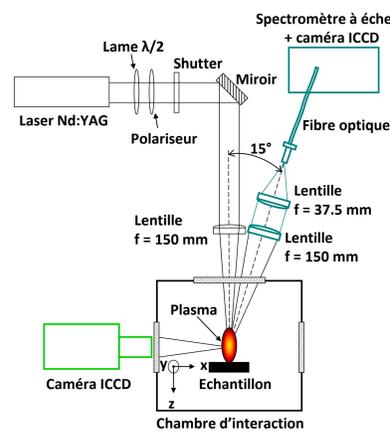


## Plasmas produits par ablation laser

### Résumé

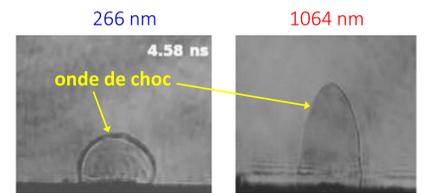
Les plasmas produits par ablation laser sont de petite taille, et caractérisés par une dynamique d'expansion rapide. Leurs propriétés dépendent de nombreux paramètres qui sont associées aux propriétés thermophysiques du matériau irradié, à son environnement ainsi qu'aux conditions d'irradiation laser. Le rayonnement intense des impulsions laser de courte durée génère des conditions extrêmes dans le volume du dépôt d'énergie, ce qui provoque la propagation d'ondes de choc et une vaporisation de la matière hors équilibre. Pour des impulsions laser d'une durée de l'ordre de la nanoseconde, le faisceau laser interagit avec la vapeur en expansion, créant ainsi un plasma fortement ionisé. En raison de la complexité des processus mis en jeu, les prédictions des propriétés du plasma et de leur évolution spatio-temporelle par la modélisation ne sont pas possibles à ce jour. Le diagnostic des plasmas d'ablation laser est alors indispensable pour améliorer la connaissance des mécanismes mis en jeu. Une vue d'ensemble des techniques couramment utilisées est proposée sur cette affiche.

### Dispositif expérimental



### Ombroscopie ultra-rapide

- Laser d'ablation : Nd:YAG 5 ns, 3 mJ
- Laser sonde : Ti:Saphire 100 fs, 10 μJ, 400 nm

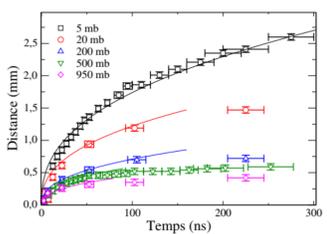
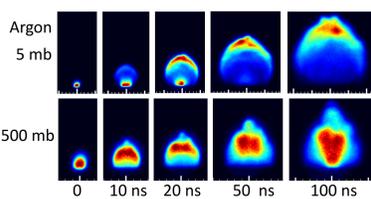


Boueri et al., Appl. Surf. Sci. 2009  
Nylon 6,6  
40 Jcm<sup>-2</sup>  
air

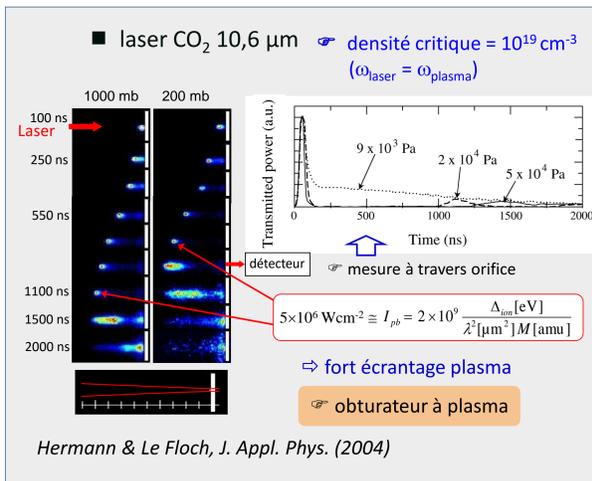
- laser infrarouge
- ⇒ absorption par bremsstrahlung inverse
  - ⇒ dépôt d'énergie dans le front du choc
  - ⇒ propagation préférentielle le long l'axe laser
  - ⇒ effet d'écrantage

### Imagerie rapide

- laser Nd:YAG 5 ns, 266 nm



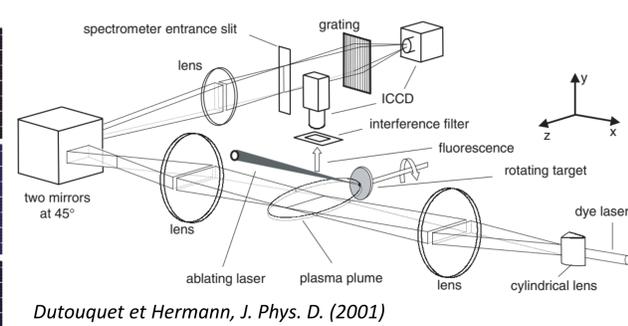
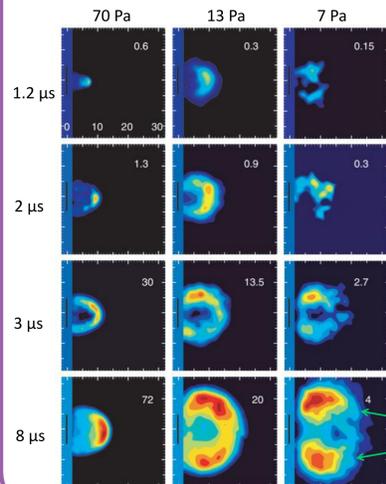
modèle Sedov-Taylor ⇒ propagation l'onde de choc  $Z = \gamma \left( \frac{E_0}{\rho_0} \right)^{1/2} t^{2/5}$



Hermann & Le Floch, J. Appl. Phys. (2004)

### Fluorescence induite par laser

ablation de l'aluminium sous O<sub>2</sub> à basse pression, FIL de AlO B<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup> - X<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup>



Dutoquet et Hermann, J. Phys. D. (2001)

- ⇒ formation d'AlO dans le volume d'interdiffusion vapeur-gaz
- ⇒ vortex

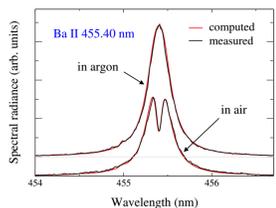
Bulgakov & Bulgakova, J. Phys. D. (1998)

### Spectroscopie d'émission couplée à la modélisation

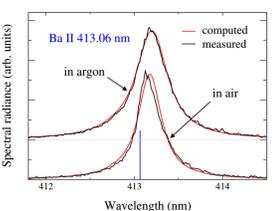
plasmas d'ablation laser

- ⇒ densité élevée
- ⇒ équilibre thermodynamique local
- ⇒ autoabsorption significative

- raie de résonance



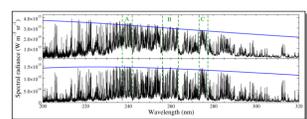
- raie à fort déplacement Stark



chimie à l'équilibre

$$\text{Guldberg-Waage: } \frac{n_A n_B}{n_{AB}} = \frac{(2\pi\mu kT)^{3/2}}{h^3} \frac{Q_A Q_B}{Q_{AB}} e^{-D_0/kT}$$

$$\text{plasma uniforme: } B_\lambda = U_\lambda (1 - e^{-\alpha L})$$



forte autoabsorption  
⇒  $B_\lambda = U_\lambda$

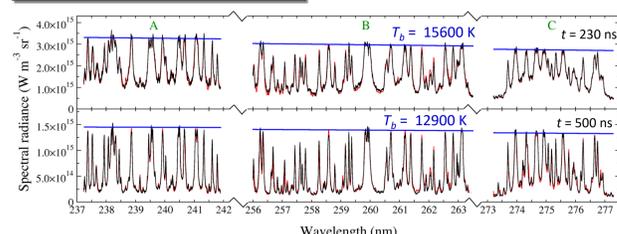
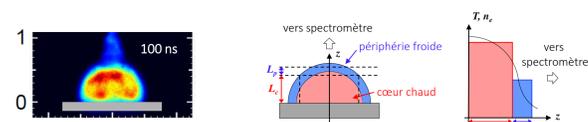
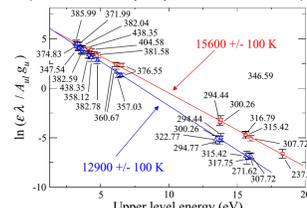


diagramme Saha-Boltzmann ⇒ mesure de T (avec raies optiquement minces)



Solution analytique de l'équation de transfert de rayonnement :

$$\text{luminance spectrale } B = U_C (1 - e^{-\alpha_C L_C}) e^{-\alpha_P L_P} + U_P (1 - e^{-\alpha_P L_P})$$

$$\text{coefficient d'absorption: } \alpha(\lambda, T) = \pi r_0 \lambda^2 f_{lu} n_l P(\lambda_0, \lambda) (1 - e^{-hc/\lambda kT})$$

sous air ⇒ creux d'absorption ⇒ plasma non-uniforme

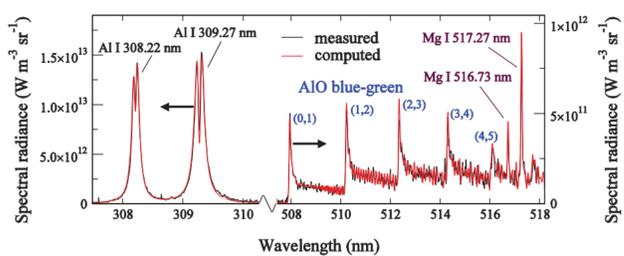
sous argon ⇒ creux d'absorption absent ⇒ plasma uniforme

sous air ⇒ raie asymétrique ⇒ plasma non-uniforme

sous argon ⇒ raie symétrique ⇒ plasma uniforme

ablation laser d'aluminium sous air

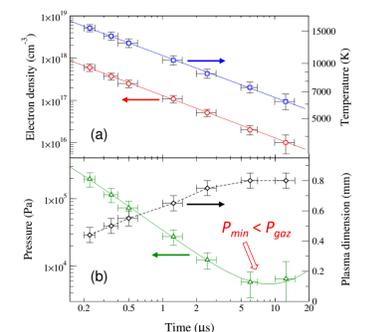
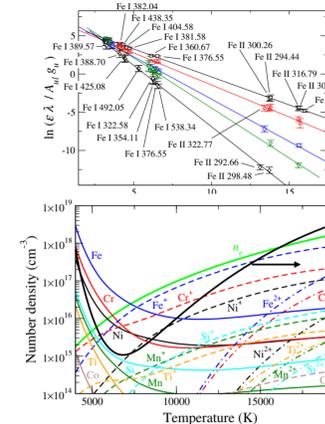
- cœur chaud ⇒ émission atomique
- bords froids ⇒ émission moléculaire et absorption des raies atomiques



### Evaluation de la pression

⇒ mesures précises de T et n<sub>e</sub>

$$\text{calcul ETL } P = \left( n_e + \sum_{z=0}^{z_{\max}} n_A^z \right) kT - \Delta P$$



### Conclusions

- Plasmas d'ablation laser atmosphériques ⇒ état proche d'ETL
- Spectroscopie d'émission couplée à la modélisation ⇒ moyen efficace de diagnostic
- A pression réduite ⇒ durée de vie réduite ⇒ mesures FIL
- Défis ⇒ chimie des plasmas (matériaux organiques)
- ⇒ diagnostic des plasmas induits par impulsions laser ultrabrèves (durée de vie réduite, état fortement hors équilibre)

- Y. B. Zel'dovich and Y. P. Raizer, Physics of Shock Waves and High Temperature Phenomena (Academic, New York, 1966)
- Sedov, Similarity and Dimensional Methods in Mechanics (Academic, London, 1959)
- Taleb et al., Anal. Chim. Acta. 1185, 339070 (2021)
- I. N. Mihailescu and J. Hermann, in Laser Processing of Materials, edited by P. Schaff (Springer, Berlin, 2010), pp. 49-88
- Taleb et al., Spectrochim. Acta Part B 178, 106144 1-13 (2021)
- Touchet et al., Spectrochim. Acta Part B 168, 105868 1-7 (2020)
- Chen et al., Spectrochim. Acta Part B 150, 77-85 (2018)
- De Giacomo et Hermann, J. Phys. D: Appl. Phys. 50, 183002 1-17 (2017)
- Hermann et al., Phys. Rev. E 96, 053210 1-6 (2017)
- Burger et Hermann, Spectrochim. Acta Part B 122, 118-126 (2016)
- Hermann et al., Phys. Rev. E 92, 053103 1-15 (2015)