

Journées 2021

25-28 octobre 2021, Palaiseau

atelier

Plasma laser : diagnostic et modélisation

première partie

Plasmas en équilibre

Arnaud Bultel¹ et Jörg Hermann²

¹ CORIA, Normandie Université, CNRS, 76801 Saint-Étienne du Rouvray

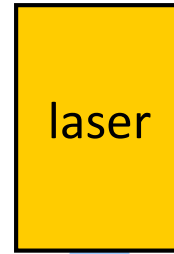
² LP3, CNRS, Aix-Marseille Université, 13009 Marseille

Plasma produit par ablation laser

☞ dépend de nombreux paramètres

laser

longueur d'onde λ_{las}
 durée d'impulsion τ_{las}
 énergie E_{las}
 fluence F_{las}
 focalisation, ...



longueur de pénétration optique

$$\delta_{opt} = \alpha^{-1}$$

matériau

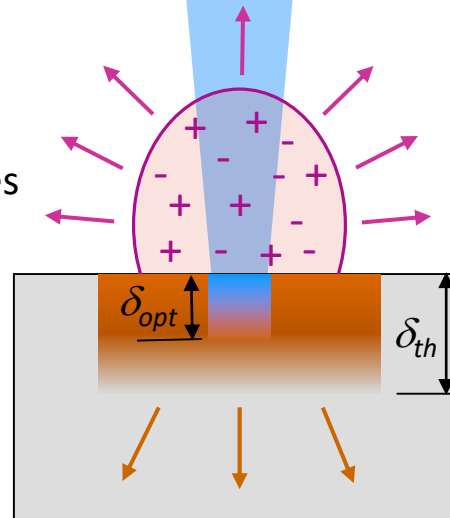
réflectivité R
 coefficient d'absorption α
 couplage électron-réseau τ_{e-i}
 conductivité thermique, K_{th}
 autres propriétés thermophysiques
 $C_p, T_{fus}, T_{vap}, H_{fus}, H_{vap}$



longueur de diffusion thermique

$$\delta_{th} = 2\sqrt{\chi \tau_{las}}$$

$$\chi = \frac{k_{th}}{\rho C_p}$$



environnement

nature du gaz
 pression P_{gaz}
 liquide

Plasma produit par ablation laser

☞ dépend de nombreux paramètres

laser

longueur d'onde λ_{las}

durée d'impulsion τ_{las}

énergie E_{las}

fluence F_{las}

focalisation, ...

Laser à excimère ArF 193 nm

$$E_{photon} = 6,42 \text{ eV}$$

matériau

réflectivité R

coefficient d'absorption α

couplage électron-réseau τ_{e-i}

conductivité thermique, K_{th}

autres propriétés thermophysiques

$C_p, T_{fus}, T_{vap}, H_{fus}, H_{vap}$

Laser CO₂ 10,6 μm

$$E_{photon} = 0,12 \text{ eV}$$

environnement

nature du gaz

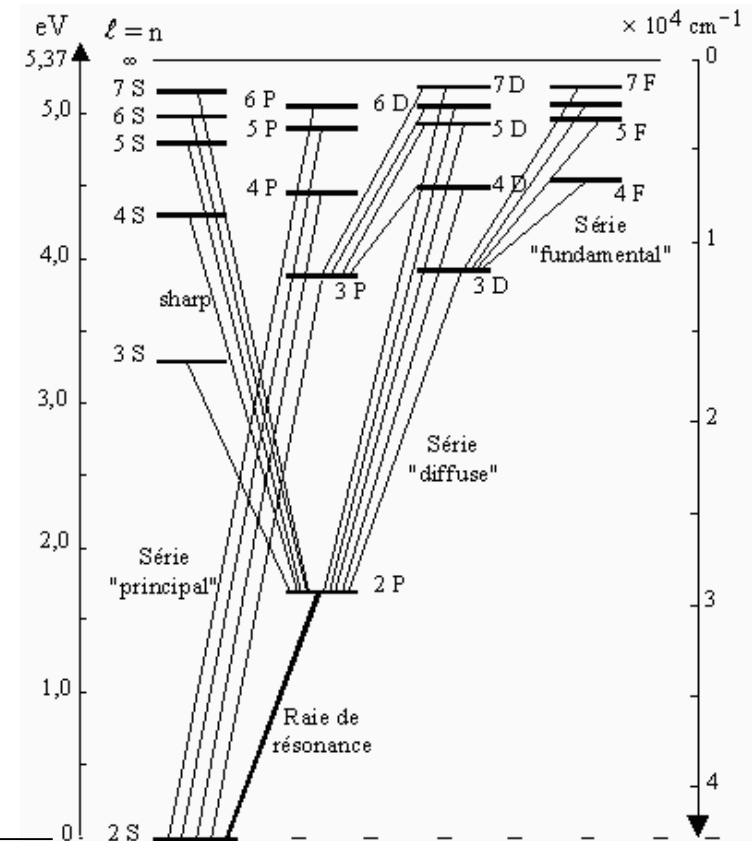
pression P_{gaz}

liquide

⇒ 50 photons pour ioniser Li

$$E_{photon} = hv = h \frac{c}{\lambda}$$

Lithium



Plasma produit par ablation laser

☞ dépend de nombreux paramètres

laser

longueur d'onde λ_{las}

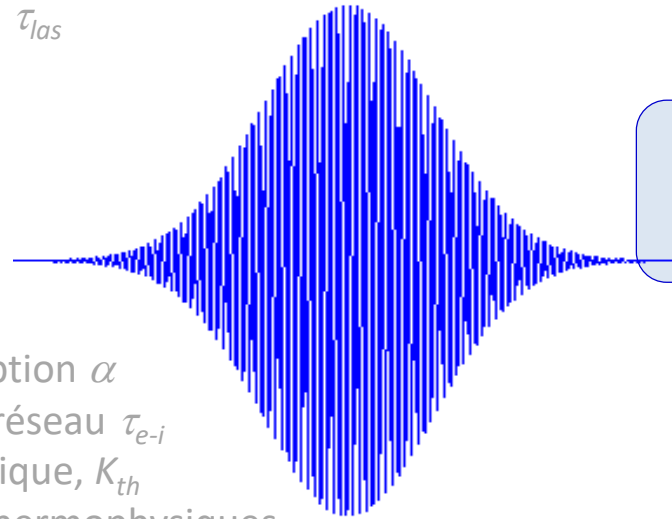
durée d'impulsion τ_{las}

énergie E_{las}

fluence F_{las}

focalisation, ...

$$E_{photon} = h\nu = \hbar\omega = h\frac{c}{\lambda}$$



Laser à excimère ArF 193 nm

$$E_{photon} = 6,42 \text{ eV}$$

$$\omega = 9,8 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

matériau

réflectivité R

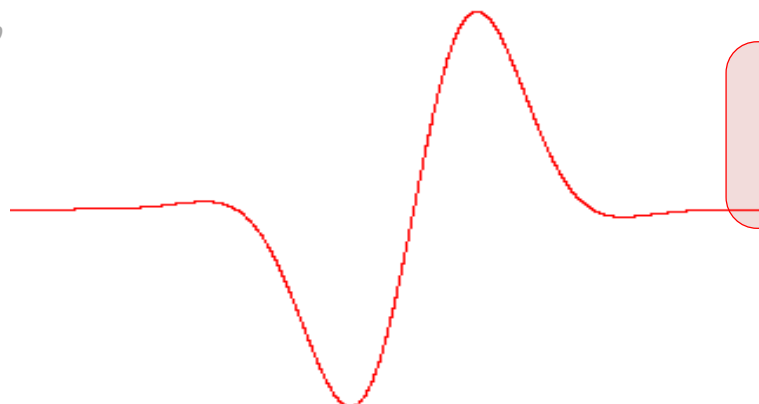
coefficient d'absorption α

couplage électron-réseau τ_{e-i}

conductivité thermique, K_{th}

autres propriétés thermophysiques

$C_p, T_{fus}, T_{vap}, H_{fus}, H_{vap}$



Laser CO₂ 10,6 μm

$$E_{photon} = 0,12 \text{ eV}$$

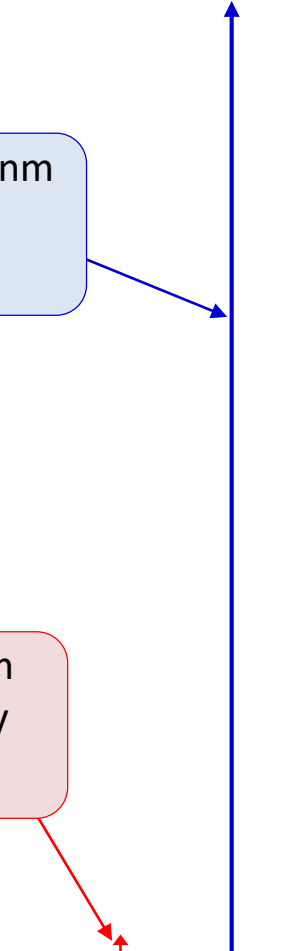
$$\omega = 1,8 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

environnement

nature du gaz

pression P_{gaz}

liquide



Chauffage des électrons par laser

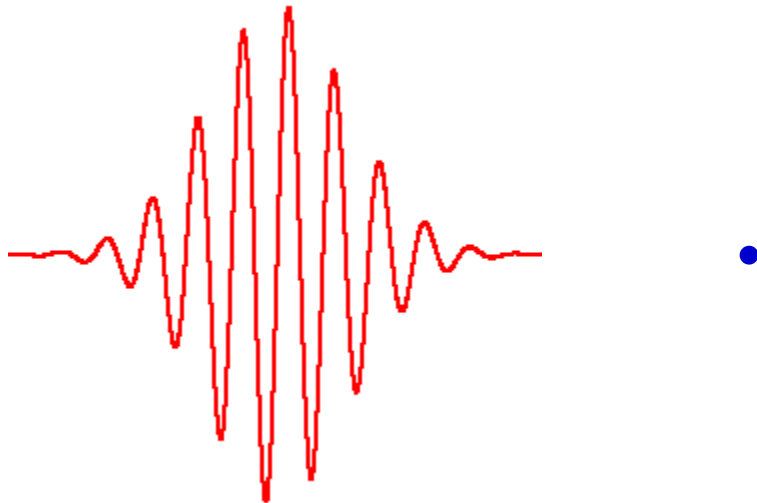
☞ dépendance de λ_{las}

Énergie pondéromotrice (quiver energy)

$$E_q = \frac{e^2 \varepsilon^2}{m\omega^2}$$

↙ champ électrique

Énergie cinétique moyenne
d'un électron dans un champs EM




Chauffage des électrons par laser

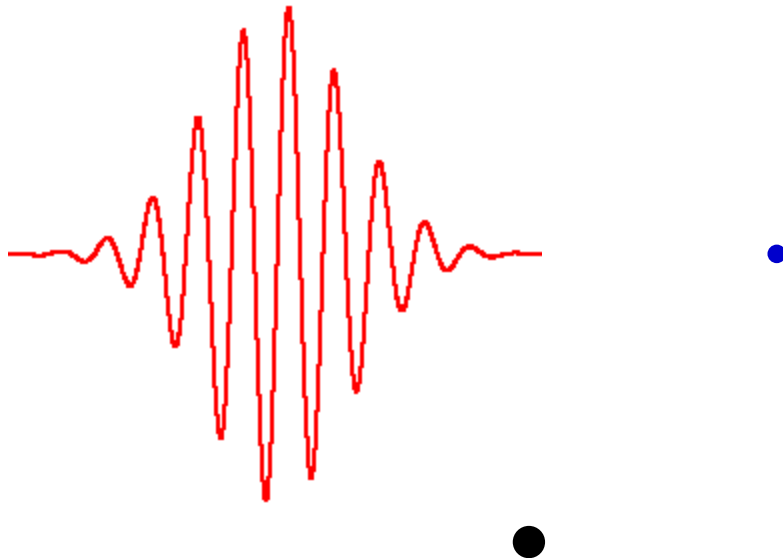
 dépendance de λ_{las}

Énergie pondéromotrice (quiver energy)

Énergie cinétique moyenne d'un électron dans un champs EM

$$E_q = \frac{e^2 \varepsilon^2}{m\omega^2}$$

 champ électrique



 chauffage des électrons nécessite collisions

Chauffage des électrons par laser

☞ dépendance de λ_{las}

taux de gain d'énergie

$$\frac{dE}{dt} = E_q \times \nu_{coll}$$

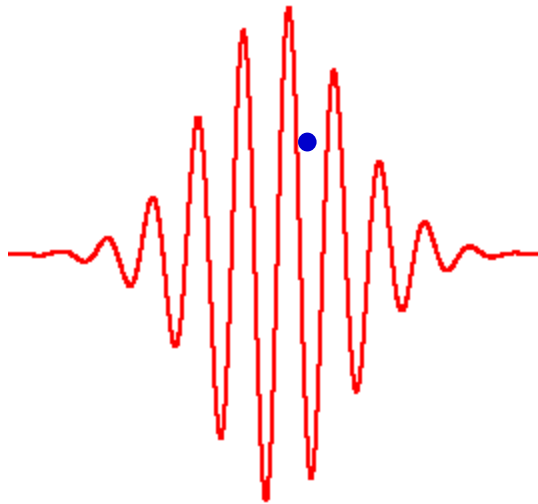
← fréquence de collision

☞ bremsstrahlung inverse

$$\frac{dE}{dt} = \frac{e^2 \varepsilon^2}{m \omega^2} \times \nu_{eff} \frac{\omega^2}{\omega^2 + \nu_{eff}^2}$$

← fréquence de collision effective

(plasma fortement ionisé ☞ interaction avec multiple particules)



$\nu_{eff} > \omega \Rightarrow$ taux de chauffage diminue avec ν_{eff}

collisions multiples au cours d'un cycle optique

$\nu_{eff} < \omega \Rightarrow$ taux de chauffage diminue avec ω

☞ taux de chauffage augmente avec λ_{las}^2

Chauffage des électrons par laser

☞ dépendance de λ_{las}

laser

longueur d'onde λ_{las}

durée d'impulsion τ_{las}

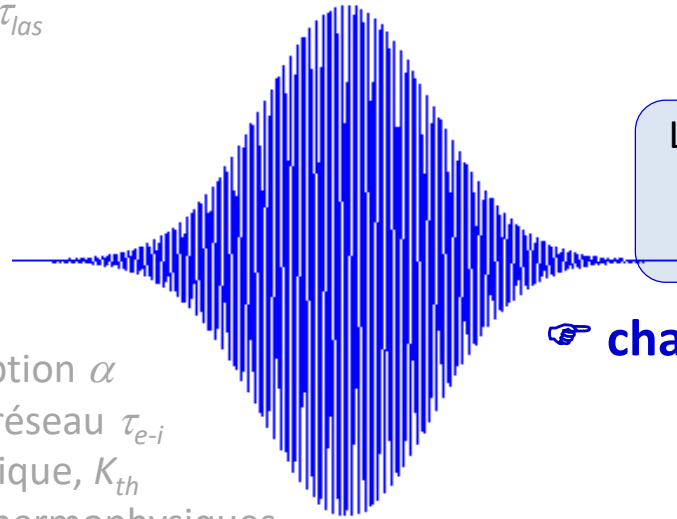
énergie E_{las}

fluence F_{las}

focalisation, ...

bremstrahlung inverse

$$\frac{dE}{dt} = \frac{e^2 \varepsilon^2}{m \omega^2} \times v_{eff} \frac{\omega^2}{\omega^2 + v_{eff}^2}$$



Laser à excimère ArF 193 nm

$$E_{photon} = 6,42 \text{ eV}$$

$$\omega = 9,8 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

☞ chauffage BI moins efficace

matériau

réflectivité R

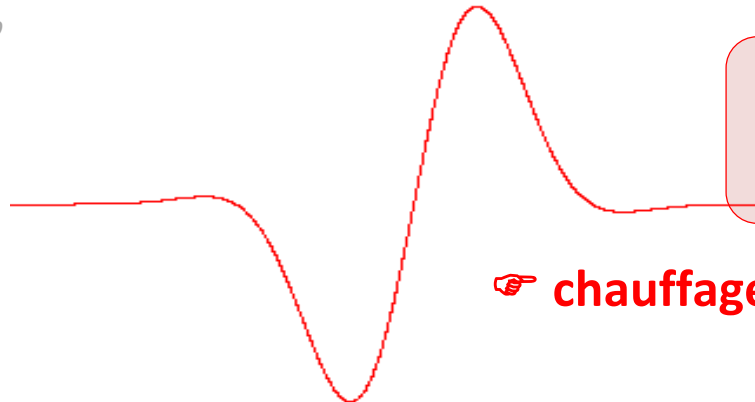
coefficient d'absorption α

couplage électron-réseau τ_{e-i}

conductivité thermique, K_{th}

autres propriétés thermophysiques

$C_p, T_{fus}, T_{vap}, H_{fus}, H_{vap}$



Laser CO₂ 10,6 μm

$$E_{photon} = 0,12 \text{ eV}$$

$$\omega = 1,8 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

☞ chauffage BI plus efficace

environnement

nature du gaz

pression P_{gaz}

liquide

Plasma produit par ablation laser

☞ dépendance de λ_{las}

laser

longueur d'onde λ_{las}

durée d'impulsion τ_{las}

énergie E_{las}

fluence F_{las}

focalisation, ...

matériau

réflectivité R

coefficient d'absorption α

couplage électron-réseau τ_{e-i}

conductivité thermique, K_{th}

autres propriétés thermophysiques

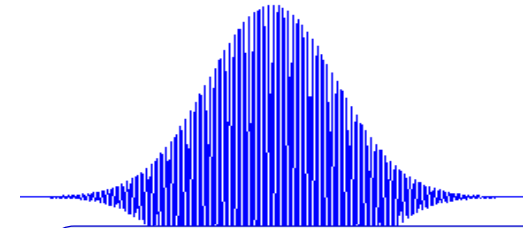
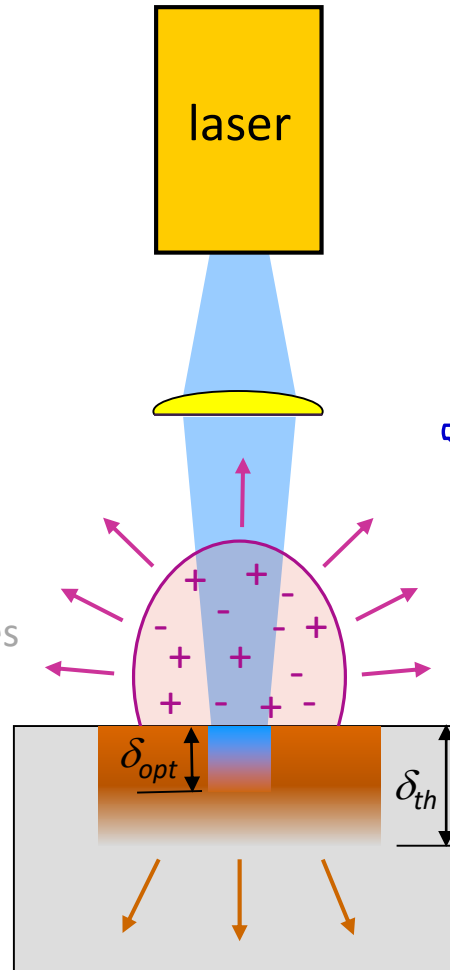
$C_p, T_{fus}, T_{vap}, H_{fus}, H_{vap}$

environnement

nature du gaz

pression P_{gaz}

liquide

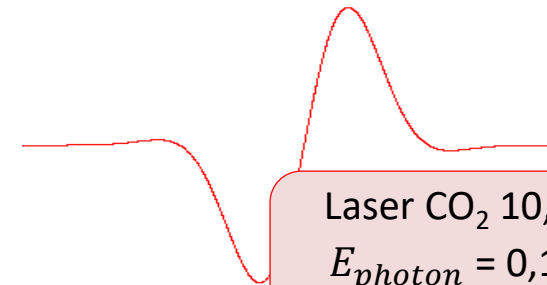


Laser à excimère ArF 193 nm

$$E_{photon} = 6,42 \text{ eV}$$

$$\omega = 9,8 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

☞ faible écrantage plasma



Laser CO₂ 10,6 μm

$$E_{photon} = 0,12 \text{ eV}$$

$$\omega = 1,8 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

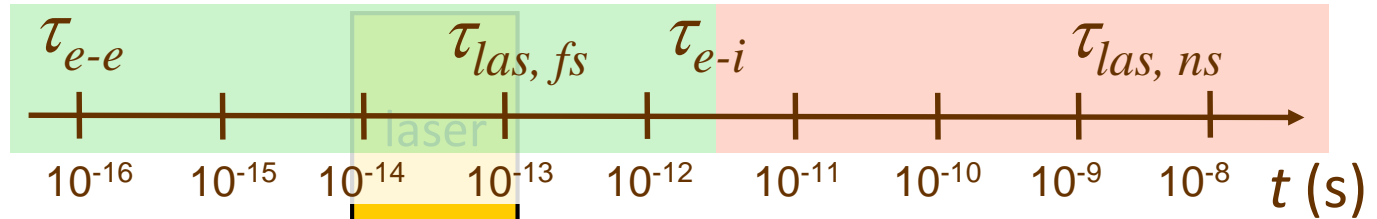
☞ fort écrantage plasma

Plasma produit par ablation laser

☞ dépendance de τ_{las}

laser

longueur d'onde λ_{las}
durée d'impulsion τ_{las}
 énergie E_{las}
 fluence F_{las}
 focalisation, ...



τ_{e-e} = temps de thermalisation e^-e^- (solide)

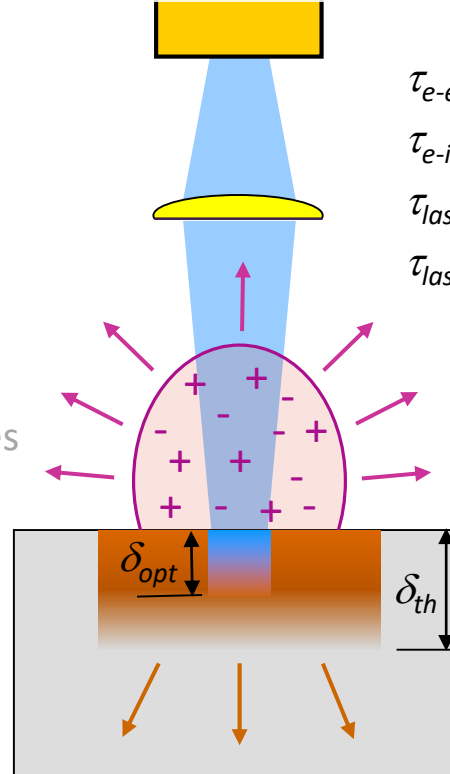
τ_{e-i} = temps de thermalisation e^- - réseau

$\tau_{las, fs}$ = durée d'impulsion laser fs

$\tau_{las, ns}$ = durée d'impulsion laser ns

matériau

réflectivité R
 coefficient d'absorption α
 couplage électron-réseau τ_{e-i}
 conductivité thermique, K_{th}
 autres propriétés thermophysiques
 $C_p, T_{fus}, T_{vap}, H_{fus}, H_{vap}$



environnement

nature du gaz
 pression P_{gaz}
 liquide

Plasma produit par ablation laser

☞ dépendance de τ_{las}

laser

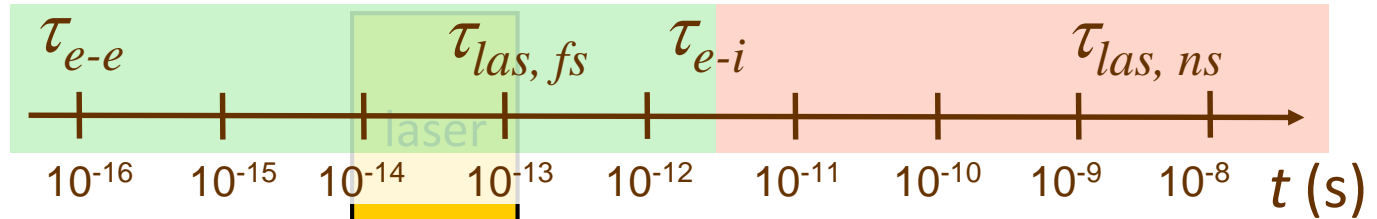
longueur d'onde λ_{las}

durée d'impulsion τ_{las}

énergie E_{las}

fluence F_{las}

focalisation, ...



τ_{e-e} = temps de thermalisation e^-e^- (solide)

τ_{e-i} = temps de thermalisation e^- - réseau

$\tau_{las, fs}$ = durée d'impulsion laser fs

$\tau_{las, ns}$ = durée d'impulsion laser ns

laser fs ☞ $\tau_{las} < \tau_{e-i}$

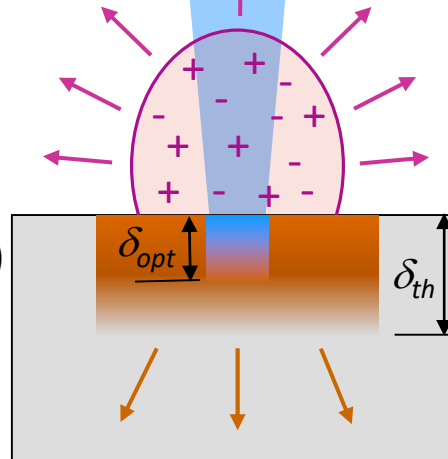
laser ns ☞ $\tau_{las} > \tau_{e-i}$

⇒ chauffage efficace des électrons

⇒ ions restent froids (pendant τ_{las})

☞ **génération de rayons XUV**

☞ **plasmas hors équilibre**



⇒ ablation pendant τ_{las}

⇒ interaction laser-vapeur

⇒ réchauffage (excitation, ionisation)

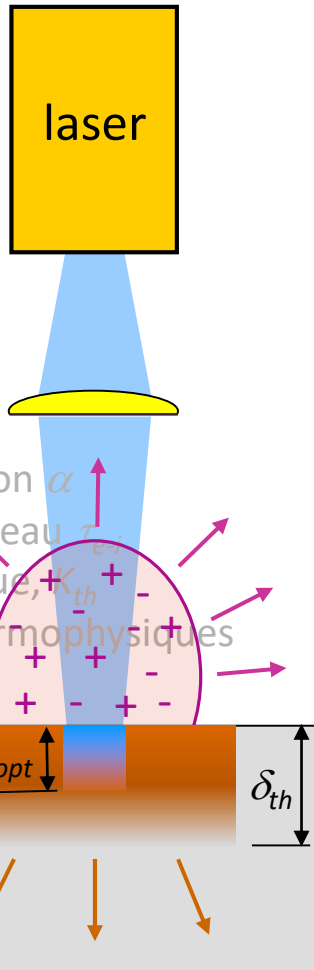
☞ **plasma thermique, rayonnement visible**

Plasma produit par ablation laser

☞ dépend de nombreux paramètres

laser

longueur d'onde λ_{las}
 durée d'impulsion τ_{las}
 énergie E_{las}
 fluence F_{las}
 focalisation, ...



matériau

réflectivité R
 coefficient d'absorption α
 couplage électron-réseau τ_{e-n}
 conductivité thermique κ_{th}
 autres propriétés thermophysiques
 $C_p, T_{fus}, T_{vap}, H_{fus}, H_{vap}$

environnement

nature du gaz
 pression P_{gaz}
 liquide

☞ grande variabilité des propriétés

⇒ applications nombreuses

- traitement et nettoyage de surface
- micro-usinage et nanostructuration des matériaux
- dépôt de couches minces (PLD)
- génération de nanoparticules
- analyse des matériaux (LIBS)
- source de rayonnements XUV, ...

☞ complexité des mécanismes mis en jeu

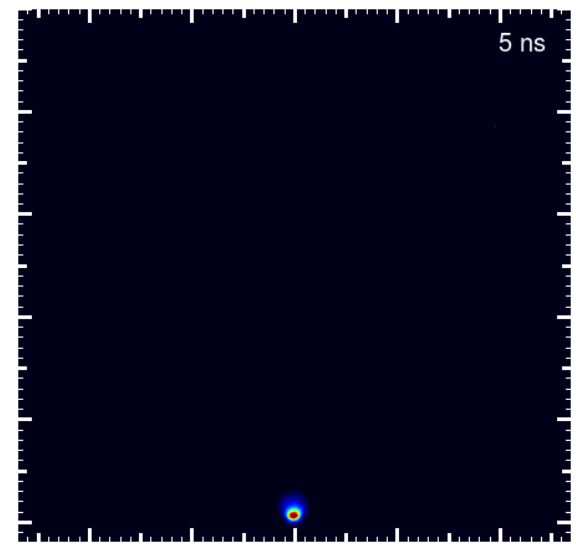
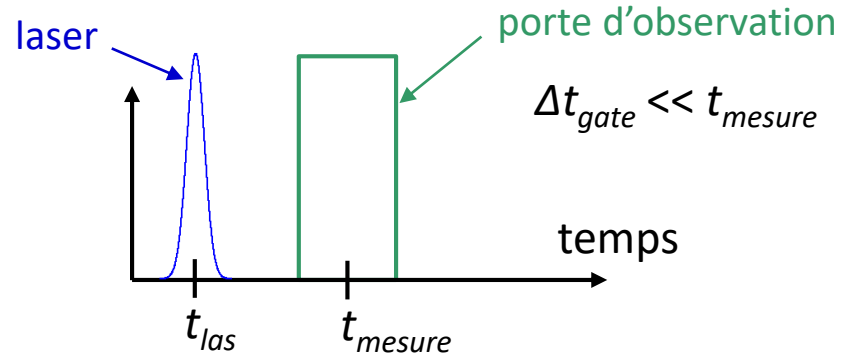
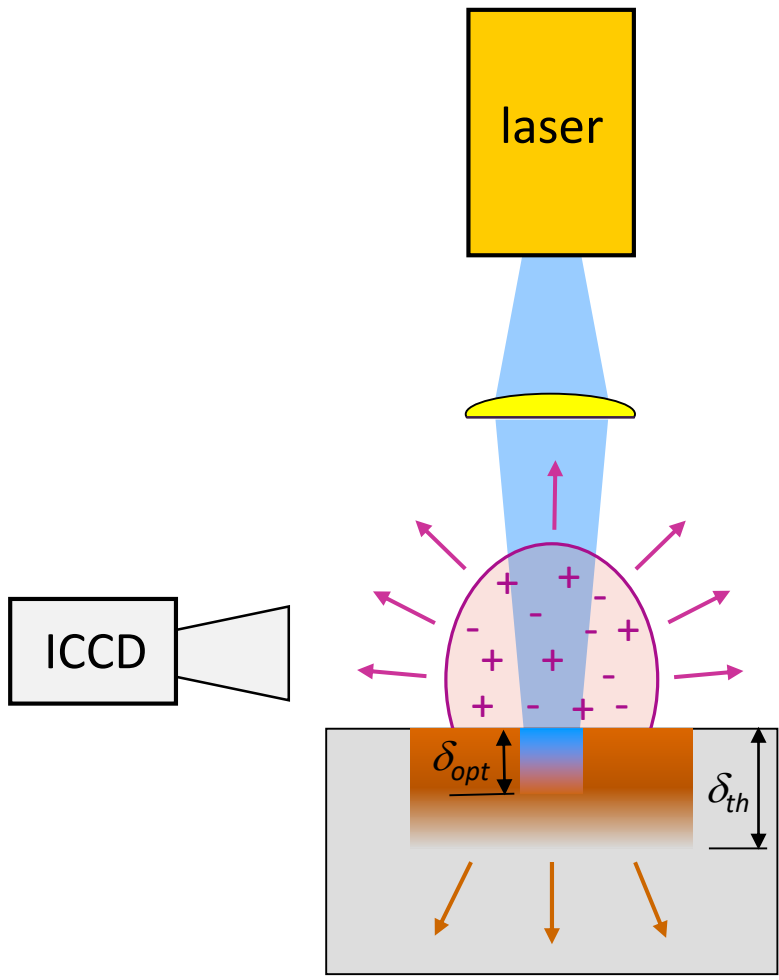
⇒ modélisation difficile

- aide à la compréhension
- description de tout le processus impossible à ce jour

☞ diagnostic couplé à la modélisation

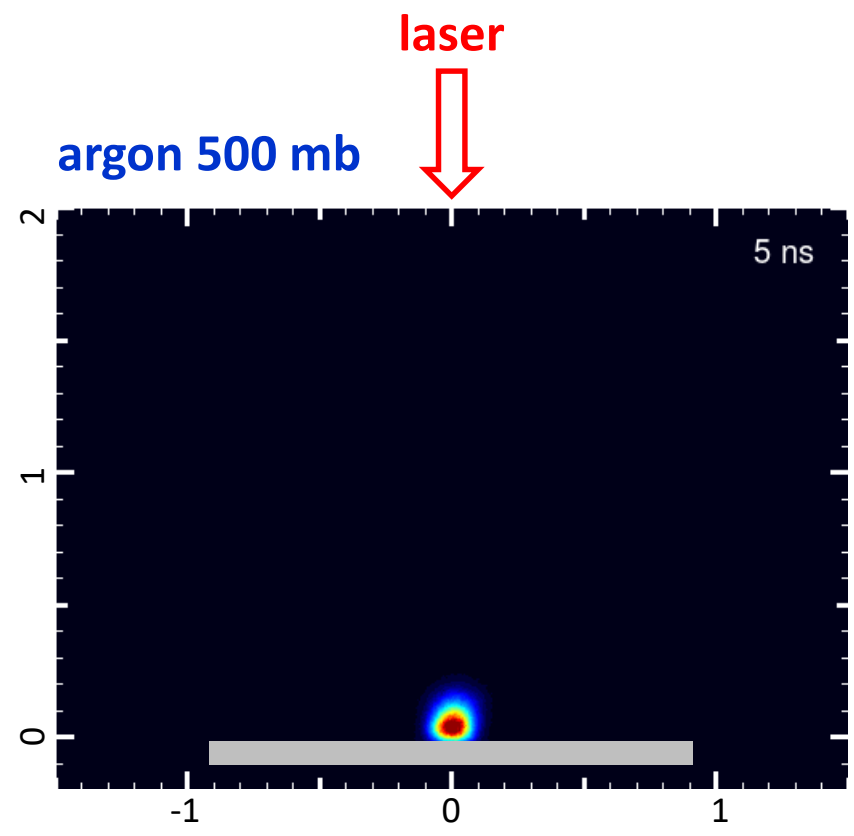
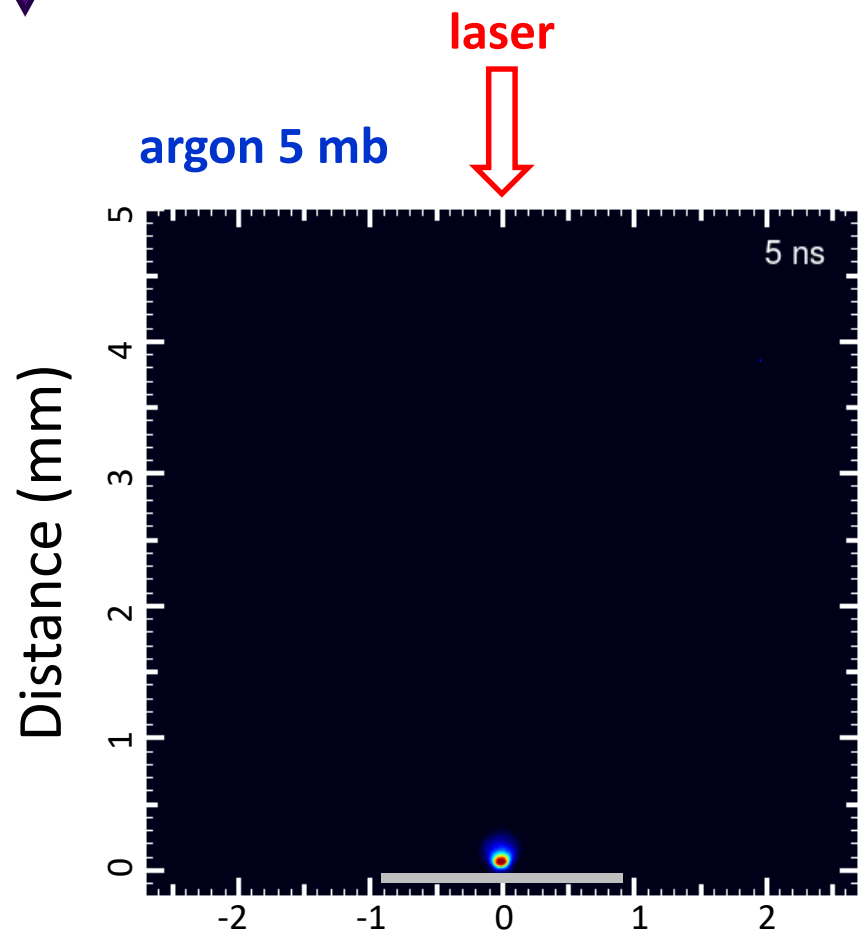
Imagerie rapide

à l'aide d'une caméra ICCD



Imagerie rapide

ablation de silice fondue
 $E_{las} = 6 \text{ mJ}$, $\lambda = 266 \text{ nm}$, $\tau = 5 \text{ ns}$

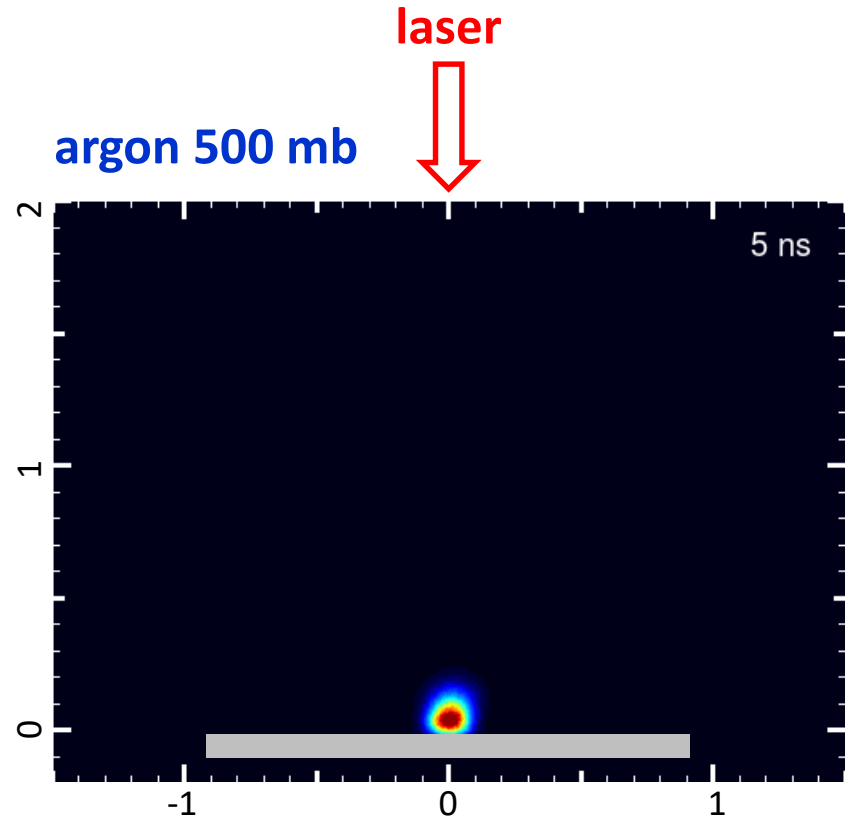
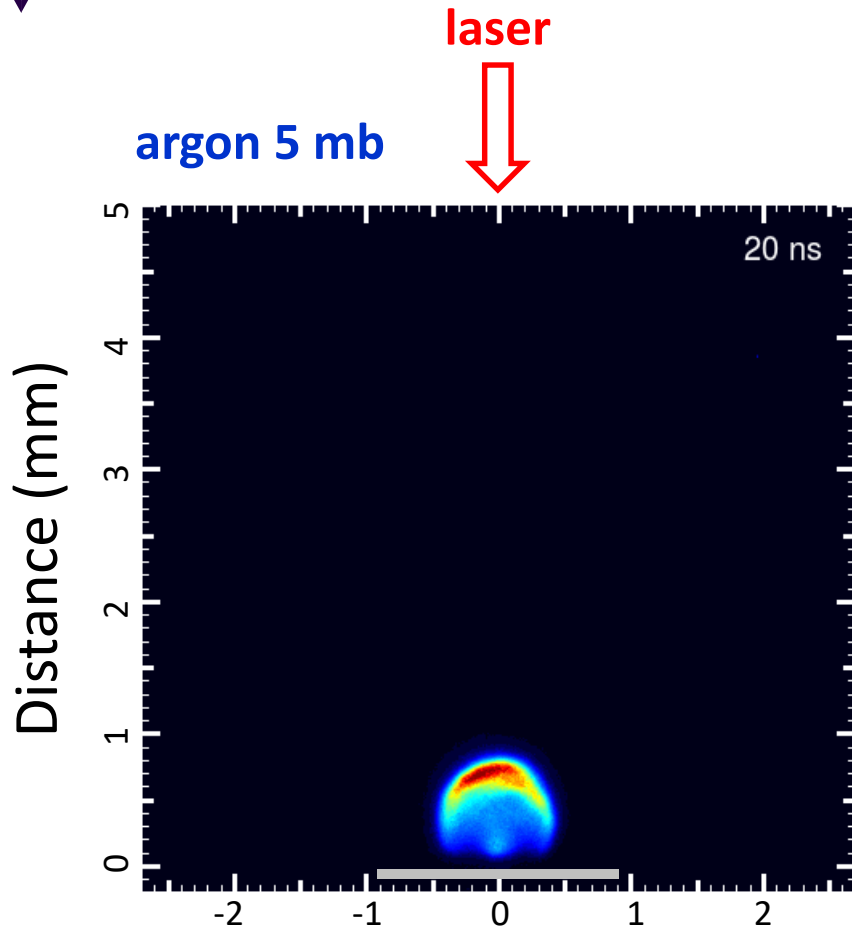


Position latérale (mm)

Imagerie rapide

ablation de silice fondue

$$E_{las} = 6 \text{ mJ}, \lambda = 266 \text{ nm}, \tau = 5 \text{ ns}$$

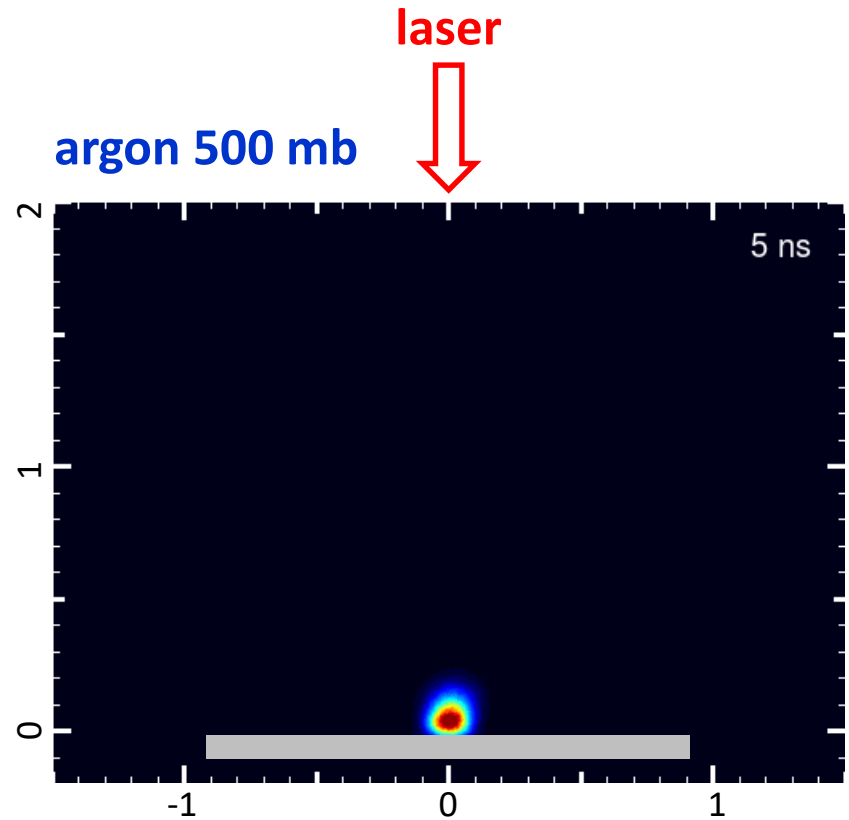
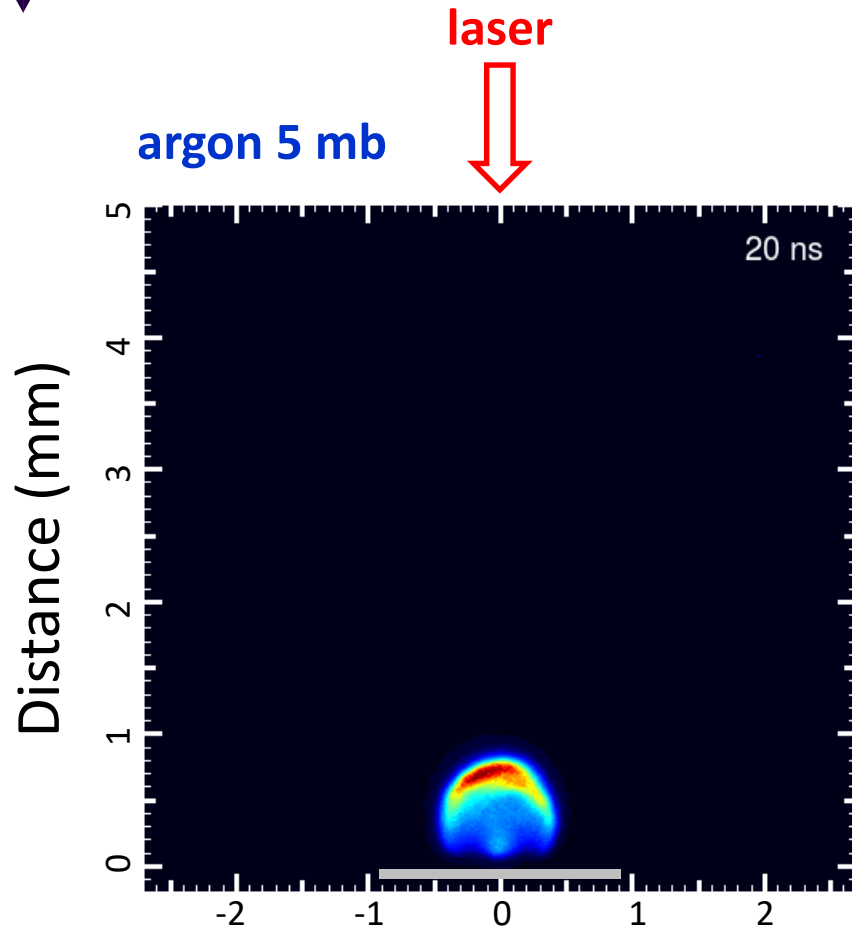


Position latérale (mm)

Imagerie rapide

ablation de silice fondue

$$E_{las} = 6 \text{ mJ}, \lambda = 266 \text{ nm}, \tau = 5 \text{ ns}$$

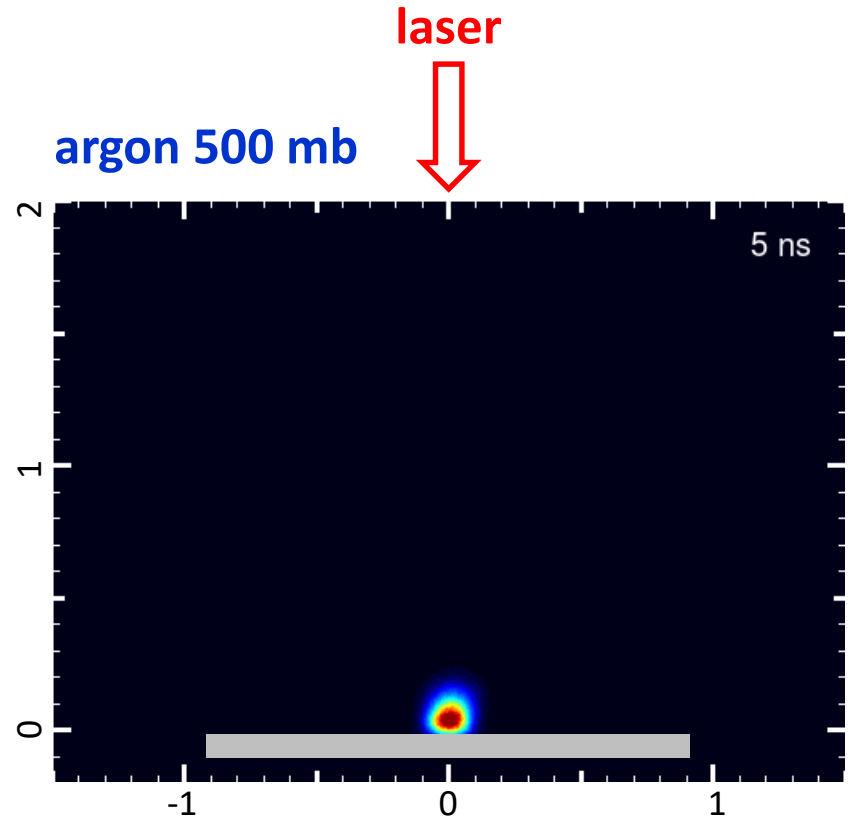
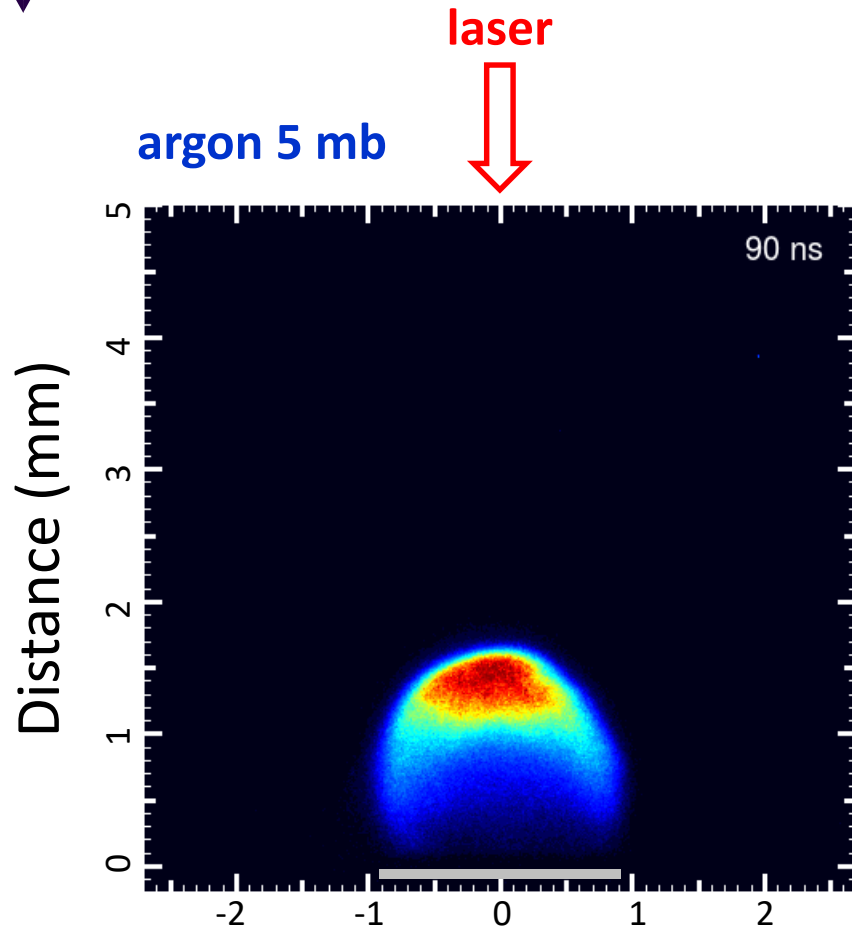


Position latérale (mm)

Imagerie rapide

ablation de silice fondue

$$E_{las} = 6 \text{ mJ}, \lambda = 266 \text{ nm}, \tau = 5 \text{ ns}$$

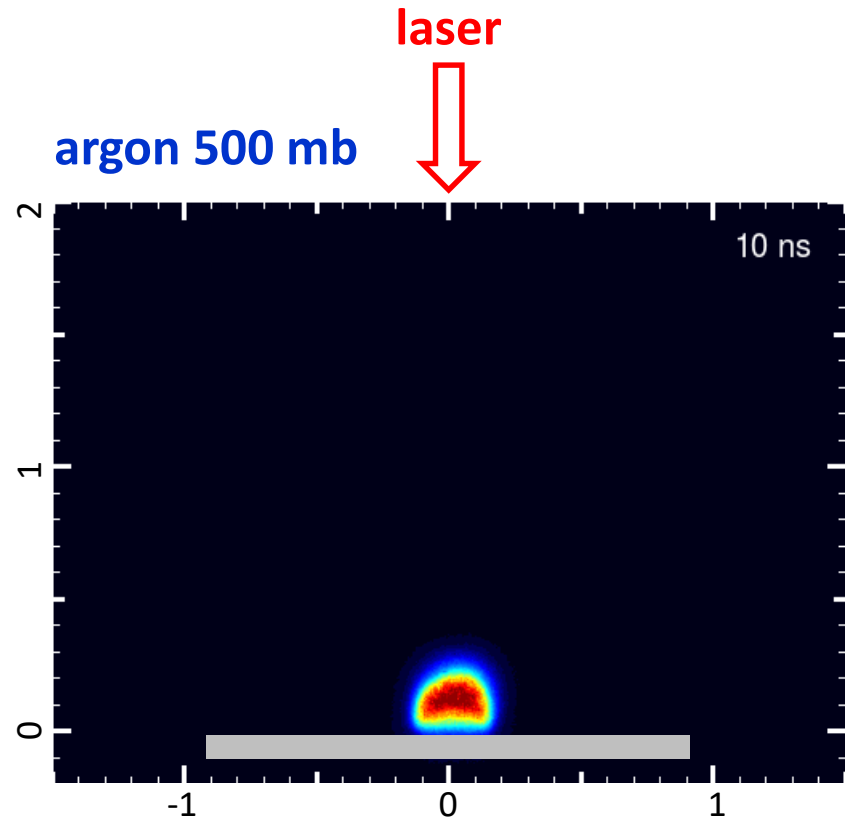
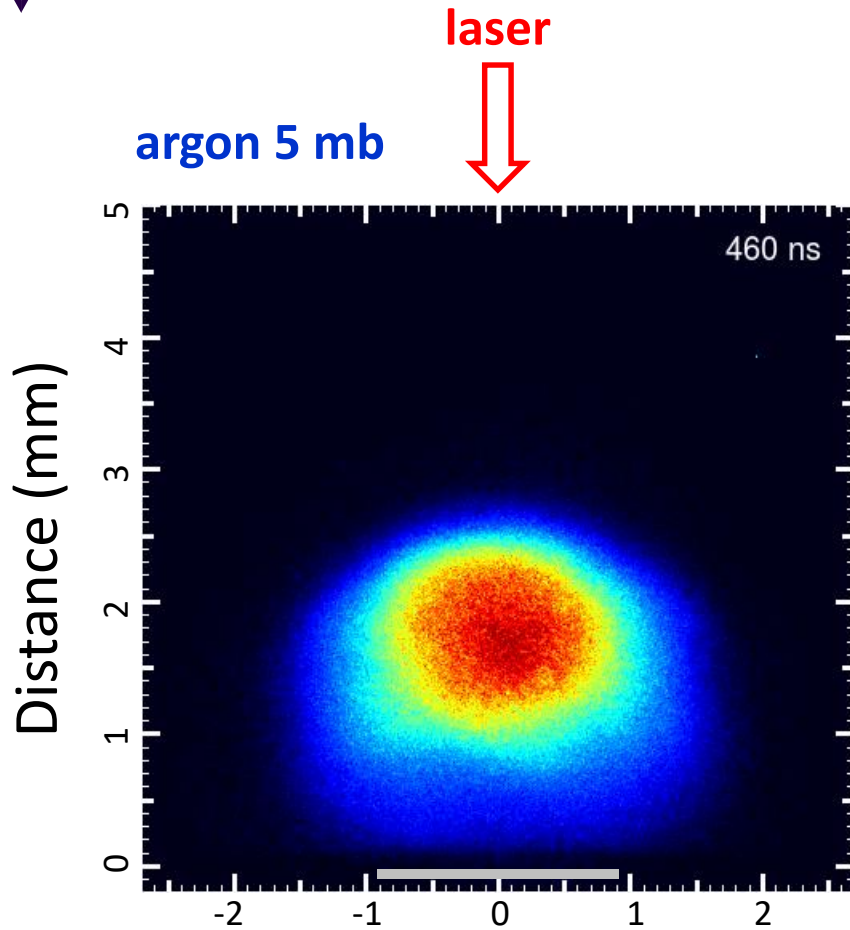


Position latérale (mm)

Imagerie rapide

ablation de silice fondue

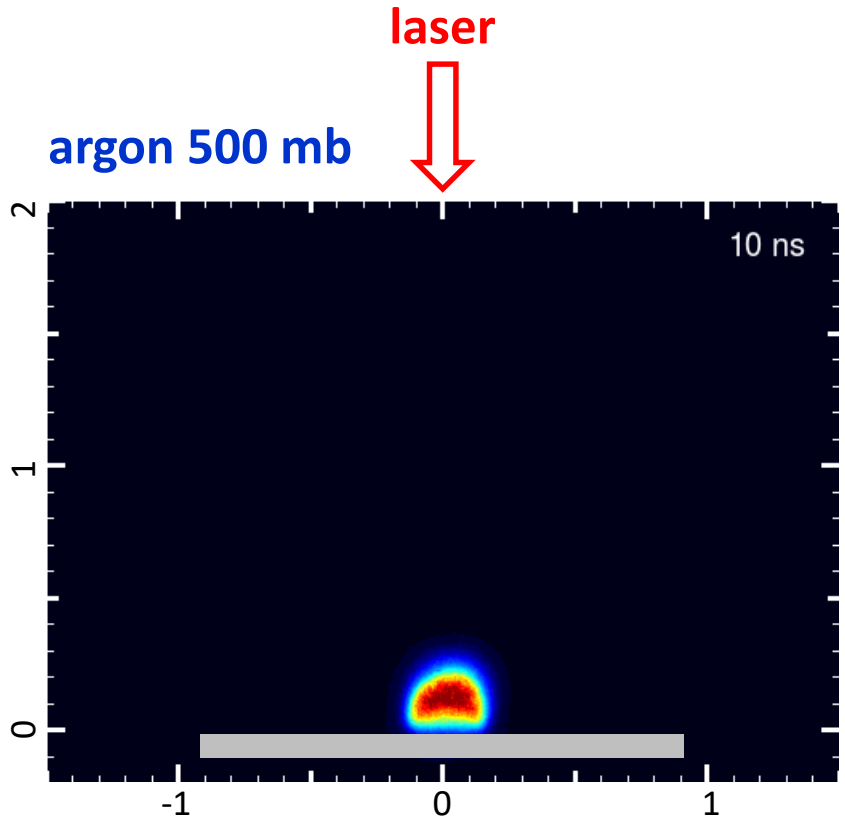
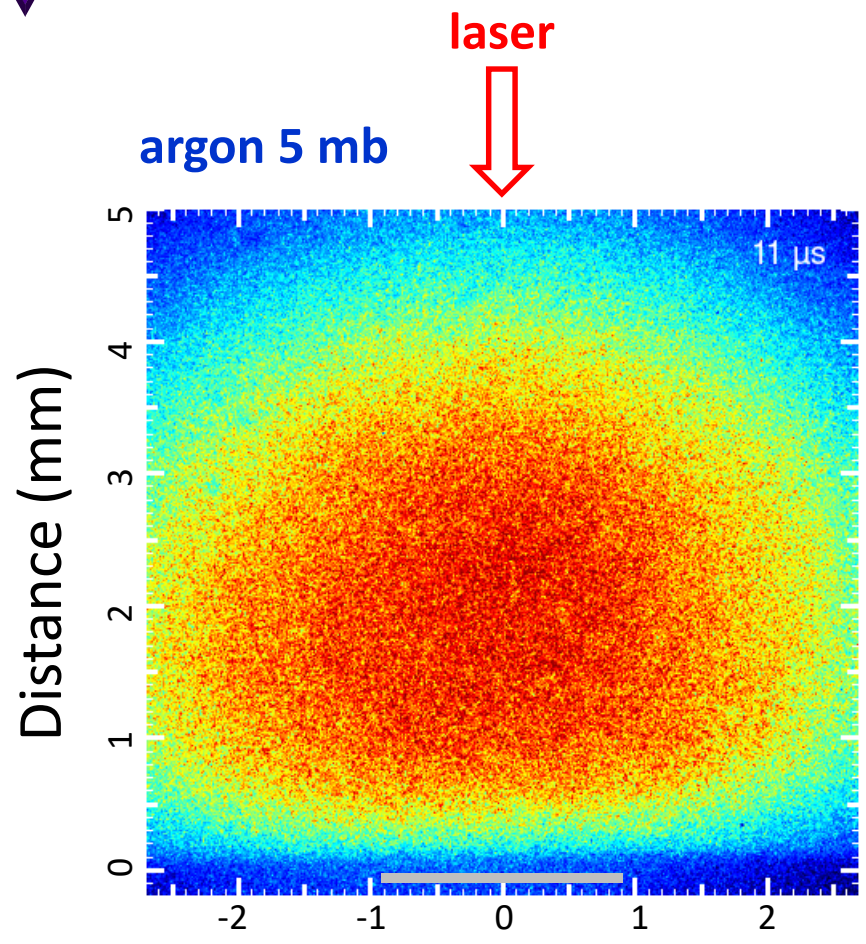
$$E_{las} = 6 \text{ mJ}, \lambda = 266 \text{ nm}, \tau = 5 \text{ ns}$$



Position latérale (mm)

Imagerie rapide

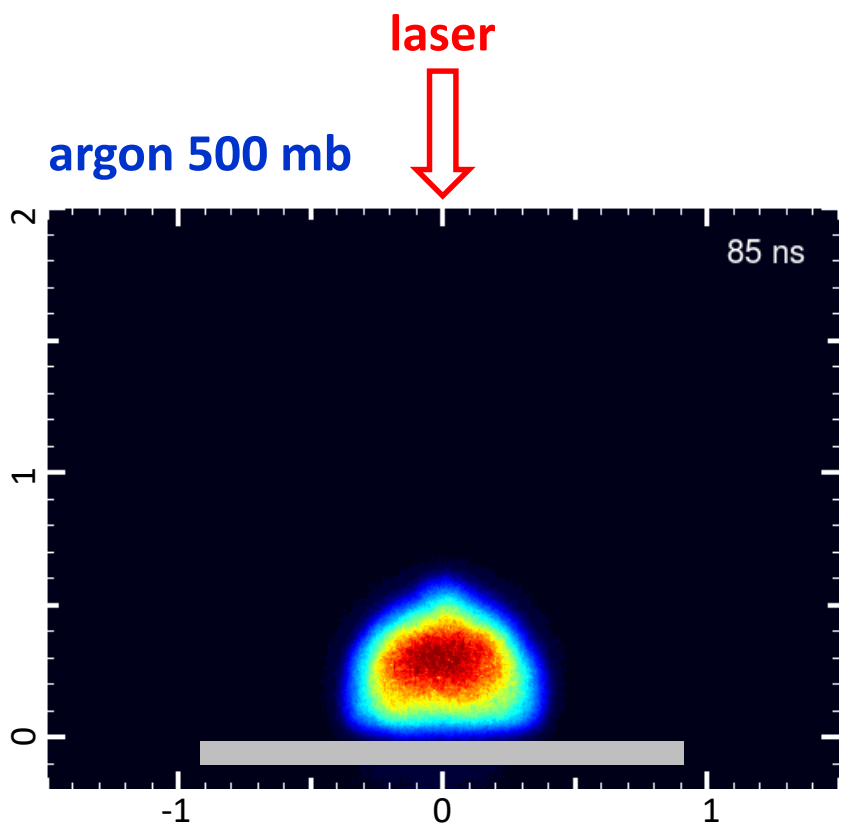
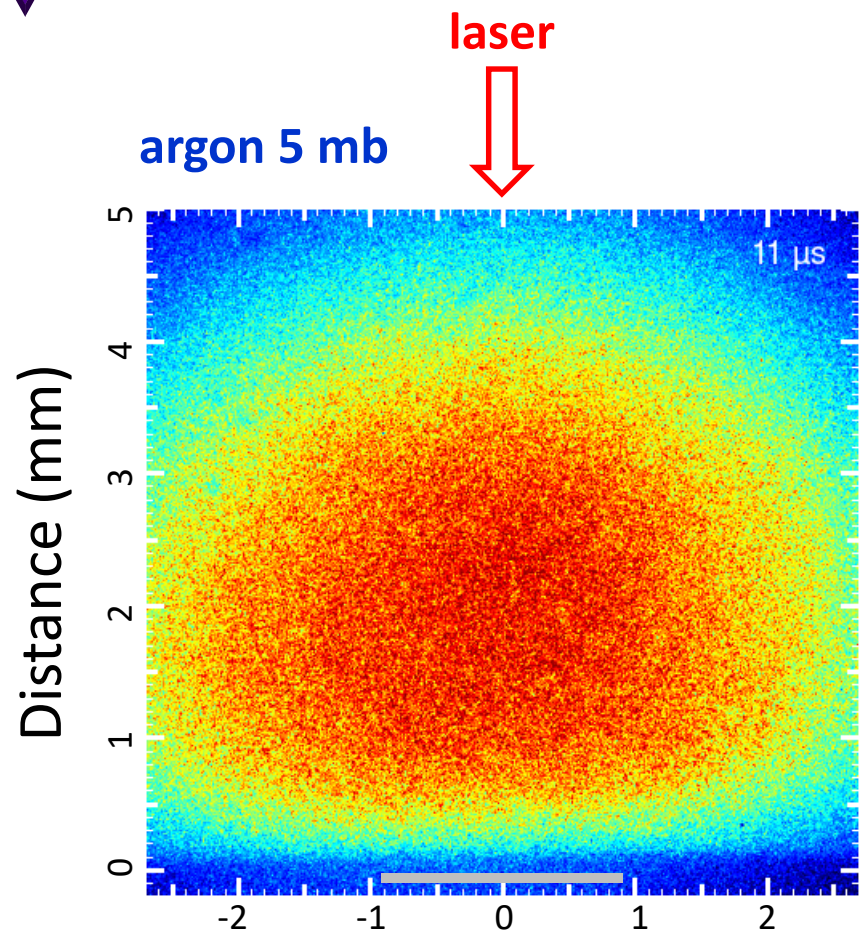
ablation de silice fondue
 $E_{las} = 6 \text{ mJ}$, $\lambda = 266 \text{ nm}$, $\tau = 5 \text{ ns}$



Position latérale (mm)

Imagerie rapide

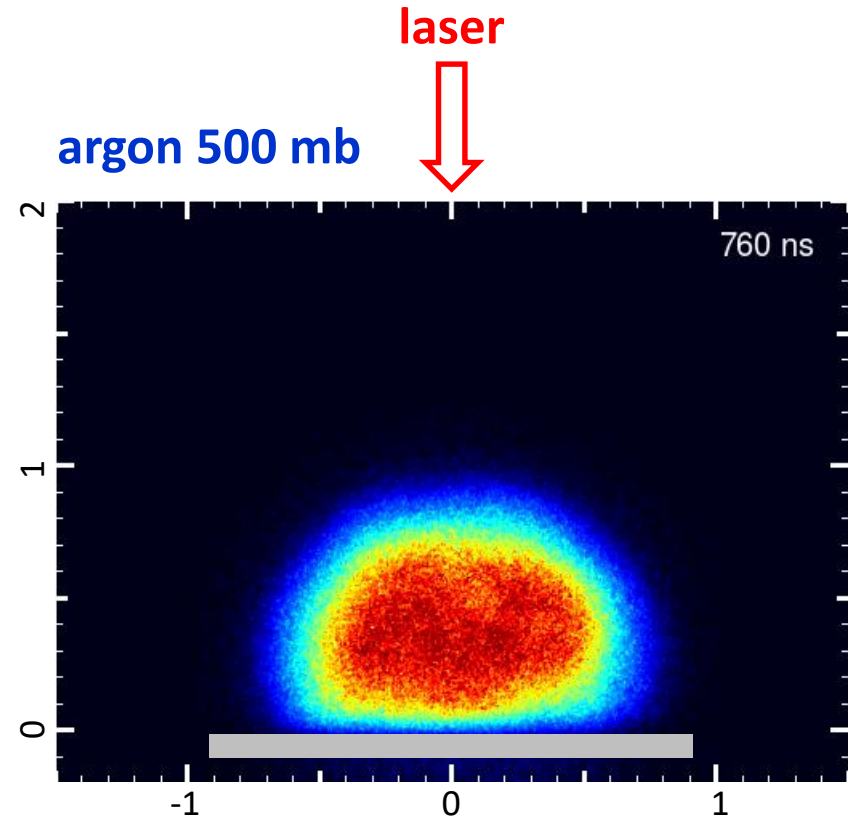
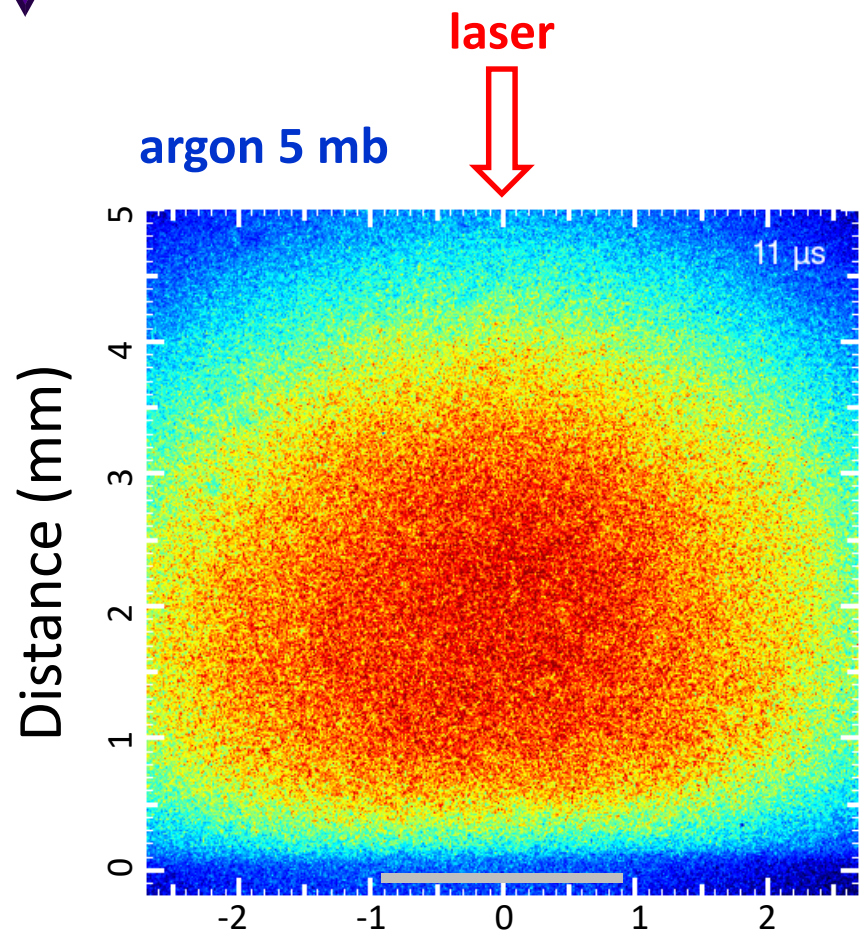
ablation de silice fondue
 $E_{las} = 6 \text{ mJ}$, $\lambda = 266 \text{ nm}$, $\tau = 5 \text{ ns}$



Position latérale (mm)

Imagerie rapide

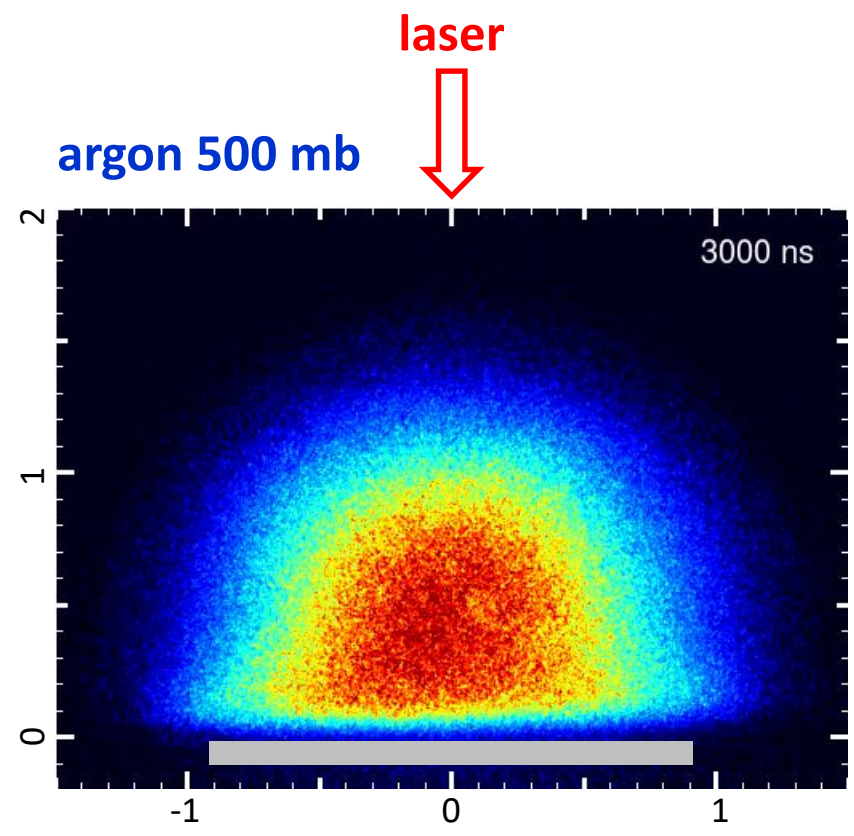
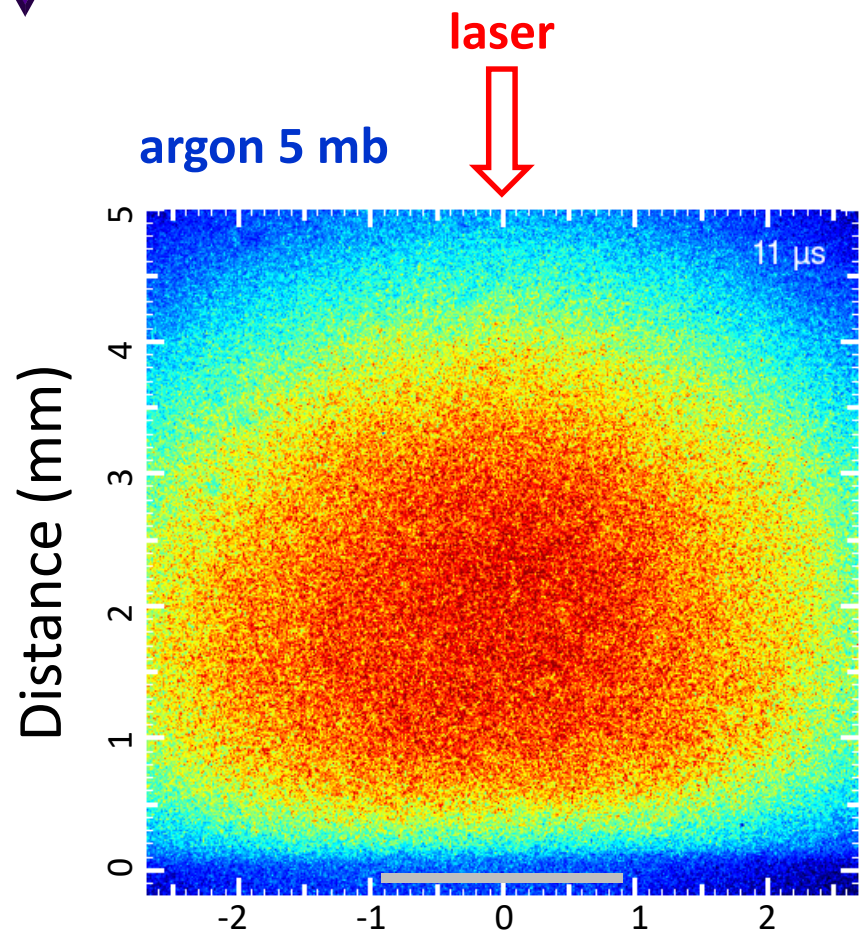
ablation de silice fondue
 $E_{las} = 6 \text{ mJ}$, $\lambda = 266 \text{ nm}$, $\tau = 5 \text{ ns}$



Position latérale (mm)

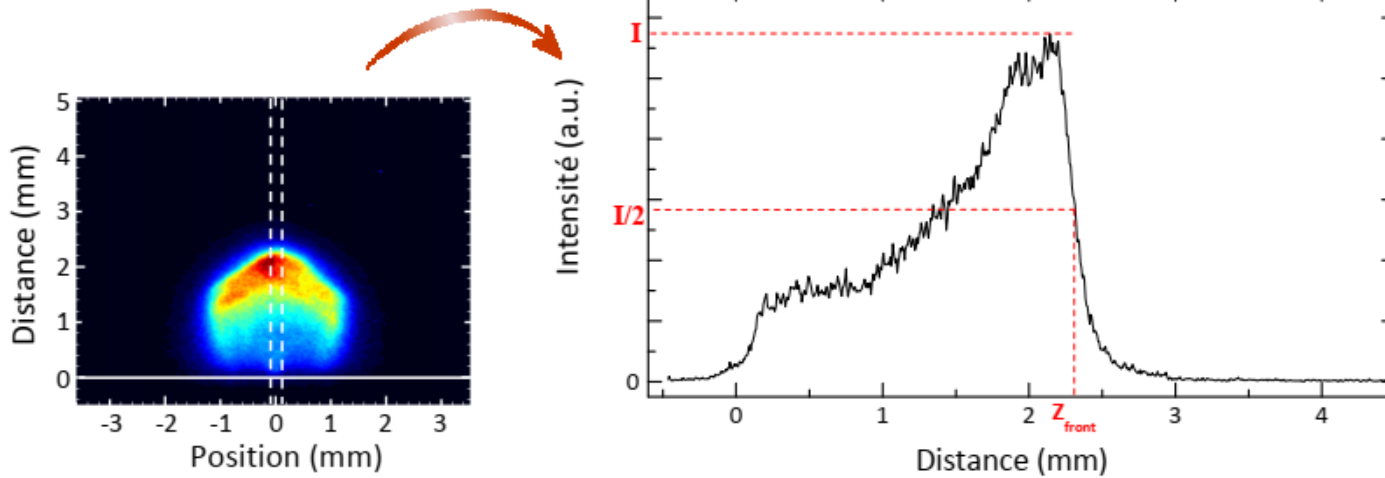
Imagerie rapide

ablation de silice fondue
 $E_{las} = 6 \text{ mJ}$, $\lambda = 266 \text{ nm}$, $\tau = 5 \text{ ns}$

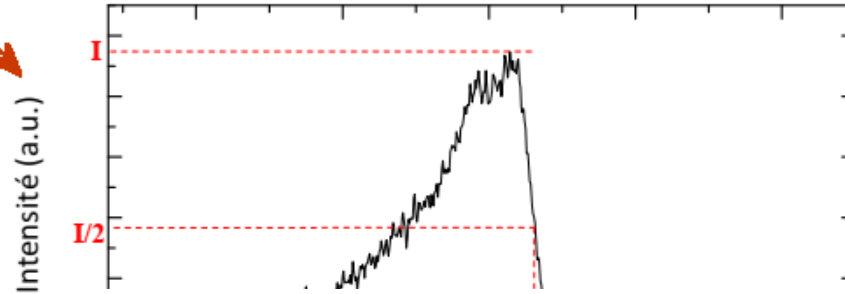
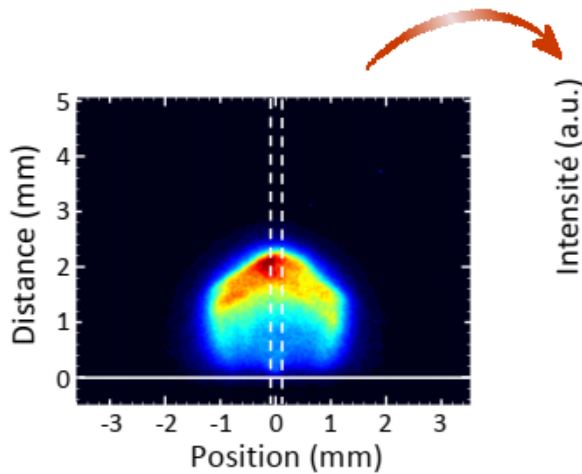


Position latérale (mm)

caractérisation de la dynamique d'expansion



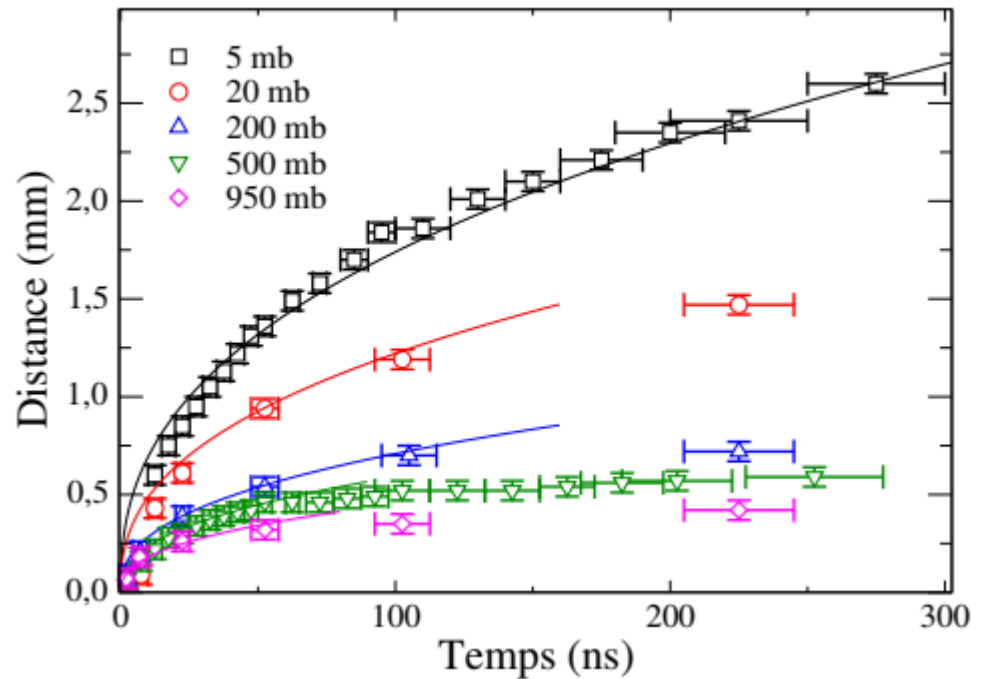
caractérisation de la dynamique d'expansion



modèle Sedov-Taylor

☞ propagation l'onde de choc

$$Z = \gamma \left(\frac{E_0}{\rho_0} \right)^{1/2} t^{2/5}$$



Plasma produit par ablation laser

☞ dépendance de λ_{las}

laser

longueur d'onde λ_{las}

durée d'impulsion τ_{las}

énergie E_{las}

fluence F_{las}

focalisation, ...

matériau

réflectivité R

coefficient d'absorption α

couplage électron-réseau τ_{e-i}

conductivité thermique, K_{th}

autres propriétés thermophysiques

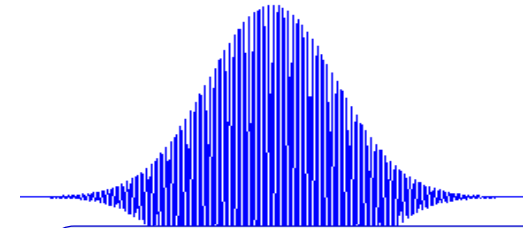
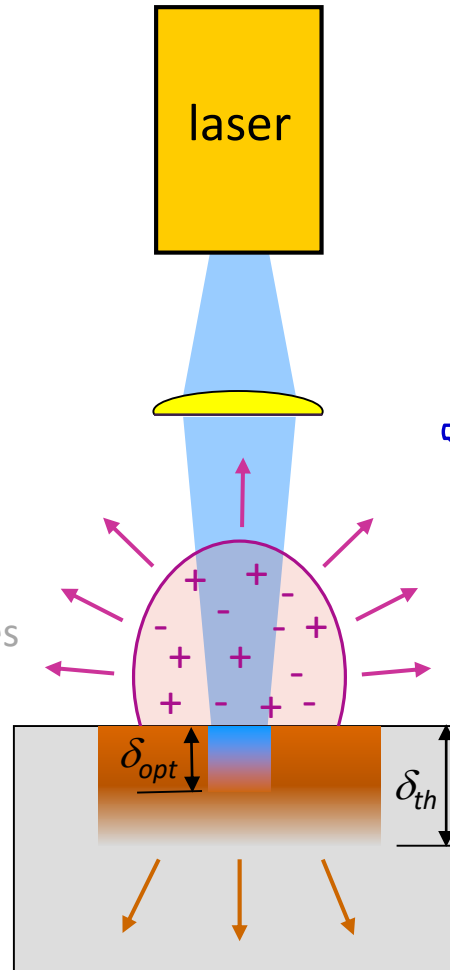
$C_p, T_{fus}, T_{vap}, H_{fus}, H_{vap}$

environnement

nature du gaz

pression P_{gaz}

liquide

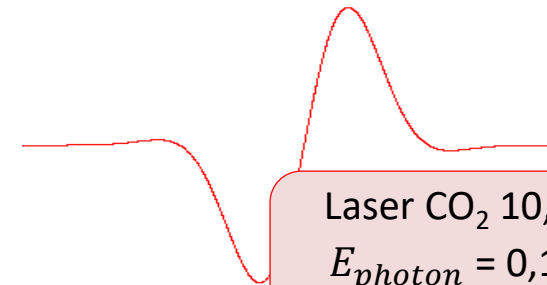


Laser à excimère ArF 193 nm

$$E_{photon} = 6,42 \text{ eV}$$

$$\omega = 9,8 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

☞ faible écrantage plasma



Laser CO₂ 10,6 μm

$$E_{photon} = 0,12 \text{ eV}$$

$$\omega = 1,8 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

☞ fort écrantage plasma

Densité critique

= densité électronique pour laquelle le plasma devient opaque

☞ champs électrique laser crée écarts de neutralité

⇒ le plasma réagit

fréquence plasma (électronique) $\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m}}$

⇒ onde EM peut se propager si $\omega_{rad} > \omega_p$

densité critique = n_e pour laquelle $\omega_p = \omega_{rad}$

exemple : laser CO₂ ($\lambda_{las} = 10,6 \mu\text{m}$) $\Rightarrow n_{crit} = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

☞ plasma atmosphérique opaque pour laser CO₂

Densité critique

= densité électronique pour laquelle le plasma devient opaque

☞ champs électrique laser crée écarts de neutralité

⇒ le plasma réagit

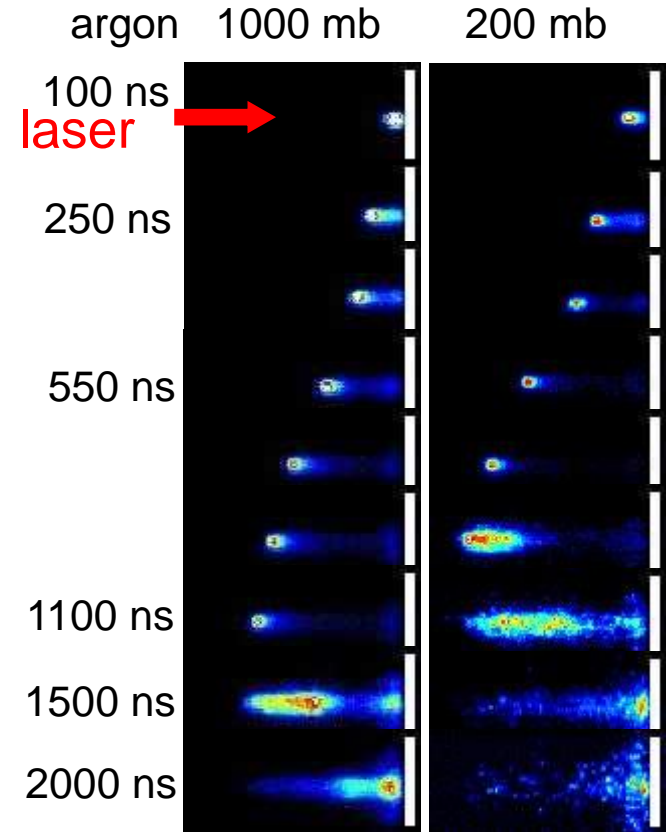
fréquence plasma (électronique) $\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m}}$

⇒ onde EM peut se propager si $\omega_{rad} > \omega_p$

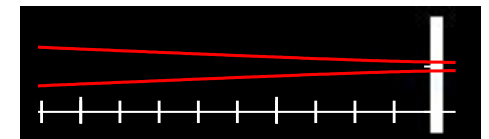
densité critique = n_e pour laquelle $\omega_p = \omega_{rad}$

exemple : laser CO₂ ($\lambda_{las} = 10,6 \mu\text{m}$) ⇒ $n_{crit} = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

☞ plasma atmosphérique opaque pour laser CO₂

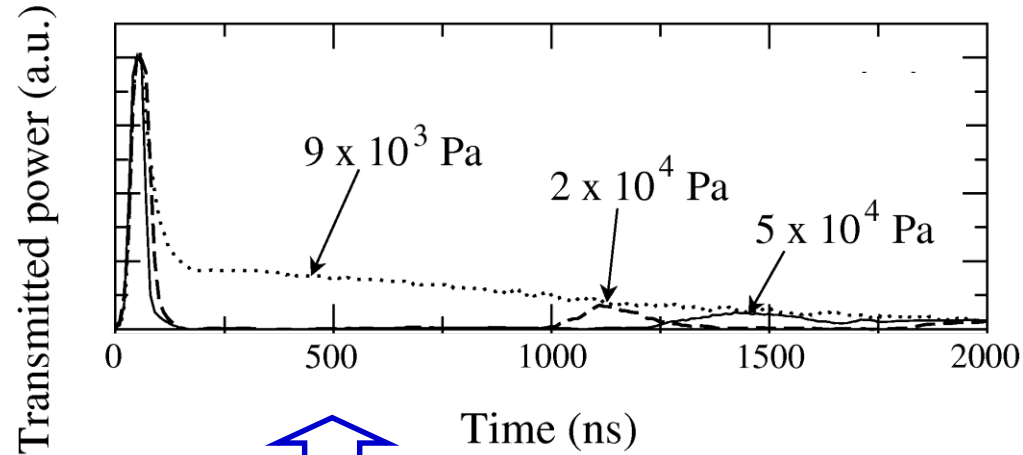
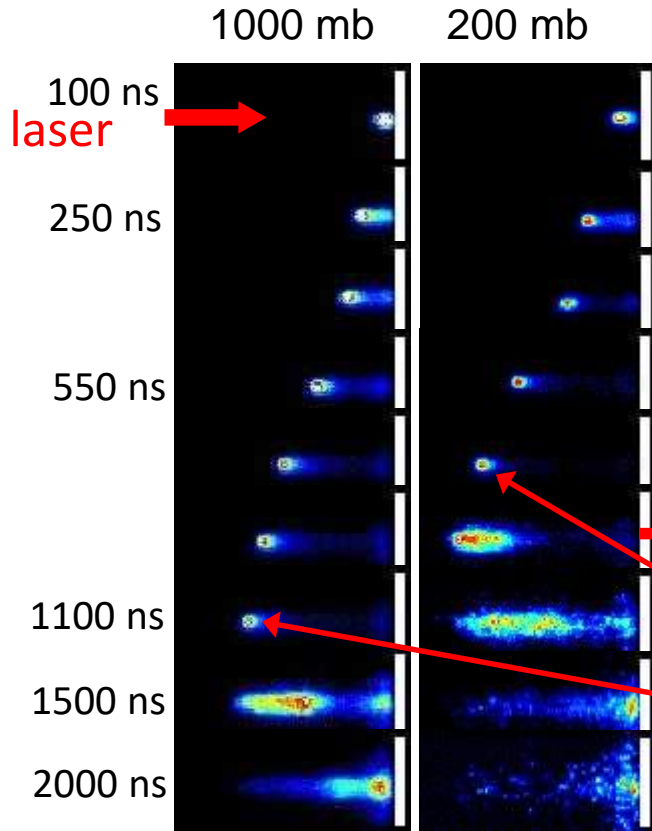


☞ **génération d'une onde d'absorption**



Imagerie rapide

- laser CO₂ 10,6 μm ☞ densité critique = 10¹⁹ cm⁻³
($\omega_{\text{laser}} = \omega_{\text{plasma}}$)

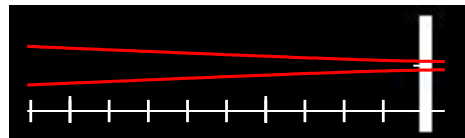


☞ mesure à travers orifice

$$5 \times 10^6 \text{ Wcm}^{-2} \cong I_{pb} = 2 \times 10^9 \frac{\Delta_{ion} [\text{eV}]}{\lambda^2 [\mu\text{m}^2] M [\text{amu}]}$$

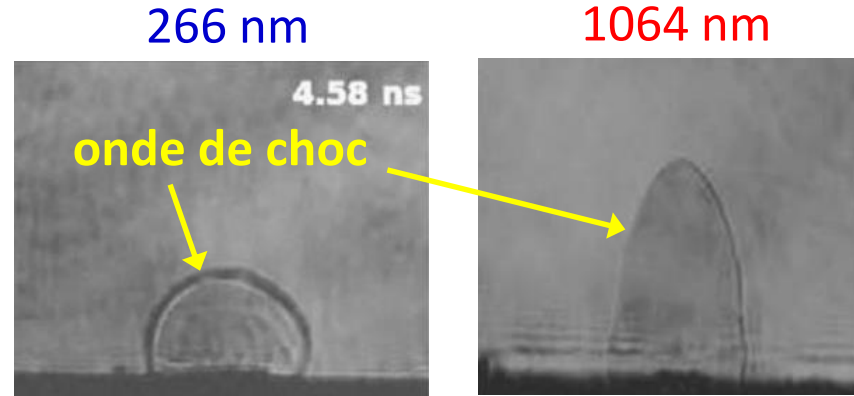
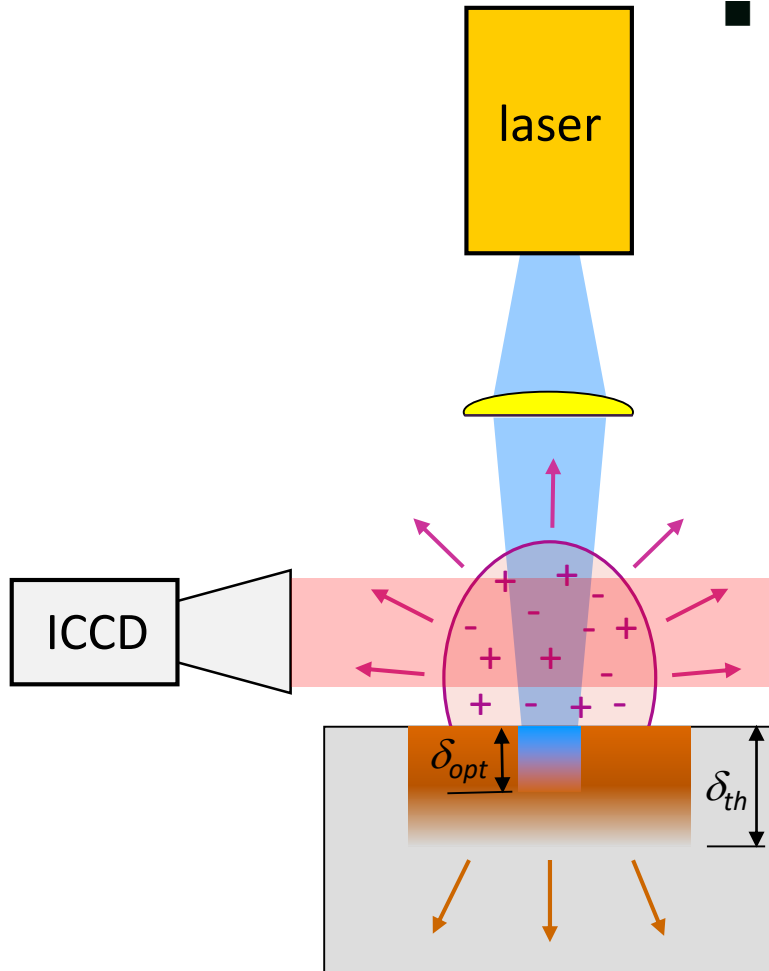
⇒ fort écrantage plasma

☞ obturateur à plasma



Ombroscopie ultrarapide

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



Nylon 6,6
40 Jcm⁻²
air

Boueri et al., Appl. Surf. Sci. 2009

laser infrarouge

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

☞ dépendance de P_{gaz}

laser

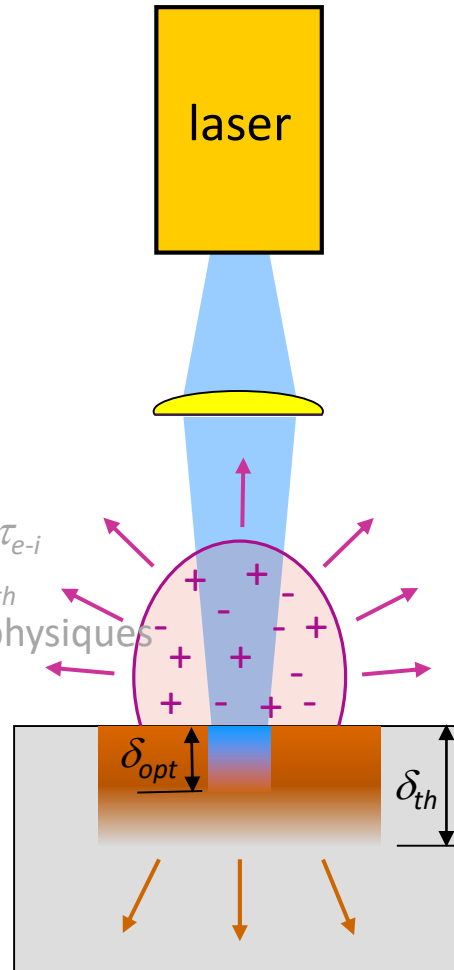
longueur d'onde λ_{las}
durée d'impulsion τ_{las}
énergie E_{las}
fluence F_{las}
focalisation, ...

matériau

réflectivité R
coefficient d'absorption α
couplage électron-réseau τ_{e-i}
conductivité thermique, K_{th}
autres propriétés thermophysiques
 $C_p, T_{fus}, T_{vap}, H_{fus}, H_{vap}$

environnement

nature du gaz
pression P_{gaz}
liquide



sous vide

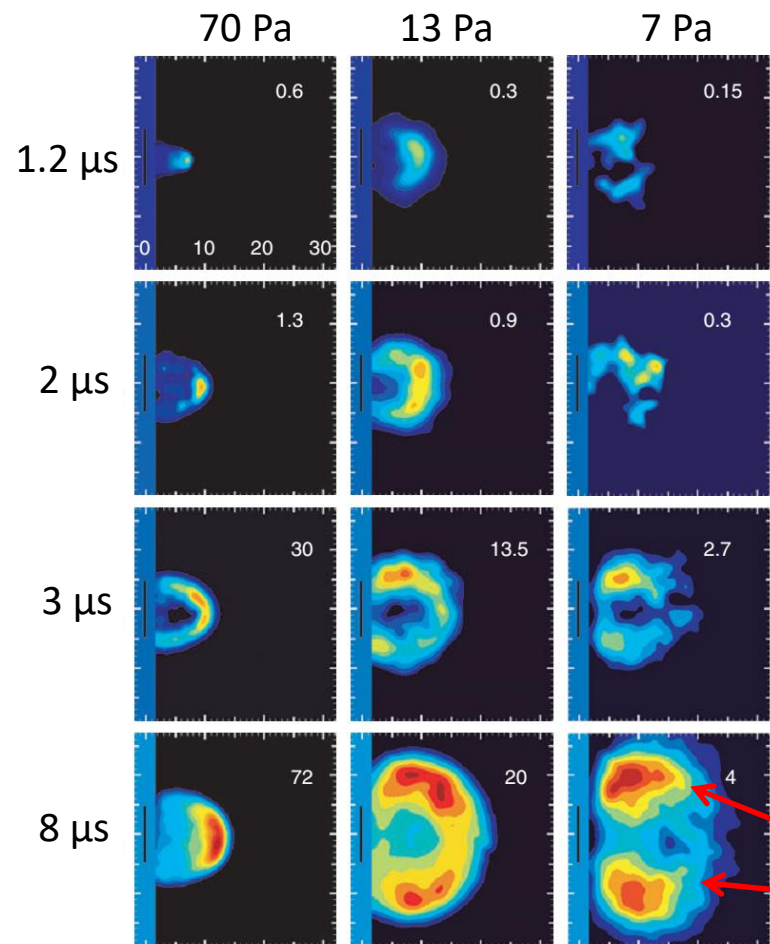
- ⇒ expansion libre
- ⇒ collisions limitées
à la phase initiale d'expansion
- ⇒ état « *d'ionisation congelée* »

en présence d'un gaz

- ⇒ interaction vapeur-gaz
- ⇒ processus collectifs/non-collectifs
(ondes de choc, diffusion, ...)
- ⇒ effet de confinement
- ⇒ durée de vie augmente avec P_{gaz}

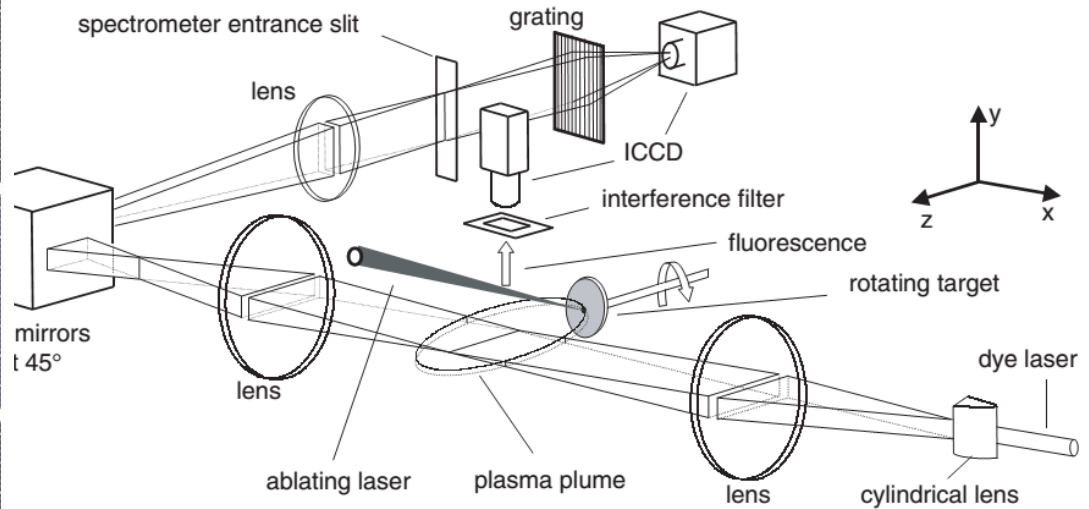
Fluorescence induite par laser

👉 observation du plasma « froid »



ablation d'aluminium sous O₂

excitation de AIO $B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$



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

👉 formation de l'AIO dans le volume d'interdiffusion vapeur-gaz

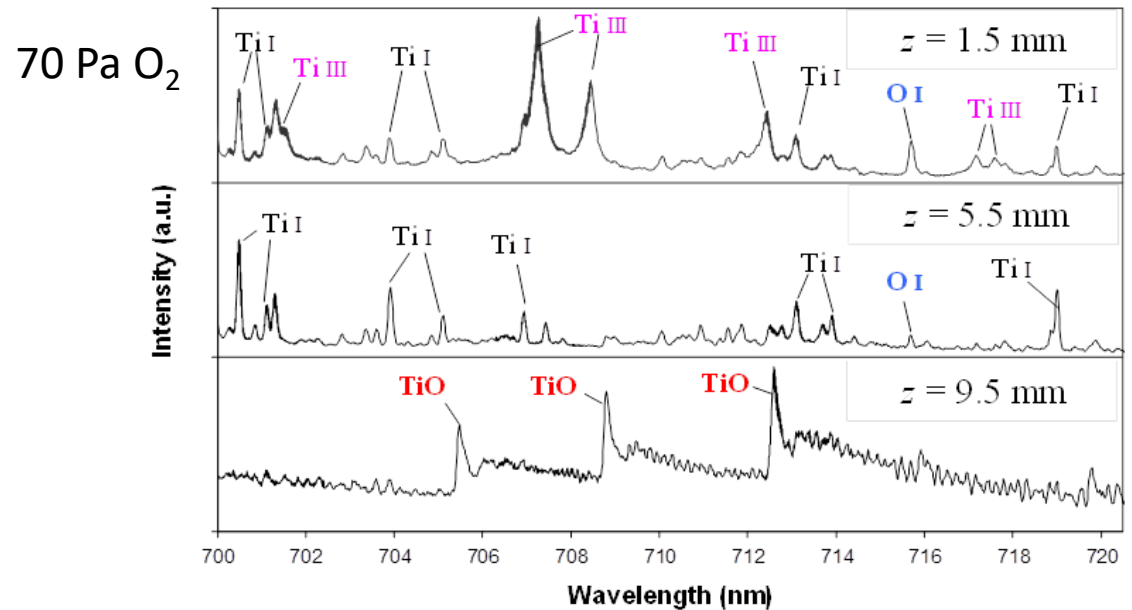
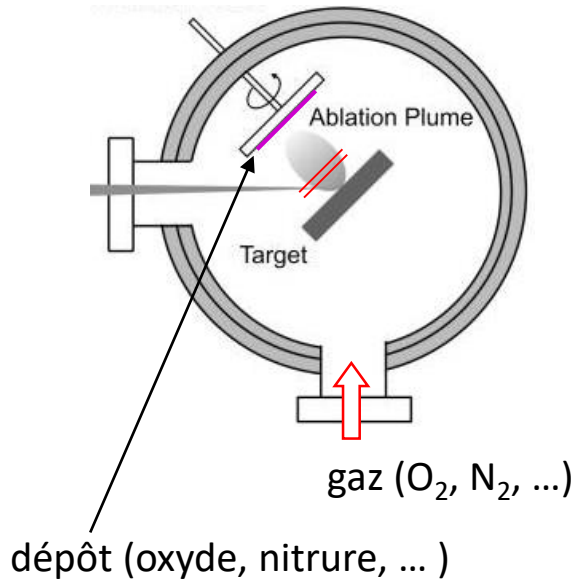
Vortex

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

Spectroscopie d'émission

dépôt de couches minces par ablation laser (PLD)

PLD réactive → synthèse de films de haute pureté



→ réactions en gaz phase dépendent de la pression

$P_{gaz} < 10$ Pa → synthèse de la couche mince sur le substrat

$P_{gaz} > 10$ Pa → réactions dans le volume

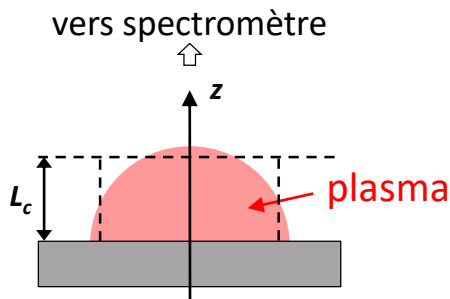
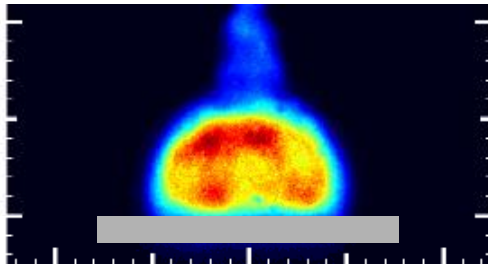
→ décharge RF auxiliaire pour nitruration

Spectroscopie d'émission

à la pression atmosphérique

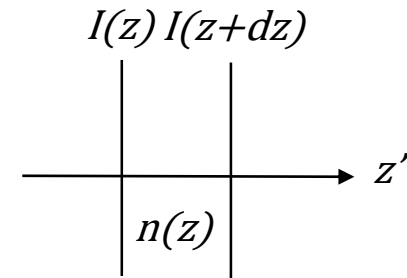
☞ plasma proche de l'équilibre thermodynamique local

⇒ simulation du spectre d'émission possible



transfert de rayonnement

$$n(z) \frac{d}{dz} \left(\frac{I(z)}{n^2(z)} \right) = \varepsilon(z) - \alpha(z)I(z)$$



plasma: $n \cong 1$

plasma uniforme $I(z) = \frac{\varepsilon}{\alpha} (1 - e^{-\alpha z})$

ETL ☞ Kirchhoff $B_{\lambda}^o = \frac{\varepsilon}{\alpha}$ $B_{\lambda}^o =$ luminance spectrale du corps noir

luminance spectrale $B_{\lambda} = B_{\lambda}^o (1 - e^{-\alpha L})$

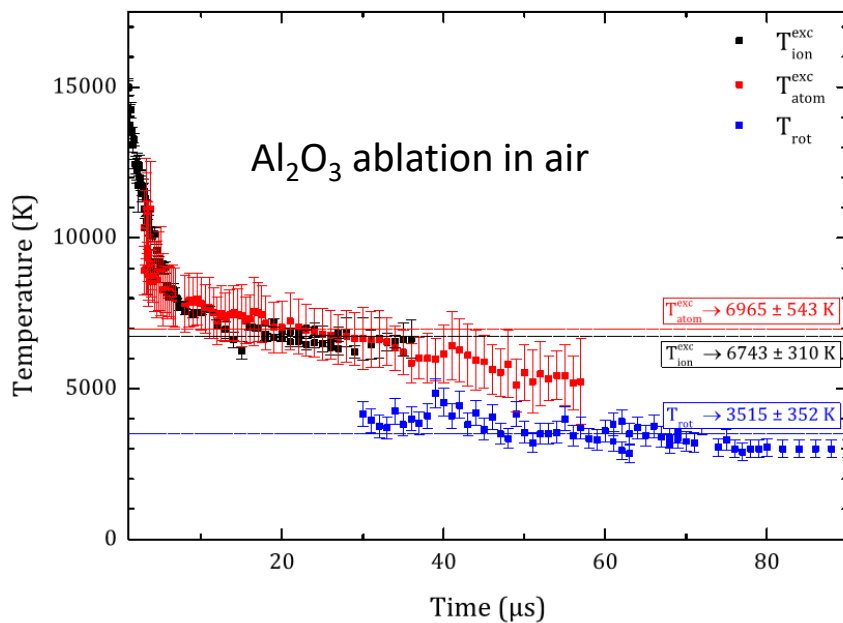
α = coefficient d'absorption

L = diamètre du plasma le long l'axe d'observation

couplée à la modélisation du plasma en ETL

Plasma d'ablation laser sous air en ETL ?

Lam et al. Spectrochimica Acta Part B (2014)



T_{ion}^{exc} = température d'excitation des ions Al^+

T_{atom}^{exc} = température d'excitation des atomes Al

T_{rot} = température rotationnelle des molécules AlO

$$T_{ion}^{exc} \cong T_{atom}^{exc} > T_{rot}$$

⇒ conclusion de Lam et al.

👉 **plasma hors équilibre**

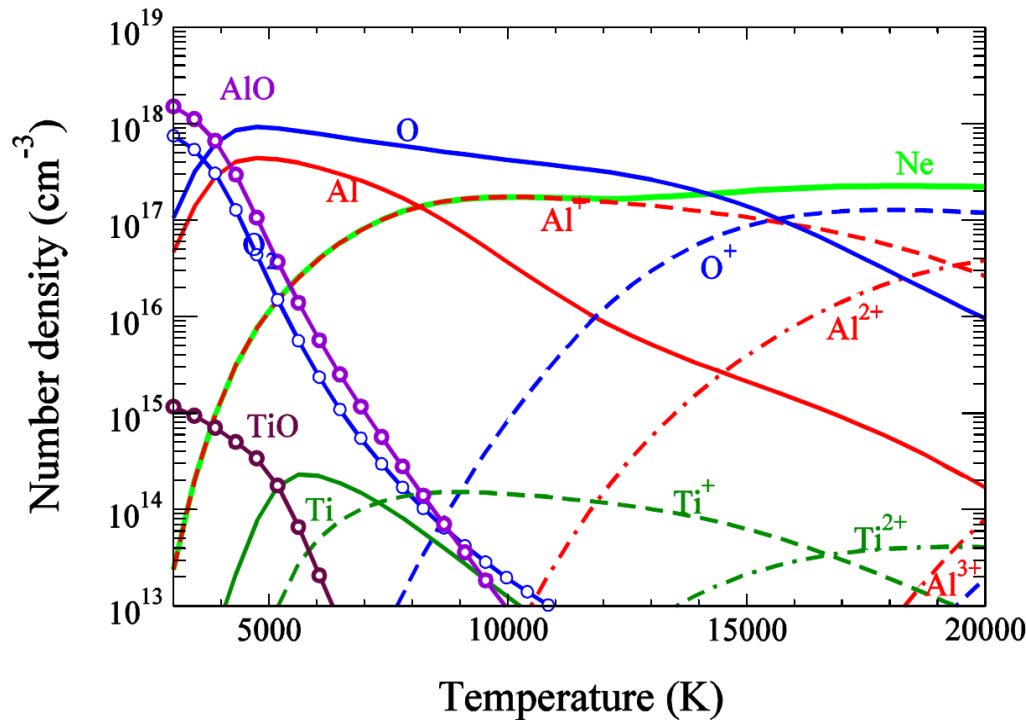
Spectroscopie d'émission

couplée à la modélisation du plasma en ETL

Plasma d'ablation laser sous air en ETL ?

👉 calcul du plasma avec réactions chimiques

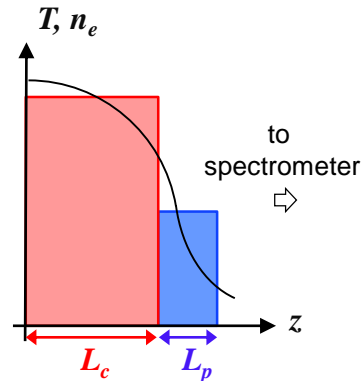
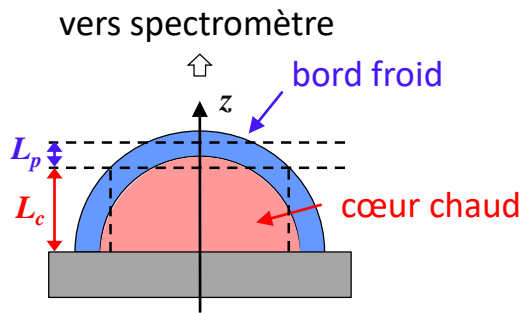
Loi de Guldberg et Waage:
$$\frac{n_A n_B}{n_{AB}} = \frac{(2\pi\mu kT)^{3/2}}{h^3} \frac{Q_A Q_B}{Q_{AB}} e^{-D_0/kT}$$



Plasma atmosphérique
Ti-saphir
(Al₂O₃ dopé de Ti)

couplée à la modélisation du plasma en ETL

Plasma d'ablation laser sous air en ETL ?



luminance spectrale :

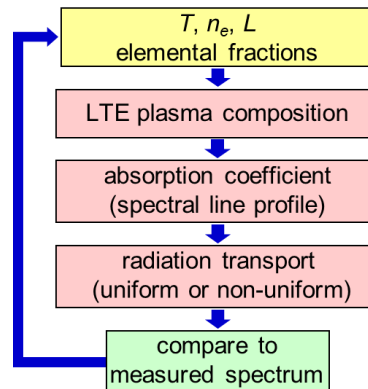
$$B = B_C^0(1 - e^{-\alpha_C L_C})e^{-\alpha_P L_P} + B_C^0(1 - e^{-\alpha_P L_P})$$

coefficient d'absorption :

$$\alpha(\lambda, T) = \pi r_0 \lambda^2 f_{lu} n_l P(\lambda_0, \lambda) (1 - e^{-hc/\lambda kT})$$

molecules :

$$n_{n,v,J} = n_{mol} \frac{g_{tot}}{Q_{mol}} e^{-[T_e + G_0(v) + F_v(J)]hc/kT}$$



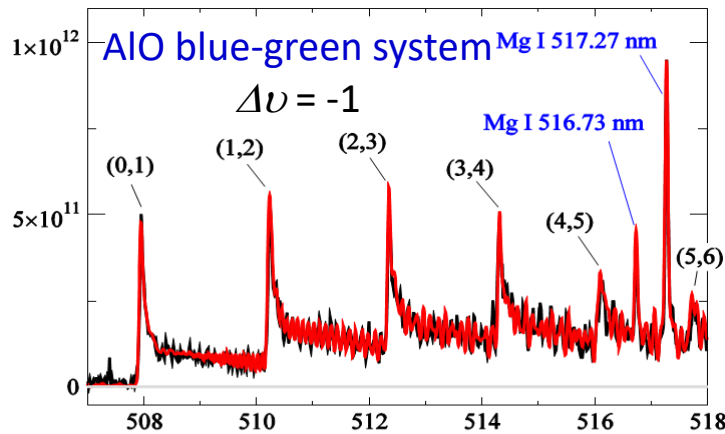
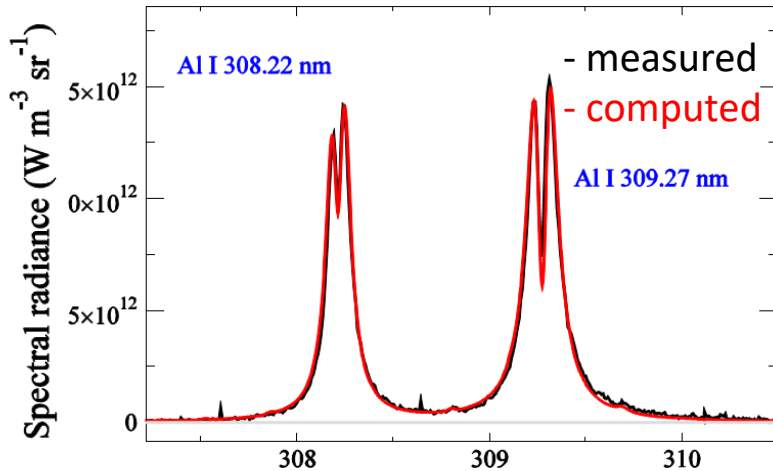
boucle de calcul

solution analytique de l'équation de transfert radiatif

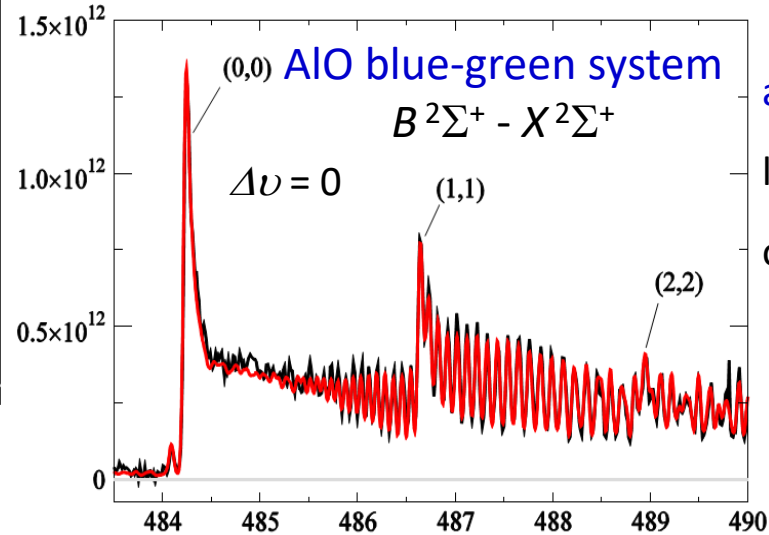
⇒ **itération rapide**

Spectroscopie d'émission

couplée à la modélisation du plasma en ETL



Hermann et al., Phys. Rev. E (2015)



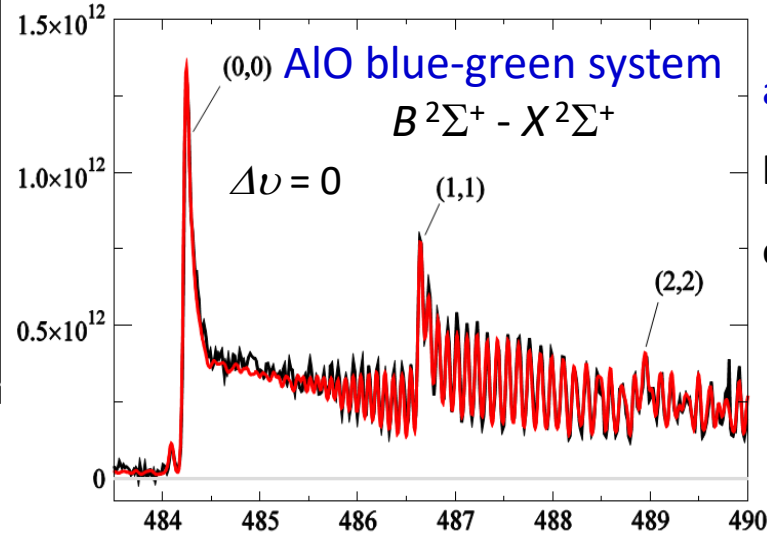
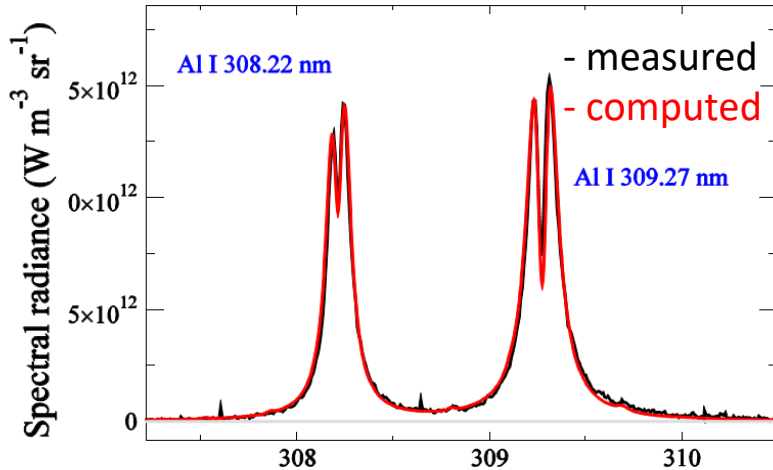
ablation Al sous air
laser: 266 nm, 6 mJ
observation $t = 6 \mu\text{s}$

	cœur	bord
L (mm)	0.7	0.1
T_{el} (K)	6100	4500
T_h (K)	6100	4000
n_e (cm ⁻³)	1.6×10^{16}	2×10^{15}
$n_{air}/(n_{vap} + n_{air})$	-	0.99
n_{tot} (cm ⁻³)	7×10^{16}	1.4×10^{19}

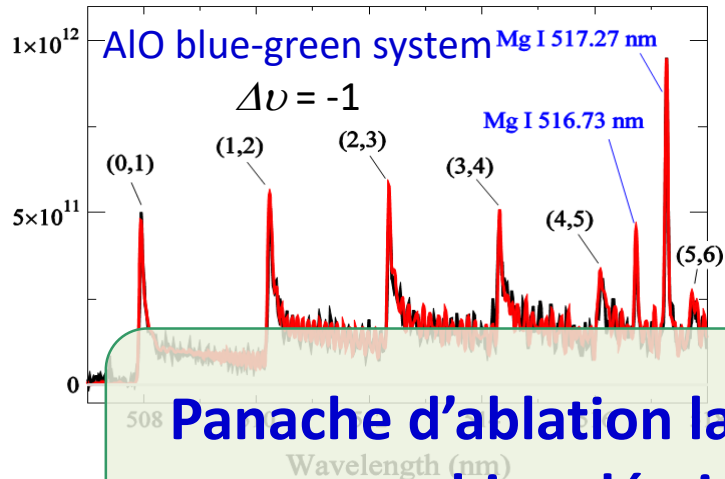
en accord avec
Shabanov and Gornushkin, SAB 2014

Spectroscopie d'émission

couplée à la modélisation du plasma en ETL



ablation Al sous air
laser: 266 nm, 6 mJ
observation $t = 6 \mu\text{s}$



Panache d'ablation laser sous air

bien décrit par plasma non-uniforme en ETL

	Core	border
L (mm)	0.7	0.1
T_{el} (K)	6100	4500
T_h (K)	6100	4000
n_e (cm^{-3})	1.6×10^{16}	2×10^{15}
n_{tot} (cm^{-3})	7×10^{16}	1.4×10^{16}

Plasma produit par ablation laser

dépendance de la nature du gaz ?

laser

longueur d'onde λ_{las}
 durée d'impulsion τ_{las}
 énergie E_{las}
 fluence F_{las}
 focalisation, ...

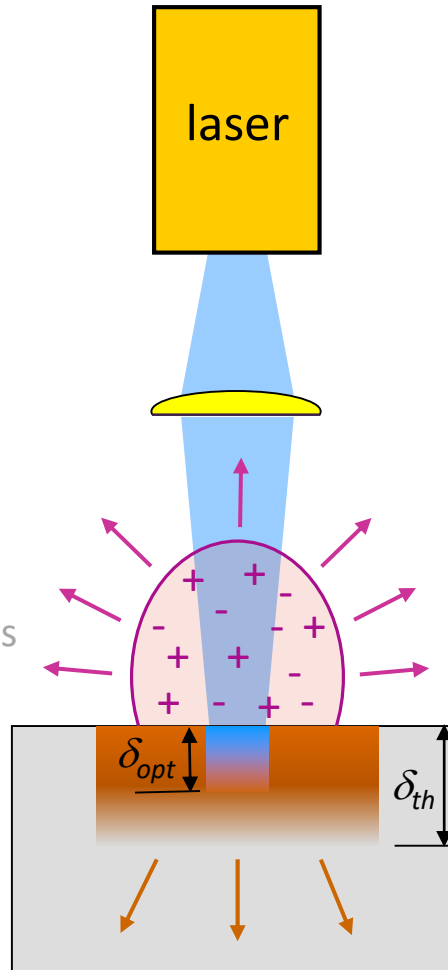
matériau

réflectivité R
 coefficient d'absorption α
 couplage électron-réseau τ_{e-i}
 conductivité thermique, K_{th}
 autres propriétés thermophysiques
 $C_p, T_{fus}, T_{vap}, H_{fus}, H_{vap}$

environnement

nature du gaz

pression P_{gaz}
 liquide

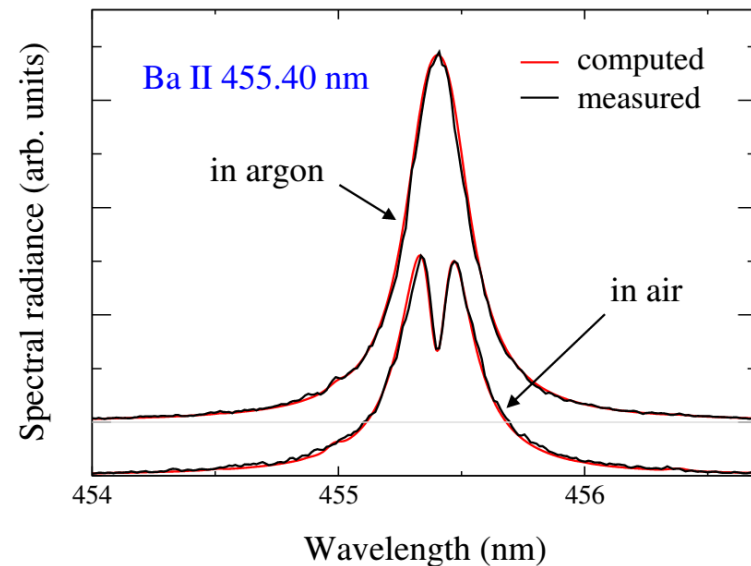
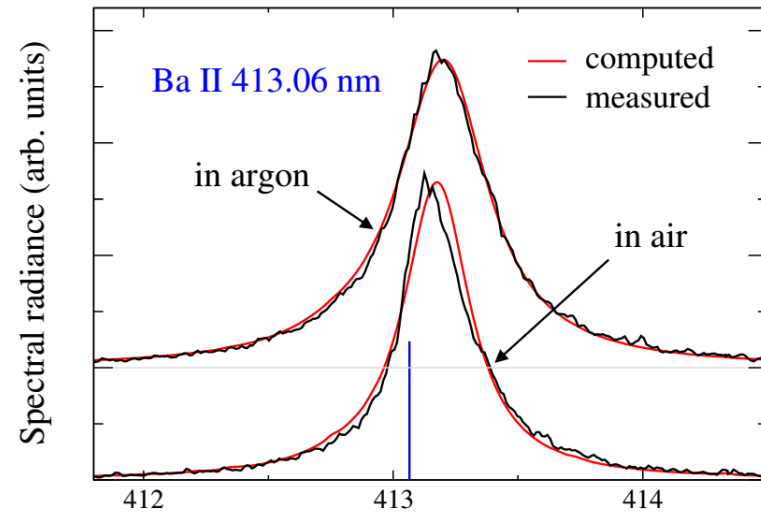
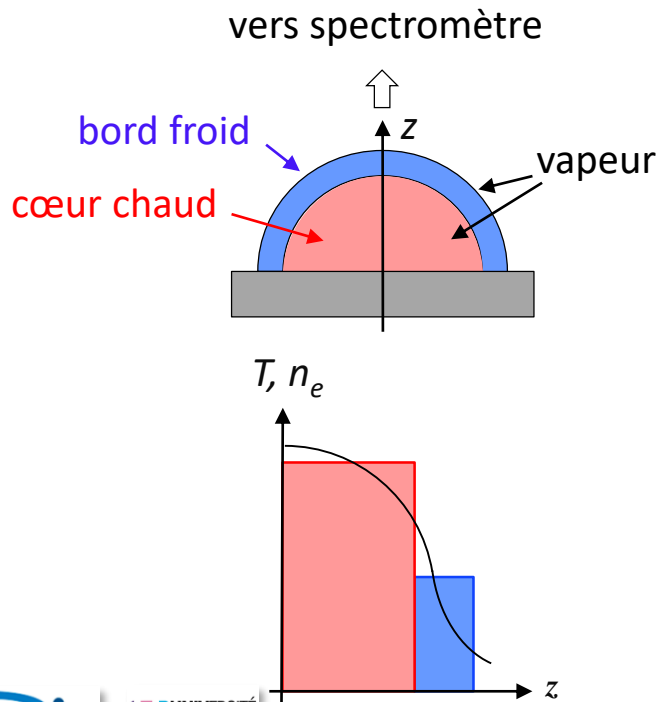


Influence de la nature du gaz

+ UV laser, 5 ns, qqs mJ
 ⇒ fort couplage d'énergie

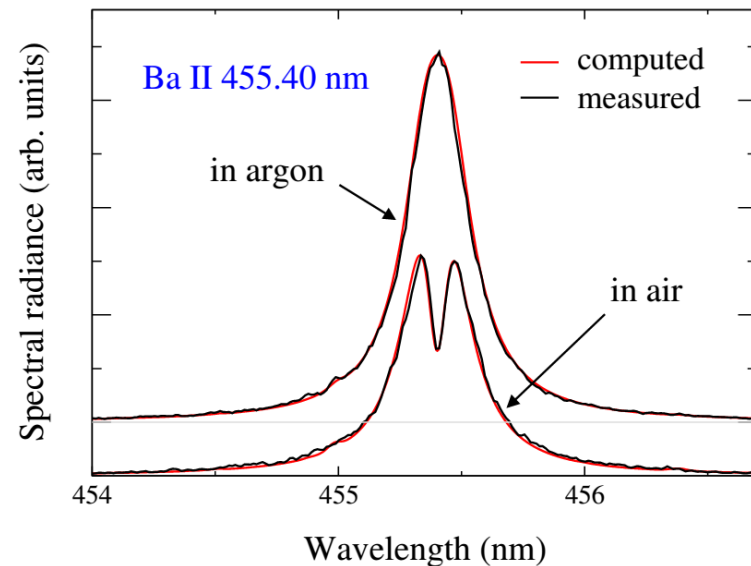
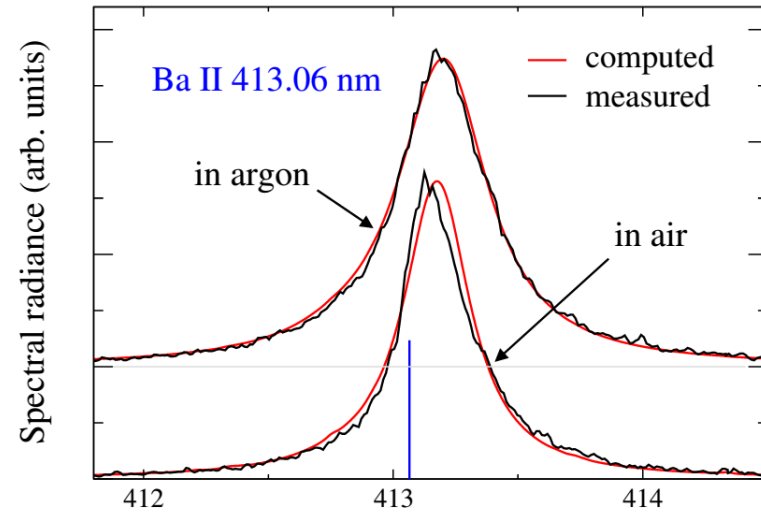
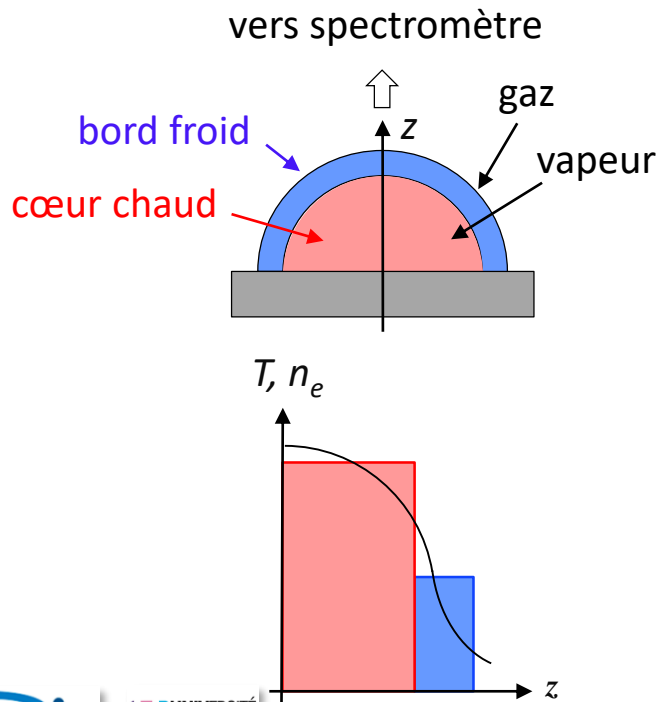
+ qqs impulsion par site
 ⇒ plasma reproductible

+ ablation laser sous air
 ⇒ panache non uniforme



Influence de la nature du gaz

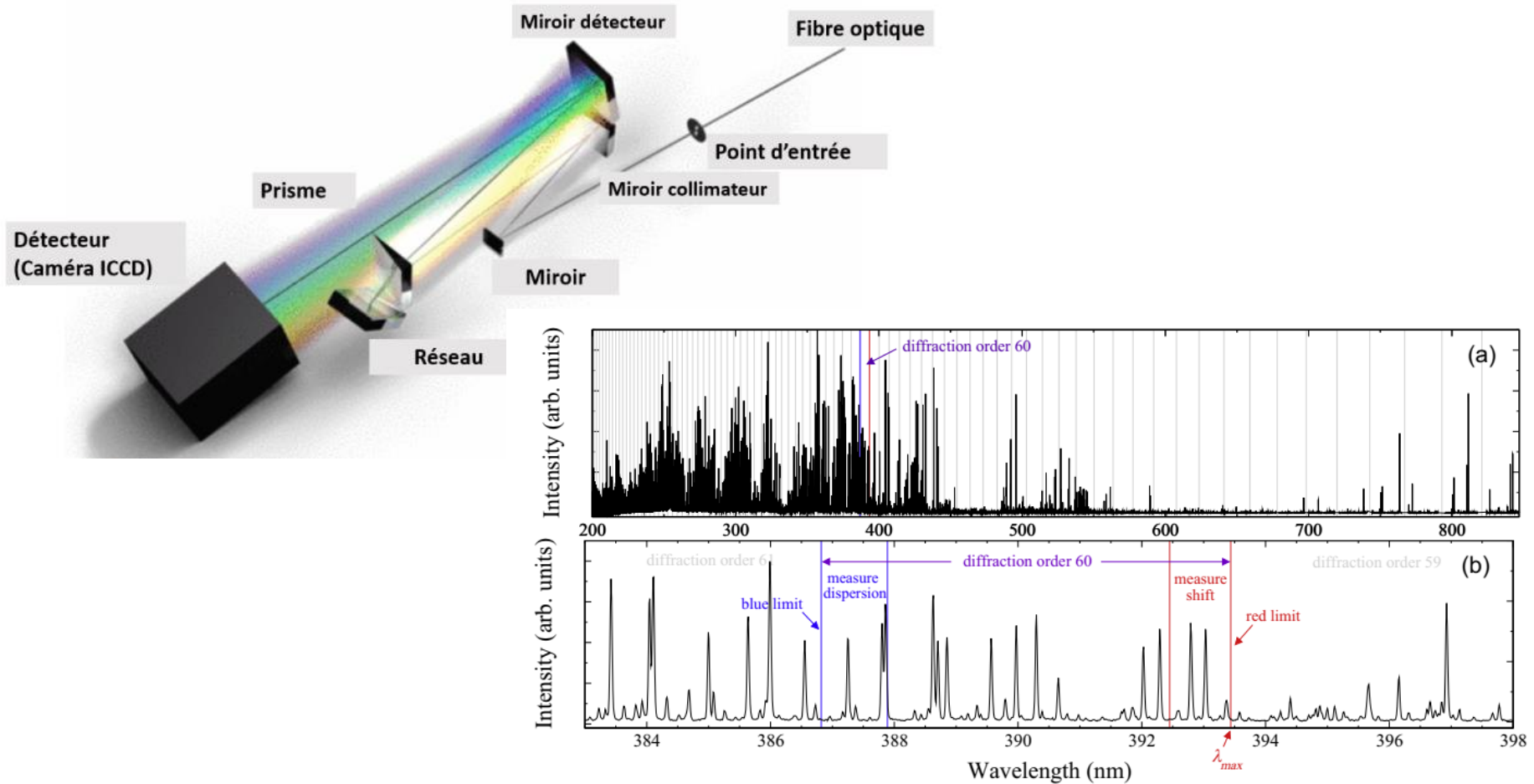
- + UV laser, 5 ns, qqs mJ
 - ⇒ fort couplage d'énergie
- + qqs impulsion par site
 - ⇒ plasma reproductible
- + ablation laser sous argon
 - ⇒ panache uniforme



Plasma spatialement uniforme sous argon

☞ spectroscopie avec spectromètre à échelle

☞ large gamme spectrale avec grand pouvoir de résolution



👉 **diagnostic précis possible**

sélection des raies = compromis

+ autoabsorption

⇒ erreur de mesure **augmente** avec τ

+ rapport signal-sur-bruit

⇒ erreur de mesure **diminue** avec τ

exemple : acier

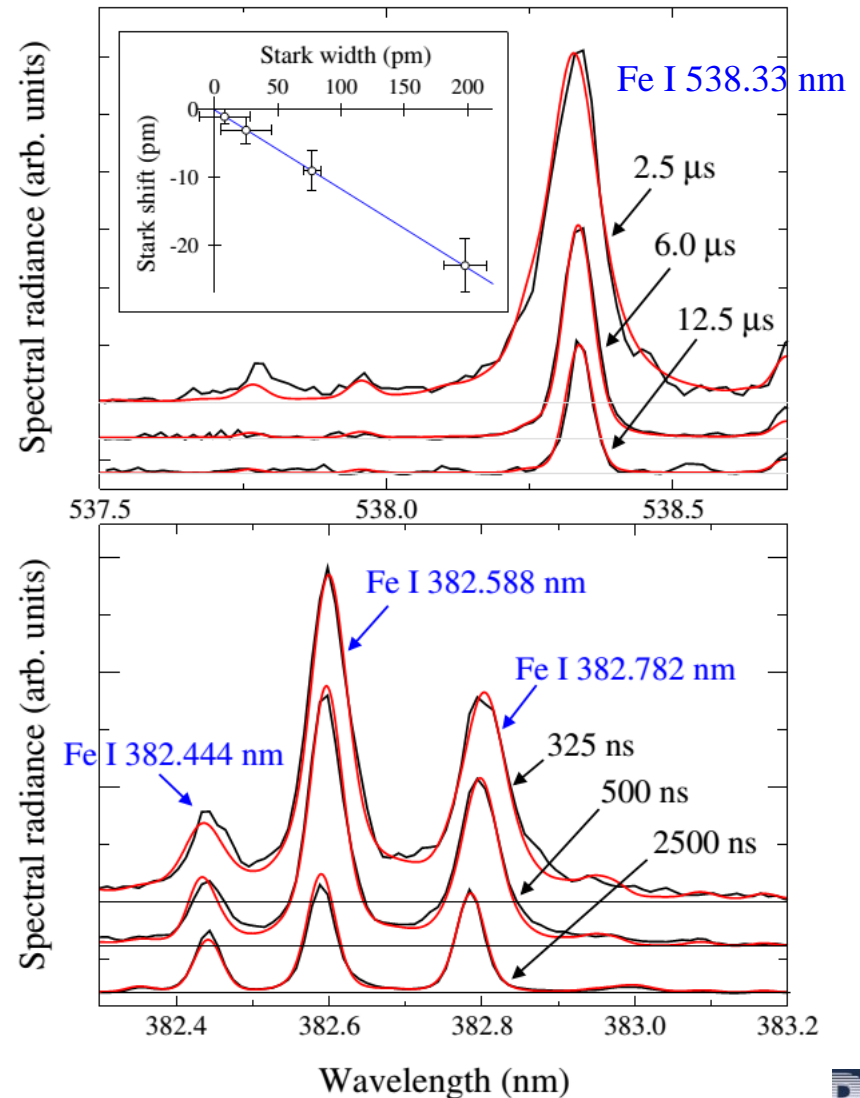
👉 **mesure n_e**

avec Fe I 538.33 and Fe I 382.78 nm

spectre Echelle

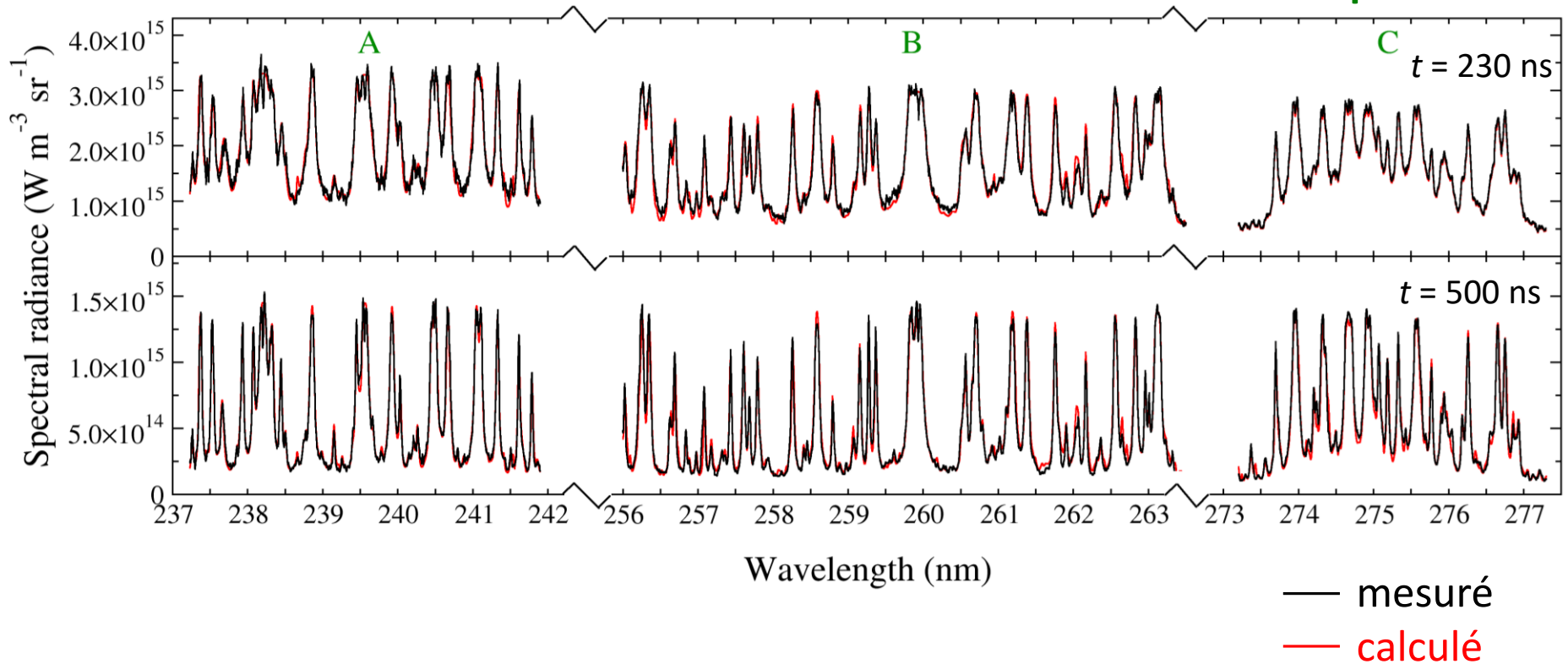
👉 observation simultanée de $\approx 10^4$ raies

⇒ **mesure des paramètres Stark des centaines de raies**



 **diagnostic précis possible**

exemple : acier

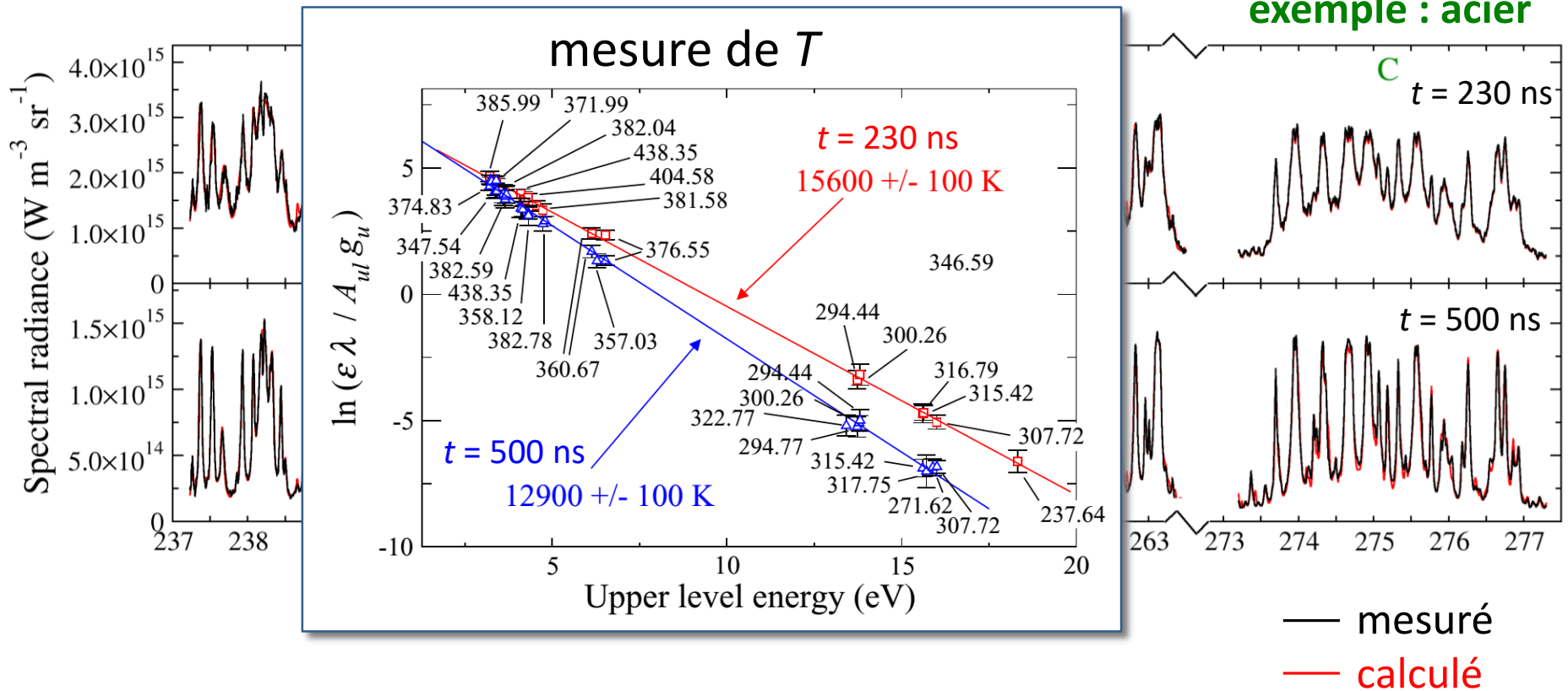


$$B_\lambda = B_\lambda^0 (1 - e^{-\tau}) \quad \text{optiquement épais } (\tau \gg 1) \Rightarrow B_\lambda = B_\lambda^0$$

\Rightarrow raies intenses sature à la luminance du corps noir

Plasma spatialement uniforme sous argon

mesures T et n_e avec raies $\tau < 1$



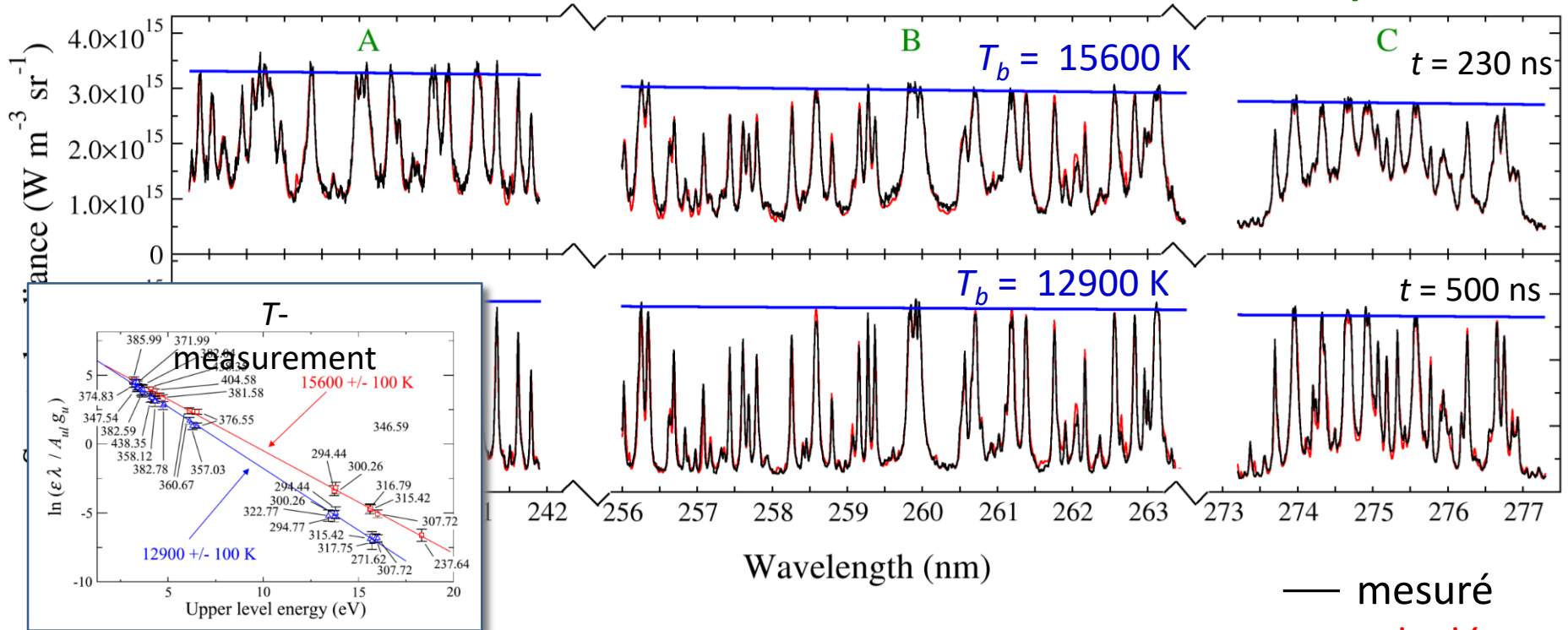
$$B_\lambda = B_\lambda^0 (1 - e^{-\tau}) \quad \text{optiquement épais } (\tau \gg 1) \Rightarrow B_\lambda = B_\lambda^0$$

⇒ raies intenses sature à la luminance du corps noir

Plasma spatialement uniforme sous argon

température d'excitation atomique = température du corps noir

exemple : acier



$$B_{\lambda} = B_{\lambda}^0 (1 - e^{-\tau})$$

optiquement épais ($\tau \gg 1$) $\Rightarrow B_{\lambda} = B_{\lambda}^0$

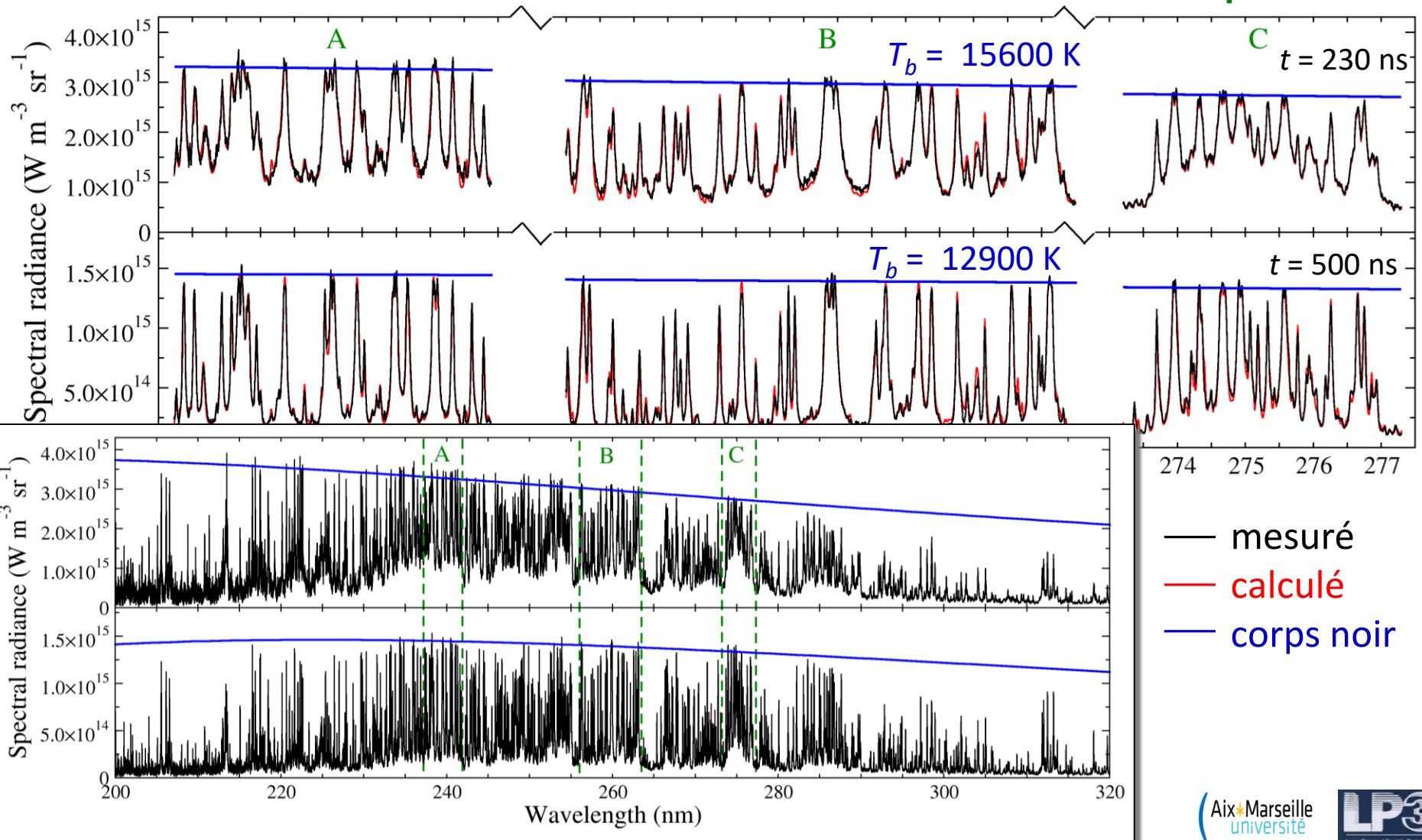
\Rightarrow raies intenses sature à la luminance du corps noir

- mesuré
- calculé
- corps noir

Plasma spatialement uniforme sous argon

température d'excitation atomique = température du corps noir

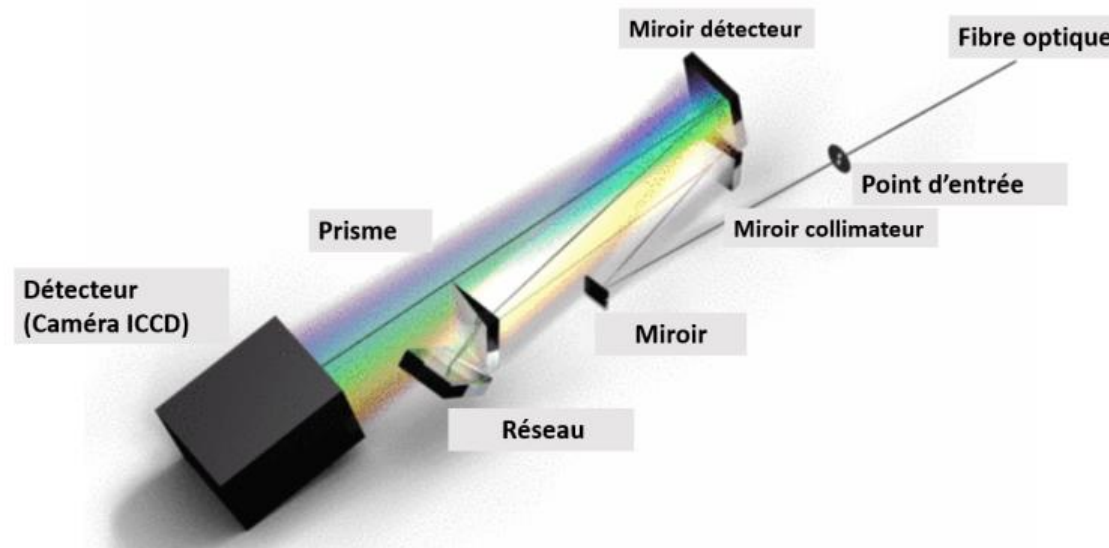
exemple : acier



Spectroscopie d'émission

avec spectromètre à échelle

👉 large gamme spectrale avec grand pouvoir de résolution



👉 **étalonnage extrêmement sensible à la température**

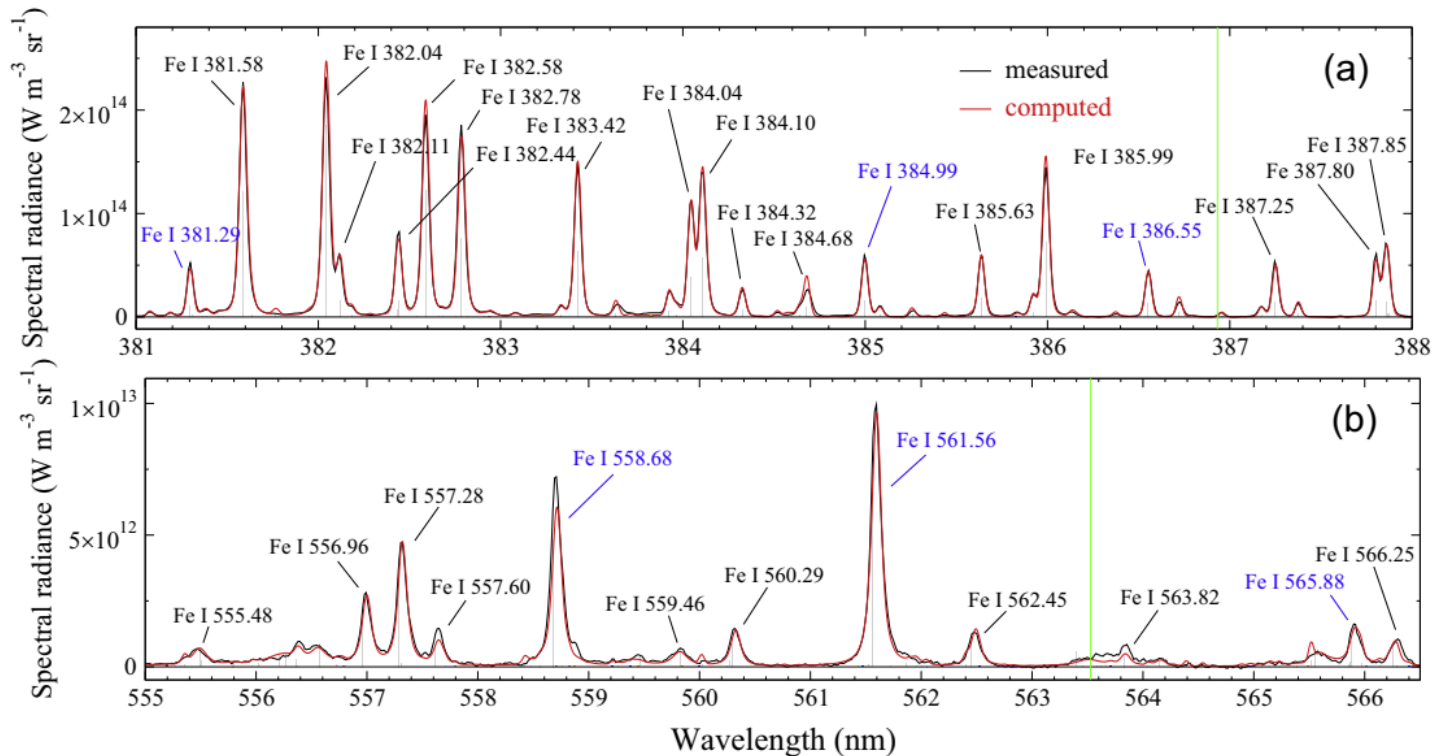
étalonnage spectral et fonction de réponse

👉 **étalonnage en intensité difficile**

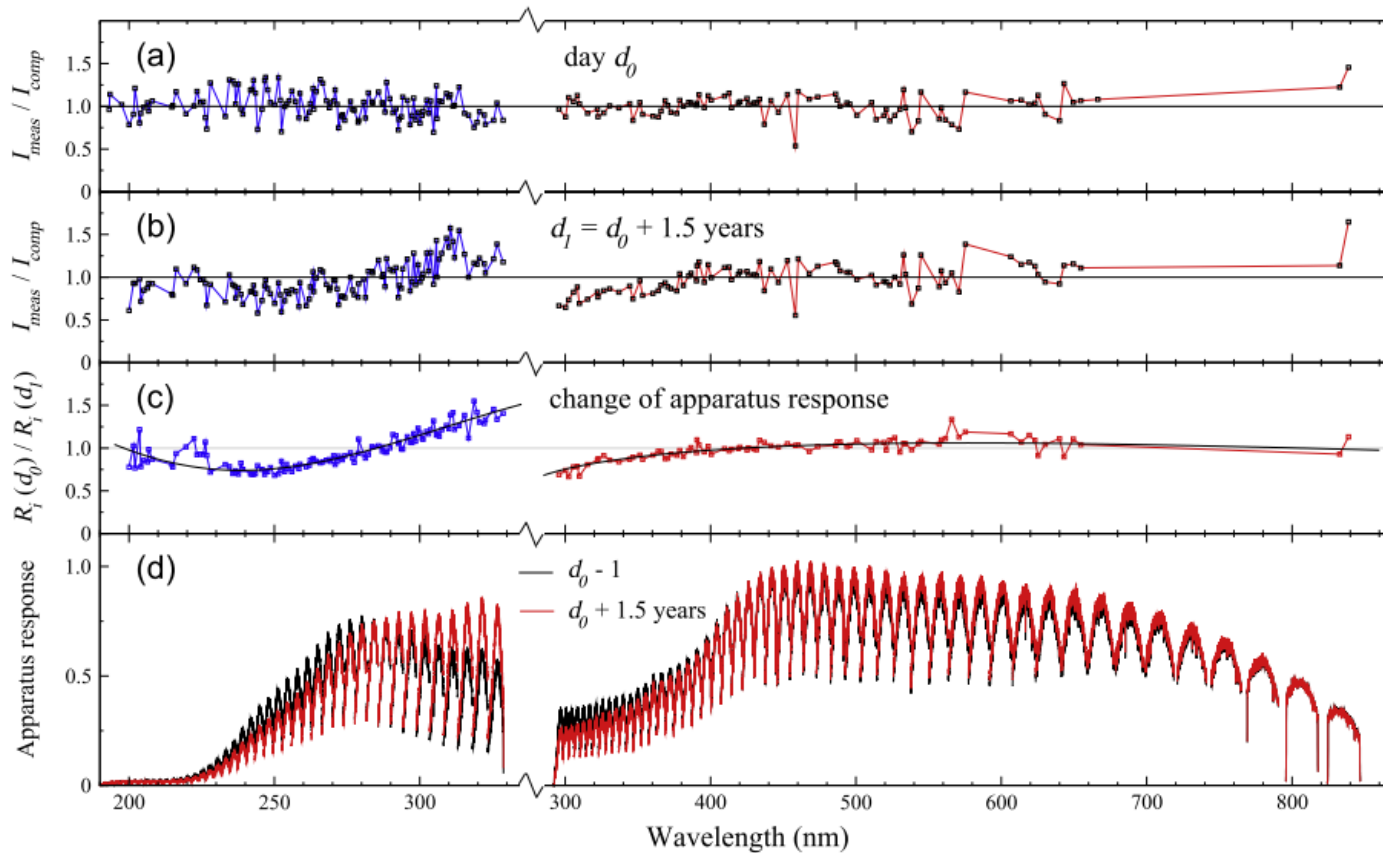
source requise avec faible variation en intensité sur large gamme spectrale

plasma uniforme en ETL \rightarrow calcul précis du spectre

ablation de l'acier \rightarrow spectre riche, valeurs A_{ul} précises sur NIST



Réponse de l'appareil déduite du rapport I_{mes} / I_{comp}



écart-type des fluctuations = intervalle de confiance moyenne des $A_{ul} = 15\%$

👉 **plasma laser = moyen pour mesurer A_{ul}**

première partie

Plasmas en équilibre

plasma produit par ablation laser :

- ➔ processus complexe, dépend de nombreux paramètres
- ➔ grande variabilité des conditions exp. et des propriétés du plasma
- ➔ modélisation de la dynamique d'expansion « *qualitative* »
- ➔ diagnostic pour meilleure compréhension
(imagerie rapide, ombroscopie ultrarapide, FIL, spectroscopie optique, ...)

plasma atmosphérique produit par ablation laser nanoseconde :

- ➔ équilibre thermodynamique local
- ➔ diagnostic couplé à la modélisation
- ➔ perspectives comme source de rayonnement « *idéale* »
(étalonnage des spectromètres, mesures de données spectro., analyse élémentaire, ...)