

Spark vs Claquage Laser: quelques méthodes de caractérisation

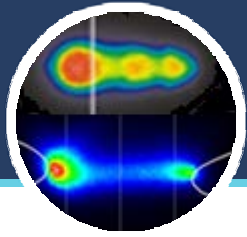
GDR EMILI – 26 octobre 2021

Stéphane PELLERIN

Steve RUDZ , Maxime WARTEL

¹ GREMI, UMR7344, Université d'Orléans/CNRS, Bourges, France





Spark vs Claquage Laser

Sommaire

I - Etincelle / Claquage laser

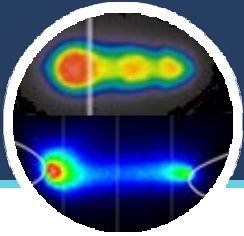
II - Génération de déflagrations/détonations reproductibles

↳ Caractérisation du dépôt d'énergie par claquage en mélange gazeux

III- LIBS et SIBS

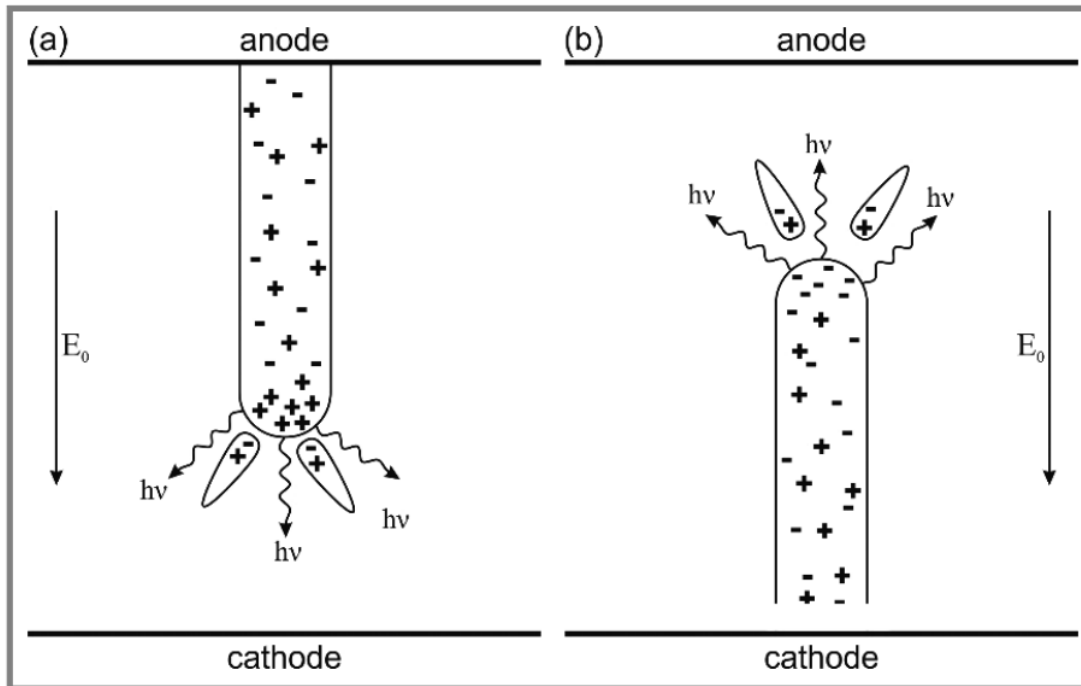
↳ Caractérisation du plasma → Diffusion Thomson

↳ Détermination des paramètres Stark de raies spectrales



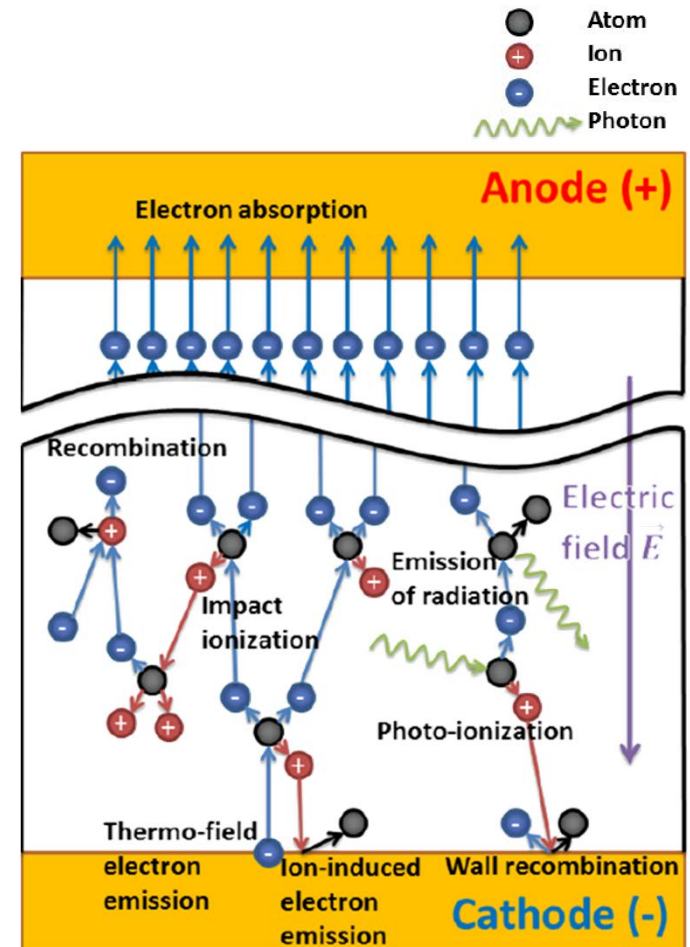
Étincelle: que se passe t-il ?

Spark : décharge électrique entre deux conducteurs se propageant à travers un diélectrique en général gazeux



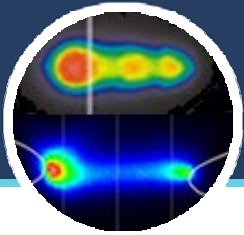
formation de streamers positifs (gauche) et négatifs (droite)

[Kevin Ollegott et al, DOI: 10.1002/cite.202000075]

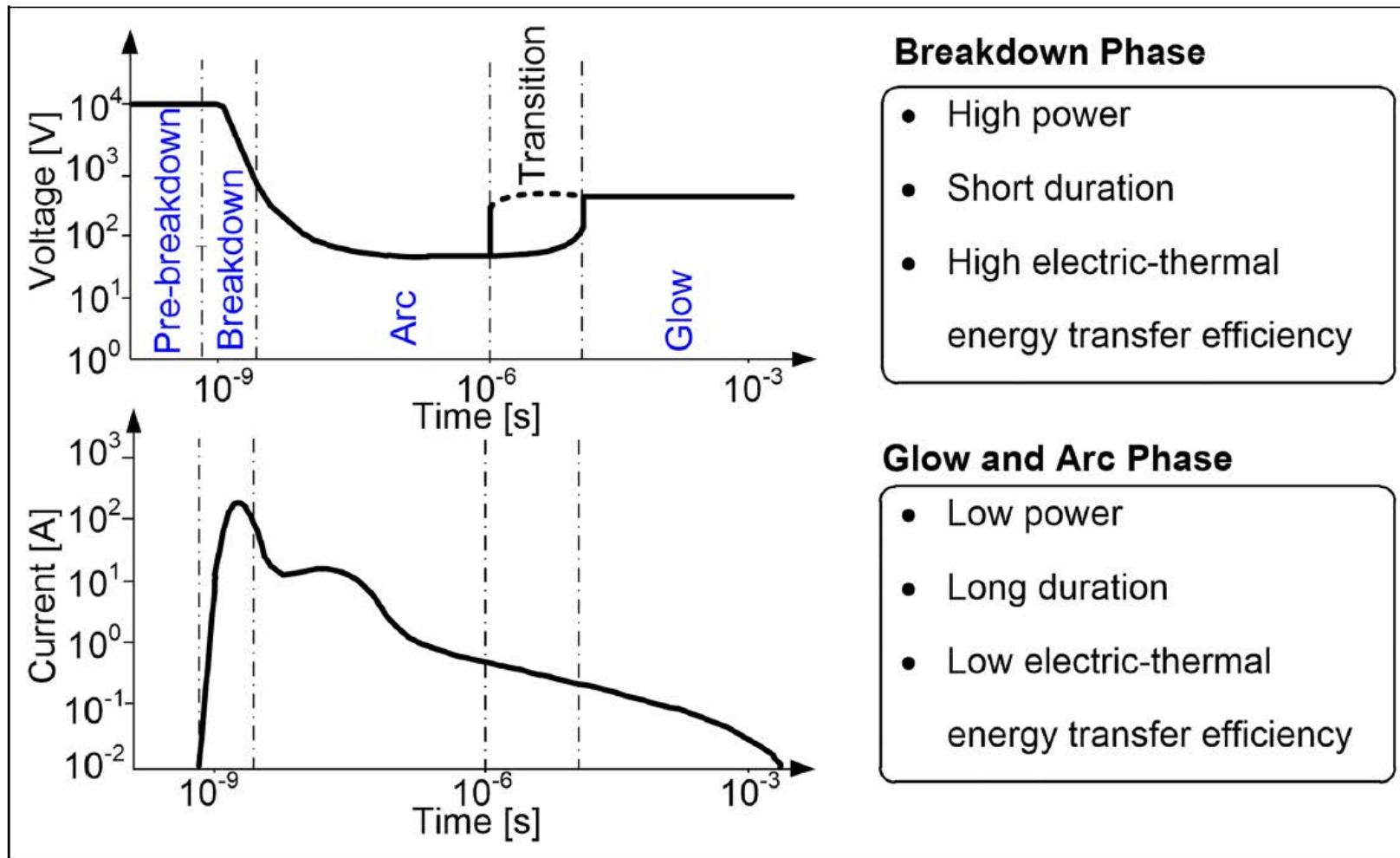


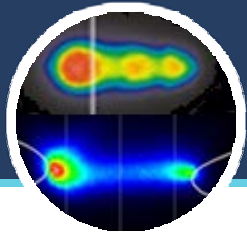
Principaux phénomènes durant une étincelle

[Andrey Voloshko, Thèse St Etienne, 2015]



Etincelle: Les différentes phases

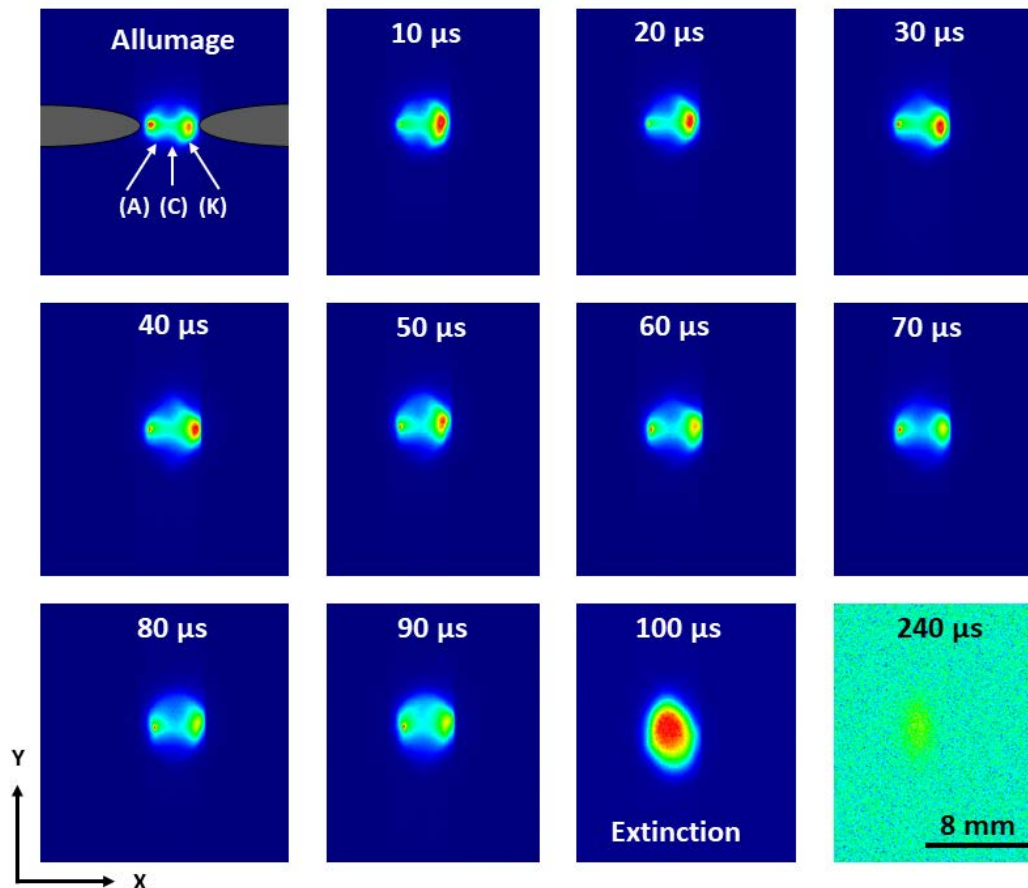




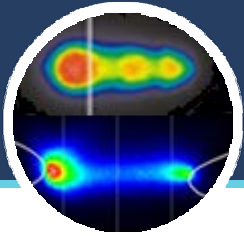
Etincelle: Imagerie

➤ Imagerie

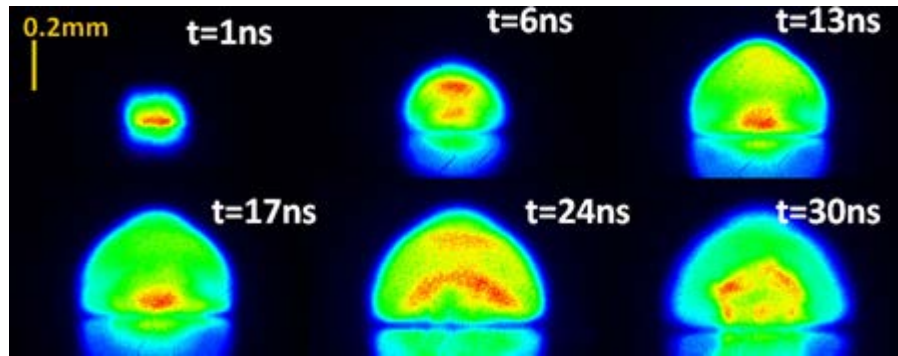
■ Evolution d'une décharge de durée $\tau_{\text{arc}} = 100 \mu\text{s}$



- $d_{\text{élec}} = 4 \text{ mm}$
- $U_{\text{arc}} = 80 \text{ V}$
- $I_{\text{arc}} = 4 \text{ A}$
- $E_{\text{arc}} = 32 \text{ mJ}$
- $t_{\text{exp}} = 10 \mu\text{s}$



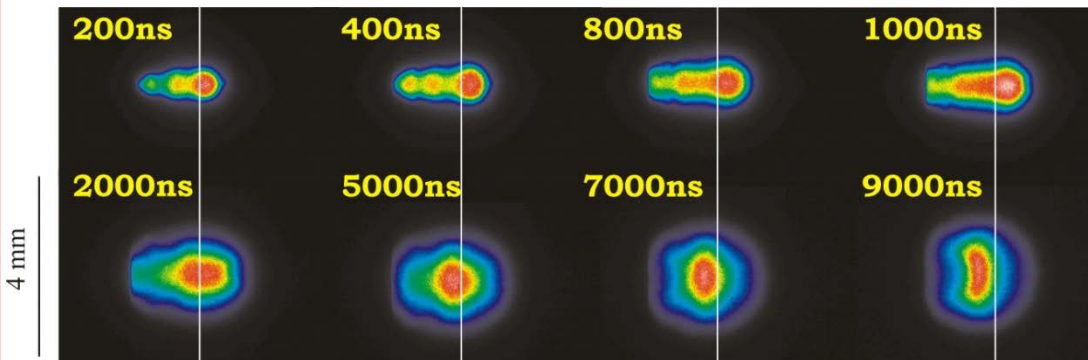
Plasma induit par laser: Ablation ou Claquage ?



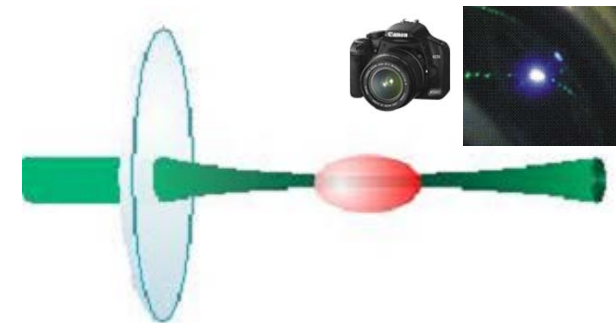
A. Mendys et al. / Spectrochimica Acta Part B 96 (2014) 61–68



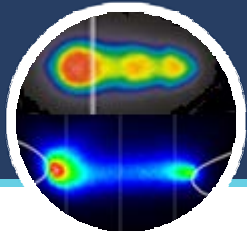
Solid target (ablation)
Application: film deposition, analysis...



A. Mendys, et al., Spectrochim. Acta B (2011) 66, 691



Gaseous target (breakdown)
Application: plasma igniters...



Ablation laser : processus physiques fondamentaux et échelles de temps

GAS (breakdown)

- cascade excitation
- multiphoton excitation
- tunnel effects ($I > 10^{12} \text{ W/cm}^2$)

INITIAL
ELECTRONS **fs, ps**

SOLID (ablation)

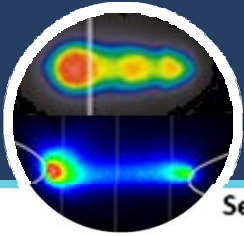
- conduction band electrons heated absorbing photons (metals)
- multiphoton band-to-band transitions lead to electron-hole pairs generation (semiconductors, insulators)
- dissipation of absorbed energy in collisions between excited electrons and lattice (thermal conductivity)

- expansion of the ablated material (electrons, ions, highly excited atoms) expands at speed $>$ speed of sound \rightarrow shockwave
- electrons absorb energy from laser in inverse bremsstrahlung process
- further excitation of atoms and ions \rightarrow luminous plasma



ps, ns

- after laser pulse plasma cools down through recombination processes and radiative quenching
- PRODUCTS: electrons, ions \rightarrow atoms \rightarrow molecules \rightarrow clusters

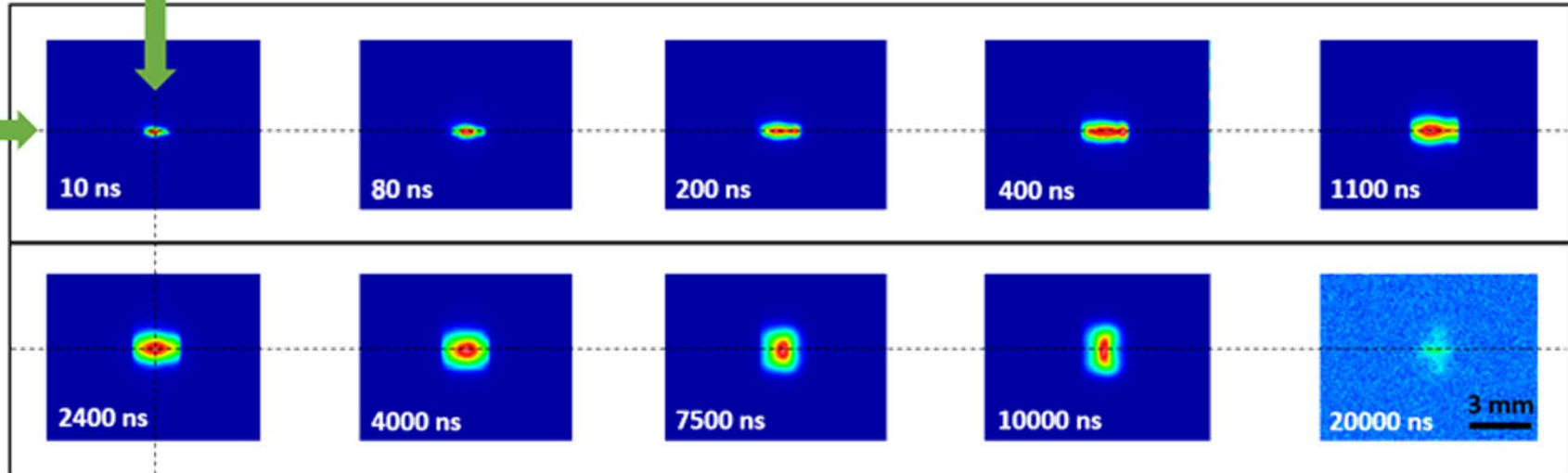


Plasma induit par laser: Imagerie

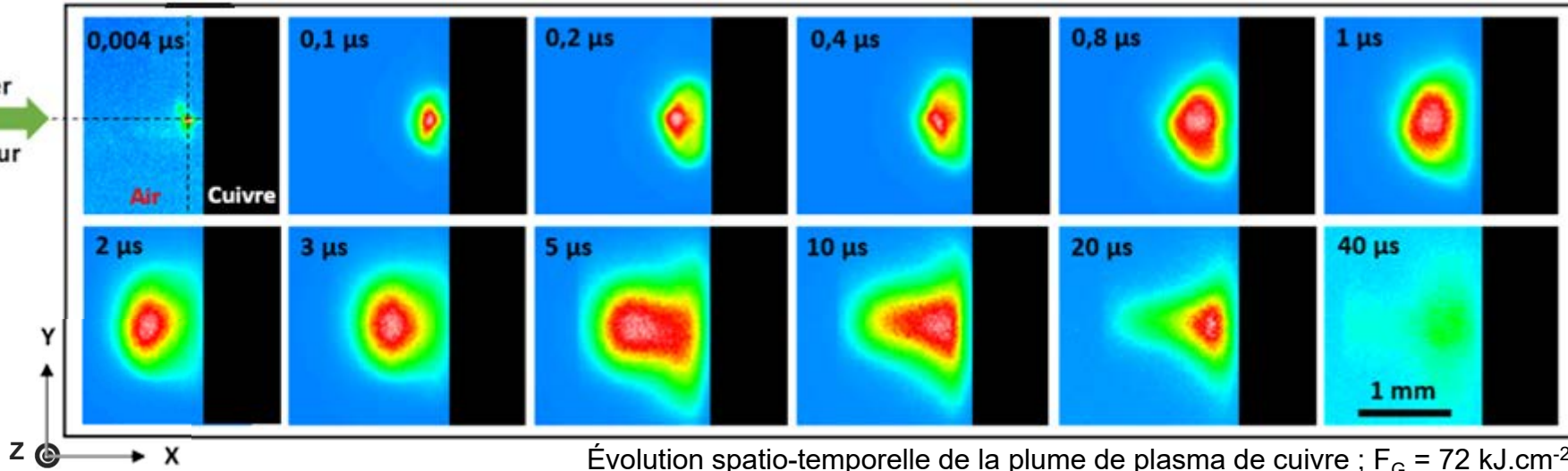
Sens laser sonde

Évolution spatio-temporelle de la plume de plasma d'argon ; $P = 1 \text{ bar}$; $F_G = 44,9 \text{ kJ.cm}^{-2}$

Sens laser
générateur

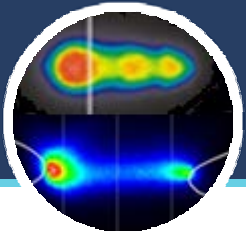


Sens laser
générateur



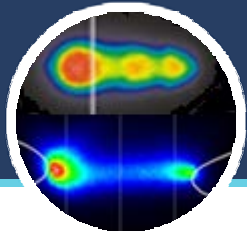
Évolution spatio-temporelle de la plume de plasma de cuivre ; $F_G = 72 \text{ kJ.cm}^{-2}$

[Mamadou Sankhe, Thèse Orléans, 2019]



Génération de déflagrations/détonations reproductibles

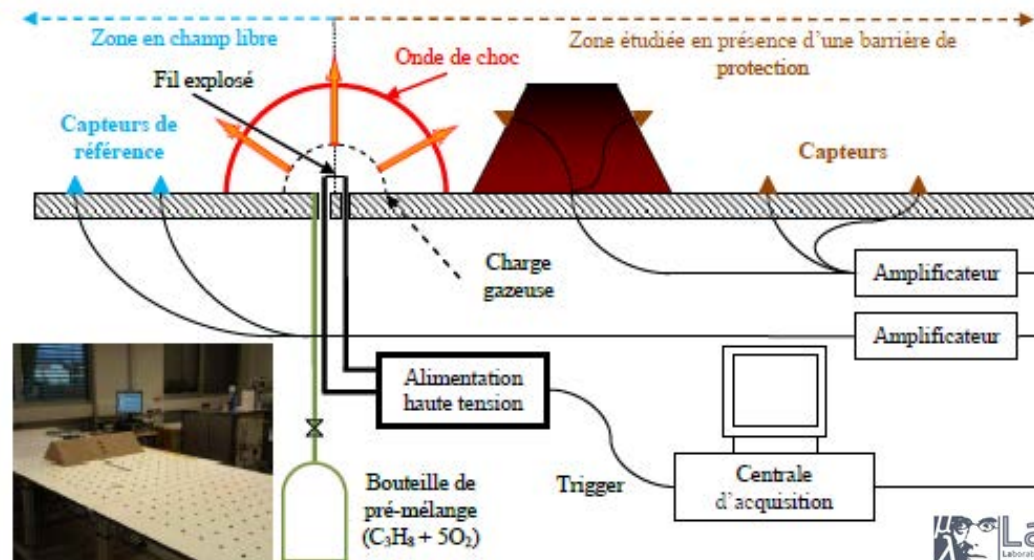
**Caractérisation du dépôt d'énergie
par claquage en mélange (réactif) gazeux**

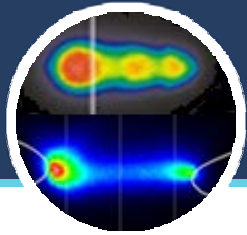


Etude des ondes de souffle: contexte

- Etude des ondes de souffle à partir de charges gazeuses
→ prédiction du comportement des structures

Amorçage au fil explosé	Amorçage par claquage électrique	Amorçage par claquage laser
Soulève des questions de sécurité	Problème de reproductibilité intrusivité des électrodes	Sûr et facilement reproductible



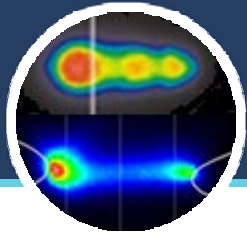


Etude des ondes de souffle: contexte

- Etude des ondes de souffle à partir de charges gazeuses
→ prédiction du comportement des structures

Amorçage au fil explosé	Amorçage par claquage électrique	Amorçage par claquage laser
Soulève des questions de sécurité	Problème de reproductibilité intrusivité des électrodes	Sûr et facilement reproductible

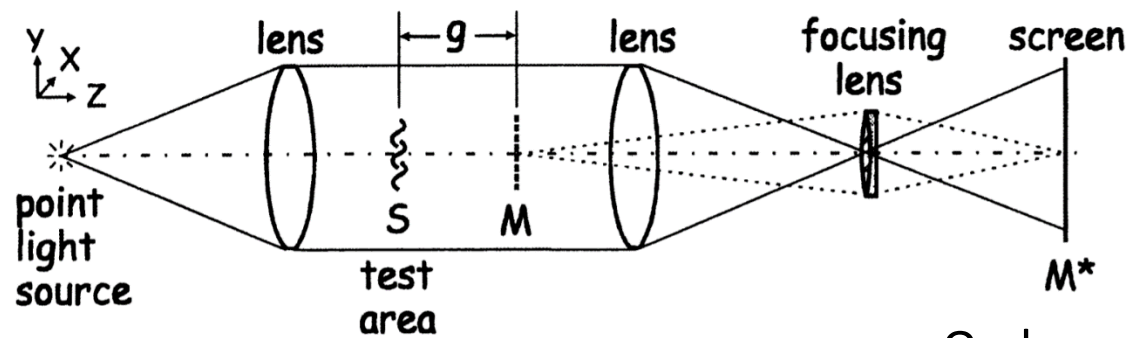
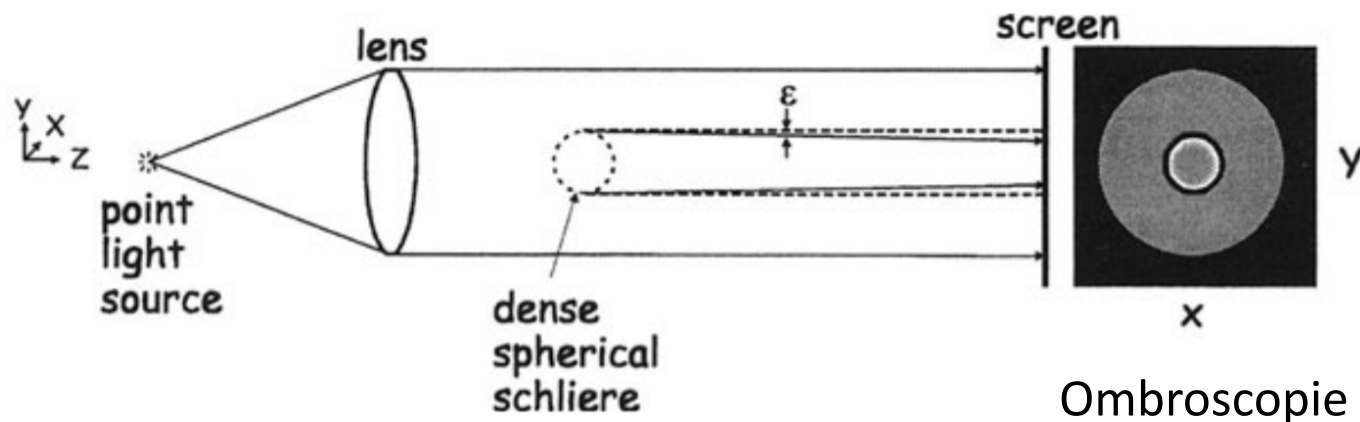
- Objectifs :
 - Caractérisation énergétique du claquage
 - Caractérisation de l'énergie de l'onde de souffle issue du dépôt d'énergie à l'amorçage



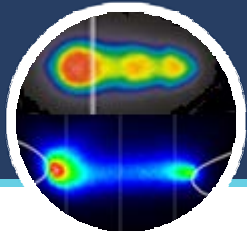
Etude des ondes de souffle: ombroscopie

Principe

- Principe de l'ombroscopie : mettre en évidence la déviation de la lumière due au changement d'indice optique de l'air (causé par un gradient de pression)



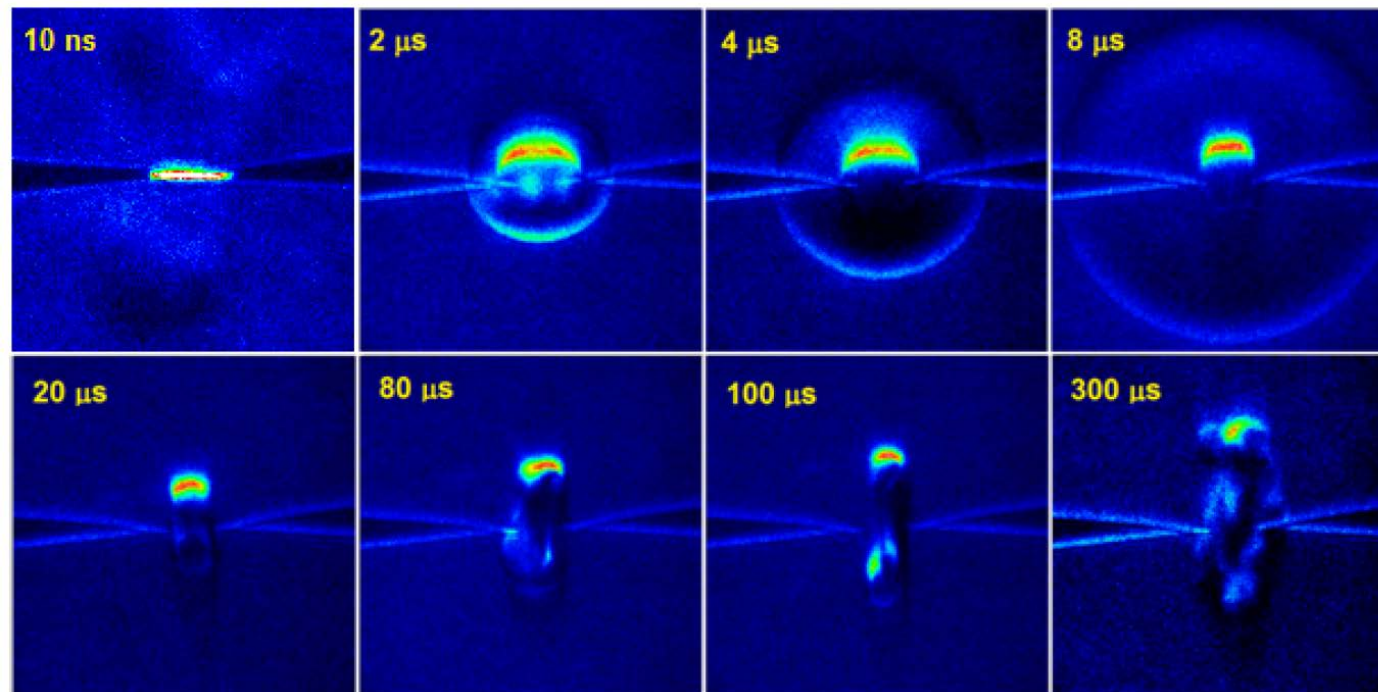
→ possibilité de Schlieren



Etude des ondes de souffle: ombroscopie

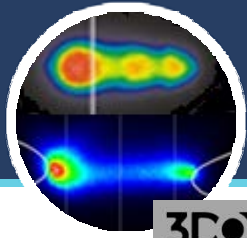
Exemple sur une étincelle

- Principe de l'ombroscopie : mettre en évidence la déviation de la lumière due au changement d'indice optique de l'air (causé par un gradient de pression)



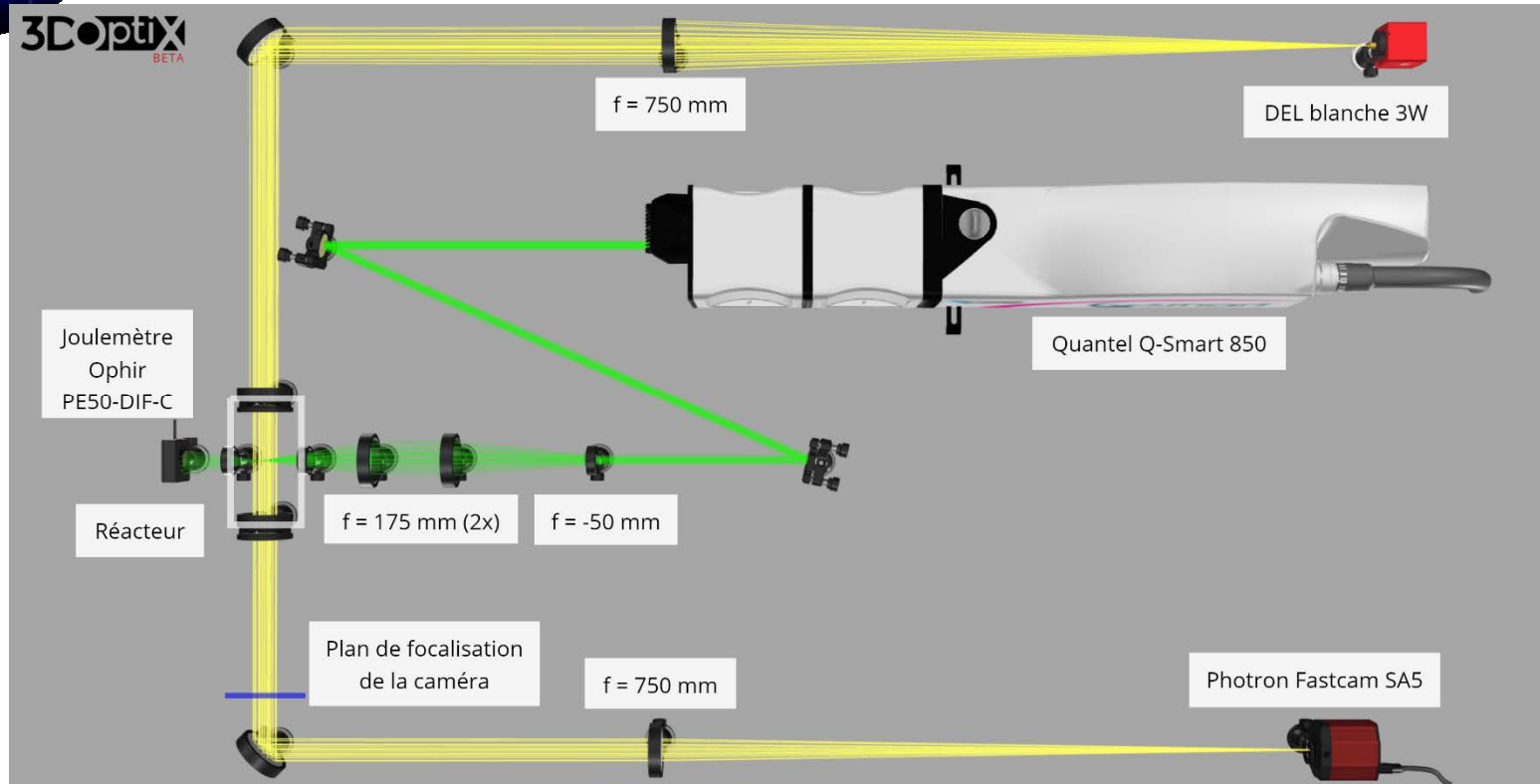
Images Schlieren - Etincelle ns, air, $P=1$ bar, $U=+36$ kV, $d=1$ mm

[S. Stepanyan, AIAA SciTech Forum, 2017]



Etude des ondes de souffle: ombroscopie

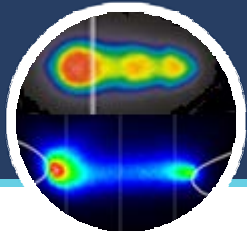
Cas d'un PIL : Dispositif expérimental



Durée impulsion τ	5 ns
Diamètre faisceau	9 mm
Grandissement extenseur	3,5
Rayon au col ω_0	2,42 μm

- Laser Nd:YAG pulsé 532 nm
- Energie laser : 5 mJ – 200 mJ,
mesurée avec un joulemètre
- Tirs dans l'air
- $g/h \approx 0.39$

S.Rudz, T.Guillaumin et al, JITIPEE, 2021

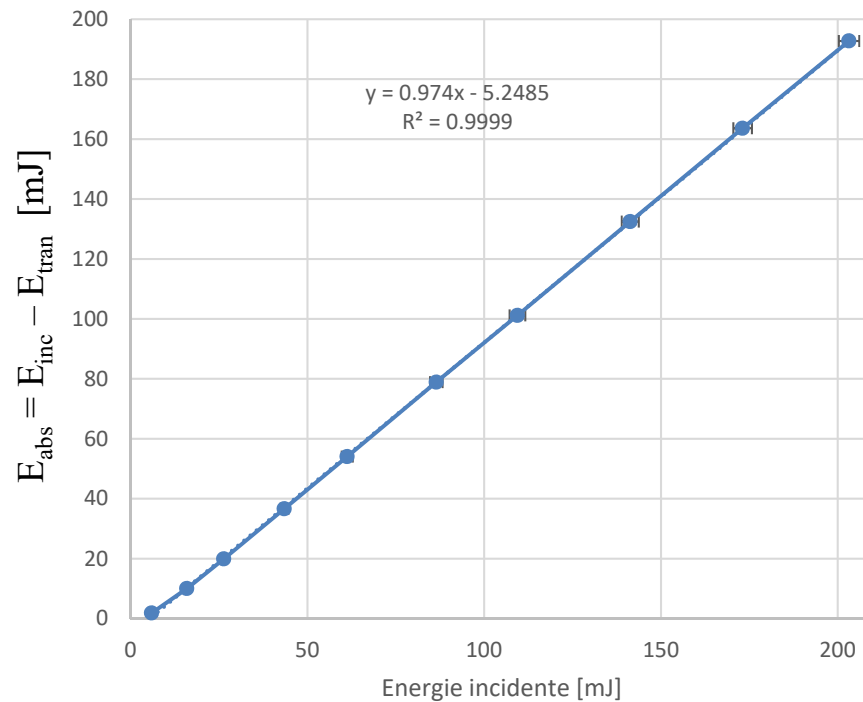


Etude des ondes de souffle: ombroscopie

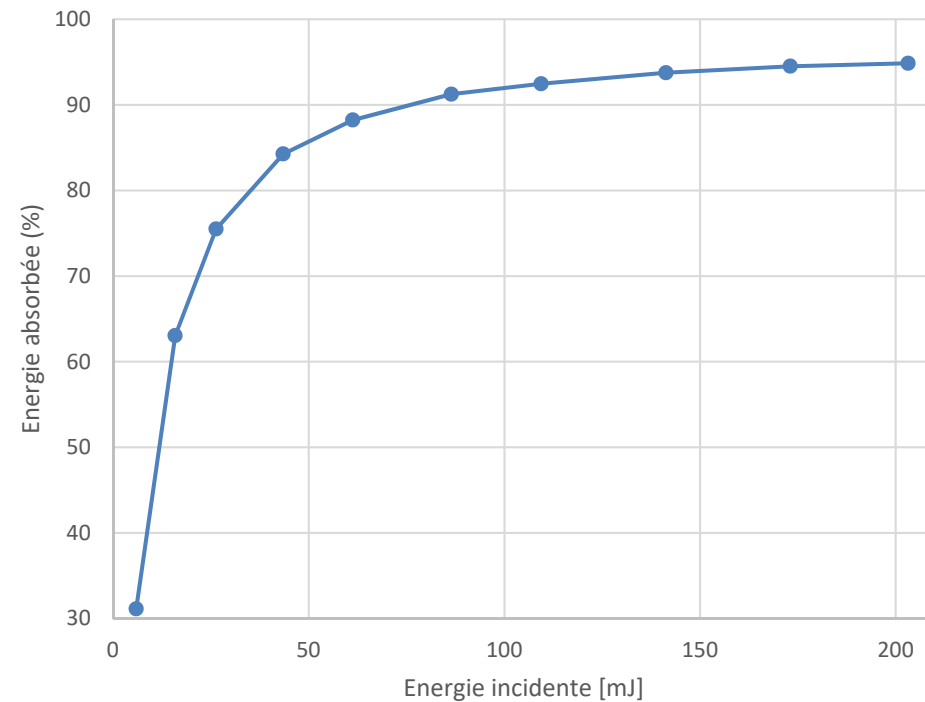
Cas d'un PIL : Reproductibilité des tirs

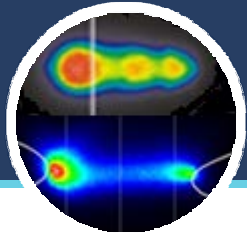
- Ecart types faibles pour une énergie donnée
- La linéarité du graphe $E_{\text{abs}} = f(E_{\text{inc}}) \sim$ bonne focalisation du laser

Energie absorbée en fonction de l'énergie incidente



Part de l'énergie absorbée par rapport à l'énergie incidente

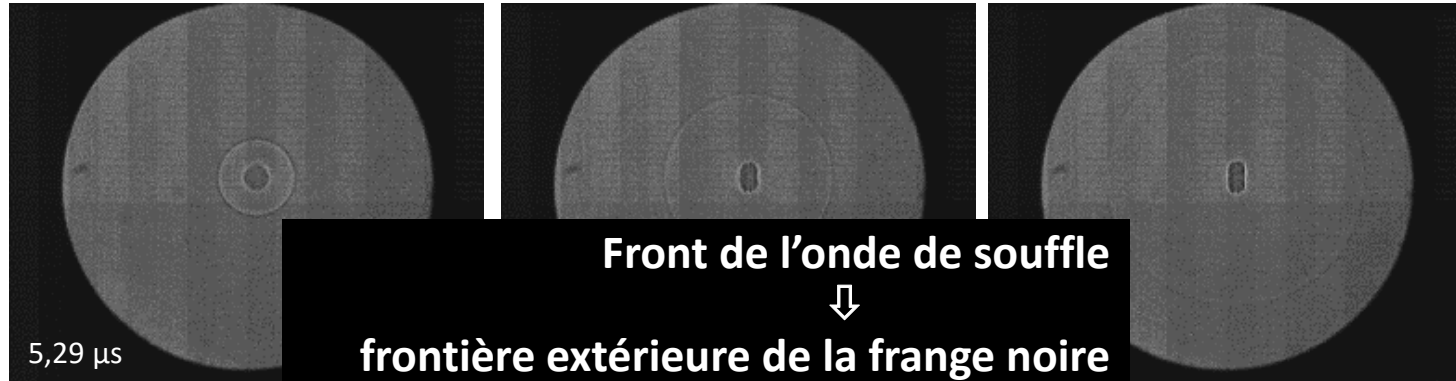




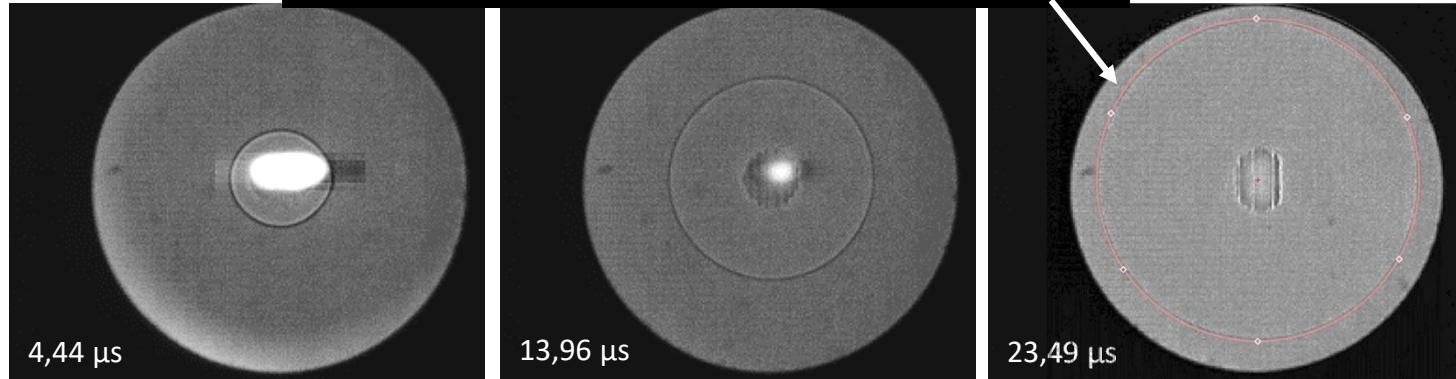
Etude des ondes de souffle: ombroscopie

Cas d'un PIL : Exemple [$105000\text{i/s} - t_{\text{exp}}=0.37\mu\text{s}$]

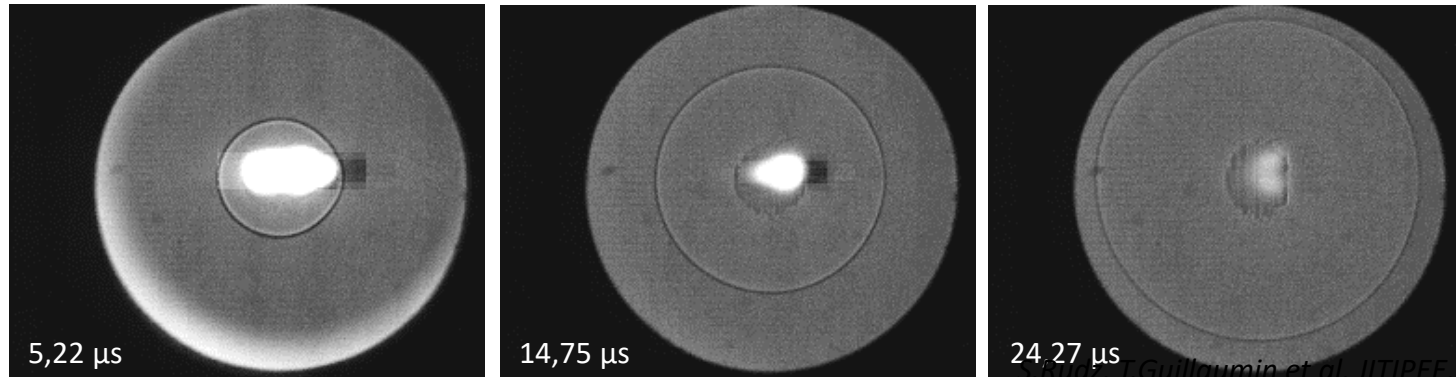
■ 10 mJ

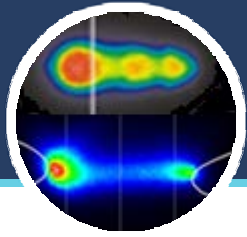


■ 50 mJ



■ 100 mJ

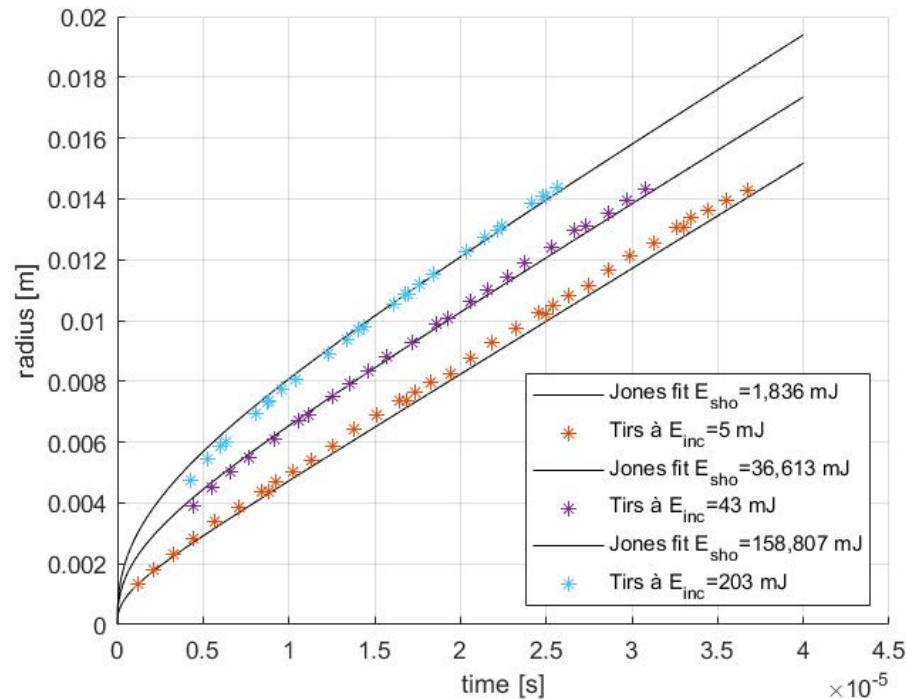




Etude des ondes de souffle: ombroscopie

Résultats expérimentaux – Modèle de Jones

■ Rayon en fonction du temps



Modèle de Jones (chocs intermédiaires):

- à $t = 0$, le choc est considéré fort $\rightarrow P_0 \sim 0$;
- à $t \rightarrow \infty$, la vitesse de l'onde de souffle est la vitesse acoustique du milieu.

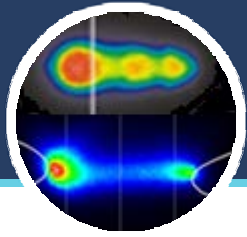
$$\tau = 0,543 \left[\left(1 + 4,61 x(t)^{\frac{5}{2}} \right)^{\frac{2}{5}} - 1 \right]$$

avec $\tau = c_0 \frac{t}{r_0}$; $x(t) = \frac{\overset{\text{mesuré}}{r(t)}}{\overset{\text{cherché}}{r_0}}$; $r_0 = \left[\frac{6,25 E_0}{B \gamma p_0} \right]^{\frac{1}{3}}$

B : facteur géométrique lié au gaz

$B=5,319$ dans l'air.

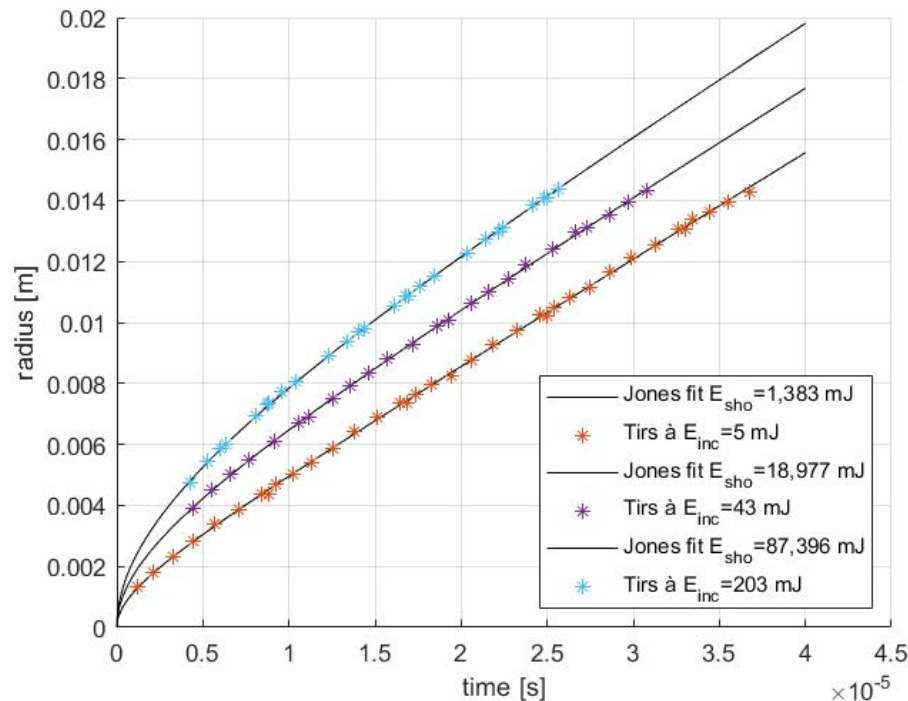
γ : coefficient polytropique du gaz



Etude des ondes de souffle: ombroscopie

Résultats expérimentaux – Modèle de Jones ‘modifié’

■ Rayon en fonction du temps



Modèle de Jones sans l’hypothèse de choc fort :

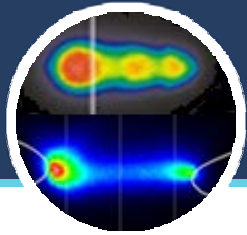
$$\tau = a \left[\left(1 + b x(t)^d \right)^e - 1 \right]$$

- à $t \rightarrow \infty$, la vitesse de l’onde de souffle est la vitesse acoustique du milieu.

$$\Rightarrow e = \frac{1}{d} \quad \text{et} \quad b = a^{-d}$$

avec $\tau = c_0 \frac{t}{r_0}$; $x(t) = \frac{\overset{\text{mesuré}}{r(t)}}{\overset{\text{cherché}}{r_0}}$; $r_0 = \left[\frac{6,25 E_0}{B \gamma p_0} \right]^{\frac{1}{3}}$

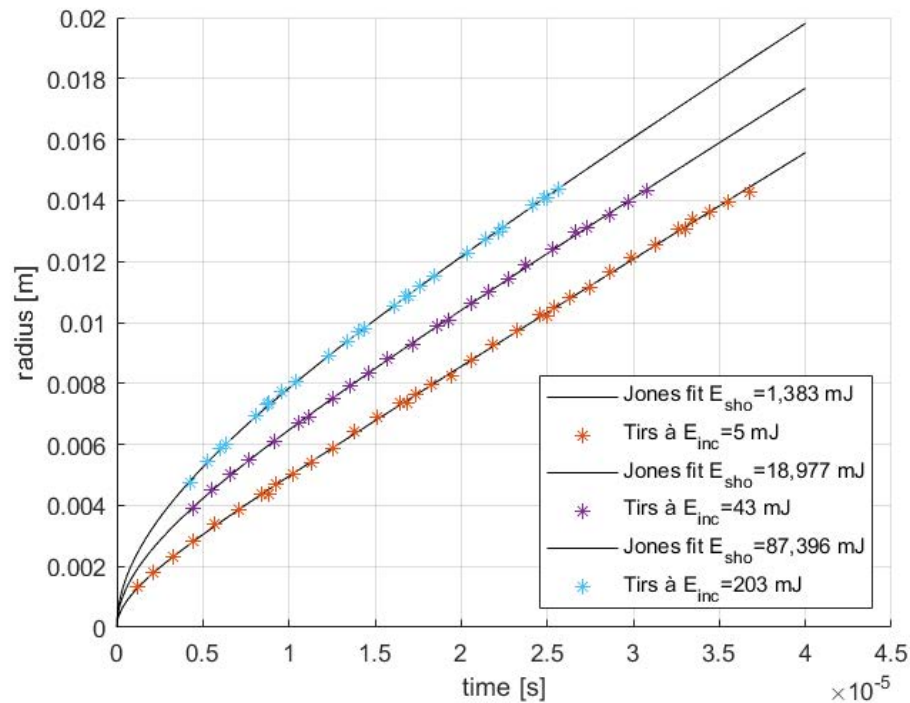
$$\tau = 0,818 \left[\left(1 + 1,485 x(t)^{1,969} \right)^{0,508} - 1 \right]$$



Etude des ondes de souffle: ombroscopie

Résultats expérimentaux – Modèle de Jones ‘modifié’

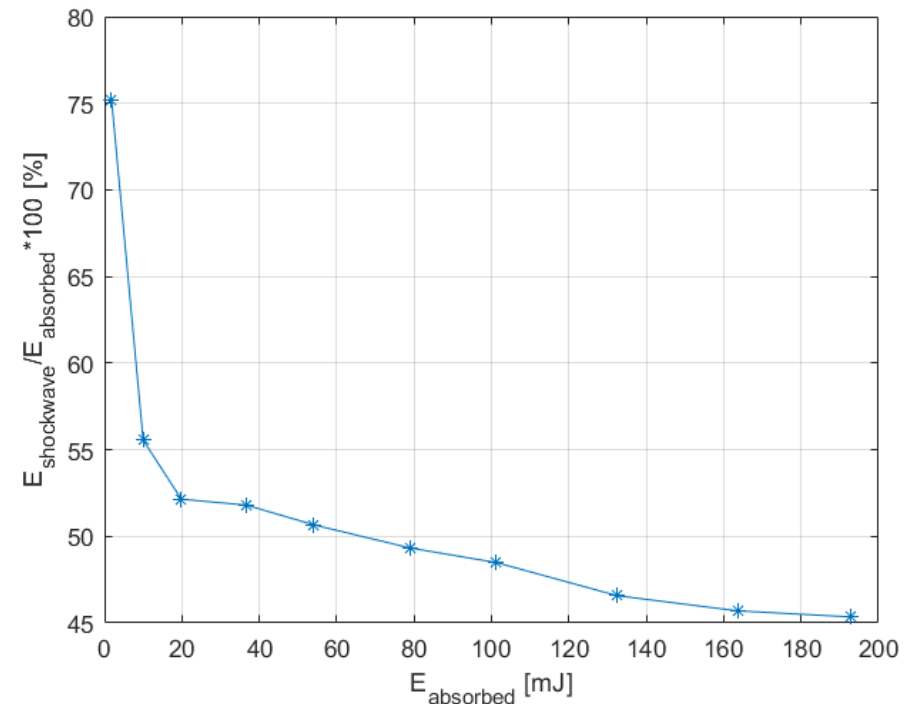
- Rayon en fonction du temps

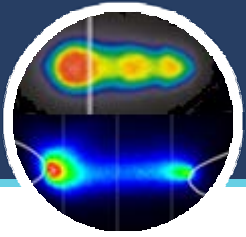


→ Asymptote vers 45%

→ Modèle optimisé pour réévaluer la part d'énergie associée à l'onde de souffle

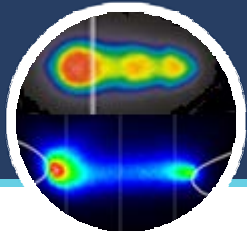
- Part de l'énergie du choc par rapport à l'énergie absorbée





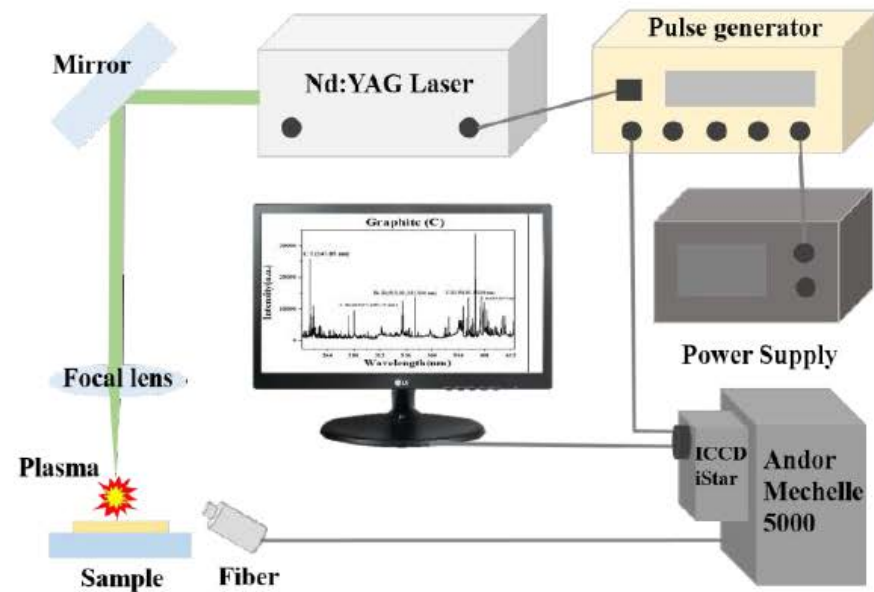
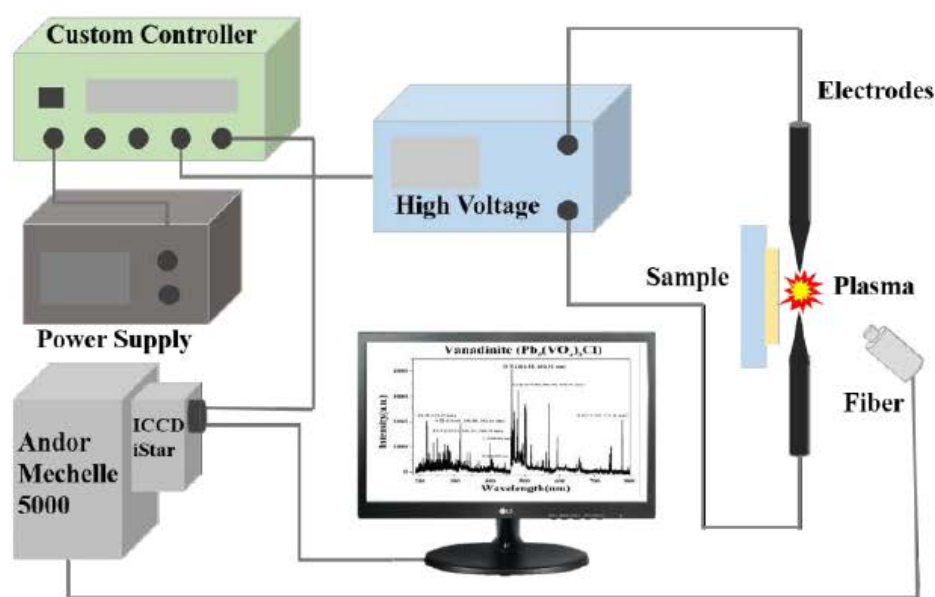
Applications LIBS et SIBS

Caractérisation du plasma

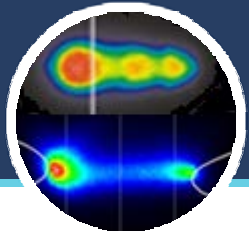


LIBS / SIBS: contexte

- Spectroscopie de claquage induite par laser (LIBS)
- Spectroscopie de claquage induite par étincelle (SIBS)
- 'Spark assisted LIBS' (SA-SIBS)
 - Méthodes portables et robustes pour la détection élémentaire en temps réel



[J. Jung et al, J. Analytical Atomic Spectrometry, 2020]



LIBS / SIBS: contexte

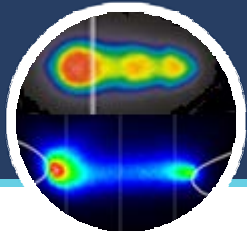
■ Exigences de diagnostic plasma:

- Principaux objectifs: Paramètres Plasma: N_e , T_e , T_i
Composition du Plasma: analyse quantitative

• Méthode idéale

- ✓ Résolution temporelle adéquate à une échelle de temps caractéristique de l'évolution du plasma
- ✓ Résolution spatialement, nécessaire pour cartographier les paramètres du plasma
- ✓ Aucune hypothèse sur l'état d'équilibre du plasma
- ✓ Non intrusive, pour ne pas perturber l'état du plasma

Il n'y a pas de méthode qui remplissent toutes ces conditions



Caractérisation du Plasma: SOE

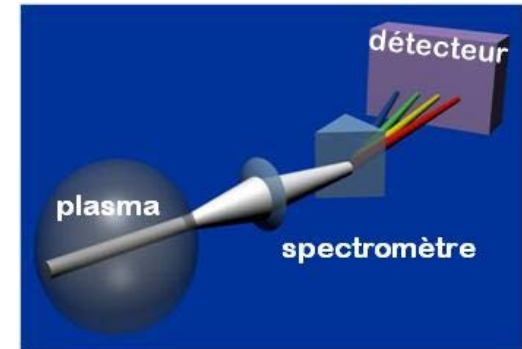
■ Spectroscopie optique d'Emission (SOE):

❖ Méthode non intrusive :

- Permet de déterminer la densité électronique en utilisant l'élargissement Stark des raies spectrales sous hypothèse d'ETL
- Permet d'estimer une température (Graphe de Boltzmann, Graphe de Saha-Boltzmann) sous hypothèse d'ETL

❖ Mais :

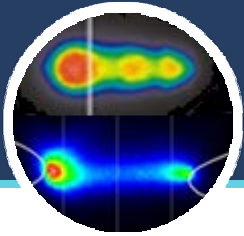
- Mesures intégrées latéralement
- Hypothèse sur l'équilibre thermodynamique
- Réabsorption possible du plasma: erreurs dans le calcul de T_e et N_e
- Disponibilité des données atomiques... dont $\Delta\lambda_S(N_e, T)$



Inversion d'Abel
pour remonter aux distributions radiales
sous certaines conditions...

Calcul de transfert radiatif (LTE-Spec[©])

- Plusieurs zones supposées uniformes
- Prise en compte de la réabsorption
- Le meilleur ajustement fournit N_e , T_{ex} ,
et les concentrations relatives C_x



Caractérisation du Plasma: DT

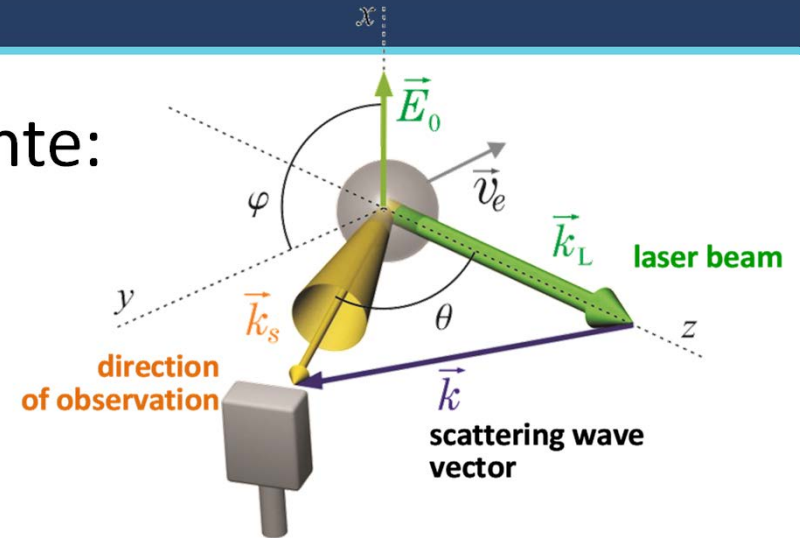
■ Diffusion laser Thomson cohérente:

❖ Avantages :

- Résolu spatialement et temporellement
- Indépendant de l'état d'équilibre du plasma
- N_e , T_e (et T_i) déduits facilement des spectres de diffusion, sans étalonnage préalable

❖ Mais :

- Dispositif expérimental complexe
- Signal de DT faible → utilisation des lasers avec des puissances 'élevées' → intrusive (?)



Puissance diffusée dans l'angle solide $\Delta\Omega$

$$\frac{dP_s}{d\omega_s} d\omega_s = P_L N_e \frac{d\sigma}{d\Omega} \Delta\Omega L S(k, \Delta\omega) d\omega_s$$

$$|\vec{k}| = |\vec{k}_s - \vec{k}_L| \cong \frac{4\pi}{\lambda_L} \sin(\theta/2)$$

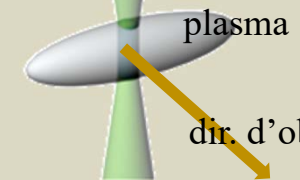
$$\Delta\omega = \omega_s - \omega_L = (\vec{k}_s - \vec{k}_L) \cdot \vec{v}_e$$

Paramètre de diffusion : $\alpha \equiv \frac{1}{k\lambda_D} \approx \frac{1}{4\pi \sin(\theta/2)} \frac{\lambda_L}{\lambda_D}$

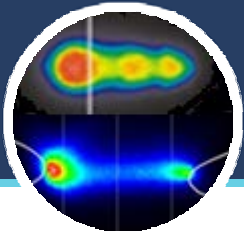
spectral density function

Résolution spatiale

faisceau sonde

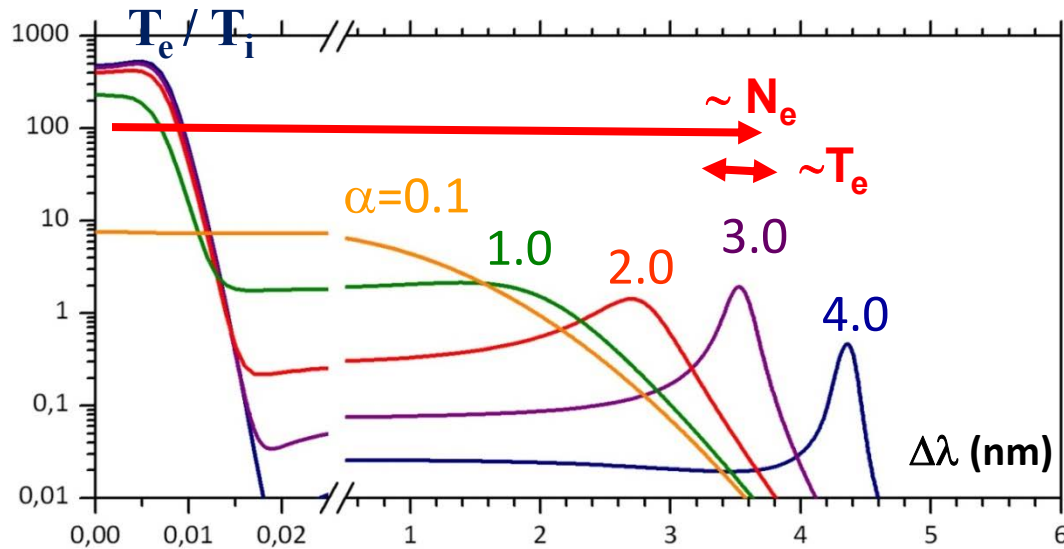


Radialement → laser « sonde » ($\approx 100 \mu\text{m}$)
 Axialement → fente d'entrée ($\approx 10 \mu\text{m}$)



Caractérisation du Plasma: DT cohérente

- ❖ Dans les plasmas induits par laser ($1 < \alpha < 3$)
pour $\lambda = 532 \text{ nm}$ et $\theta = 90^\circ$



Fonction ionique

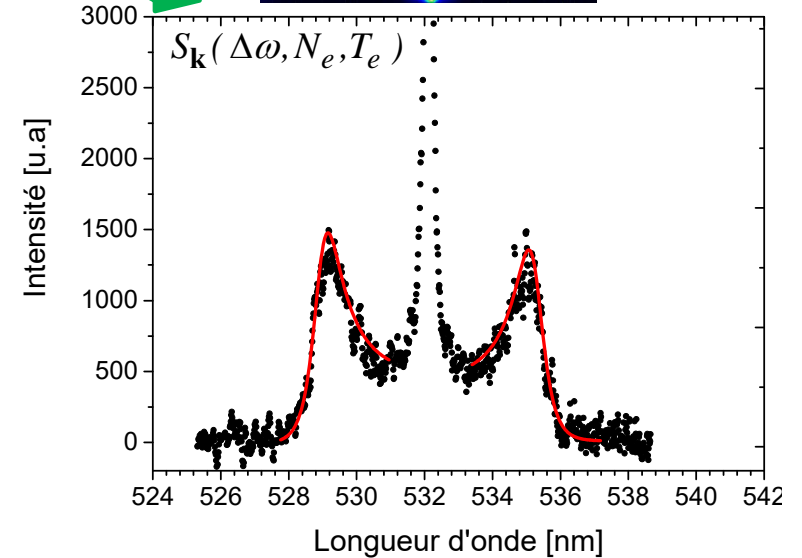
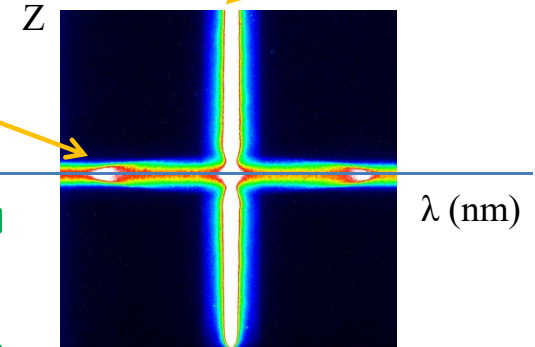
Fonction électronique

$$S(\vec{k}_s, \omega_s) = S_i(\vec{k}_s, \omega_s) + S_e(\vec{k}_s, \omega_s)$$

Pour un \vec{k}_s fixé, S donne le profil du spectre de diffusion

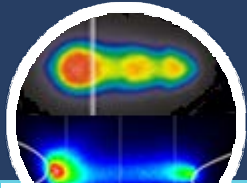
DT (fonction
électronique)

Rayleigh
+ DT (fonction
ionique)



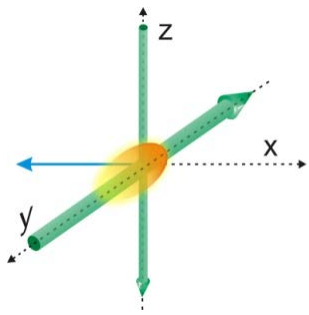
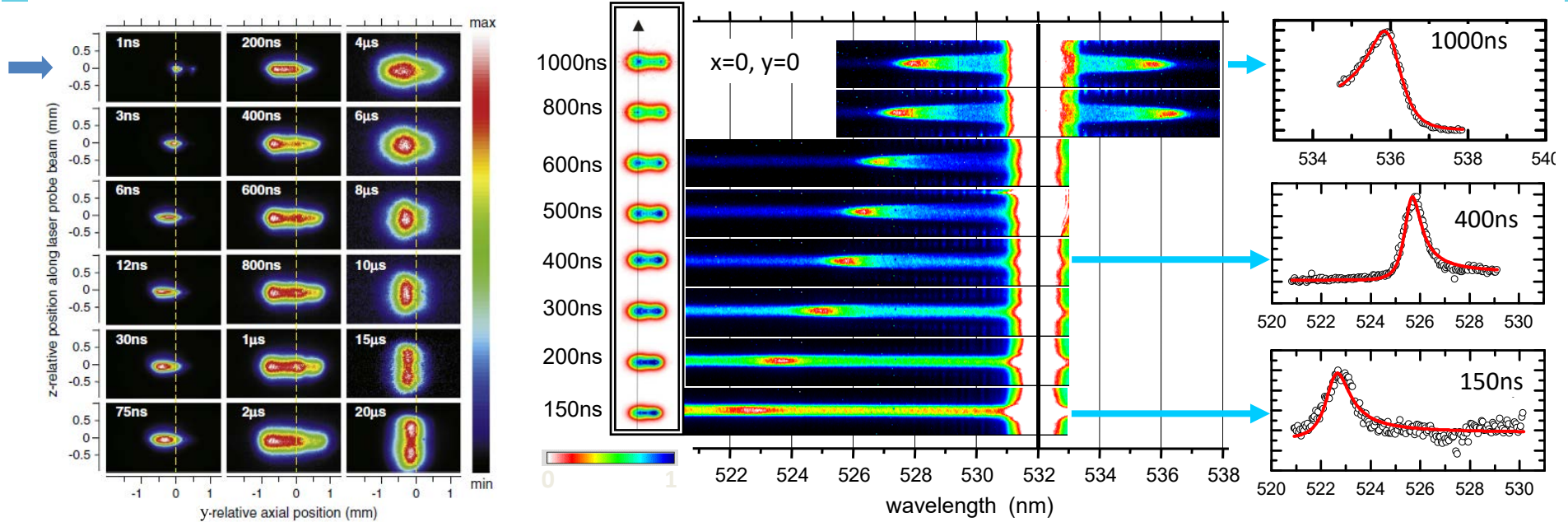
$$N_e = (0,6 \pm 0,02) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$T_e = (16160 \pm 800) \text{ K}$$

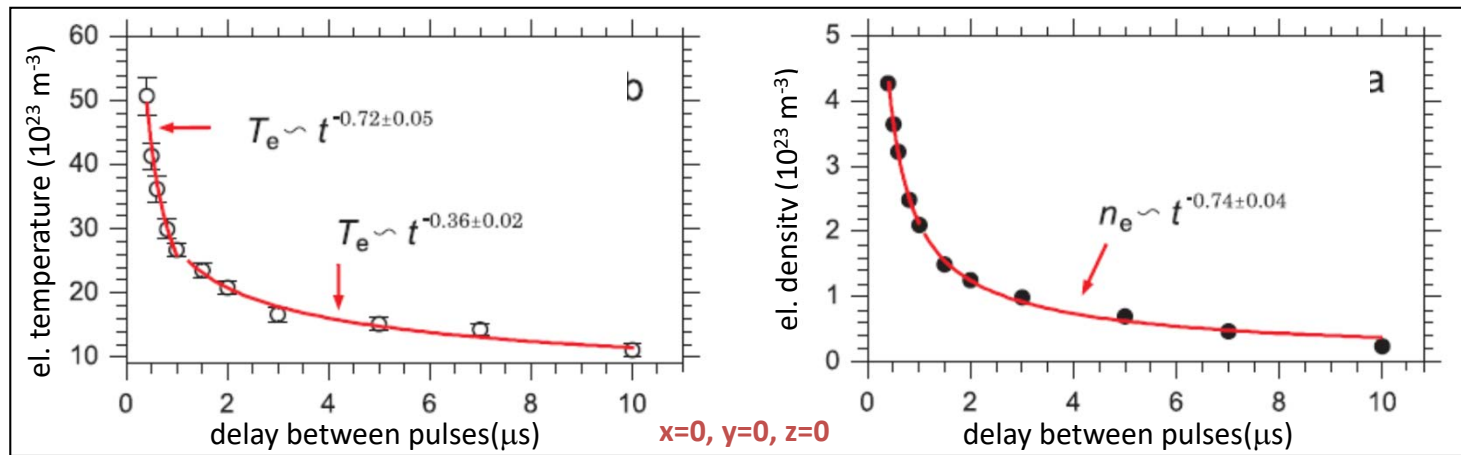


Caractérisation du Plasma: DT cohérente

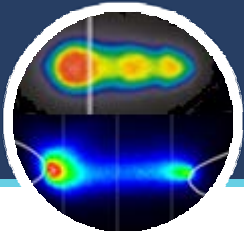
N_e and T_e evolution on axis of LIP in argon by 6ns pulse of $2\text{kJ}/\text{cm}^2$ fluence



Pump : $2\text{kJ}/\text{cm}^2$
 Probe : $16\text{J}/\text{cm}^2$
 ICCD gate – 6 ns



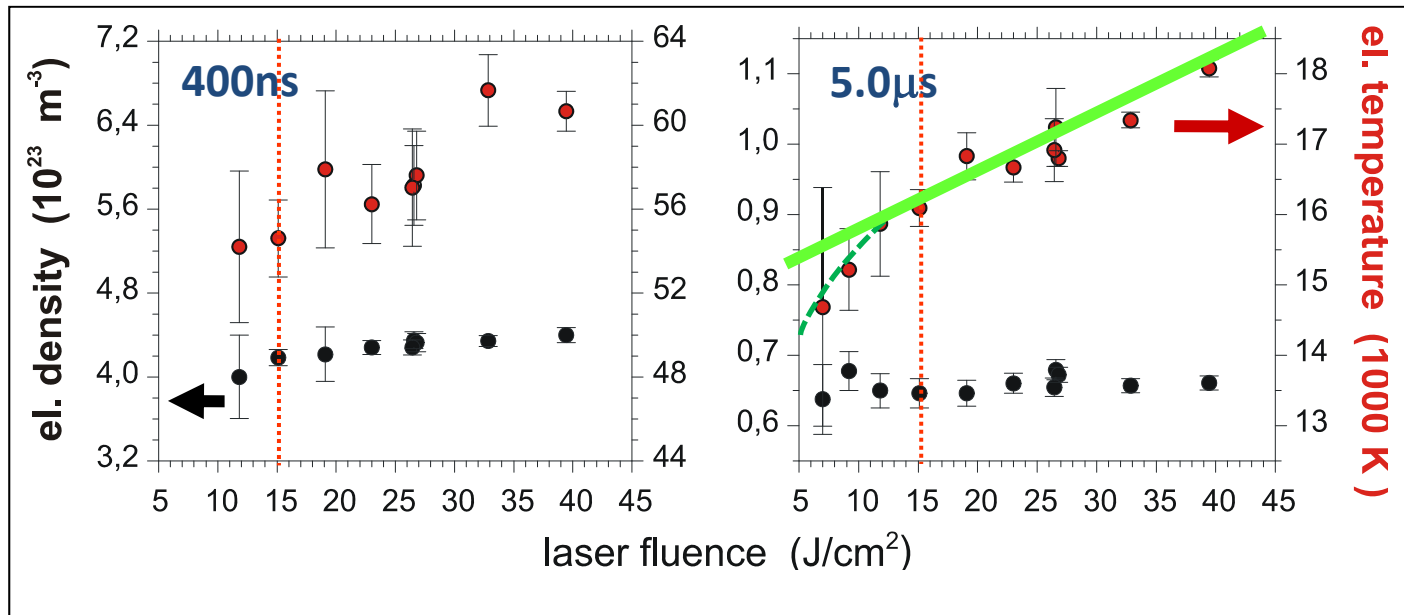
A. Mendys, et al., *Spectrochim. Acta B* (2011) **66**, 691; doi:10.1016/j.sab.2011.08.002



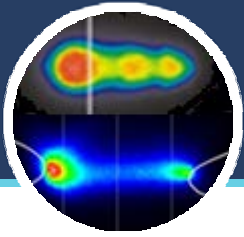
Caractérisation du Plasma: DT cohérente

N_e and T_e evolution on axis of LIP in argon by 6ns pulse of 2kJ/cm² fluence

Influence de l'énergie du faisceau sonde sur T_e



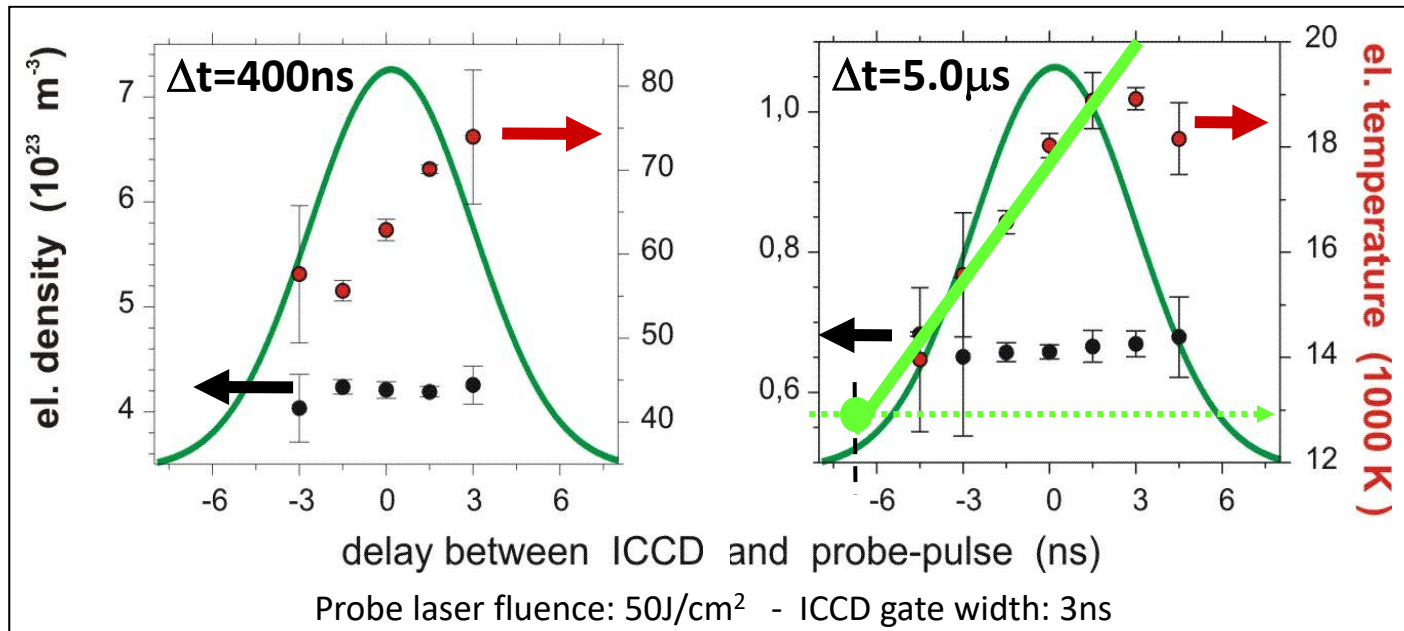
- A faible fluence, pas de modification significative de T_e , mais l'incertitude augmente rapidement
- A fluence élevée, T_e peut être 'modifiée' par le faisceau sonde
- Phénomène non linéaire → attention à l'extrapolation 'à fluence nulle'!



Caractérisation du Plasma: DT cohérente

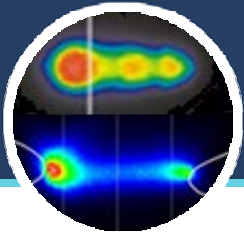
N_e and T_e evolution on axis of LIP in argon by 6ns pulse of 2kJ/cm² fluence

Influence de l'énergie du faisceau sonde sur T_e



A. Mendys, et al., *Spectrochim. Acta B* (2011) **66**, 691; doi:10.1016/j.sab.2011.08.002

- Contrairement à N_e , T_e est considérablement perturbée
→ **Extrapolation des mesures à l'origine de l'impulsion**
- Nécessité de **travailler avec une fluence du laser sonde réduite** en-dessous de la limite de perturbation des mesures de T_e !



Caractérisation du Plasma: DT cohérente

'Time resolved Ne and Te measurements via TS in an atm.ns pulsed discharge'

⇒ Application à une étincelle

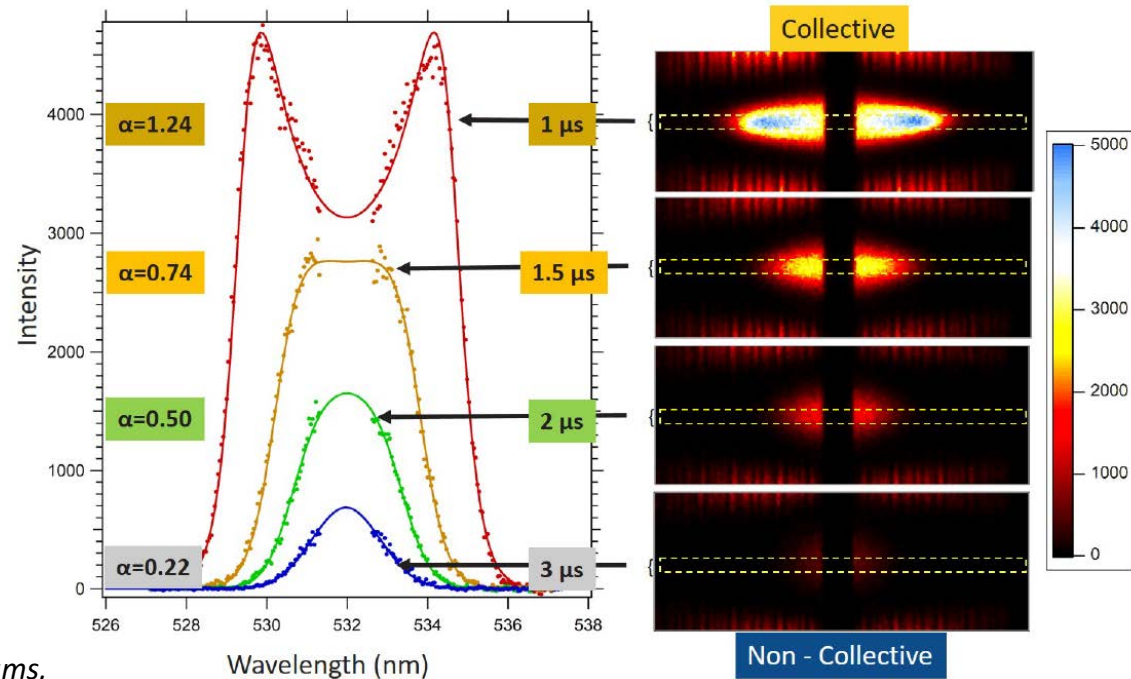
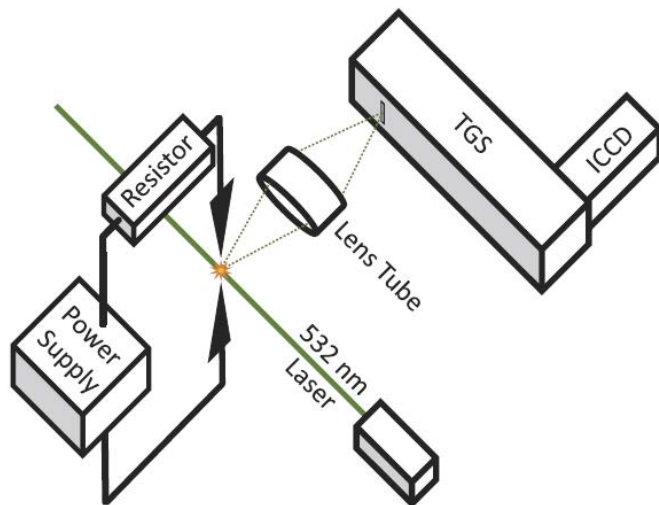
Pulsed power supply: 15 kV, 10 ns (FWHM)

Pin-to-pin electrodes: W, gap = 2 mm

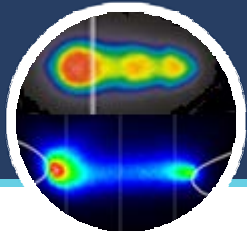
Probe laser: 532 nm Nd:Yag laser, 7 mJ

Light collection: triple grating spectrometer (TGS), iCCD

⇒ N_e décroît jusque $20 \mu\text{s}$ après l'impulsion



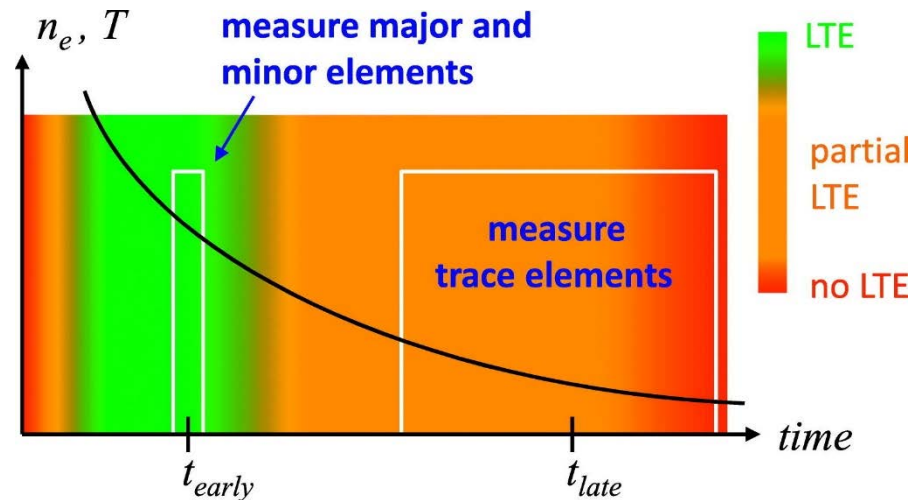
J. Miles, C.Murray, A.Ross, K.Lemmer, J.Russell and S.Adams,
Plasma Sources Sci. Technol. 29 (2020) 07LT02



Détermination des paramètres Stark

Contexte

- Forte variation des paramètres N_e et T_e lors de l'évolution du plasma
 → détermination de N_e par SOE nécessite de connaître $\Delta\lambda_s(N_e, T_e)$



C.T.Chen, D.Banaru, T.Sarnet, J.Hermann, Spectrochimica Acta Part B, 2018

Plasma induit par laser → procédure de mesure en deux étapes pour améliorer la sensibilité de la LIBS sans étalonnage

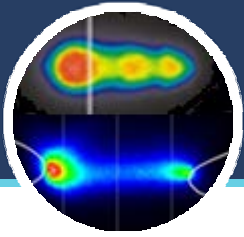
■ SOE

- Paramètres Stark ($\Delta\lambda_s, \Delta d_s$)
 d'Ar I à 696,5 nm et d'Ar II à 480,6 nm



■ DT

- Densité électronique : N_e
- Température électronique : T_e



Détermination des paramètres Stark

Exemple: PIL dans l'argon, P = 0,4 bar

■ Ar I à 696,5 nm

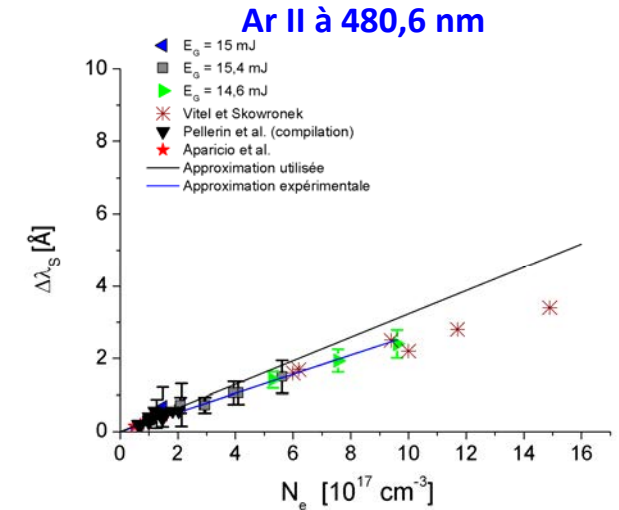
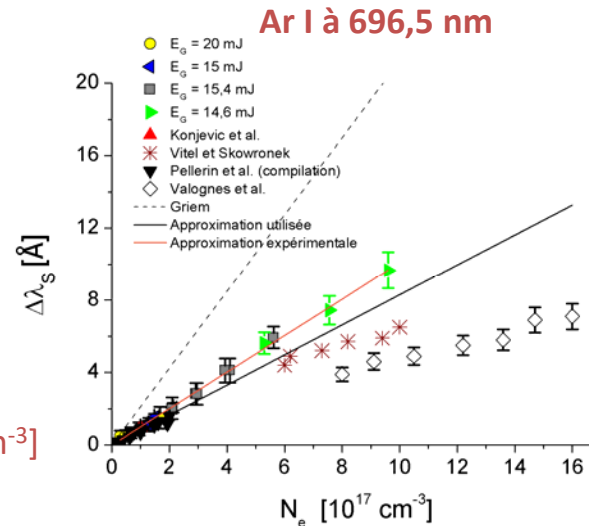
$$\Delta\lambda_S [\text{\AA}] = 1,01 (\pm 0,01) \cdot N_e [10^{17} \text{ cm}^{-3}]$$

$$\Delta d_S [\text{\AA}] = 3,25 (\pm 0,04) \times 10^{-1} \cdot N_e [10^{17} \text{ cm}^{-3}]$$

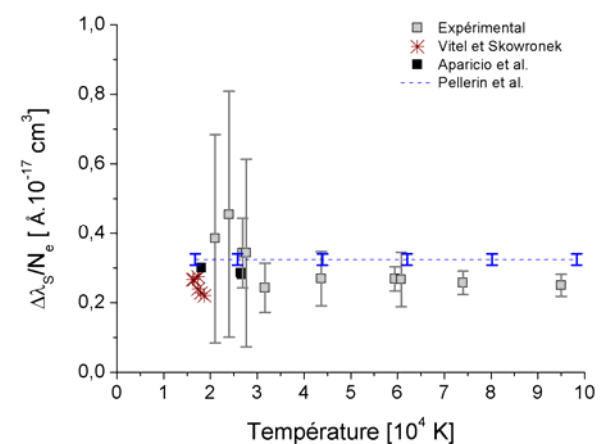
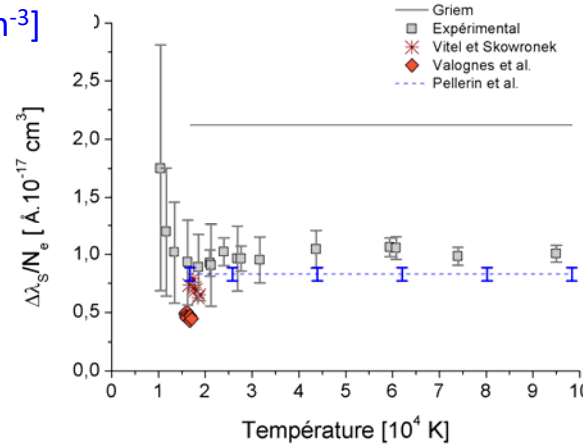
■ Ar II à 480,6 nm

$$\Delta\lambda_S [\text{\AA}] = 2,62 (\pm 0,08) \times 10^{-1} \cdot N_e [10^{17} \text{ cm}^{-3}]$$

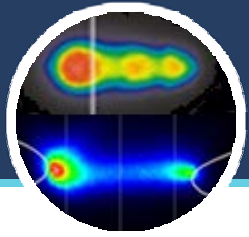
$$\Delta d_S [\text{\AA}] = -2,74 (\pm 0,09) \times 10^{-2} \cdot N_e [10^{17} \text{ cm}^{-3}]$$



Évolution des paramètres Stark en fonction de la densité électronique



Évolution des paramètres Stark en fonction de la température électronique



En guise de conclusion

- Claquage laser

- ↳ Possibilité de générer des déflagrations/détonations reproductibles
- ↳ détermination de l'énergie transmise dans l'onde de choc par ombroscopie
- ↳ Prise en compte du modèle de Jones 'modifié' pour un choc intermédiaire

- LIBS / SIBS

- ↳ Intérêt de la Diffusion Thomson pour caractériser le milieu...
sous certaines précautions !
- ↳ Gammes de T_e et N_e étendues → intérêt pour la détermination des paramètres de raie spectrale
- ↳ Possibilité d'utiliser la diffusion Rayleigh pour 'suivre' l'onde de souffle



Connexion

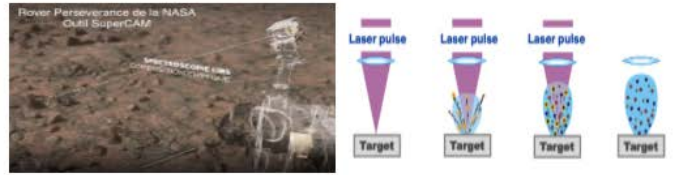
- NAVIGATION**
- Accueil
 - Intervenants
 - Programme
 - Inscriptions ▾
 - Cours
 - Forum des entreprises
 - Informations Pratiques
 - Partenaires
 - Comité d'organisation

- SUPPORT**
- @ Contact

ANF LIBS – DES LABORATOIRES À LA SURFACE DE LA PLANÈTE MARS

NOTA: Le pass-sanitaire est obligatoire pour la formation du fait de la restauration et de l'hotellerie.

ANF LIBS est une formation du réseau des plasmas froids de la MITI du CNRS et du réseau LIBS France sur la méthode de spectroscopie d'émission optique de plasma créé par laser (LIBS: laser-induced breakdown spectroscopy). Il s'agit d'une technique d'analyse chimique élémentaire entièrement optique, rapide, et ne nécessitant aucun contact.



En associant des cours, des travaux pratiques, des ateliers thématiques, et des rencontres avec des industriels et revendeurs, cette action vise à :

- faire connaître les techniques d'analyse multi-élémentaires,
- former les stagiaires aux bases de la technique LIBS, leur transmettre une méthodologie de mise en œuvre, et les initier à la technique et aux performances de l'imagerie LIBS.
- transmettre aux stagiaires les connaissances pluridisciplinaires essentielles pour la compréhension et l'utilisation de la technique (interaction laser-matière, plasma, spectroscopie)
- faire connaître aux stagiaires les possibilités de la technique LIBS avec

INFOS ET PARTENAIRES

- **PRE-INSCRIPTION**
- **LIEN AZUR COLLOQUE**



<https://anfplasmalaser.sciencesconf.org/>

deadline: 2 novembre



Merci de votre attention

