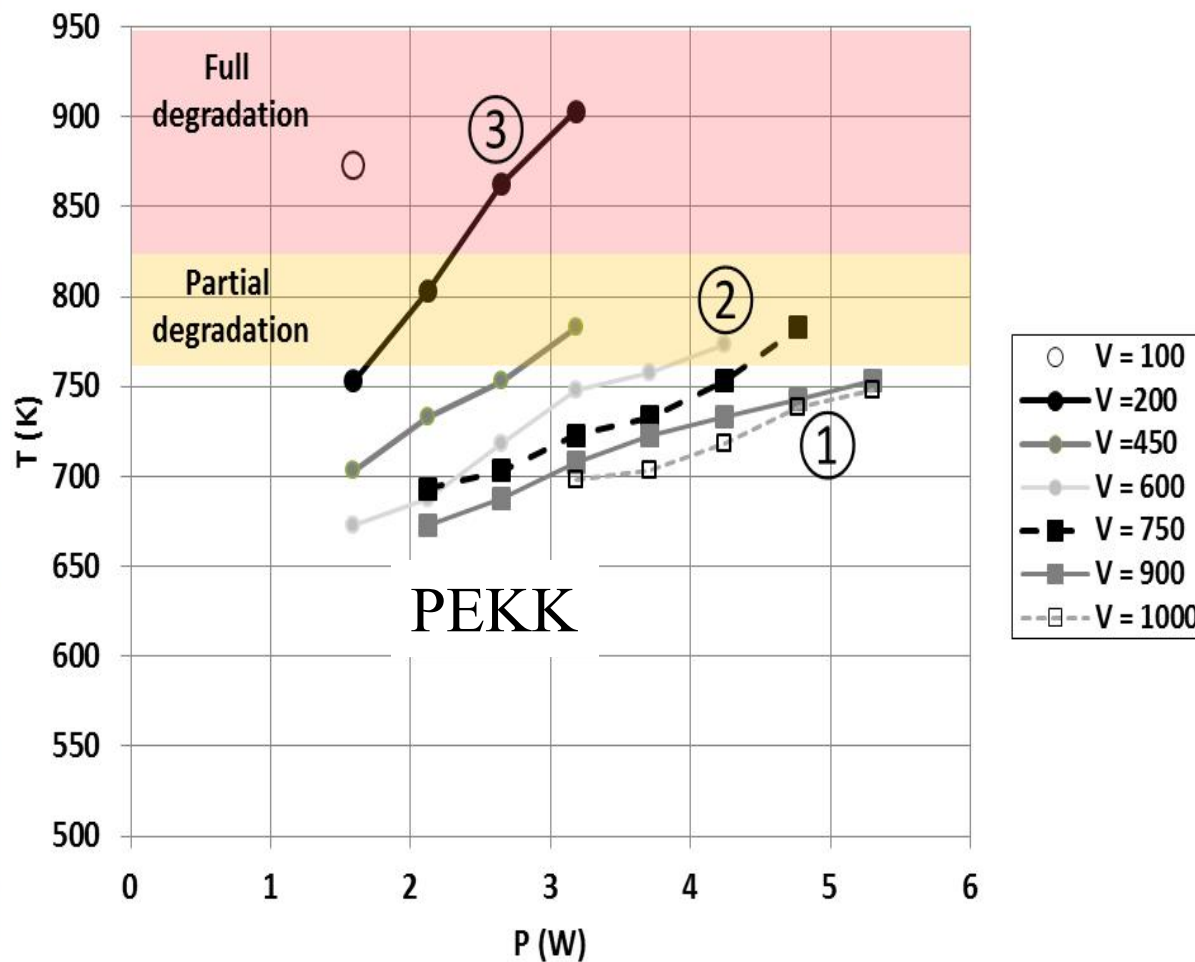
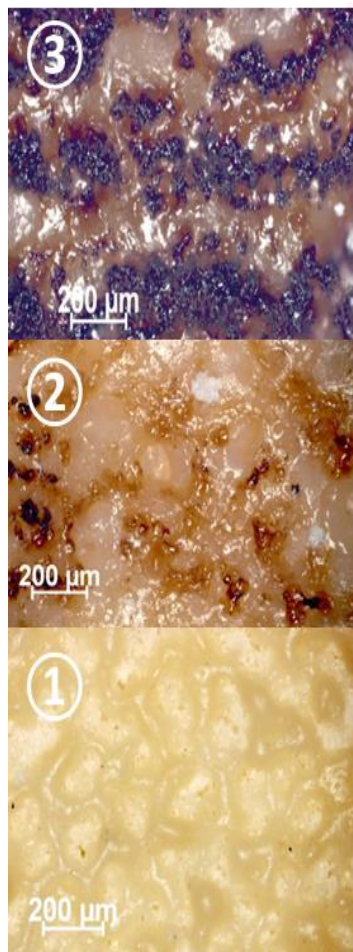
PEKK



## Résultats

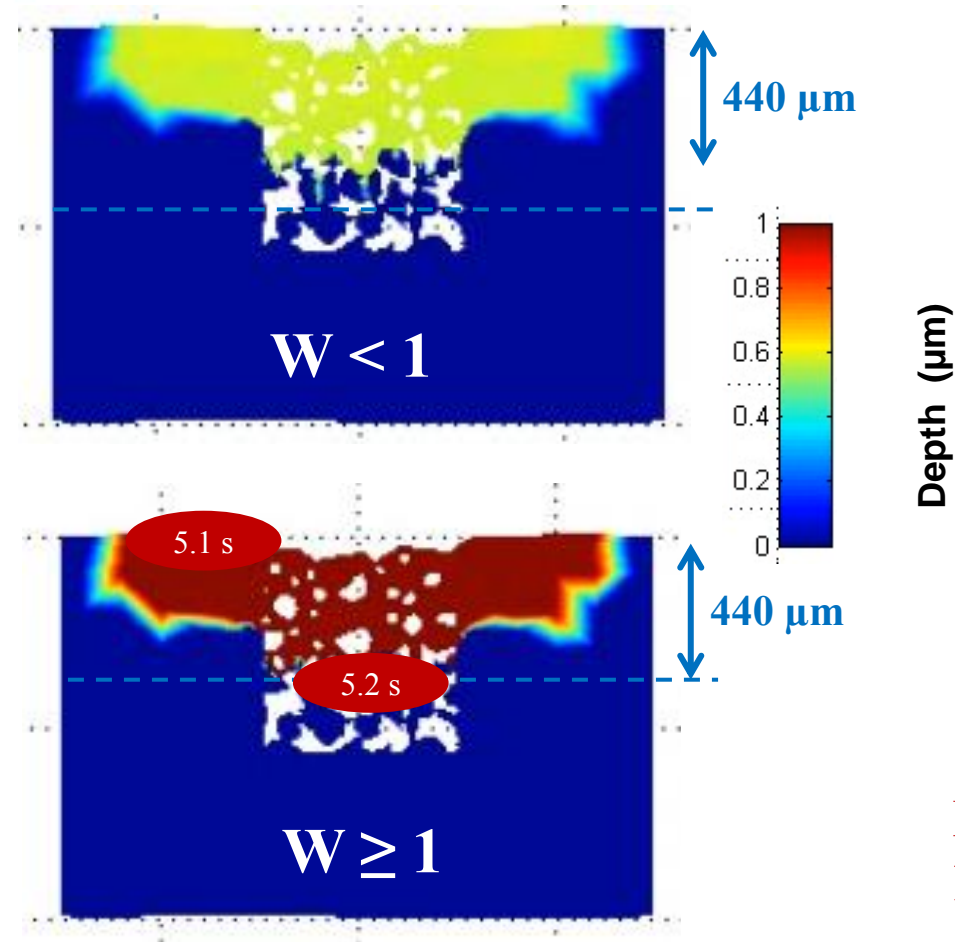
Elévation de  $T_{polymère}$  entre 50 et  $900^{\circ}\text{C}$   
Refroidissement très rapide  $< 0,25\text{ s}$

# Influence de la puissance et la vitesse laser





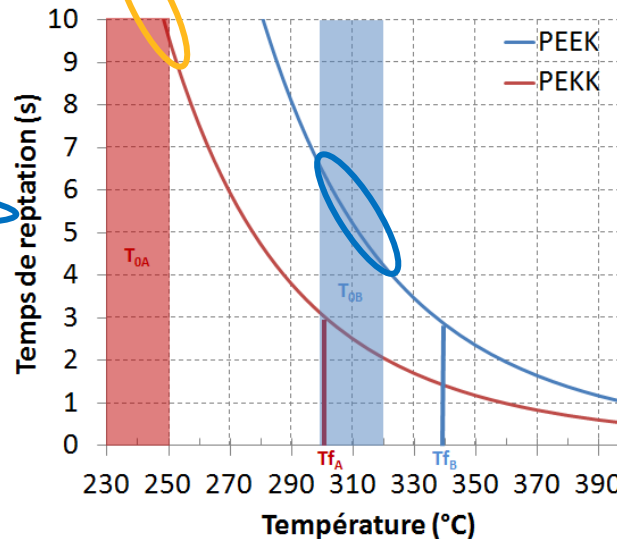
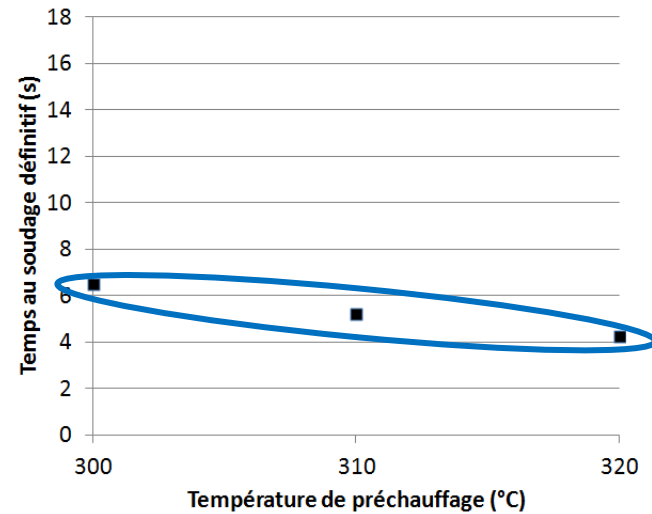
# Analyse des temps de soudage



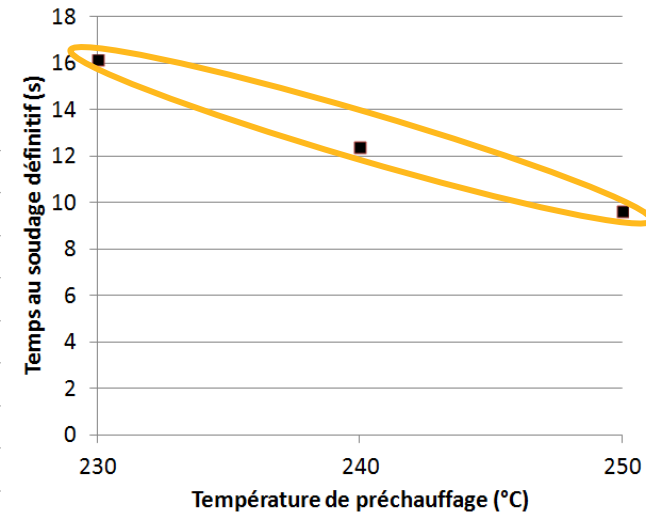
Dans pratiquement toute la zone fondue,  
les interfaces ont le temps de se souder

# Prediction du temps de soudage à l'interface des grains

PEEK



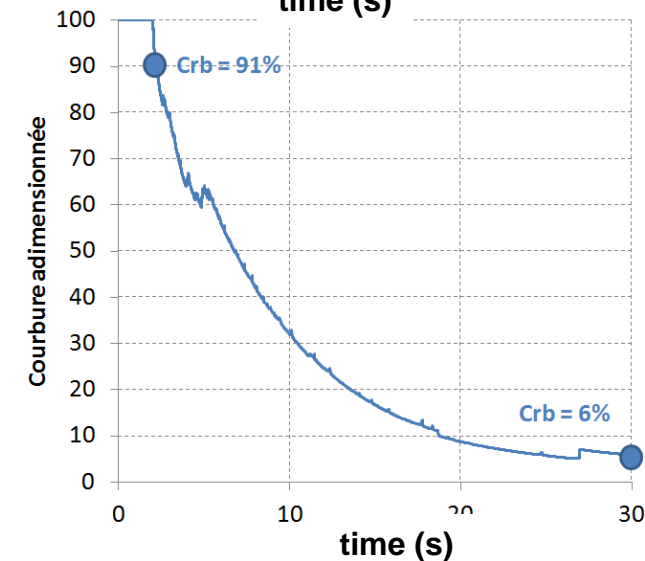
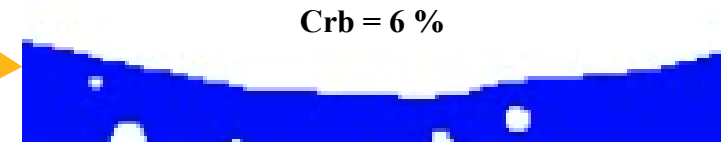
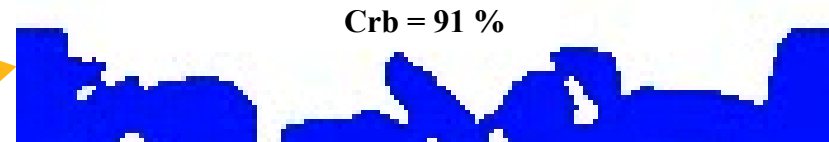
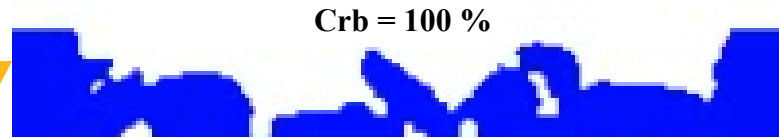
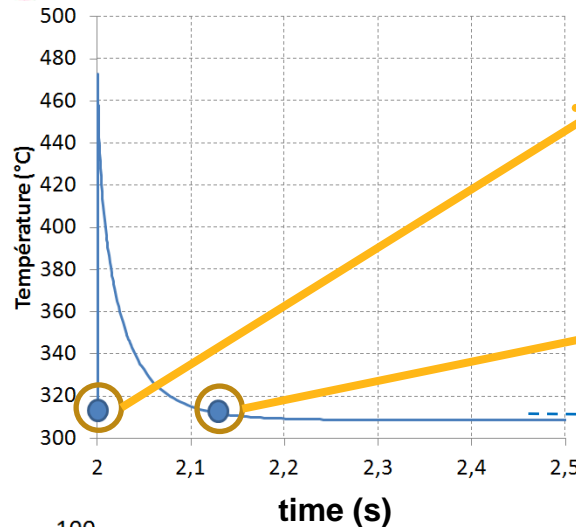
PEKK



## Résultats

Temps de soudage dépend de la température de pré-chauffage  
Pas de variation significative dans l'épaisseur fondue

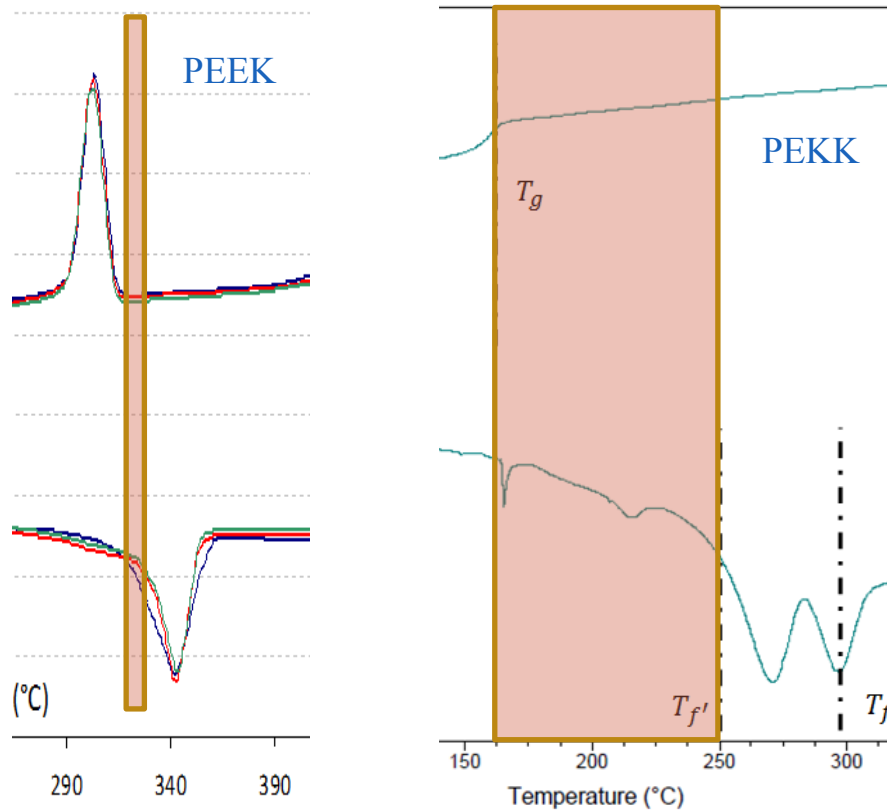
# Analyse des temps de coalescence



Temps de coalescence pour le lit de poudre :  
entre 8 et 30 s pour les conditions de procédé choisies

Les temps de soudage < temps de coalescence  
du lit de poudre

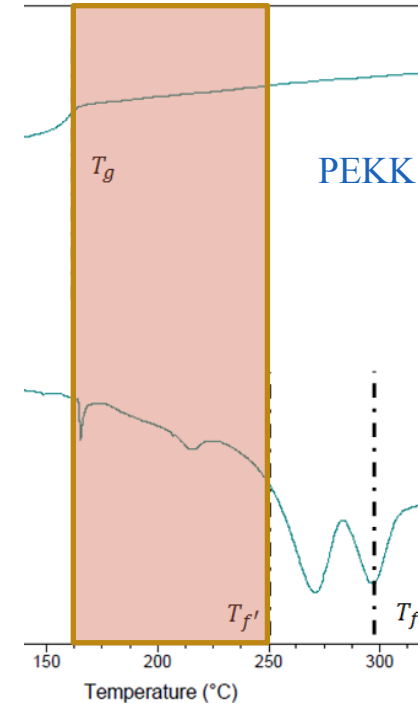
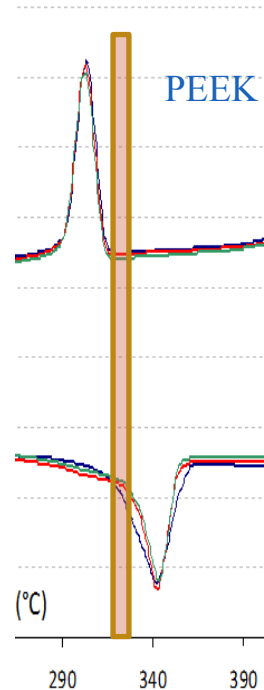
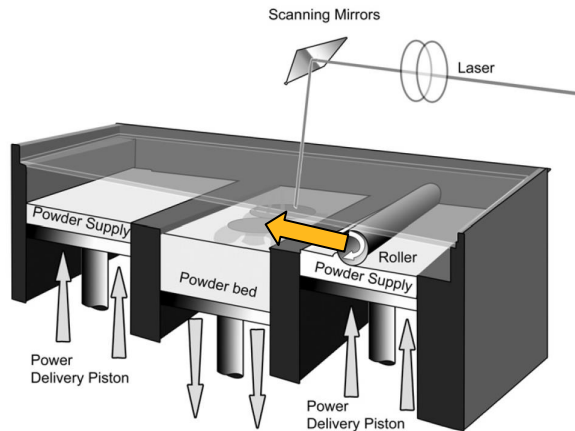
# Aptitude des poudres thermoplastiques au procédé SLM



Fenêtre de procédé très étroite pour le PEEK

**Très difficile de mettre en œuvre des polymères amorphes**

# Etalement d'une couche de poudre



Diffusion de l'air emprisonné :  
la zone fondue ne doit pas cristalliser lors de l'étalement  
d'une nouvelle couche

# Conclusions

## **Banc experimental SLM**

- ⇒ identification expérimentale de l'interaction laser / lit de poudre
- ⇒ Recalage et validation de la simulation

## **Simulation multiphysique à l'échelle de la poudre**

- ⇒ Estimation des grandeurs thermiques mis en jeu
- ⇒ Compréhension assez fine du procédé
- ⇒ Des pistes pour améliorer le procédé



# Perspectives

- Interaction laser / lit de poudre à l'échelle microscopique (diffusion de Mie)  
⇒ optimisation de la granulométrie de la poudre
- Diffusion de l'air dans le polymère fondu  
⇒ prédiction des taux de porosités  
⇒ He au lieu de N<sub>2</sub> ?
- Stratégie avec plusieurs laser ?  
Faisceau défocalisé ?
- Influence de la dégradation du polymère  
(tension de surface, masse molaire, ...)

