

# Impression 3D de verre (de silice)

Application à la réalisation de composants photoniques

Yves QUIQUEMPOIS<sup>1</sup>, Ayan MONDAL, Priya DOMINIC, Halima EL AADAD, Hicham EL  
HAMZAOUI, Marc DOUAY

<sup>1</sup>yves.quiquempois@univ-lille.fr

Université de Lille - CNRS

Physique des Lasers, Atomes et Molécules - UMR 8523, F-59000 Lille, France

**VERRE ET OPTIQUE**

Ecole thématique USTV  
Presqu'île de Giens  
05-10 Octobre 2025



Université  
de Lille



# Plan

## Introduction et contexte

Qualités optiques requises concernant les matériaux pour l'optique  
Présentation des méthodes de synthèse additive de verre

## Polymérisation à 2 photons

Principe de l'impression multiphotonique  
Dimensions d'un « voxel »  
Méthodologie pour l'impression à 2 photons

## Résines hybrides pour la réalisation de verres de silice

Technologies employées  
Réalizations avec les résines Solmer

## Art et impression 3D

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Plan

## Introduction et contexte

Qualités optiques requises concernant les matériaux pour l'optique  
Présentation des méthodes de synthèse additive de verre

## Polymérisation à 2 photons

Qualités de l'incubation  
Applications d'incubation  
Technologie

## Résines hybrides pour la réalisation de verres de silice

Qualités de l'incubation  
Applications d'incubation  
Réalisation avec les résines Solmer

## Art et impression 3D

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées  
Réalisation avec les résines  
Solmer

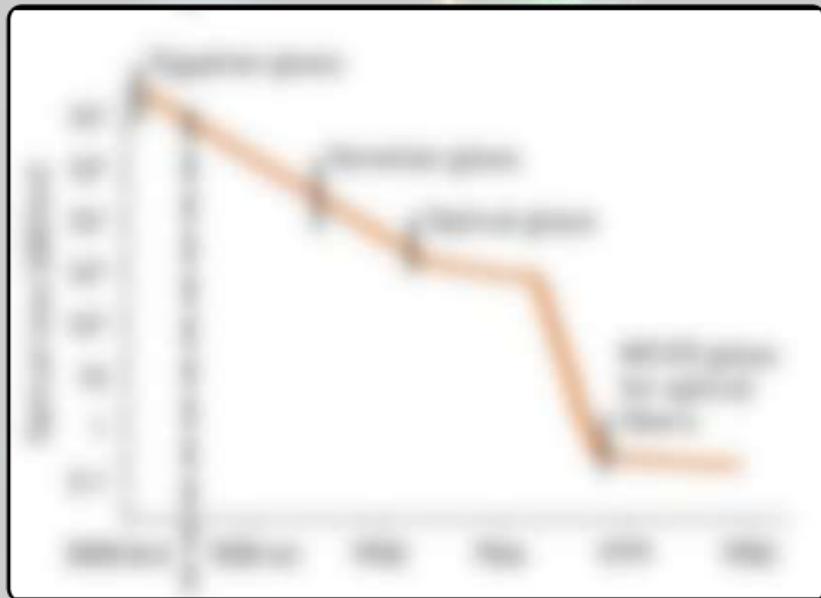
### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Absorption optique



[J. Ballato, Optics & Photonics News, March 2022]

## Loi de Beer-Lambert :

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} e^{-\alpha \ell}$$

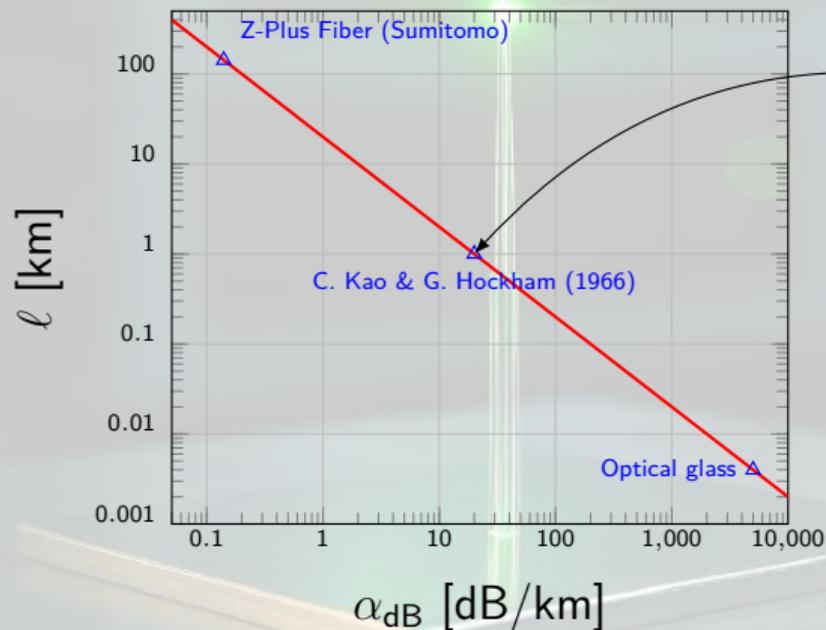
avec  $\alpha$  en  $[\text{m}^{-1}]$ ,  
et  $\ell$  en  $[\text{m}]$ .

## Pertes $[\text{dB}/\text{km}]$ :

$$\alpha_{\text{dB}} = 1000 \cdot \frac{10}{\ln 10} \alpha$$

# Absorption optique

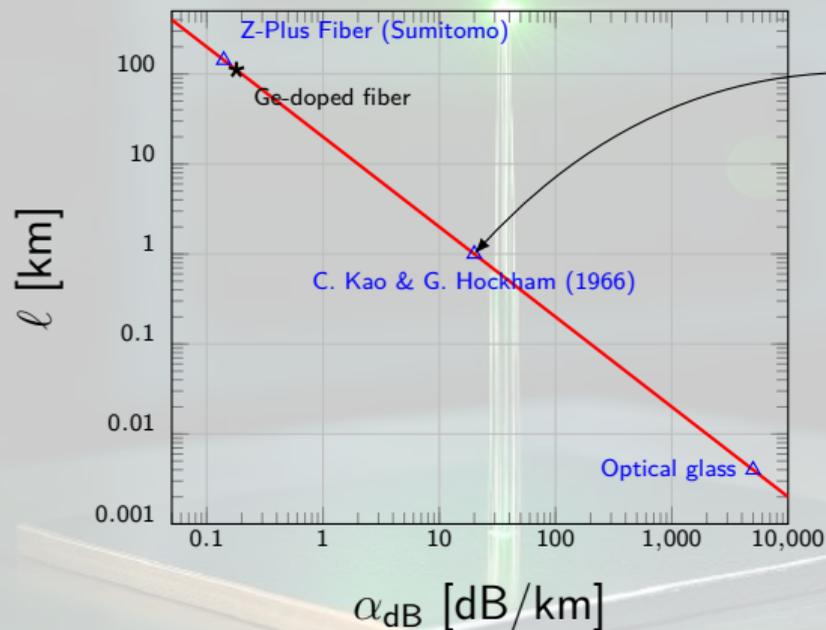
Distance  $\ell$  pour  $P_{\text{out}}/P_{\text{in}} = 0.01$



C. KAO at Stanford Communication Labs in Harlow, U.K. [Optics & Photonics News March 2019]

# Absorption optique

Distance  $\ell$  pour  $P_{\text{out}}/P_{\text{in}} = 0.01$



C. KAO at Stanford Communication Labs in Harlow, U.K. [Optics & Photonics News March 2019]

## Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

## Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

## Résines pour verre

Technologies employées  
Réalisations avec les résines  
Solmer

## Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Qualité de surface



3D printed Lens  
<https://www.nanoscribe.com/>

Éviter la déformation significative du **front d'onde** :

$$\text{Résolution} < \lambda/10$$

$\lambda$	défauts < à
IR $\rightarrow$ 1500 nm	<b>150 nm</b>
Visible $\rightarrow$ 500 nm	<b>50 nm</b>

# Autres paramètres importants

## ✓ Homogénéité d'indice de réfraction

- Diffusion de la lumière (Rayleigh, Mie, ...) → pertes
- Guides optiques → pertes
- Micro-bulles d'air, inclusions, défauts, contaminations ... → pertes

## ✓ Rugosité de surface

- Guides d'onde, puces photoniques → pertes
- Lentilles → aberrations , ...

## ✓ Vieillessement

## ✓ Tenue à la température

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Autres paramètres importants

## ✓ Homogénéité d'indice de réfraction

- Diffusion de la lumière (Rayleigh, Mie, ...) → pertes
- Guides optiques → pertes
- Micro-bulles d'air, inclusions, défauts, contaminations ... → pertes

## ✓ Rugosité de surface

- Guides d'onde, puces photoniques → pertes
- Lentilles → aberrations , ...

## ✓ Vieillessement

## ✓ Tenue à la température

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Autres paramètres importants

## ✓ Homogénéité d'indice de réfraction

- Diffusion de la lumière (Rayleigh, Mie, ...) → pertes
- Guides optiques → pertes
- Micro-bulles d'air, inclusions, défauts, contaminations ... → pertes

## ✓ Rugosité de surface

- Guides d'onde, puces photoniques → pertes
- Lentilles → aberrations, ...

## ✓ Vieillessement

## ✓ Tenue à la température

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Autres paramètres importants

- ✓ Homogénéité d'indice de réfraction
  - Diffusion de la lumière (Rayleigh, Mie, ...) → pertes
  - Guides optiques → pertes
  - Micro-bulles d'air, inclusions, défauts, contaminations ... → pertes
- ✓ Rugosité de surface
  - Guides d'onde, puces photoniques → pertes
  - Lentilles → aberrations , ...

✓ Vieillessement

✓ Tenue à la température

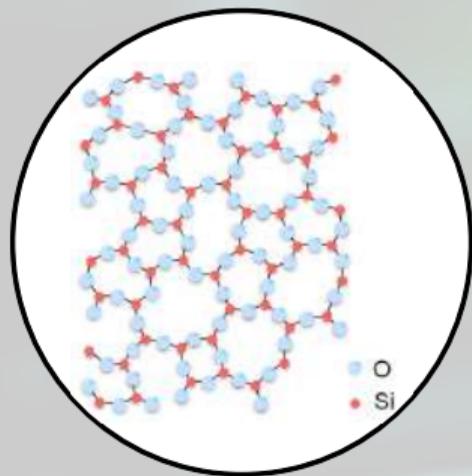
# Autres paramètres importants

- ✓ Homogénéité d'indice de réfraction
  - Diffusion de la lumière (Rayleigh, Mie, ...) → pertes
  - Guides optiques → pertes
  - Micro-bulles d'air, inclusions, défauts, contaminations ... → pertes
- ✓ Rugosité de surface
  - Guides d'onde, puces photoniques → pertes
  - Lentilles → aberrations , ...
- ✓ Vieillissement
- ✓ Tenu...

# Autres paramètres importants

- ✓ Homogénéité d'indice de réfraction
  - Diffusion de la lumière (Rayleigh, Mie, ...) → pertes
  - Guides optiques → pertes
  - Micro-bulles d'air, inclusions, défauts, contaminations ... → pertes
- ✓ Rugosité de surface
  - Guides d'onde, puces photoniques → pertes
  - Lentilles → aberrations , ...
- ✓ Vieillissement
- ✓ Tenue à la température

# Focus sur le verre de quartz fondu (silice)



T de travail ( $\eta$ faible)	$\approx 2100$ °C
T "ramollissement"	$\approx 1730$ °C
T transition vitreuse	$\approx 1200$ °C

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Additive Manu- facturing

C. Xin, et al., "A comprehensive review on additive manufacturing of glass: Recent progress and future outlook," *Materials & Design* 227 (2023) 111736

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

**Additive  
Manu-  
facturing**

C. Xin, et al., "A comprehensive review on additive manufacturing of glass: Recent progress and future outlook," *Materials & Design* 227 (2023) 111736

**Direct**

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre



C. Xin, et al., "A comprehensive review on additive manufacturing of glass: Recent progress and future outlook," *Materials & Design* 227 (2023) 111736

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

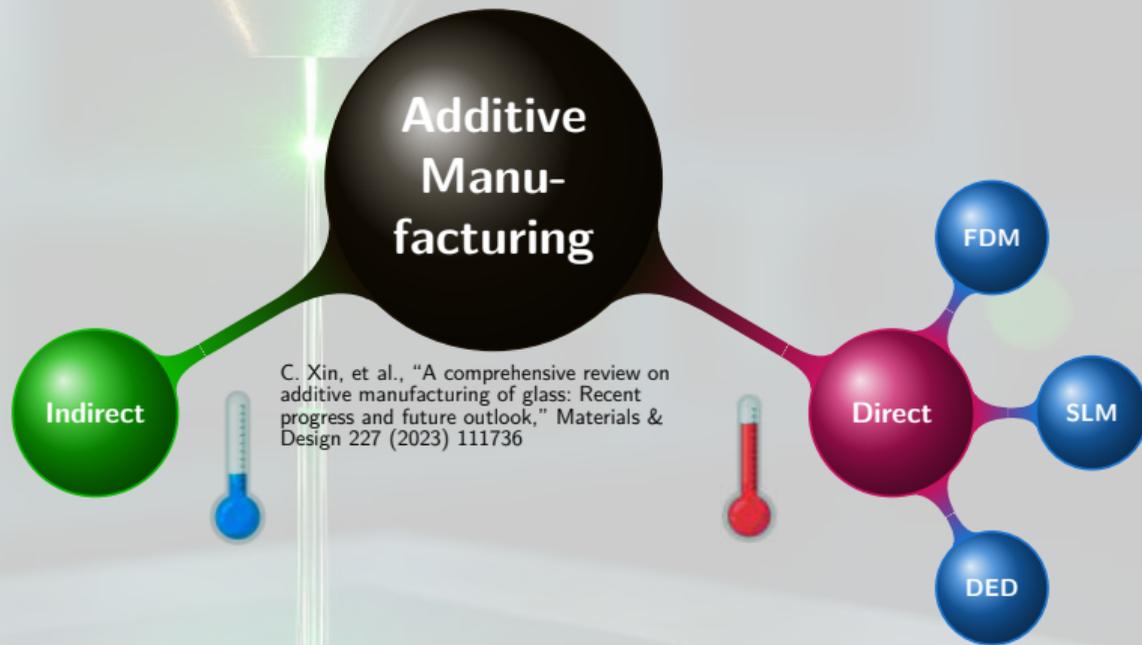
Art et impression  
3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre



## Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

## Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

## Résines pour verre

Technologies employées  
Réalisations avec les résines  
Solmer

## Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre



C. Xin, et al., "A comprehensive review on additive manufacturing of glass: Recent progress and future outlook," *Materials & Design* 227 (2023) 111736

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

## Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

## Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

## Résines pour verre

Technologies employées  
Réalisations avec les résines  
Solmer

## Art et impression 3D



Université  
de Lille

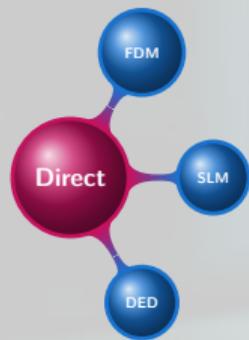


PhLAM  
UMR 8503 - CNRS - Université de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Méthodes de synthèse directes



- Généralement pas de post-traitement pour obtenir l'objet final (verre)
  - Nécessite des matériaux précurseurs dont la composition chimique est « similaire » à l'objet à fabriquer

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines Solmer

### Art et impression 3D

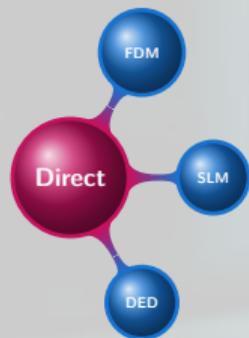


Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Méthodes de synthèse directes



- Généralement pas de post-traitement pour obtenir l'objet final (verre)
- Nécessite des matériaux précurseurs dont la composition chimique est « similaire » à l'objet à fabriquer

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Fused Deposition Modeling

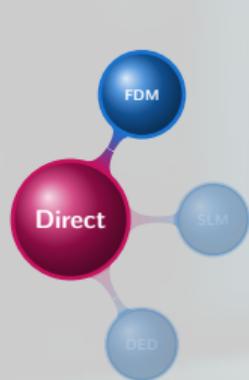


Figure 1 – Tiré de [1]

- Basé sur un procédé d'extrusion à haute température
- Utilisation de fil en verre métallisé par un système de chauffage à haute température

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Fused Deposition Modeling



Figure 1 – Tiré de [1]

- Basé sur un procédé d'extrusion à haute température
- Utilisation de buses en métal → problème de gestion de température

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille

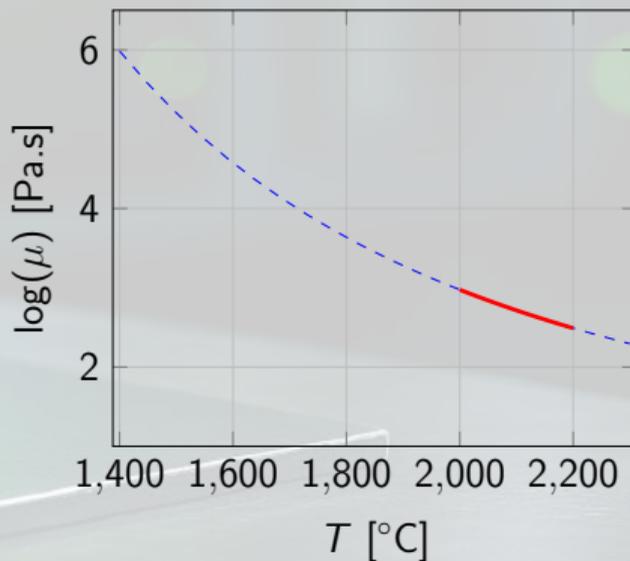


# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Fused Deposition Modeling

Viscosité  $\mu$  doit être de l'ordre de  $10^2 - 10^3$  [Pa.s] :

Verre de silice  $\text{SiO}_2$



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Fused Deposition Modeling

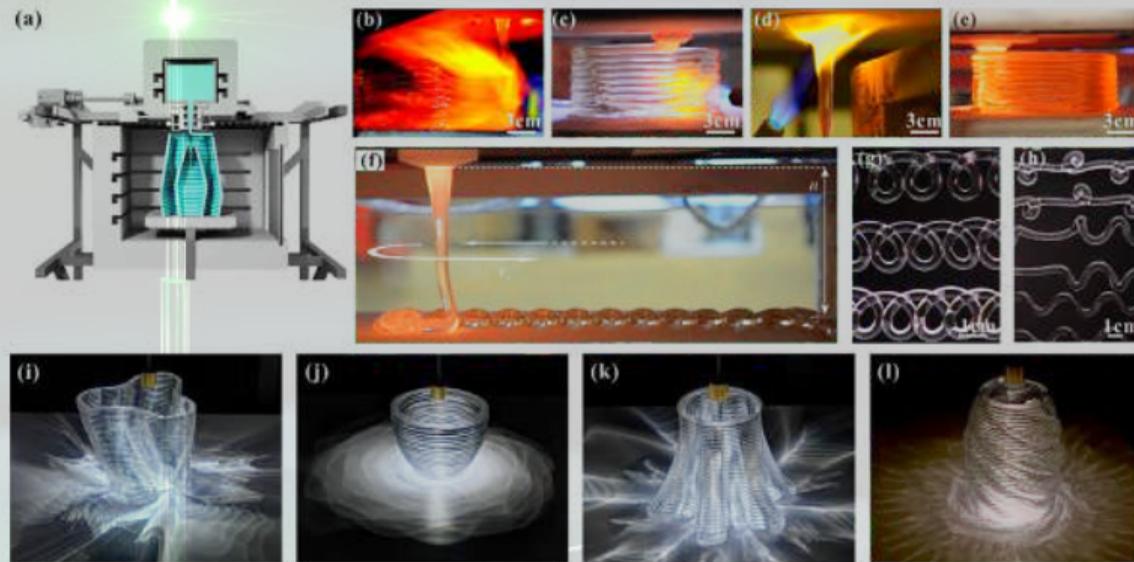
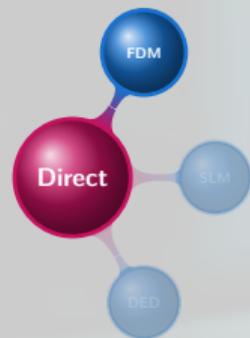


Figure 2 – Tiré de [2]

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Fused Deposition Modeling

- Procédé très intéressant pour les **verres « basse température »** (Chalcogénures  $\text{Te}_x\text{As}_y\text{Se}_z$ )



Figure 3 – Tiré de [3]

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Fused Deposition Modeling

- Réalisation de préformes microstructurées avec des verres de silice dopés (PbO et B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

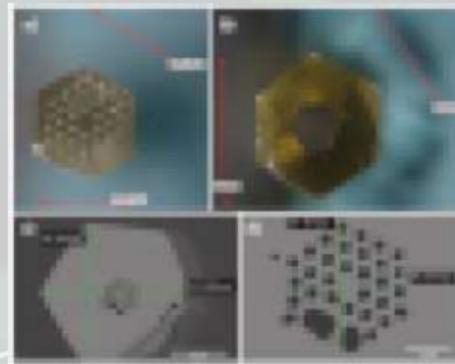


Figure 4 – Tiré de [4]

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Selective Laser Melting

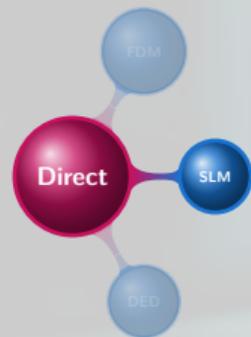


Figure 5 – Tiré de [1]

- Apport d'énergie par chauffage laser

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Selective Laser Melting

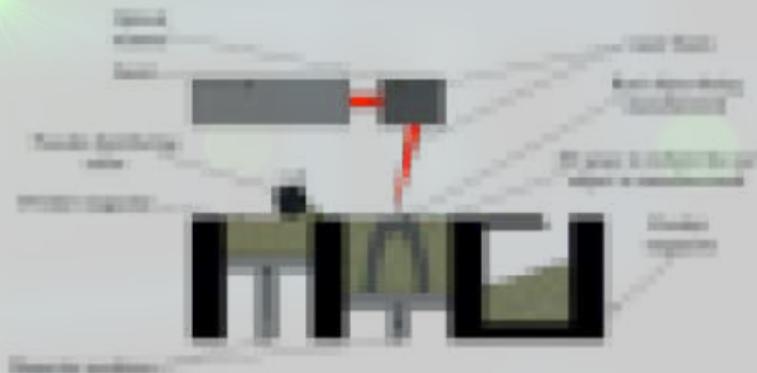
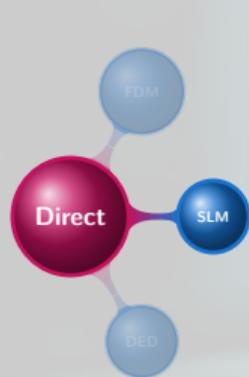


Figure 5 – Tiré de [1]

- Apport d'énergie par chauffage laser
- Matériaux précurseurs : poudres

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



PhLAM  
UMR 8503

# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Selective Laser Melting

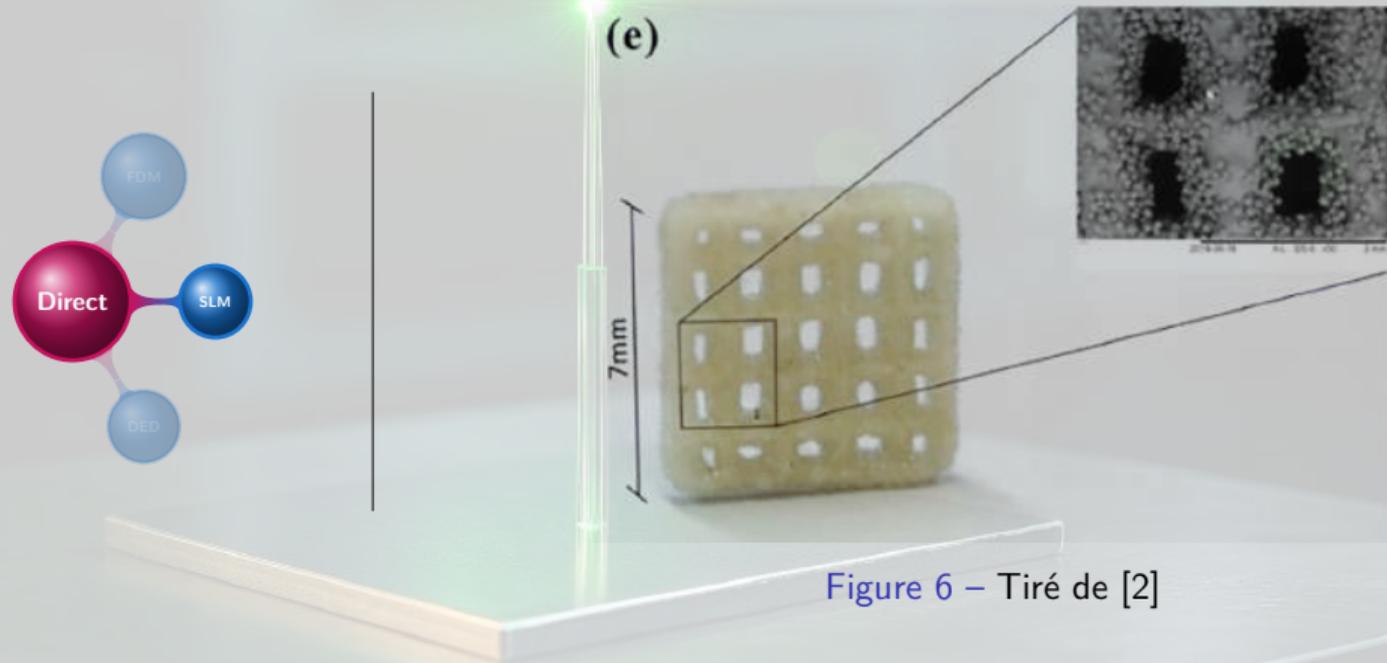


Figure 6 – Tiré de [2]

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Direct Energy Deposition

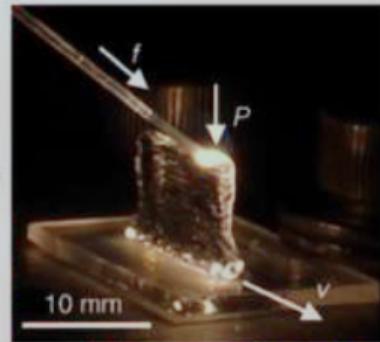
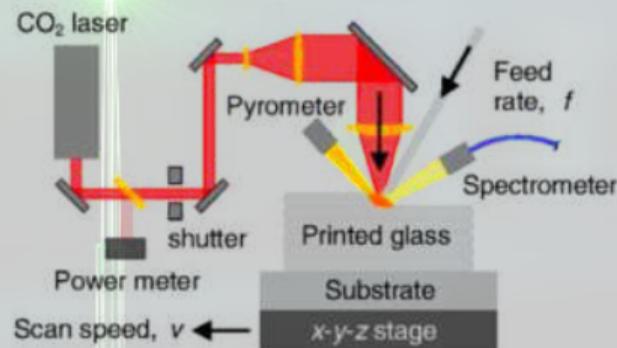
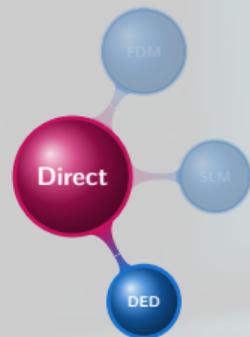


Figure 7 – Tiré de [2]

- Apport d'énergie par chauffage laser

• Matériau précurseur

# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Direct Energy Deposition

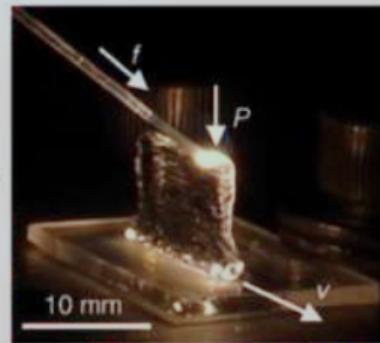
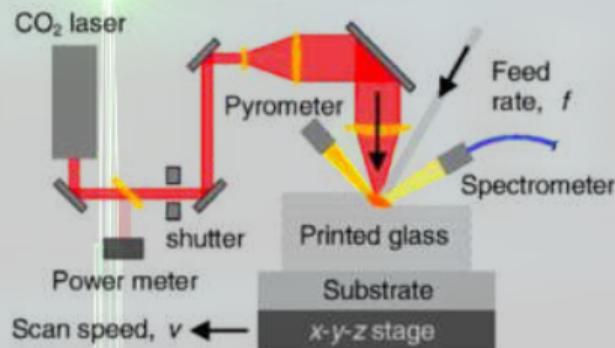
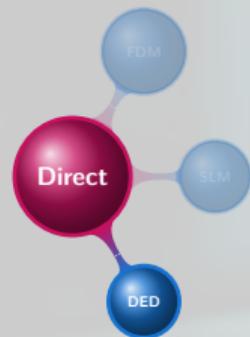


Figure 7 – Tiré de [2]

- Apport d'énergie par chauffage laser
- Matériaux précurseurs : filaments

# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Direct Energy Deposition

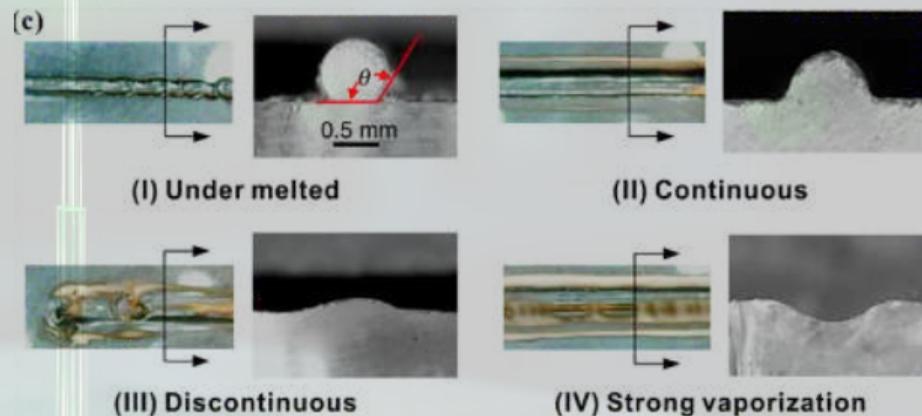
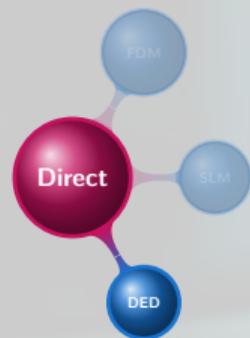


Figure 8 – Tiré de [2]

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D

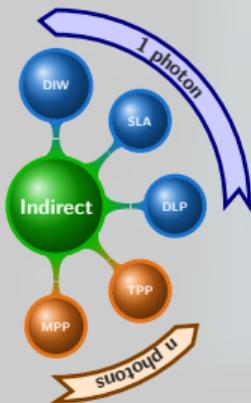


Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Méthodes de synthèse indirectes



- Utilisation de résines photosensibles généralement dans l'UV (monomère + photo-initiateur + précurseurs de verre)

- Photopolymérisation à température ambiante
- Post-traitement OBLIGATOIRE pour obtenir un verre
  - Chauffage à  $T > 600^{\circ}\text{C}$
  - Rétrécissement important ([10%, 60%])

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D

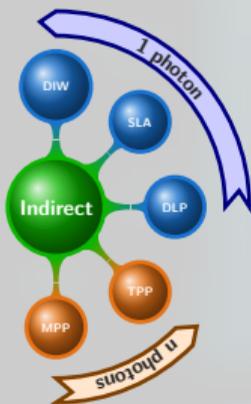


Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Méthodes de synthèse indirectes



- Utilisation de résines photosensibles généralement dans l'UV (monomère + photo-initiateur + précurseurs de verre)
- Photopolymérisation à température ambiante
- Post-traitement OBLIGATOIRE pour obtenir un verre
  - Chauffage à  $T > 600^{\circ}\text{C}$
  - Rétrécissement important ([10%, 60%])

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D

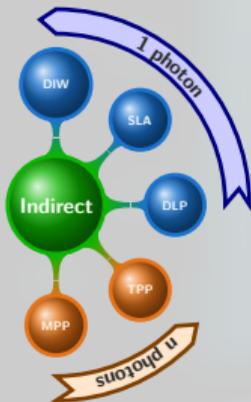


Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Méthodes de synthèse indirectes



- Utilisation de résines photosensibles généralement dans l'UV (monomère + photo-initiateur + précurseurs de verre)
- Photopolymérisation à température ambiante
- **Post-traitement OBLIGATOIRE pour obtenir un verre**
  - ↪ *Chauffage à  $T > 600^{\circ}\text{C}$*
  - ↪ *Rétreint peut être important ([10%, 60%])*

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Digital Light Processing

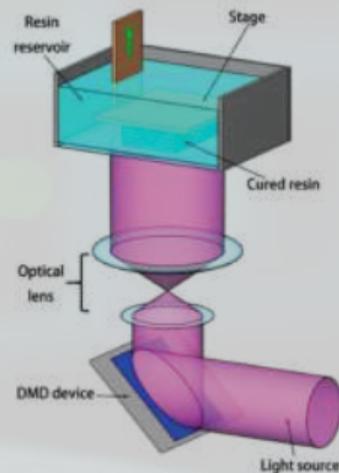
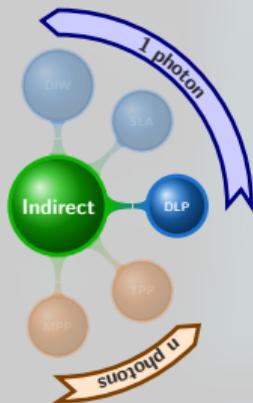


Figure 9 – Tiré de [5]

- Résolution limitée par celle du système DLP et optiques

# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Digital Light Processing

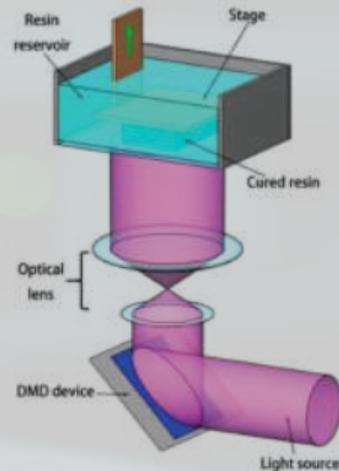
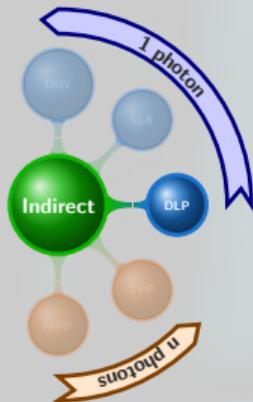


Figure 9 – Tiré de [5]

- Résolution limitée par celle du système DLP et optiques
- Réalisation couche par couche

# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Digital Light Processing

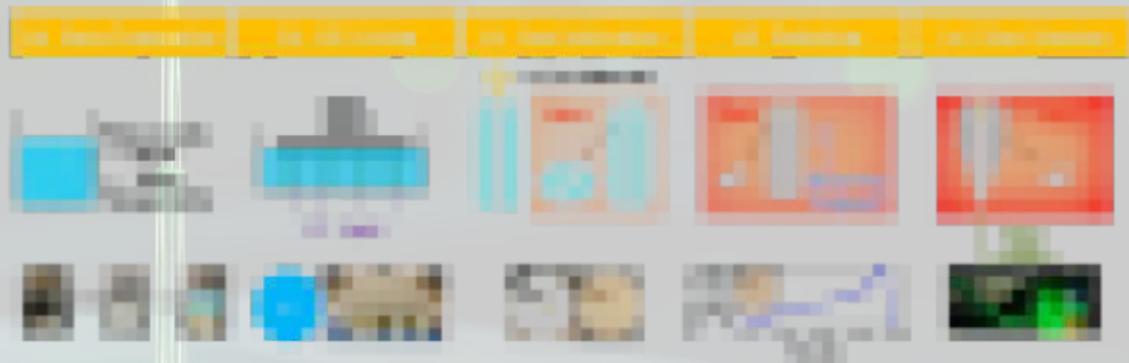
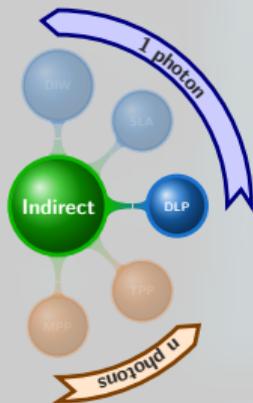


Figure 10 – Tiré de [6]

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines Solmer

Art et impression 3D



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Digital Light Processing

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D

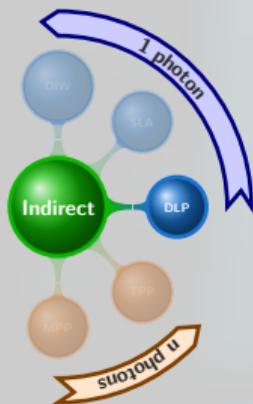


Figure 11 – Tiré de [7]



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Stereolithography



Figure 12 – Tiré de [1]

- Polymérisation à l'endroit du passage du laser

• Simulation de la fabrication additive – principe

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



PhLAM  
UMR 8543

# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Stereolithography



Figure 12 – Tiré de [1]

- Polymérisation à l'endroit du passage du laser
- Similaire à la méthode SLM dans le principe

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Direct Ink Writing

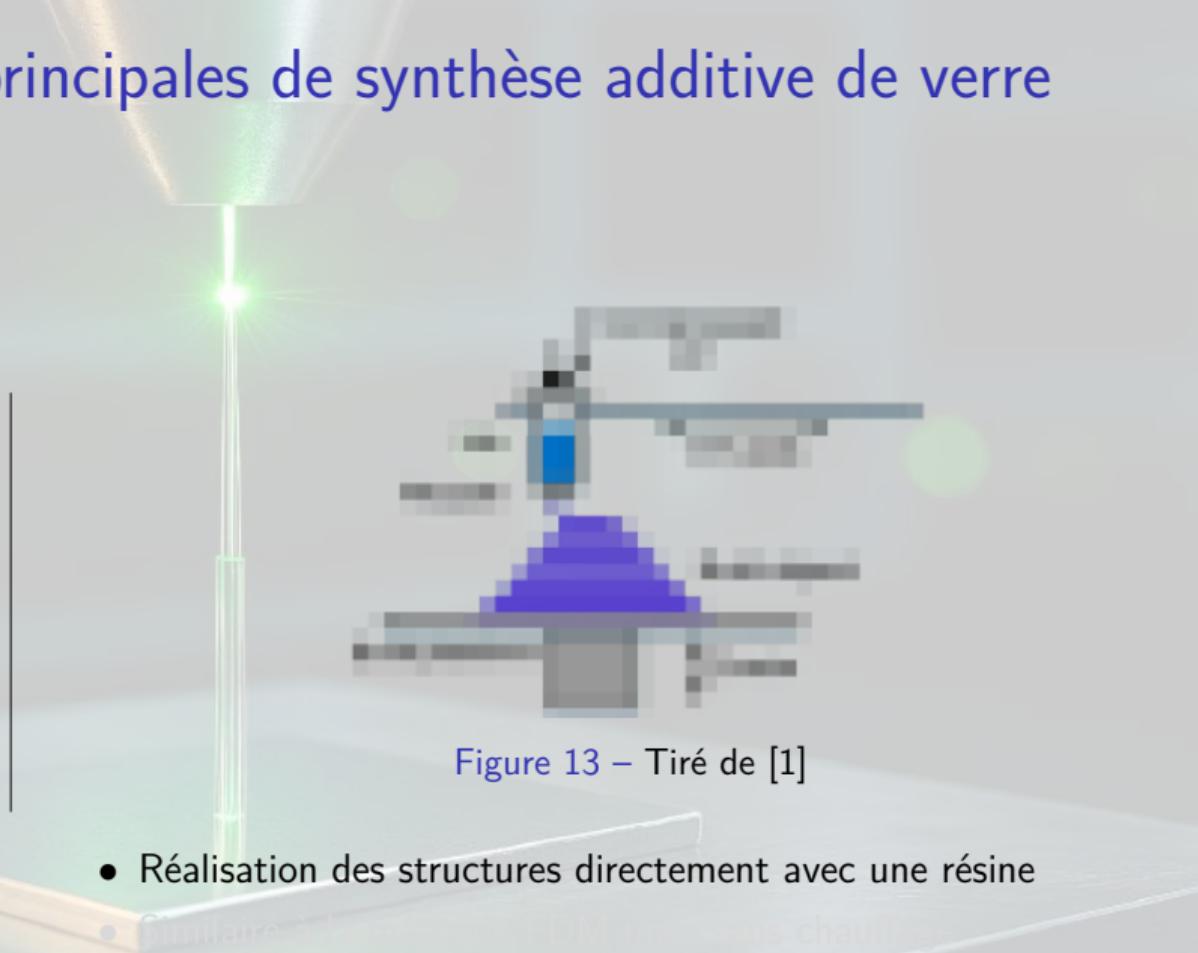
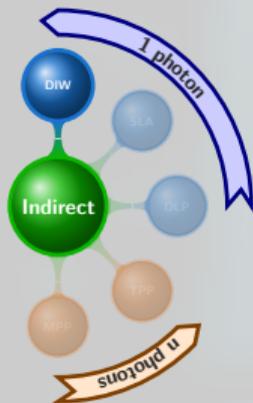


Figure 13 – Tiré de [1]

- Réalisation des structures directement avec une résine

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Direct Ink Writing

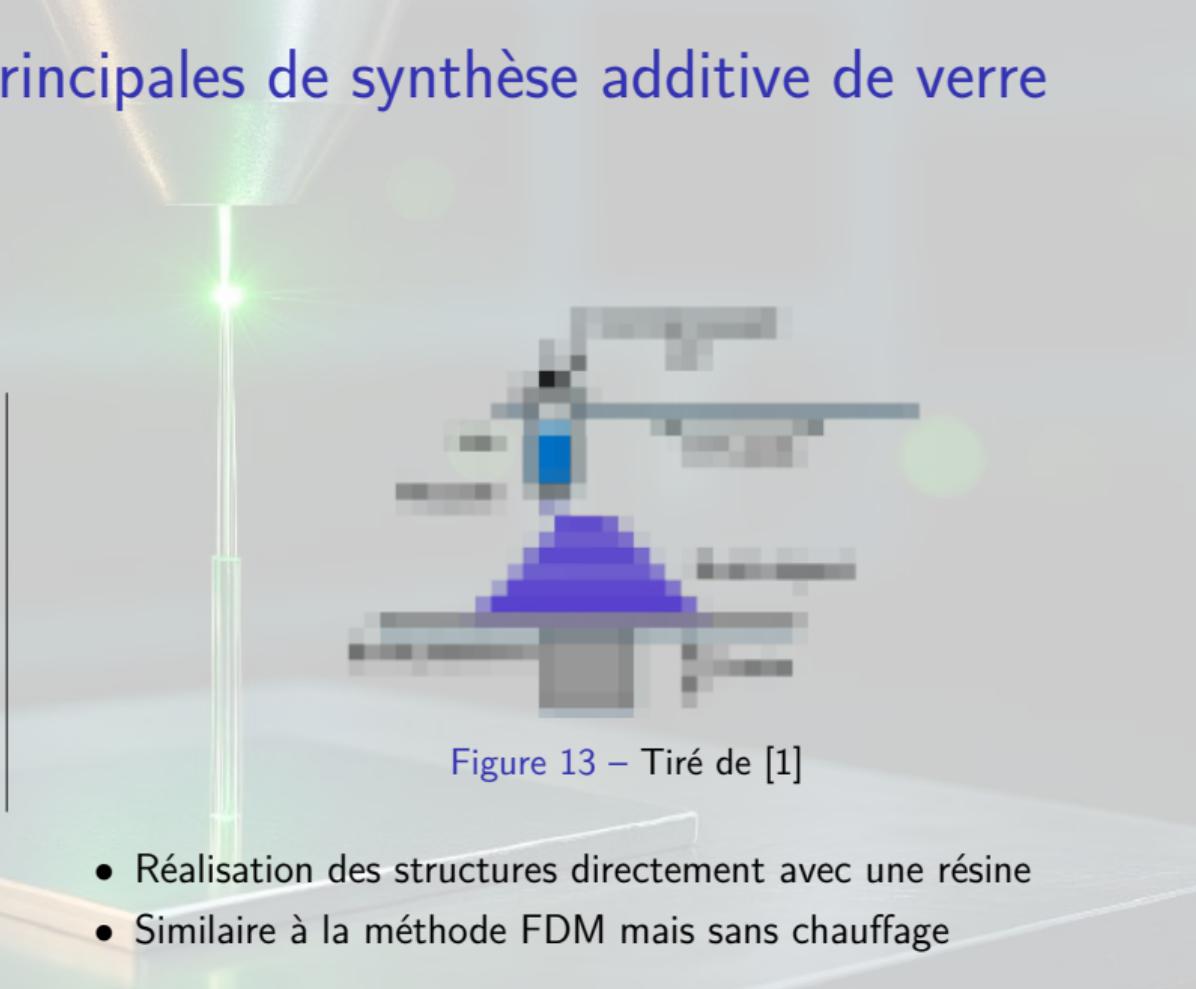
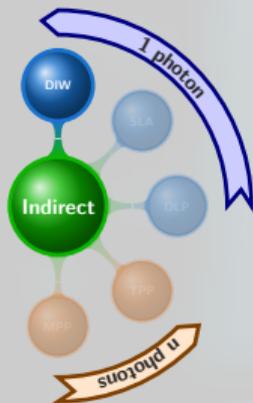


Figure 13 – Tiré de [1]

- Réalisation des structures directement avec une résine
- Similaire à la méthode FDM mais sans chauffage

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Direct Ink Writing

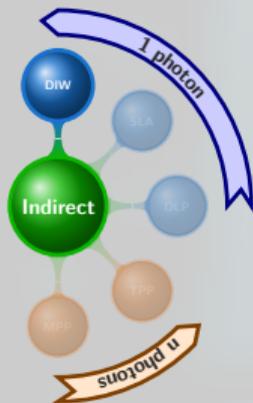


Figure 14 – Tiré de [8]

- Résine : OrmoClear (Micro Resist Technology, GmbH), and aqueous triblock copolymer, Pluronic F127 (BASF)

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Multiple Photon Polymerization

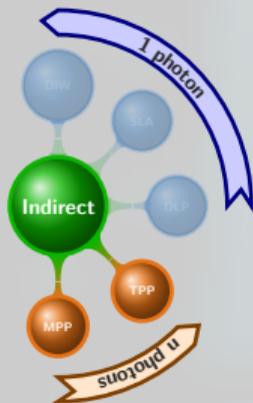


Figure 15 – Tiré de [9]

- Absorption à 2 ou  $n$  photons utilisée pour polymériser une résine
- Résolution dépend de l'énergie des photons et de la longueur d'onde du faisceau

# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Multiple Photon Polymerization

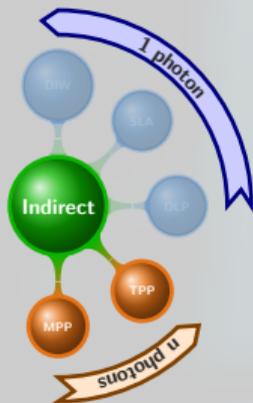


Figure 15 – Tiré de [9]

- Absorption à 2 ou  $n$  photons utilisée pour polymériser une résine
- Résolution dépend de l'énergie déposée et de la forme du faisceau

# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Bilan et Comparaison

Techniques	Multi-material Ability	Transparency	Spatial Resolution	Surface Quality	Disadvantages	Applications
FDM	No	Medium	mm	Low	Obvious stripes on the Z-axis and can only be used for large-scale glass specimens	Building industry, Ornaments and artwork
DIW	Yes	High	$\mu\text{m}$	Medium	Gap-spanning features and distorted printed lines	GRIN lenses
SLM	No	Low	mm	Very low	Rough surface, an opaque appearance and incomplete densification	Continuous-flow reactor and structure catalysts
SLA	No	High	$\mu\text{m}$	High	Sidewall effect	LED packaging and microfluids
DLW/TPP	Yes	High	nm	Very high	High cost, limited materials, Slow printing process [4]	Micro-toroid optical resonator and micro-photonic devices
DLP	No	High	nm- $\mu\text{m}$	High	Sidewall effect	Lenses and optical sensors

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines Solmer

### Art et impression 3D



Université de Lille



# Techniques principales de synthèse additive de verre

## Bilan et Comparaison

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

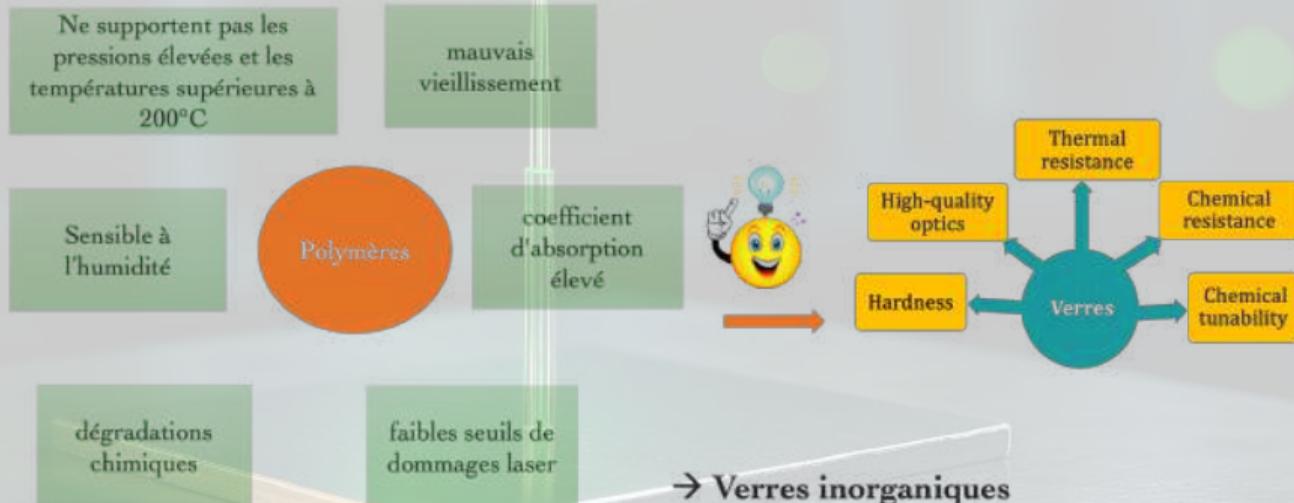
### Art et impression 3D



Université  
de Lille



→ Résines organiques largement utilisées en impression 3D pour l'optique



→ Verres inorganiques

**Silice**, Phosphate, Chalcogenures, Fluorures ...

# Plan

## Introduction et contexte

Les exigences optiques requises concernant les matériaux pour l'optique  
Présentation des méthodes de synthèse additive de verre

## Polymérisation à 2 photons

Principe de l'impression multiphotonique  
Dimensions d'un « voxel »  
Méthodologie pour l'impression à 2 photons

## Résines hybrides pour la réalisation de verres de silice

Réalisations avec les résines Solmer

## Art et impression 3D

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées  
Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D

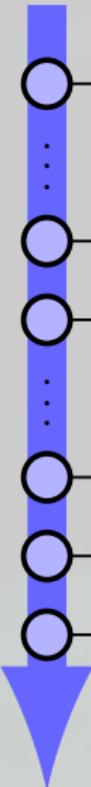


Université  
de Lille



# Polymérisation multi-photonique

## Historique

- 
- **1931 – Maria Goeppert-Mayer:** Processus d'absorption à deux photons théorisé
  - **1960 – Theodore Maiman:** Invention du laser
  - **1961 – W. Kaiser, C. Garrett:** Observation expérimentale de la TPA
  - **1997 – S. Maruo et S. Kawata** Première démonstration de la TPP
  - **2001 – S. Kawata et al.** Impression d'un micro-taureau par TPP
  - **2007 – Nanoscribe** Commercialisation d'une imprimante utilisant la TPP



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

#### Principe

Résolution  
Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Polymérisation multi-photonique

## Principe

La polymérisation est initiée par un faisceau focalisé dans une résine constituée d'un Photoinitiateur (PI) et de Monomères (M) + silice (si résine hybride) :

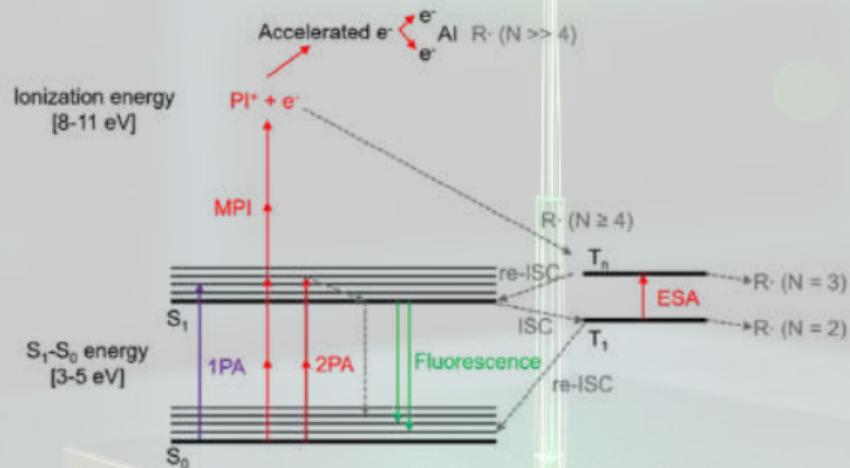


Figure 16 – Tiré de [10]

- 1PA : Absorption directe d'un photon  $h\nu$
- 2PA : Absorption de 2 photons simultanément  $h\nu + h\nu$
- MPA : Absorption de M photons simultanément

# Polymérisation multi-photonique

## Principe

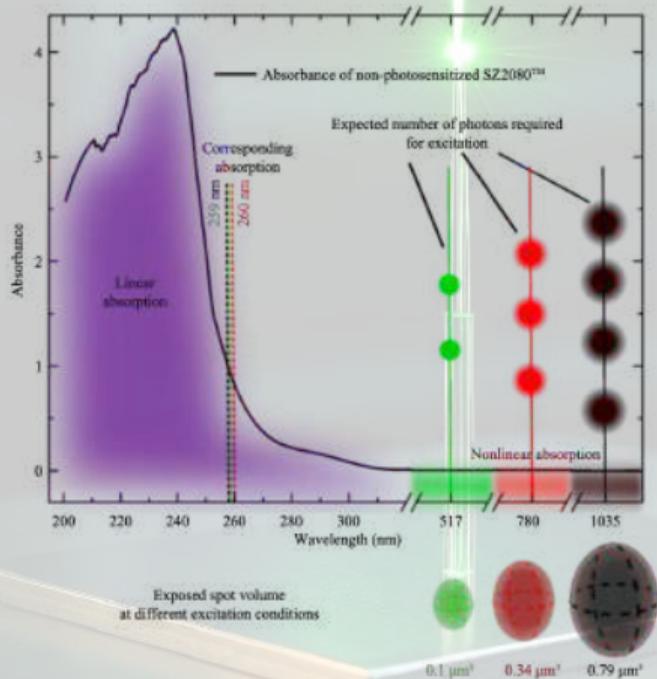
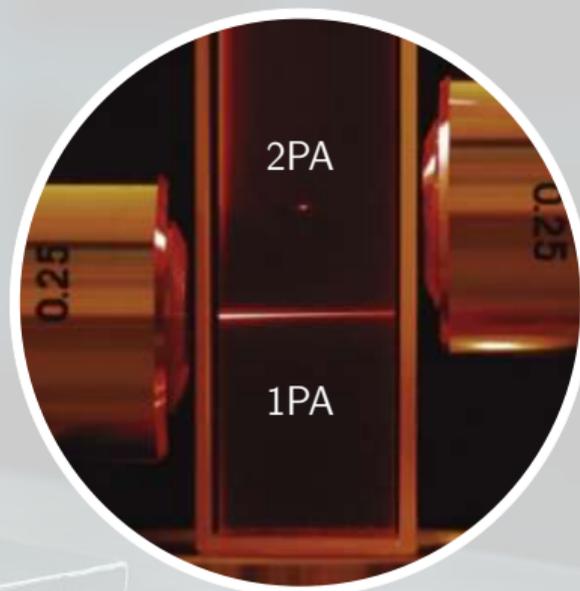


Figure 17 – Tiré de [11]



<https://www.newport.com/n/two-photon-microscopy>

Figure 18 – 2PA vs 1PA

# Résines photosensibles

De nombreuses possibilités de monomères et photoinitiateurs

Table 2. List of the widely used monomers and PI, processing parameters and functionality of nano/microstructures fabricated using TPP

Resin	Resin Name	Photoinitiator	Power <sup>a</sup> (mW)	Speed <sup>b</sup> ( $\mu\text{m/s}$ )	Resolution ( $\mu\text{m}$ )	Proposed Functionality	Reference
Epoxy	SU-8-2075	SU-8-2075	1.5-6	300	10,000	Fabricate Bulk Structure	33
Acrylate	BADGE	-	50-40	100-1000	-	Waveguide	33
	DDA + DHPMA	BDEBP and ITX	0.10	40	80	Woodpile	33
	PETIA	Lucin TPO-L, curcumin	-	-	-	$\mu$ -structure to entrap and kill <i>Staphylococcus aureus</i> bacteria	3
	IP-Dip	IP-Dip	10-33	-	184	Diffraction Grating	31
	TMSPMA	DETC	20	2000	-	Biomedical	33
	SR368, SR399	L-TPO-L	18	-	-	Plasmonic Grating	33
	IP-Dip	IP-Dip	10	500	500	Large-scale nano proto-typing	33
	IP-Dip and IPL	-	33.6	25000	-	AFM Tip	34
	SCR500	-	20	-	-	First paper on TPP	30
	IPL-780	IPL-780	4	30	300	Drug screening	35
	IP-S	IP-S	-	-	-	Piezoelectric micro-bot	35
	PEGDA	2,2-bis[2-(4-pentanoxyphenyl)vinyl]propane (N)	3.8-7.7	110	-	Cell Scaffold	36
Hydrogel	DMAA-co-AAHAQ	-	25	10000	-	Protein Repellency Test	37
	Methacrylate gelatin	PEGDA + Benzyl-dimethyl-cycloketone	65	60-150	-	Human BJ cell line	38

BADGE: bisphenol-A diglycidylether, TMSPMA: 3-trimethoxysilyloxypropyl methacrylate, BDEBP: 4,4'-bis[diethylamino]benzophenone, ITX: isopropyl thioxanthone, PI: Photoinitiator, PS: Photoresistor, CL-cross-linker, TMPTA: trimethylpropane triacrylate, PETIA: pentamethyltriol triacrylate, DHPMA: dipentaerythritol-pentaacrylate, NVP: N-vinyl pyrrolidone.

<sup>a</sup>Laser writing power.

<sup>b</sup>scan speed.

Tiré de [11]

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



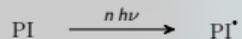
Université  
de Lille



# Polymérisation multi-photonique

Exemples de réactions chimiques avec photo-initiateur

$n$ PA and radical formation :



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



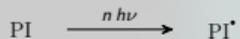
Université  
de Lille



# Polymérisation multi-photonique

Exemples de réactions chimiques avec photo-initiateur

$n$ PA and radical formation :



Monomer radical formation (ex : acrylates) :



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution  
Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



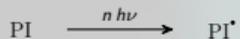
Université  
de Lille



# Polymérisation multi-photonique

Exemples de réactions chimiques avec photo-initiateur

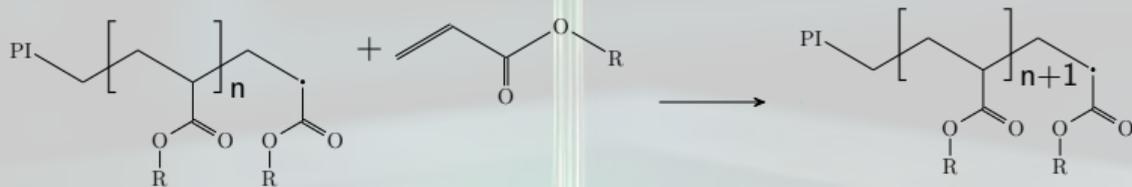
$n$ PA and radical formation :



Monomer radical formation (ex : acrylates) :



Propagation :



## Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

## Polymérisation à 2 photons

### Principe

Résolution  
Méthodologie

## Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

## Art et impression 3D



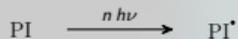
Université  
de Lille



# Polymérisation multi-photonique

Exemples de réactions chimiques avec photo-initiateur

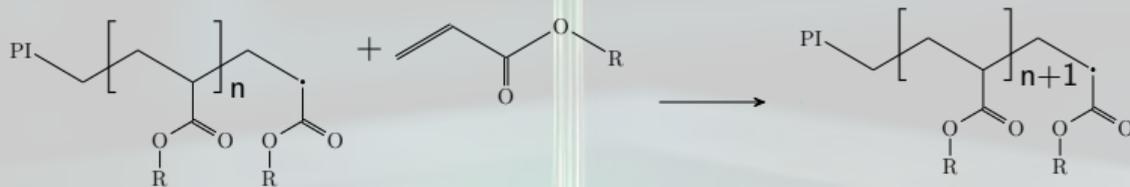
$n$ PA and radical formation :



Monomer radical formation (ex : acrylates) :



Propagation :



Termination :



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution  
Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



Université  
de Lille

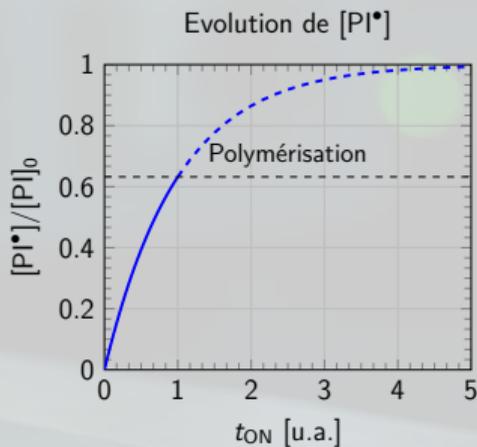


# Polymérisation multi-photonique

Calcul de la concentration en radicaux en fonction de la dose reçue [12]

$[PI]_0$	concentration initiale en PI
$[PI^\bullet]$	concentration en radicaux
$\sigma_n^{eff}$	surface d'absorption effective à n photons
$N$	flux de photons

La polymérisation est déclenchée lorsque  $[PI^\bullet]$  atteint un seuil :



$[PI^\bullet]$  fonction de  $I^n$   
 $[PI^\bullet]$  dépend du temps d'insolation

a.  $N(z, t) = N_0(z)$  constant par impulsion et  $[PI^\bullet]$  constant entre impulsions

# Polymérisation multi-photonique

Calcul de la concentration en radicaux en fonction de la dose reçue [12]

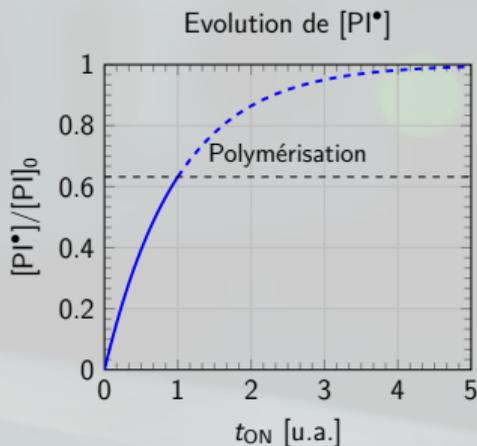
$[PI]_0$	concentration initiale en PI
$[PI^\bullet]$	concentration en radicaux
$\sigma_n^{\text{eff}}$	surface d'absorption effective à n photons
$N$	flux de photons

Concentration en  $[PI^\bullet]$  donné par :

$$\frac{\partial [PI^\bullet]}{\partial t} = ([PI]_0 - [PI^\bullet]) \sigma_n^{\text{eff}} N^n$$

a.  $N(z, t) = N_0(z)$  constant par impulsion et  $[PI^\bullet]$  constant entre impulsions

La polymérisation est déclenchée lorsque  $[PI^\bullet]$  atteint un seuil :



$[PI^\bullet]$  fonction de  $I^n$   
 $[PI^\bullet]$  dépend du temps d'insolation

# Polymérisation multi-photonique

Calcul de la concentration en radicaux en fonction de la dose reçue [12]

$[PI]_0$	concentration initiale en PI
$[PI^\bullet]$	concentration en radicaux
$\sigma_n^{\text{eff}}$	surface d'absorption effective à n photons
$N$	flux de photons

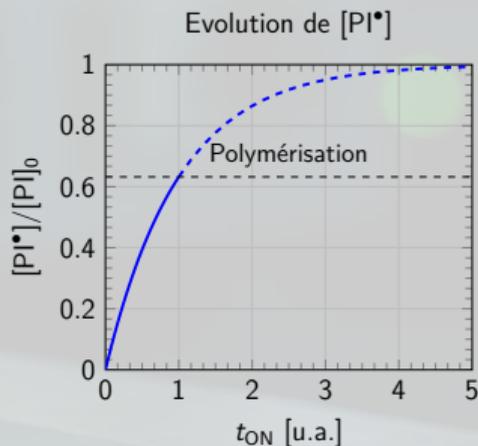
Concentration en  $[PI^\bullet]$  donné par :

$$\frac{\partial [PI^\bullet]}{\partial t} = ([PI]_0 - [PI^\bullet]) \sigma_n^{\text{eff}} N^n$$

$$\hookrightarrow [PI^\bullet] = [PI]_0 \left( 1 - e^{-\sigma_n^{\text{eff}} N^n t_{\text{ON}}} \right)^a$$

a.  $N(z, t) = N_0(z)$  constant par impulsion et  $[PI^\bullet]$  constant entre impulsions

La polymérisation est déclenchée lorsque  $[PI^\bullet]$  atteint un seuil :

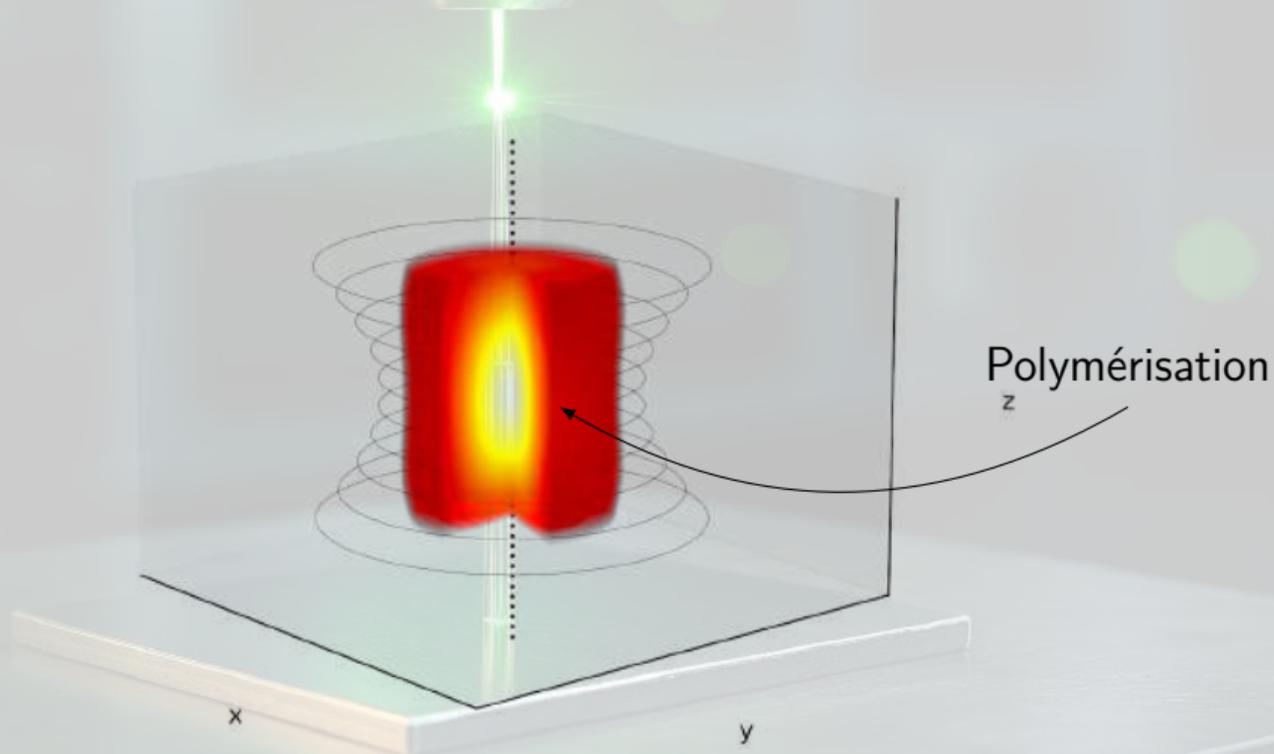


$[PI^\bullet]$  fonction de  $I^n$

$[PI^\bullet]$  dépend du temps d'insolation

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Que se passe-t-il au point de focalisation ?



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



Université  
de Lille

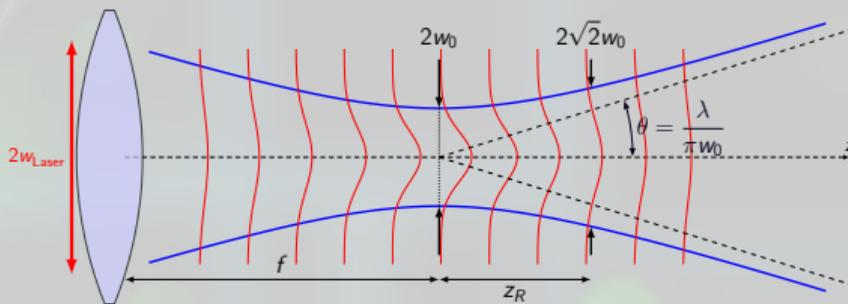


# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Rappel sur les faisceaux gaussiens

Pour un faisceau laser gaussien :

$$I(r, z) = \frac{2P}{\pi w^2(z)} e^{-2\frac{r^2}{w^2(z)}}$$



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



Université  
de Lille



# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Rappel sur les faisceaux gaussiens

Pour un faisceau laser gaussien :

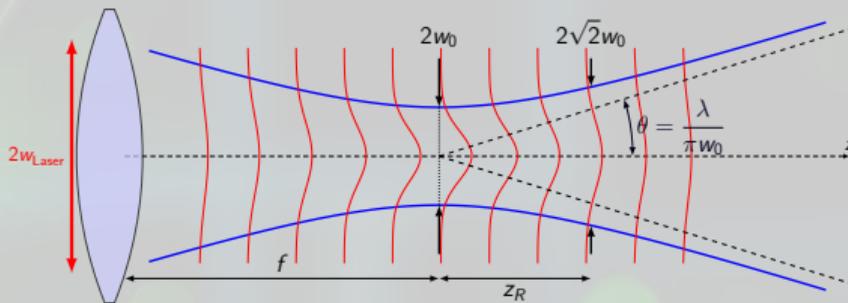
$$I(r, z) = \frac{2P}{\pi w^2(z)} e^{-2\frac{r^2}{w^2(z)}}$$

Rayon de ceinture  $w(z)$  :

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$$

avec  $z_R$  la **distance de Rayleigh** :

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



Université  
de Lille



# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Rappel sur les faisceaux gaussiens

Pour un faisceau laser gaussien :

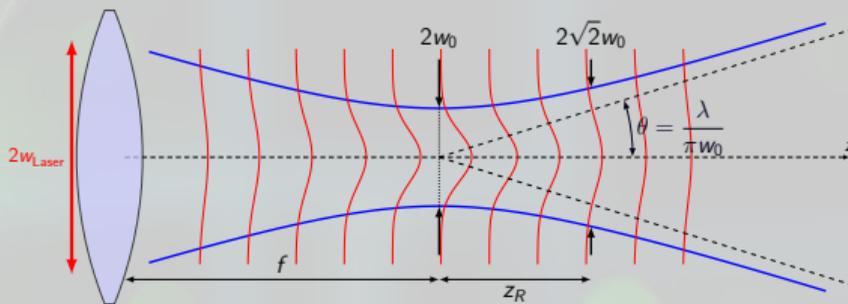
$$I(r, z) = \frac{2P}{\pi w^2(z)} e^{-2\frac{r^2}{w^2(z)}}$$

Rayon de ceinture  $w(z)$  :

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$$

avec  $z_R$  la distance de Rayleigh :

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$



$$w_0 \approx f \theta_{\text{Laser}} = f \frac{\lambda}{\pi w_{\text{Laser}}}$$

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Rappel sur les faisceaux gaussiens

Pour un faisceau laser gaussien :

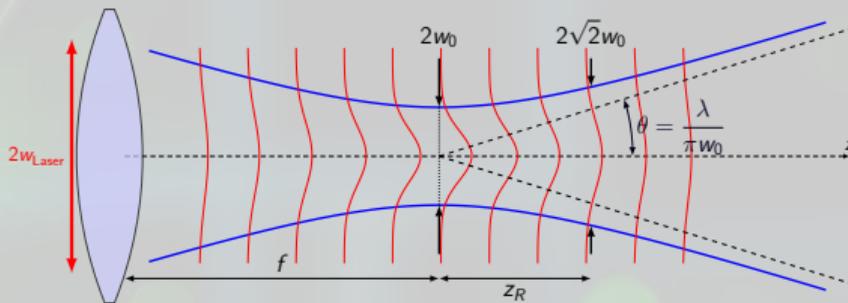
$$I(r, z) = \frac{2P}{\pi w^2(z)} e^{-2\frac{r^2}{w^2(z)}}$$

Rayon de ceinture  $w(z)$  :

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$$

avec  $z_R$  la **distance de Rayleigh** :

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$



$$w_0 \approx f \theta_{\text{Laser}} = f \frac{\lambda}{\pi w_{\text{Laser}}}$$

• Si  $w_{\text{Laser}} \nearrow \implies w_0 \searrow$

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Rappel sur les faisceaux gaussiens

Pour un faisceau laser gaussien :

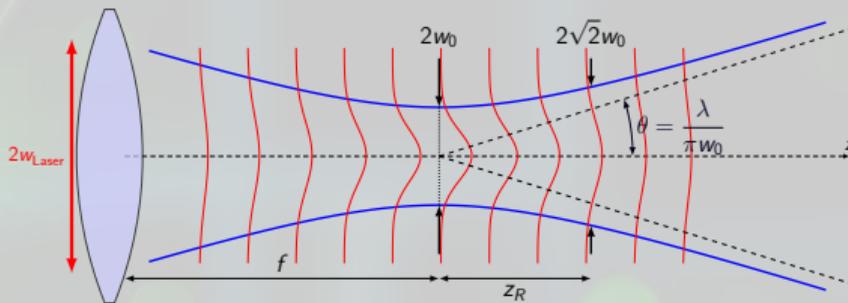
$$I(r, z) = \frac{2P}{\pi w^2(z)} e^{-2\frac{r^2}{w^2(z)}}$$

Rayon de ceinture  $w(z)$  :

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$$

avec  $z_R$  la **distance de Rayleigh** :

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$



$$w_0 \approx f \theta_{\text{Laser}} = f \frac{\lambda}{\pi w_{\text{Laser}}}$$

- Si  $w_{\text{Laser}} \nearrow \implies w_0 \searrow$
- Si  $f \searrow \implies w_0 \searrow$

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Rappel sur les faisceaux gaussiens

Pour un faisceau laser gaussien :

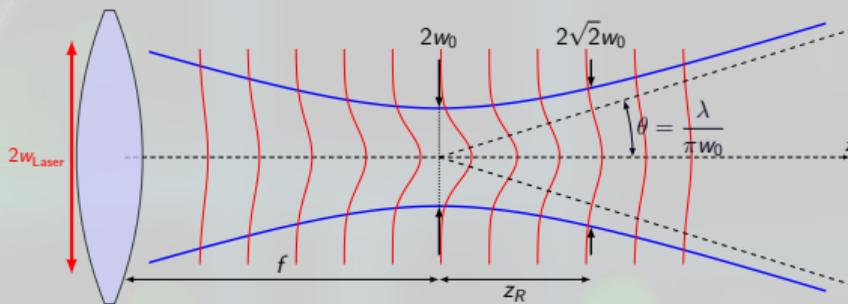
$$I(r, z) = \frac{2P}{\pi w^2(z)} e^{-2\frac{r^2}{w^2(z)}}$$

Rayon de ceinture  $w(z)$  :

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$$

avec  $z_R$  la **distance de Rayleigh** :

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$



$$w_0 \approx f \theta_{\text{Laser}} = f \frac{\lambda}{\pi w_{\text{Laser}}}$$

- Si  $w_{\text{Laser}} \nearrow \implies w_0 \searrow$
- Si  $f \searrow \implies w_0 \searrow$
- Si  $\lambda \searrow \implies w_0 \searrow$

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Rappel sur les faisceaux gaussiens

Pour un faisceau laser gaussien :

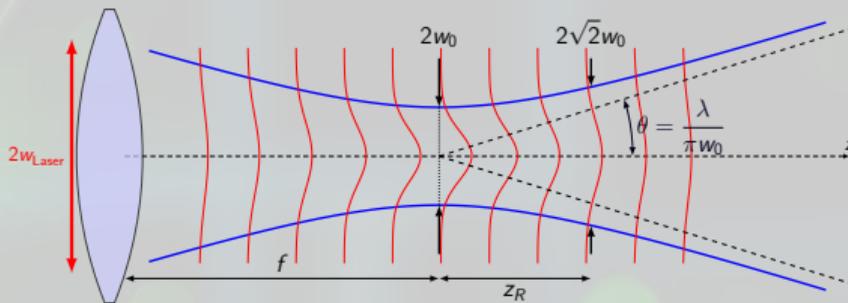
$$I(r, z) = \frac{2P}{\pi w^2(z)} e^{-2\frac{r^2}{w^2(z)}}$$

Rayon de ceinture  $w(z)$  :

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2}$$

avec  $z_R$  la **distance de Rayleigh** :

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$



$$w_0 \approx f \theta_{\text{Laser}} = f \frac{\lambda}{\pi w_{\text{Laser}}}$$

- Si  $w_{\text{Laser}} \nearrow \implies w_0 \searrow$
- Si  $f \searrow \implies w_0 \searrow$
- Si  $\lambda \searrow \implies w_0 \searrow$

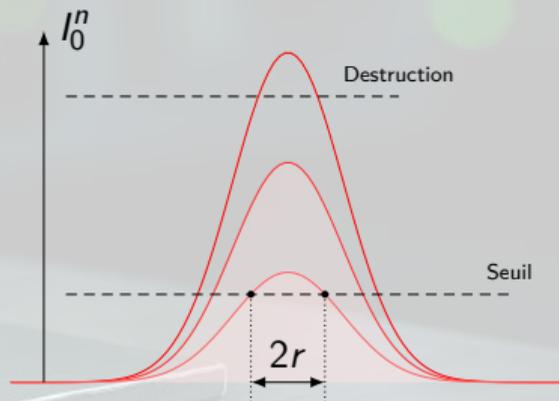
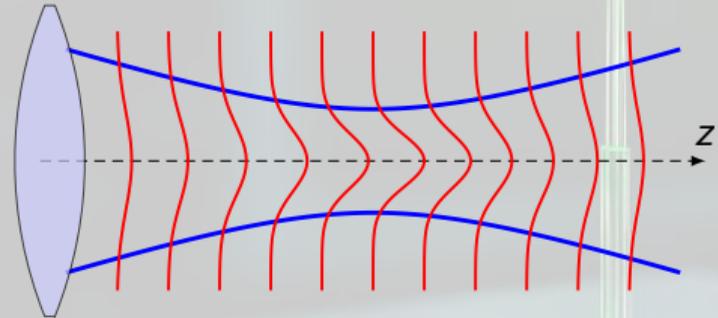
→ Le volume de focalisation dépend de l'ouverture numérique de la lentille !

# Forme et dimensions de l'ellipsoïde de focalisation

Evolution de la quantité  $I^n(r, z)$  proche du point focal

## Effet de seuil :

→ polymérisation quand la concentration en radicaux libres  $[PI^\bullet](r, z, t) \geq \rho_s$ .

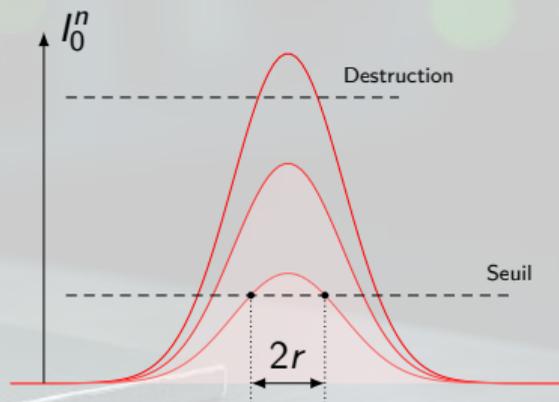
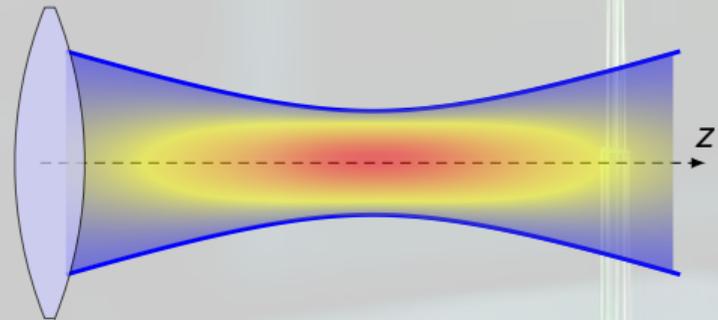


# Forme et dimensions de l'ellipsoïde de focalisation

Evolution de la quantité  $I^n(r, z)$  proche du point focal

## Effet de seuil :

→ polymérisation quand la concentration en radicaux libres  $[PI^\bullet](r, z, t) \geq \rho_s$ .

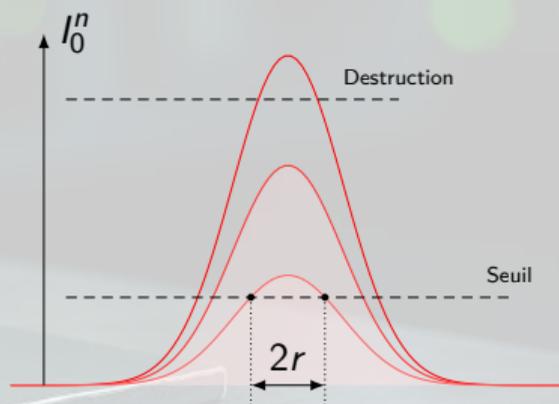
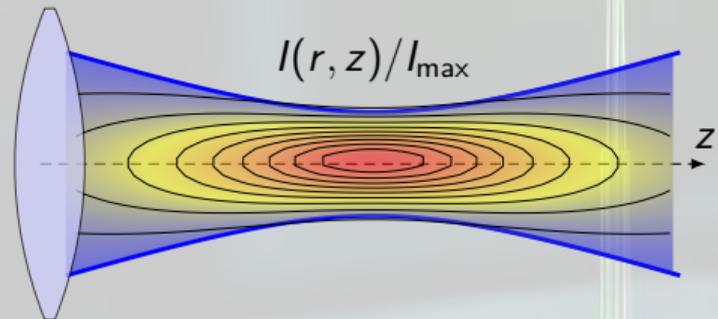


# Forme et dimensions de l'ellipsoïde de focalisation

Evolution de la quantité  $I^n(r, z)$  proche du point focal

## Effet de seuil :

→ polymérisation quand la concentration en radicaux libres  $[PI^\bullet](r, z, t) \geq \rho_s$ .

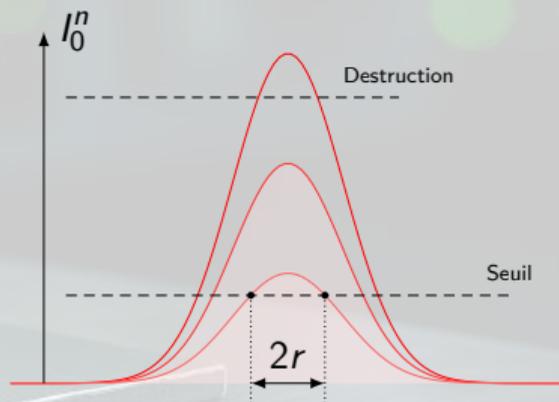
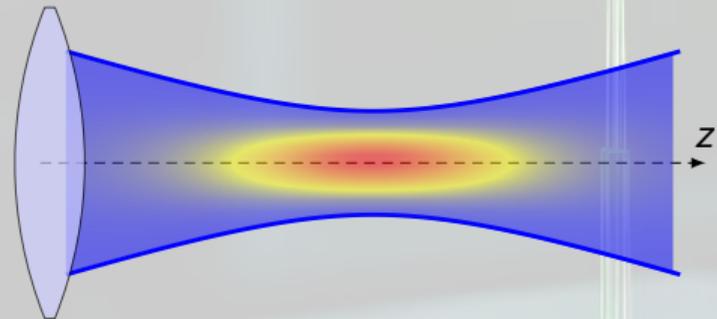


# Forme et dimensions de l'ellipsoïde de focalisation

Evolution de la quantité  $I^n(r, z)$  proche du point focal

## Effet de seuil :

→ polymérisation quand la concentration en radicaux libres  $[PI^\bullet](r, z, t) \geq \rho_s$ .

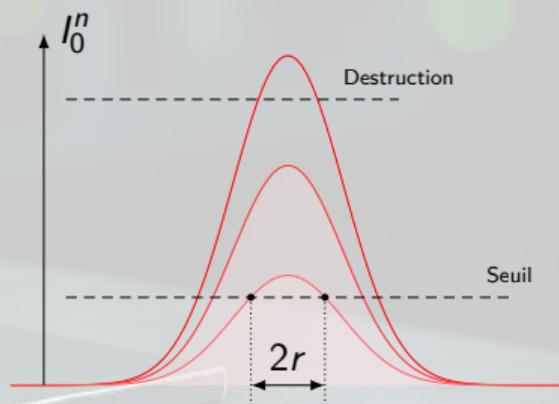
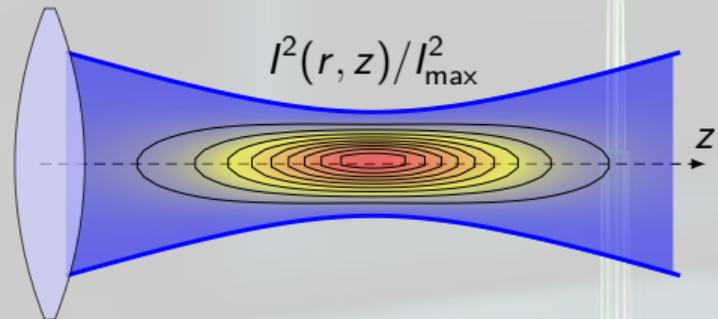


# Forme et dimensions de l'ellipsoïde de focalisation

Evolution de la quantité  $I^n(r, z)$  proche du point focal

## Effet de seuil :

→ polymérisation quand la concentration en radicaux libres  $[PI^\bullet](r, z, t) \geq \rho_s$ .

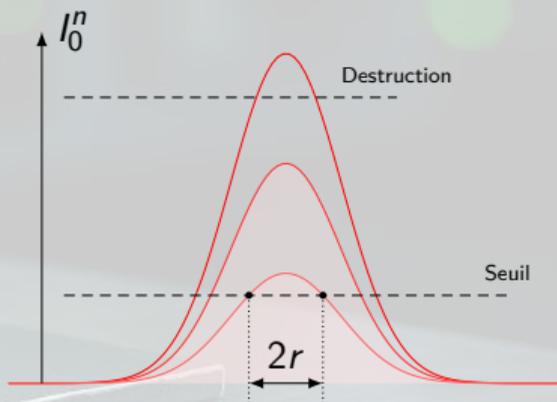
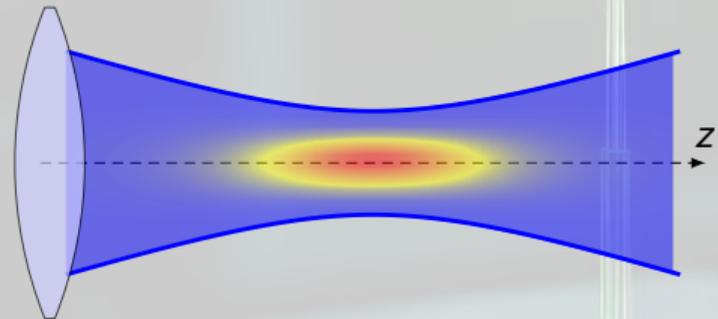


# Forme et dimensions de l'ellipsoïde de focalisation

Evolution de la quantité  $I^n(r, z)$  proche du point focal

## Effet de seuil :

→ polymérisation quand la concentration en radicaux libres  $[PI^\bullet](r, z, t) \geq \rho_s$ .

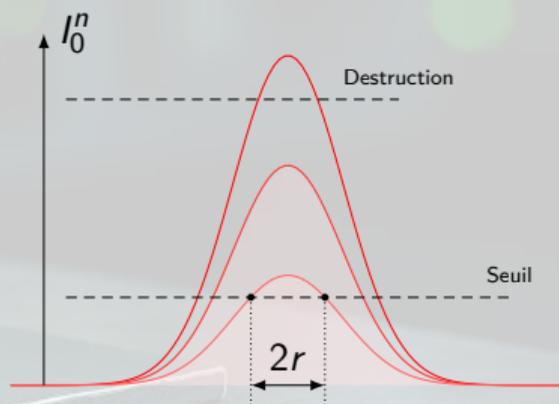
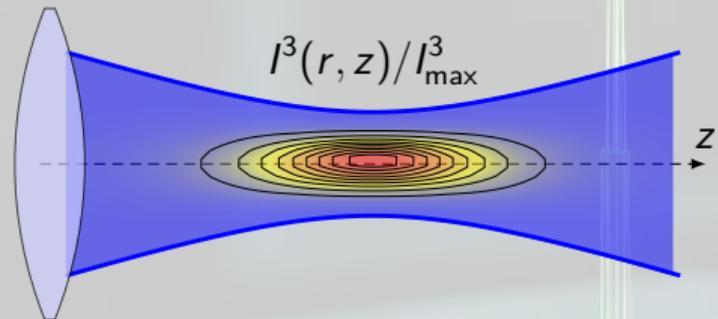


# Forme et dimensions de l'ellipsoïde de focalisation

Evolution de la quantité  $I^n(r, z)$  proche du point focal

## Effet de seuil :

→ polymérisation quand la concentration en radicaux libres  $[PI^\bullet](r, z, t) \geq \rho_s$ .

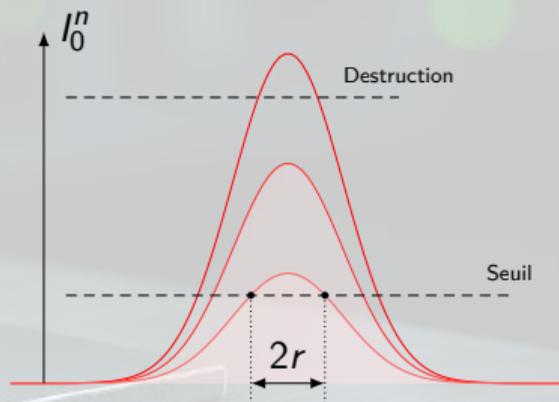
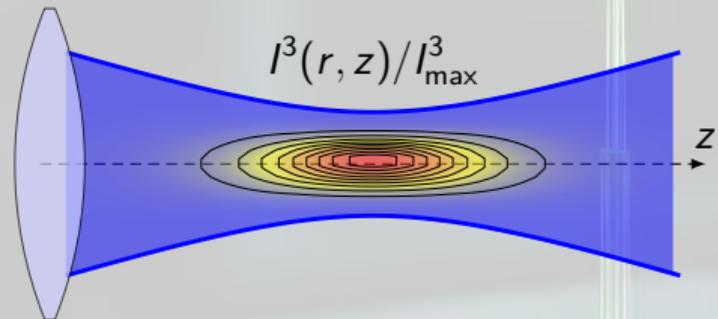


# Forme et dimensions de l'ellipsoïde de focalisation

Evolution de la quantité  $I^n(r, z)$  proche du point focal

## Effet de seuil :

→ polymérisation quand la concentration en radicaux libres  $[PI^\bullet](r, z, t) \geq \rho_s$ .



•  $n \nearrow \implies r \searrow$

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Modèle simplifié basé sur [12]

Ellipsoïde de focalisation  $\rightarrow [PI^\bullet] = \rho_s :$

- $I_{\text{mean}}$  laser
- Energie d'un photon
- Rapport cyclique du laser

## Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

## Polymérisation à 2 photons

Principe  
**Résolution**  
Méthodologie

## Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

## Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Modèle simplifié basé sur [12]

Ellipsoïde de focalisation  $\rightarrow [PI^\bullet] = \rho_s :$

$$\rho_s = \rho_0 \left(1 - e^{-\sigma_n^{\text{eff}} N^n(z,r)t}\right)$$

- $I_{\text{mean}}$  laser
- Energie d'un photon
- Rapport cyclique du laser

## Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

## Polymérisation à 2 photons

Principe  
**Résolution**  
Méthodologie

## Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

## Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Modèle simplifié basé sur [12]

Ellipsoïde de focalisation  $\rightarrow [PI^\bullet] = \rho_s :$

$$\rho_s = \rho_0 \left(1 - e^{-\sigma_n^{\text{eff}} N^n(z,r)t}\right)$$

Calcul des dimensions **transverses** :

En posant

$$\begin{cases} z = 0 \\ N(r) = N_0 e^{-2(r/w_0)^2} \end{cases}$$

- $I_{\text{mean}}$  laser
- Energie d'un photon
- Rapport cyclique du laser

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Modèle simplifié basé sur [12]

Ellipsoïde de focalisation  $\rightarrow [PI^\bullet] = \rho_s$  :

$$\rho_s = \rho_0 \left(1 - e^{-\sigma_n^{\text{eff}} N^n(z,r)t}\right)$$

Calcul des dimensions **transverses** :

En posant

$$\begin{cases} z = 0 \\ N(r) = N_0 e^{-2(r/w_0)^2} \end{cases}$$

On obtient :

$$d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{n}} w_0 \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma_n^{\text{eff}}}{C} N_0^n t_{\text{ON}} \right)}$$

avec  $C = \ln \rho_0 / (\rho_0 - \rho_s)$

- $I_{\text{mean}}$  laser
- Energie d'un photon
- Rapport cyclique du laser

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Modèle simplifié basé sur [12]

Ellipsoïde de focalisation  $\rightarrow [PI^\bullet] = \rho_s$  :

$$\rho_s = \rho_0 \left(1 - e^{-\sigma_n^{\text{eff}} N^n(z,r)t}\right)$$

Calcul des dimensions **transverses** :

En posant

$$\begin{cases} z = 0 \\ N(r) = N_0 e^{-2(r/w_0)^2} \end{cases}$$

On obtient :

$$d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{n}} w_0 \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma_n^{\text{eff}}}{C} N_0^n t_{\text{ON}} \right)}$$

avec  $C = \ln \rho_0 / (\rho_0 - \rho_s)$

Que vaut  $N_0 = N(z = 0, r = 0)$  ?

- $I_{\text{mean}}$  laser
- Energie d'un photon
- Rapport cyclique du laser

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Modèle simplifié basé sur [12]

Ellipsoïde de focalisation  $\rightarrow [PI^\bullet] = \rho_s$  :

$$\rho_s = \rho_0 \left(1 - e^{-\sigma_n^{\text{eff}} N^n(z,r)t}\right)$$

Calcul des dimensions **transverses** :

En posant

$$\begin{cases} z = 0 \\ N(r) = N_0 e^{-2(r/w_0)^2} \end{cases}$$

On obtient :

$$d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{n}} w_0 \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma_n^{\text{eff}}}{C} N_0^n t_{\text{ON}} \right)}$$

avec  $C = \ln \rho_0 / (\rho_0 - \rho_s)$

Que vaut  $N_0 = N(z = 0, r = 0)$  ?

$$N_0 = \frac{2P}{\pi w_0^2} \times \frac{\lambda}{hc} \times \frac{1}{\tau_l \mathcal{F}_l}$$

- $I_{\text{mean}}$  laser
- Energie d'un photon
- Rapport cyclique du laser

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Modèle simplifié basé sur [12]

Ellipsoïde de focalisation  $\rightarrow [PI^\bullet] = \rho_s$  :

$$\rho_s = \rho_0 \left(1 - e^{-\sigma_n^{\text{eff}} N^n(z,r)t}\right)$$

Calcul des dimensions **transverses** :

En posant

$$\begin{cases} z = 0 \\ N(r) = N_0 e^{-2(r/w_0)^2} \end{cases}$$

On obtient :

$$d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{n}} w_0 \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma_n^{\text{eff}}}{C} N_0^n t_{\text{ON}} \right)}$$

avec  $C = \ln \rho_0 / (\rho_0 - \rho_s)$

Que vaut  $N_0 = N(z = 0, r = 0)$  ?

$$N_0 = \frac{2P}{\pi w_0^2} \times \frac{\lambda}{hc} \times \frac{1}{\tau_l \mathcal{F}_l}$$

avec :

- $I_{\text{mean}}$  laser
- Energie d'un photon
- Rapport cyclique du laser

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Modèle simplifié basé sur [12]

Ellipsoïde de focalisation  $\rightarrow [PI^\bullet] = \rho_s$  :

$$\rho_s = \rho_0 \left(1 - e^{-\sigma_n^{\text{eff}} N^n(z,r)t}\right)$$

Calcul des dimensions **transverses** :

En posant

$$\begin{cases} z = 0 \\ N(r) = N_0 e^{-2(r/w_0)^2} \end{cases}$$

On obtient :

$$d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{n}} w_0 \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma_n^{\text{eff}}}{C} N_0^n t_{\text{ON}} \right)}$$

avec  $C = \ln \rho_0 / (\rho_0 - \rho_s)$

Que vaut  $N_0 = N(z = 0, r = 0)$  ?

$$N_0 = \frac{2P}{\pi w_0^2} \times \frac{\lambda}{hc} \times \frac{1}{\tau_l \mathcal{F}_l}$$

avec :

- $I_{\text{mean laser}}$
- Energie d'un photon
- Rapport cyclique du laser

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Modèle simplifié basé sur [12]

Ellipsoïde de focalisation  $\rightarrow [PI^\bullet] = \rho_s$  :

$$\rho_s = \rho_0 \left(1 - e^{-\sigma_n^{\text{eff}} N^n(z,r)t}\right)$$

Calcul des dimensions **transverses** :

En posant

$$\begin{cases} z = 0 \\ N(r) = N_0 e^{-2(r/w_0)^2} \end{cases}$$

On obtient :

$$d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{n}} w_0 \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma_n^{\text{eff}}}{C} N_0^n t_{\text{ON}} \right)}$$

avec  $C = \ln \rho_0 / (\rho_0 - \rho_s)$

Que vaut  $N_0 = N(z = 0, r = 0)$  ?

$$N_0 = \frac{2P}{\pi w_0^2} \times \frac{\lambda}{hc} \times \frac{1}{\tau_l \mathcal{F}_l}$$

avec :

- $I_{\text{mean laser}}$
- Energie d'un photon
- Rapport cyclique du laser

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Modèle simplifié basé sur [12]

Ellipsoïde de focalisation  $\rightarrow [PI^\bullet] = \rho_s$  :

$$\rho_s = \rho_0 \left(1 - e^{-\sigma_n^{\text{eff}} N^n(z,r)t}\right)$$

Calcul des dimensions **transverses** :

En posant

$$\begin{cases} z = 0 \\ N(r) = N_0 e^{-2(r/w_0)^2} \end{cases}$$

On obtient :

$$d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{n}} w_0 \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma_n^{\text{eff}}}{C} N_0^n t_{\text{ON}} \right)}$$

avec  $C = \ln \rho_0 / (\rho_0 - \rho_s)$

Que vaut  $N_0 = N(z = 0, r = 0)$  ?

$$N_0 = \frac{2P}{\pi w_0^2} \times \frac{\lambda}{hc} \times \frac{1}{\tau_l \mathcal{F}_l}$$

avec :

- $I_{\text{mean}}$  laser
- Energie d'un photon
- Rapport cyclique du laser

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Modèle simplifié basé sur [12]

Ellipsoïde de focalisation  $\rightarrow [PI^\bullet] = \rho_s$  :

$$\rho_s = \rho_0 \left(1 - e^{-\sigma_n^{\text{eff}} N^n(z,r)t}\right)$$

Calcul des dimensions **transverses** :

En posant

$$\begin{cases} z = 0 \\ N(r) = N_0 e^{-2(r/w_0)^2} \end{cases}$$

On obtient :

$$d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{n}} w_0 \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma_n^{\text{eff}}}{C} N_0^n t_{\text{ON}} \right)}$$

avec  $C = \ln \rho_0 / (\rho_0 - \rho_s)$

Que vaut  $N_0 = N(z = 0, r = 0)$  ?

$$N_0 = \frac{2P}{\pi w_0^2} \times \frac{\lambda}{hc} \times \frac{1}{\tau_l \mathcal{F}_l}$$

avec :

- $I_{\text{mean}}$  laser
- Energie d'un photon
- Rapport cyclique du laser

Que vaut  $t_{\text{ON}}$  ?

$$t_{\text{ON}} = \mathcal{F}_l \tau_l t$$

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Modèle simplifié basé sur [12]

Ellipsoïde de focalisation  $\rightarrow [PI^\bullet] = \rho_s :$

$$\rho_s = \rho_0 \left(1 - e^{-\sigma_n^{\text{eff}} N^n(z,r)t}\right)$$

Calcul des dimensions **longitudinales** :

En posant

$$\begin{cases} r = 0 \\ N(z) = \frac{N_0}{1 + (z/Z_R)^2} \end{cases}$$

On obtient :

$$\ell = 2Z_R \left( N_0^n \sqrt{\frac{\sigma_n^{\text{eff}}}{C}} t_{\text{ON}} - 1 \right)^{1/2}$$

Que vaut  $N_0 = N(z=0, r=0)$  ?

$$N_0 = \frac{2P}{\pi w_0^2} \times \frac{\lambda}{hc} \times \frac{1}{\tau_\ell \mathcal{F}_\ell}$$

avec :

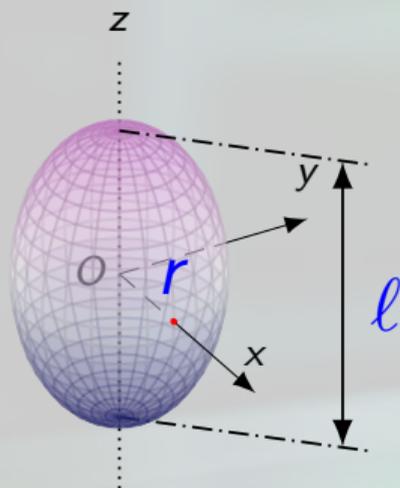
- $I_{\text{mean}}$  laser
- Energie d'un photon
- Rapport cyclique du laser

Que vaut  $t_{\text{ON}}$  ?

$$t_{\text{ON}} = \mathcal{F}_\ell \tau_\ell t$$

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Pour résumer : dimensions longitudinales et transversales



**Dimensions longitudinales :**

$$l = 2z_R \left( N_0 \sqrt{\frac{\sigma_n^{\text{eff}}}{C}} t_{\text{ON}} - 1 \right)^{1/2}$$

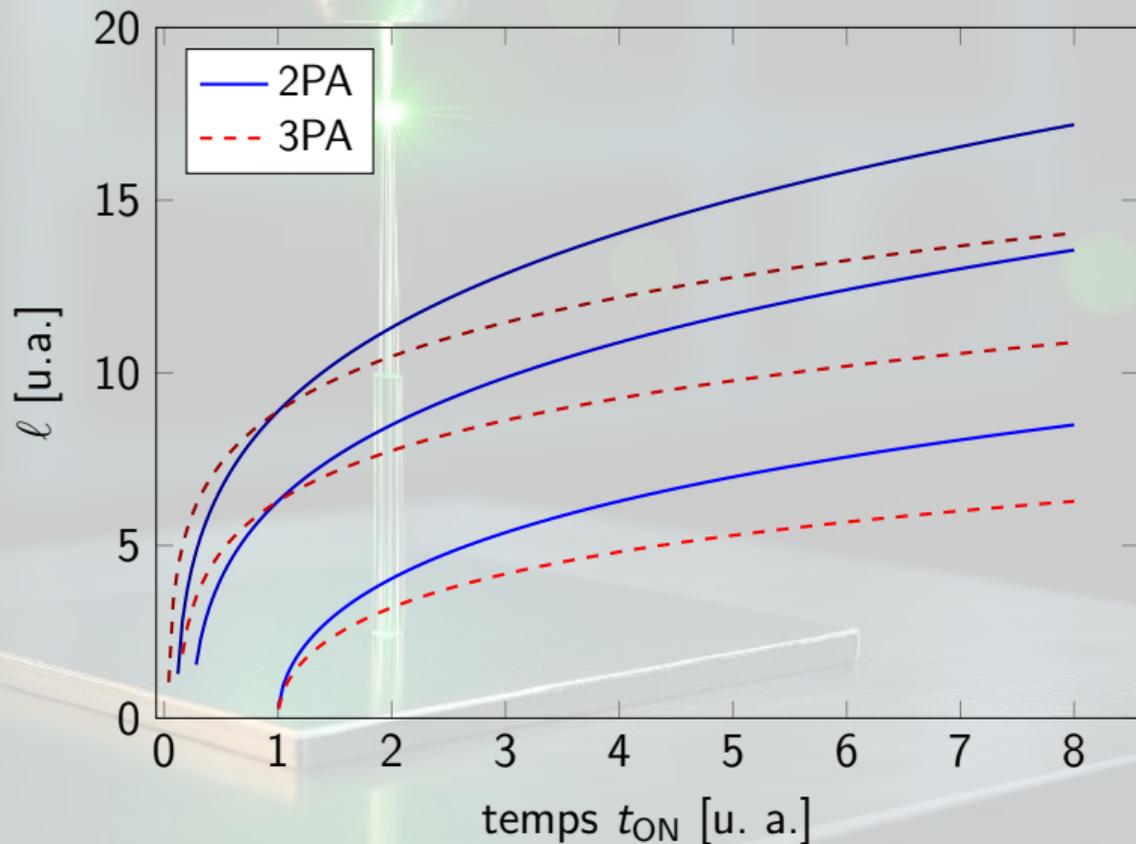
**Dimensions transversales :**

$$d = 2r = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{n}} w_0 \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma_n^{\text{eff}}}{C} N_0 t_{\text{ON}} \right)}$$

avec  $C = \ln(\rho_0 / (\rho_0 - \rho_s))$   
et  $t_{\text{ON}} = \mathcal{F}_\ell \tau_\ell t$ .

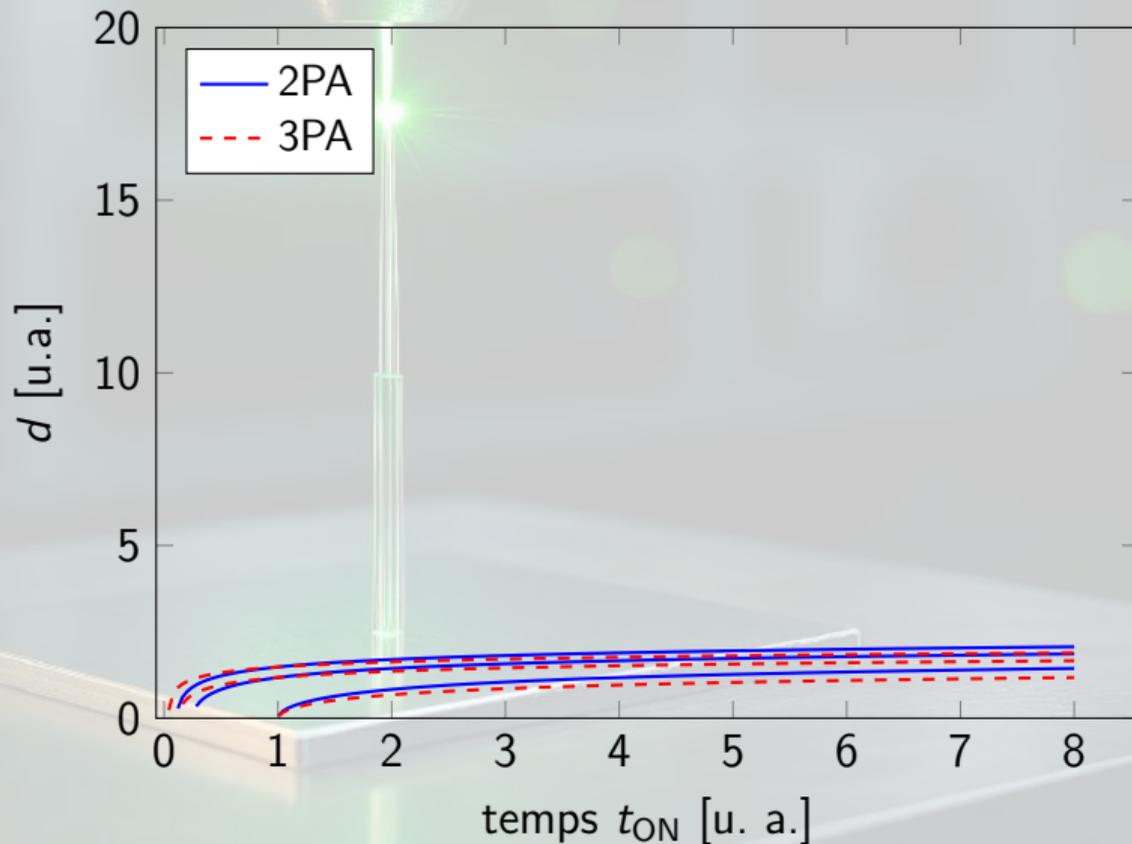
# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Evolution de  $\ell$  en fonction du temps d'exposition pour des intensités différentes



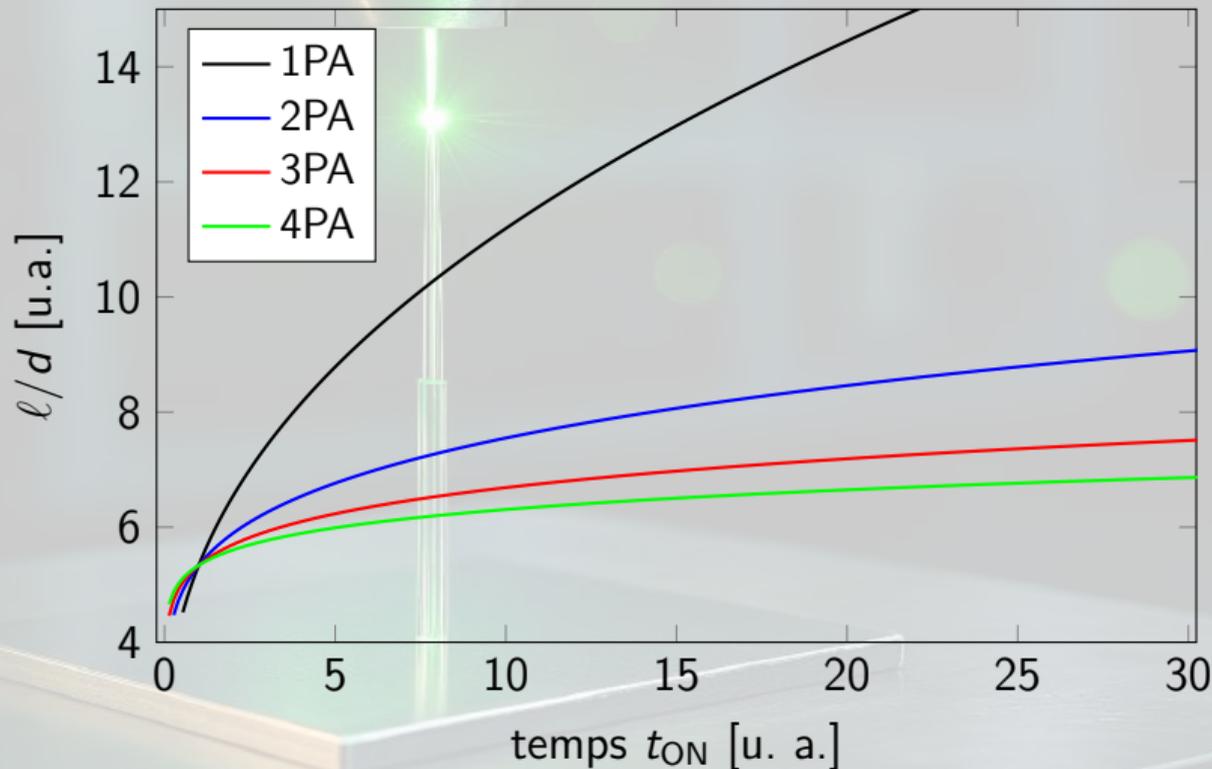
# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Evolution de  $d$  en fonction du temps d'exposition pour des intensités différentes



# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Evolution du ratio  $l/d$  en fonction du temps d'exposition



# Dimensions d'une ligne

Modèle similaire tenant compte d'un balayage du laser

Lorsque le faisceau laser est balayé, la puissance reçue dépend de l'intensité du faisceau et de sa vitesse de déplacement  $v_b$  [12].

**Dimensions transverses d'une ligne<sup>i</sup> :**

$$w = w_0 \sqrt{\ln \frac{\sigma \left( \frac{P}{h\omega_L} \right)^2}{\pi^{3/2} v_b \mathcal{F}_\ell \tau_\ell w_0^2 C}}$$

i. Pour une absorption à 2 photons

# Dimensions statiques d'un voxel unitaire

Ouverture numérique d'un objectif

**Ouverture numérique NA :**

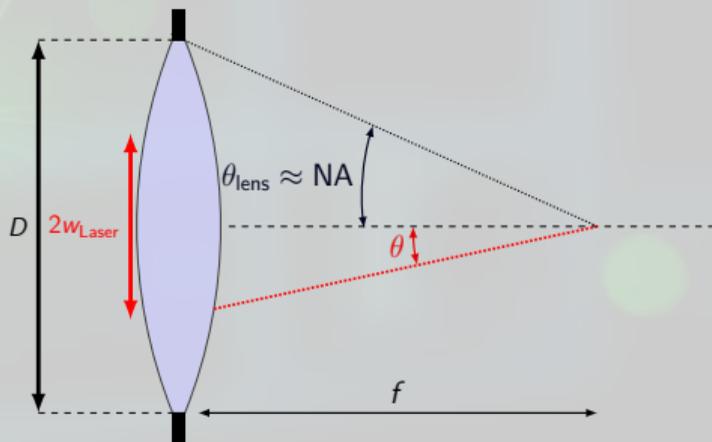
$$NA \approx \theta_{\text{lens}} \approx \frac{D}{2f}$$

Pour limiter les aberrations :

$$w_{\text{Laser}} \approx \frac{D}{4} = \frac{fNA}{2}$$

**Waist au point de focalisation :**

$$w_0 \approx \frac{2 \lambda}{\pi NA} = 0.64 \frac{\lambda}{NA}$$



- Si  $NA \nearrow \implies w_0 \searrow$
- Si  $\lambda \searrow \implies w_0 \searrow$

## Advances in modeling and optimization for two-photon lithography

Valeriia Sedova,<sup>a,\*</sup> Florie Ogor,<sup>b</sup> Joël Rovera,<sup>b</sup> Odysseas Tsilipakos,<sup>c</sup>  
Jonas Wiedenmann,<sup>d</sup> Kevin Heggarty,<sup>b</sup> and Andreas Erdmann<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Fraunhofer IISB, Erlangen, Germany

<sup>b</sup>IMT Atlantique, Brest, France

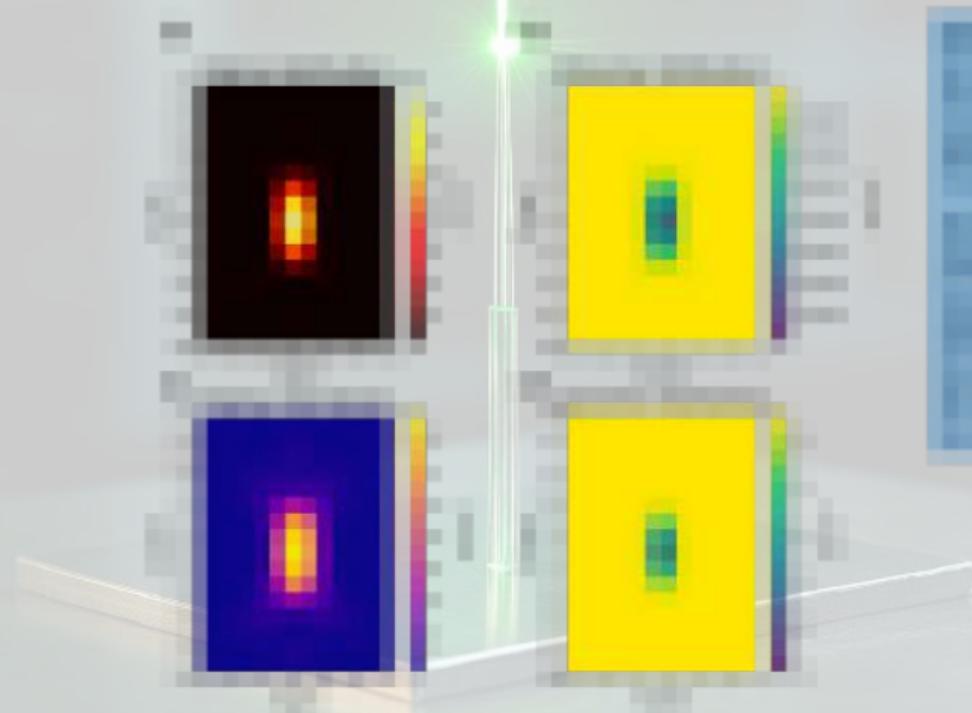
<sup>c</sup>Theoretical and Physical Chemistry Institute, National Hellenic Research Foundation (NHRF), Athens, Greece, Institute of Electronic Structure and Laser, Foundation for Research and Technology Hellas, Heraklion, Greece

<sup>d</sup>Heidelberg Instruments Mikrotechnik GmbH, Würzburg, Germany



# Modèles évolués

Pour aller plus loin ... [13]



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

## Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

## Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

## Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

## Art et impression 3D

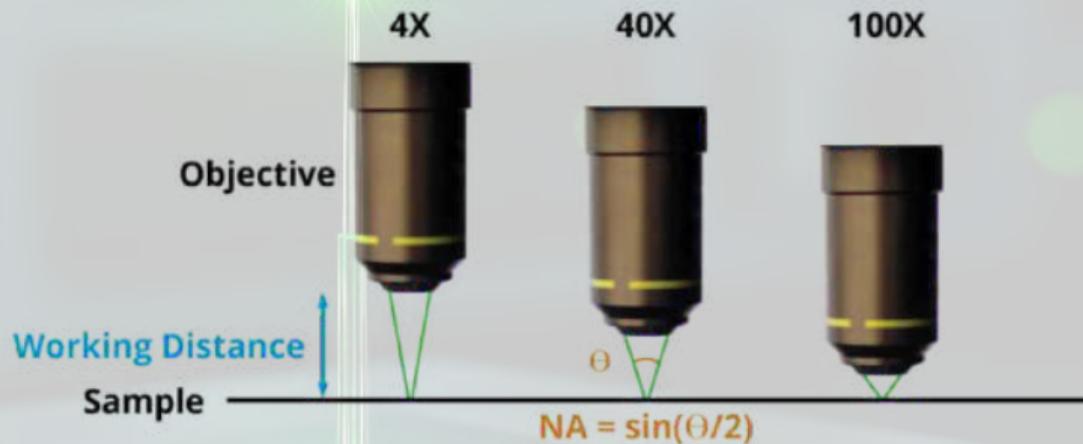


Université  
de Lille



# Choix de l'objectif de focalisation

Distance de travail



- Si NA  $\nearrow$  Résolution  $\nearrow$  ( $w_0 \searrow$ ) MAIS distance de travail  $\searrow$

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



Université  
de Lille



# Impression sur fibres optiques

## Principe



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines Solmer

### Art et impression 3D

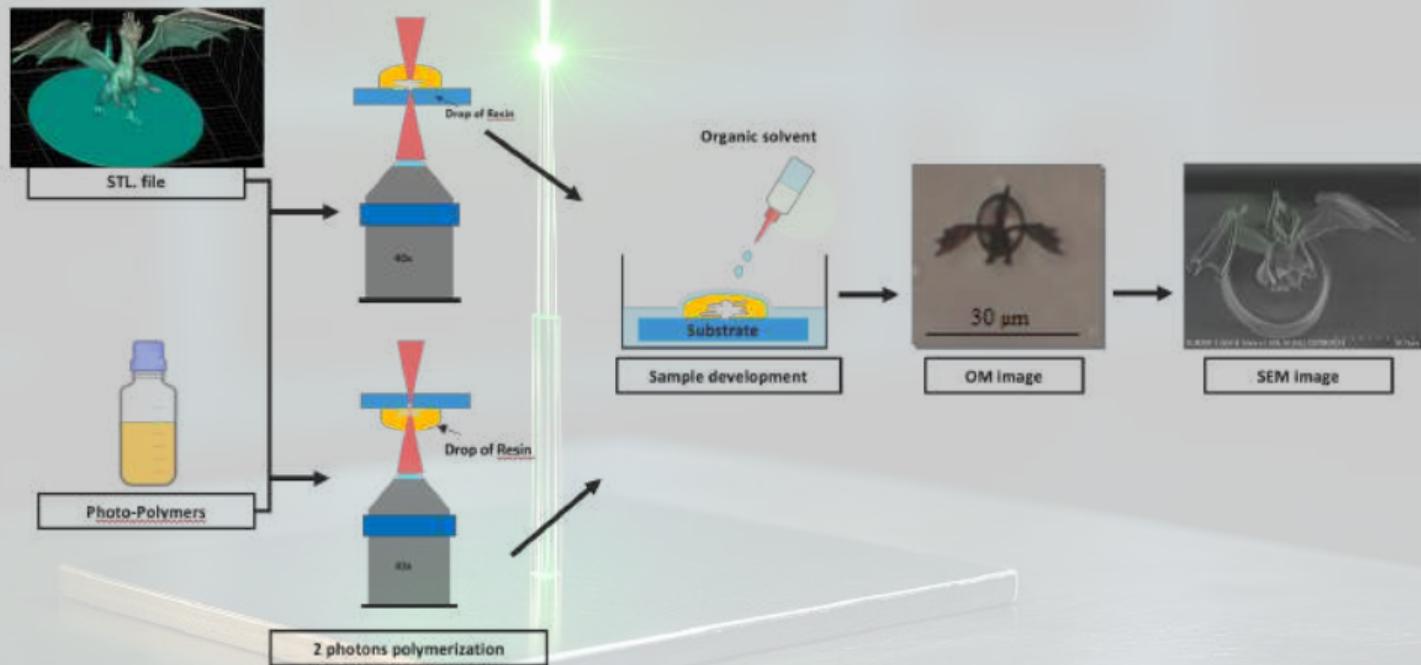


Université  
de Lille



# Impression sur substrats

## Principe



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D

Université  
de Lille

cnrs

PhLAM  
Laboratoire de Photonique  
Moléculaire et Laser  
Université de Lille

# Paramètres de déplacement du laser

## Slicing et Hatching

- Le logiciel dédié génère un g-code qui transcrit les déplacements du laser (coordonnées + vitesse)
- La puissance du laser est choisie en fonction de la résine et la résolution

### Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Paramètres de déplacement du laser

## Slicing et Hatching

- Le logiciel dédié génère un g-code qui transcrit les déplacements du laser (coordonnées + vitesse)
- La puissance du laser est choisie en fonction de la résine et la résolution

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



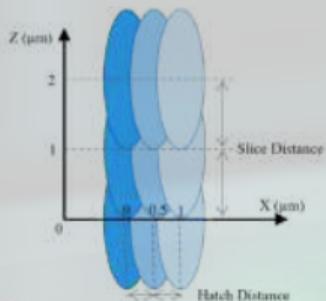
Université  
de Lille



# Paramètres de déplacement du laser

## Slicing et Hatching

- Le logiciel dédié génère un g-code qui transcrit les déplacements du laser (coordonnées + vitesse)
- La puissance du laser est choisie en fonction de la résine et la résolution



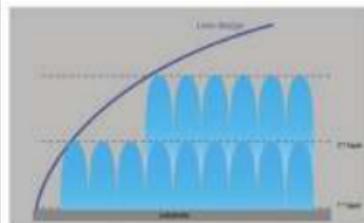
Tiré de [14]

# Paramètres de déplacement du laser

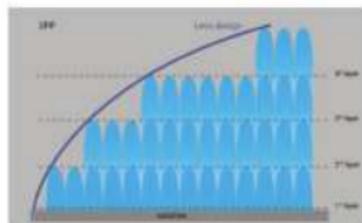
## Slicing et Hatching

### 3D printing basics

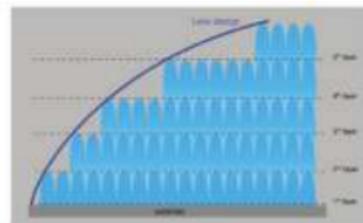
#### Challenge staircasing vs. printing speed



Slicing distance 2 µm



Slicing distance 1 µm



Slicing distance 0.5 µm

Tiré de [NanoScribe]

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



Université  
de Lille



# Paramètres de déplacement du laser

Slicing et Hatching



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

## Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

## Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

**Méthodologie**

## Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

## Art et impression 3D



Université  
de Lille



PhLAM  
Physique des Hautes Pressions et des Lasers

# Exemple d'imprimante 3D

Microlight 3D



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

## Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

## Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

**Méthodologie**

## Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

## Art et impression 3D



Université  
de Lille



PhLAM  
Physique des Hautes Pressions et des Lasers  
UMR 8507

# Plan

## Introduction et contexte

Qualités optiques requises concernant les matériaux pour l'optique  
Présentation des méthodes de synthèse additive de verre

## Polymérisation à 2 photons

Principes de l'impulsion lumineuse  
Applications d'impression additive  
Technologie de la polymérisation à 2 photons

## Résines hybrides pour la réalisation de verres de silice

Technologies employées  
Réalizations avec les résines Solmer

## Art et impression 3D

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D

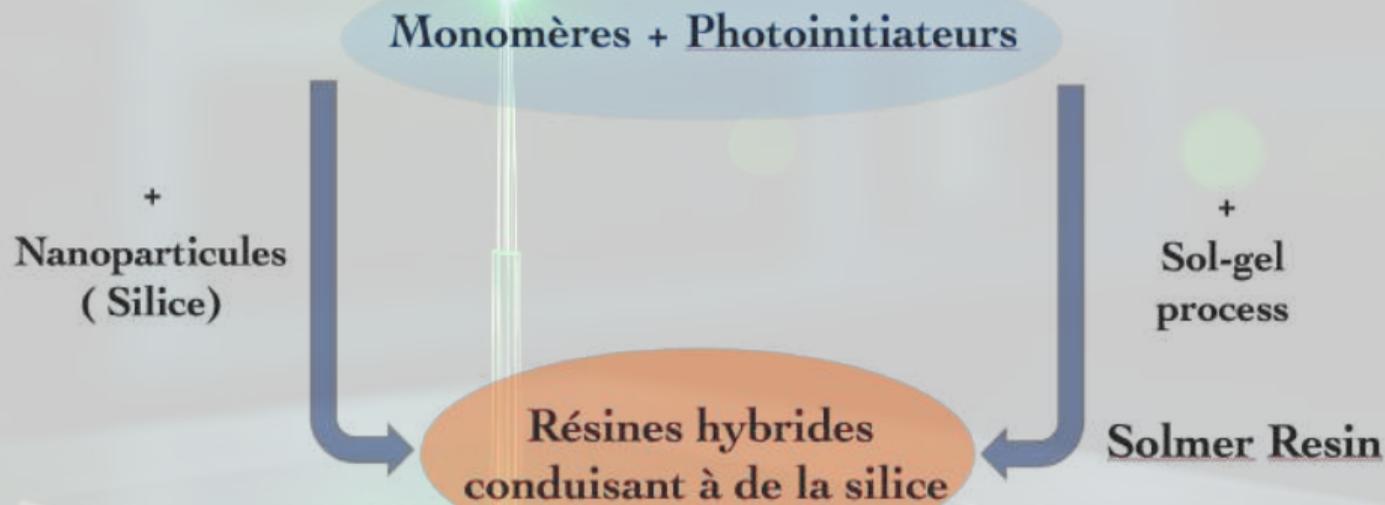


Université  
de Lille



# Résines photosensibles hybrides

Deux voies possibles



Xiewen Wen et al, 3D-printed silica with nanoscale resolution, Nature *Materials*, vol 20 1506 | November 2021 | 1506-1511

H. El Aaad et al., Solmers: Versatile hybrid resins for nanometric 3D printing of silica-based photonic components, *Materials Today Advances* 22 (2024) 100500

Synthèse additive de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

Art et impression 3D



Université de Lille



# Résines photosensibles hybrides

Procédé sol-gel

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

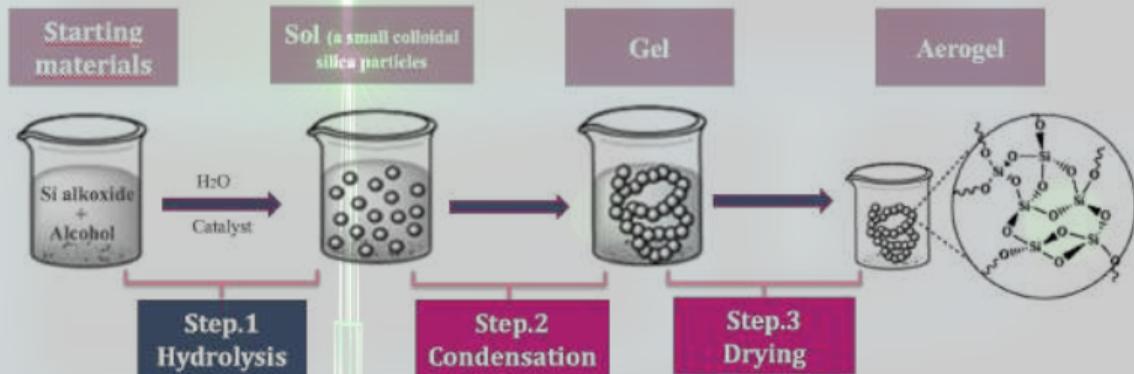
Polymérisation à 2  
photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

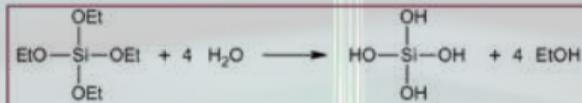
Résines pour verre

Technologies employées  
Réalisations avec les résines  
Solmer

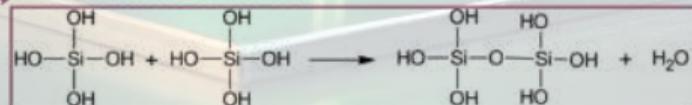
Art et impression  
3D



**Hydrolysis reaction:**



**Condensation reaction:**



Université  
de Lille



# Résines photosensibles hybrides

Procédé sol-gel

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

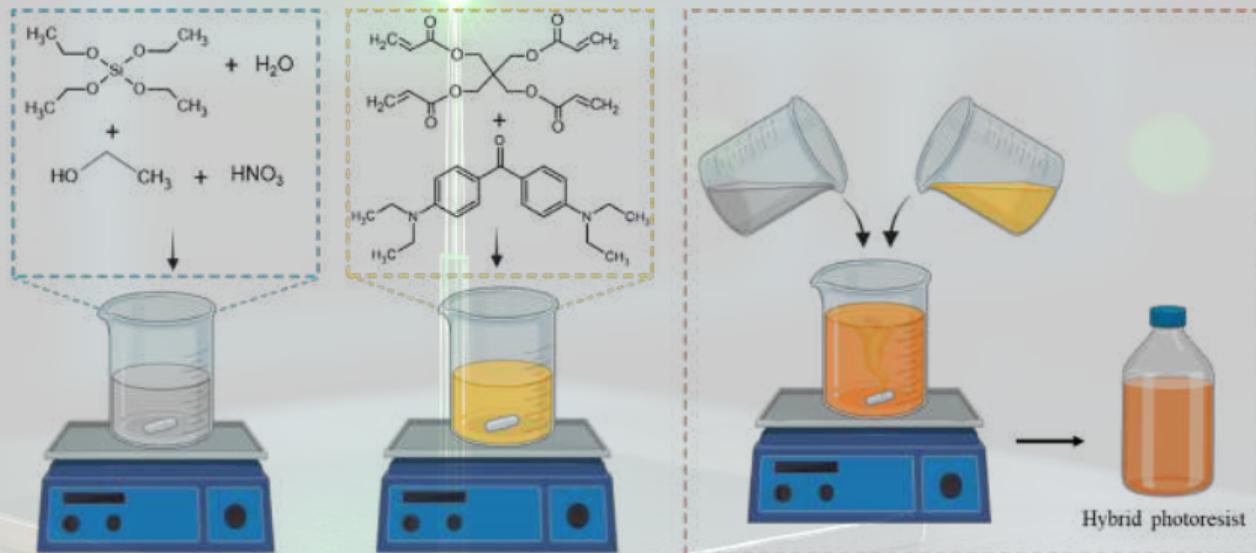
Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D

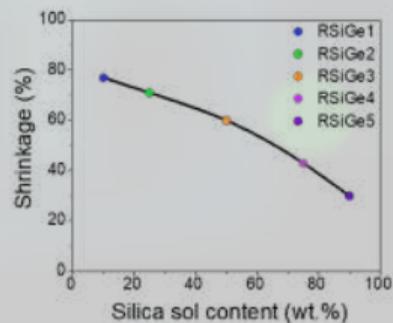
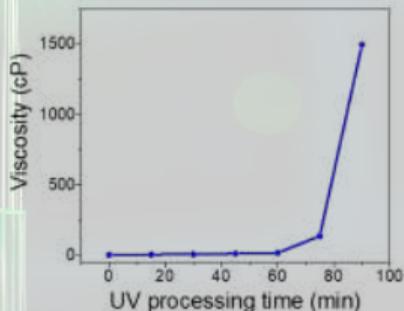
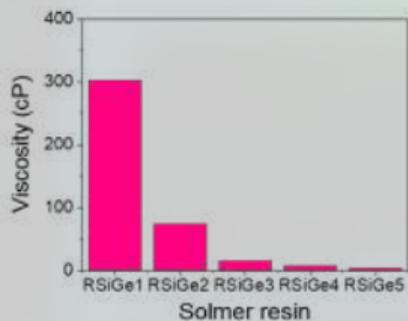


Université  
de Lille



# Caractéristiques des résines Solmer

Viscosité modifiable (sol/organic 1/9, 1/3, 1/1, 3/1, 9/1)



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D

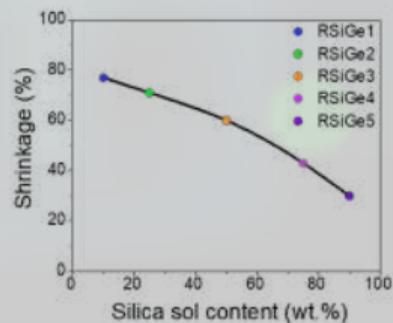
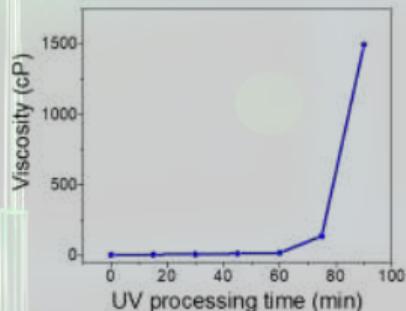
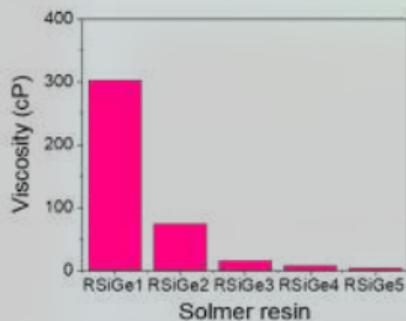


Université  
de Lille



# Caractéristiques des résines Solmer

Viscosité modifiable (sol/organic 1/9, 1/3, 1/1, 3/1, 9/1)



- Viscosité est modifiable par post-insolation UV

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D

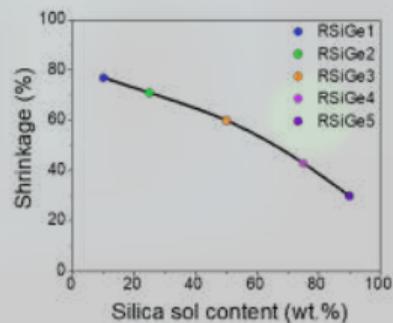
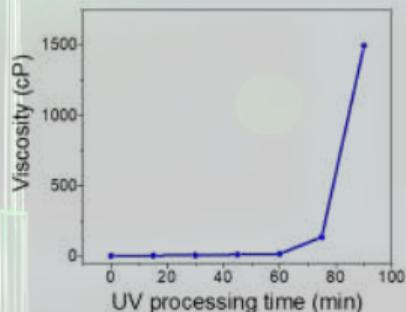
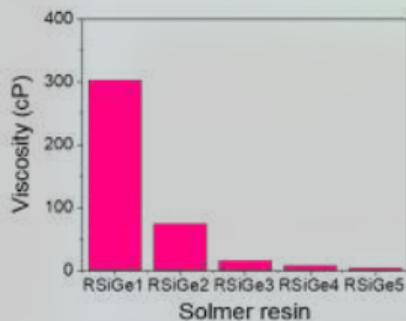


Université  
de Lille



# Caractéristiques des résines Solmer

Viscosité modifiable (sol/organic 1/9, 1/3, 1/1, 3/1, 9/1)



- Viscosité est modifiable par post-insolation UV
- Rétreint peut être minimisé avec des résines à haute teneur en silice

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D

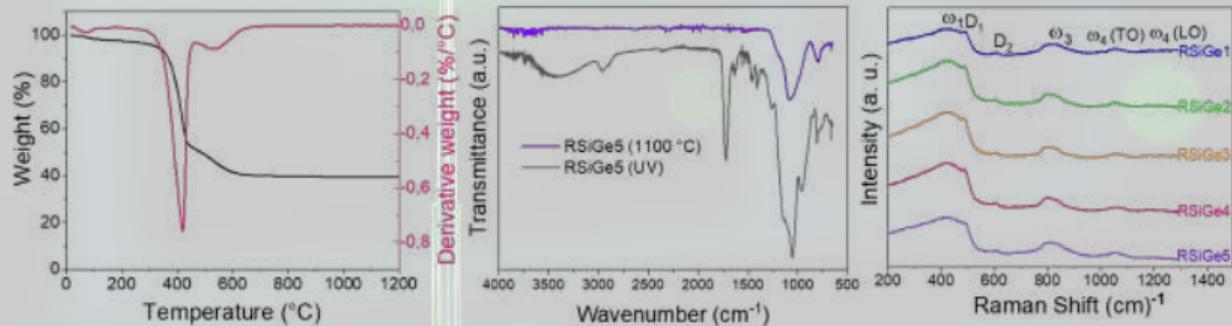


Université  
de Lille



# Caractéristiques des résines Solmer

## Analyses structurales



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D

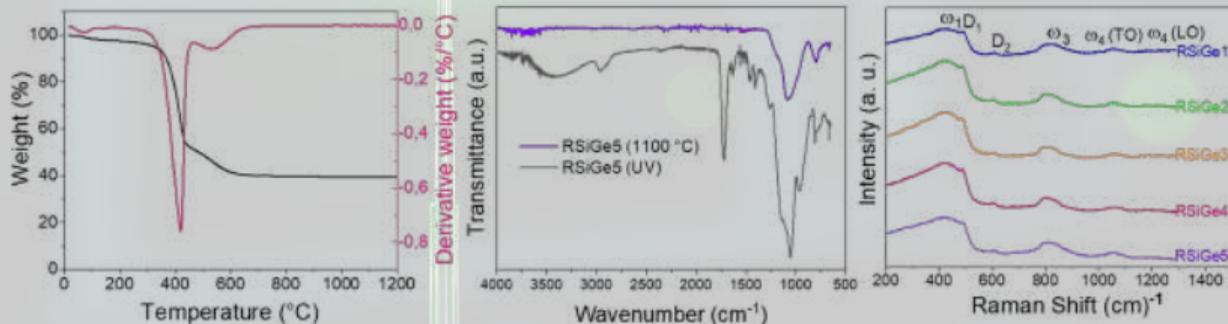


Université  
de Lille



# Caractéristiques des résines Solmer

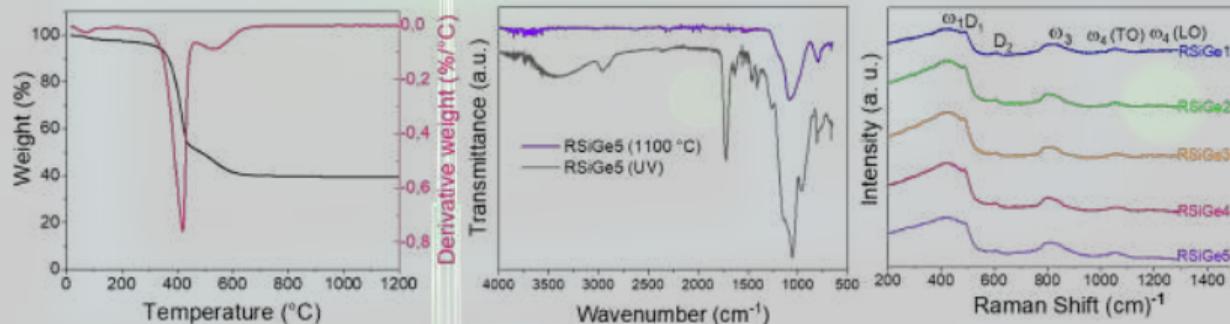
## Analyses structurales



- Comparaison spectre de transmission avant / après déliantage/frittage

# Caractéristiques des résines Solmer

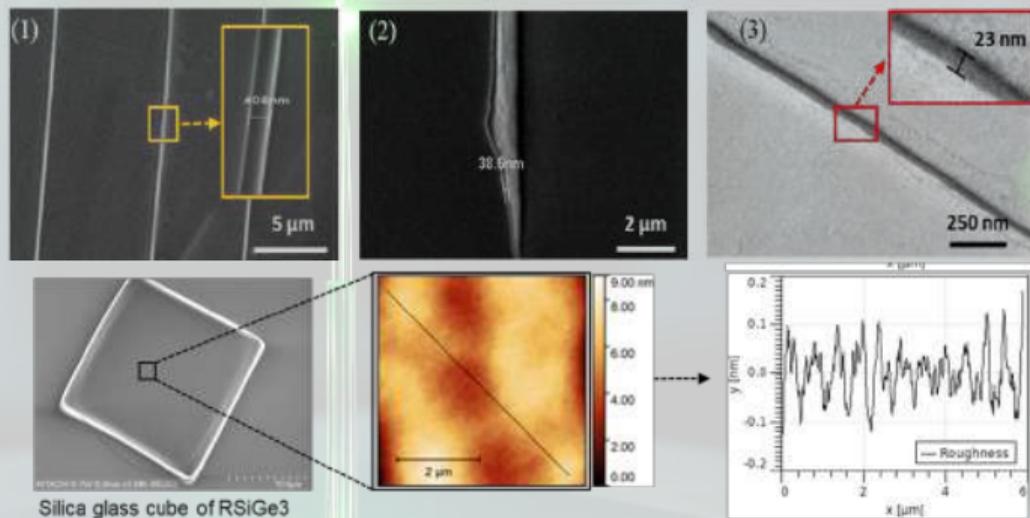
## Analyses structurales



- Comparaison spectre de transmission avant / après déliantage/frittage
- Spectres Raman confirment état amorphe silice

# Caractéristiques des résines Solmer

## Résolution atteignable et rugosité



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D

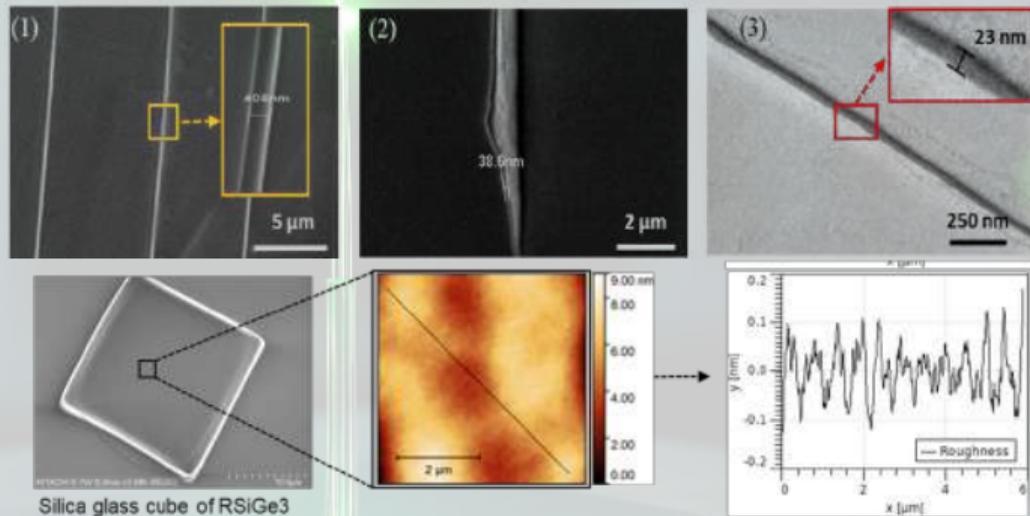


Université  
de Lille



# Caractéristiques des résines Solmer

Résolution atteignable et rugosité



- 23 nm minimum d'impression

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D

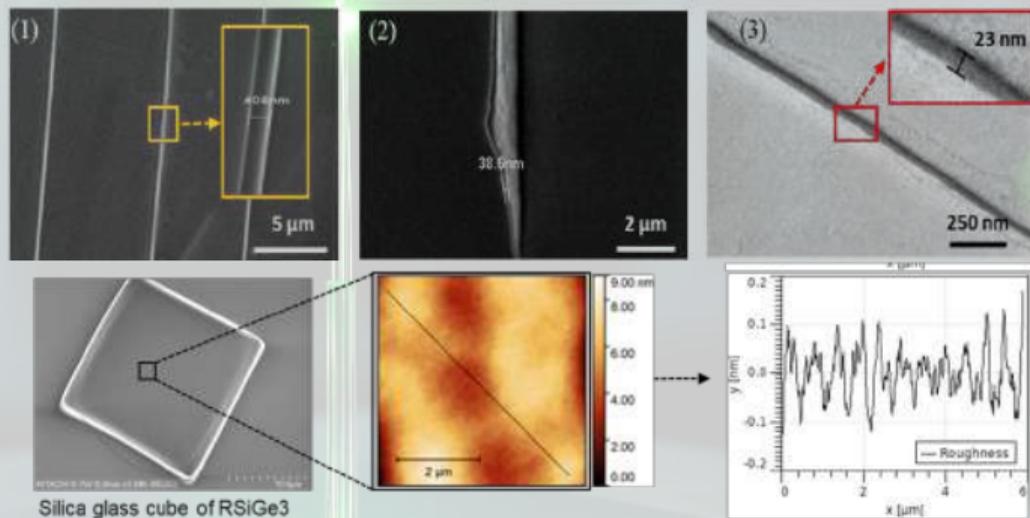


Université  
de Lille



# Caractéristiques des résines Solmer

## Résolution atteignable et rugosité



- 23 nm minimum d'impression
- Rugosité  $< 0.5$  nm

### Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées  
Réalisations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D

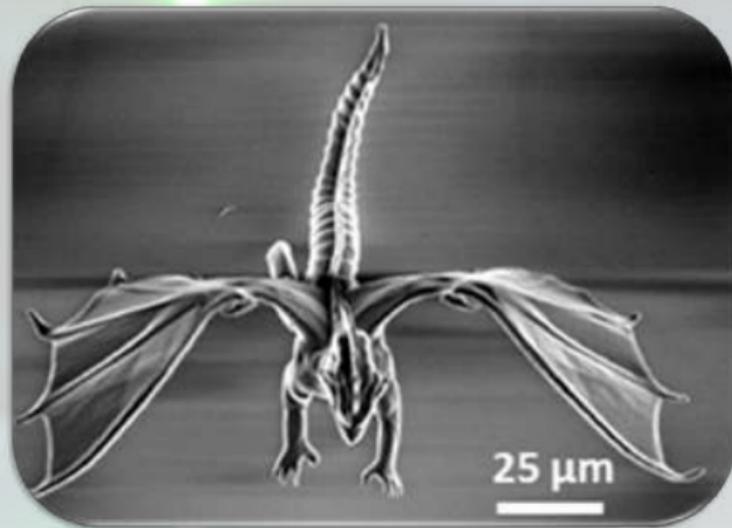


Université  
de Lille



# Caractéristiques des résines Solmer

Exemple de réalisation en silice dopée Ge



- Exemple de réalisation en silice dopée Ge

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

## Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

## Polymérisation à 2 photons

Principe

Résolution

Méthodologie

## Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

## Art et impression 3D

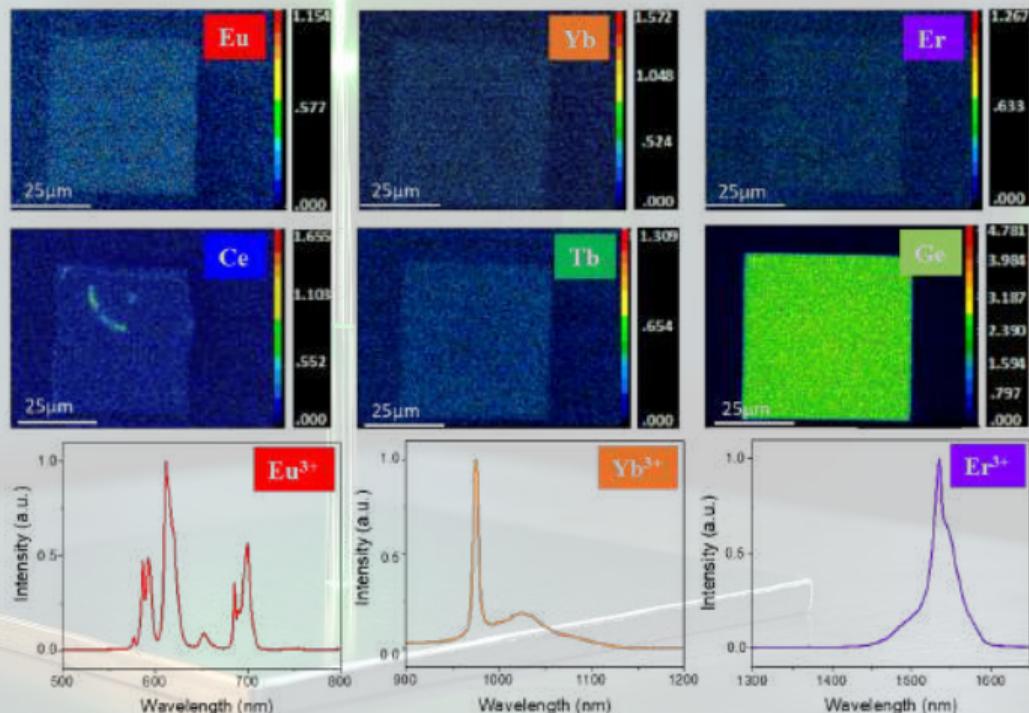


Université  
de Lille



# Caractéristiques des résines Solmer

Dopage possible dans la résine en ions luminescents



- Localisation homogène des dopants

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D

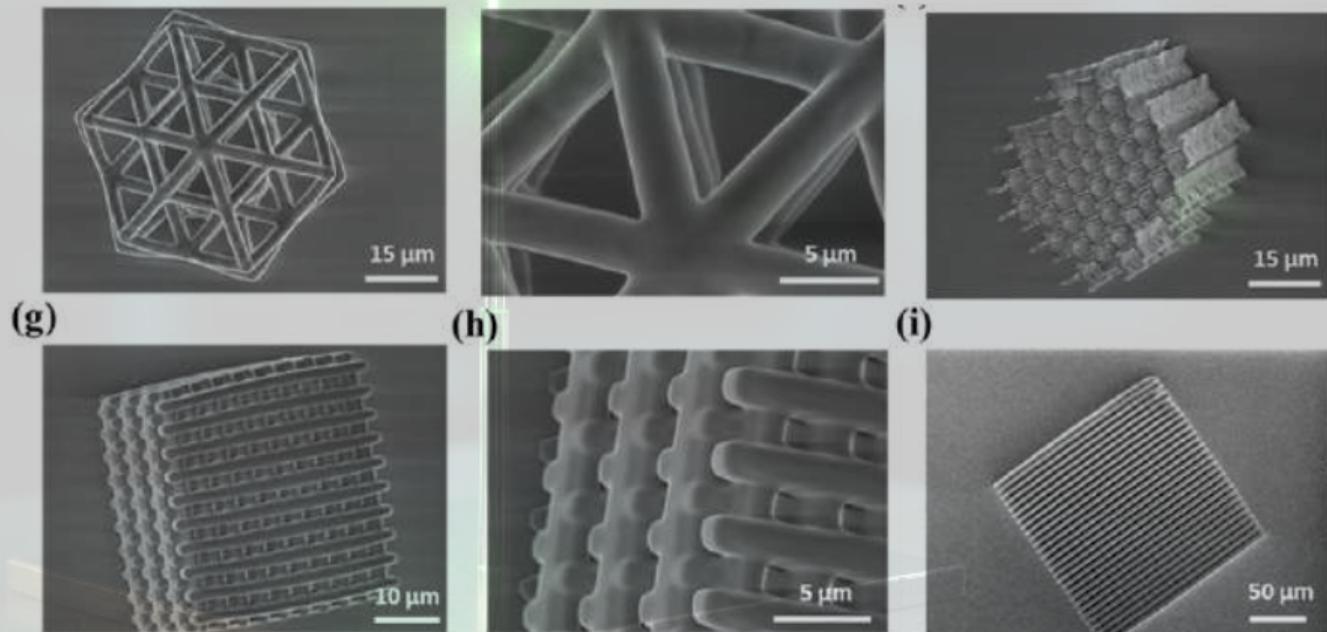
Université  
de Lille

cnrs

PhLAM  
Physique des Lasers  
et des Milieux  
Amorphes

# Caractéristiques des résines Solmer

Quelques réalisations



- Après traitement thermique

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D

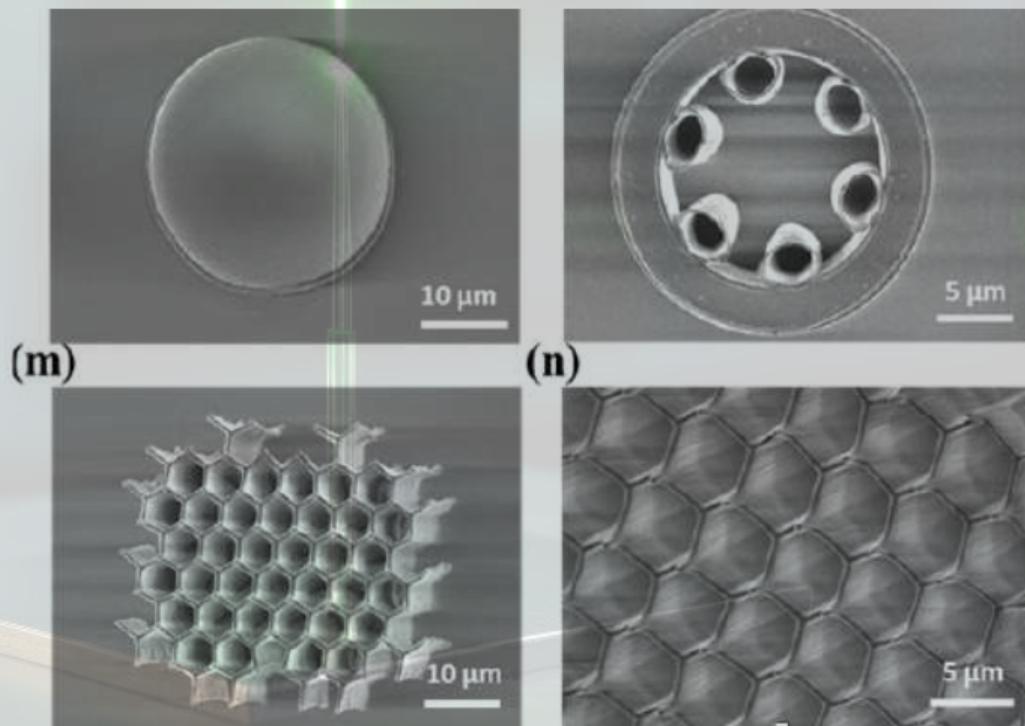


Université  
de Lille



# Caractéristiques des résines Solmer

Quelques réalisations



Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D

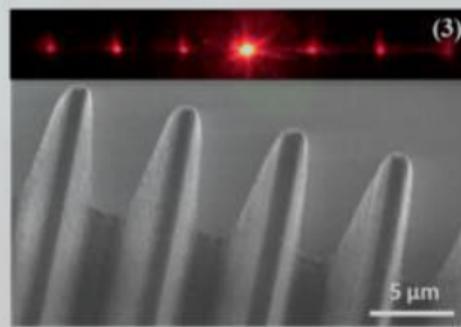
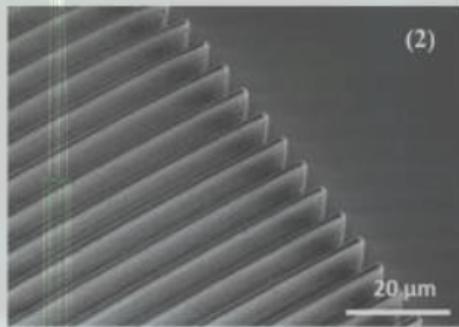
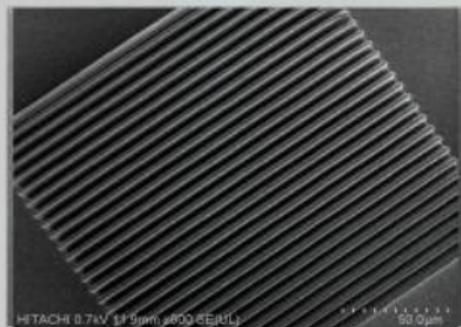


Université  
de Lille



# Caractéristiques des résines Solmer

Quelques réalisations



- Réseaux de diffraction à la demande

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



Université  
de Lille



# Caractéristiques des résines Solmer

Vers du multimatériaux

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

Contexte

Qualités optiques

Synthèse additive

Polymérisation à 2  
photons

Principe

Résolution

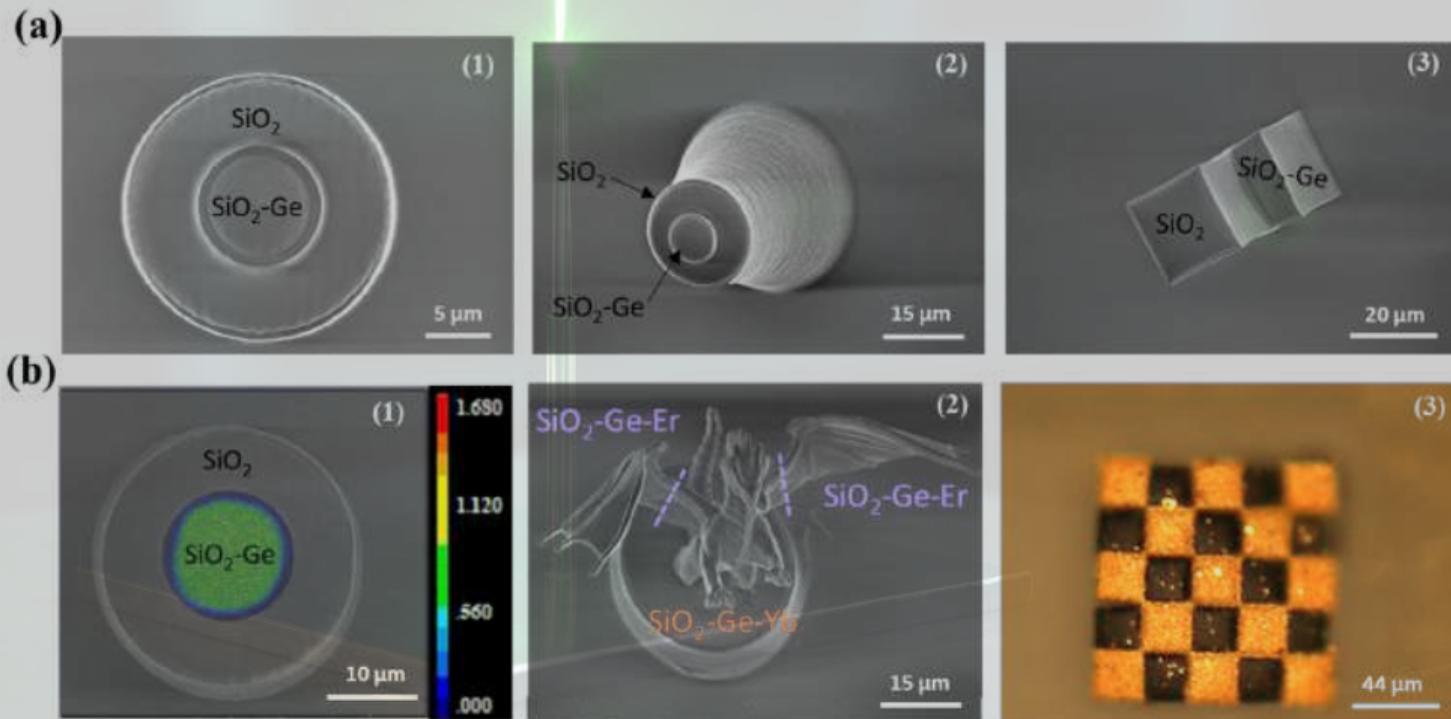
Méthodologie

Résines pour verre

Technologies employées

Réalisations avec les résines  
Solmer

Art et impression  
3D



Université  
de Lille

cnrs

PhLAM  
Physique des Lasers  
Matières et Milieux

# Plan

## Introduction et contexte

Qualités optiques requises concernant les matériaux pour l'optique  
Présentation des méthodes de synthèse additive de verre

## Polymérisation à 2 photons

Principes de l'impulsion lumineuse  
Caractéristiques des résines  
Technologies employées

## Résines hybrides pour la réalisation de verres de silice

Principes de la polymérisation  
Réalisation de verres de silice avec les résines Solmer

## Art et impression 3D

## Synthèse additive de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées  
Réalisation avec les résines Solmer

### Art et impression 3D



Université de Lille



# Art et Couleurs

Impression d'images



- 8500 dpi. Objectif 10×

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

## Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

## Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

## Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

## Art et impression 3D

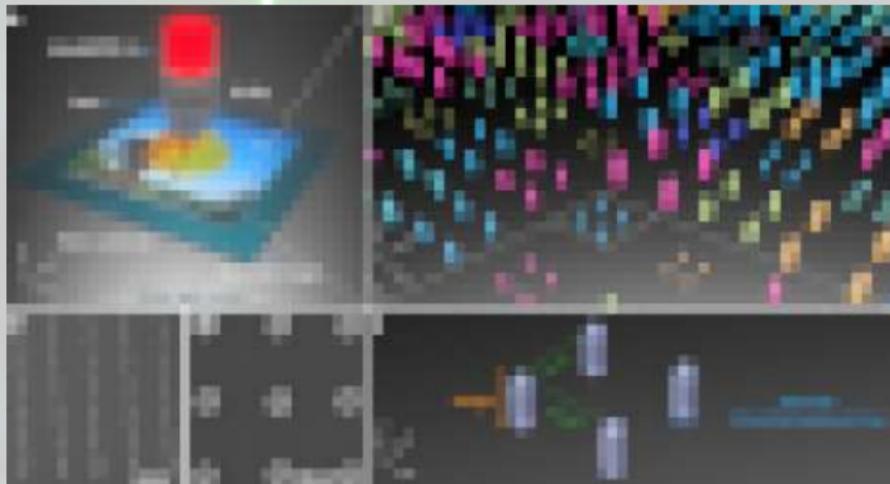


Université  
de Lille



# Art et Couleurs

## Principe



- Impression de nanocylindres

Tiré de [A. Wang, "Full Color and Grayscale Painting with 3D Printed Low-Index Nanopillars," Nano Letters 2021 21 4721]

Synthèse additive  
de verre

Y. Quiquempois

### Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

### Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

### Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

### Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Perspectives et Remerciements

- Inclure l'IA dans la réalisation de structures réalisées par synthèse additive (PhotonIA - PEPR Diadem)



<https://www.pepr-diadem.fr/le-pepr-diadem/>

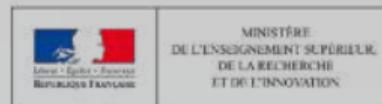
- Financeurs



3D Glassens  
« Micro - nanoscale  
3D printing of silica-  
based glasses for  
optical sensors



Add 4 Photonics Equipex+



## Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

## Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

## Résines pour verre

Technologies employées  
Réalizations avec les résines  
Solmer

## Art et impression 3D



Université  
de Lille



# Références

- [1] Hongwei Gao et al., Materials Today 69, p. 107 (2024)
- [2] Chenxing Xin et al., Materials & Design 227, 111736 (2023)
- [3] J. Carcreff et al., Crystals 11, 228 (2021)
- [4] P.Gołębiewski et al., Additive Manufacturing 79, 103899 (2024)
- [5] J. Zhang et al., International Journal of Bioprinting 6 (1), p. 12 (2020)
- [6] Y. Chu et al., Optics Letters 44 (21), p. 5358 (2019)
- [7] J. Wang et al., Ceramics International 49, 15689 (2023)
- [8] D. J. Lorang et al., Advance Materials 23 p. 5055 (2011)
- [9] S. K. Saha et al., Journal of Micro- and Nano-Manufacturing 5 031002 (2017)
- [10] E. Skliutas et al., Nanophotonics 10 (4) 1211 (2021)
- [11] A. Jaiswal et al., iScience 26, 106374 (2023)
- [12] S. Shukla et al., ACS Nano 5 (3) p. 1947 (2011)
- [13] V. Sedova et al., JM<sup>3</sup> 24 (2), 023001-1 (2025)
- [14] K. Bornillo, Progress in Additive manufacturing 10 :5977 (2025)

## Contexte

Qualités optiques  
Synthèse additive

## Polymérisation à 2 photons

Principe  
Résolution  
Méthodologie

## Résines pour verre

Technologies employées  
Réalisations avec les résines  
Solmer

## Art et impression 3D



Université  
de Lille

