



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

Gilles Régnier

Denis Defauchy

Patrice Peyre

Yann Rouchausse

Louness Illoul

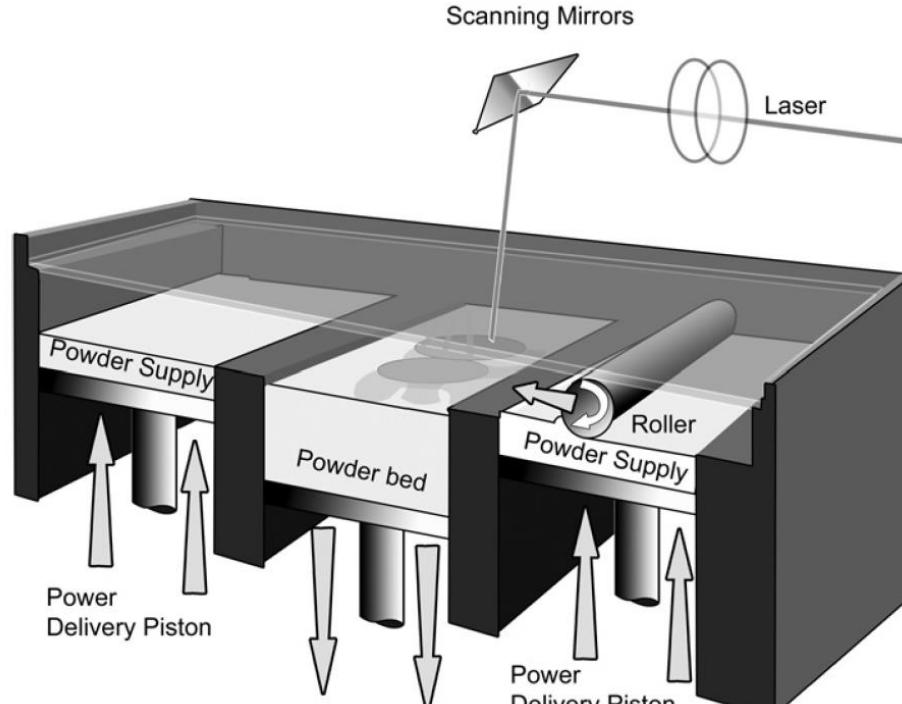


Le principe du procédé SLM

20 à 50h



Ø 20 à 200 µm



Dassault Aviation

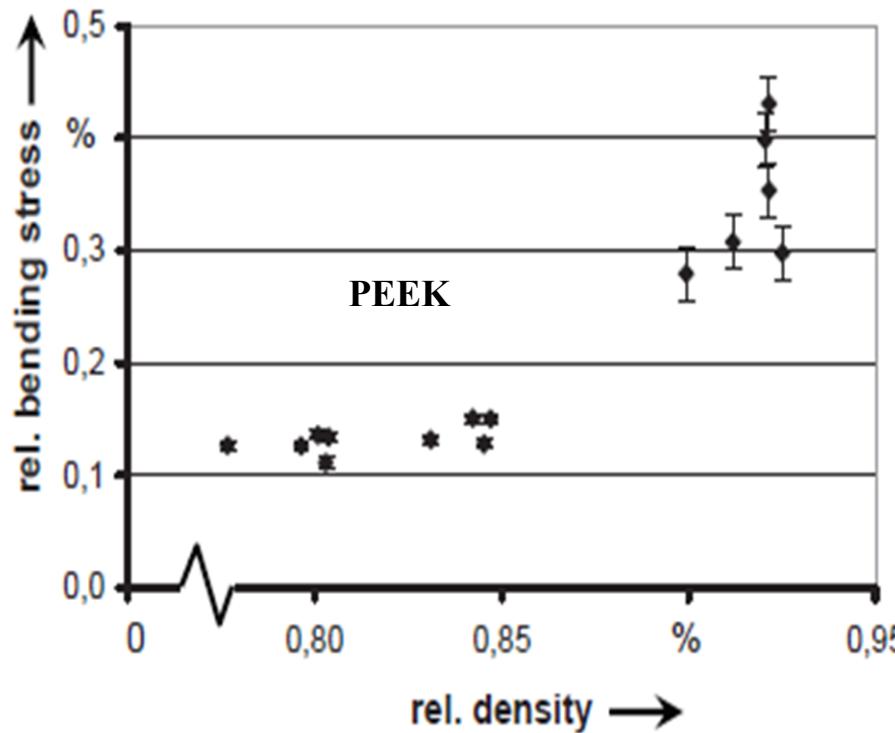


Thales Alenia Space

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

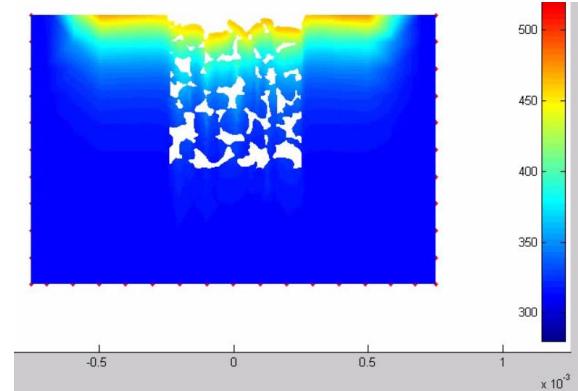


Phénomènes physiques mis en jeu dans le procédé :

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

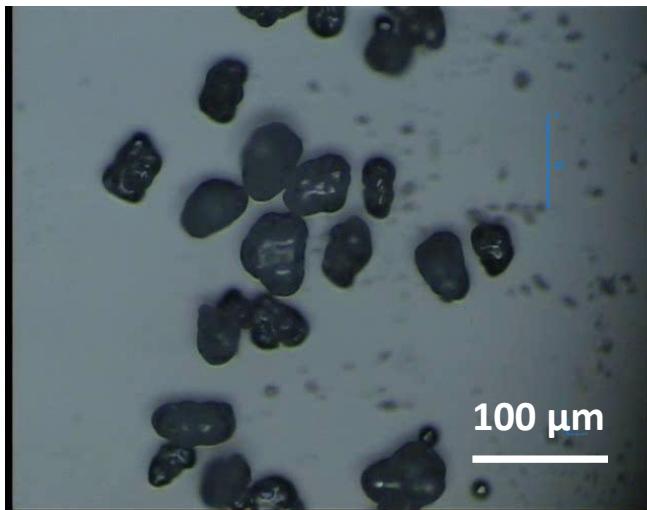


Conception d'un banc SLM

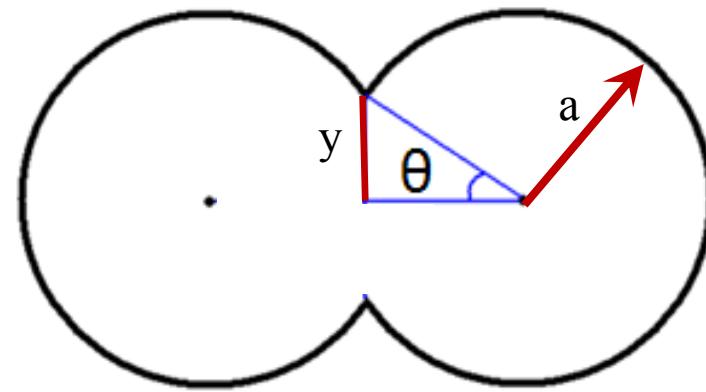


Simulation numérique du procédé SLM

Coalescence de deux sphères



PA12 – Heating $3^\circ \text{ C}/\text{min}$



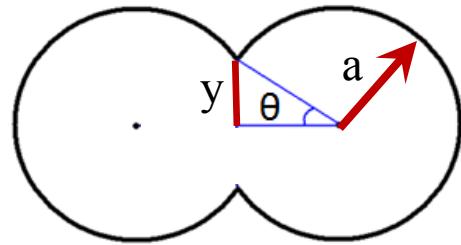
Frenkel (1945), Eshelby (1949)

Forces en présence :

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

Coalescence de deux sphères visqueuses

Résolution



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

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



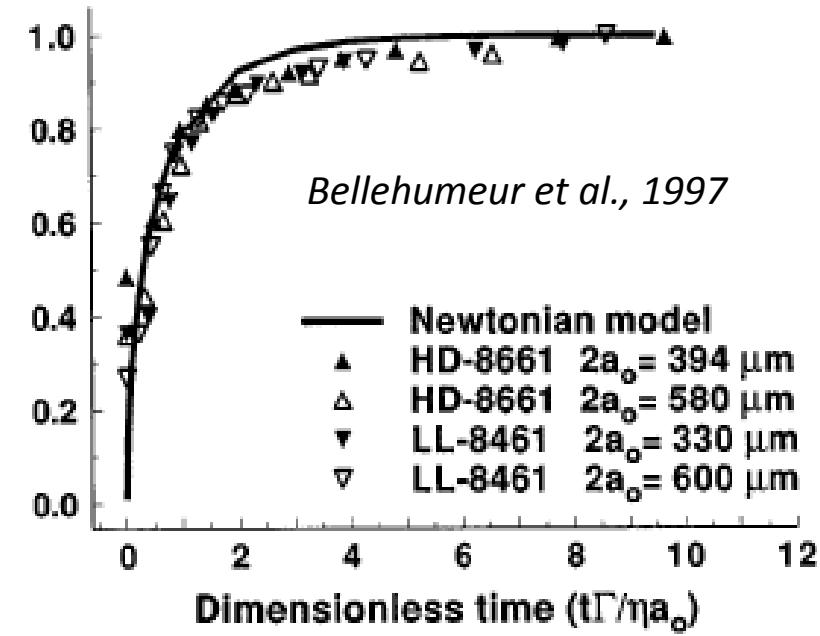
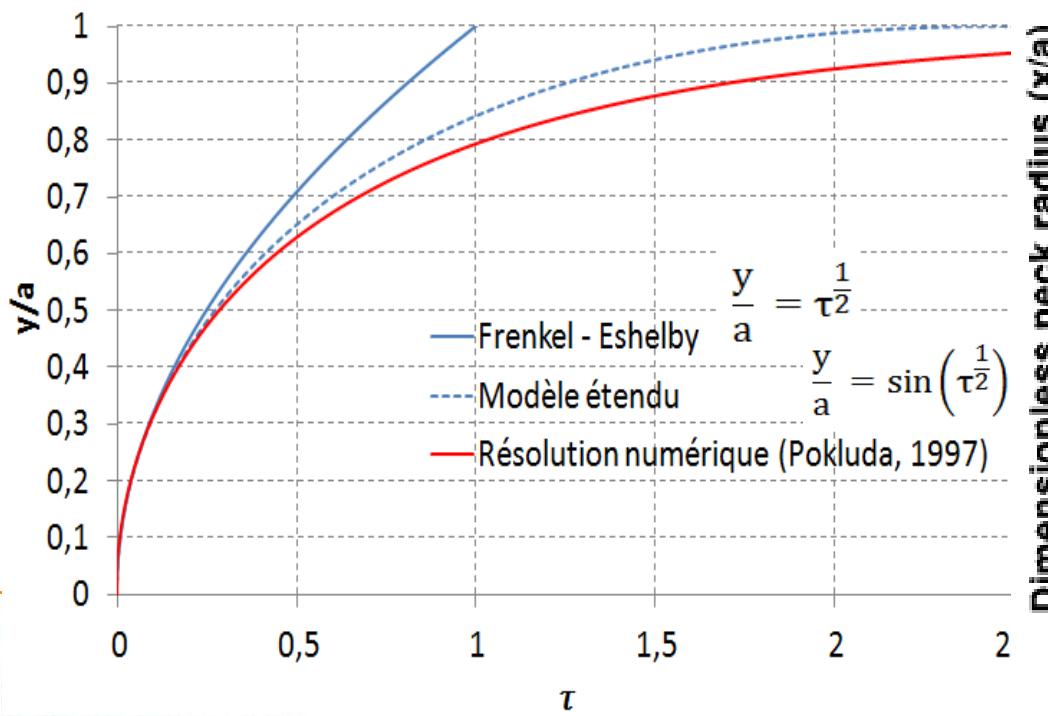
Solution améliorée
(*Defauchy, 2013*)

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



Solution numérique

Pokluda et al. (1997)



Physics of coalescence

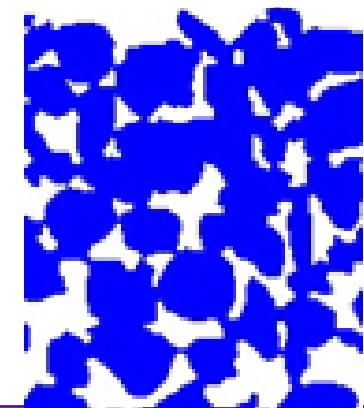
- Peu de différences de cinétique de coalescence entre (*Defauchy, 2013*) :
 - 2 cylindres (*Hopper, Journal of Fluid Mechanics, 1992*)
 - 2 sphères
- Peu d'influence de la viscoélasticité (éventuellement au début) (*Lin et al., 2001 / Stribeck et al., 2006*)
- La cinétique de coalescence est pilotée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

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

Γ Surface tension
η viscosity
a₀ radius of entities

- Coalescence anisotherme d'un lit de poudre :

➡ Besoin d'une simulation

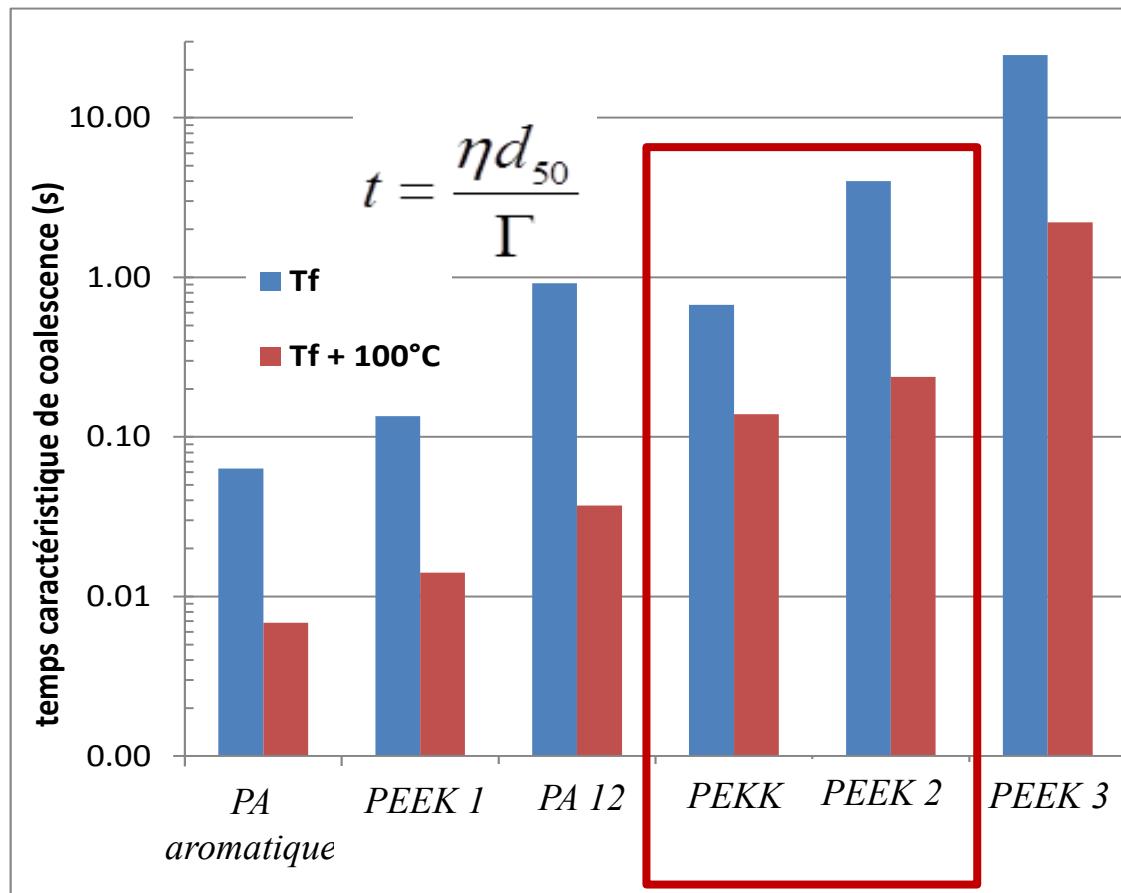


Aptitude des poudres thermoplastiques pour le procédé SLM

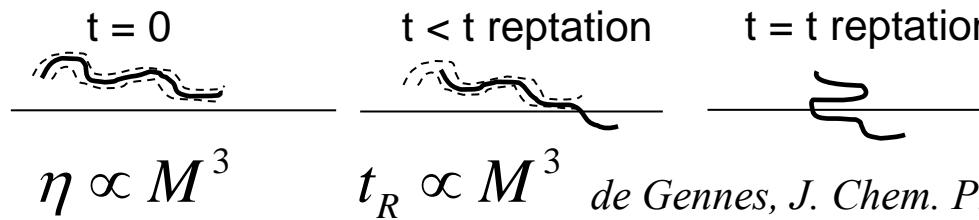
La tension de surface varie entre 25 and 50 mN/m

d_{50} varie entre 10 à 100 μm

η 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-cristallisation 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

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

Yang and Pitchumani, *Macromolecules* (2002)

$W_c > 1 \Rightarrow$ interface cicatrisée

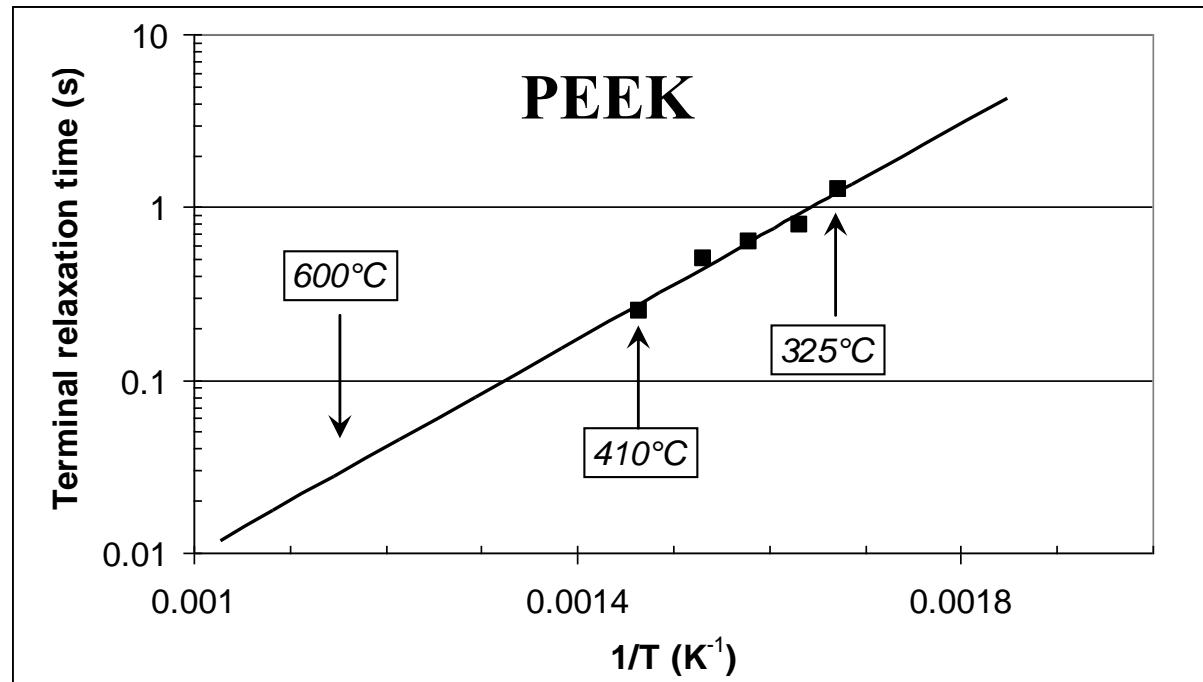
Détermination du
temps de reptation time $t_R(T)$
 \Rightarrow rhéométrie

PEEK

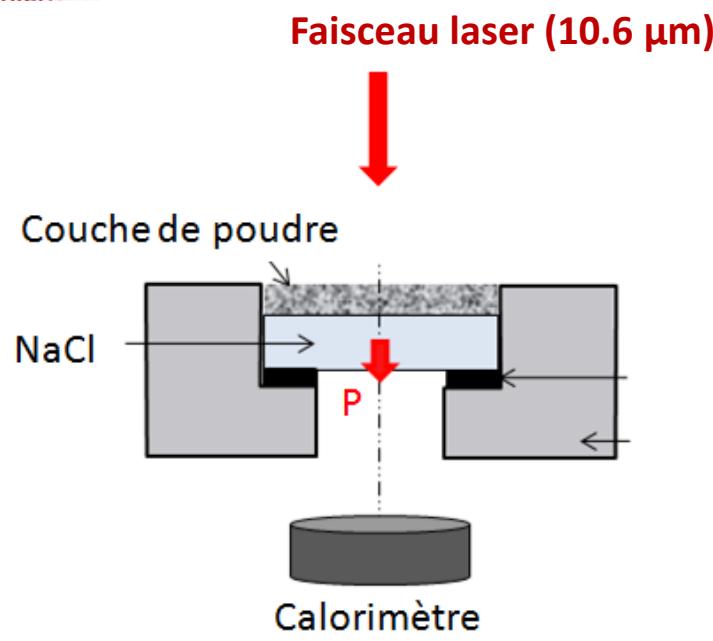
$$tr(s) = 2.1 \cdot 10^{-5} \exp(60000 / RT)$$

PEKK

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

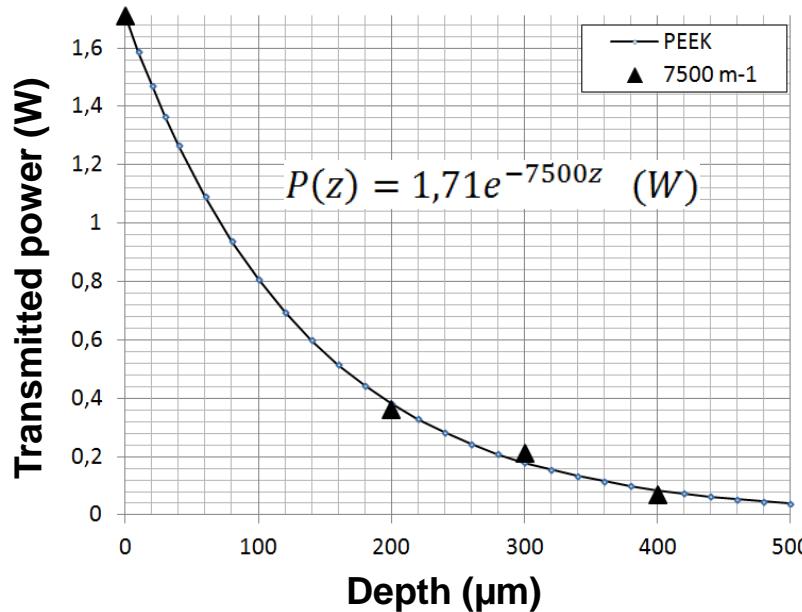


Interaction laser / poudre de polymère

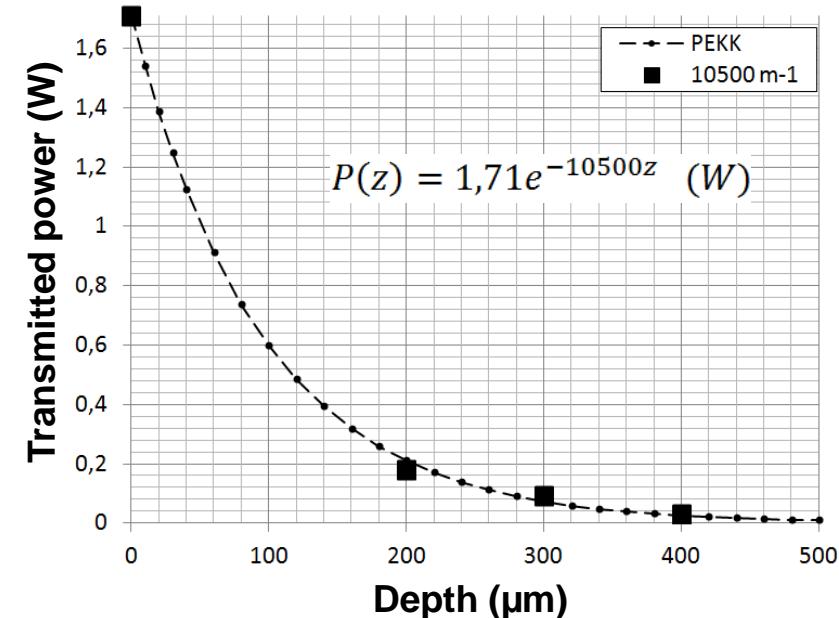


Interaction laser / polymer powder

Identification d'une loi de Beer-Lambert



Poudre	α (m^{-1})
PEEK 1	15000
PEEK 2	7500
PEEK 3	1300
PEKK 1	10500
PEKK 2	8700

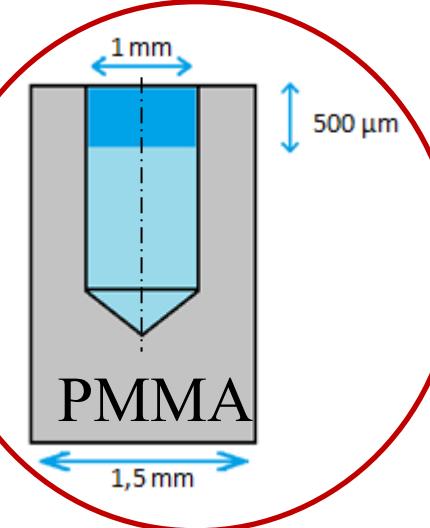
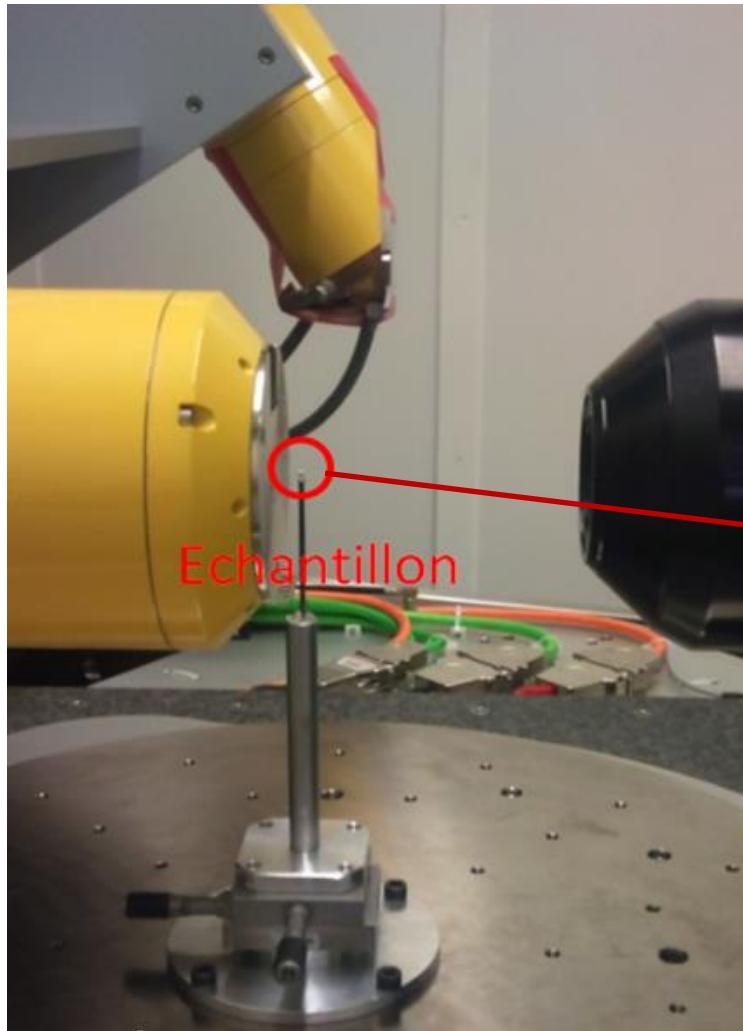


Diffusion de Mie
 $\lambda = 10,6 \mu\text{m} / \text{granulométrie } 10 \text{ à } 50 \mu\text{m}$

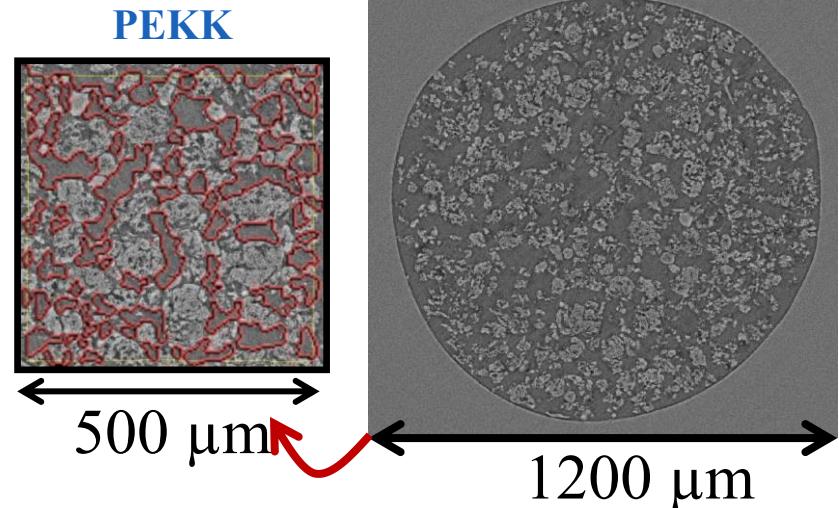
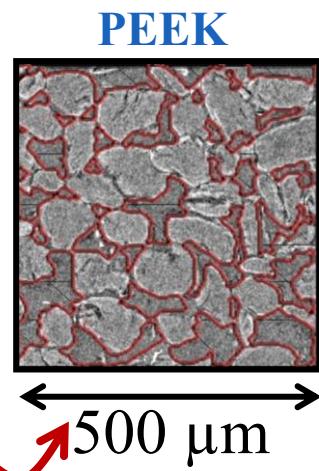
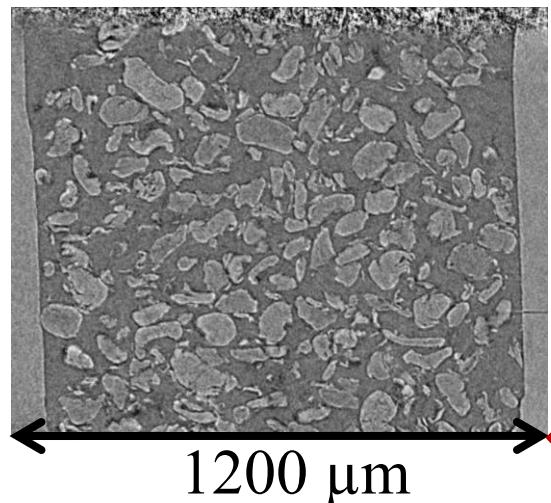
Phénomène complexe de
réflexion – diffusion - absorption

Géométrie des poudres par tomographie X

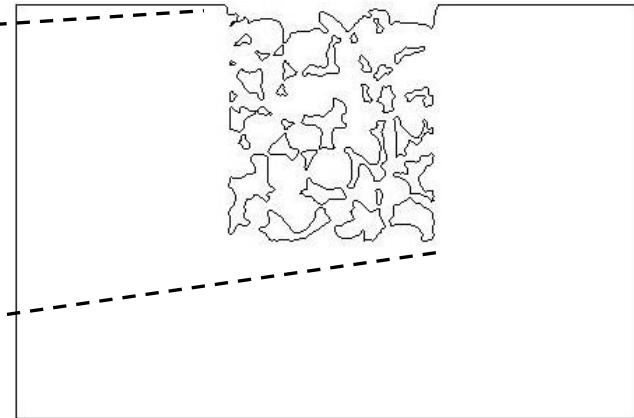
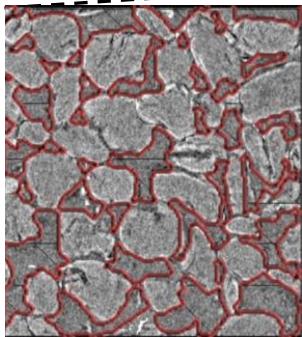
Microtomographie (F2M)



Modélisation de la géométrie des poudres

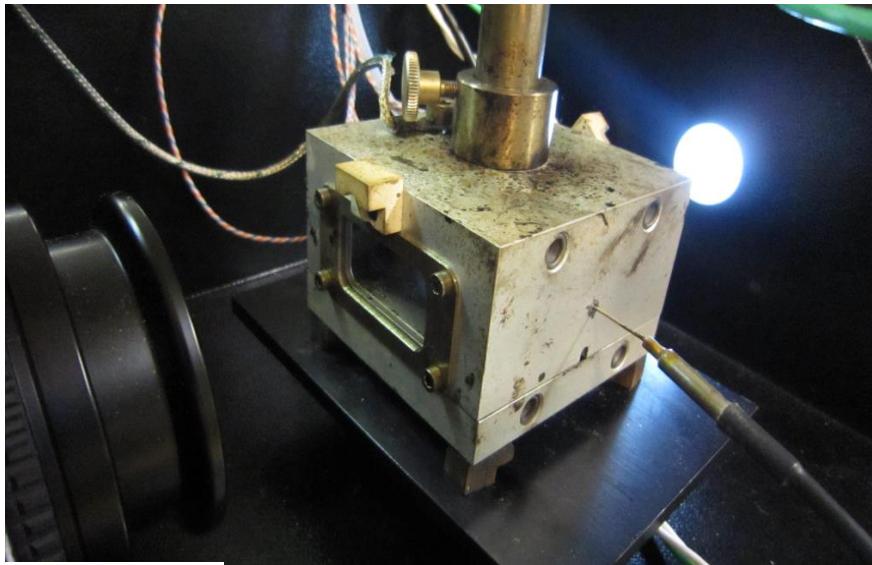


CAD software CATIA DS – Module « Sketch Tracer »

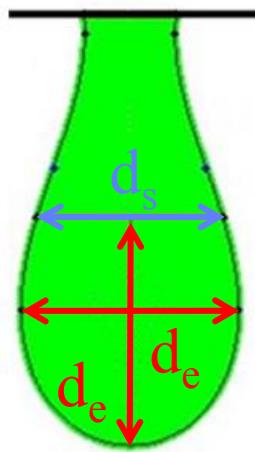
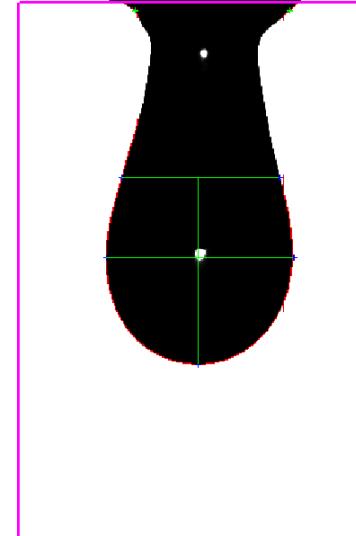


Measure de la tension de surface

Appareil Digidrop de GBX



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



(Stauffer, 1965)
Equation de Young-Laplace

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

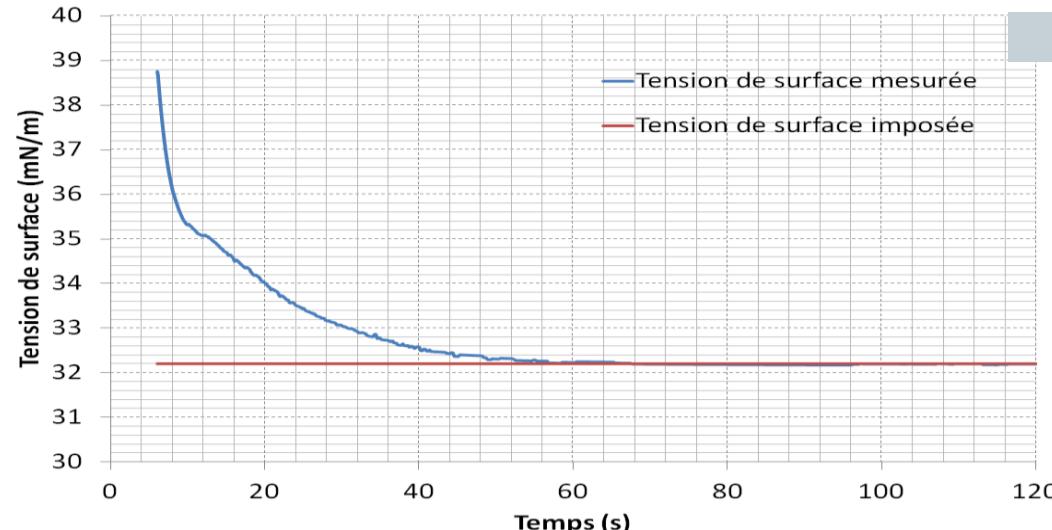
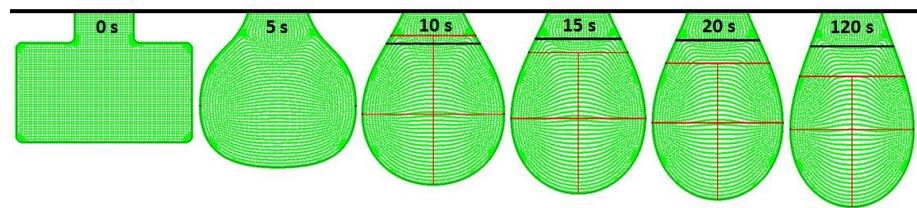
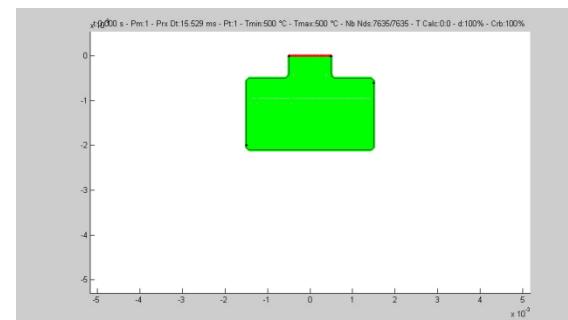
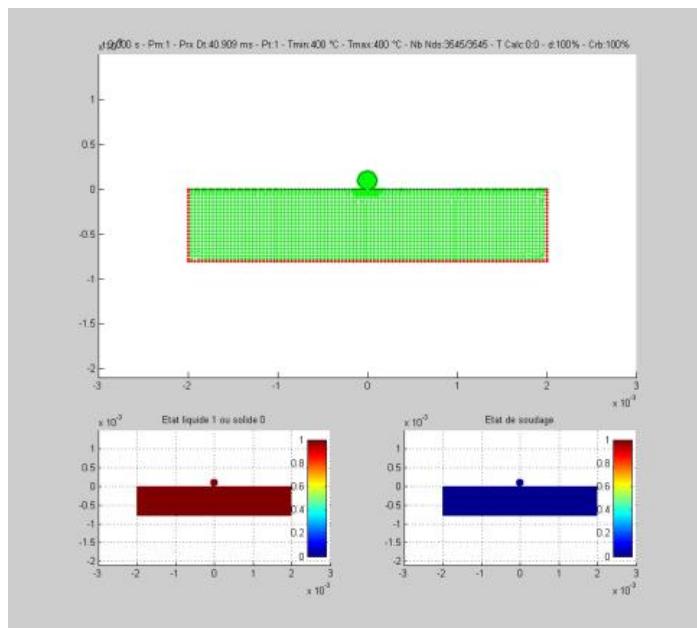


$$\Gamma = \frac{\rho g d_e^2}{H(d_s)}$$

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

Validation de la simulation numérique

Simulation numérique Méthode CNEM

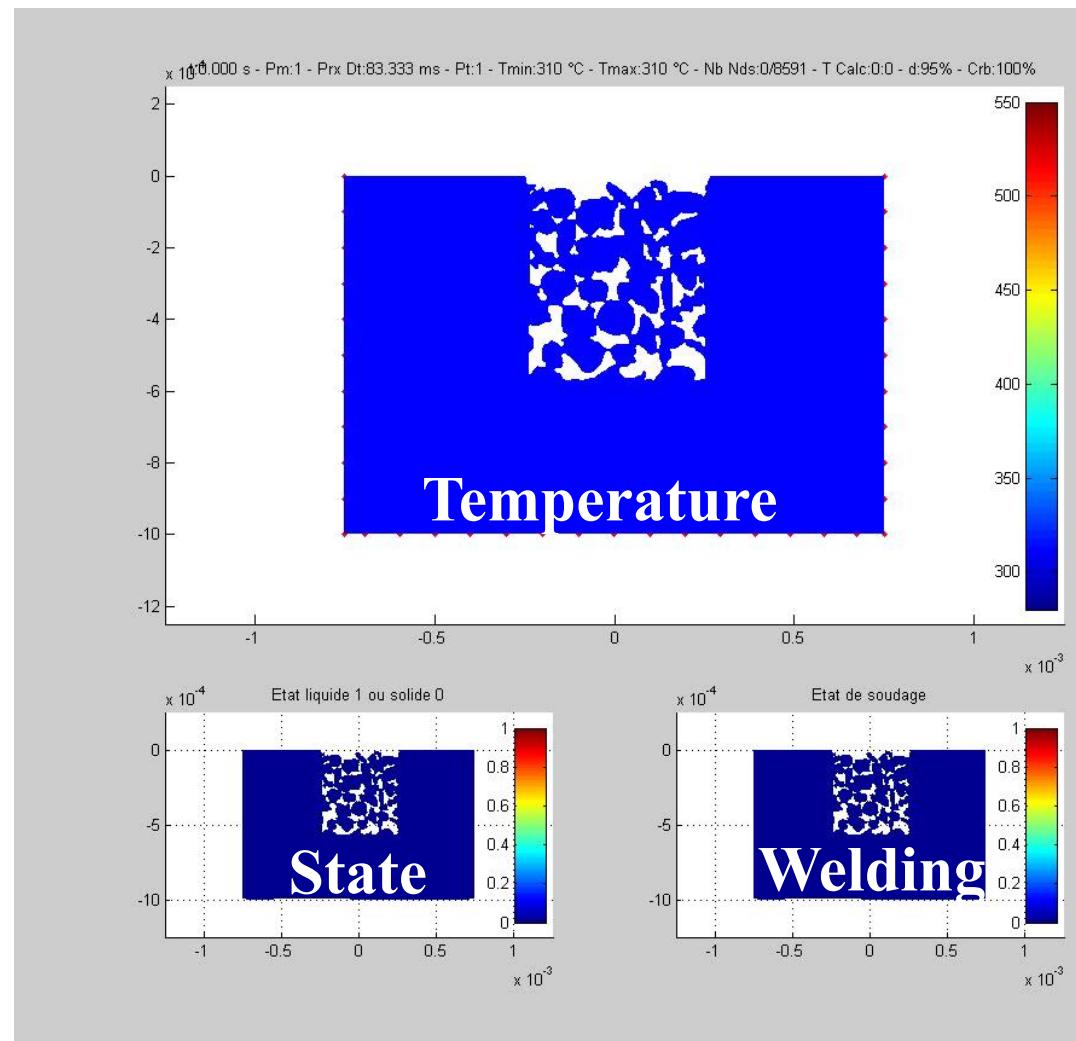


Simulation de la coalescence d'un lit de poudre

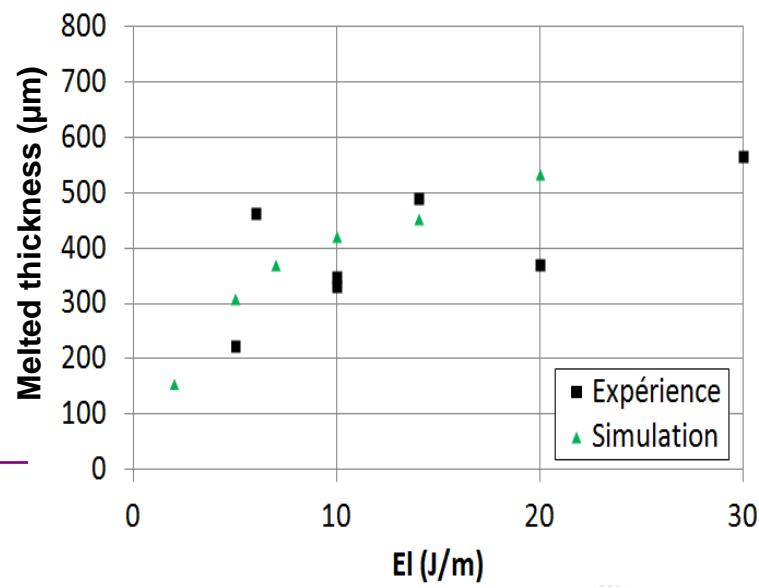
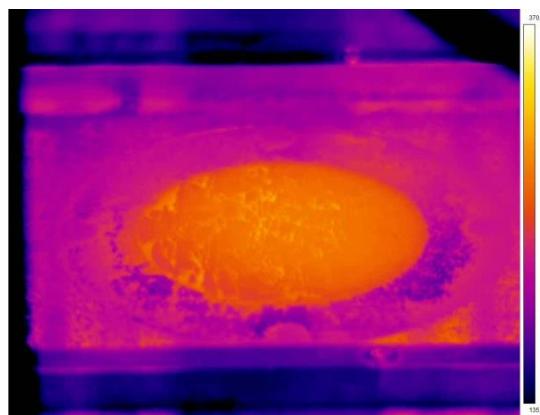
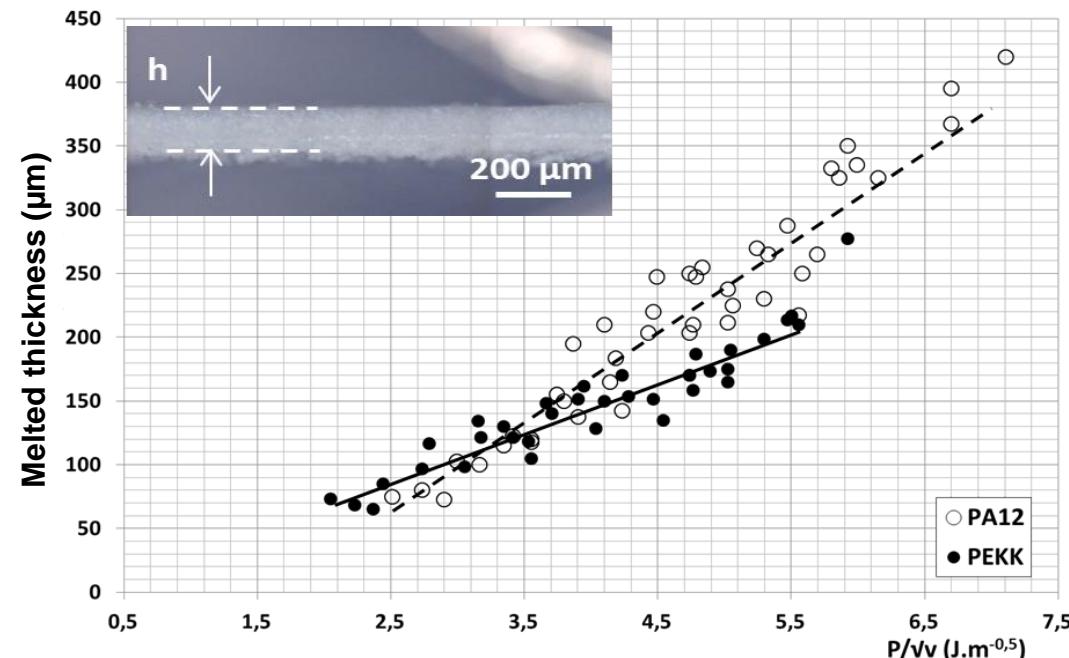
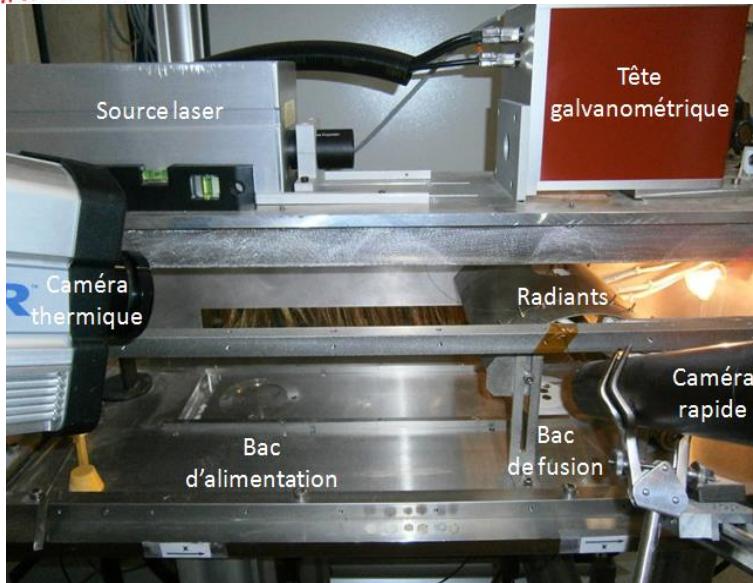
Polymer	PEEK
Température de préchauffage	310 °C
Vitesse de déplacement laser	1 m/s
Puissance du laser	5 W
Energie linéaire déposée El (P/V)	5 J/m

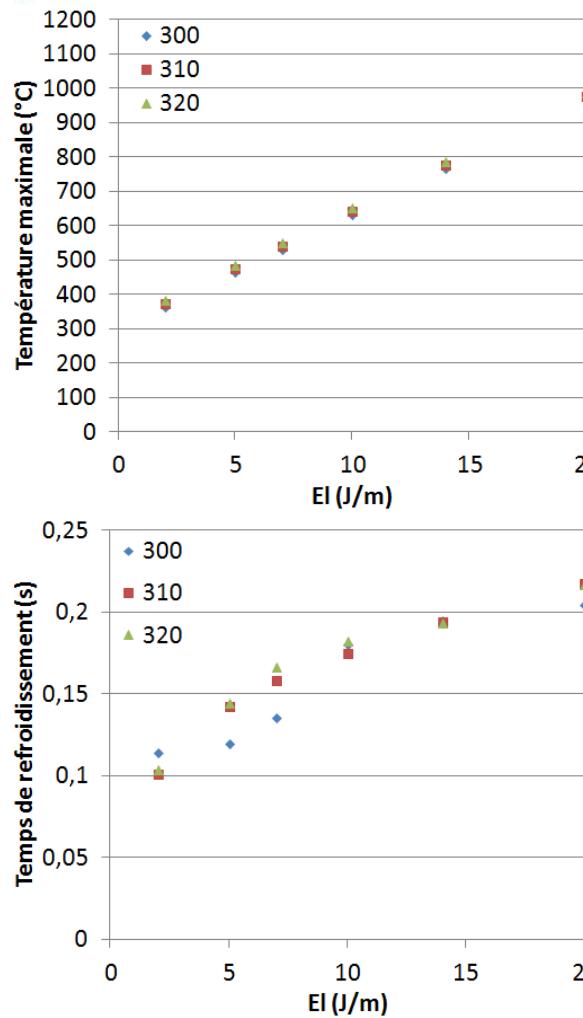
Durée de la simulation : 30 s
Durée du balayage laser : 1,2 ms

Vidéo temps réel
Temps de calcul : 25 h



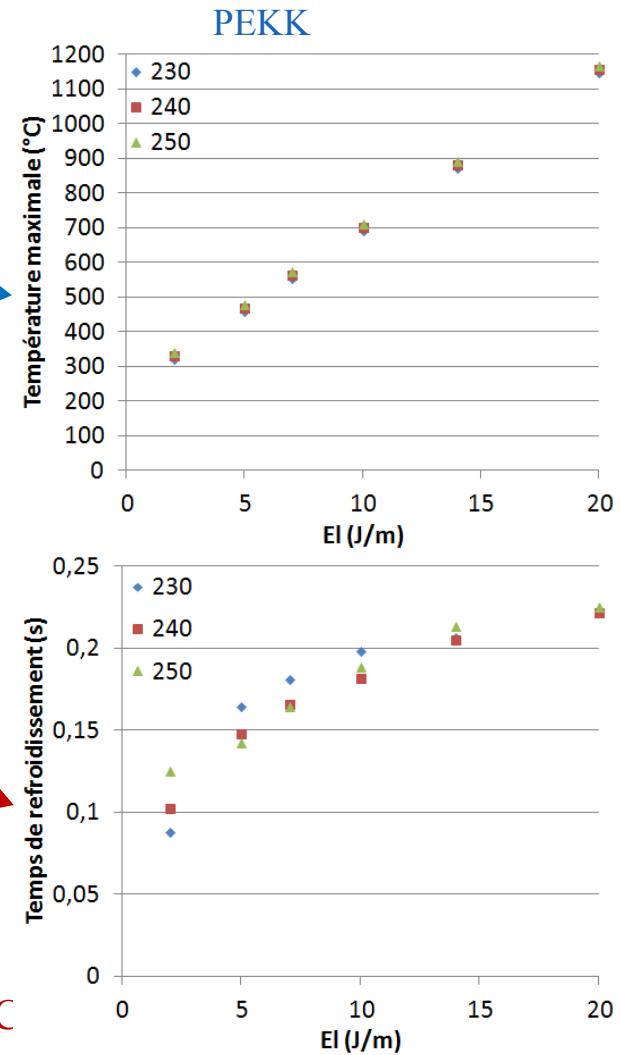
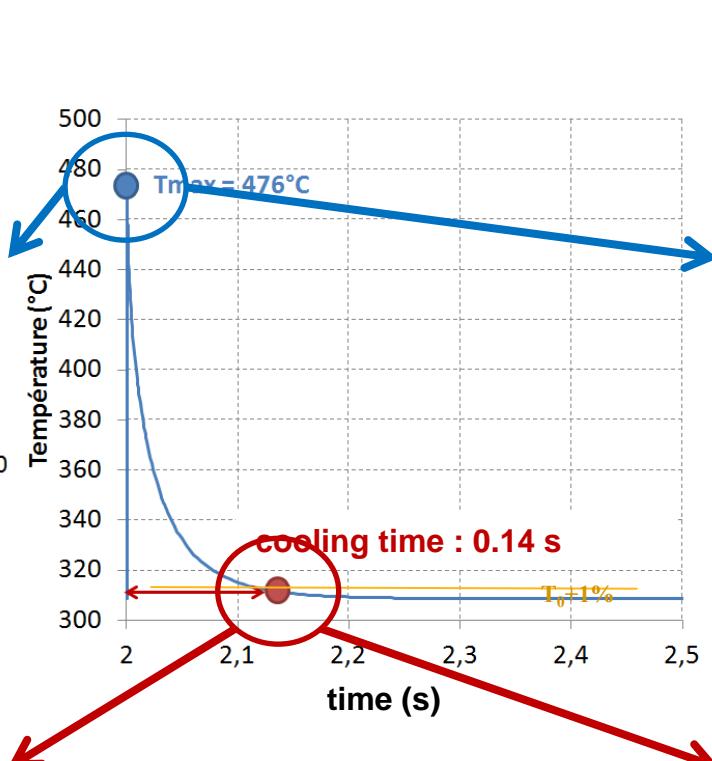
Recalage et validation des simulations : Comparaison de l'épaisseur fondu





Simulation results

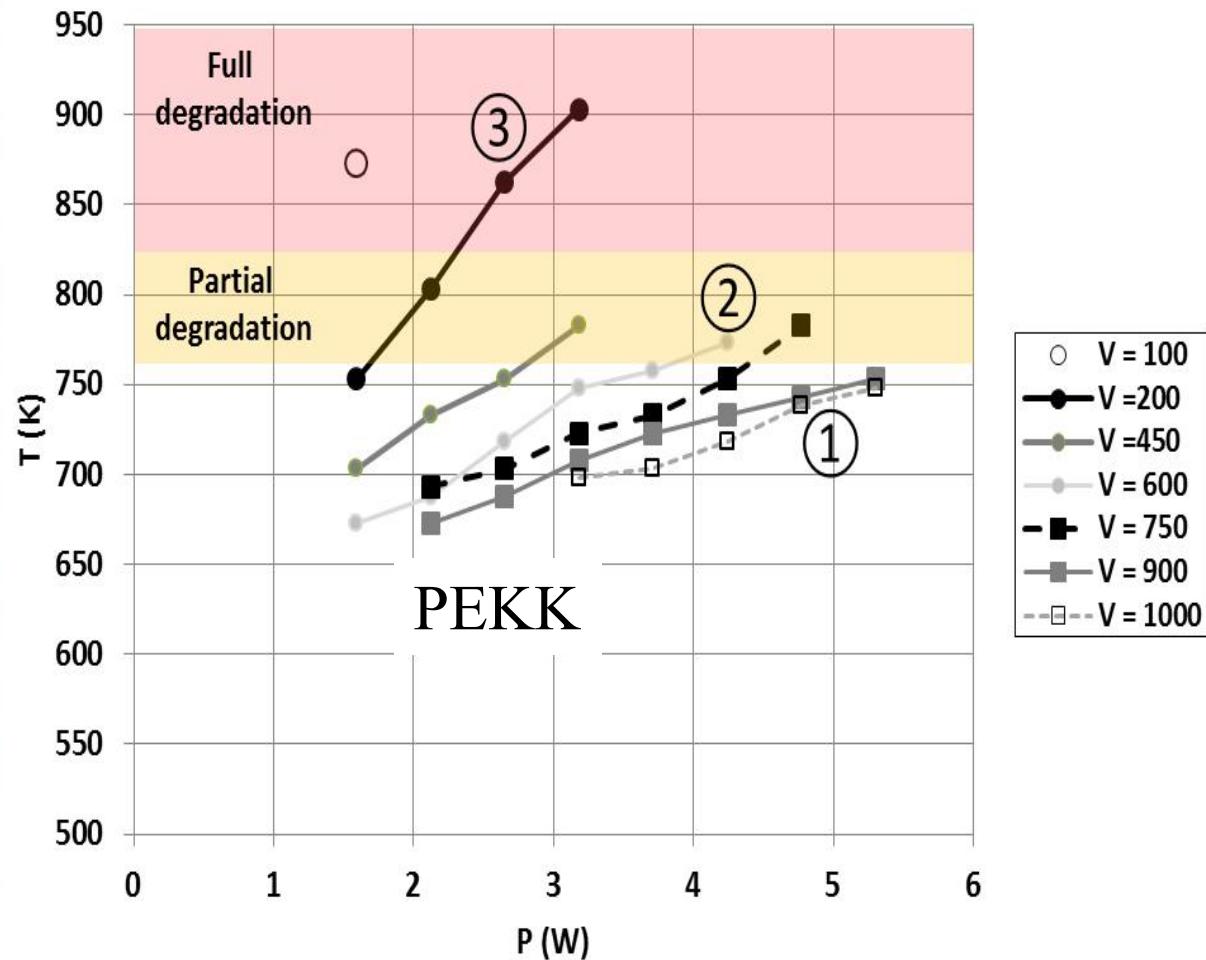
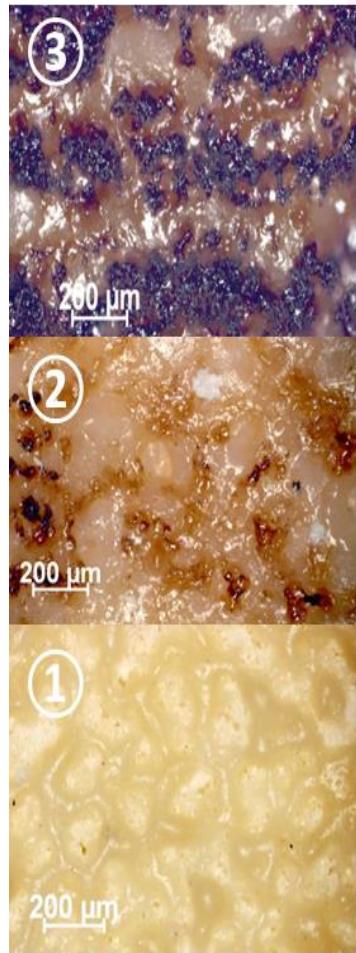
Knowledge of thermal cycles



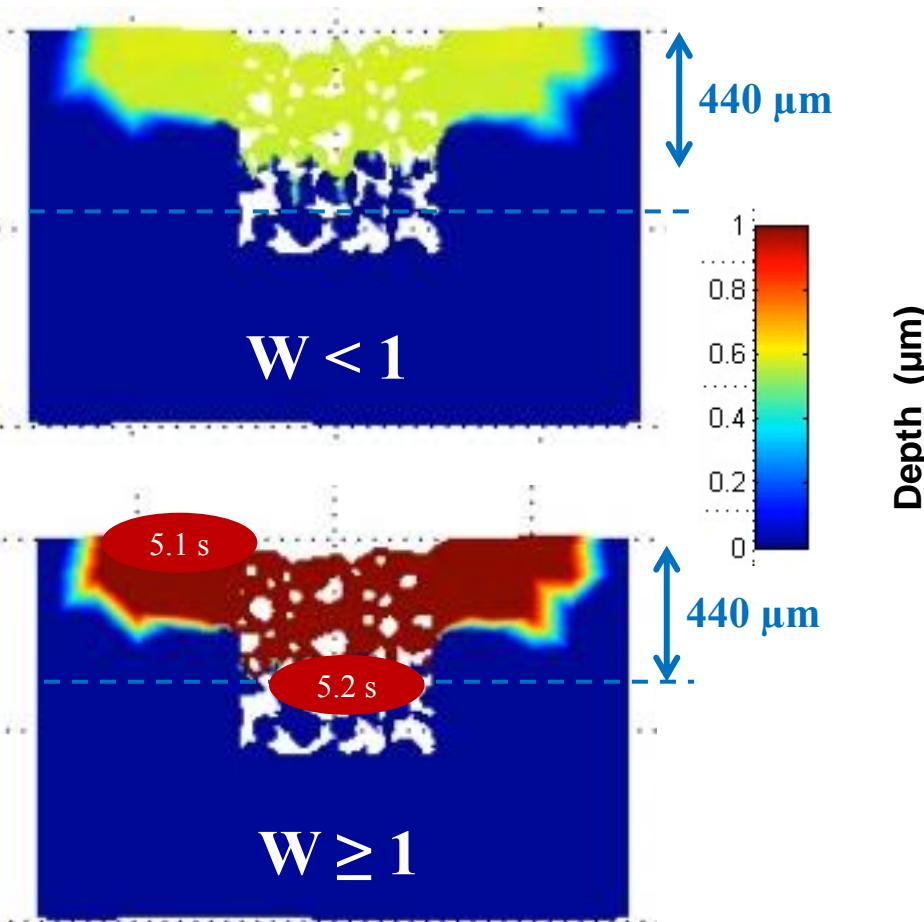
Résultats

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

Influence de la puissance et la vitesse laser



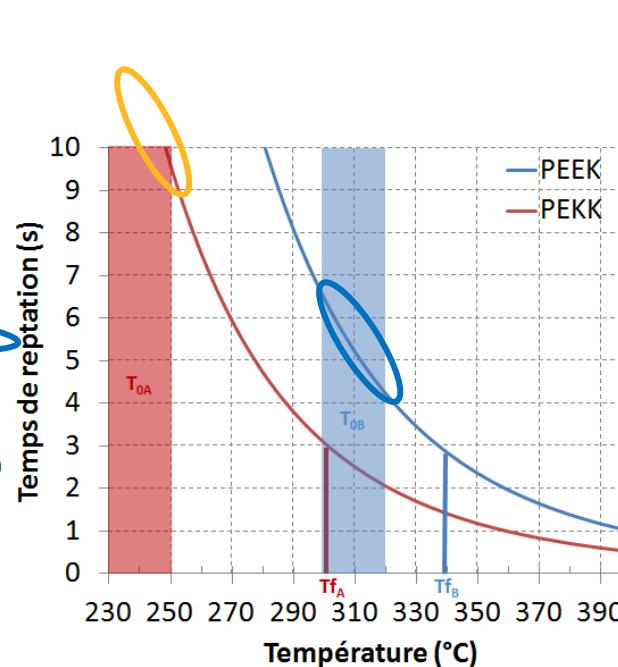
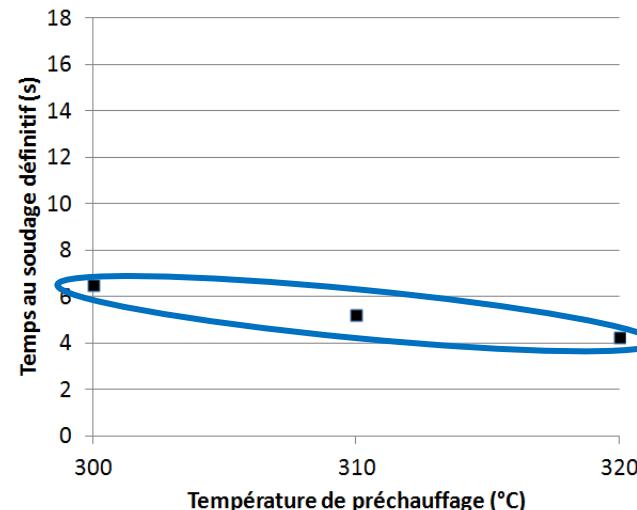
Analyse des temps de soudage



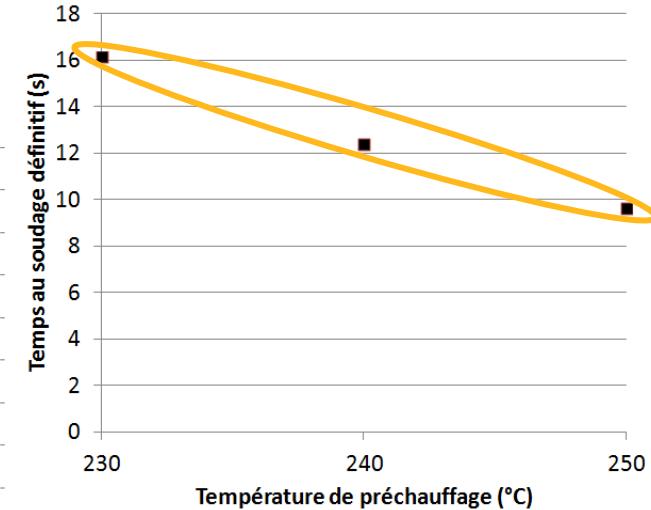
Dans pratiquement toute la zone fondu, les interfaces ont le temps de se souder

Prediction du temps de soudage à l'interface des grains

PEEK



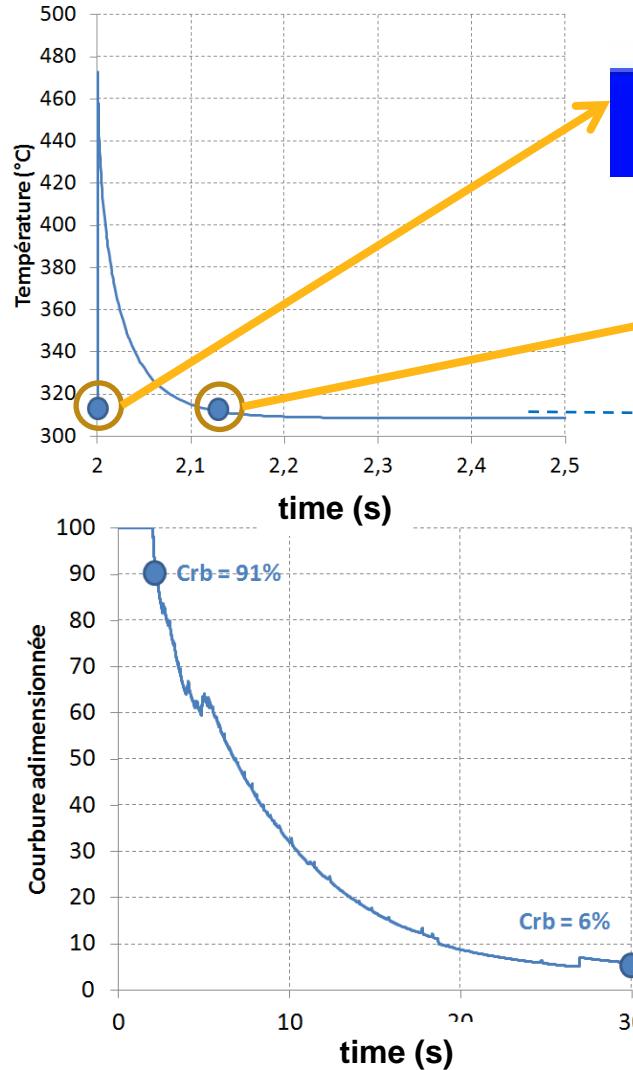
PEKK



Résultats

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

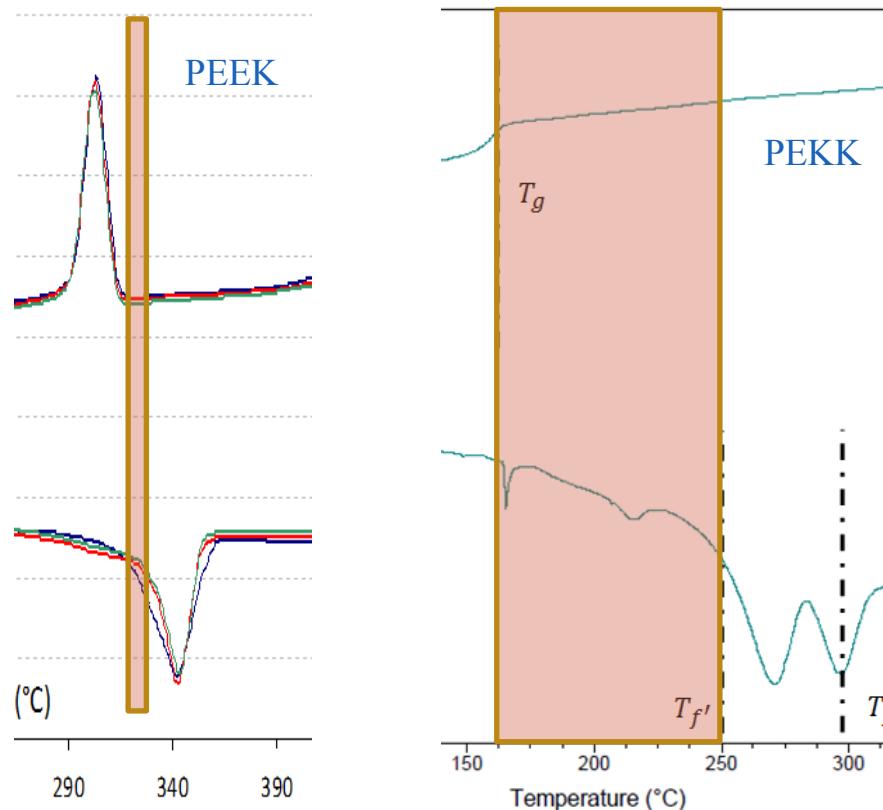
Analyse des temps de coalescence



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

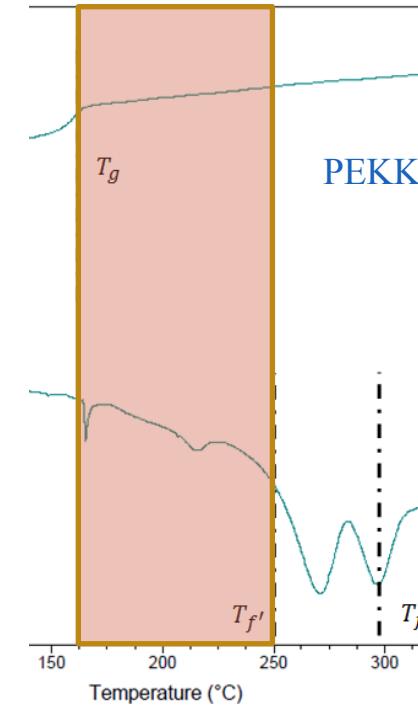
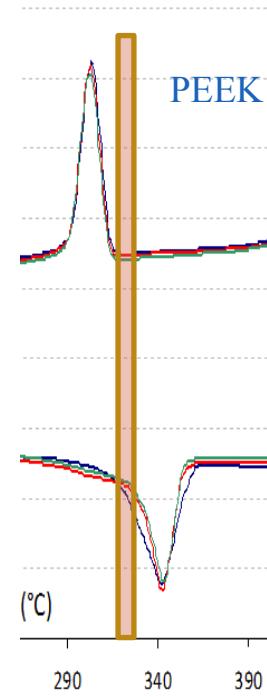
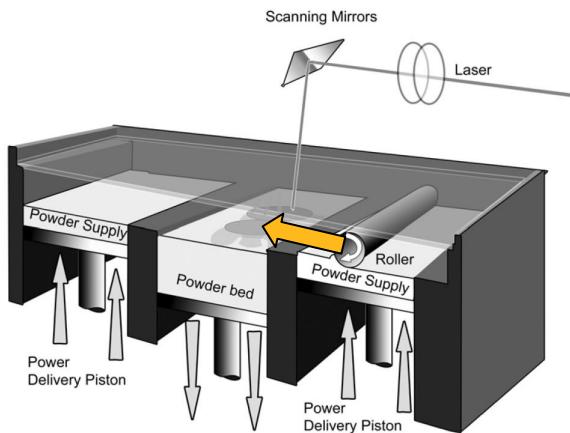
Aptitude des poudres thermoplastiques au procédé SLM



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 fondu 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

Perpectives

- 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 N2 ?
- Stratégie avec plusieurs laser ?
Faisceau défocalisé ?
- Influence de la dégradation du polymère
(tension de surface, masse molaire, ...)

