



**HAL**  
open science

## Spectroscopie de diffusion dans les plasmas thermiques

Stéphane Pellerin, Jörg Hermann, Sylvain Iséni, Sedina Tsikata

► **To cite this version:**

Stéphane Pellerin, Jörg Hermann, Sylvain Iséni, Sedina Tsikata. Spectroscopie de diffusion dans les plasmas thermiques. Journées 2021 Groupement de Recherche (GdR) étude des milieux ionisés Plasmas froids créés par décharge et laser (EMILI), Oct 2021, Palaiseau, France. hal-03445193

**HAL Id: hal-03445193**

**<https://hal.science/hal-03445193>**

Submitted on 23 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Spectroscopie de diffusion dans les plasmas thermiques

### Objectifs

Diagnostics résolus spatialement et temporellement de plasmas thermiques

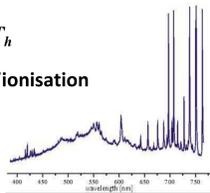
- Paramètres plasma :  $N_e$ ,  $T_e$ ,  $T_h$
- Composition du plasma (Analyse quantitative)

Plasma Thermique → Equilibre des températures ⇒  $T_e \approx T_h$

Hauts densité électronique, pression, température et degré d'ionisation

#### Spectre

- rayonnement continu intense
- lignes sensiblement élargies en raison de l'élargissement Stark
- contribution importante de l'élargissement Doppler

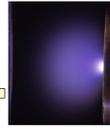


#### Exemples

Plasma d'arc à pression atmosphérique – plasma stationnaire



Plasma induit par laser (PIL) – plasma transitoire



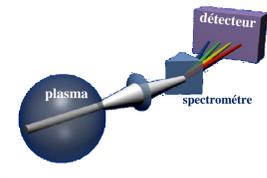
### Méthode idéale

- Résolution temporelle adéquate, à une échelle de temps caractéristique de l'évolution du plasma
- Résolu spatialement → crucial dans le cas de plasmas non homogènes
- Non intrusive → pas de perturbation de l'état du plasma
- Sans hypothèse sur l'état d'équilibre du plasma

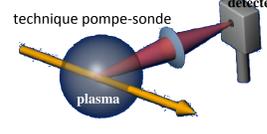
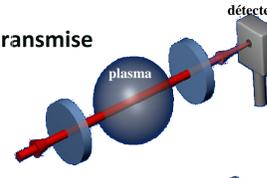
**Il n'existe pas de méthode qui réponde à toutes ces exigences**

### Diagnostics des plasmas: limites

- **Spectroscopie optique d'émission**  
seule l'intensité spatialement intégrée le long de la ligne de visée peut être mesurée directement
  - Réabsorption possible
  - Seules les particules excitées peuvent être sondées
  - Hypothèses requises sur l'état d'équilibre du plasma
  - Transformation d'Abel pour avoir les valeurs locales
- **Méthodes (active) basées sur l'analyse de la lumière transmise**  
Spectroscopie d'absorption laser  
Absorption saturée  
Spectroscopie à cavité optique (CRDS)  
Spectroscopie de polarisation
- **Méthodes locales basées sur les lasers**
  - Fluorescence induite par laser (LIF, TALIF)
    - Limitée par les décroissances non-radiatives
    - Masquée dans le rayonnement du plasma élevé
    - Peut être intrusive
  - Spectroscopie non linéaire → Mélange 4 ondes
    - Coherent anti-Stokes Raman Scattering (CARS)
    - PC-Degenerate Four Waves Mixing (PC-FWM)



Méthode non-locale



$$\omega_4 + \omega_3 = \omega_1 + \omega_2$$

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3 + \vec{k}_4$$

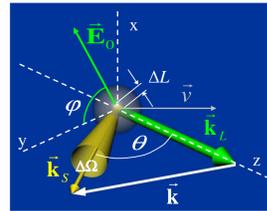
$\epsilon_z = \epsilon_{\lambda_{raie}} + \epsilon_{\lambda_{fond}}$   
 $I_\lambda(x) = \int \epsilon_\lambda(x, y) dx$   
 $\epsilon_\lambda(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{dI_\lambda}{dy} dy$

- Hypothèse de symétrie cylindrique du plasma
- Nécessite un grand nombre de données → stabilité du plasma
- Forte influence des calculs numériques → rayon R, dérivée...
- Extraction du fond continu du profil de la raie

**Méthodes non-locales**  
**Peu applicables à haute densité électronique, moyenne et haute P**  
**Peu aisées à mettre en oeuvre**

A. Mendys, et al. Spectrochim. Acta B 96, 61–68, (2014)

### Diffusion laser



$$\Delta P_S = P_L \Delta L \Delta \Omega N \frac{d\sigma}{d\Omega} S(\mathbf{k}, \Delta\omega) \Delta\omega_S$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{3}{8\pi} \sigma (1 - \sin^2 \theta \cos^2 \phi)$$

Fonction de Densité Spectrale

$$\vec{k} = \vec{k}_s - \vec{k}_i = \frac{4\pi}{\lambda_L} \sin(\theta/2) \text{ Vecteur de diffusion}$$

Mouvement des centres de diffusion

$$\Delta\omega = \omega_s - \omega_i = (\vec{k}_s - \vec{k}_i) \cdot \vec{v} = \vec{k} \cdot \vec{v}$$

Diffusion non cohérente sur un ensemble

$$S_k(\Delta\omega) d\omega_s = F_k(v_k) dv_k = k^{-3} F_k(\Delta\omega/k) d\omega_s$$

fonction de densité spectrale reproduisant la distribution des centres de diffusion en mouvement

- Diffusion élastique
- Diffusion Rayleigh
  - Diffusion Thomson
- Diffusion inélastique
- Diffusion Raman

Diffusions Rayleigh, Thomson et Raman → informations sur la densité des électrons et des particules lourdes et sur leurs températures → DIAGNOSTIC PLASMA

Diffusion Thomson dans différents types de plasmas

Sources plasma	$N_e$ [m <sup>-3</sup> ]	$T_e$ [K]	$\alpha$
Tokamak	$10^{20}$	$10^7$	0.006
Glow discharge	$10^{18}$	$10^4$	0.02
Arc dans Ar à Patm	$10^{23}$	$10^4$	3.0
Plasma Induit par Laser	$10^{25}$	$10^3$	6.0

Aux longueurs d'onde optiques et pour des plasmas thermiques  $\alpha \ll 1$

### Diffusions Thomson incohérente et cohérente

$$\alpha \equiv \frac{1}{k\lambda_D} \approx \frac{1}{4\pi \sin(\theta/2) \lambda_D} \quad \lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 k_B T_e}{e^2 N_e} \right)^{1/2} \quad \tilde{\omega}_{pl} = \sqrt{e^2 n_e / (\epsilon_0 m_e)}$$

$\alpha \ll 1 \rightarrow$  Diffusion non-collective

$\alpha \gg 1 \rightarrow$  Diffusion collective / cohérente

Contrib. Electronique → information sur  $n_e$  et  $T_e$   
 Contrib. Ionique → information sur  $T_e/T_i$   
 Interprétation simple, aucune hypothèse sur l'ETL

Le fit de la  $I^0$  de distribution spectrale  $S(\mathbf{k}, \omega)$  donne à la fois  $n_e$  et  $T_e$

$T_e = 20\,000\text{ K}$ ,  $T_e/T_i = 1$ ,  $n_e = 1.0 \times 10^{23}\text{ m}^{-3}$ ,  $T_e/T_i = 1$

$T_e = 20\,000\text{ K}$ ,  $n_e = 1.0 \times 10^{23}\text{ m}^{-3}$

$\lambda_L = 532\text{ nm}$ ,  $\phi = \theta = \pi/2$ ,  $Z = 1$

### Plasma d'ablation

Faisceau d'ablation:  $30\text{ J/cm}^2 - 6.70 \times 10^9\text{ W/cm}^2$   
 Faisceau sonde:  $100\text{ J/cm}^2 - 16.6 \times 10^9\text{ W/cm}^2$   
 Résolution spatiale:  $200\text{mm (radial)} \times 30\text{mm (axial)}$   
 iCCD gate:  $8\text{ ns} - 2000\text{ impulsions laser}$

Diffusion Raman peut être utilisée pour diagnostiquer les populations relatives de niveaux excités dans un plasma partiellement ionisé

Raman, Mg I  $3s3p\ 2P^{\circ}_{0,1,2}$

Raman, Al I  $3s^23p\ 2P^{\circ}_{1/2,3/2}$

Raman,  $N_2/O_2$

Caract. électronique

electron density ( $10^{23}\text{ m}^{-3}$ )

electron temperature (1000 K)

Ref: A. Deberny et al., Raman satellites in optical scattering from a laser-ablated Mg plume, Physical Review A 78 (2008) 055404

B. Pokrzywka et al., Spectrochim. Acta B (2012) 74–75, 24

### Diffusion Thomson: Chauffage du plasma

Diffusion Thomson – caract. électronique

DT – Caract. Ionique + Diffusion Rayleigh + Lumière parasite

Plasma d'arc, Ar à  $P=10^5\text{ Pa}$ ,  $I=200\text{A}$

$N_e = 1.1 \times 10^{23}\text{ m}^{-3}$   
 $T_e = 21000\text{ K}$

$N_e$  et  $T_e$  en fonction de l'énergie laser

$N_e = 1.45(3) \times 10^{23}\text{ m}^{-3}$   
 $T_e(\text{LTE}) = 14000\text{ K}$

$T_e$  est supérieure à  $T_{e,\text{LTE}}$  obtenu à partir de  $N_e$  de quelques milliers de kelvins, ??? ce qui contredit le modèle plasma LTE ???

Effet du chauffage électronique par l'impulsion laser → évolution temporelle des spectres TS au cours de l'impulsion laser, par balayage de la porte de la iCCD et déclenchement retardé par rapport au pulse laser.

Énergie laser sondée: 150 mJ (rouge), 50 mJ (vert), 20 mJ (jaune)

Le chauffage des électrons est une fonction fortement non linéaire de la puissance laser  
 [A.B. Murphy, PRL 89, 025002 (2002); Phys Rev E 69, 016408 (2004)]  
 → l'extrapolation linéaire à énergie nulle est invalide!  
 → Détermination de la valeur de  $T_e$  par interpolation au début de l'impulsion

### Diffusion Thomson: Détermination de $T_i$

K. Dzierzega et al. Appl. Phys. Lett. 102, 134108 (2013)

Intensity (arb. units) vs wavelength (nm)

Te:Ti = 1-3-5

● Ionic feature of TS spectrum contains information about  $T_e/T_i$ , which is a direct measure of plasma departure from LTE

● The measurements need relatively high spectral resolution, better than  $0.1\text{ cm}^{-1}$ . Pulsed ns laser with narrow linewidth and spectrometer of spectral resolution higher than 100 000 are indispensable

Traitement des données

- Détermination de  $T_e$  et  $N_e$  à partir de la caractéristique électronique
- Déconvolution du pic central par la fonction d'appareil
- Ajustement de la caractéristique ionique des spectres TS et Rayleigh avec  $T_i$  comme paramètre

Helium Laser pompe:  $1\text{ kJ/cm}^2$   
 Laser sonde:  $9.5\text{ J/cm}^2$

ei. density ( $10^{23}\text{ m}^{-3}$ ) vs  $\Delta t$  - time delay (ns)

temperature (10000 K) vs  $\Delta t$  - time delay (ns)

Les résultats ne reposent pas sur des hypothèses sur l'état d'équilibre du plasma!

### Diffusion Rayleigh dans les PIL

$I_{\text{scat}} = I_{\text{las}} L n \frac{d\sigma}{d\Omega} \Delta\Omega$

Position de l'onde de choc

Limites du plasma

L'analyse des ondes de choc peut être effectuée en enregistrant de telles images pour différents temps de retard entre les impulsions laser

Argon Laser pompe:  $2\text{ kJ/cm}^2$   
 impulsion 6ns

shock front position

Fireball boundary

Sedov-Taylor formula

model of de Izarra & et al

best formula

shock front velocity

- ☺ Obtention de nombreuses informations, notamment sur les plasmas transitoires.
- ☺ Méthodes locales, avec une importante haute résolution spatiale.
- ☺ Mesure simultanée des paramètres du plasma.
- ☺ Mesures directes des paramètres du plasma, sans hypothèse sur l'équilibre thermodynamique.
- ☺ Informations simples sur les paramètres plasma les plus importants, généralement sans étalonnage, y compris certains difficiles à obtenir par d'autres méthodes.
- ☹ Possible élévation de la température électronique dans les mesures par DT (chauffage)
- ☹ Nécessité de phénomènes reproductibles
- ☹ Pas toujours simple à implanter.