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-03445193v1

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.

Copyright

cnrs GDR Groupement de recherche
EMILI Étude des milieux ionisés
Plasmas froids créés par décharge et laser

Diagnostics des Plasmas

Journées 2021
25-28 octobre 2021, Palaiseau

Spectroscopie de diffusion dans les plasmas thermiques

Objectifs

Diagnostics résolus spatialement et temporellement de plasmas thermiques

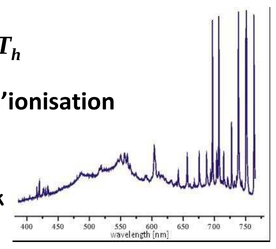
- Paramètres plasma : N_e, T_e, T_h
- Composition du plasma (Analyse quantitative)

Plasma Thermique → Equilibre des température $\Rightarrow T_e \approx T_h$

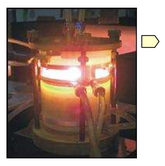
⇩

Hautes densité électronique, pression, temperature et degré d'ionisation

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

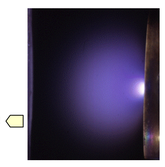


Exemples



Plasma d'arc à pression atmosphérique – plasma stationnaire

Plasma induit par laser (PIL) – plasma transitoire

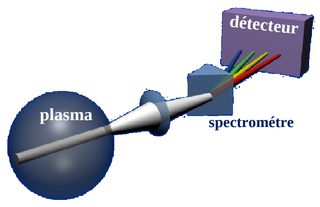


Méthode idéale

- 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

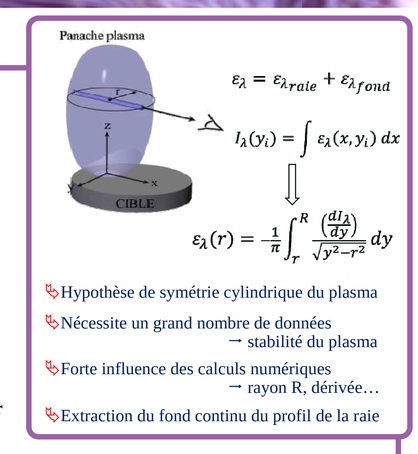
Il n'existe pas de méthode qui réponde à toutes ces exigences

Diagnostics des plasmas: limites

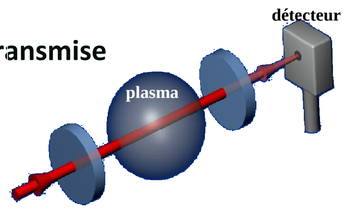


Spectroscopie optique d'émission
seule l'intensité spatialement intégrée le long de la ligne de visée peut être mesurée directement
- Réabsorption possible
- Seules les particules excitées peuvent être sondées
- Hypothèses requises sur l'état d'équilibre du plasma
- Transformation d'Abel pour avoir les valeurs locales

Méthode non-locale

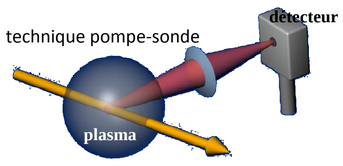


Méthodes (active) basées sur l'analyse de la lumière transmise
Spectroscopie d'absorption laser
Absorption saturée
Spectroscopie à cavité optique (CRDS)
Spectroscopie de polarisation



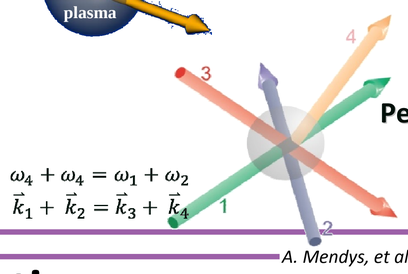
Méthodes non-locales

Méthodes locales basées sur les lasers
- Fluorescence induite par laser (LIF, TALIF)
  - Limitéée par les décroissances non-radiatives
  - Masquée dans le rayonnement du plasma élevé
  - Peut être intrusive



Peu applicables à haute densité électronique, moyenne et haute P

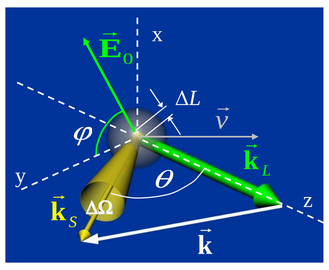
- Spectroscopie non linéaire → Mélange 4 ondes
  - → Coherent anti-Stokes Raman Scattering (CARS)
  - → PC-Degenerate Four Waves Mixing (PC-FWM)



Peu aisées à mettre en oeuvre

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

Diffusion laser



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

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

Fonction de Densité Spectrale

$$|\vec{\mathbf{k}}| = |\vec{\mathbf{k}}_S - \vec{\mathbf{k}}_L| \cong \frac{4\pi}{\lambda_L}\sin(\theta/2)$$ *Vecteur de diffusion*

Mouvement des centres de diffusion

$$\Delta\omega \equiv \omega_L - \omega_S = \left(\vec{\mathbf{k}}_S - \vec{\mathbf{k}}_L\right)\cdot\vec{v} = \vec{\mathbf{k}}\cdot\vec{v}$$

Diffusion élastique
- **Diffusion Rayleigh**
- **Diffusion Thomson**

Diffusion inélastique
- **Diffusion Raman**

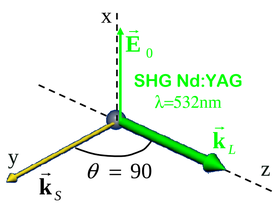
Diffusion non cohérente sur un ensemble

$$S_k(\Delta\omega)\, d\omega_s = F_k(v_k)\, dv_k = k^{-1}F_k(\Delta\omega/k)\, d\omega_s$$

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

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



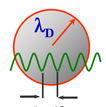
Sources plasma	N_e [m^{-3}]	T_e [K]	α
Tokamak	10^{20}	10^7	0.006
Glow discharge	10^{18}	10^4	0.02
Arc dans Ar à Patm	10^{23}	10^4	3.0
Plasma Induit par Laser	10^{25}	10^5	6.0

Aux longueurs d'onde optiques et pour des plasmas thermiques α~1

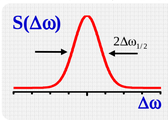
Diffusions Thomson incohérente et cohérente

$$\alpha \equiv \frac{1}{k\lambda_D} \approx \frac{1}{4\pi\sin(\theta/2)}\frac{\lambda_L}{\lambda_D} \qquad \lambda_D = \left(\frac{\varepsilon_0 k_B T_e}{e^2 N_e}\right)^{1/2} \qquad \omega_{pl} = \sqrt{e^2 n_e/(\varepsilon_0 m_e)}$$

α << 1 → Diffusion non-collective

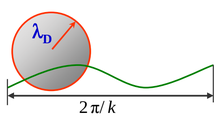


$$\Delta\omega_{1/2} \approx 2k\bar{v}_e = k\sqrt{2k_B T_e/m_e}$$

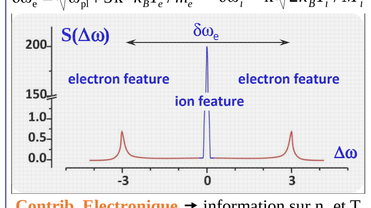


Spectral distribution gives EEDF

α >> 1 → Diffusion collective / cohérente

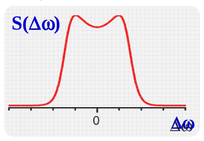


$$\delta\omega_e = \sqrt{\omega_{pl}^2 + 3k^2 k_B T_e/m_e} \qquad \delta\omega_i = k\sqrt{2k_B T_i/M_i}$$

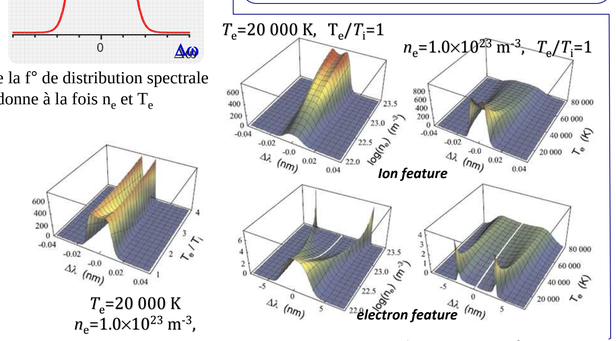


Contrib. Electronique → information sur n_e et T_e
Contrib. Ionique → information sur T_e/T_i.
⇩
Interprétation simple, aucune hypothèse sur l'ETL

α ≅ 1 → Cas partiellement collectif

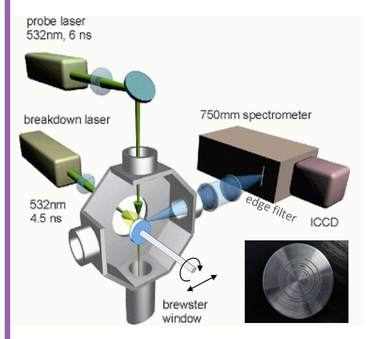


Le fit de la f° de distribution spectrale S(**k**,ω) donne à la fois n_e et T_e

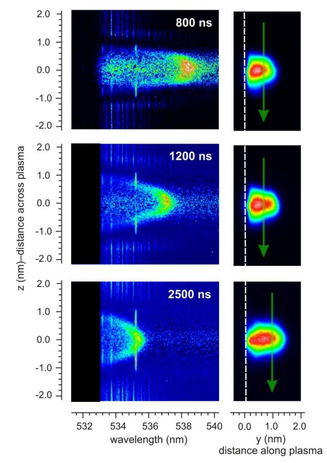


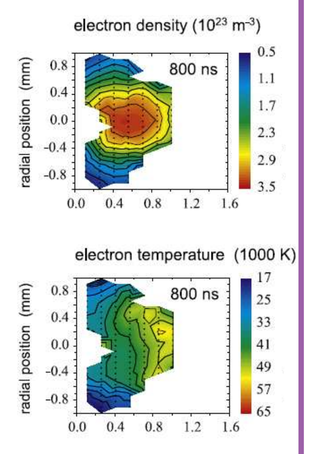
λ_L = 532 nm, φ = θ = π/2 , Z = 1

Plasma d'ablation



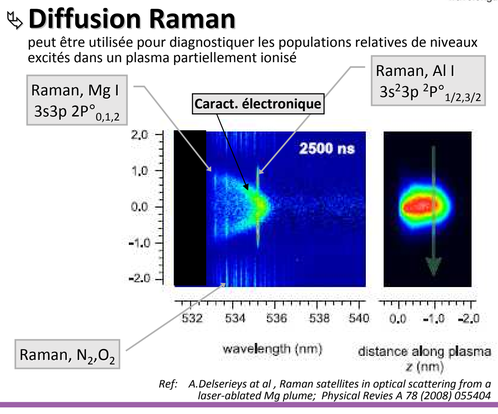
Faisceau d'ablation: 30 J/cm² - 6.70×10⁹ W/cm²
Faisceau sonde: 100 J/cm² - 16.6×10⁹ W/cm²
Résolution spatiale: 200mm (radial) × 30mm (axial)
iCCD gate: 8 ns - 2000 impulsions laser



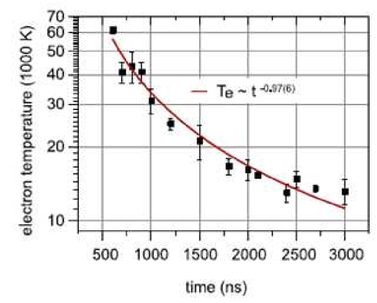


Diffusion Raman

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



Ref: A.Delserieys at al , Raman satellites in optical scattering from a laser-ablated Mg plume; Physical Revies A 78 (2008) 055404



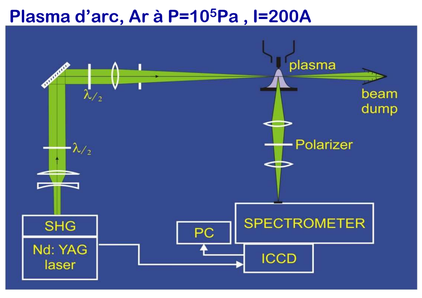
B.Pokrzywka et al.,Spectrochim. Acta B (2012) ***74–75****, 24*

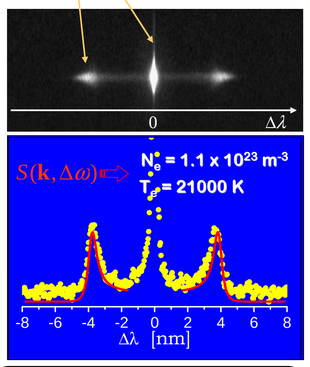
Diffusion Thomson: Chauffage du plasma

Diffusion Thomson – caract. électronique

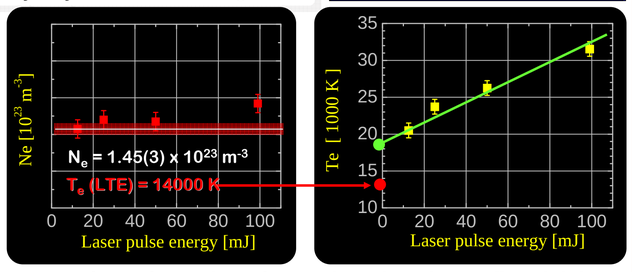
DT - Caract. Ionique + Diffusion Rayleigh + Lumière parasite

Plasma d'arc, Ar à P=10⁵Pa , I=200A



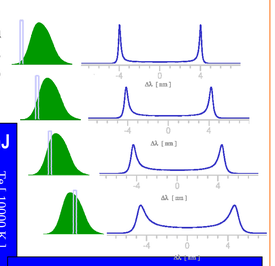


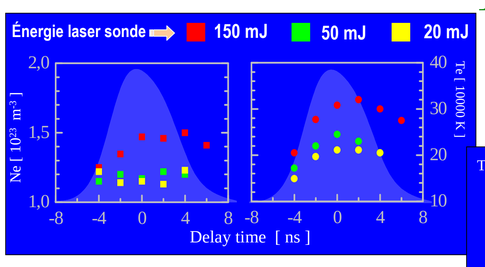
N_e et T_e en fonction de l'énergie laser

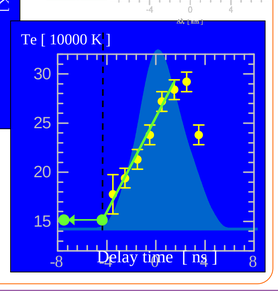


T_e est supérieure à T_{LTE} obtenu à partir de N_e, de quelques milliers de kelvins,
??? ce qui contredit le modèle plasma LTE ???

⇨ **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.







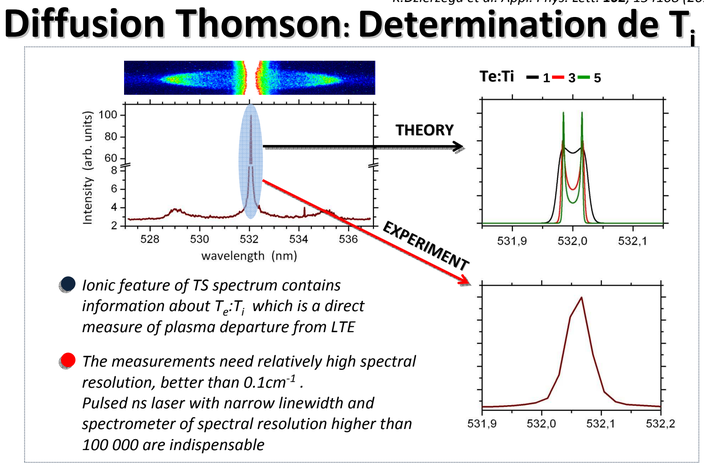
Le chauffage des électrons est une fonction fortement non linéaire de la puissance laser

[A.B. Murphy; PRL ***89****, 025002 (2002); Phys Rev E* ***69****, 016408 (2004)]*

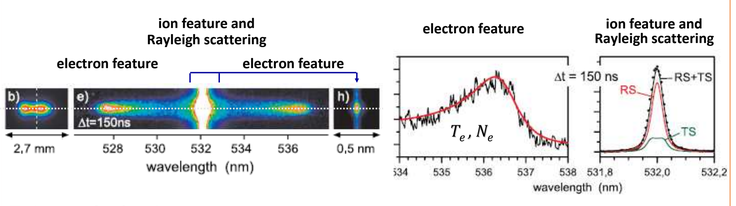
- → l'extrapolation linéaire à énergie nulle est invalide!
- → Détermination de la valeur de T_e par interpolation au début de l'impulsion

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

Diffusion Thomson: Determination de T_i

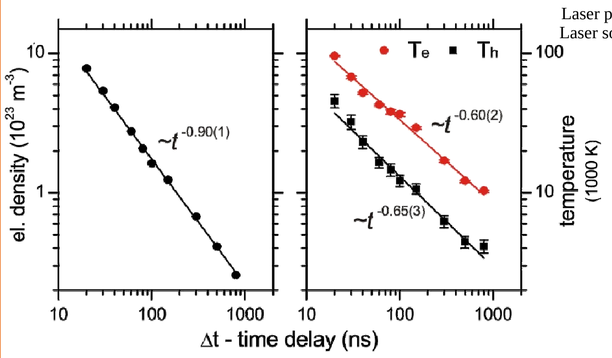


- *Ionic feature of TS spectrum contains information about T_e:T_i which is a direct measure of plasma departure from LTE*
- *The measurements need relatively high spectral resolution, better than 0.1cm^{-1}. Pulsed ns laser with narrow linewidth and spectrometer of spectral resolution higher than 100 000 are indispensable*



Traitement des données
1. Détermination de T_e et N_e à partir de la caractéristique électronique
2. Déconvolution du pic central par la fonction d'appareil
3. Ajustement de la caractéristique ionique des spectres TS et Rayleigh avec T_i comme paramètre

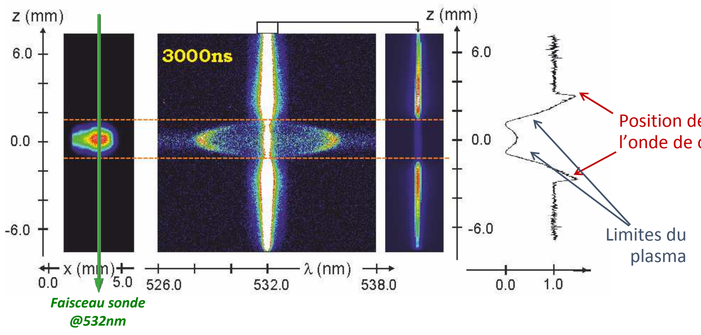
Hélium
Laser pompe: 1 kJ/cm²
Laser sonde: 9.5 J/cm²



→ Ecart à l'équilibre thermique

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

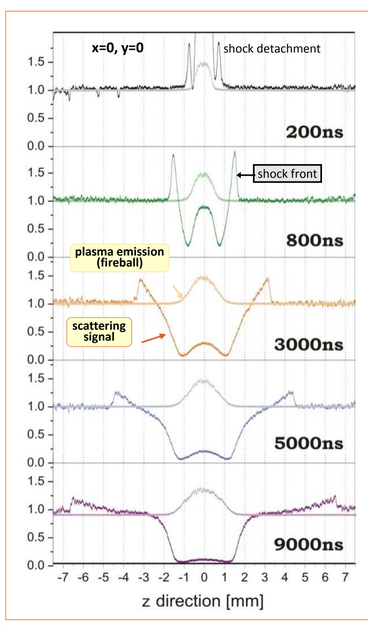
Diffusion Rayleigh dans les PIL



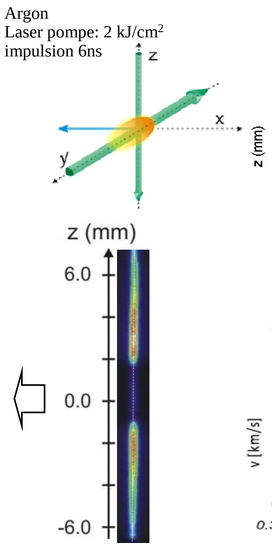
$$I_{scat} = I_{las}\, L\, n\, \frac{d\sigma}{d\Omega}\Delta\Omega$$

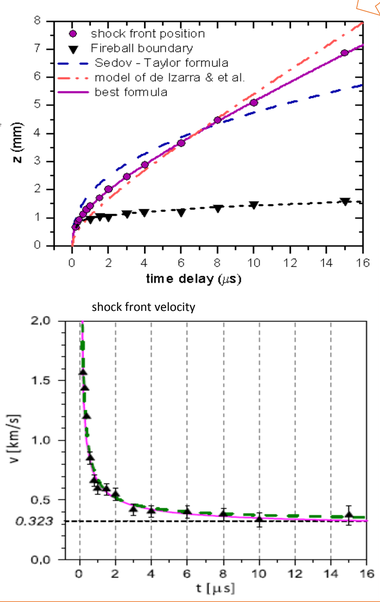
densité d'atomes

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 kJ/cm²
impulsion 6ns





- ☺ **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.**