

Action Nationale de Formation (ANF) - CNRS

Plasmas & mécanique des fluides

Laboratoire CORIA, Saint-Etienne du Rouvray

Cours - TP

Ombroscopie – stroboscopie laser : principes de bases, performances & mise en œuvre

Aurélien Favre

CORIA UMR 6614, Université de Rouen – Normandie, 76801 Saint-Etienne du Rouvray, France

✉ : aurelien.favre@coria.fr

Propos, en tant qu'utilisateur...

1. Généralités : imagerie à gradient d'indice

- a. Ombroscopie
 - i. définition
 - ii. montages & exemples
- b. Strioscopie
 - i. définition
 - ii. exemples
- c. Bilan

~ 45 mins

2. Application : plasmas induits par laser (PIL)

- a. Quelques mots sur la physique d'un PIL
- b. De nombreux exemples...
 - i. qualitatif
 - ii. quantitatif
- c. Le savoir faire du CORIA
 - i. expérimental
 - ii. simulation

~ 45 mins

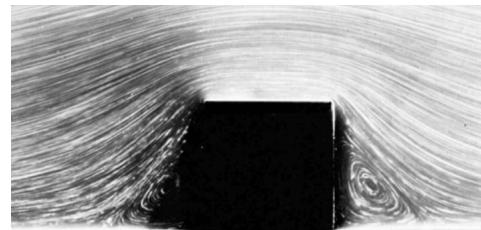
3. Démonstration : OB16

Sommaire

NACA012
(Air, $Re = 5000$, $\alpha = 16^\circ$)
ONERA



Décollement turbulent
amont obstacle
A. Sohankar (2015)



Allée de Bénard-von Kármán
V. Dyke (1982)
Thèse F. Thiesset



Combustion
Flammes de butane avec
prémélange décroissant (G à D)
EM2C, CNRS



Plasma
Décharge électrique
(générique : soudure)



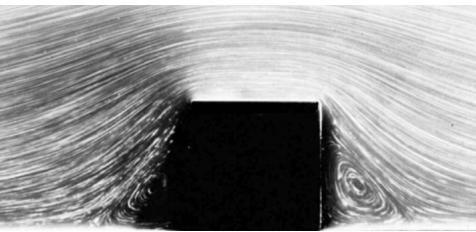
Écoulements **fluides** :
aérodynamiques ou/et (diphasique) hydrodynamiques

Écoulements **réactifs** :
flammes (moléculaire, basses T) ou plasmas (atomique, hautes T)



Sujet du jour!

*non exhaustive...



Caractérisation* d'un écoulement (réactif) :

- dimensions caractéristiques
à différentes échelles spatiales
- temps caractéristiques
à différentes échelles temporelles

Non intrusif :
imagerie

Non intrusif :
simulation - CFD
LES, RANS, DNS
(YALESS2 - V. Moureau)
(F. Thiesset + L. Danaila)

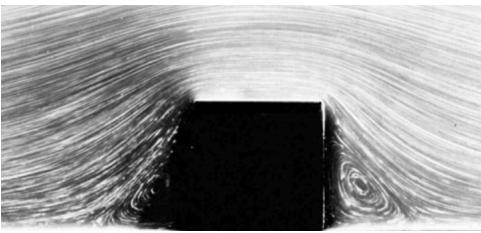
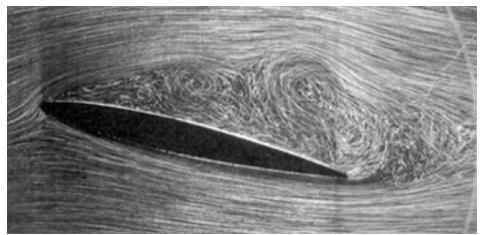
Intrusif :
traçage
diffusion de Mie
(LDV / PIV - B. Lecordier)

- (chimie)
scalaires : T , x , ...

(spectroscopie)
émission / absorption

(schéma cinétique)
taux de réaction,
sections efficaces

(sonde optique)
fluorescence,
diffusion Raman,
Rayleigh, Thomson,
LIBS
(P. Boubert)



Caractérisation* d'un écoulement (réactif) :

- dimensions caractéristiques
à différentes échelles spatiales
- temps caractéristiques
à différentes échelles temporelles
- (chimie)
scalaires : T , x , ...

Techniques d'**imagerie**
non intrusives :

interférométrie,
holographie,
ombroscopie,
strioscopie

(M. Brunel)
(D. Lebrun)

Sujet du jour!

→ Visualisation :

interfaces
turbulence
instabilités
atomisation
onde de choc
...

Variations de ρ

Équation de **Clausius-Mosotti** (ou **Lorenz-Lorentz**) :

→ Décrit la modification des propriétés diélectriques (ϵ_r , ou optique n) d'un milieu en interaction avec un champ électrique (onde électromagnétique - lumière)

$$(C-M) \quad \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \quad (L-L)$$

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$: permittivité du vide

$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ constante diélectrique relative du milieu (avec ϵ la permittivité absolue du matériau)

N : nombre d'atomes/molécules par unité de volume (m^{-3})

α : polarisabilité moyenne d'un atome/molécule ($\text{C m}^2 \text{ V}^{-1}$)

n : indice de réfraction

On suppose un milieu peu dense : $n \approx 1$ donc $n = 1 + \delta$ (avec $\delta \ll 1$)

$$n^2 = (1 + \delta)^2 = 1 + 2\delta + \delta^2 \approx 1 + 2\delta$$

Donc

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \approx \frac{2\delta}{3+2\delta} \approx \frac{2\delta}{3} \text{ (DL 1er ordre)}$$

D'où

$$\delta \approx \frac{N\alpha}{2\epsilon_0}$$

Comme $n = 1 + \delta$, on obtient :

$$n \approx 1 + \frac{N\alpha}{2\epsilon_0}$$

Il vient alors naturellement :

$$n \approx 1 + \frac{N\alpha}{2\varepsilon_0} \leftrightarrow n - 1 \approx \frac{N\alpha}{2\varepsilon_0}$$

N peut s'exprimer en fonction de la masse volumique en fonction du nombre d'Avogadro N_A ainsi que de la masse molaire M par :

$$N = \frac{N_A \rho}{M}$$

On obtient alors :

$$n - 1 \approx \frac{N_A \alpha}{2\varepsilon_0 M} \rho$$

On reconnaît ici la forme macroscopique pour les milieux peu denses de l'équation de L-L, aussi appelée équation de **Gladstone-Dale** :

$$n - 1 \approx K\rho$$

K est appelée constante optique :

- $K = f(T, \lambda)$
- aussi définie pour des milieux denses (liquides, solides transparents)

Valeurs indicatives :

ordre de grandeur : $K = \frac{n-1}{\rho} \sim 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Air (20°C, 10⁵ Pa) : $K \approx 2,4 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Eau (20°C, 589 nm) : $K \approx 3,3 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

Silice (20°C, 589 nm) : $K \approx 2,08 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

→ Des variations de ρ induisent des variations de n !

Principe de **Fermat** : la lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée de parcours soit extrémale.

- propagation rectiligne des rayons lumineux dans des milieux homogènes

- fondements de l'optique géométrique

- lois des Snell-Descartes (réflexion / réfraction)

→ en cas d'inhomogénéité (écoulement / changement de milieu de propagation), l'équation d'**Euler** traduit analytiquement le principe de Fermat ($s \equiv$ abscisse curvilinear / trajectoire du rayon lumineux) :

$$\overrightarrow{\text{grad}} n = \frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{OM}}{ds} \right)$$

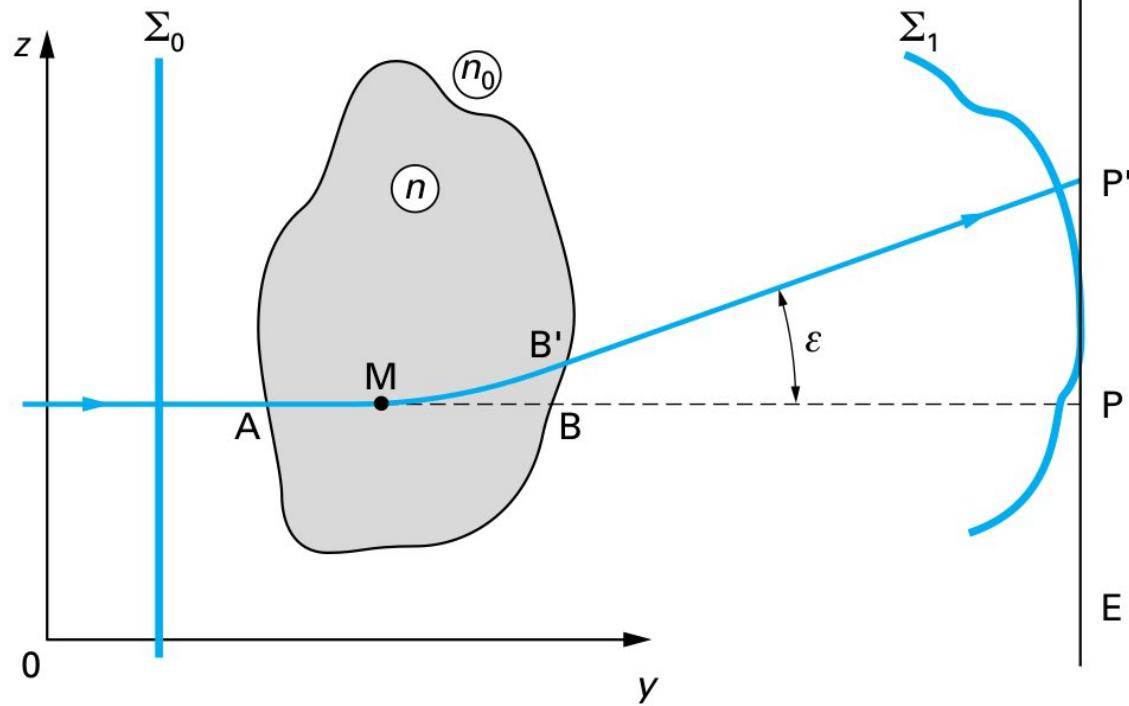
Cette équation matérialise le fait que la propagation de tout rayonnement lumineux incident est modifiée par le changement d'indice $n_0 \rightarrow n$.

Prenons l'exemple d'une onde plane incidente Σ_0 perpendiculaire à Oy . En aval de la région d'indice n , après passage du milieu fluide, le front d'onde est modifié en Σ_1 .

Un rayon lumineux normal à Σ_0 qui se projetait en P en l'absence d'écoulement, est en réalité observé en P' sur l'écran (E).

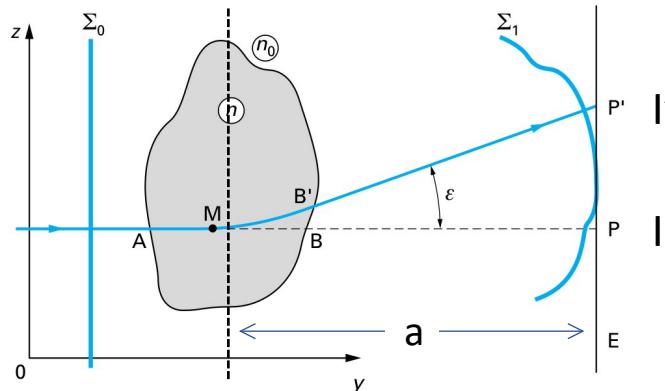
La distance algébrique PP' est portée par l'angle de déflexion ε (en toute rigueur $\varepsilon = \varepsilon(x, z)$) que nous simplifions en :

$$\varepsilon \approx \int \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} ds$$



a. Ombroscopie - définition

1. Généralités : imagerie à gradient d'indice



On note I et $I' = I + \Delta I$ les éclairements collectés sur l'écran (E) respectivement en P et P' , la perturbation relative de l'éclairement induite par l'écoulement est alors :

$$\frac{\Delta I}{I} \approx a \int_A^B \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \ln n dy$$

L'**ombroscopie**, ou « méthode des ombres », « ombrographie » ou encore « *shadowgraphy* » permet ainsi de mettre en évidence la **dérivée seconde** de n (et donc de ρ).

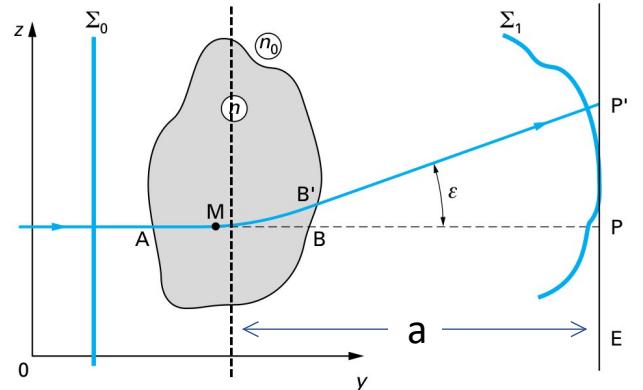
- La dérivée seconde marque une sensibilité à la **variation** du gradient : cette méthode est donc adaptée à la visualisation de phénomènes présentant des interfaces nettes telles que les ondes de choc.
- Si intégration temporelle de longue durée devant le phénomène à capturer : interprétabilité nulle
→ privilégier une source d'éclairage cohérente (laser) et impulsionnelle (laser, led)

mais

- ◆ nécessite de la synchronisation (générateur de délais, déclenchement, etc)
- ◆ impose une grande prudence (écran = photodetecteur dans l'axe optique de la source d'éclairage) !
- ◆ l'atténuation d'une source cohérente induit généralement des artefacts optiques difficilement correctibles

a. Ombroscopie - montages & exemples

1. Généralités : imagerie à gradient d'indice

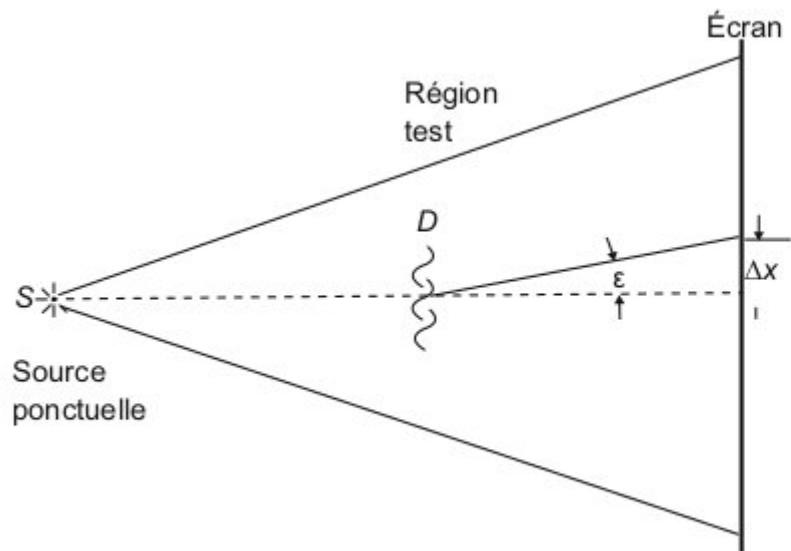


On note I et $I' = I + \Delta I$ les éclairements collectés sur l'écran (E) respectivement en P et P' , la perturbation relative de l'éclairage induite par l'écoulement est alors :

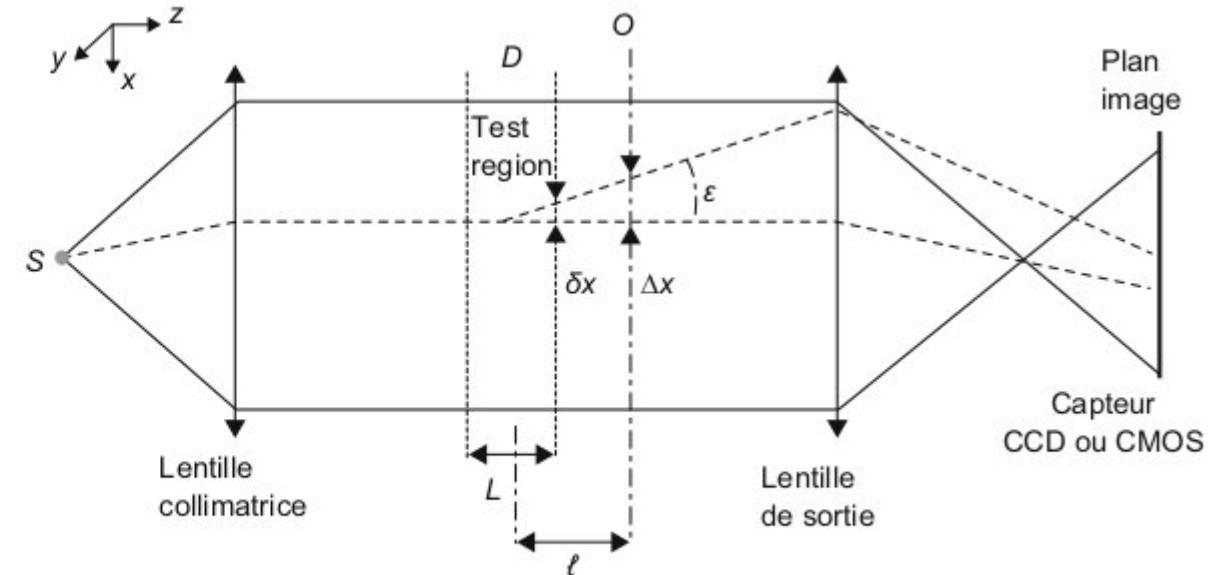
$$\frac{\Delta I}{I} \approx a \int_A^B \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \ln n \, dy$$

L'**ombroscopie**, ou « méthode des ombres », « ombrageographie » ou encore « *shadowgraphy* » permet ainsi de mettre en évidence la **dérivée seconde** de n (et donc de ρ).

Il est possible d'imager cette variation de différentes manières, les deux plus répandues étant :



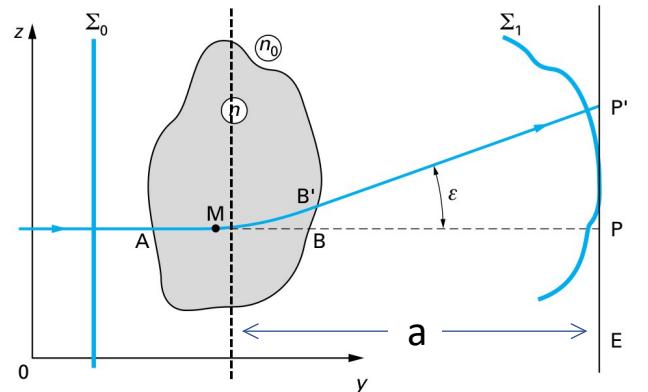
(a) montage d'ombroscopie en lumière diffuse



(b) montage d'ombroscopie en lumière parallèle

a. Ombroscopie - montages & exemples

1. Généralités : imagerie à gradient d'indice

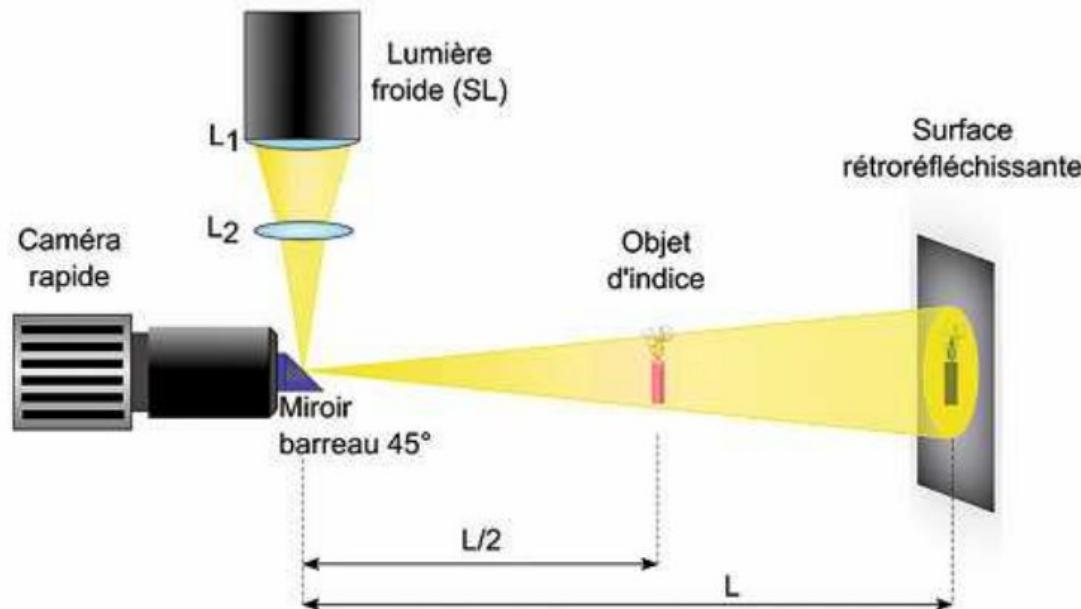


On note I et $I' = I + \Delta I$ les éclairements collectés sur l'écran (E) respectivement en P et P' , la perturbation relative de l'éclairement induite par l'écoulement est alors :

$$\frac{\Delta I}{I} \approx a \int_A^B \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \ln n dy$$

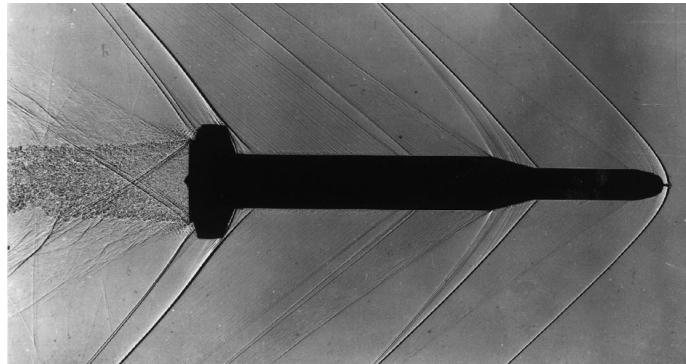
L'**ombroscopie**, ou « méthode des ombres », « ombrageographie » ou encore « *shadowgraphy* » permet ainsi de mettre en évidence la **dérivée seconde** de n (et donc de ρ).

Une alternative existante mais moins répandue est l'ombroscopie rétroréfléchissante :



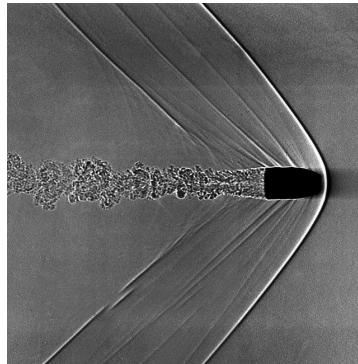
a. Ombroscopie - montages & exemples

1. Généralités : imagerie à gradient d'indice



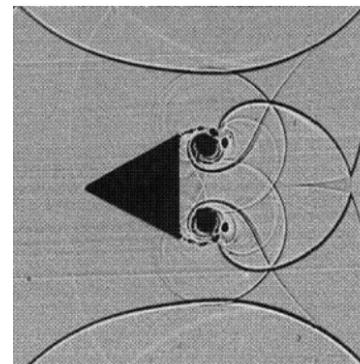
Projectile supersonique

M. Giraud, Rapport ISL T 11/65, 1965



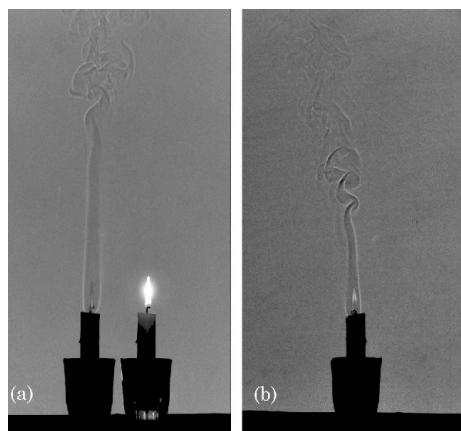
Projectile supersonique

A. Davidhazy, NASA, 2008



Obstacle triangulaire tube à choc

W. Merzkirch, Acad. Press, 1981

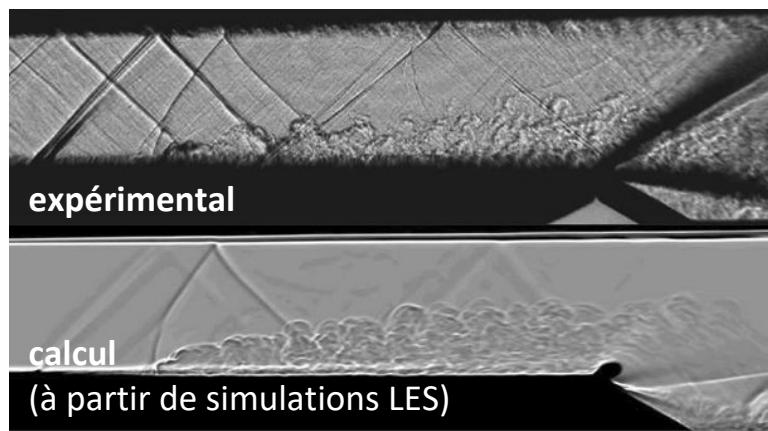


(a)

(b)

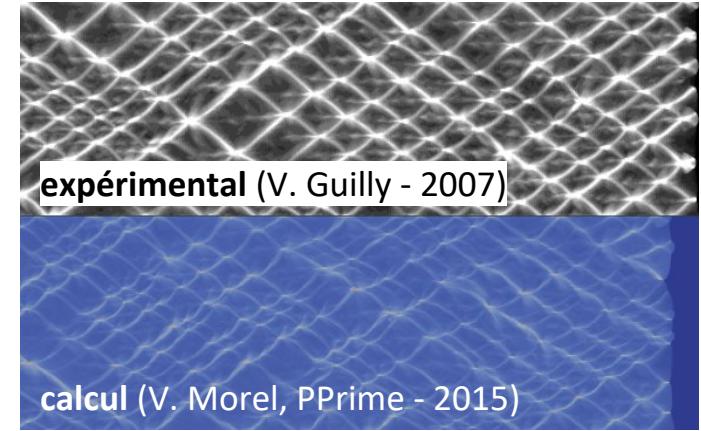
Bougies

M. Hargather *et al.*, Appl. Opt., 2009



Jet d'He à $Ma = 1,5$

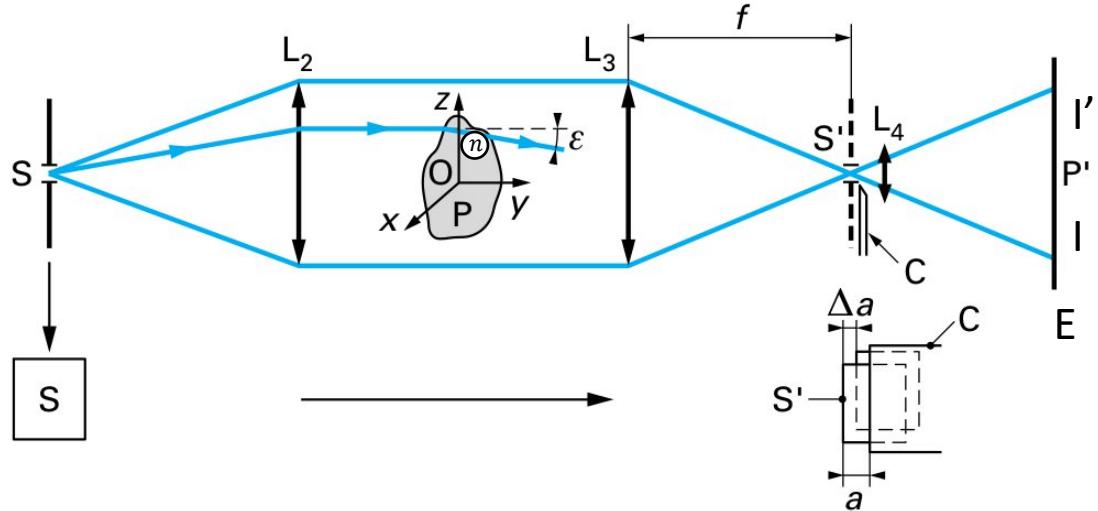
E. Luthman *et al.*, Exp. Fluids, 2019



Cellules de détonation

b. Strioscopie - définition

1. Généralités : imagerie à gradient d'indice



L'écoulement (indice n) à visualiser doit être éclairé en lumière parallèle (L_2).
On image les déflexions à l'aide de L_3 de focale f .
Au plan focal image (S'), on positionne un couteau de filtrage optique C qui induit des déformations Δa de l'image de S .

On note I et $I' = I + \Delta I$ les éclairements collectés sur l'écran (E) après filtrage optique, on montre alors que :

$$\frac{\Delta I}{I} \propto \frac{f}{a n} \frac{\partial n}{\partial z} \quad (\text{couteau d'arête parallèle à } Ox)$$

$$\frac{\Delta I}{I} \propto \frac{f}{a n} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (\text{couteau d'arête parallèle à } Oz)$$

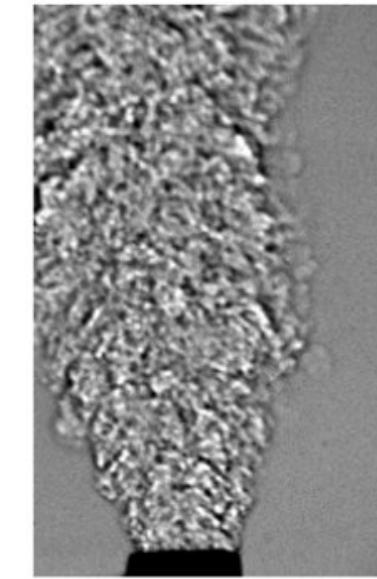
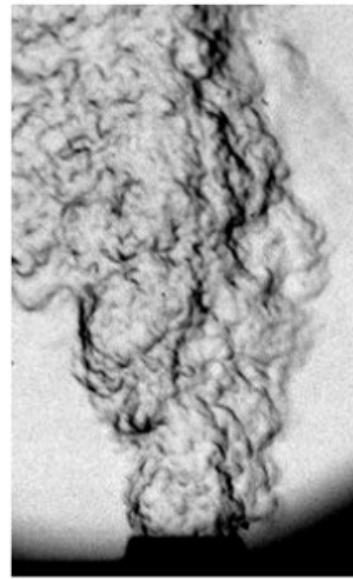
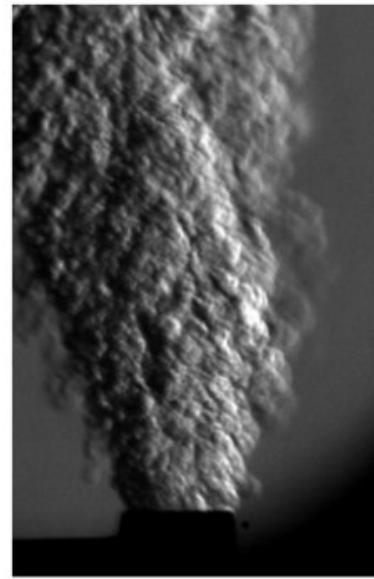
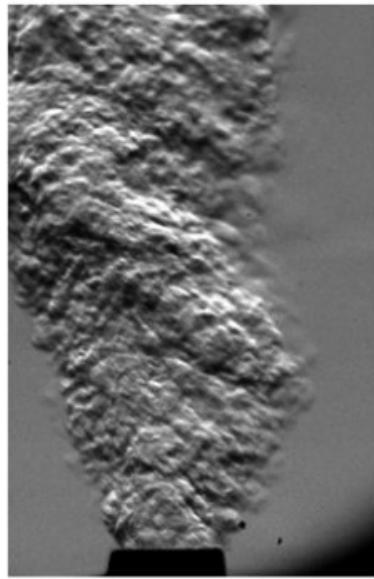
La **strioscopie** permet ainsi de mettre en évidence la **dérivée première** de n (et donc de ρ).

La dérivée première marque une sensibilité à la **variation** propre de n : cette méthode est donc adaptée à la visualisation de phénomènes présentant des interfaces moins marquées que des fronts de choc (convection, diffusion, etc).

Vocabulaire :

- si la source S d'éclairage de l'écoulement est incohérente / thermique : on parle d'imagerie *Schlieren*
- en éclairage cohérent : pas d'appellation particulière
- le couteau de filtrage est aussi appelé :
 - « couteau de Foucault-Toepler » (scientifiques à l'origine de ce dispositif autour de 1860)
 - « couteau de Gauss » (optique gaussienne - positionnement au plan focal de Gauss)
 - « *knife edge* »

Influence de l'orientation et de la géométrie du couteau de filtrage sur l'image obtenue en E :



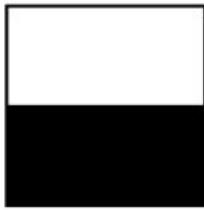
Jet d'He pour :

(a) couteau horizontal,

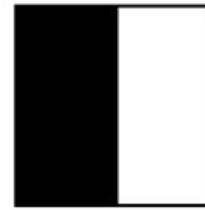
(b) couteau vertical,

(c) couteau annulaire,

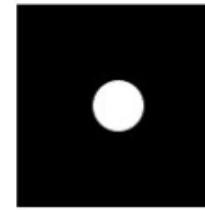
(d) pas de couteau = ombrascopie



(a)



(b)



(c)

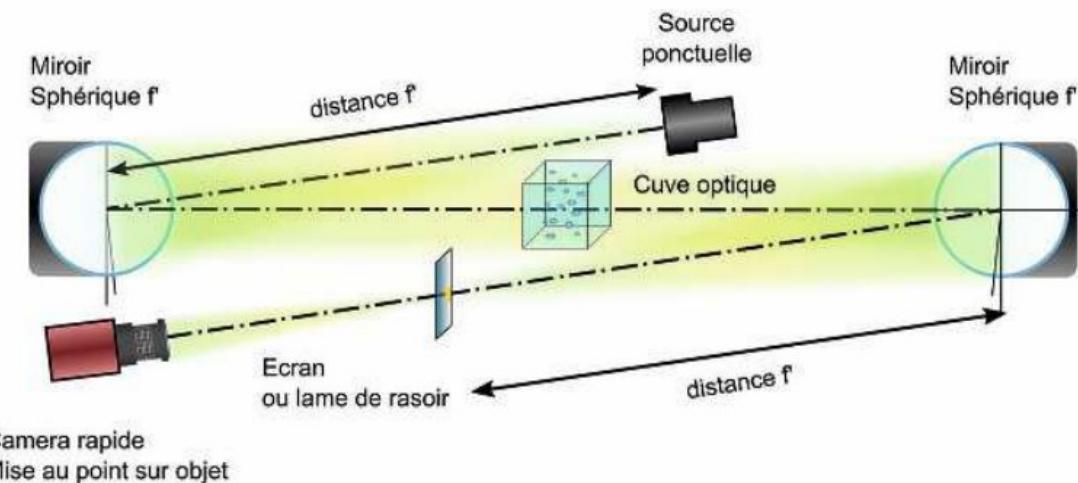


(d)

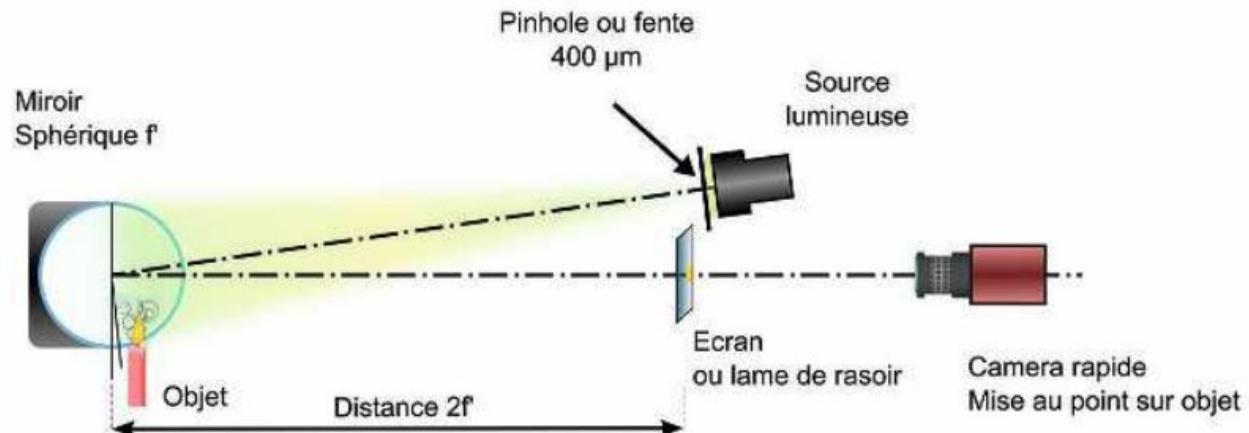
Autre information : couteau = objet de géométrie aiguë → une arête trop émoussé agit comme un écran opaque non filtrant
 Idéal : lame de rasoir (qq 10 µm au fil)...

Méthode	Contraste relié à	Sensibilité	Usage typique
Strioscopie	$\frac{\partial n}{\partial x}$	Variations spatiales de n	Convection, diffusion : petits écarts de densité
Ombroscopie	$\frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$	Variations spatiales du gradient de n	Chocs, turbulence marquée : « discontinuités » de densité

Pour les deux méthodes, variantes avec miroir sphérique :

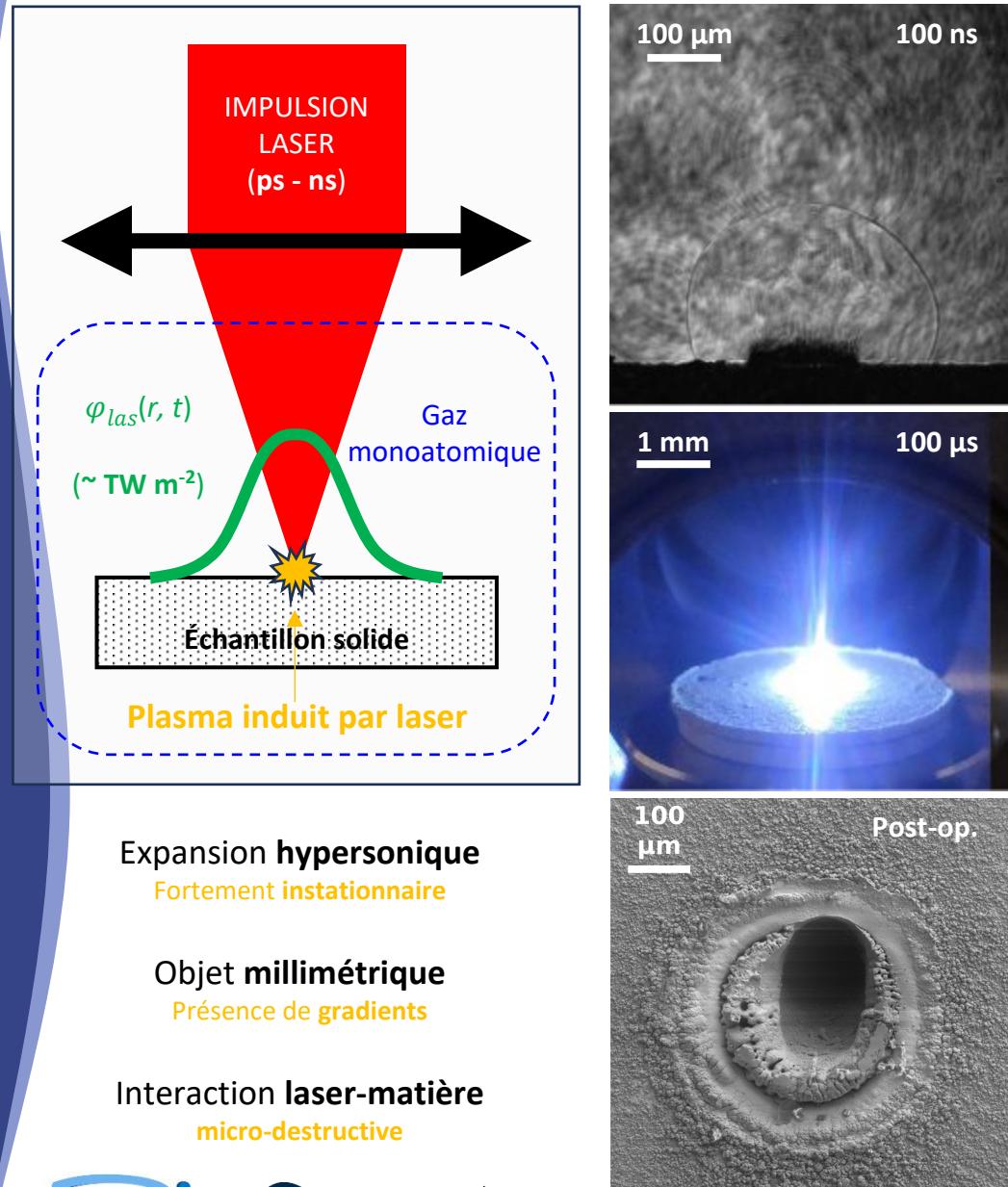


Montage en Z : simple traversée

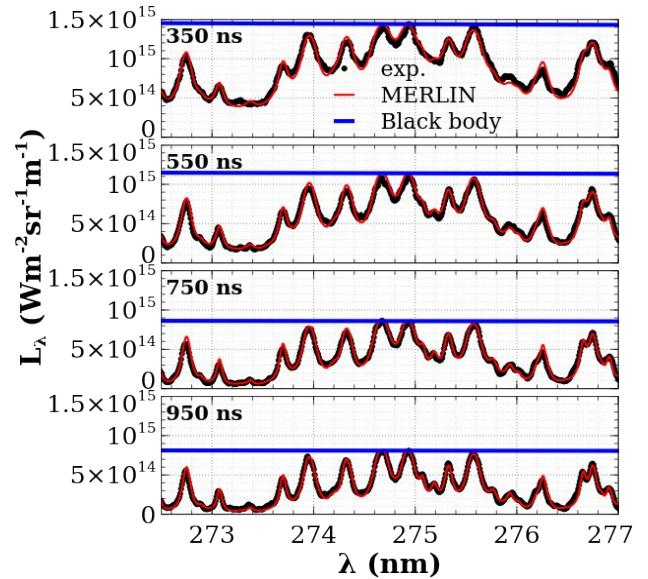
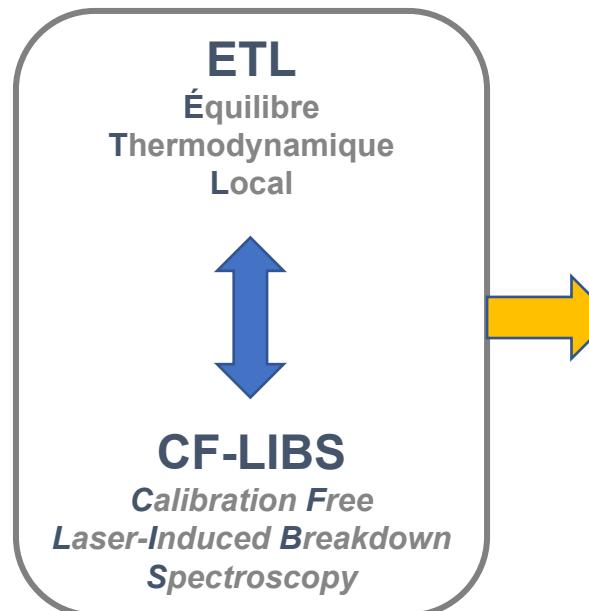
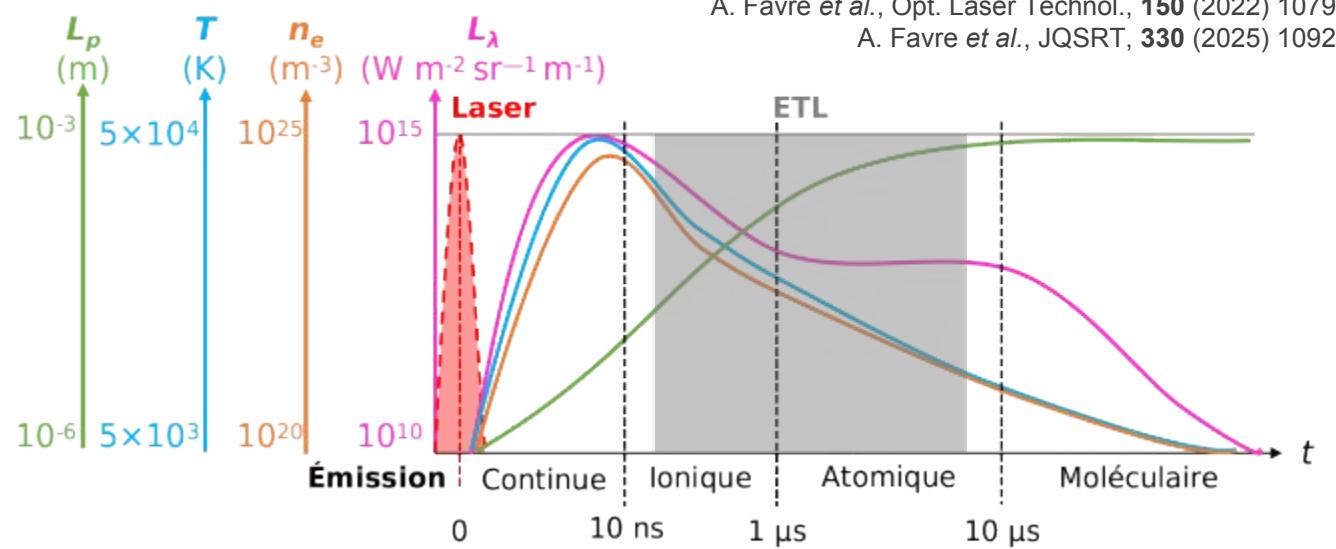


Montage en double traversée

a. Quelques mots sur la physique d'un PIL



2. Application : plasmas induits par laser (PIL)



MERLIN (*MultiElemental Radiative equiLibrium emissioN*)

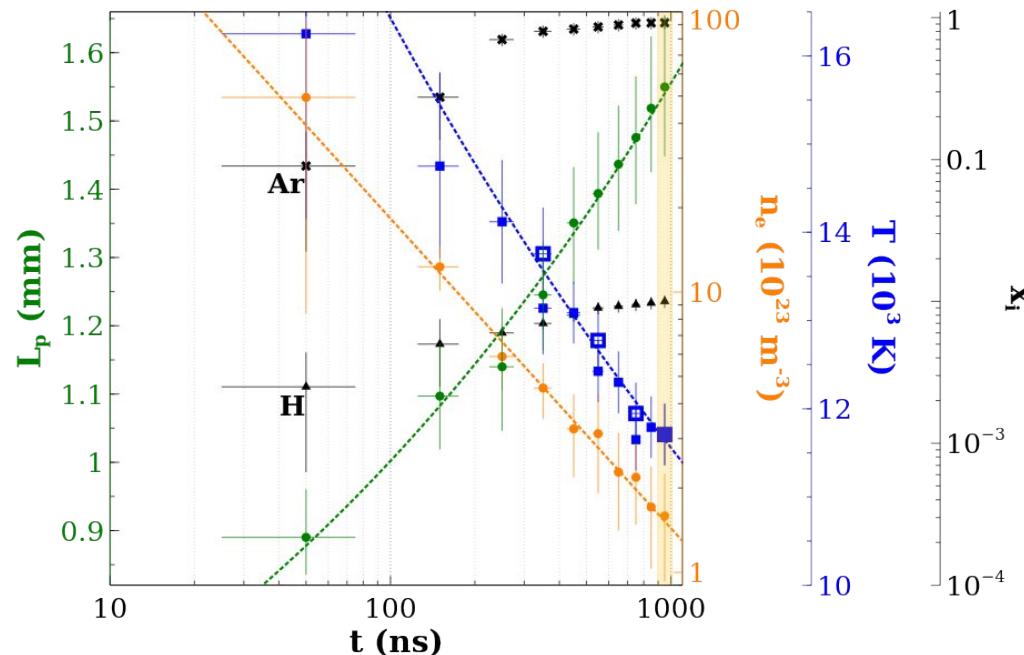
A. Favre et al., JQSRT, 330 (2025) 109222



Transfert radiatif pour un système réactif quelconque à l'ETL

$$\lambda_{las} = 1064 \text{ nm} \quad \tau_{las} = 6 \text{ ns} \quad \varphi_{las} = (2,5 \pm 0,7) \times 10^{14} \text{ W m}^{-2}$$

Eurofer97 dans $0,5 p_{atm}$ d'Ar (α -Gaz 2) : intégration sur 100 ns



Mesures expérimentales des entrées de MERLIN :

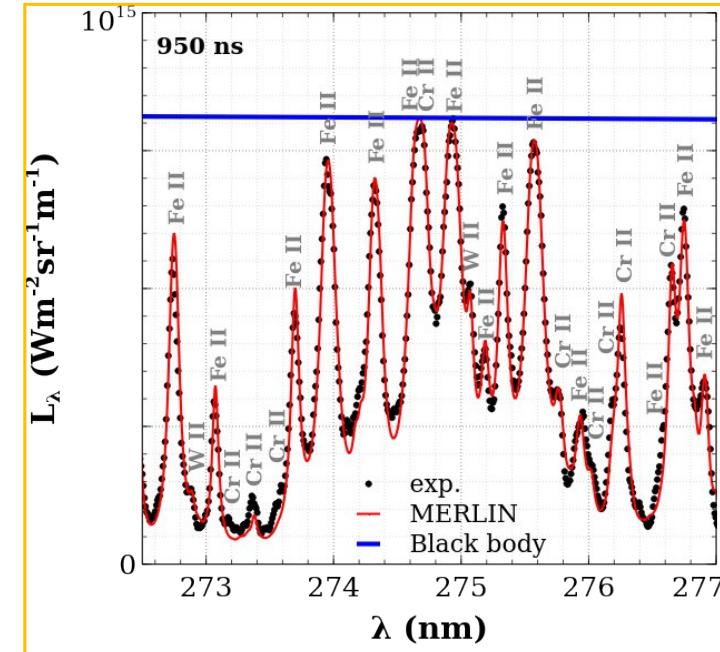
L_p : imagerie

n_e : élargissement Ar I, Ar II et H I

T : Saha-Boltzmann Fe I/Fe II et $L^0_{\lambda \sim 275 \text{ nm}, T}$

x_{Ar}, x_H (par LIBS) x_{EF97} (par XRF)

f_{AP} : par spectroscopie lampe Hg basse pression

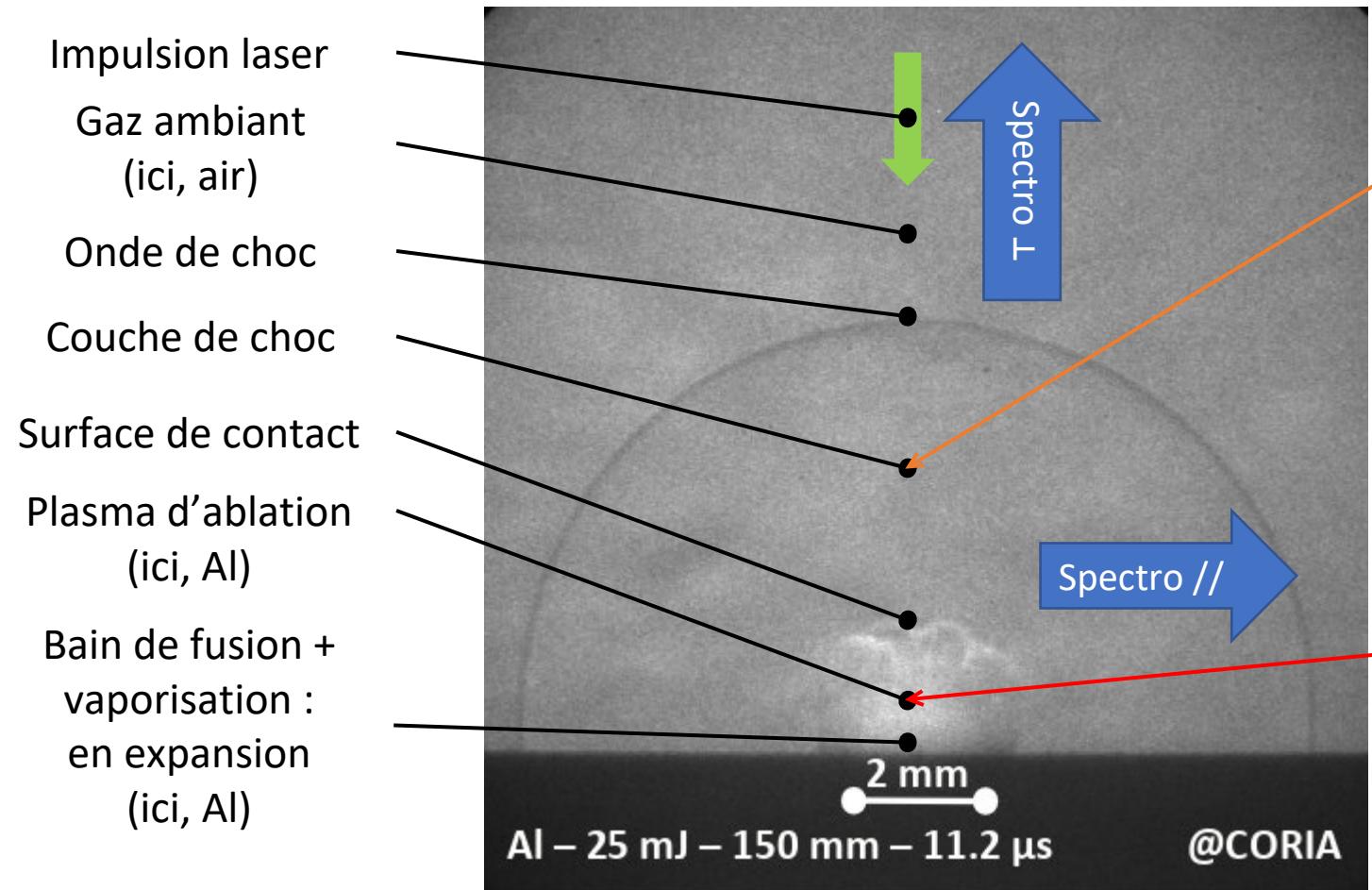


Validation :

- Calcul de composition à l'ETL
- Transfert radiatif : condition limite d'auto-absorption
- Profils spectraux (élargissements et convolutions)

a. Quelques mots sur la physique d'un PIL

Interaction avec le gaz environnant



2. Application : plasmas induits par laser (PIL)

Au passage du front de choc ($\sim 10 \text{ km s}^{-1}$) :

- dissociation (si gaz diatomique)
- ionisation

du gaz environnant.

→ La couche de choc contient donc ici : $\text{O}_2, \text{N}_2, \text{O}, \text{N}, \text{O}^+, \text{N}^+, \text{e}^-$ (+éventuellement ions moléculaires) : c'est aussi un plasma !! À des niveaux de densité et température bien moindres que le plasma d'ablation...

Aux premiers instants : densité du solide & température ($\sim 50\,000 \text{ K}$) → pression $\sim \text{GPa}$
Composition : $\text{Al}, \text{Al}^+, \text{Al}^{2+}, \text{Al}^{3+}, \text{e}^-$

À mesure de l'expansion : recombinaison & dilution
Composition : $\text{Al}, \text{Al}^+, \text{O}, \text{N}, \text{O}^+, \text{N}^+, \text{e}^-$

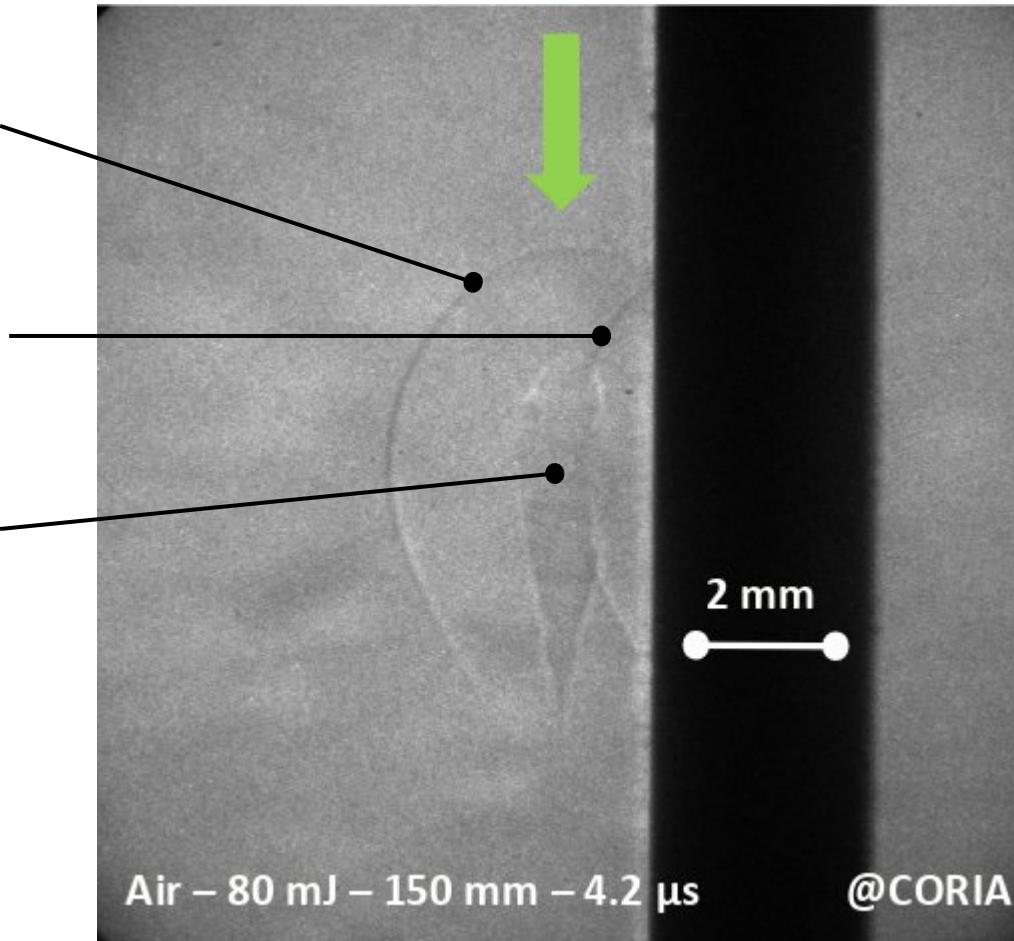
Spectroscopie // ou \perp :
/ !\ effets d'intégrations spatiale
→ Imagerie à gradient d'indice = guide

Interaction avec un obstacle

Onde de choc de premier ordre

Onde de choc de second ordre (réflexion)

Plasma induit par laser (ici, Air)

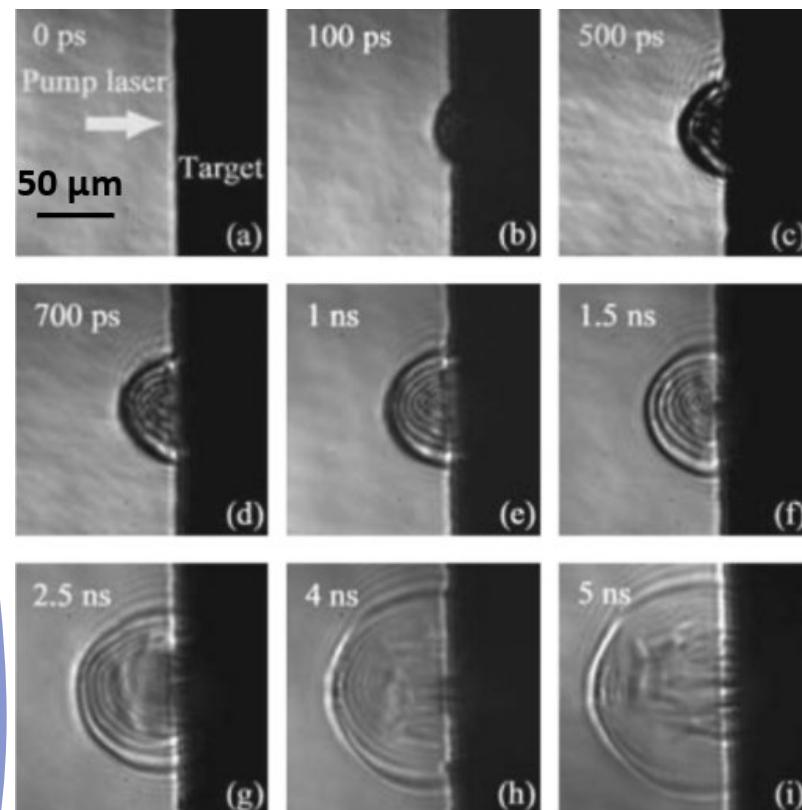


→ Imagerie à gradient d'indice comme guide du spectroscopiste...

...mais aussi comme outil d'**analyse aérodynamique** !

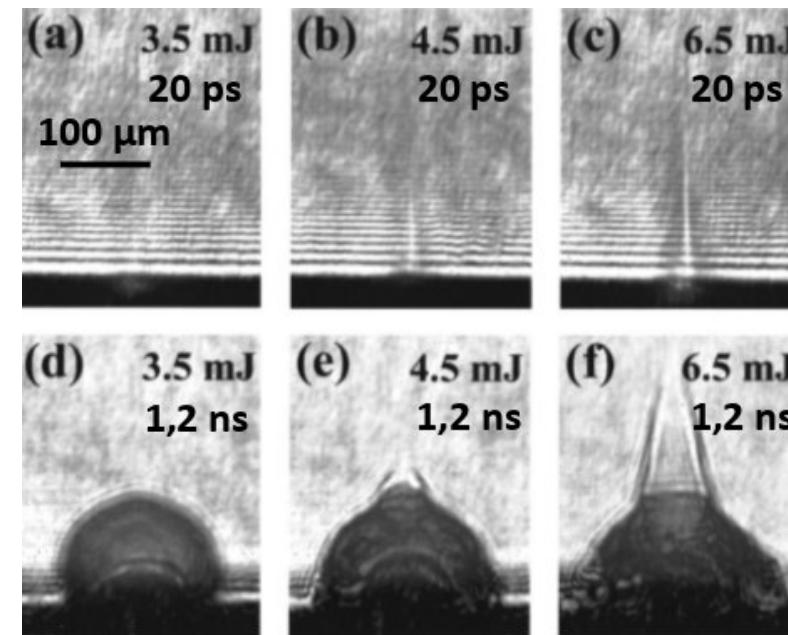
Sujet du jour!

Influence de la nature de l'échantillon irradié & des conditions d'éclairement...



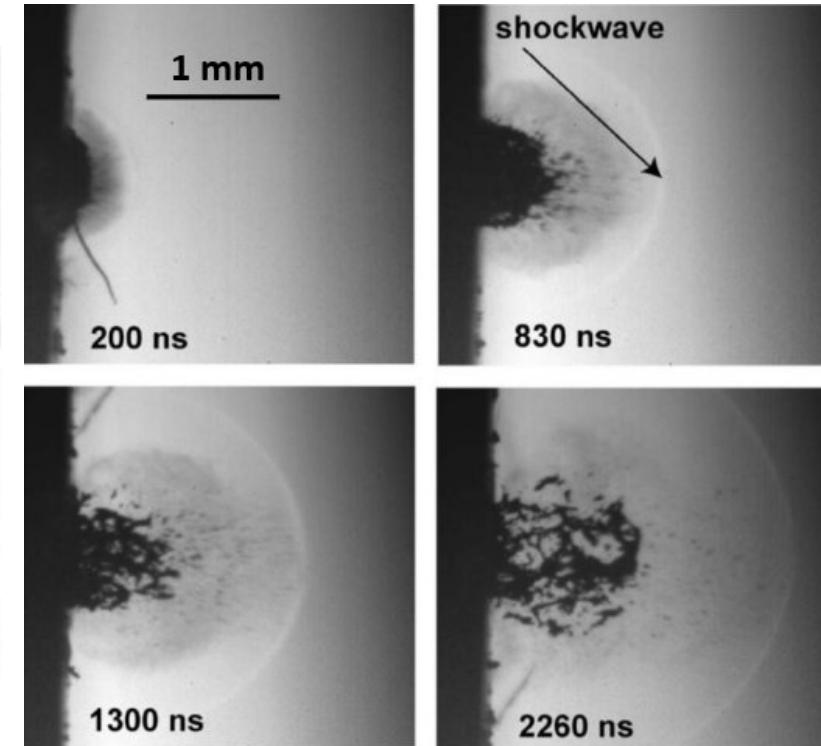
Al (50 fs, 800 nm, 40 J cm^{-2})

N. Zhang *et al.*, Phys. Rev. Lett., 2007



Cu (35 ps, 1064 nm, 50 J cm^{-2})

S.S. Mao *et al.*, Appl. Phys. Lett., 2000



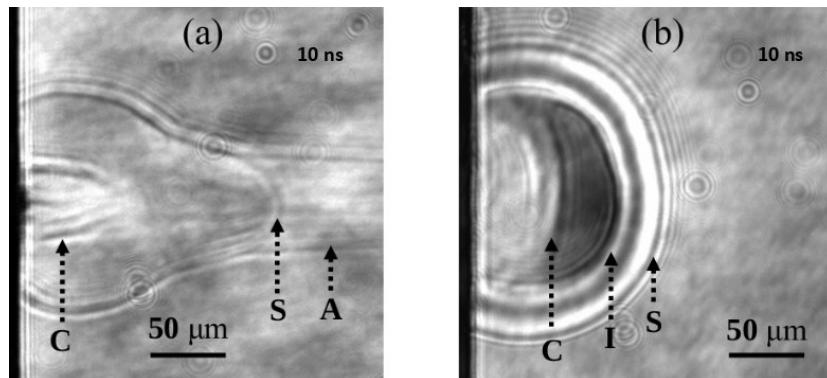
Polymère (6 ns, 1064 nm, 6.5 J cm^{-2})

M. Hauer *et al.*, Opt. Las. Eng., 2005

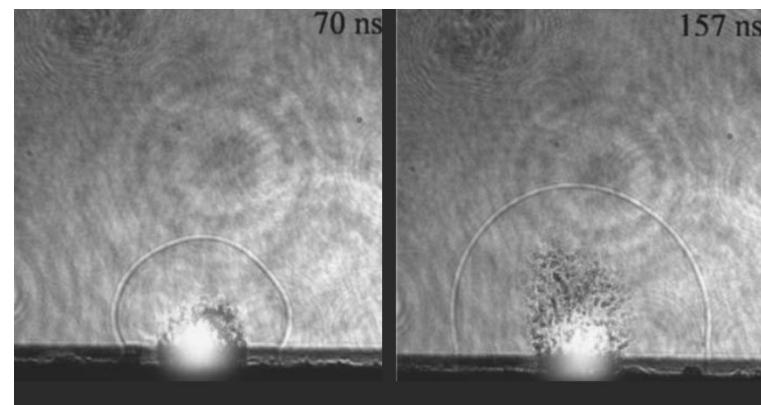
b. De nombreux exemples - qualitatif

2. Application : plasmas induits par laser (PIL)

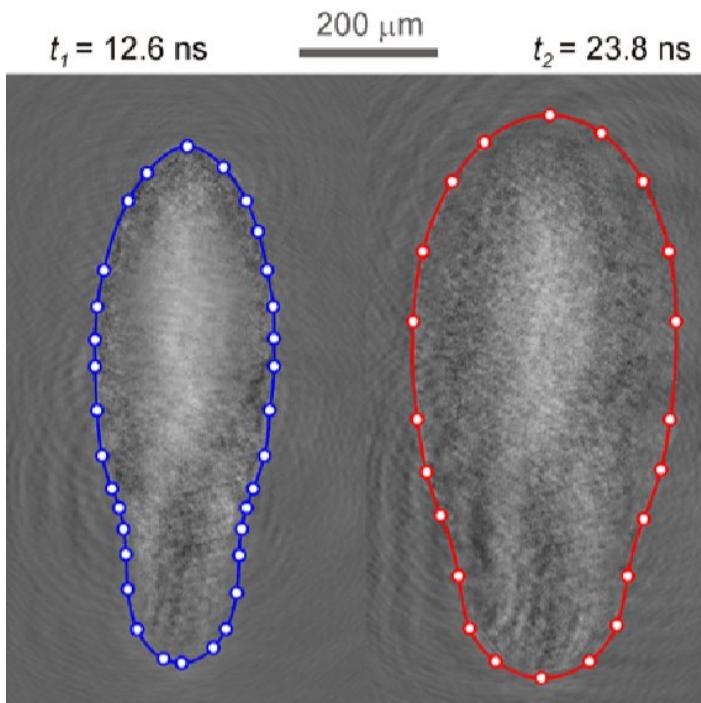
Morphologie de l'onde de choc - milieux condensés



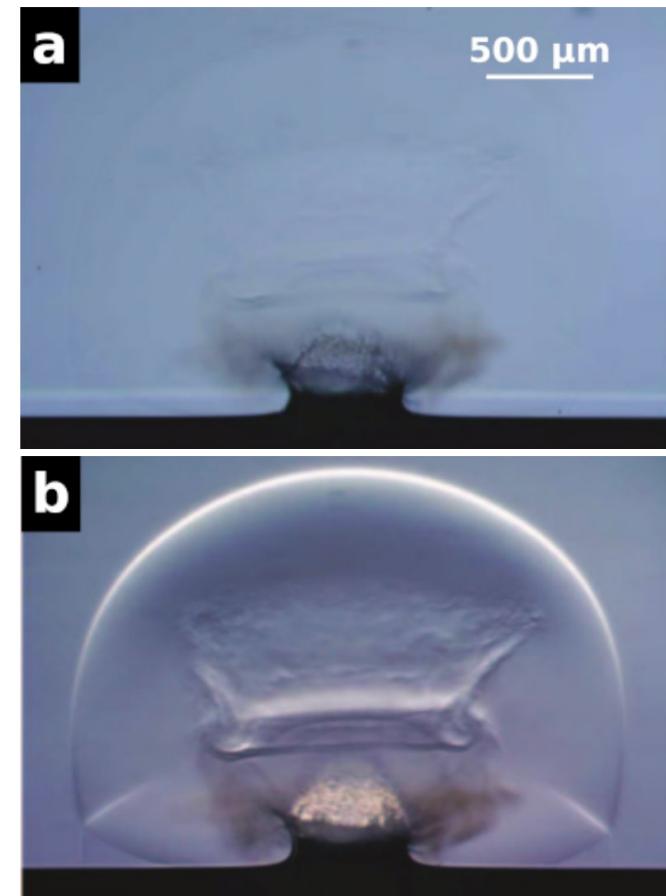
Si (100 fs & 3 ns, 266 nm, 11 J cm^{-2})
X. Zeng *et al.*, LBL, 2004



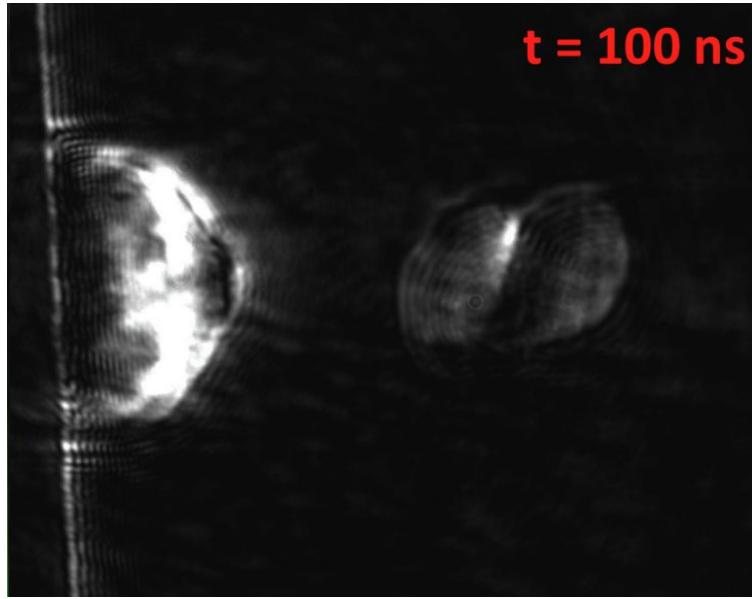
Al (5 ns, 1064 nm, 5 J cm^{-2})
C. Porneala *et al.*, Appl. Phys. Lett., 2006



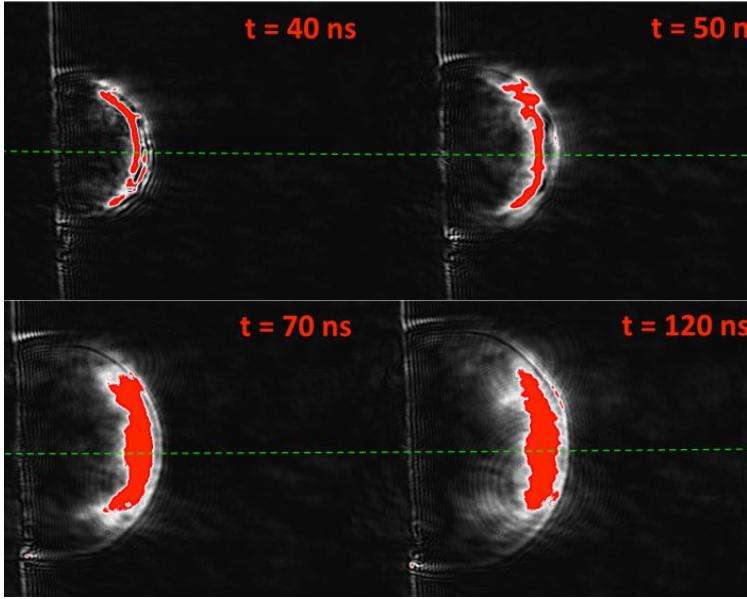
Air (4 ns, 1064 nm, 50 J cm^{-2})
P. Gregorcic *et al.*, Appl. Phys. A, 2013



Eau (80 ns, 2940 nm, 5 J cm^{-2})
a : ombroscopie
b : strioscopie + modulation de contraste
A. Vogel *et al.*, Opt. Lett., 2006



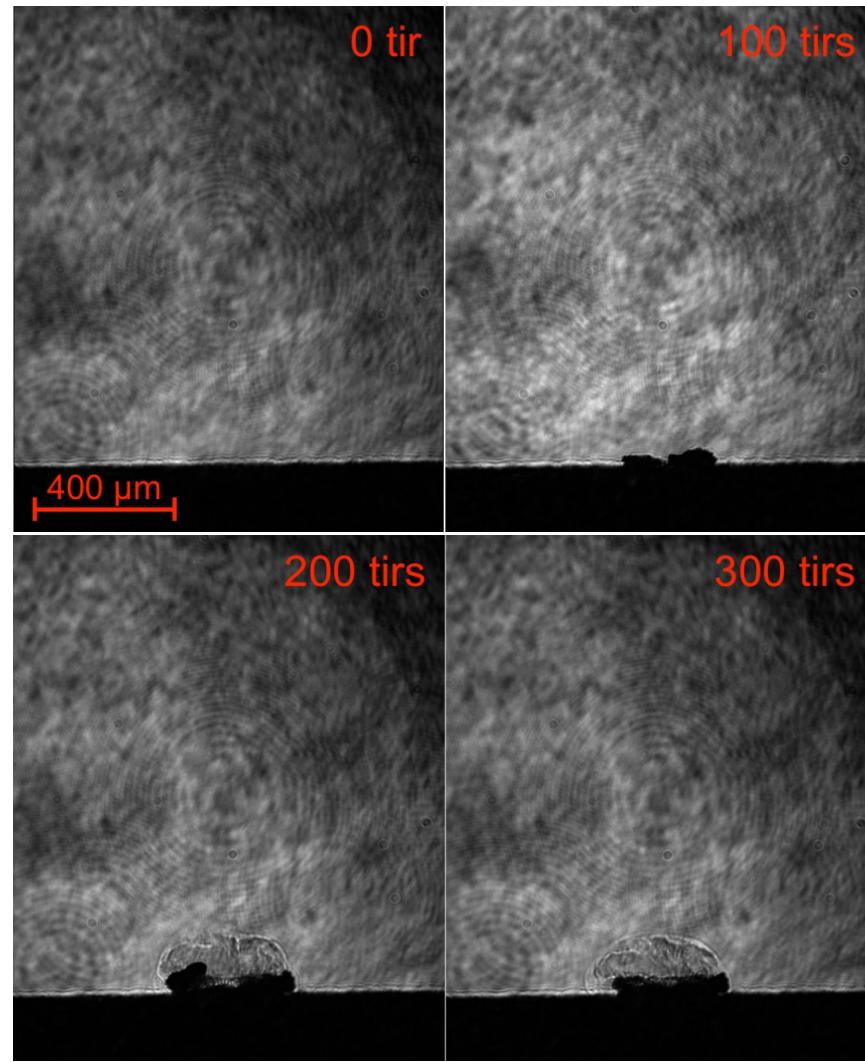
Focalisation secondaire sur un objet en suspension le long du trajet optique



Suivi temporel de la couche de choc

W (30 ps, 1064 nm, 30 mJ)

A. Favre, CORIA., 2017



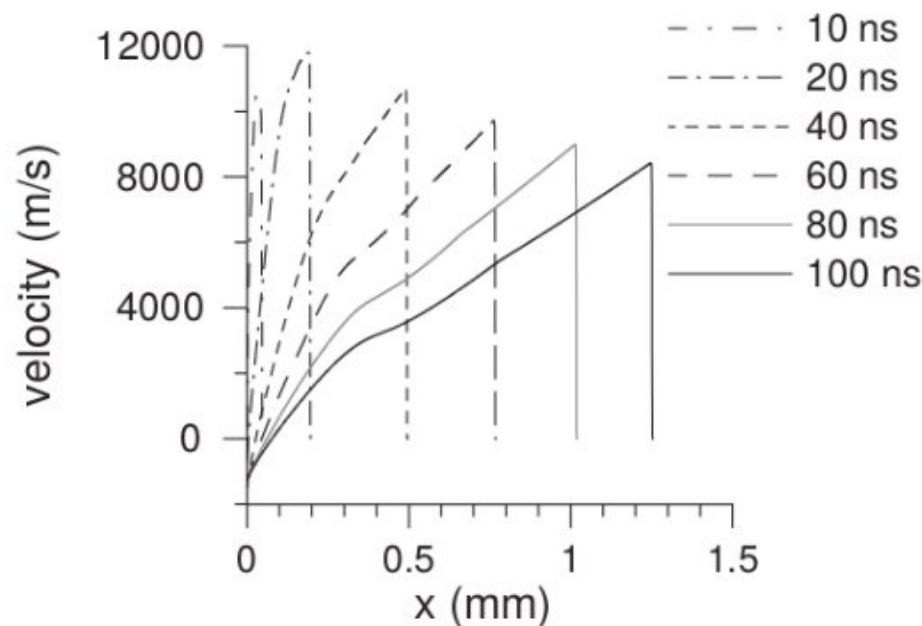
Suivi tir à tir de l'état de surface
Al (30 ps, 1064 nm, 30 mJ)

A. Favre, CORIA., 2017

b. De nombreux exemples - « quantitatif »

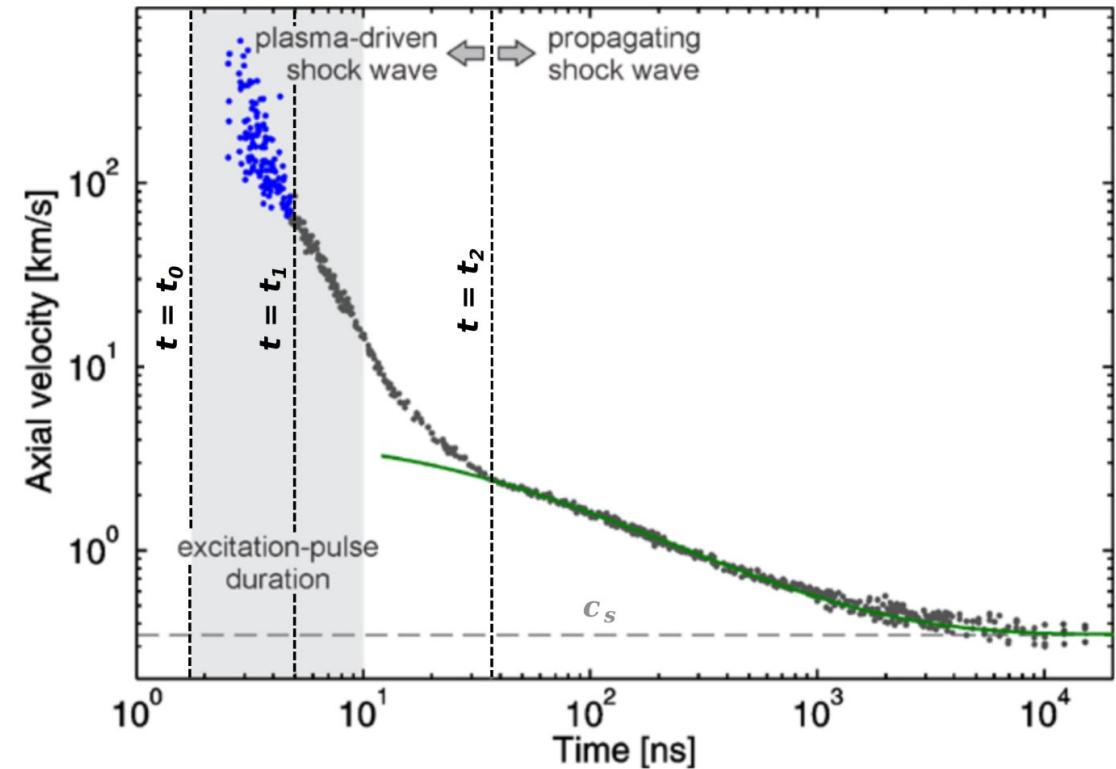
2. Application : plasmas induits par laser (PIL)

→ Imagerie = accès à des dimensions + temps caractéristiques : information dynamique = vitesse / accélération



Cu dans He (5 ns, 266 nm, 10^{13} W m^{-2})

A. Bogaerts *et al.*, SAPB, 2005

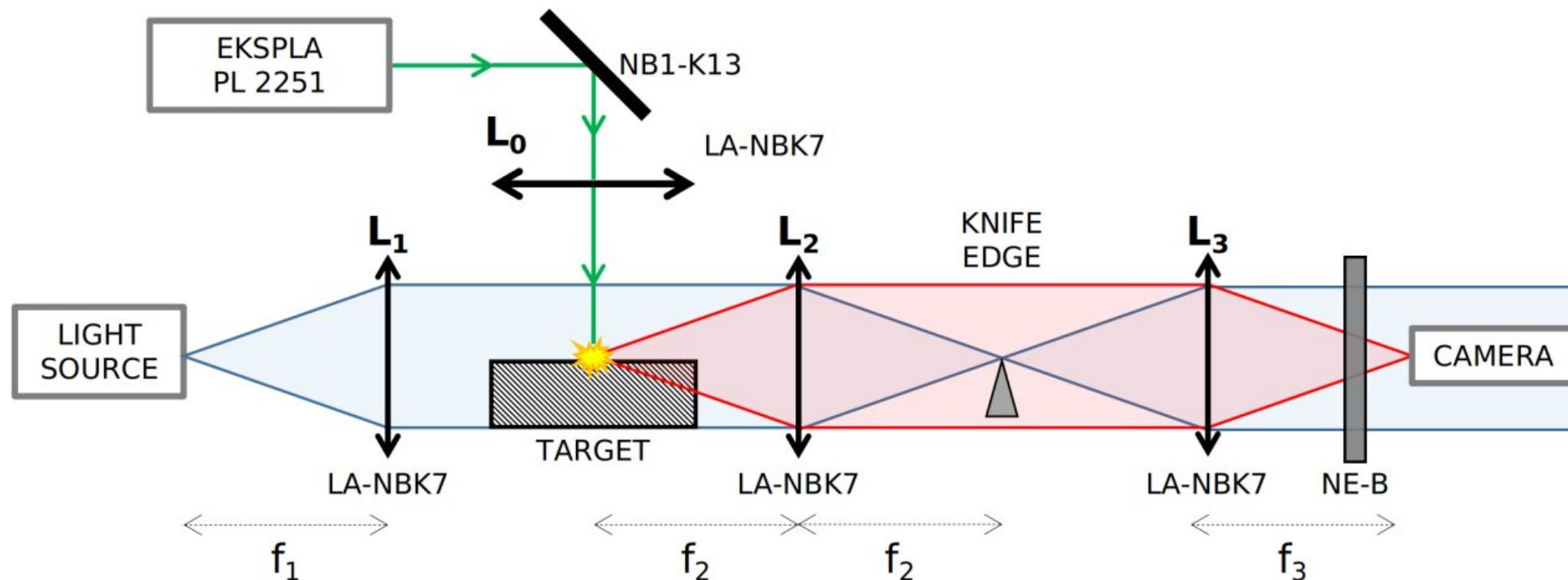


Air (4 ns, 1064 nm, 50 J cm^{-2})

P. Gregorcic *et al.*, Appl. Phys. A, 2013

Strioscopie : comparaison éclairement thermique (Schlieren) et cohérent - PIL W & Al (ps, différents gaz ambients) - en soumission

Montage :



LIGHT SOURCE = lampe Xe → thermique (Schlieren)

LIGHT SOURCE = Nd :YAG (6ns, 532 nm, 20 mJ) → cohérent

TARGET = W ou Al dans Air, Ar ou Helid-s

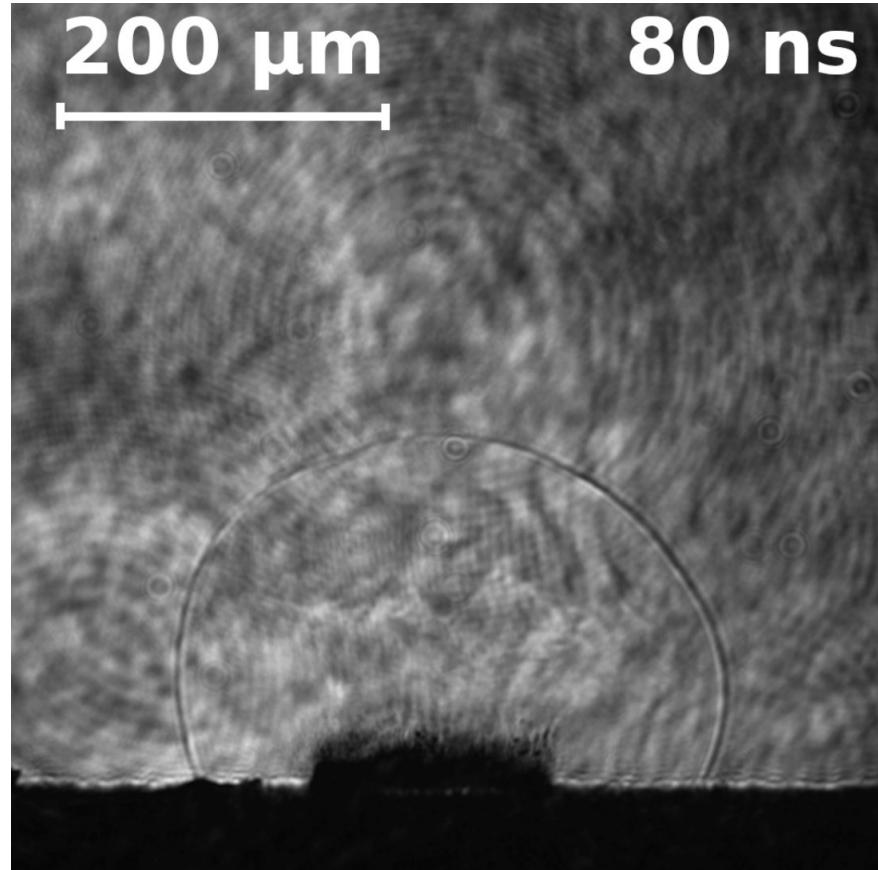
→ Le **grandissement γ** du montage est piloté par le rapport f_2 / f_3

KNIFE EDGE = lame de rasoir (μ positionnement dans les 3D)

CAMERA = PI-MAX 4 (EQ vis - visu direct)

Strioscopie : comparaison éclairage thermique (Schlieren) et cohérent - PIL W & Al (ps, différents gaz ambients) - en soumission

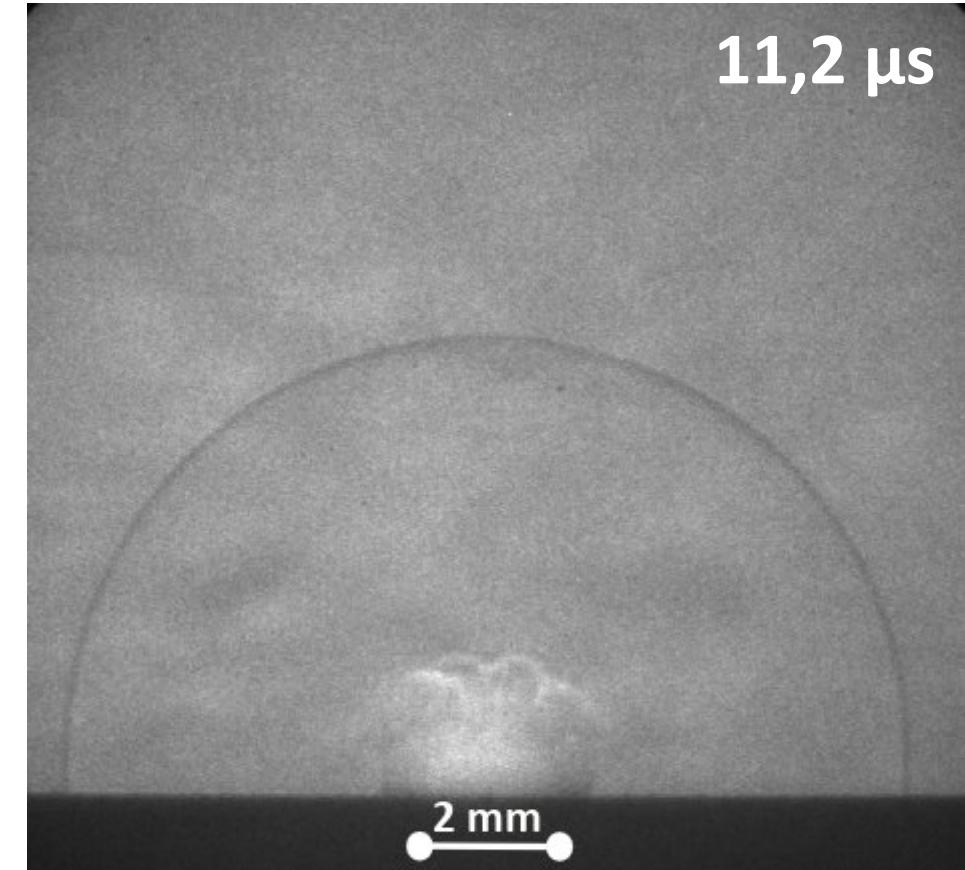
Deux clichés emblématiques de cette campagne : cohérent = début de dynamique / thermique = temps longs



Al dans l'air (10^5 Pa, 30 ps, 1064 nm, 10^{16} W m $^{-2}$)

Strioscopie cohérente ($\gamma = 4$)

A. Favre et al., TBPublished, 2026



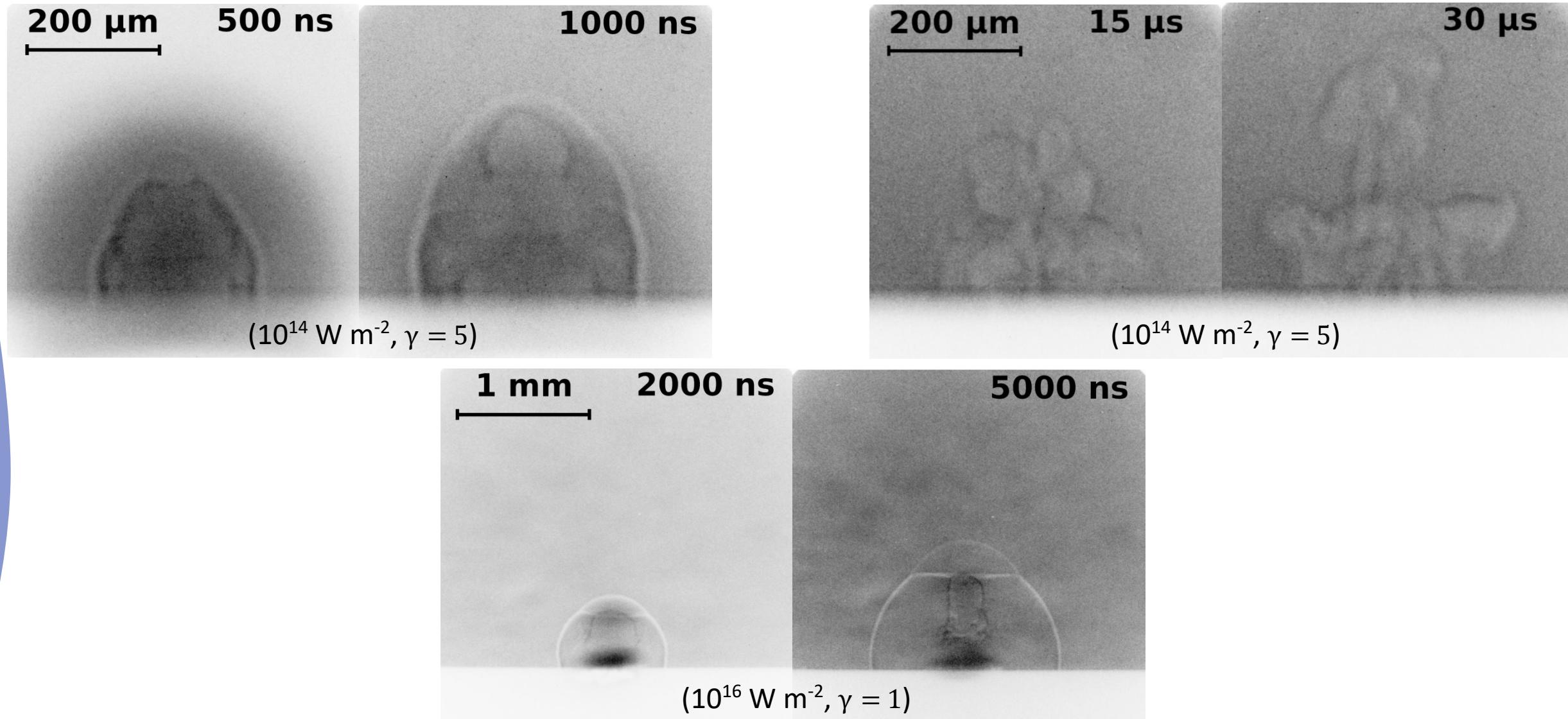
Al dans l'air (10^5 Pa, 30 ps, 1064 nm, 10^{16} W m $^{-2}$)

Strioscopie thermique ($\gamma = 1$)

A. Favre et al., TBPublished, 2026

Strioscopie : comparaison éclairage thermique (Schlieren) et cohérent - PIL W & Al (ps, différents gaz ambients) - en soumission

Clichés typiques - strioscopie **thermique** (W dans l'air : 10^5 Pa, 30 ps, 1064 nm)



Strioscopie : comparaison éclairement thermique (Schlieren) et cohérent - PIL W & Al (ps, différents gaz ambients) - en soumission

Exploitation : suivi d'interface numérique...

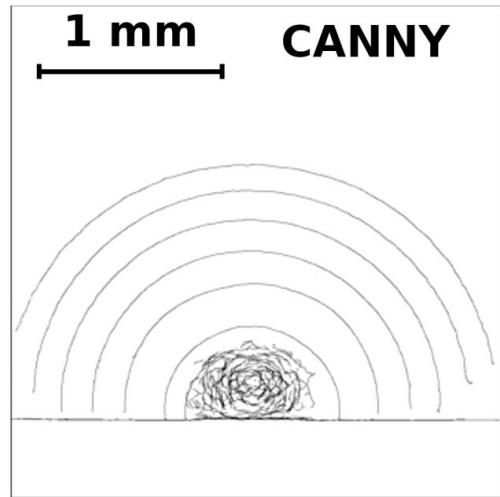
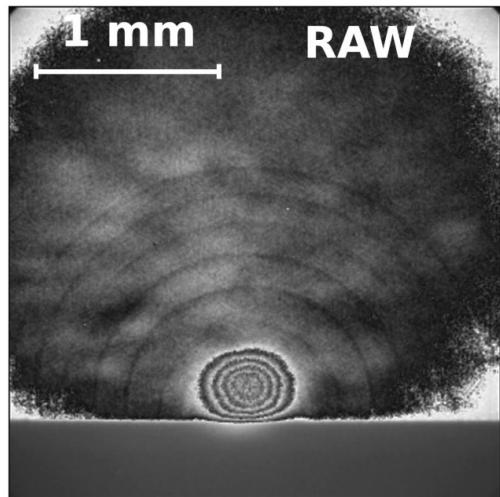
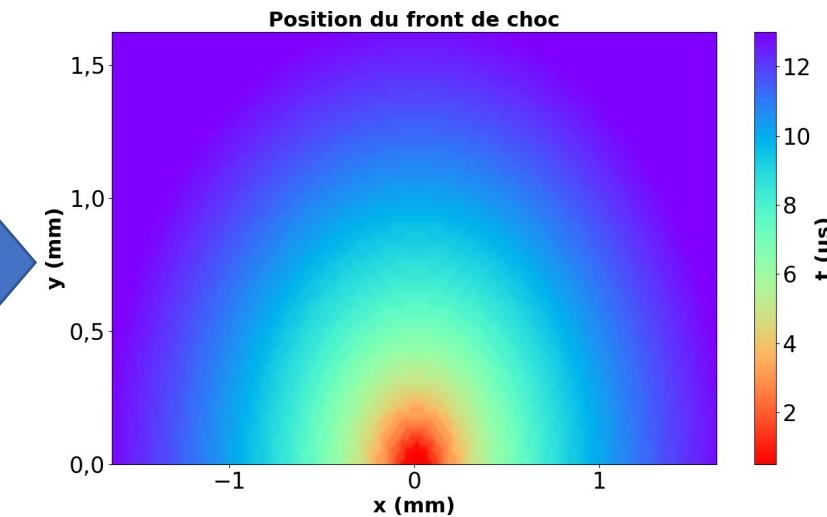
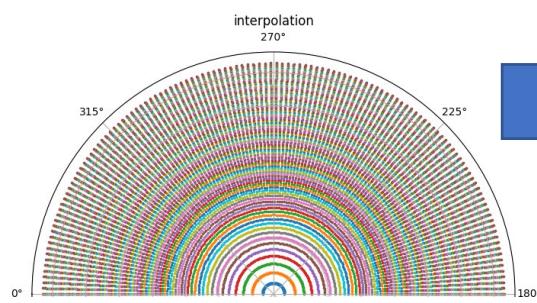


Image cumulée

Filtrage de contours

Filtrage artefacts numériques



→ Reconstruction des champs
(position, vitesse, accélération...)

Permet :

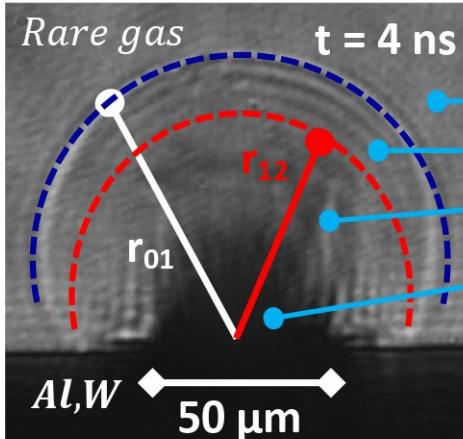
- d'obtenir des informations locales,
- de discuter de comportements en surface d'échantillon,
- d'identifier des tendances à échelles spatiales et temporelles variées.

The ECHREM* code

*Eulerian CHemically REactive
Multi-component plasma code



Assumptions



Hypersonic hemispherical expansion

- (0) External gas (rare gas: Ne, Ar, Kr or Xe)
- (1) Shock layer (shocked rare gas)
- (2) Central plasma (ablated W ou Al)

Ablated material

- r_{01} shock front radius
- r_{12} contact surface radius
- v_{sf} shock front speed

Bi-layer model
Propagation of the shockwave
Rankine-Hugoniot assumption

Atoms and ions... at T_A
Electrons... at T_e

Balance equations

(1) Shock layer

Mass $\rho_0 v_{sf} = \rho_1 [v_{sf} - u_1(r_{01})] \Leftrightarrow \frac{d\rho(\{Rg\}_j^{Z+})}{dt_2} = \dot{\rho}(\{Rg\}_j^{Z+}) - \frac{\rho(Rg_j^{Z+})}{\rho_1} \frac{d\rho_1}{dt}$

Energy $\epsilon_0 + \frac{p_0}{\rho_0} + \frac{v_{sf}^2}{2} = \epsilon_1 + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{[v_{sf} - u_1(r_{01})]^2}{2}$

Momentum $p_0 + \rho_0 v_{sf}^2 = p_1 + \rho_1 [v_{sf} - u_1(r_{01})]^2$

Collisionnal-radiative source term

(2) Central plasma

Mass $M_2 = \frac{2\pi}{3} \rho_2 r_{12}^3 \Leftrightarrow \frac{d\rho(\{Al,W\}_j^{Z+})}{dt} = \dot{\rho}(\{Al,W\}_j^{Z+}) - 3\rho(\{Al,W\}_j^{Z+}) \frac{u_2(r_{12})}{r_{12}}$

Energy $E_2 = M_2 (\epsilon^{Al,W} + \epsilon_2) + E_{c,2} \Leftrightarrow \frac{dE}{dt} = \rho_0 \epsilon_0 v_{sf} 2\pi r_{01}^2 - \frac{M_2}{\rho_2} (4\pi \epsilon_{RR} + 4\pi \epsilon_{TB} + \epsilon'_{SE})$

Momentum $\frac{d[u_2(r_{12})]}{dt} = \frac{8\pi r_{12}^2}{3 M_2} (p_2 - p_1)$

The ECHREM* code

*Eulerian CHemically REactive
Multi-component plasma code



Shock layer - Argon

Collisional-Radiative model CoRaM-RG



Exc. Elec. Impact



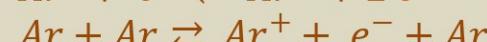
Exc. Elec. Impact



Ioni. Elec. Impact



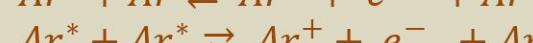
Ioni. Elec. Impact



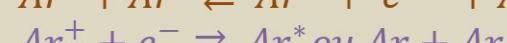
Ioni. Heavy Impact



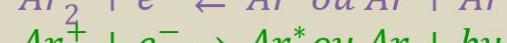
Ioni. Heavy Impact



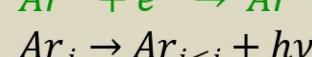
Penning Ioni.



Disso. Recomb.



Rad. Recomb.



Spont. Emiss.

30 000 elementary processes

Collisional Database

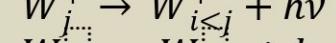
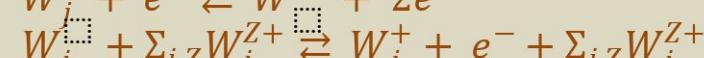
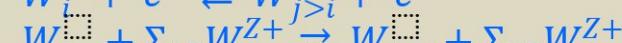
$$k_i(T_{A,e}) = \sqrt{\frac{8 k_B T_{A,e}}{\pi \mu}} \int_{x_0}^{+\infty} x e^{-x} \sigma_i(x) dx \text{ with}$$

- $\sigma_i(x)$ collisional cross section and
- $x = \frac{\varepsilon}{k_B T_{A,e}}$ reduced collision energy

Backward rate coefficient deduced from the *Detailed Balance*

Central plasma - Tungsten

Collisional-Radiative model CoRaM-W



Thermal Bremsstrahlung

520 000 elementary processes

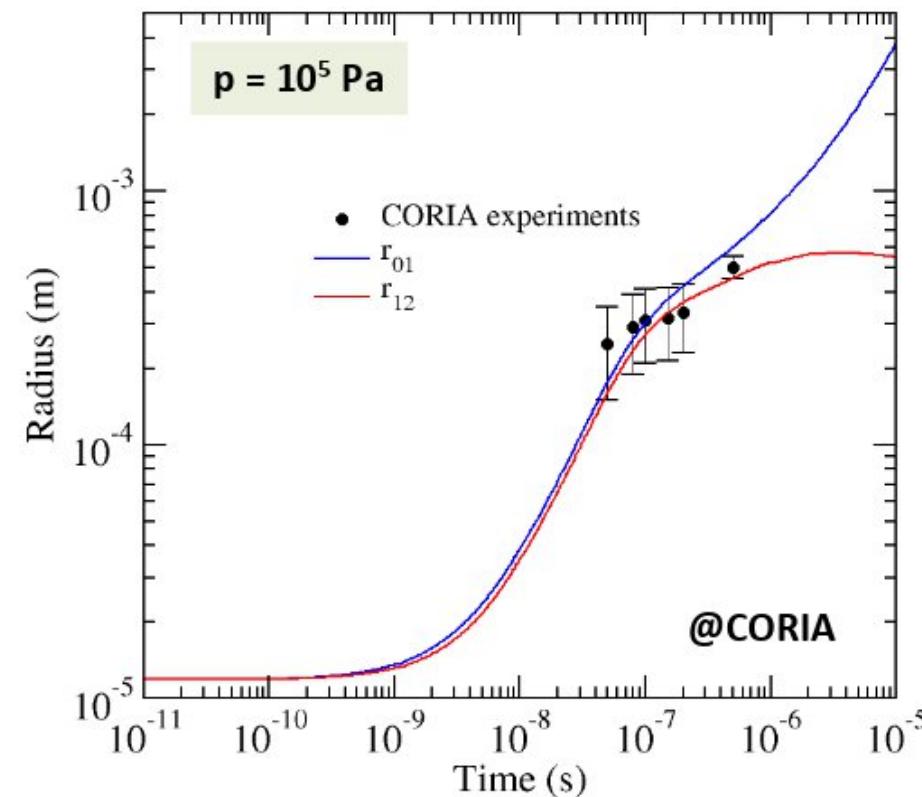
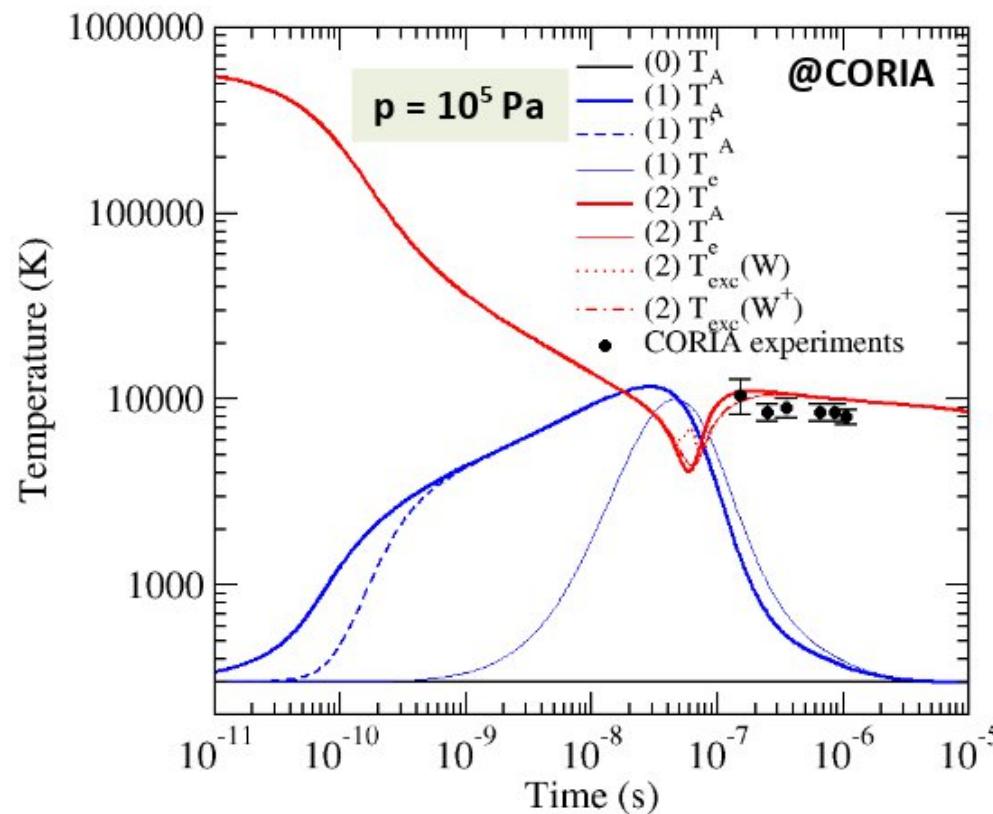
Radiative Database

NIST, Atomic Line List, ADAS, HULLAC...

ECHREM = modèle collisionnel radiatif permettant de simuler la physique d'un plasma induit par laser état par état

Modèle 0D instationnaire bi-couche (plasma central & couche de choc) de symétrie sphérique couvrant :

- la thermochimie (bilan détaillé et cinétique chimique état par état - équilibre thermodynamique)
- le transport des espèces dans leur état excité (conservation de la masse)
- l'aérodynamique des interfaces (conservation de l'énergie & de la quantité de mouvement)



Mesures :

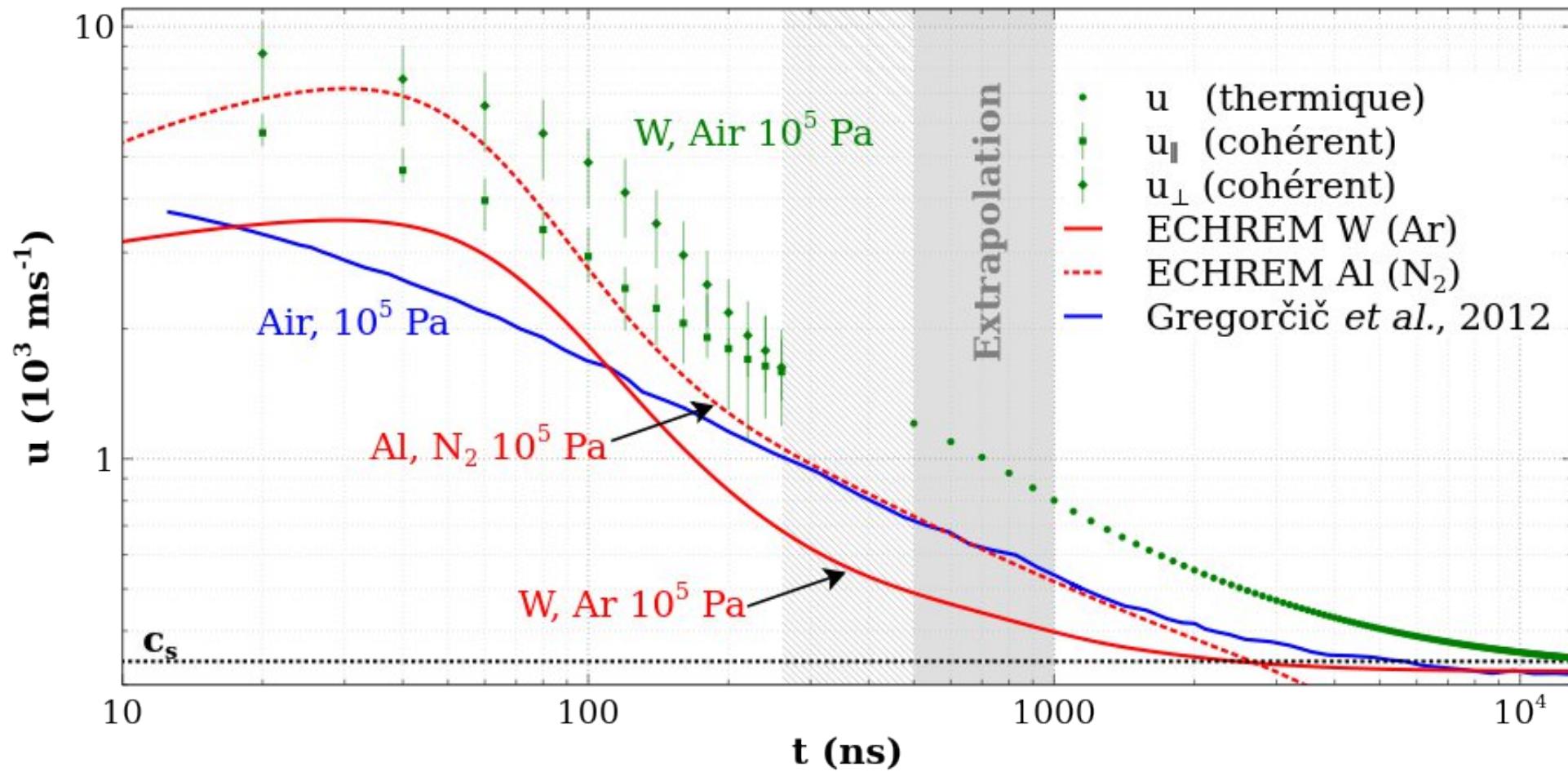
W(Ar à 10⁵ Pa)

10 ps

532 nm

10 J cm⁻²

Comparaison stroboscopie - ECHREM : PIL W (Air, ps) - en soumission

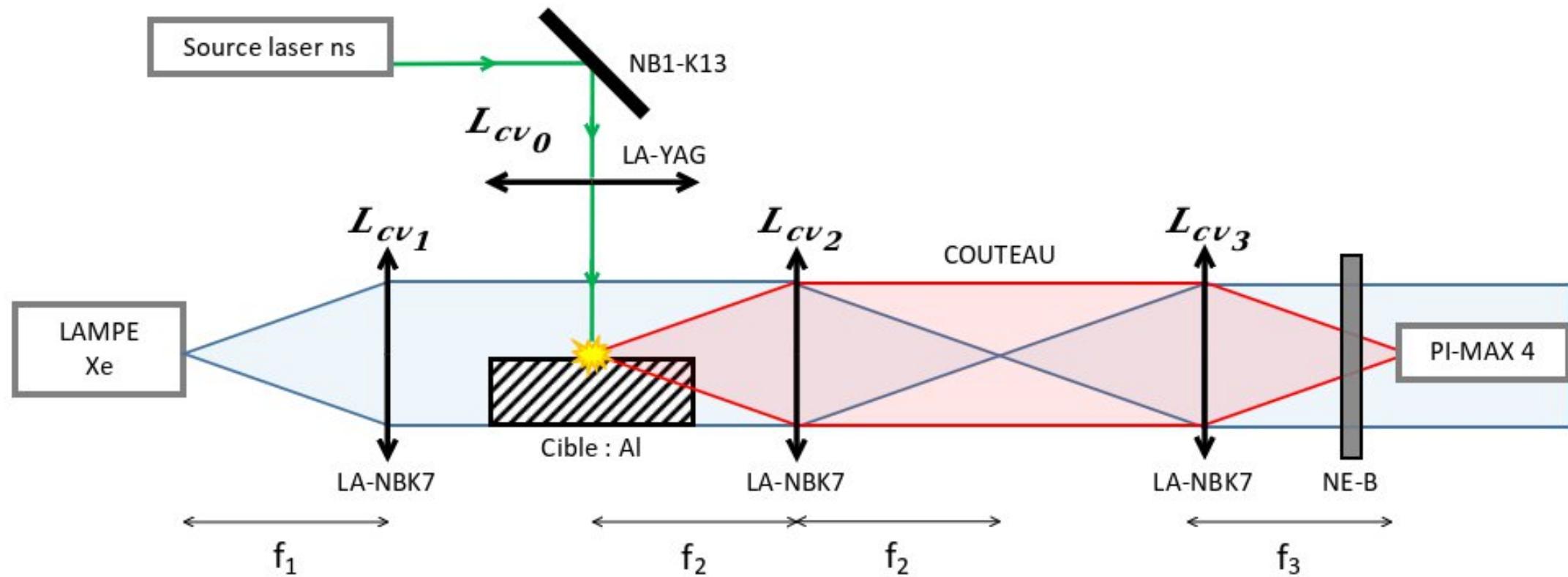


W dans l'air (10^5 Pa , 30 ps, 1064 nm, 10^{16} W m^{-2})

Stroboscopie thermique & cohérente

A. Favre *et al.*, TB Published, 2026

Ombroscopie thermique avec système imageur de grandissement γ



$$f_0 = f_1 = 100 \text{ mm}$$

$$f_{2,3} = 75 \text{ mm}$$

$$f_{3,2} = 150 \text{ mm}$$

$\rightarrow \gamma = 2$ ou $1/2$ en intervertissant L_{cv_2} et L_{cv_3} ... : observer différents instants en restant dans le champ caméra !!

Merci de votre attention !