

## Spectroscopie de diffusion dans les plasmas thermiques

### Objectifs

Diagnostiques résolus spatialement et temporellement de plasmas thermiques

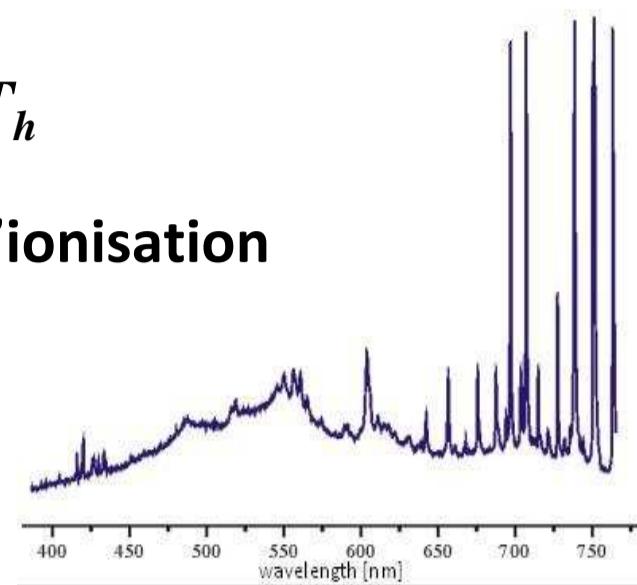
- Paramètres plasma :  $N_e$ ,  $T_e$ ,  $T_h$
- Composition du plasma (Analyse quantitative)

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

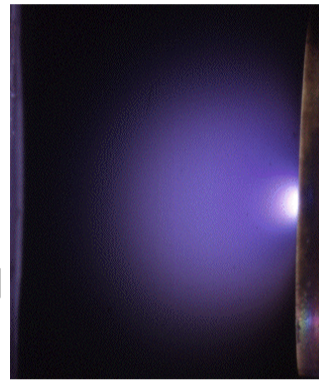


#### Exemples

Plasma d'arc à pression atmosphérique – plasma stationnaire



Plasma induit par laser (PIL) – plasma transitoire



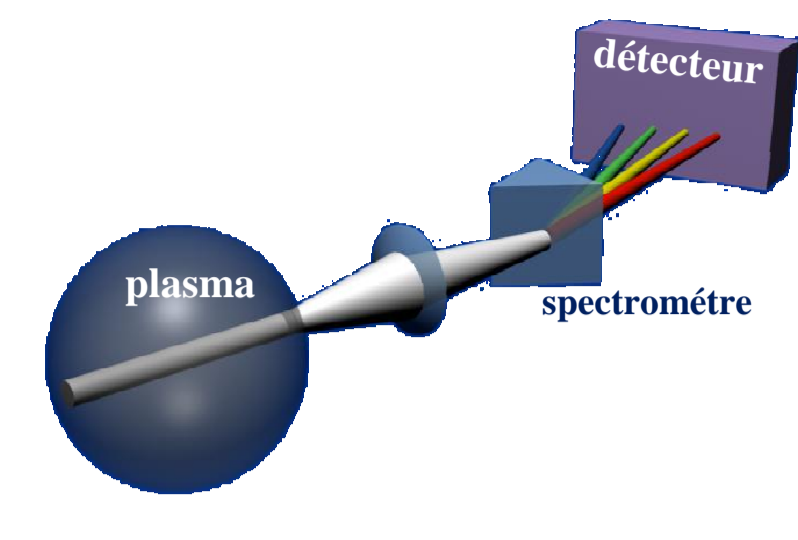
### Méthode idéale

- 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

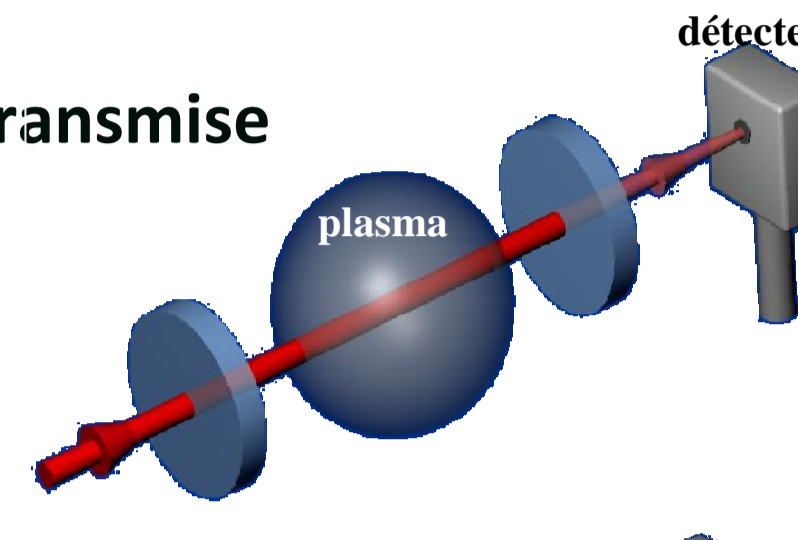
**Il n'existe pas de méthode qui réponde à toutes ces exigences**

### Diagnostiques des plasmas: limites

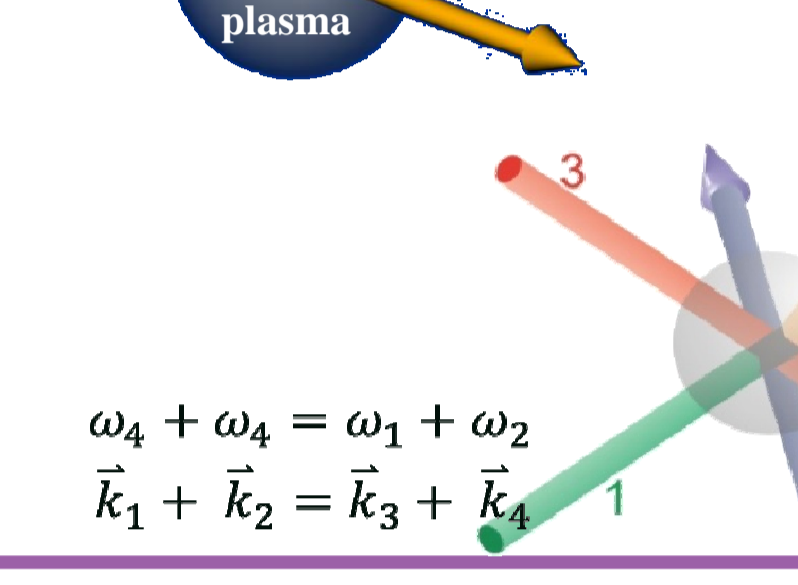
- **Spectroscopie optique d'émission**  
 seule l'intensité spatialement intégrée le long de la ligne de visée peut être mesurée directement
  - Réabsorption possible
  - Seules les particules excitées peuvent être sondées
  - Hypothèses requises sur l'état d'équilibre du plasma
  - Transformation d'Abel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



technique pompe-sonde



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

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

**Panache plasma**

$$\epsilon_z = \epsilon_{\lambda_{raie}} + \epsilon_{\lambda_{fond}}$$

$$I_\lambda(r) = \int \epsilon_\lambda(x, y, z) dx$$

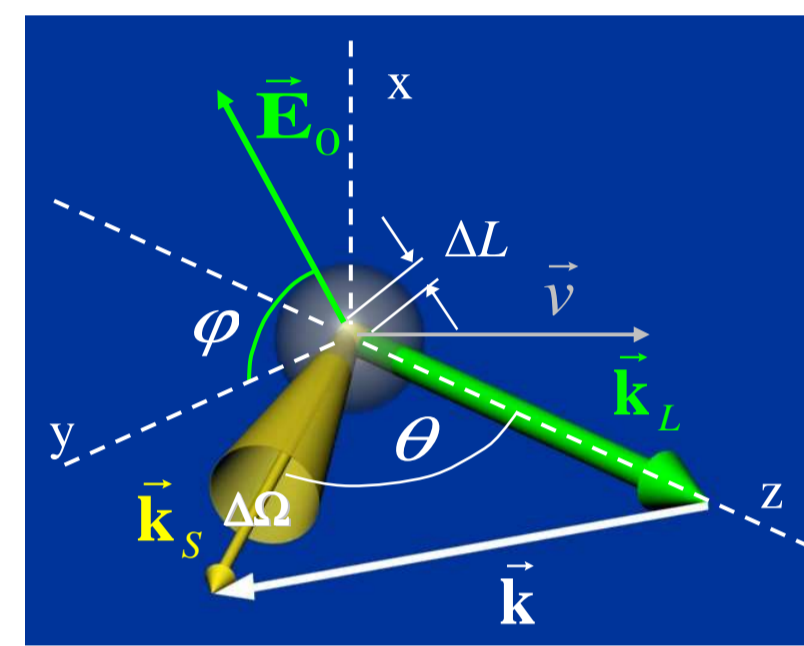
$$\epsilon_\lambda(r) = -\frac{1}{\pi} \int \frac{d\epsilon_\lambda}{dy} \frac{dy}{y^2 - r^2}$$

- 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



- 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**

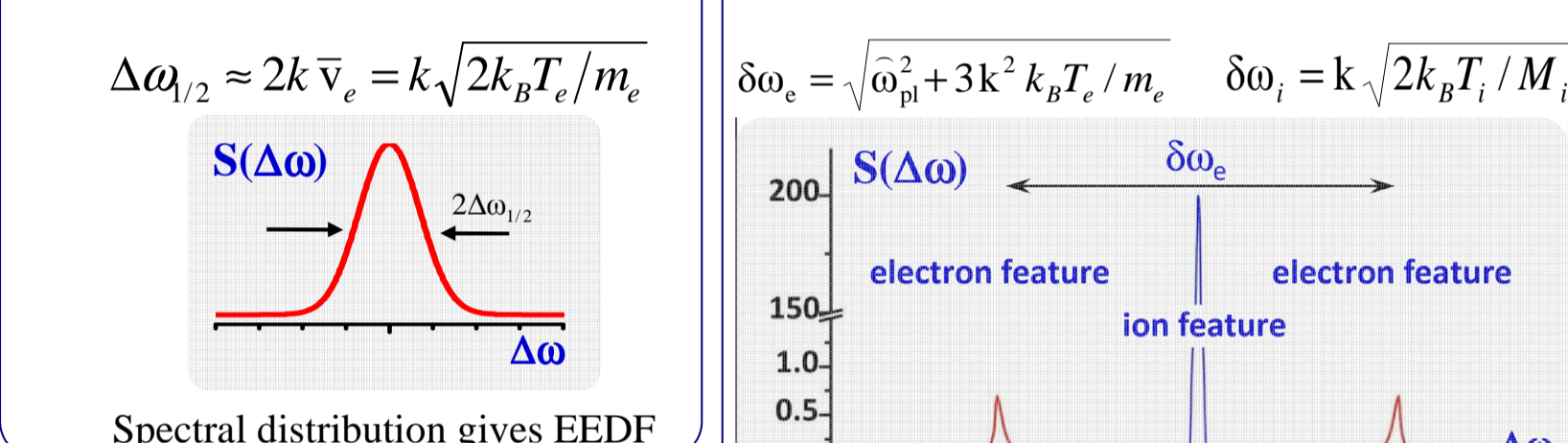
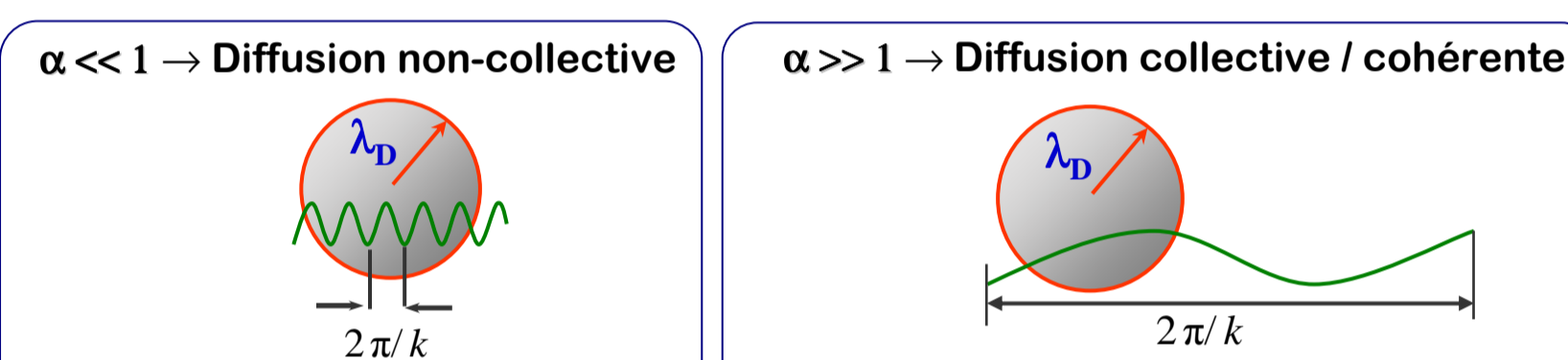
**Diffusion Thomson dans différents types de plasmas**

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

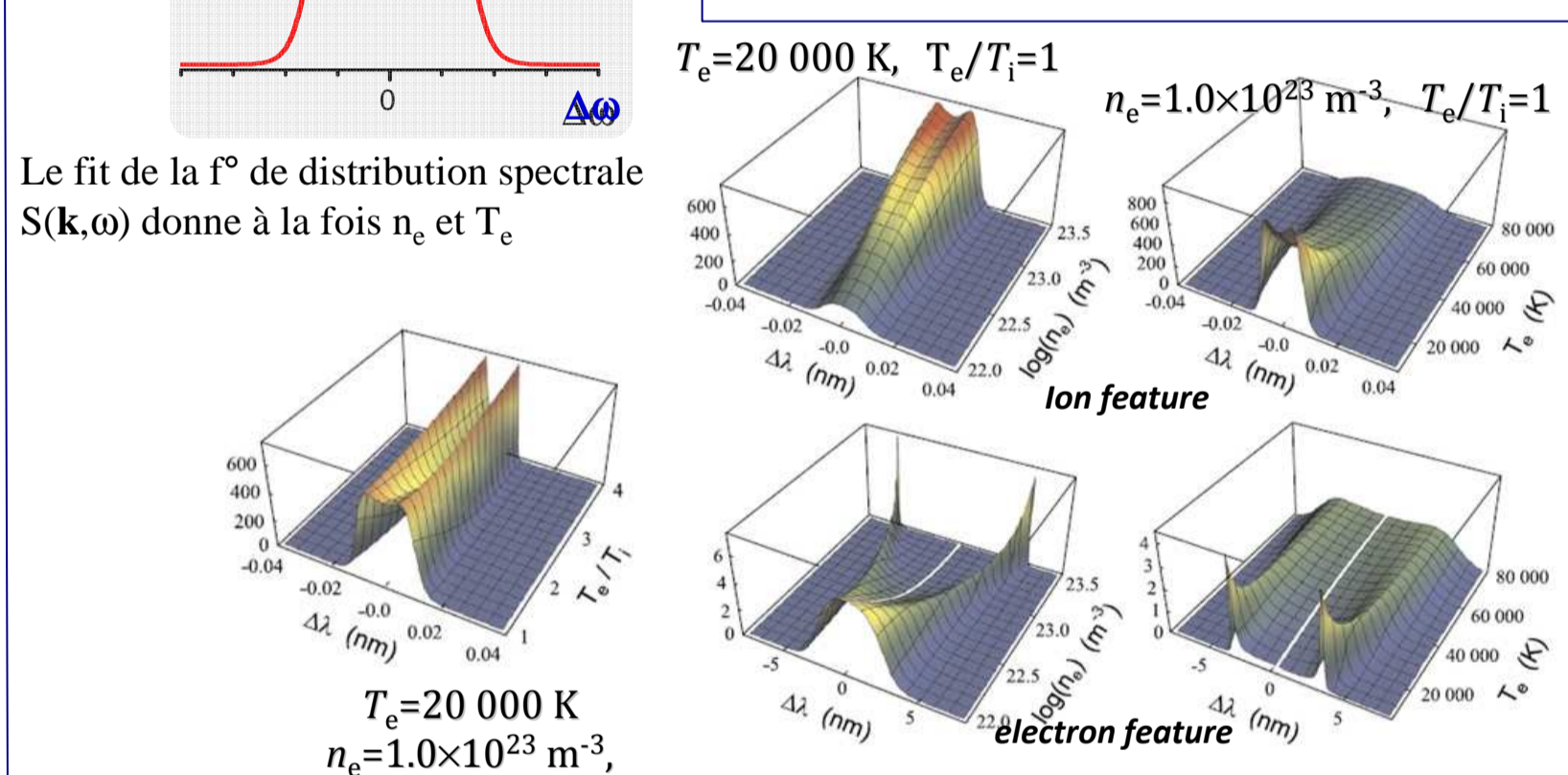
Aux longueurs d'onde optiques et pour des plasmas thermiques  $\alpha \ll 1$

### Diffusions Thomson incohérente et cohérente

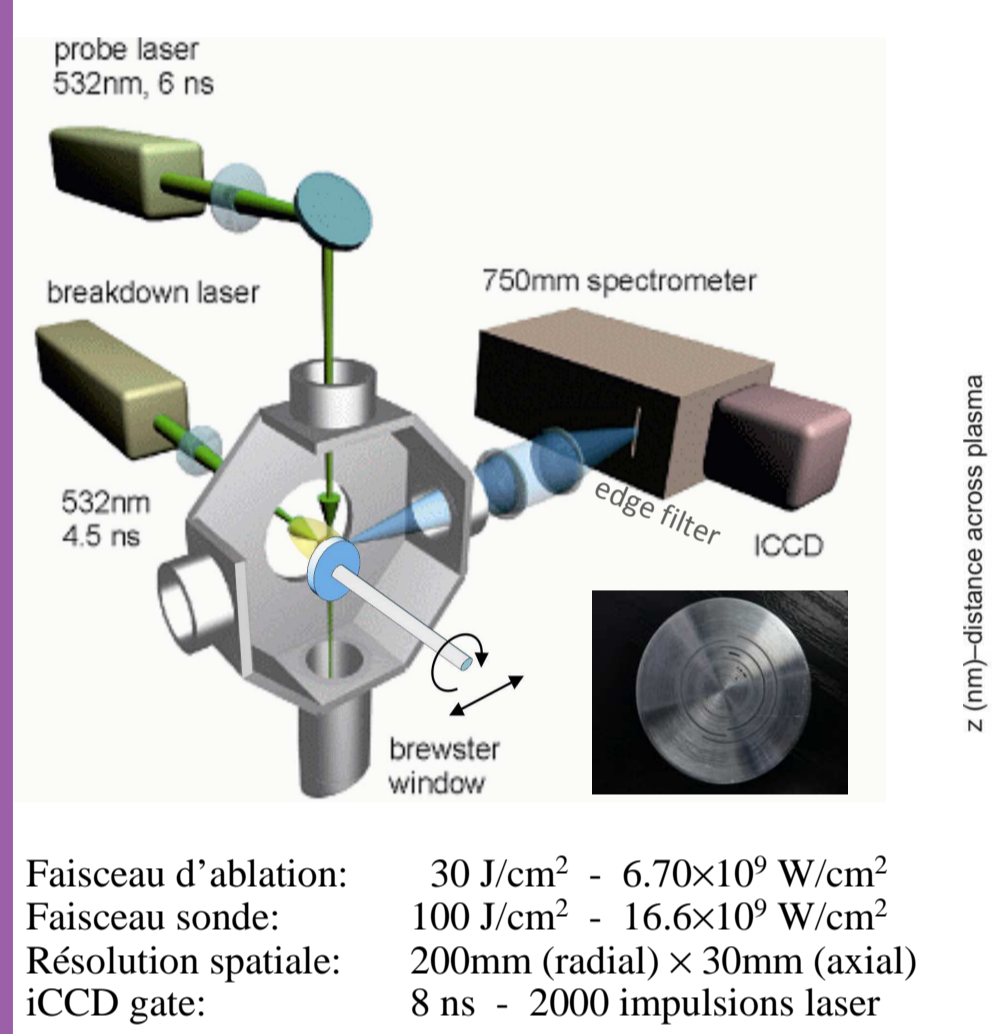
$$\alpha \equiv \frac{1}{k\lambda_D} \approx \frac{1}{4\pi \sin(\theta/2) \lambda_D} \quad \lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 k_B T_e}{e^2 N_e} \right)^{1/2} \quad \tilde{\omega}_{pl} = \sqrt{e^2 n_e / (\epsilon_0 m_e)}$$



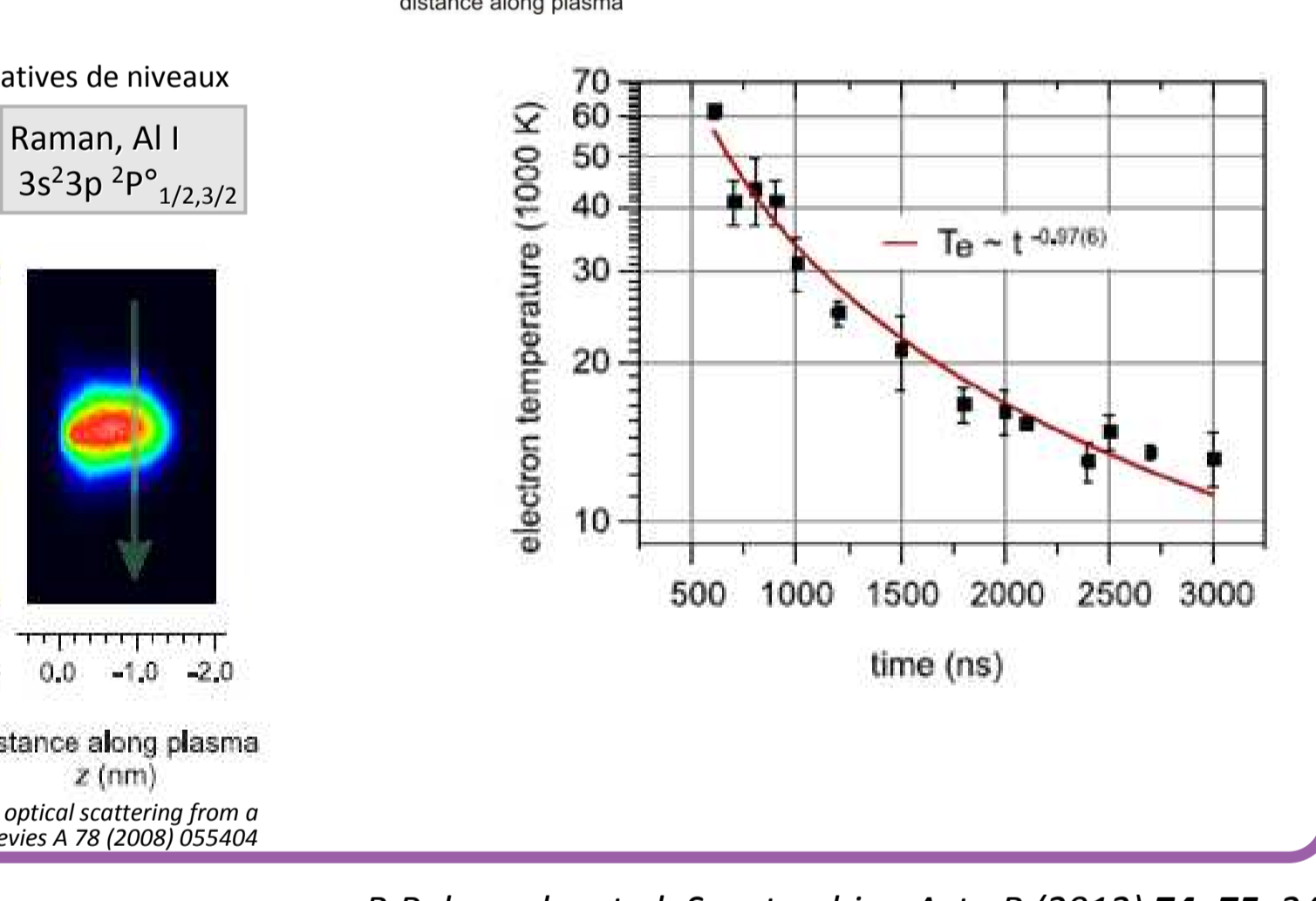
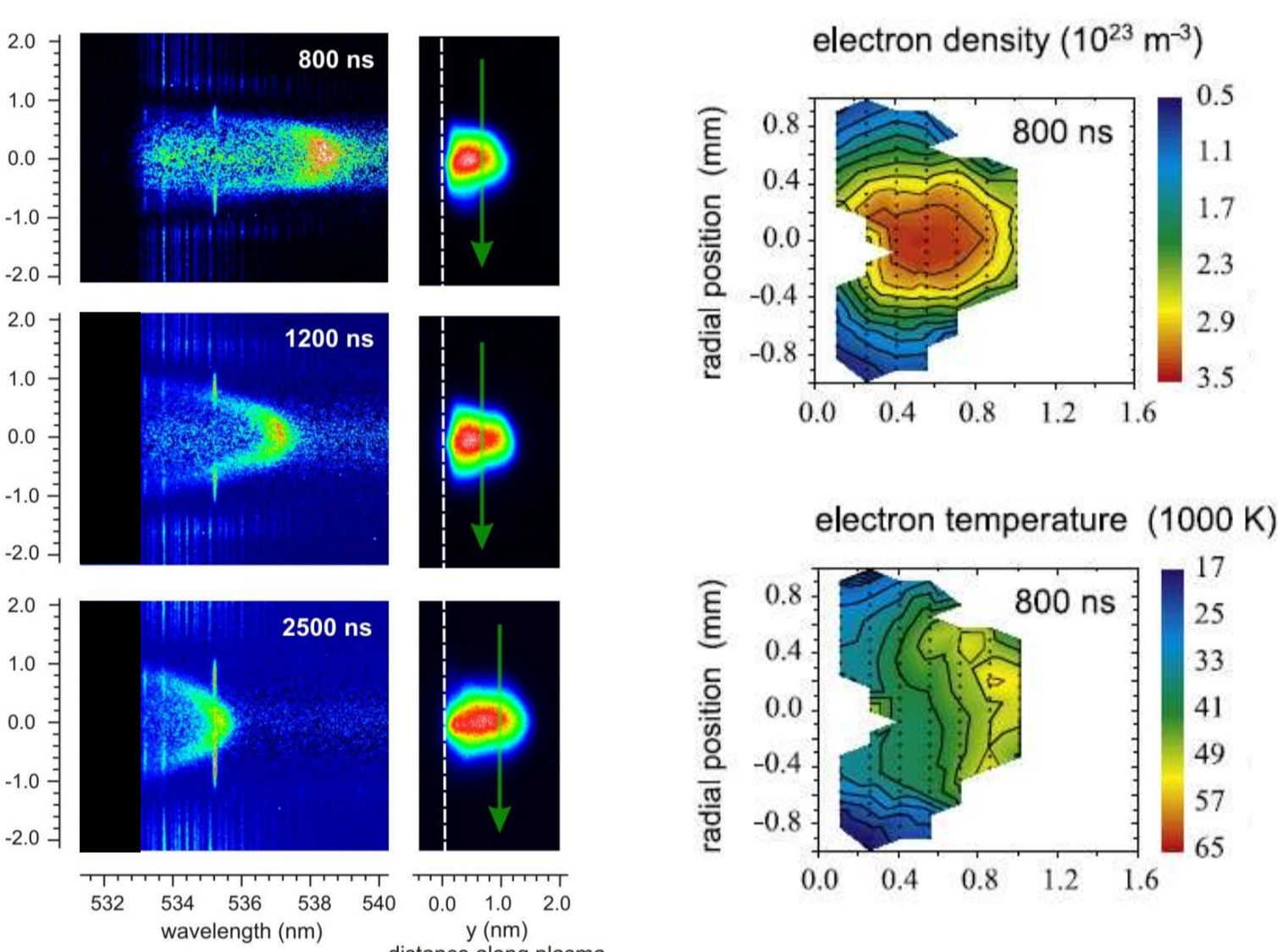
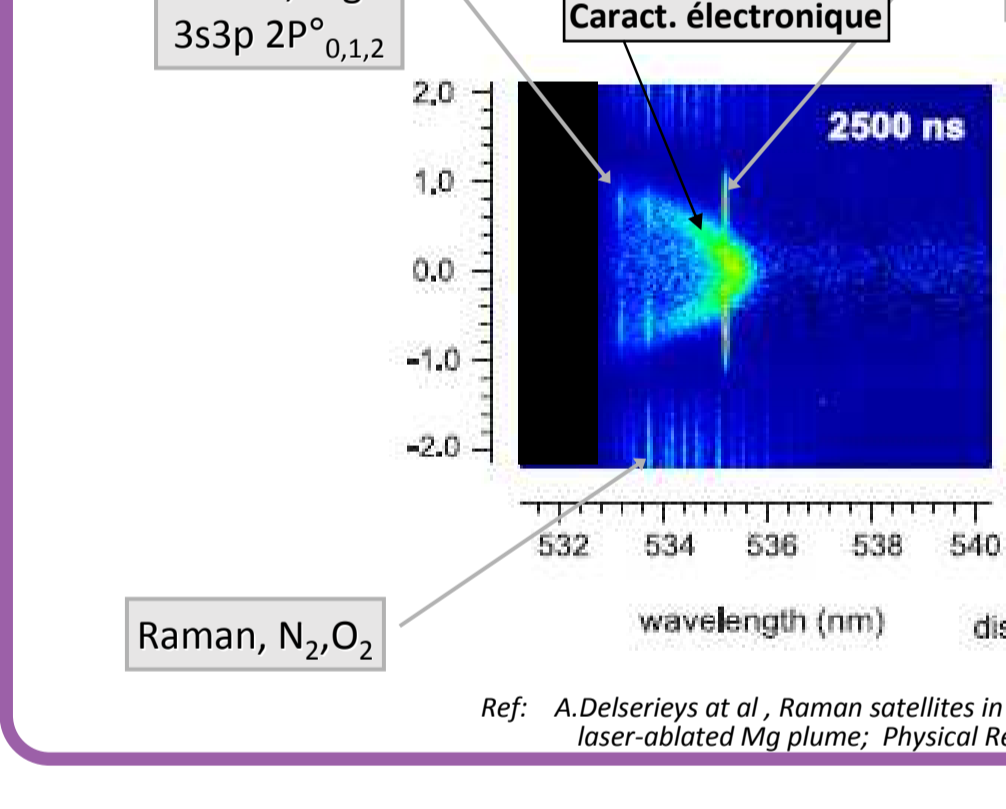
$\alpha \approx 1$  → Cas partiellement collectif  
 Le fit de la f<sup>e</sup> de distribution spectrale  $S(k, \omega)$  donne à la fois  $n_e$  et  $T_e$



### Plasma d'ablation

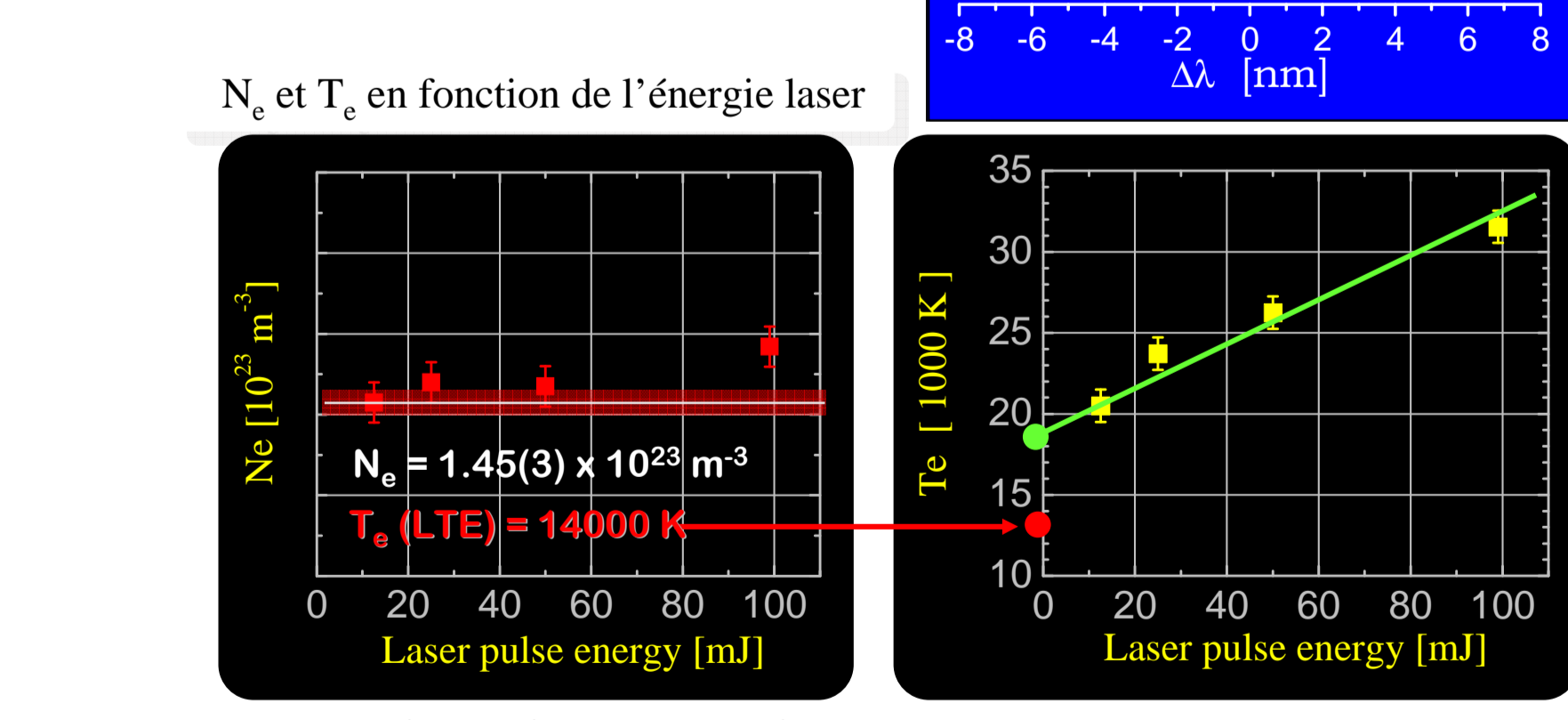
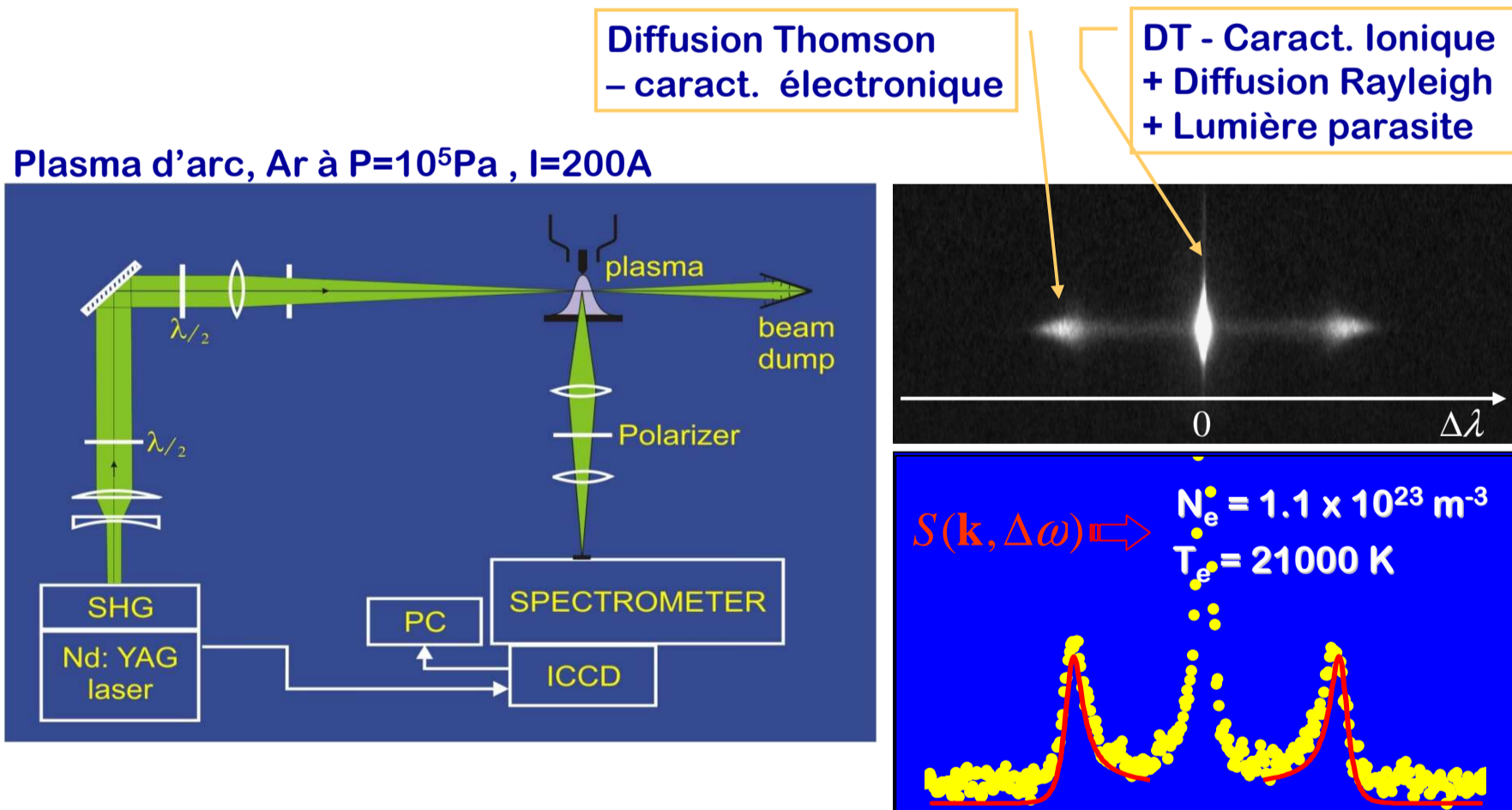


**Diffusion Raman**  
 peut être utilisée pour diagnostiquer les populations relatives de niveaux excités dans un plasma partiellement ionisé

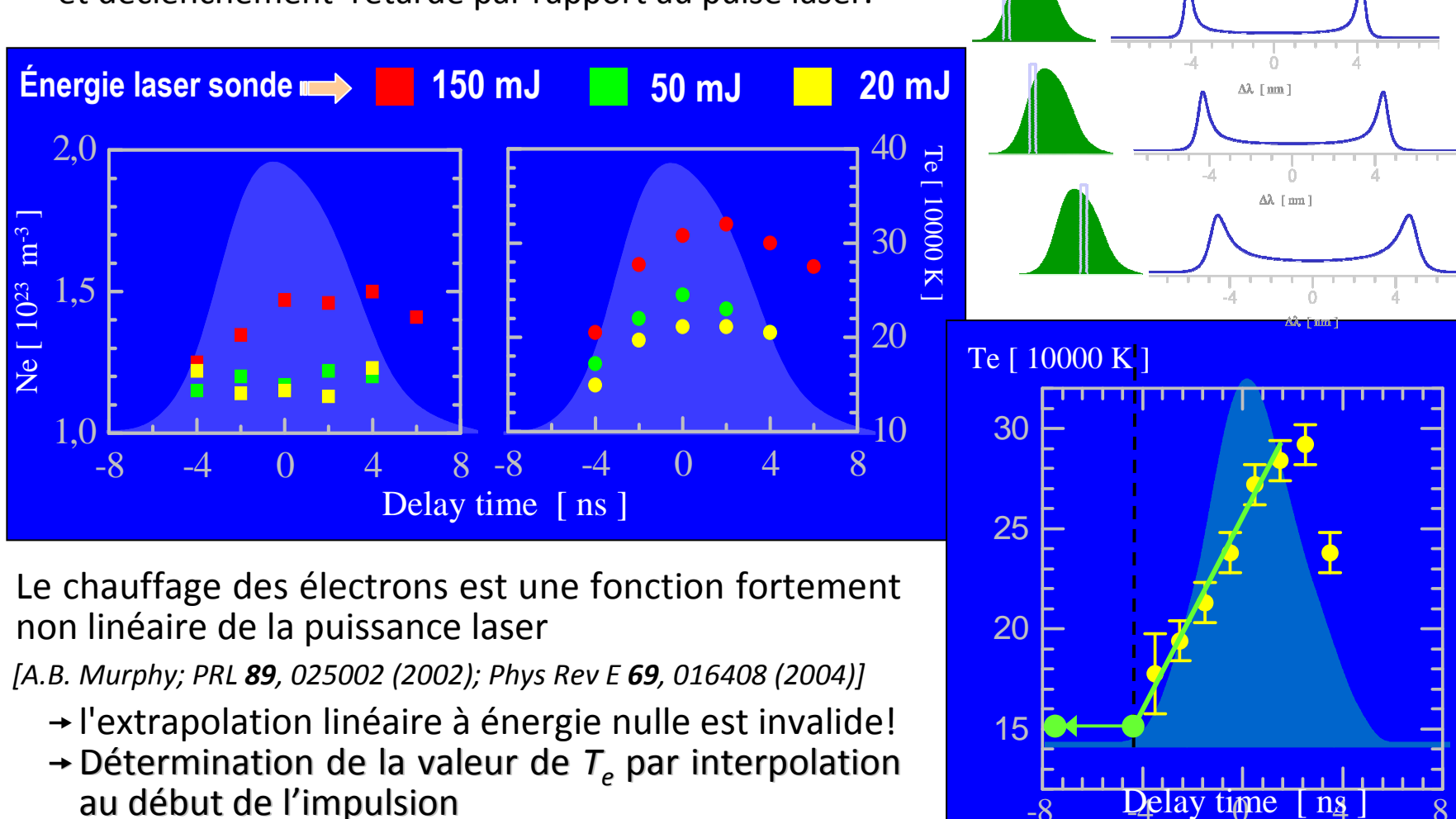


B. Pokrzywka et al., Spectrochim. Acta B (2012) 74–75, 24

### Diffusion Thomson: Chauffage du plasma

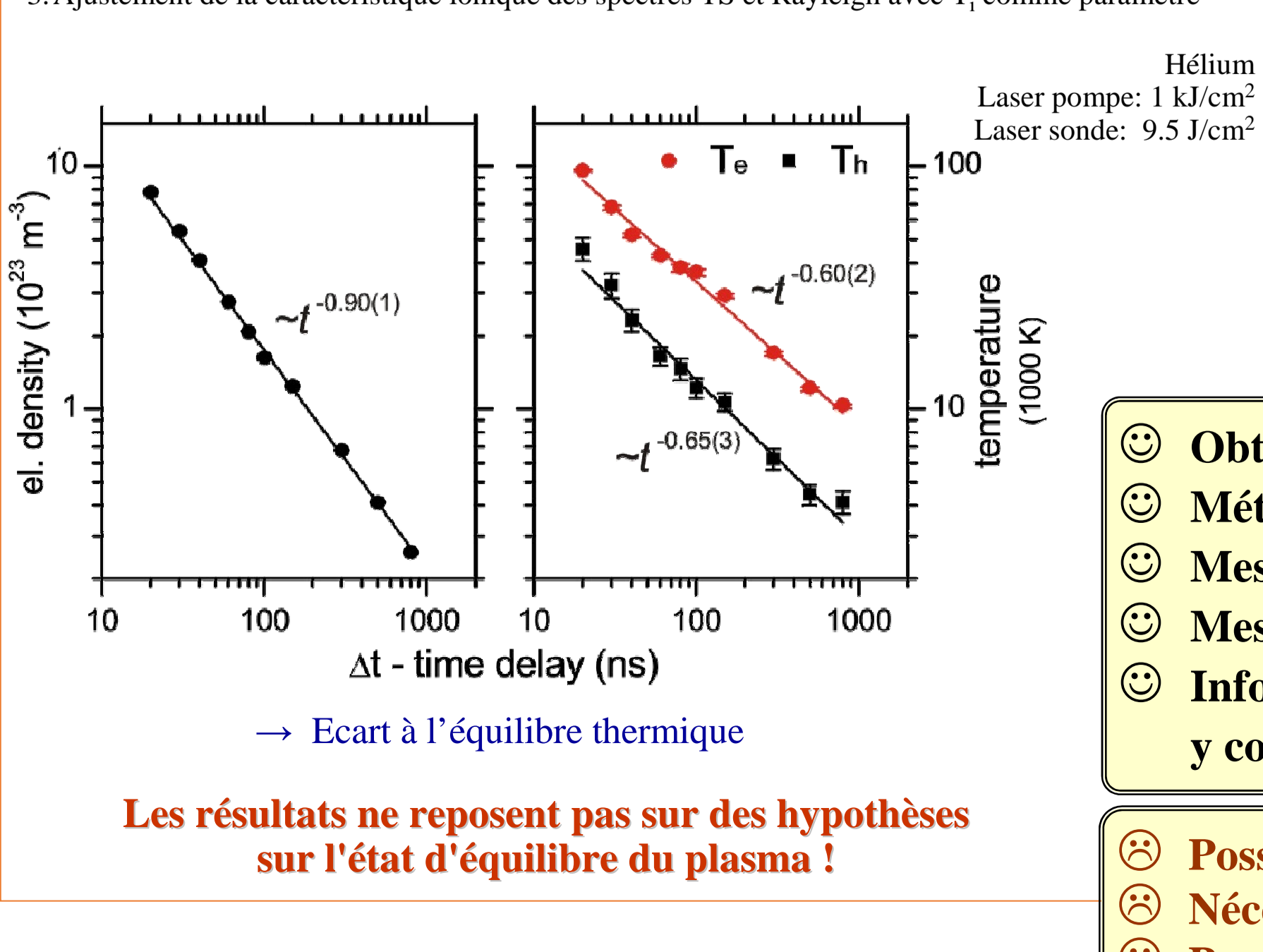
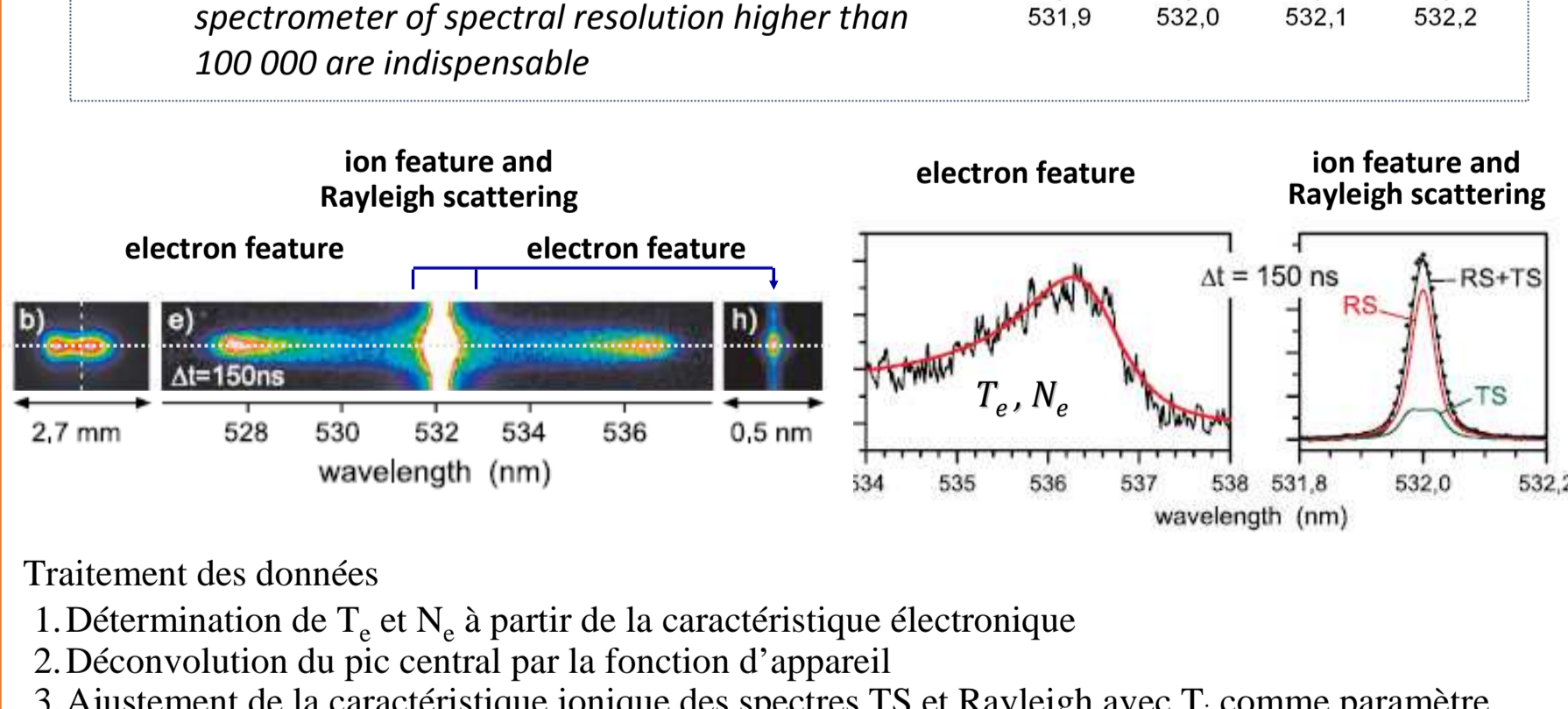
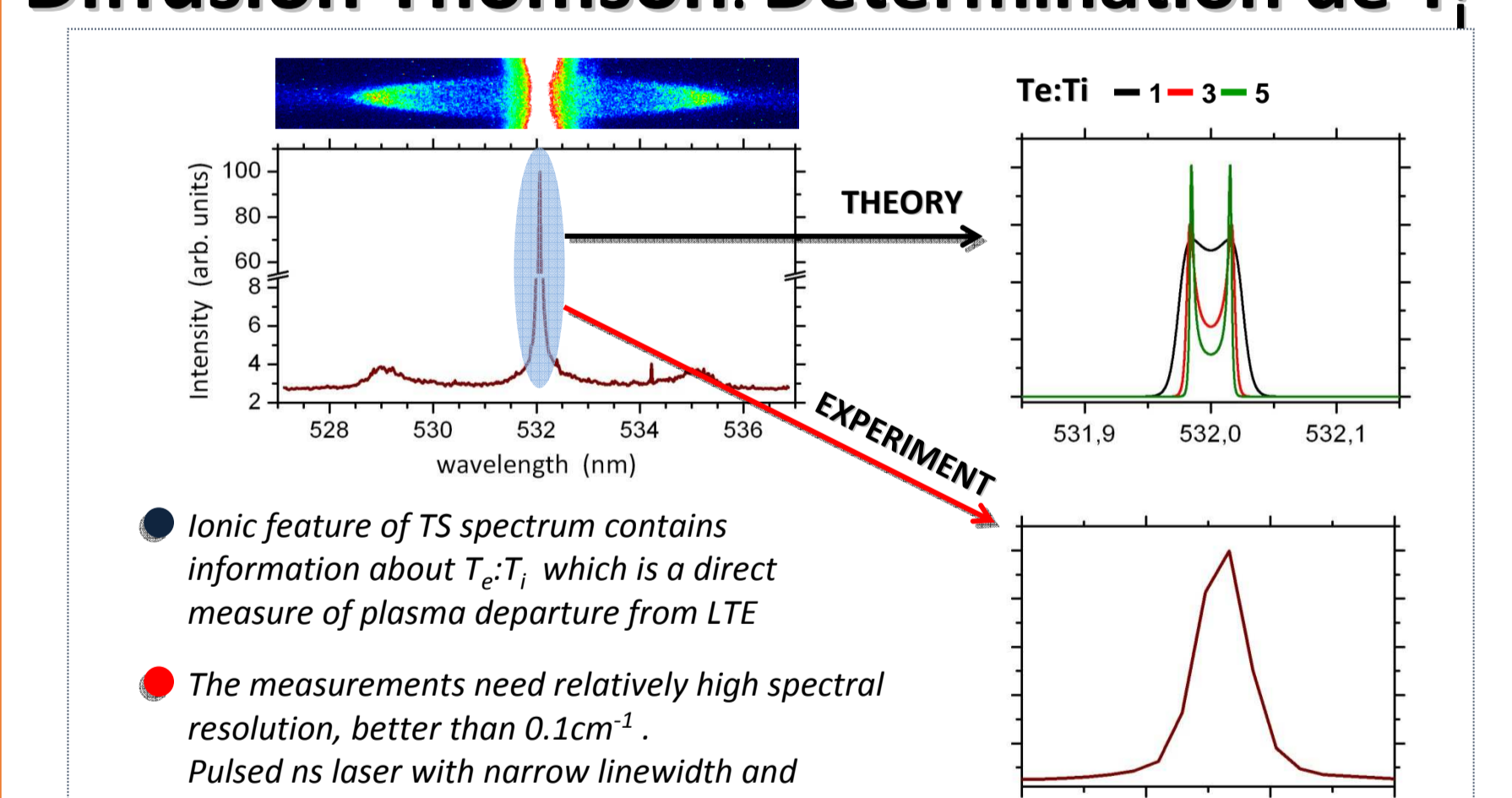


Effet du chauffage électronique par l'impulsion laser → évolution temporelle des spectres TS au cours de l'impulsion laser, par balayage de la porte de la ICCD et déclenchement retardé par rapport au pulse laser.



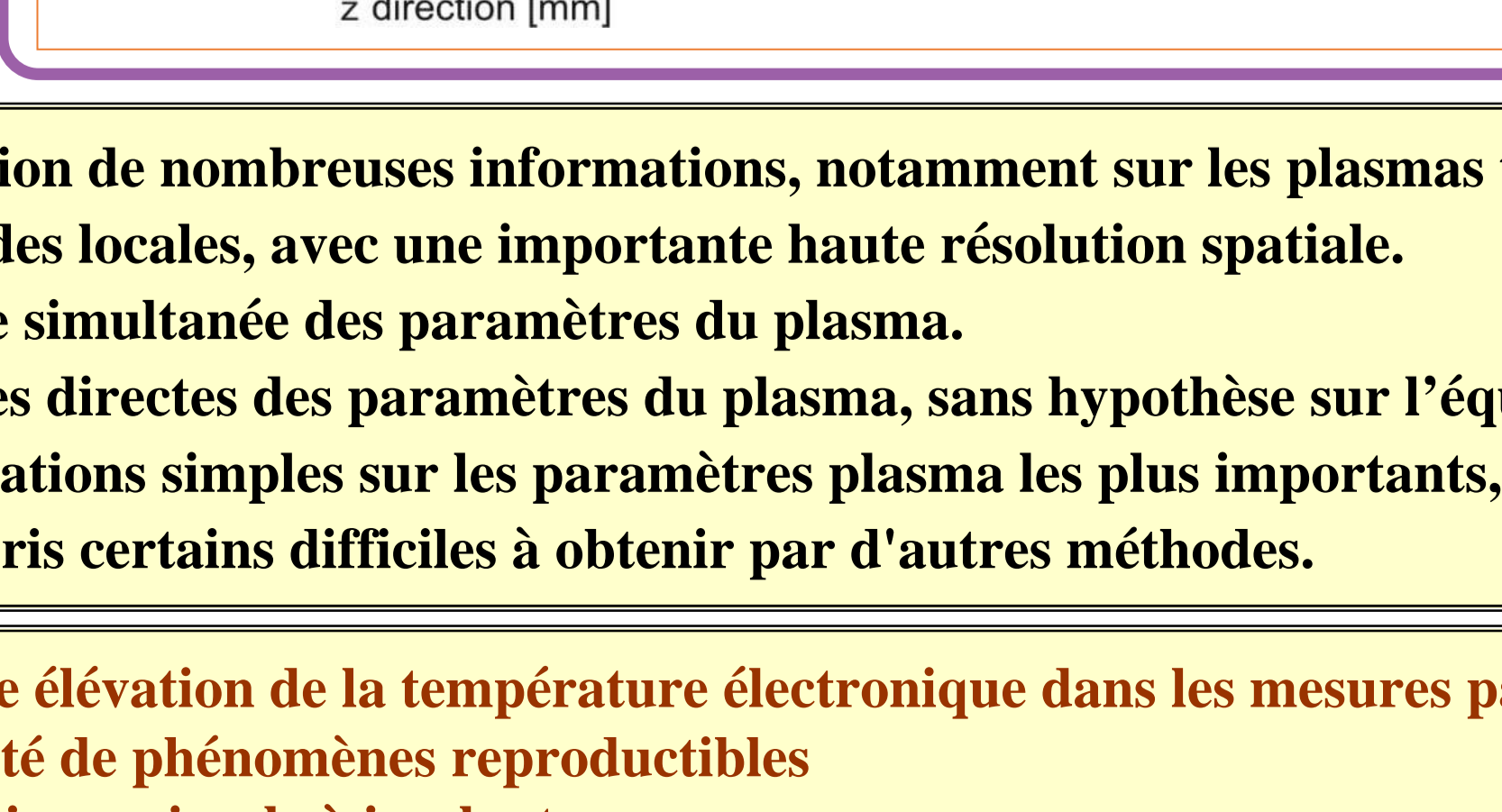
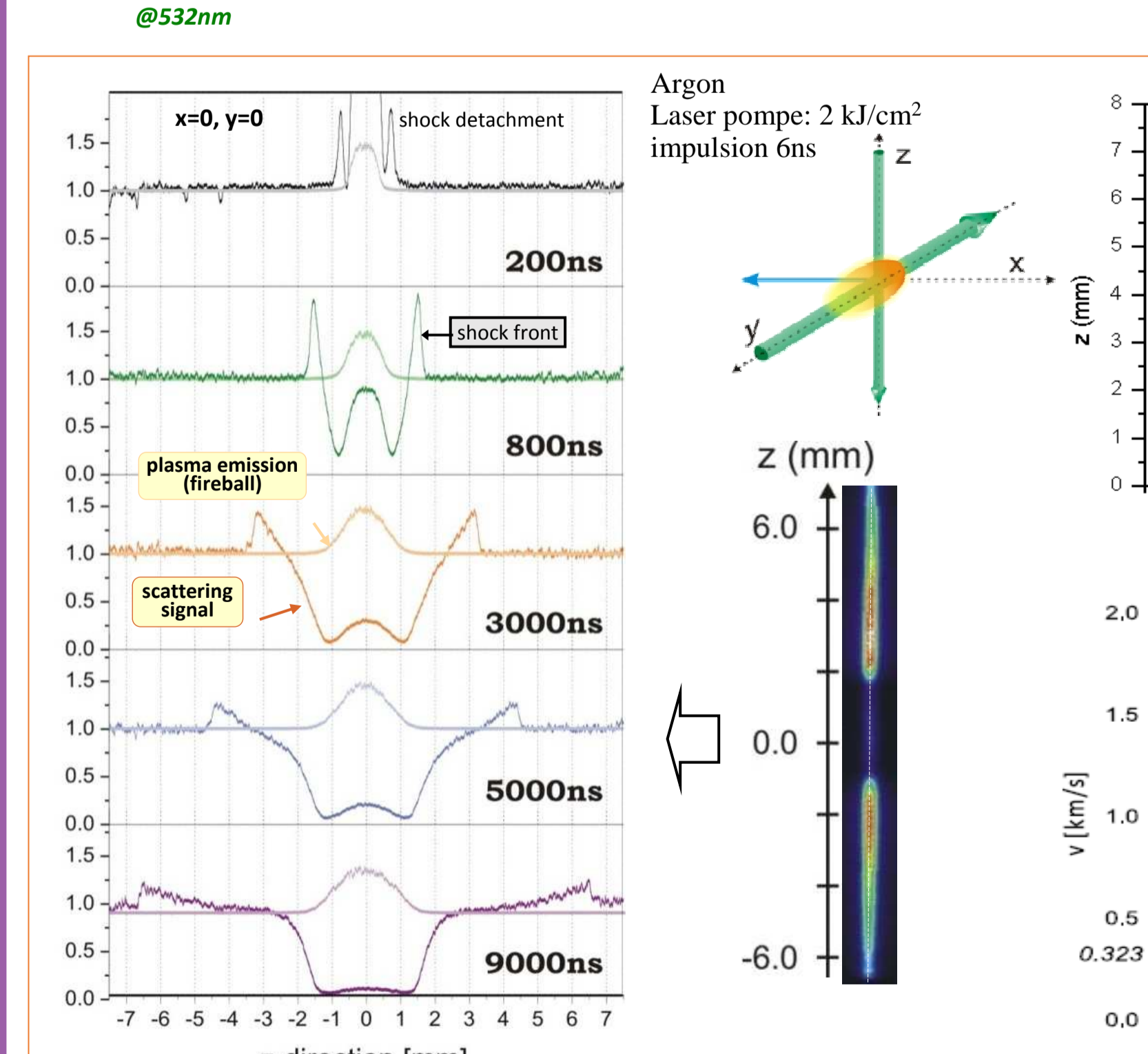
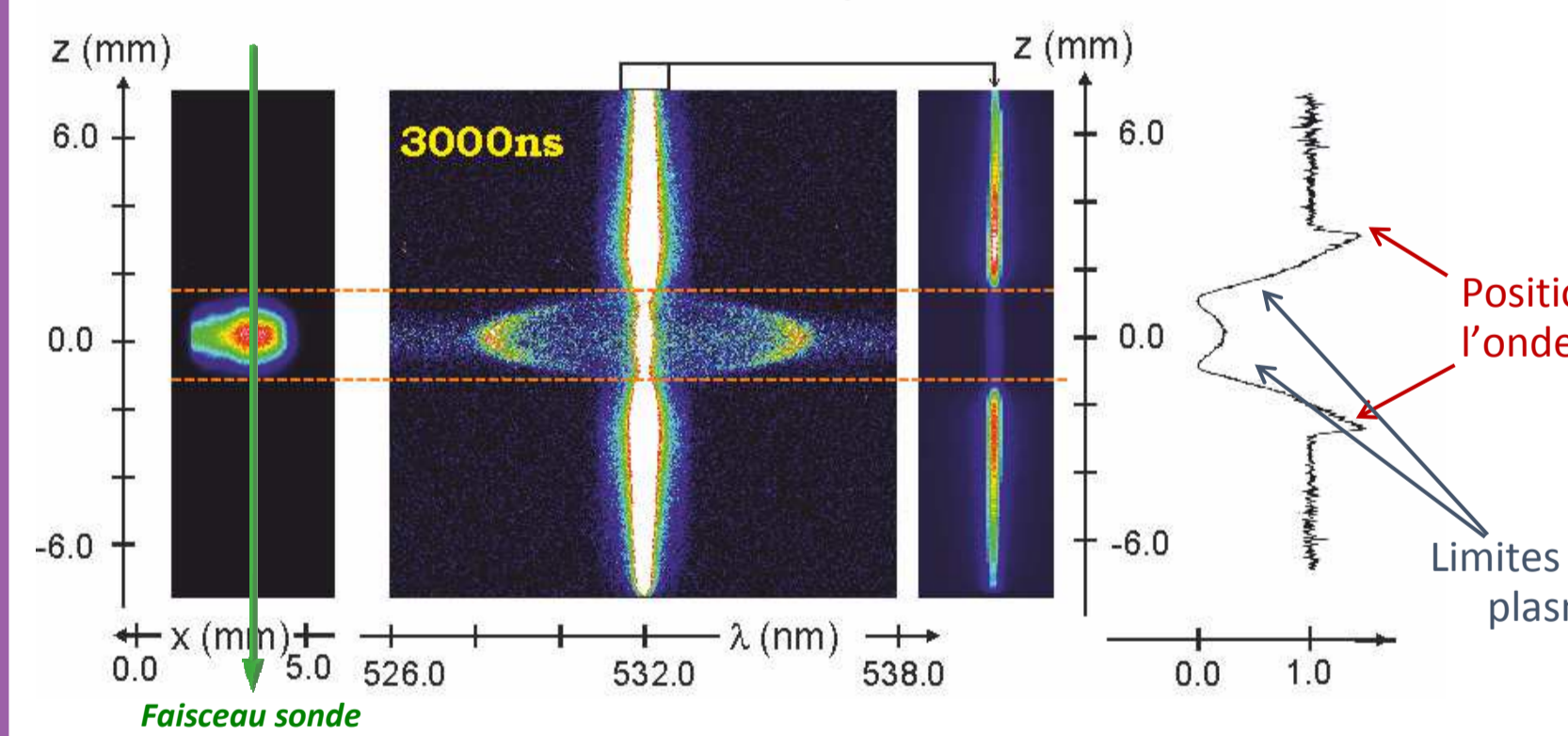
Le chauffage des électrons est une fonction fortement non linéaire de la puissance laser  
 [A.B. Murphy; PRL 89, 025002 (2002); Phys Rev E 69, 016408 (2004)]  
 → l'extrapolation linéaire à énergie nulle est invalide!  
 → Détermination de la valeur de  $T_e$  par interpolation au début de l'impulsion

### Diffusion Thomson: Détermination de $T_i$



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

### Diffusion Rayleigh dans les PIL



- ☺ 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.