

# Les journées LIBS 2009

18 & 19 mai 2009 - Université de Bordeaux

## **Les Plasmas "LIBS" : Mécanismes et Propriétés**

J. Hermann

Laboratoire LP3, CNRS - Université Aix-Marseille II





# Les Plasmas "LIBS" :

---

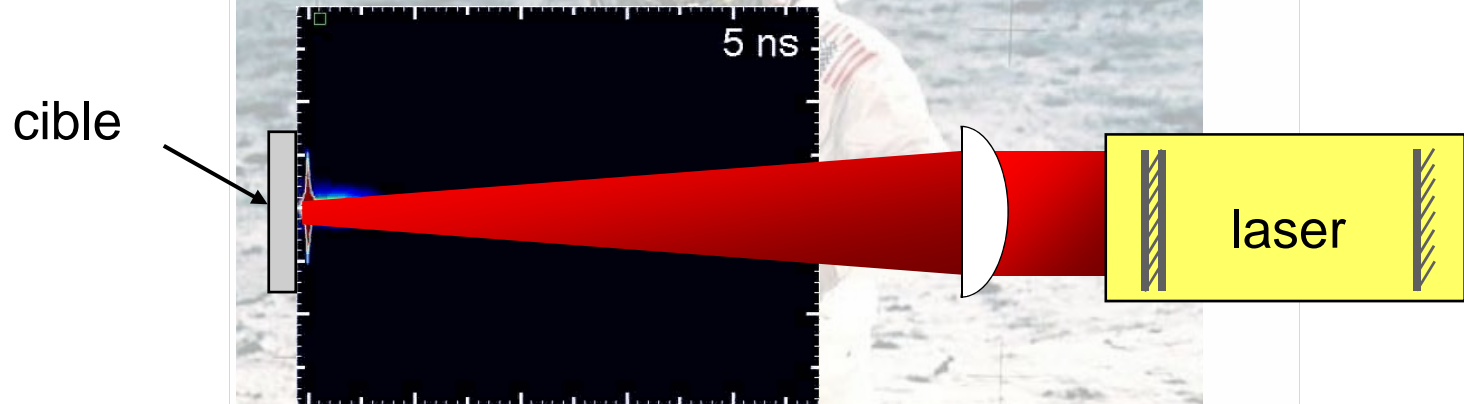
## Mécanismes et Propriétés

- Introduction
- Mécanismes d'ablation laser
- Propriétés du panache
- *"Quelques recettes LIBS"*
- Conclusion

# Introduction



## Les plasmas laser : depuis > 40 ans



- Traitement des matériaux, micro-usinage, nanostructuration, ...
- Dépôt de couches minces (PLD)
- Génération de rayonnement XUV, ...
- Analyse des matériaux (LIBS), ..

Progrès :

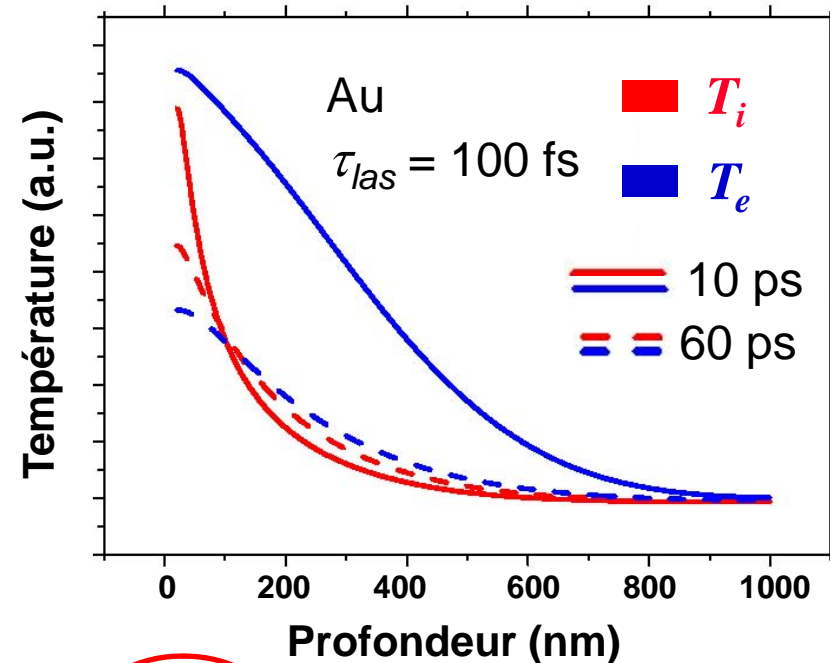
- techniques expérimentales
- modélisation

# Mécanismes d'ablation laser



exemple : ablation d'un métal par laser fs

- absorption des photons
- diffusion de chaleur
- couplage électron-réseau
- décomposition thermique ←  $10^3 \dots 10^4$  m
- décomposition mécanique



modèle 2T:

$$\rho C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) + Q_{abs}(z, t) - G(T_e - T_i)$$

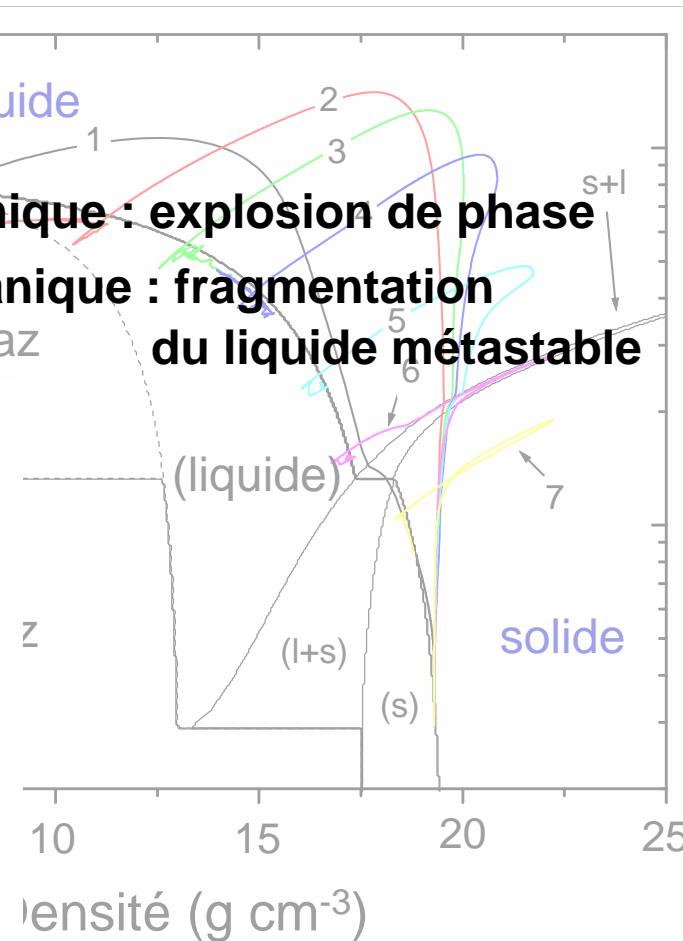
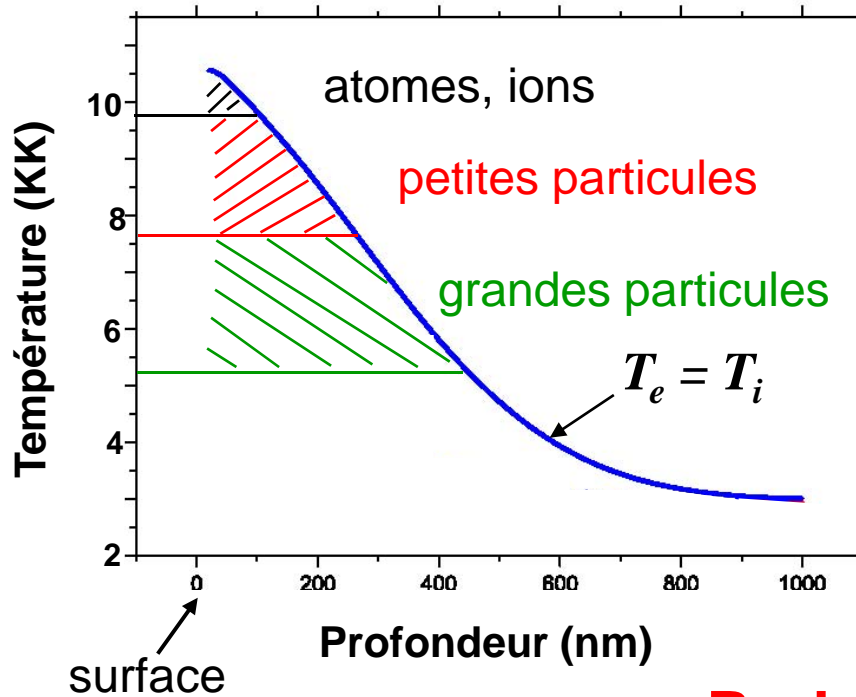
$$\rho C_p \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{th} \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + G(T_e - T_i)$$

Anisimov *et al.*, Sov. Phys. JETP (1974)

# modèle 2-T $\Rightarrow$ modèle Hydrodynamique



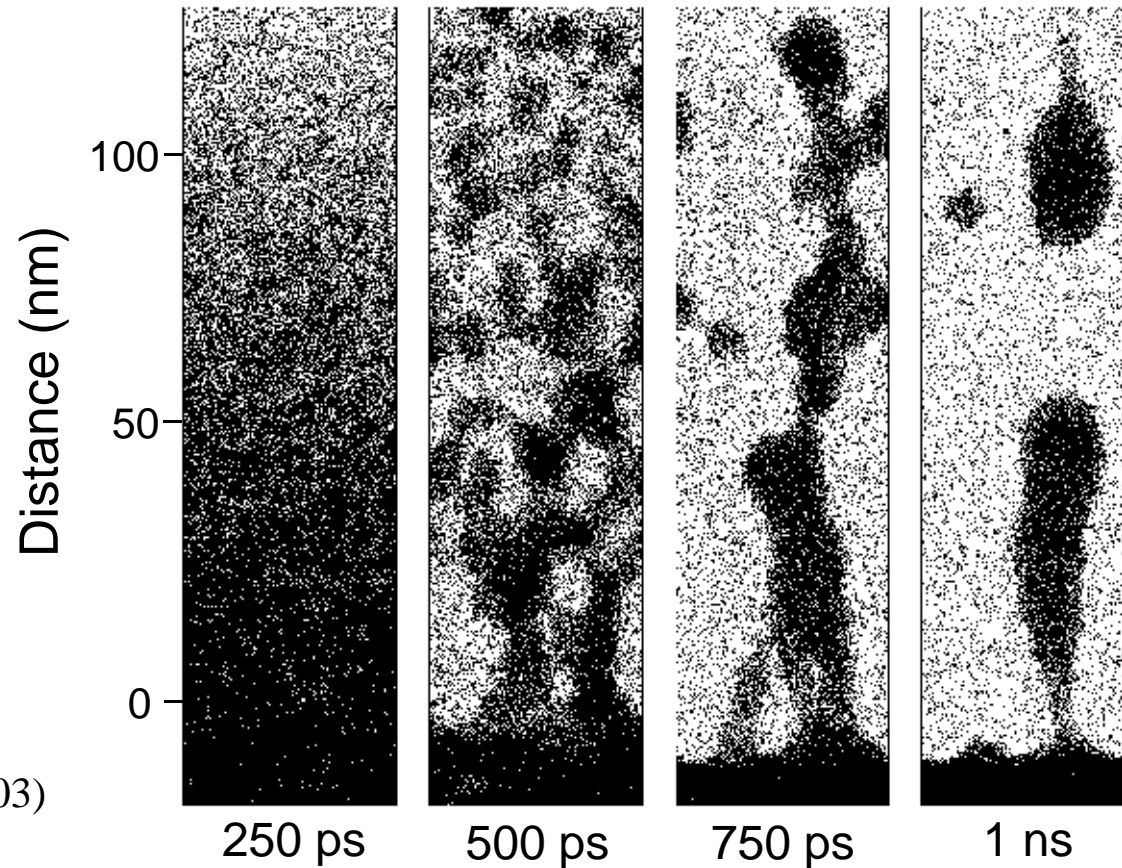
- atomisation directe
- décomposition thermique : explosion de phase
- décomposition mécanique : fragmentation du liquide métastable



Povarnitsyn *et al.*, Phys. Rev. B (2007)

**Problème : L'équation d'état**

# modèle 2T $\Rightarrow$ Dynamique moléculaire



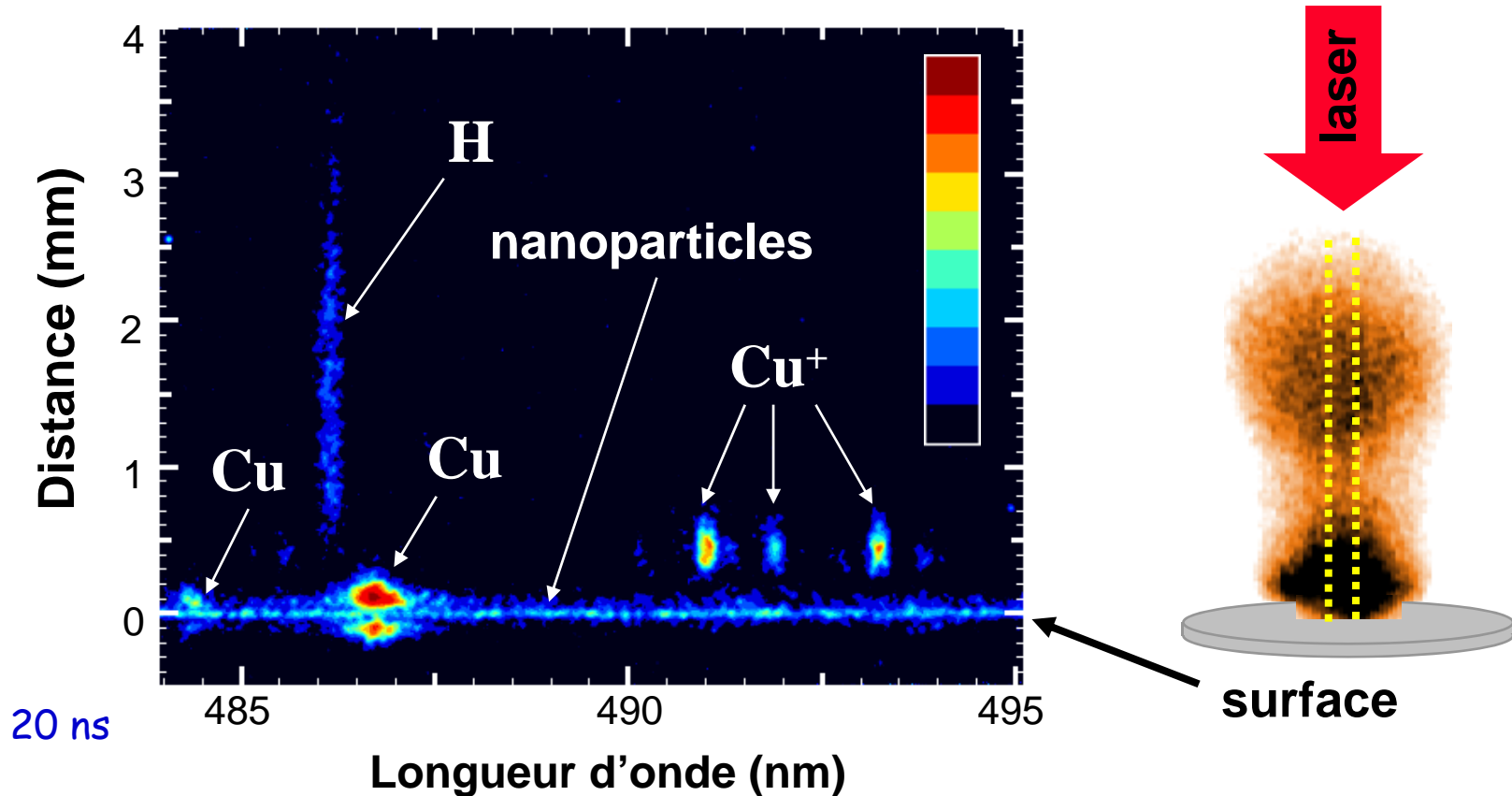
Zhigilei, Appl. Phys. A (2003)

**Problème : Potentiel d'interaction**

$\Rightarrow$  **Données expérimentales requises**

# Propriétés du panache

## Ablation sous vide



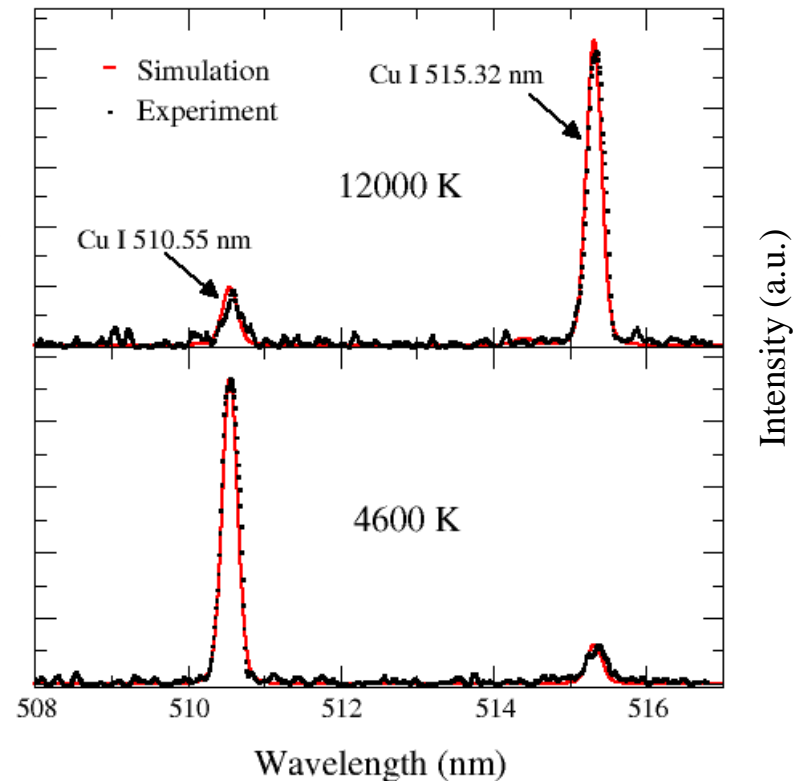
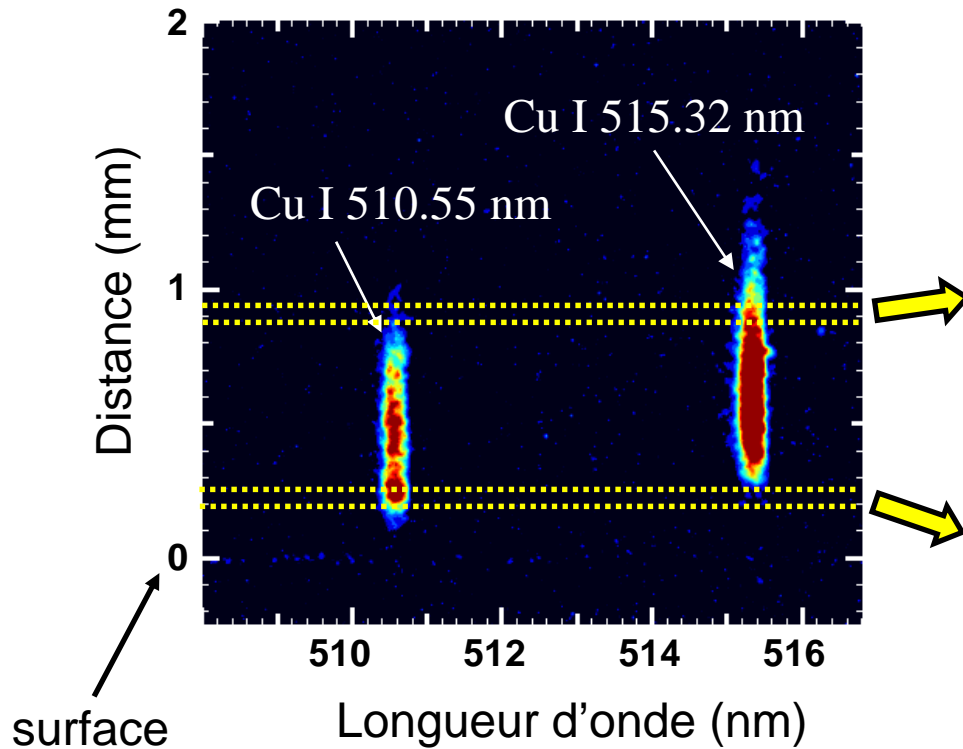
Imagerie spectrale

Noël *et al.* Appl. Surf. Sci. (2007)

# Température du plasma

## Ablation sous vide

laser



transition

$E_u$

Cu I 510.55 nm

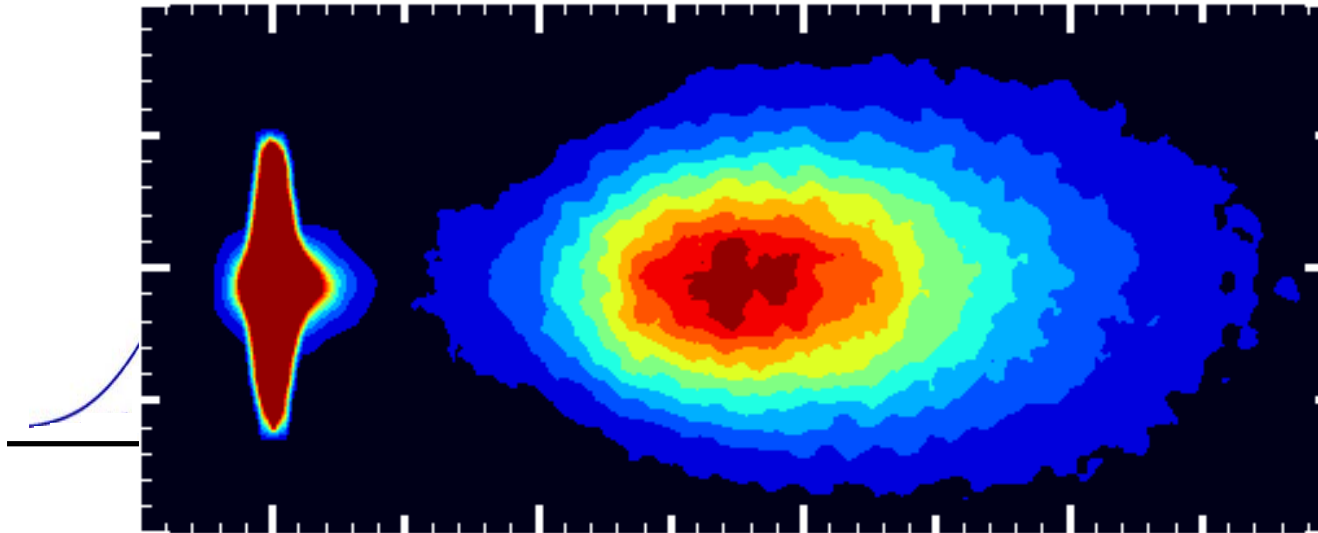
3.82 eV

Cu I 515.32 nm

6.18 eV

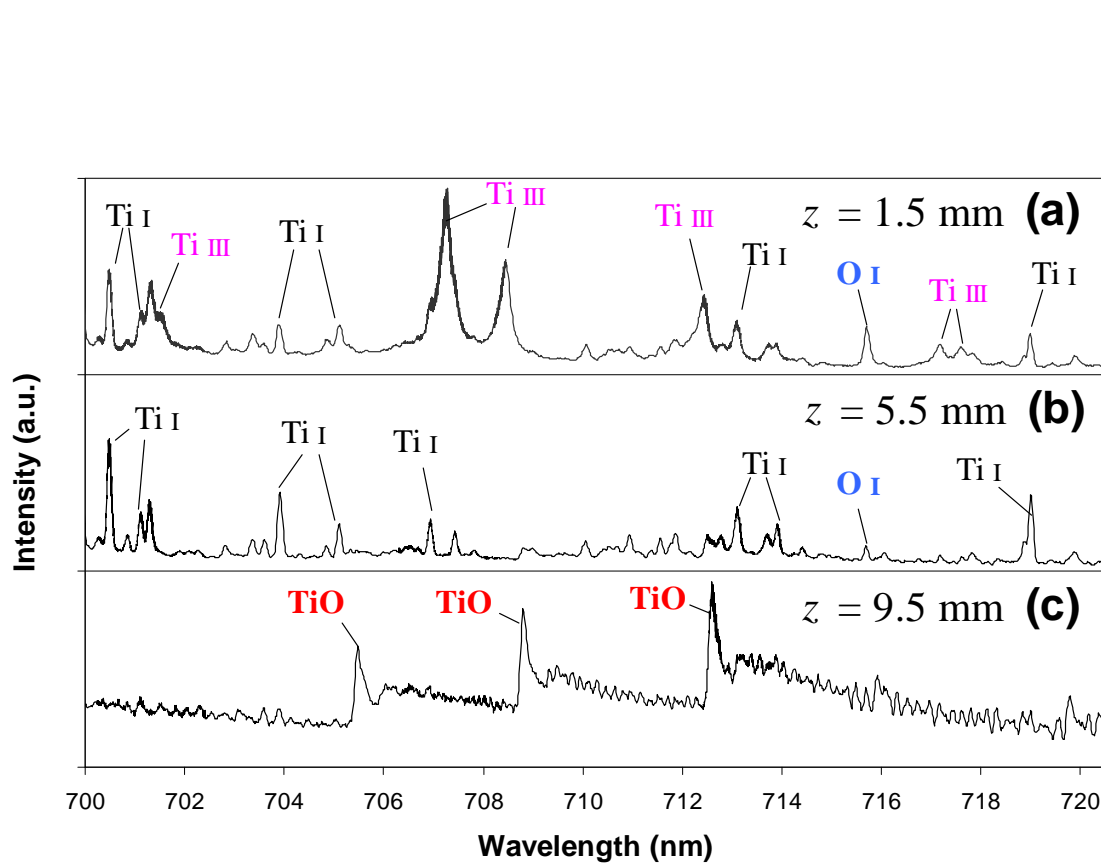


## Ablation sous vide

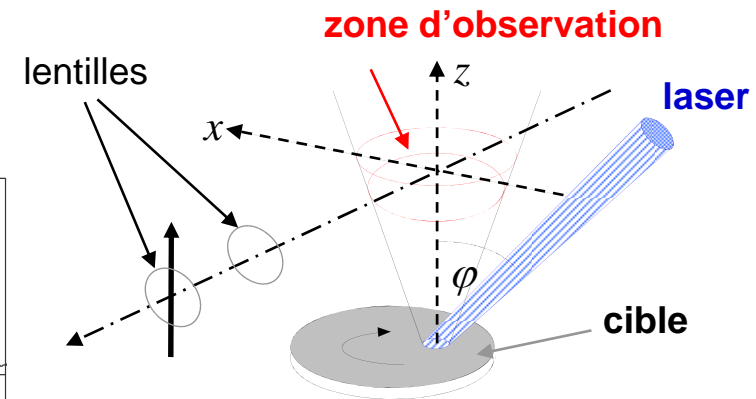




## Ablation sous atmosphère (à pression réduite)



Hermann & Dutouquet, J. Phys. D (1999)

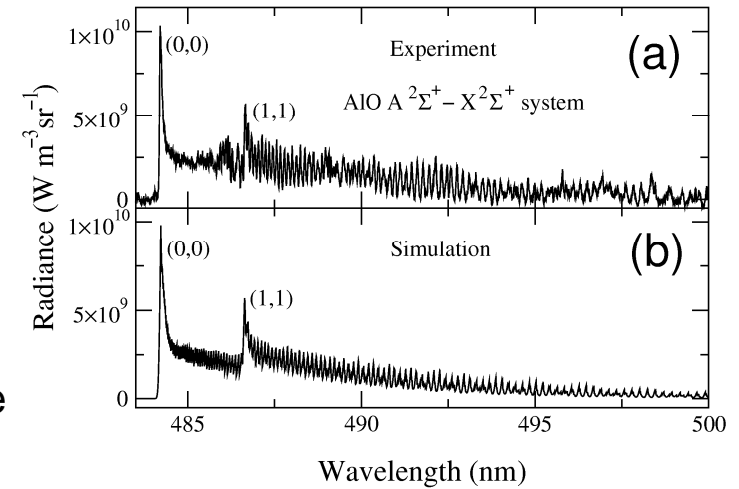
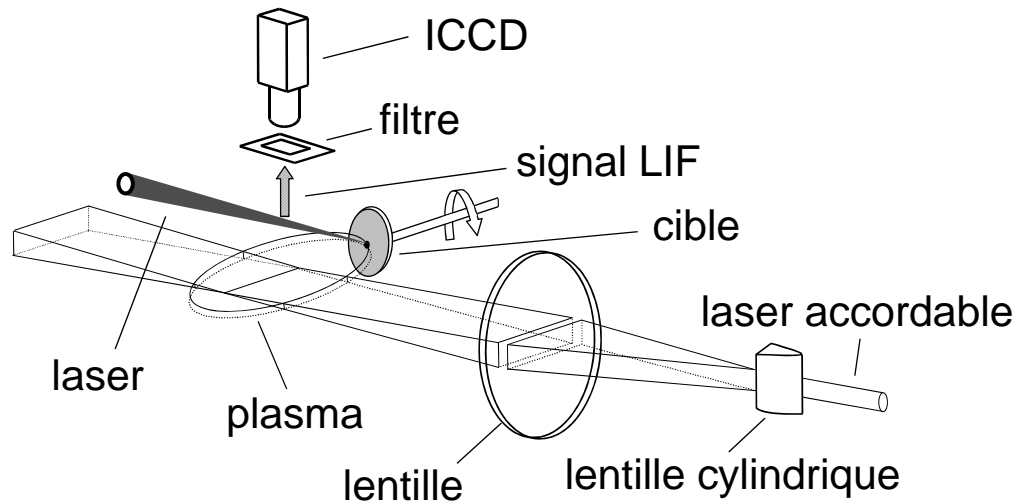


Ablation de titane  
sous oxygène à 70 Pa

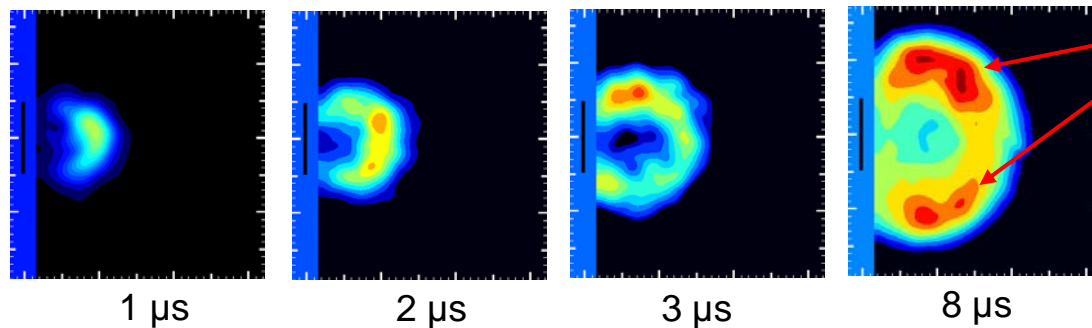
# Ablation sous atmosphère (à basse pression)



## Imagerie LIF



on sonde AIO (0,0) 484.23 nm



Vortex

Bulgakov & Bulgakova, J. Phys. D.(1998)

Ablation de aluminium sous oxygène à 13 Pa

Dutouquet & Hermann, J. Phys. D.(2001)

# Ablation sous air ambiant



- Expansion initial 1D = expansion adiabatique

⇒ Conversion  $E_{th} \rightarrow E_{kin}$

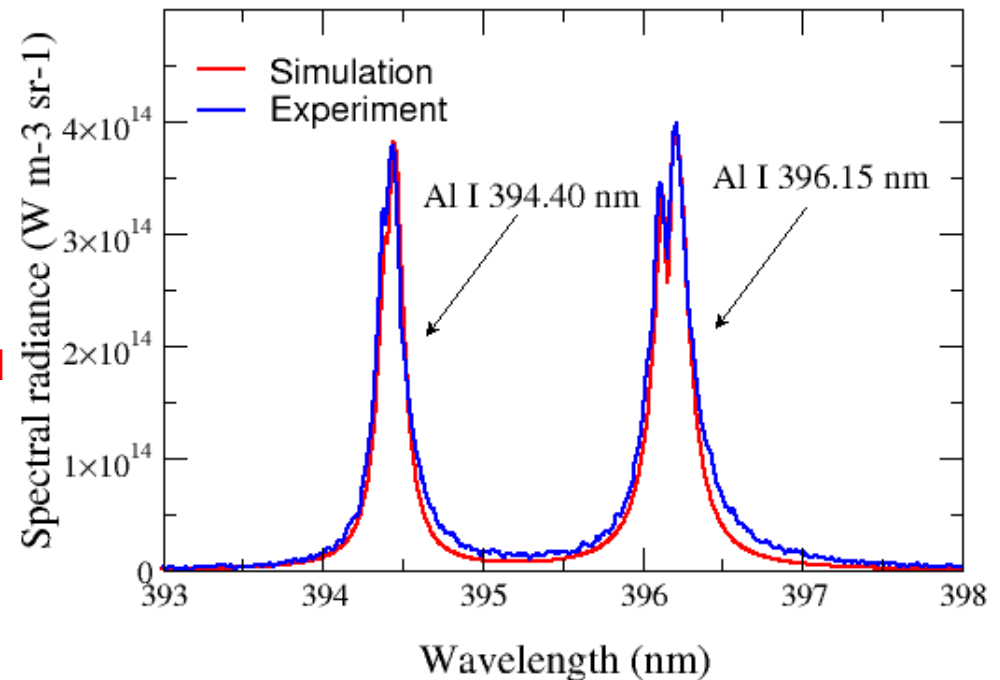
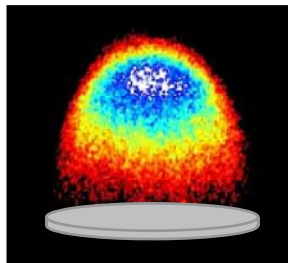
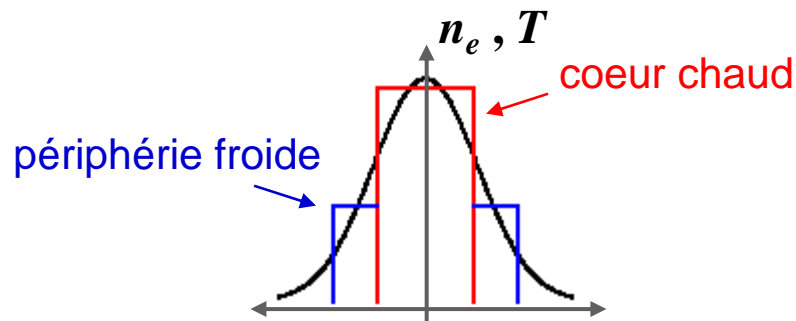
- Échange avec gaz

⇒ Onde de choc

⇒ Reconversion  $E_{kin} \rightarrow E_{th}$

⇒ Thermalisation

⇒ Interdiffusion panache/gaz

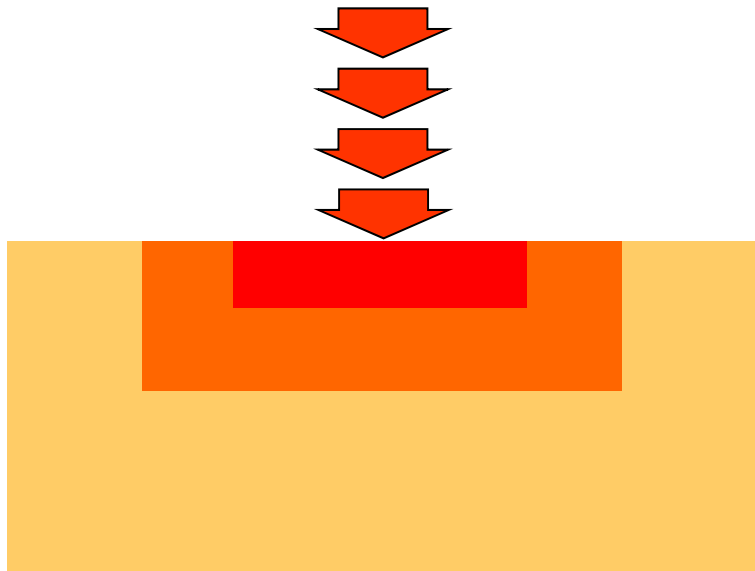


# "Quelques recettes LIBS"

## Quel laser faut-il ?

▶ **absorption :**  $\delta_{abs} = \alpha^{-1}$

▶ **heat diffusion :**  $\delta_{th} = 2\sqrt{\chi \tau_{las}}$ ,  $\chi = \frac{k_{th}}{\rho C_p}$

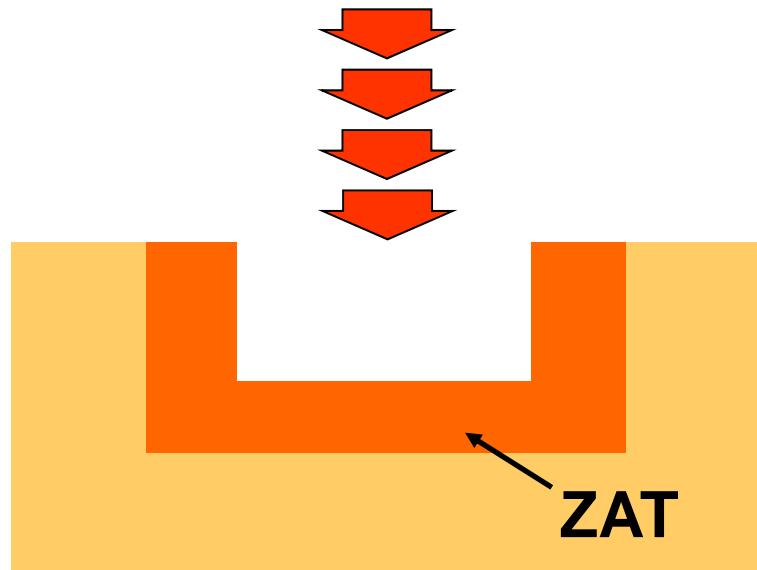


# "Quelques recettes LIBS"

## Quel laser faut-il ?

▶ **absorption :**  $\delta_{abs} = \alpha^{-1}$

▶ **heat diffusion :**  $\delta_{th} = 2\sqrt{\chi \tau_{las}}$ ,  $\chi = \frac{k_{th}}{\rho C_p}$



☞ choix longueur d'onde

☞ petit  $\tau_{las}$

⇒ **ZAT minimale**

☞ large  $I_{las}$

⇒ **absorption multiphotonique**

# Ablation est caractérisée par 3 seuils



$I_{vap}$  ablation

$I_{vap}^*$  claquage dans la vapeur

$I_{gaz}^*$  claquage dans le gaz

**Ablation :**

$$\delta_{abs} \ll \delta_{th} \Rightarrow I_{vap} = \frac{\Delta H}{1-R} \sqrt{\frac{\chi}{\tau_{las}}}$$

$$\delta_{abs} \gg \delta_{th} \Rightarrow I_{vap} = \frac{\Delta H}{\alpha(1-R)\tau_{las}}$$

**Claquage :**

avec préionisation

chauffage B.I.

$$\frac{e^2 E^2}{m} \frac{v_{eff}}{\omega^2 + v_{eff}^2} \geq \frac{43 \Phi_{ion}}{\tau_{las}} + \Phi_{ion} \frac{D}{\lambda^2} + \frac{2m}{M} \langle \varepsilon \rangle v_{eff} + \Phi_{ion} \gamma_{ci} v_{eff} + \Phi_{ion} h_a v_{eff}$$

ionisation

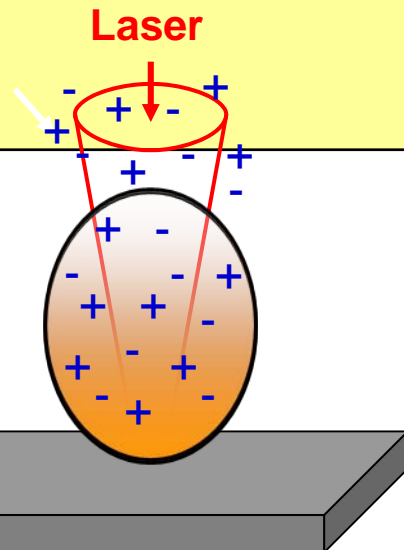
diffusion

coll. élast.

coll. inélast.

attachement

$$\Rightarrow I^* = C^{ste} \frac{\Delta_{ion}}{\lambda^2 M}$$



**Situation favorable :**  $I_{vap}, I_{vap}^* < I_{gaz}^*$

Exemple : ablation de métaux par Nd:YAG sous air

Matériaux organiques :  $I_{vap}^* \cong I_{gaz}^*$

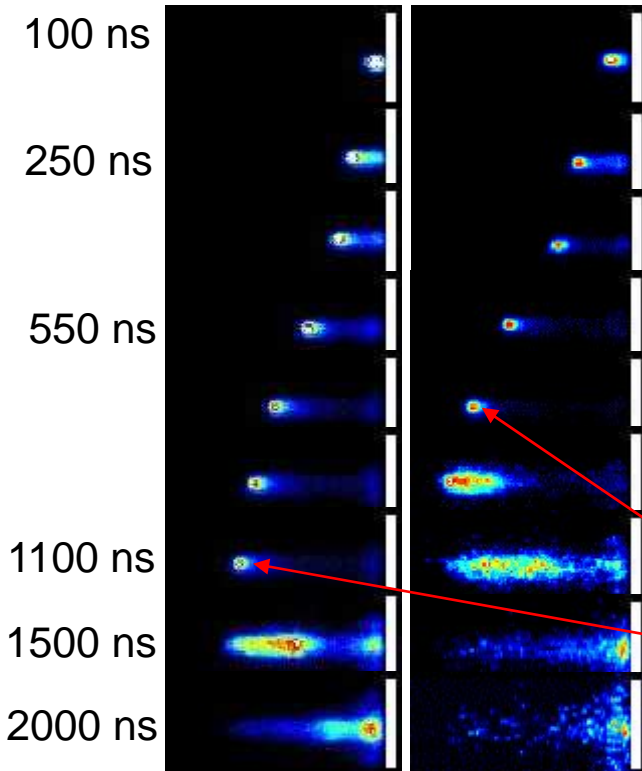
$\Rightarrow$  plasma se propage dans l'air

# Que peut arriver au pire ?



## ⇒ Onde d'absorption (LSAW)

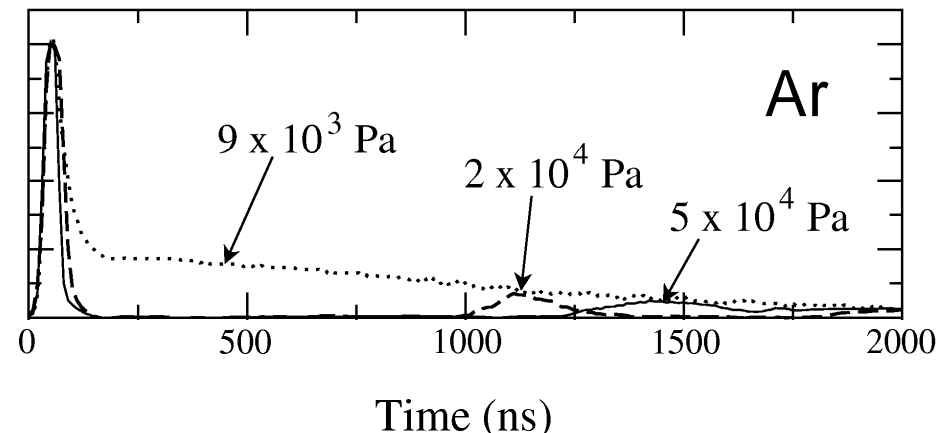
Ar  $1 \times 10^5$  Pa       $2 \times 10^4$  Pa



$$n_e = n_{crit} \Leftrightarrow \omega_p = \omega_{las} \qquad \omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m}}$$

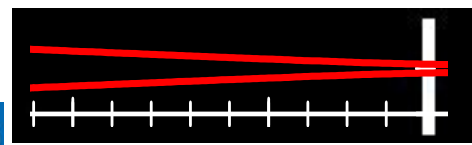
laser CO<sub>2</sub> (10.6 μm) :  $n_{crit} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

Transmitted power (a.u.)



$$5 \times 10^6 \text{ W cm}^{-2} = I_{gaz}^* = C^{ste} \frac{\Delta_{ion}}{\lambda^2 M}$$

⇒ Fort écrantage



# Et le laser "LIBS classique" ?



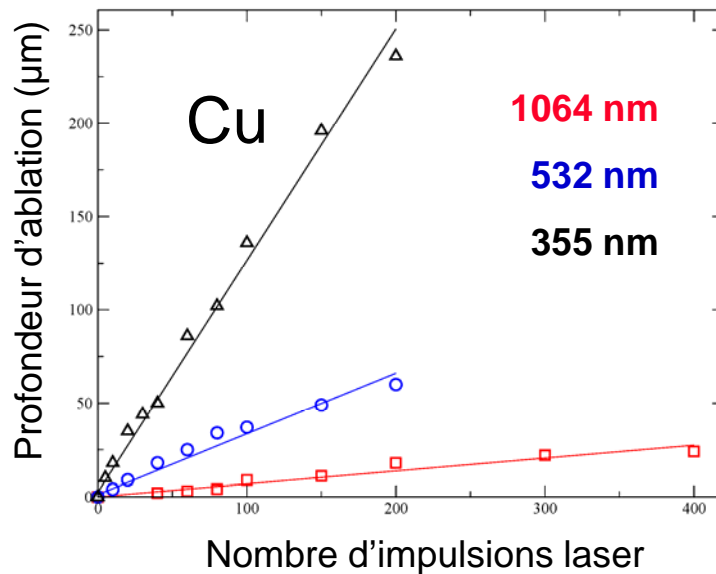
laser Nd:YAG (10.6  $\mu\text{m}$ ) :  $n_{crit} = 10^{21} \text{ cm}^{-3} \gg n_{Air}$

Laser CO<sub>2</sub> : observation d'une LSAW pour  $n_{gaz} \ll n_{crit}$

⇒ **compression du gaz par onde de choc (LSDW)**

⇒ **LSDW possible pour laser Nd:YAG, mais difficile à observer**

M. Baudalet, thèse de doctorat, Lyon (2008) ⇒ évidence par ombroscopie ultrarapide



**Profondeur d'ablation**  
⇒ **évidence de l'écrantage**

☞  $\lambda_{las}$  **courte favorable**

# Conclusion



## Ablation laser = processus complexe

- ⇒ Modélisation précise impossible
- ⇒ Conception de système LIBS : étude pour chaque application

## Compréhension et prédiction

- ⇒ par des notions/lois simples

$$\delta_{abs}, \delta_{th}, \omega_p, n_{crit}, I_{vap}, I_{vap}^*, I_{gaz}^*, = f(\tau_{las}, \lambda_{las})$$

## Choix de longueur d'onde

- ☞ **UV favorable** ⇒ meilleur couplage avec matériaux
  - ⇒ **stabilité, contribution de l'air**
  - ⇒ requise pour matériaux organiques (D. Borivent)

## Durée d'impulsion

- ⇒ résolution spatiale de l'analyse LIBS
- ⇒ température du plasma (L. Mercadier)
- ⇒ ionisation multiphotonique LIBS dans l'air (Dutouquet & Fréjafon)

- Double pulse** ⇒ améliorer LIBS (A. Semerok)



# Merci

ont contribué :

Céline Vivien, Christophe Dutouquet, Sébastien Bruneau, David Grojo, Tatiana Itina, Guillaume Clair, Sylvie Noël, Emanuel Axente, François Brygo, Laurent Mercadier, Emilien Mothe, Delphine Borivent

Livre Springer édité par Peter Schaaf :

Laser Processing of Materials:

Fundamentals, Applications, and Developments.

**Chapitre 4: Laser Plasma Interactions**

Apparition en automne 2009.