

Action Nationale de Formation (ANF) - CNRS

Plasmas & mécanique des fluides

Laboratoire CORIA, Saint-Etienne du Rouvray

Cours - TP

Ombroscopie – strioscopie 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*...

Sommaire

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

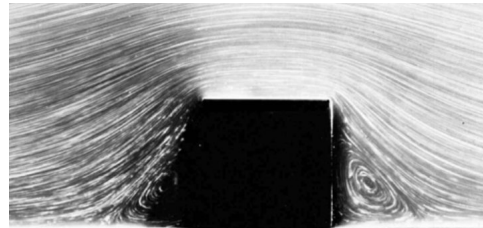
~ 45 mins

3. Démonstration : OB16

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

Non intrusif :
imagerie

Non intrusif :
simulation - CFD

LES, RANS, DNS
(YALES2 - V. Moureau)
(F. Thieset + L. Danaila)

Intrusif :
traçage

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

- **temps caractéristiques**

à différentes échelles temporelles

- **(chimie)**

scalaires : T , x , ...

(spectroscopie)

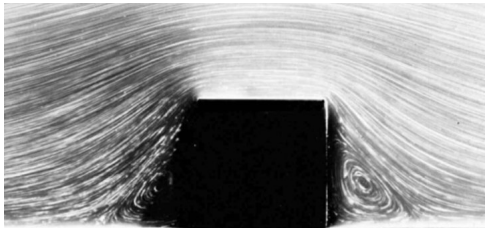
émission / absorption

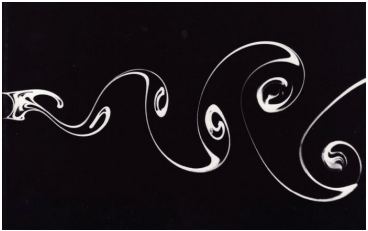
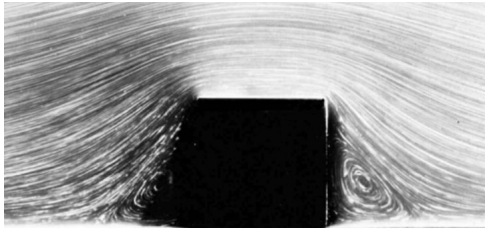
(schéma cinétique)

*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, (M. Brunel)
holographie, (D. Lebrun)
ombroscopie,
strioscopie

← 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)

$$(C-M) \quad \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{N\alpha}{3\varepsilon_0} = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \quad (L-L)$$

$\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$: permittivité du vide

$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ 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

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

D'où

$$\delta \approx \frac{N\alpha}{2\varepsilon_0}$$

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

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

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) : $K \approx 2,08 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$

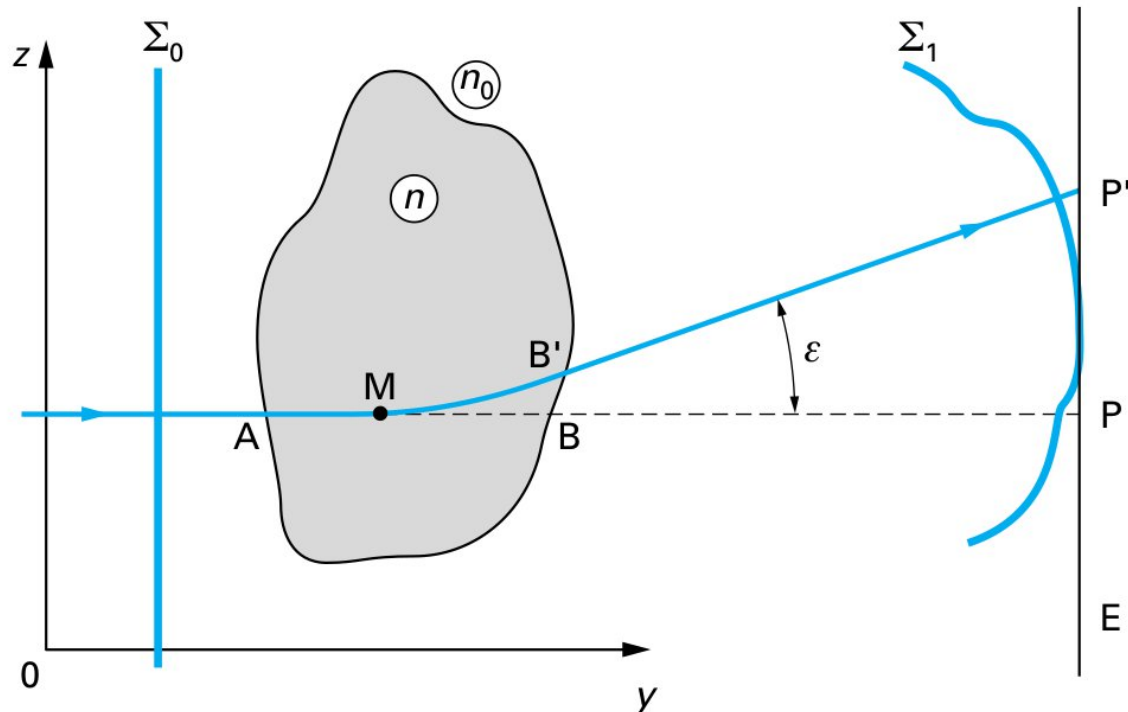
→ Des variations de ρ induisent des variations de n !

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

- 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 curviligne / trajectoire du rayon lumineux) :

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



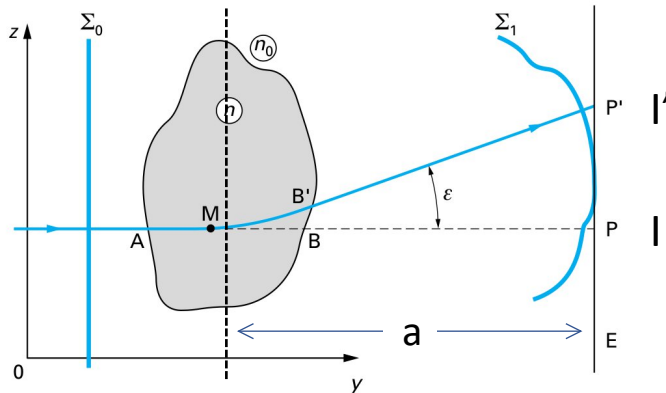
Cette équation matérialise le fait que la propagation de tout rayonnement lumineux incident est modifiée par le changement d'indice $n_0 \rightarrow n$.

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 :

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



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 :

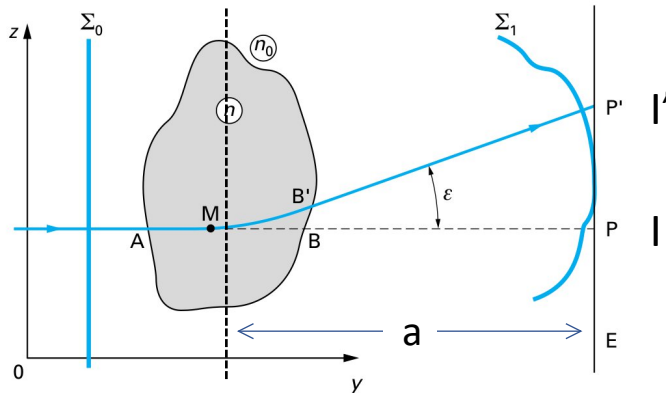
$$\frac{\Delta I}{I} \approx a \int_A^B \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \ln n \, dy$$

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 = photodecteur dans l'axe optique de la source d'éclairage) !
- ◆ l'atténuation d'une source cohérente induit généralement des artéfacts optiques difficilement correctibles

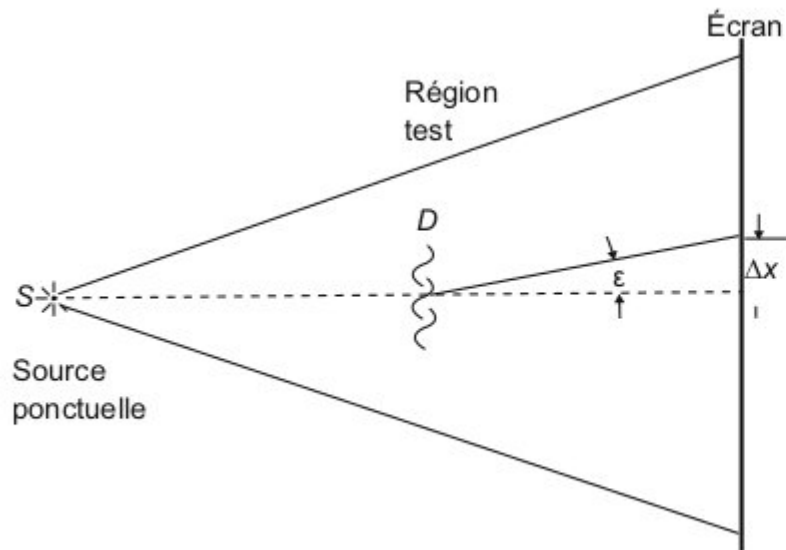


On note I et $I' = I + \Delta I$ les éclaircissements collectés sur l'écran (E) respectivement en P et P', la perturbation relative de l'éclairement induite par l'écoulement est alors :

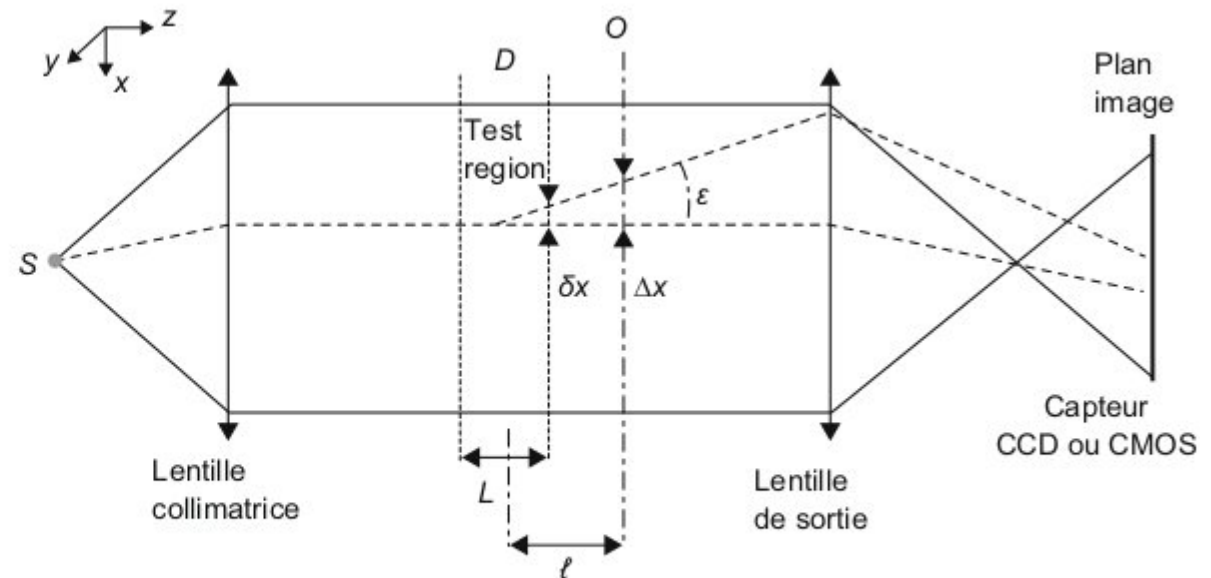
$$\frac{\Delta I}{I} \approx a \int_A^B \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \ln n \, dy$$

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).

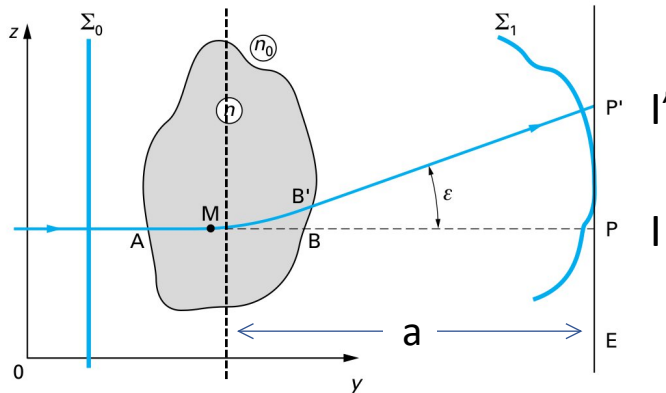
Il est possible d'imager cette variation de différentes manières, les deux plus répandues étant :



(a) montage d'ombroscopie en lumière diffuse



(b) montage d'ombroscopie en lumière parallèle

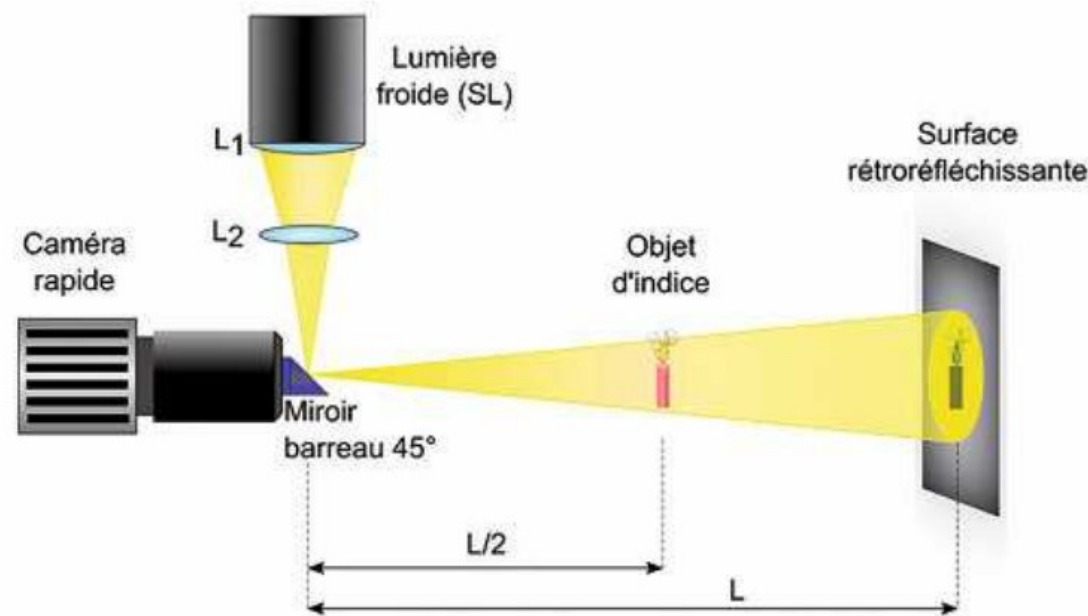


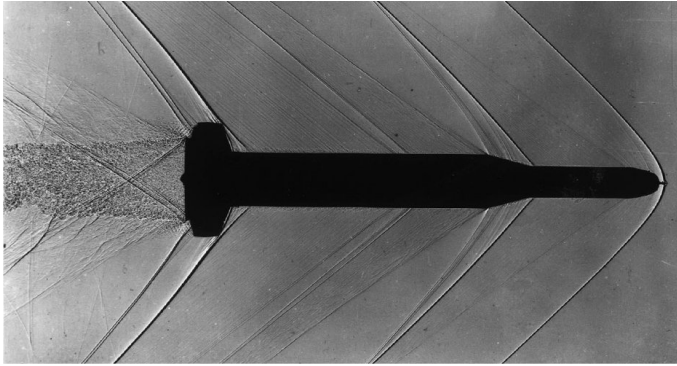
On note I et $I' = I + \Delta I$ les éclairements collectés sur l'écran (E) respectivement en P et P', la perturbation relative de l'éclairement induite par l'écoulement est alors :

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

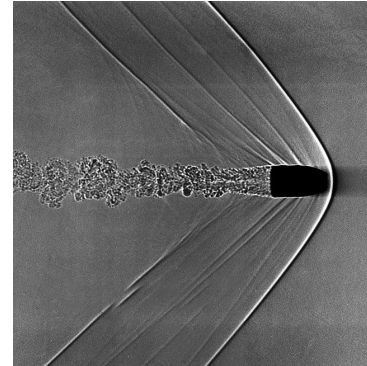
L'**ombroscopie**, ou « méthode des ombres », « ombrographie » ou encore « *shadowgraphy* » permet ainsi de mettre en évidence la **dérivée seconde** de n (et donc de ρ).

Une alternative existante mais moins répandue est l'ombroscopie rétro réfléchissante :

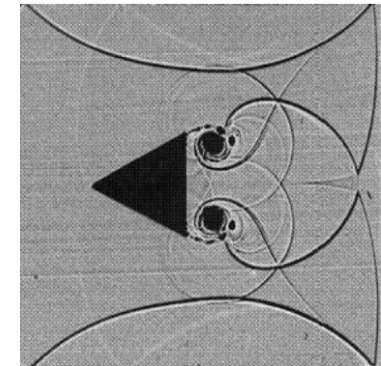




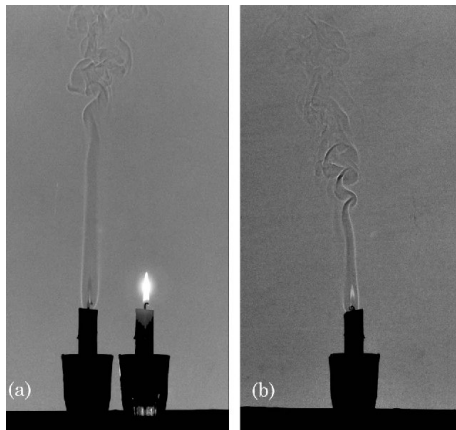
Projectile supersonique
M. Giraud, Rapport ISL T 11/65, 1965



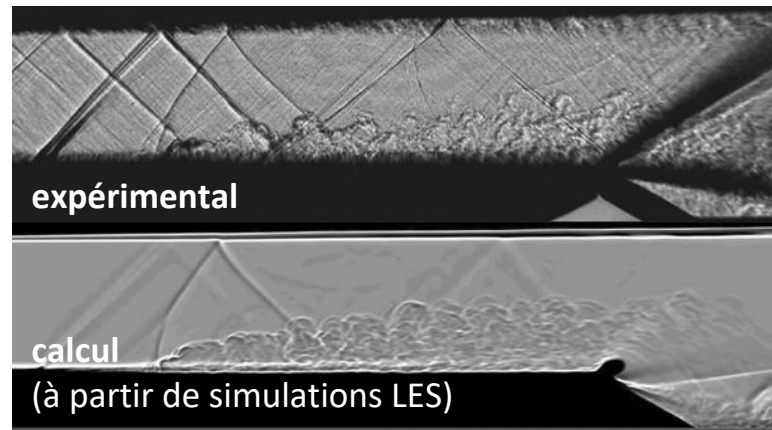
Projectile supersonique
A. Davidhazy, NASA, 2008



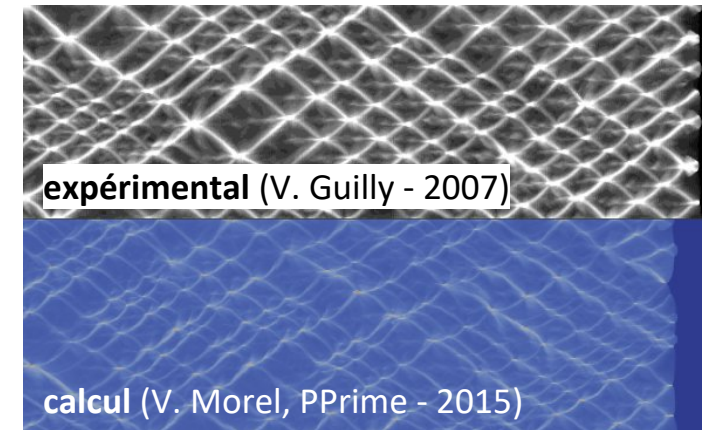
Obstacle triangulaire tube à choc
W. Merzkirch, Acad. Press, 1981



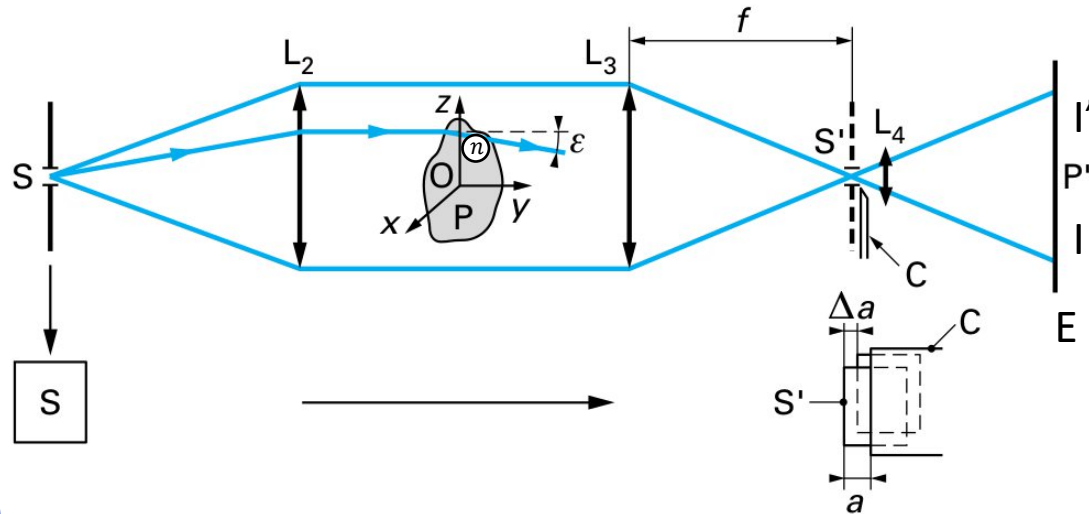
Bougies
M. Hargather *et al.*, Appl. Opt., 2009



Jet d'He à $Ma = 1,5$
E. Luthman *et al.*, Exp. Fluids, 2019



Cellules de détonation



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 :

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

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

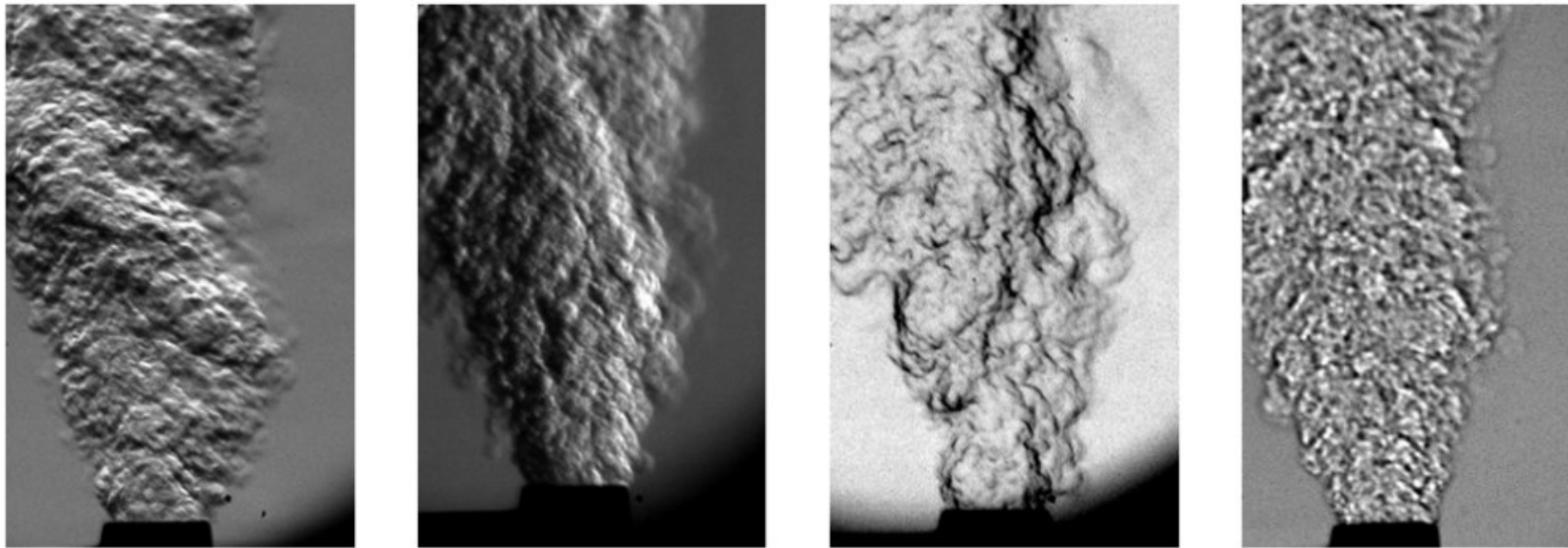
La **strioscopie** permet ainsi de mettre en évidence la **dérivée première de n** (et donc de ρ).

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 :



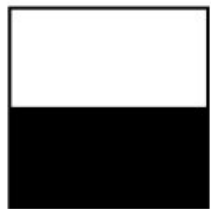
Jet d'He pour :

(a) couteau horizontal,

(b) couteau vertical,

(c) couteau annulaire,

(d) pas de couteau = ombroscopie



(a)



(b)



(c)

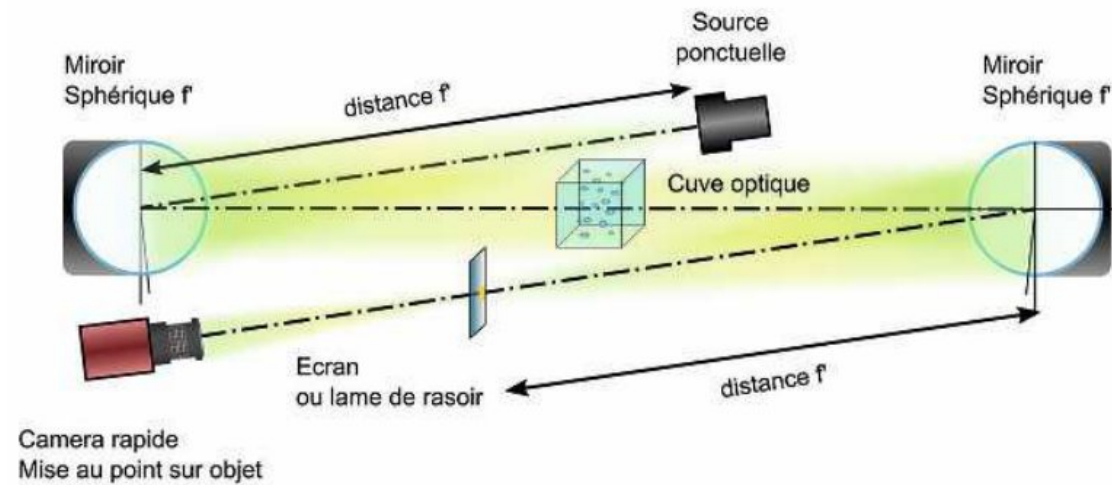


(d)

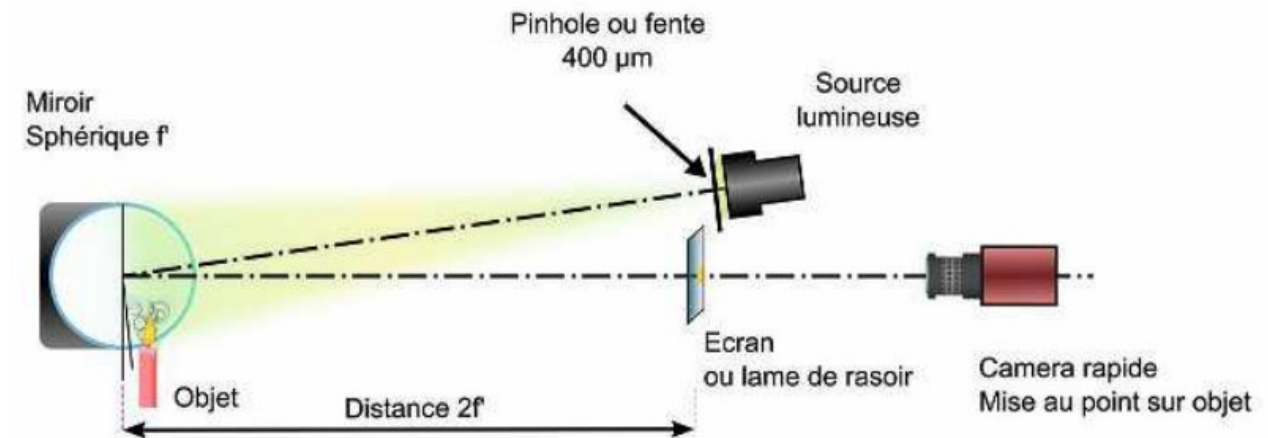
Autre information : couteau = objet de géométrie aiguë → une arête trop émoussé agit comme un écran opaque non filtrant
Idéal : lame de rasoir (qq 10 μm au fil)...

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 :

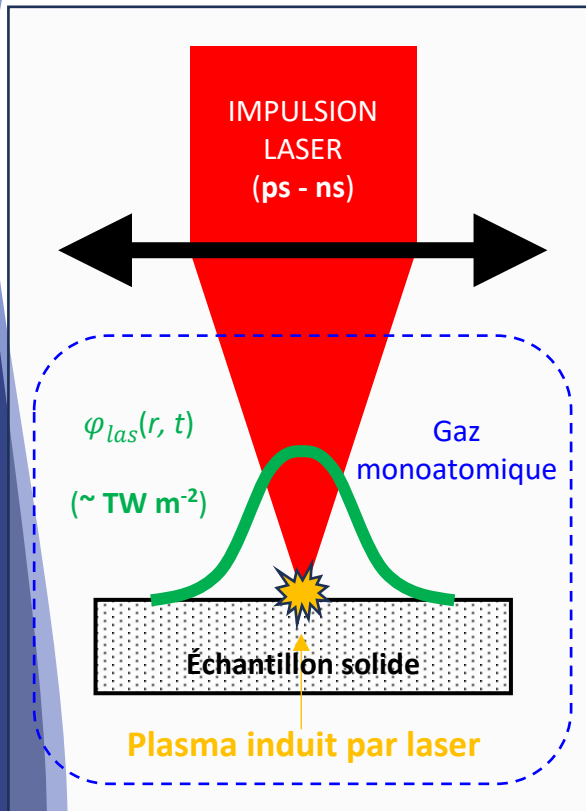


Montage en Z : simple traversée



Montage en double traversée

a. Quelques mots sur la physique d'un PIL



Expansion **hypersonique**

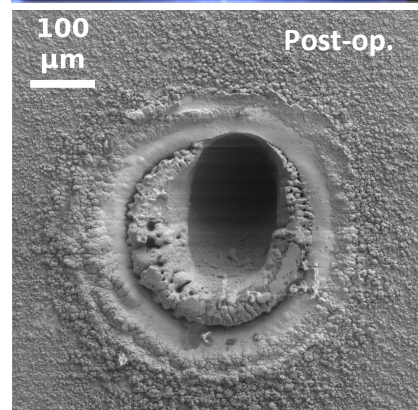
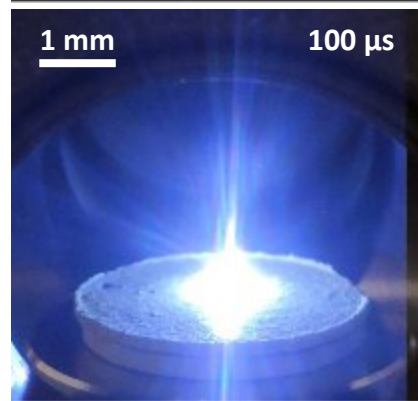
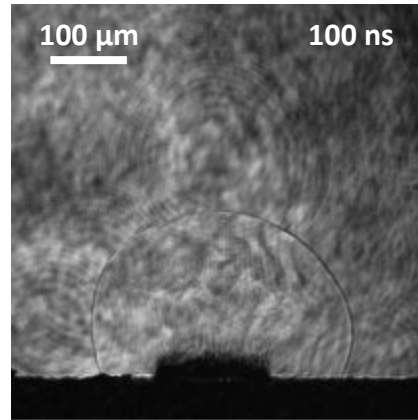
Fortement **instationnaire**

Objet **millimétrique**

Présence de **gradients**

Interaction **laser-matière**

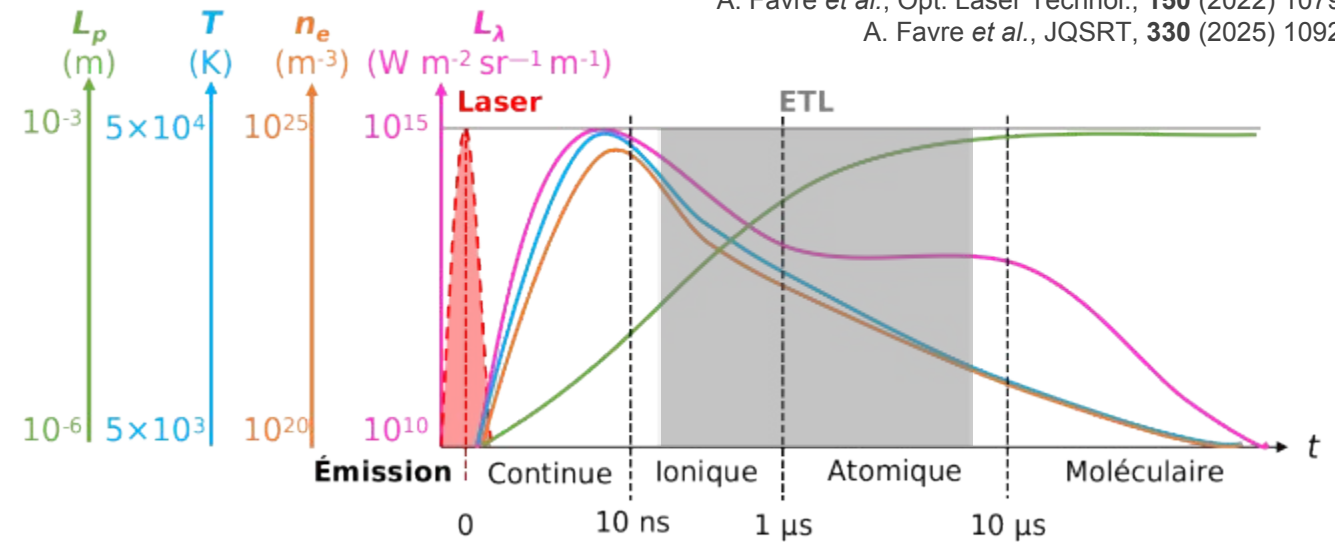
micro-destructive



2. Application : plasmas induits par laser (PIL)

A. Favre *et al.*, Opt. Laser Technol., **150** (2022) 107913

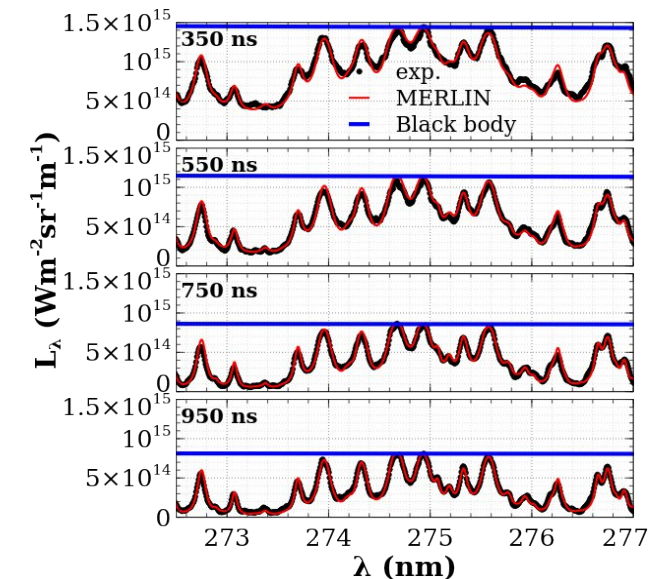
A. Favre *et al.*, JQSRT, **330** (2025) 109222



ETL
Équilibre
Thermodynamique
Local

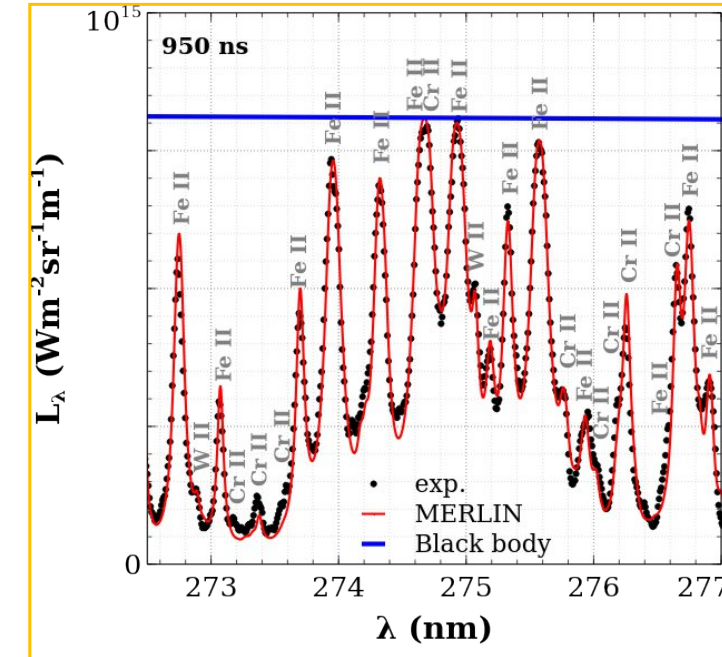
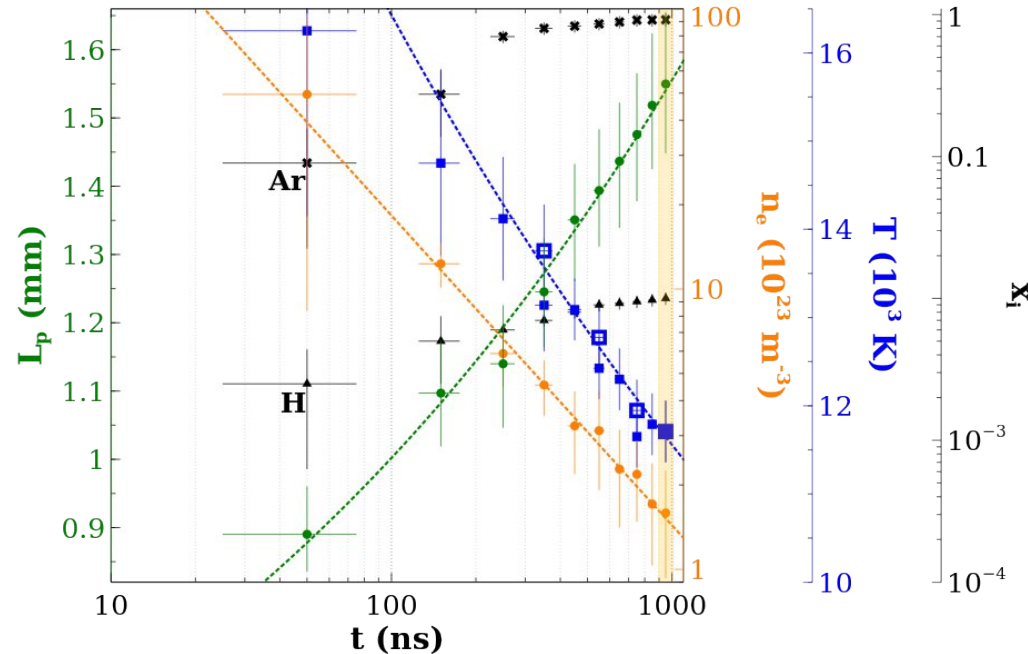


CF-LIBS
Calibration Free
Laser-Induced Breakdown
Spectroscopy



MERLIN (MultiElemental Radiative equilibrium emission)A. Favre et al., JQSRT, **330** (2025) 109222**Transfert radiatif pour un système réactif quelconque à l'ETL**

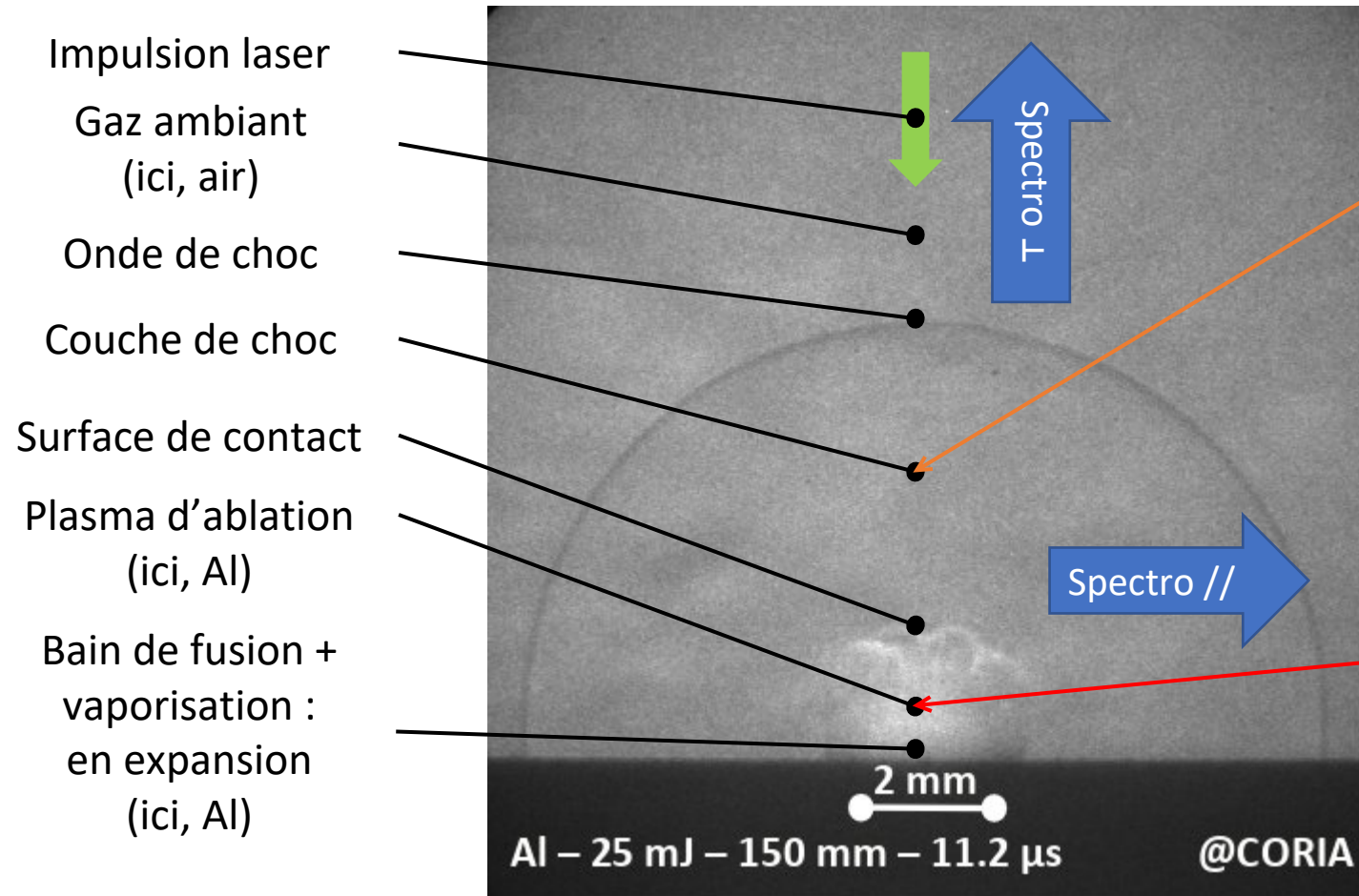
$\lambda_{las} = 1064 \text{ nm}$ $\tau_{las} = 6 \text{ ns}$ $\varphi_{las} = (2,5 \pm 0,7) \times 10^{14} \text{ W m}^{-2}$
 Eurofer97 dans $0,5p_{atm}$ d'Ar (α -Gaz 2) : intégration sur 100 ns

**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 : O_2 , N_2 , O , N , O^+ , N^+ , 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 : Al , Al^+ , Al^{2+} , Al^{3+} , e^-

À mesure de l'expansion : recombinaison & dilution
Composition : Al , Al^+ , O , N , O^+ , N^+ , e^-

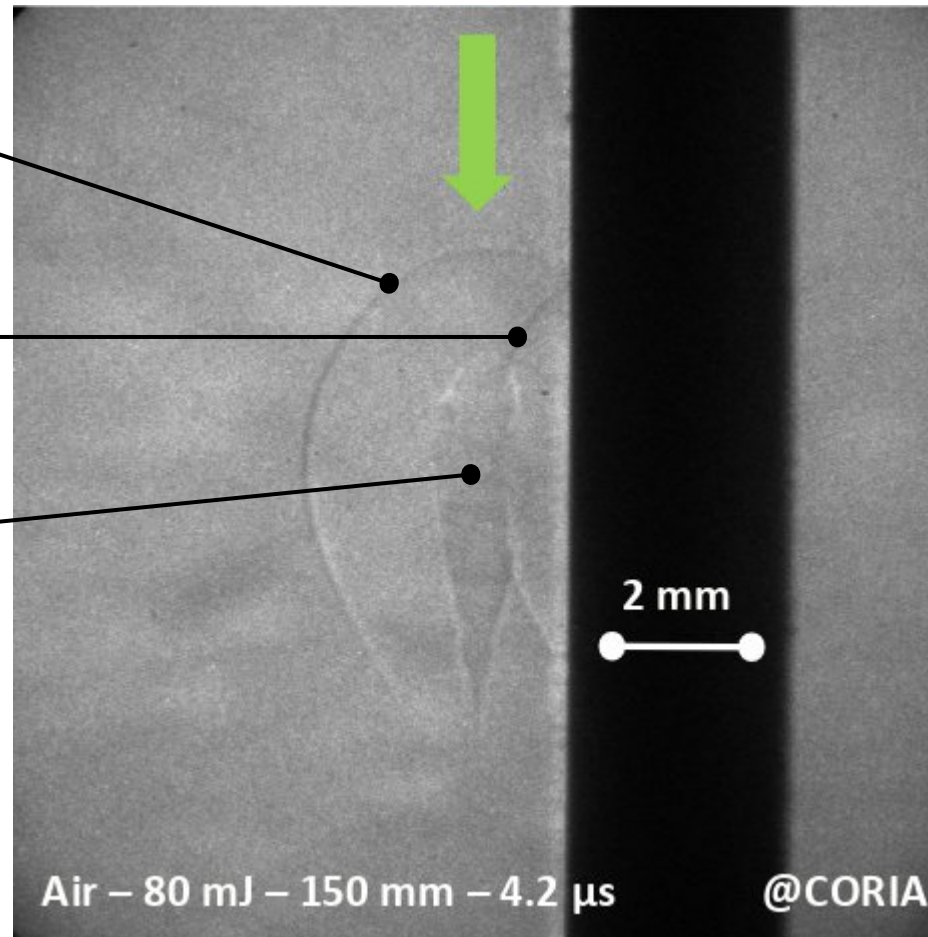
Spectroscopie // ou \perp :
/ !\ effets d'intégrations spatiale
→ Imagerie à gradient d'indice = guide

Interaction avec un obstacle

Onde de choc de
premier ordre

Onde de choc de
second ordre
(réflexion)

Plasma induit
par laser
(ici, Air)

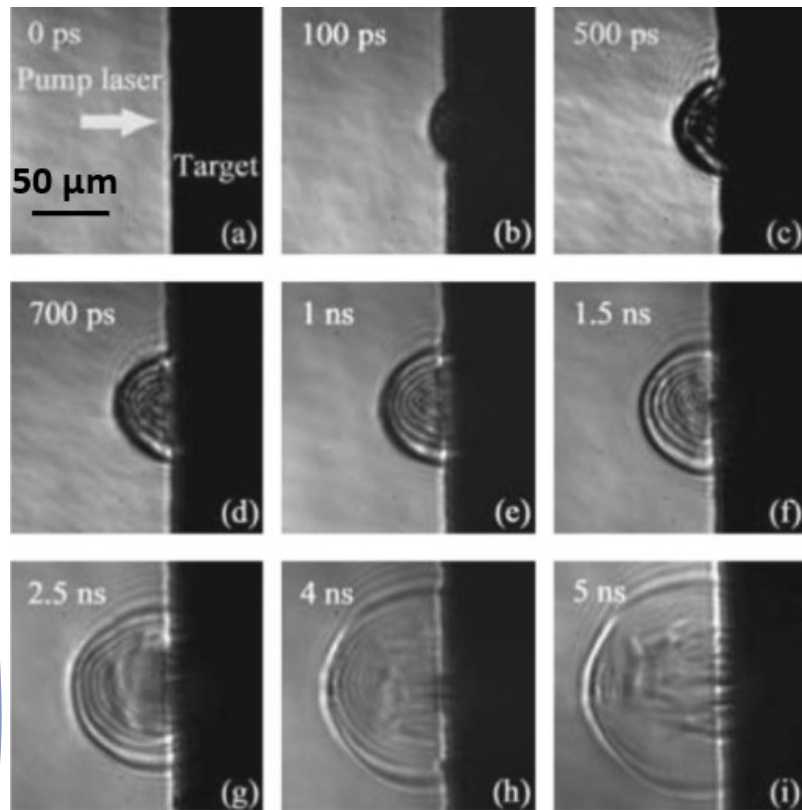


→ Imagerie à gradient d'indice comme guide du spectroscopiste...

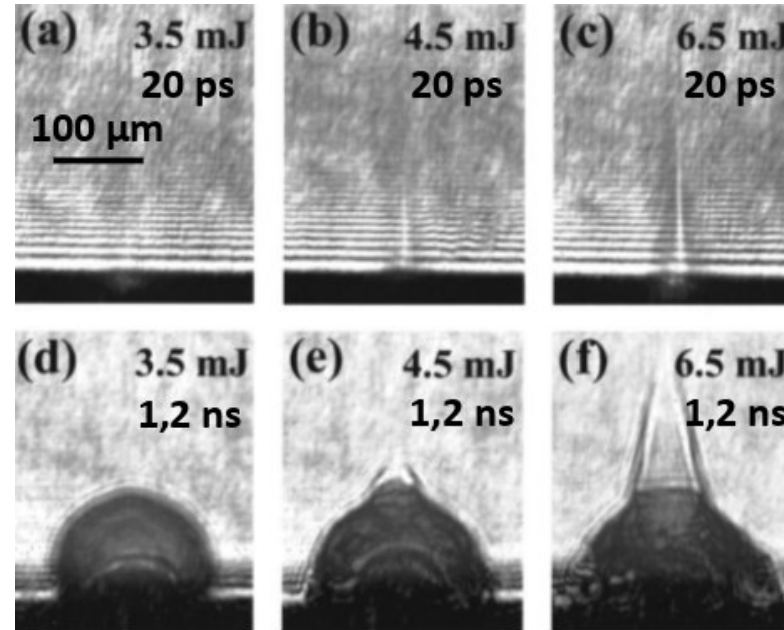
...mais aussi comme outil d'**analyse**
aérodynamique !

Sujet du jour!

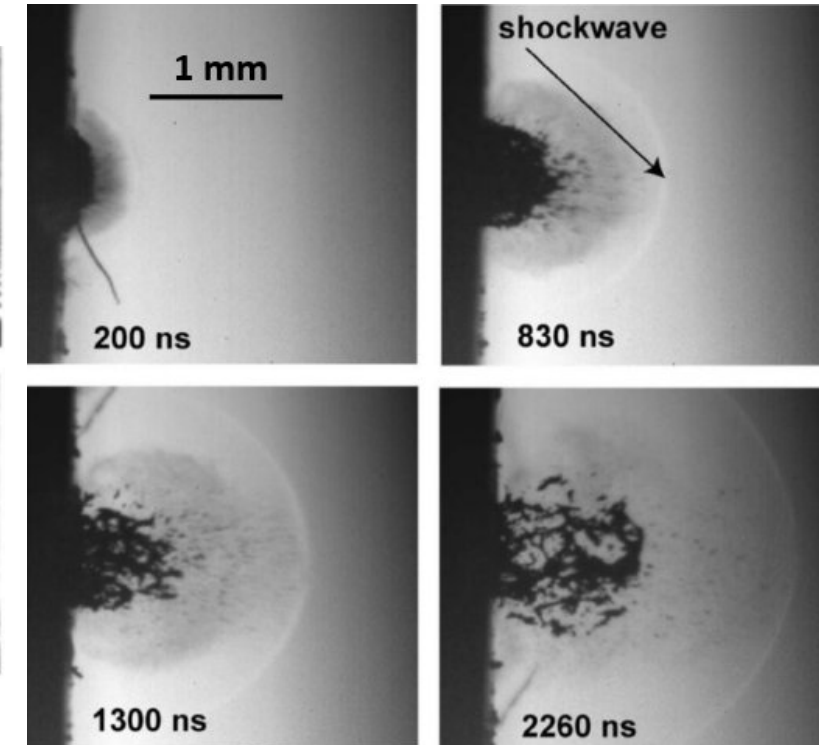
Influence de la nature de l'échantillon irradié & des conditions d'éclairement...



Al (50 fs, 800 nm, 40 J cm^{-2})
N. Zhang *et al.*, Phys. Rev. Lett., 2007

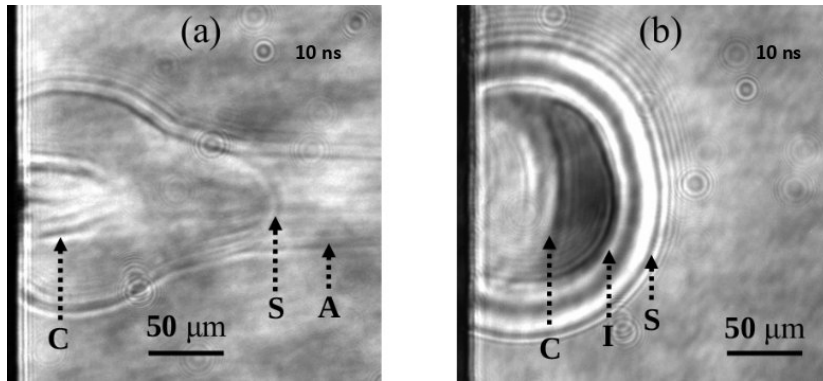


Cu (35 ps, 1064 nm, 50 J cm^{-2})
S.S. Mao *et al.*, Appl. Phys. Lett., 2000



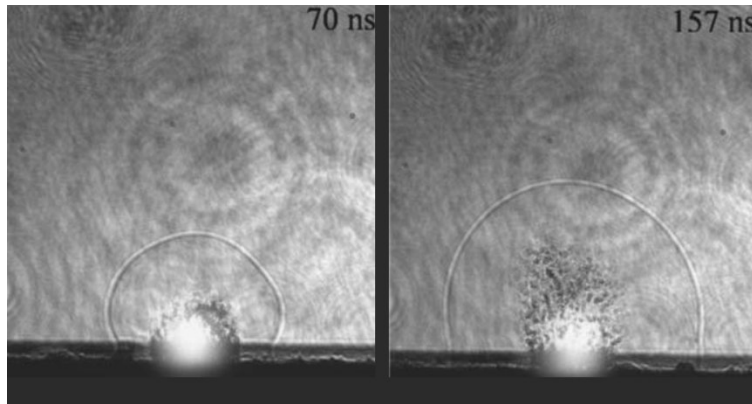
Polymère (6 ns, 1064 nm, $6,5 \text{ J cm}^{-2}$)
M. Hauer *et al.*, Opt. Las. Eng., 2005

Morphologie de l'onde de choc - milieux condensés



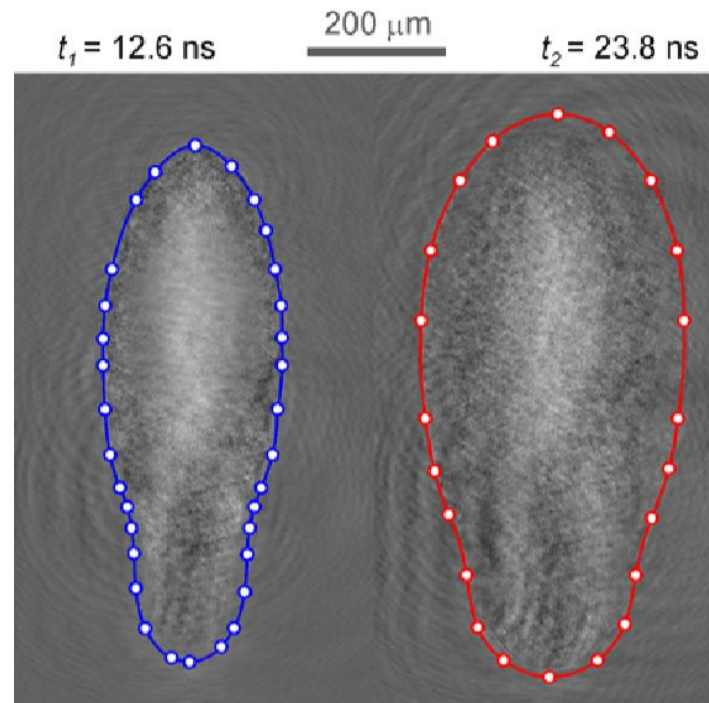
Si (100 fs & 3 ns, 266 nm, 11 J cm^{-2})

X. Zeng *et al.*, LBBL, 2004



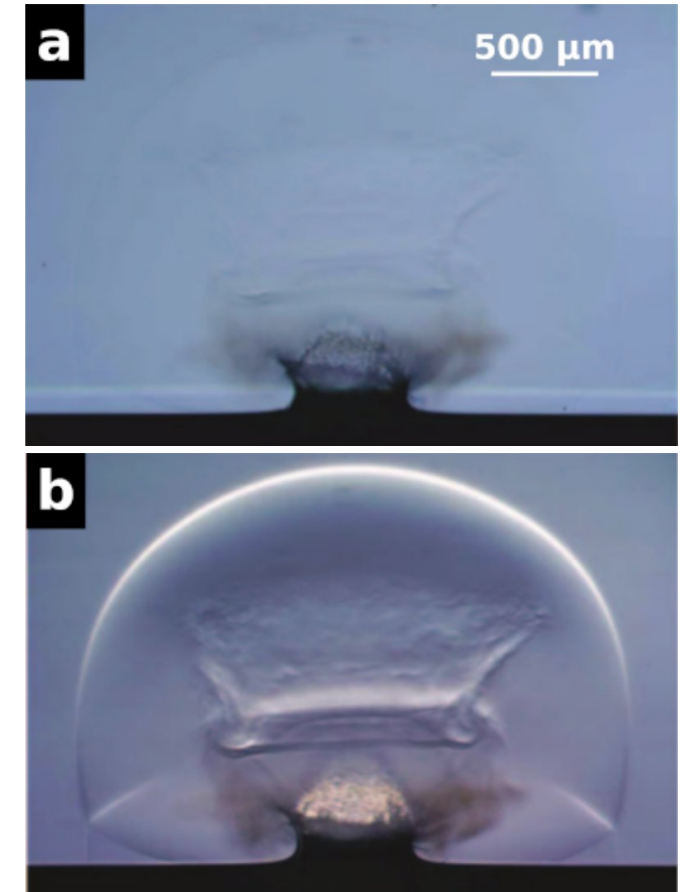
Al (5 ns, 1064 nm, 5 J cm^{-2})

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

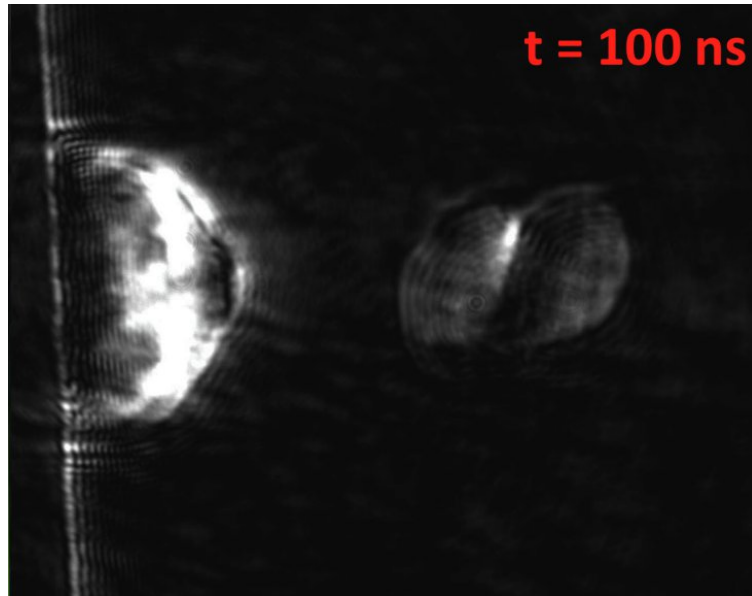


Eau (80 ns, 2940 nm, 5 J cm^{-2})

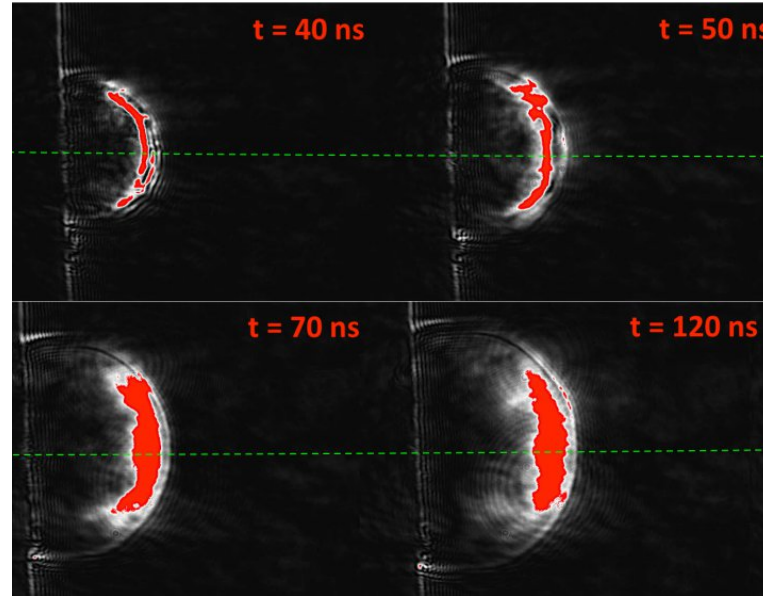
a : ombroscopie

b : strioscopie + modulation de contraste

A. Vogel *et al.*, Opt. Lett., 2006



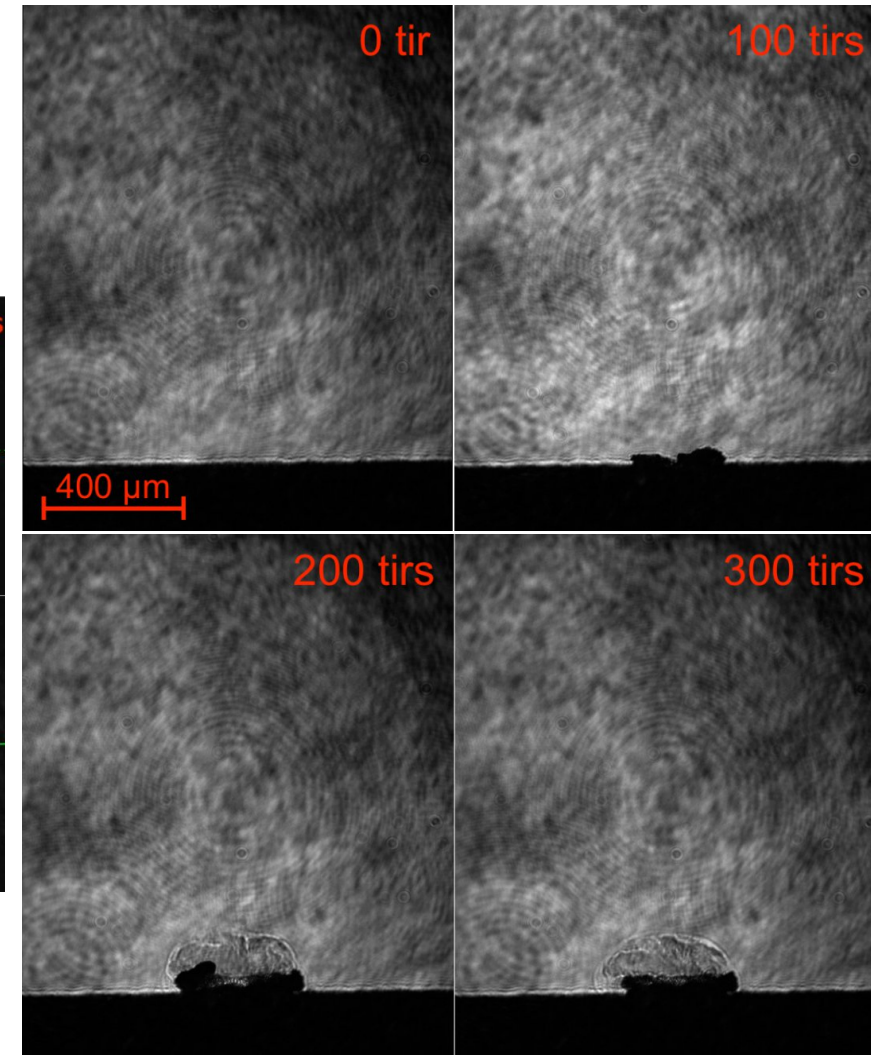
Focalisation secondaire sur un objet en suspension le long du trajet optique



Suivi temporel de la couche de choc

W (30 ps, 1064 nm, 30 mJ)

A. Favre, CORIA., 2017

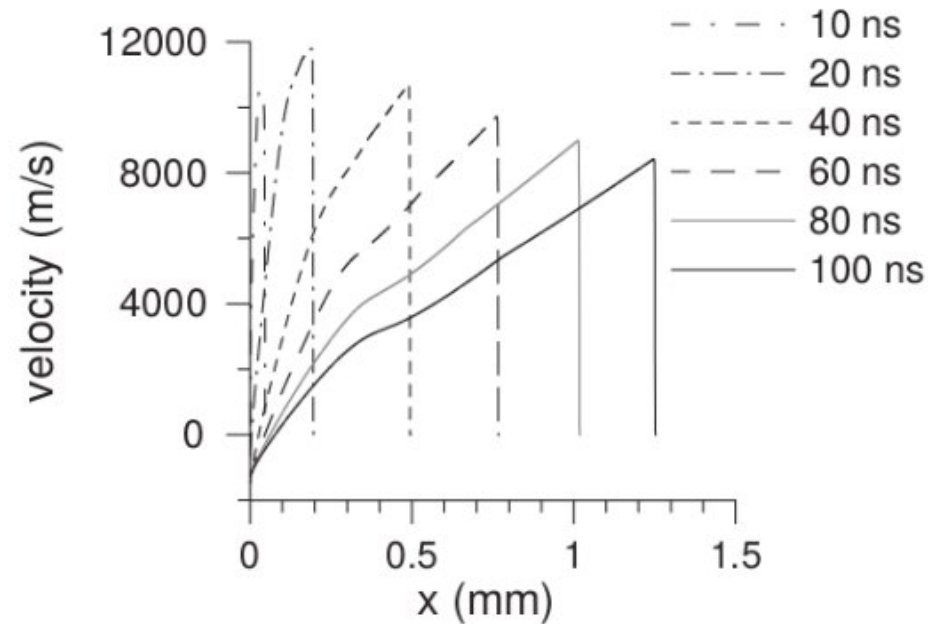


Suivi tir à tir de l'état de surface

Al (30 ps, 1064 nm, 30 mJ)

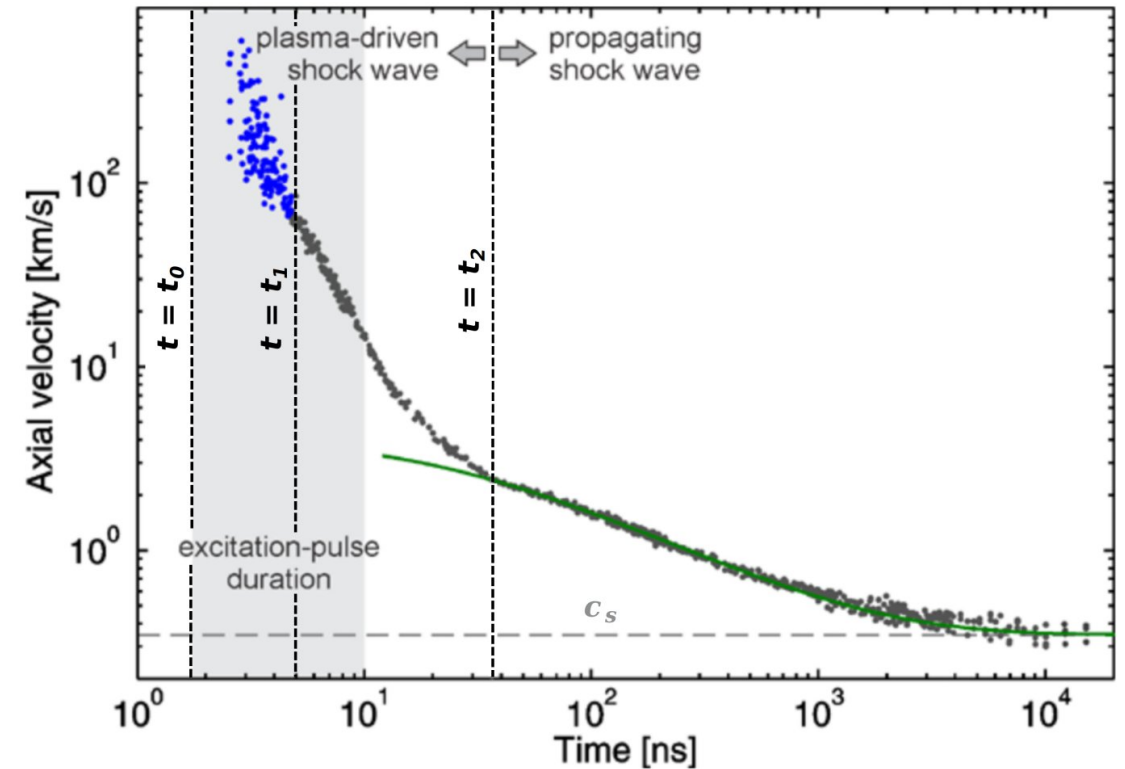
A. Favre, CORIA., 2017

→ 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

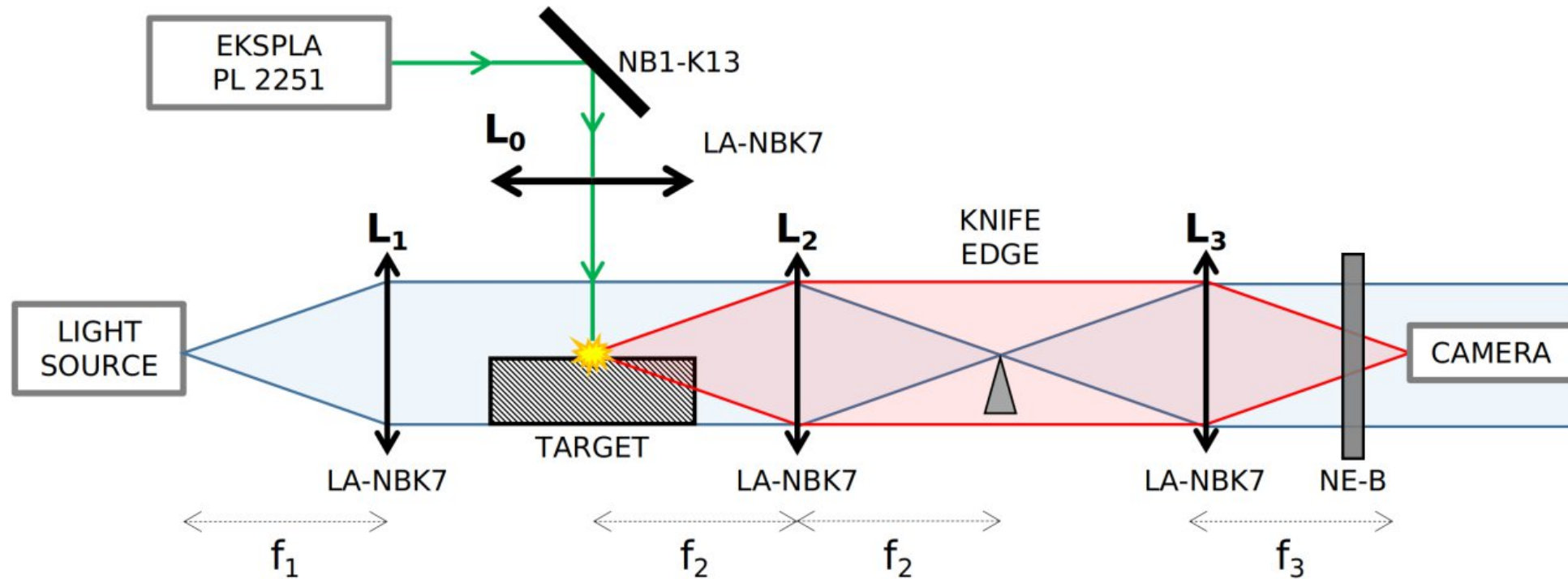


Air (4 ns, 1064 nm, 50 J cm $^{-2}$)

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

Strioscopie : comparaison éclaircissement thermique (Schlieren) et cohérent - PIL W & Al (ps, différents gaz ambiants) - **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

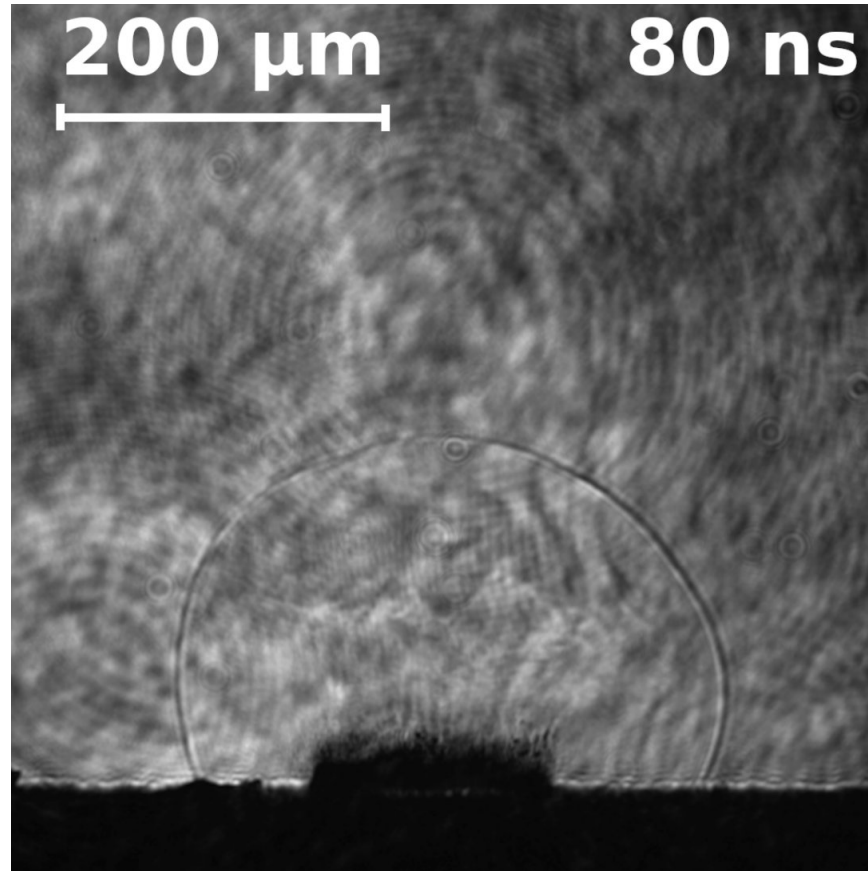
→ Le **grandissement** γ du montage est piloté par le rapport f_2 / f_3

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

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

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

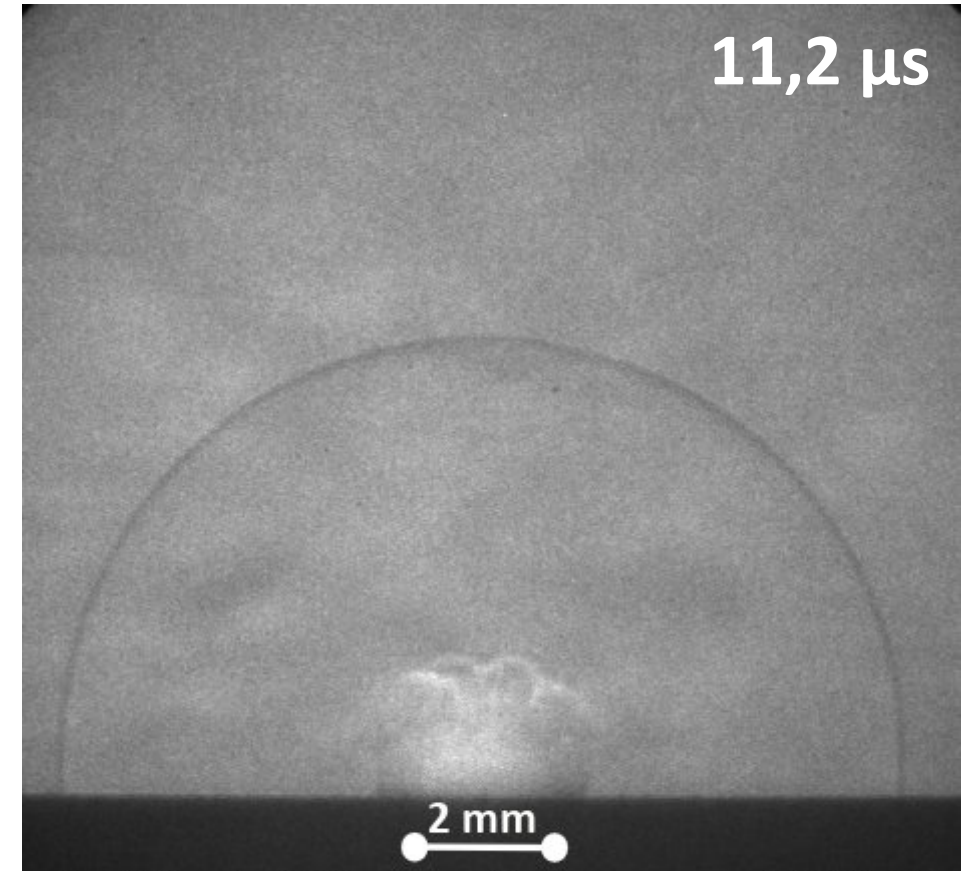
Deux clichés emblématiques de cette campagne : **cohérent = début de dynamique** / **thermique = temps longs**



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



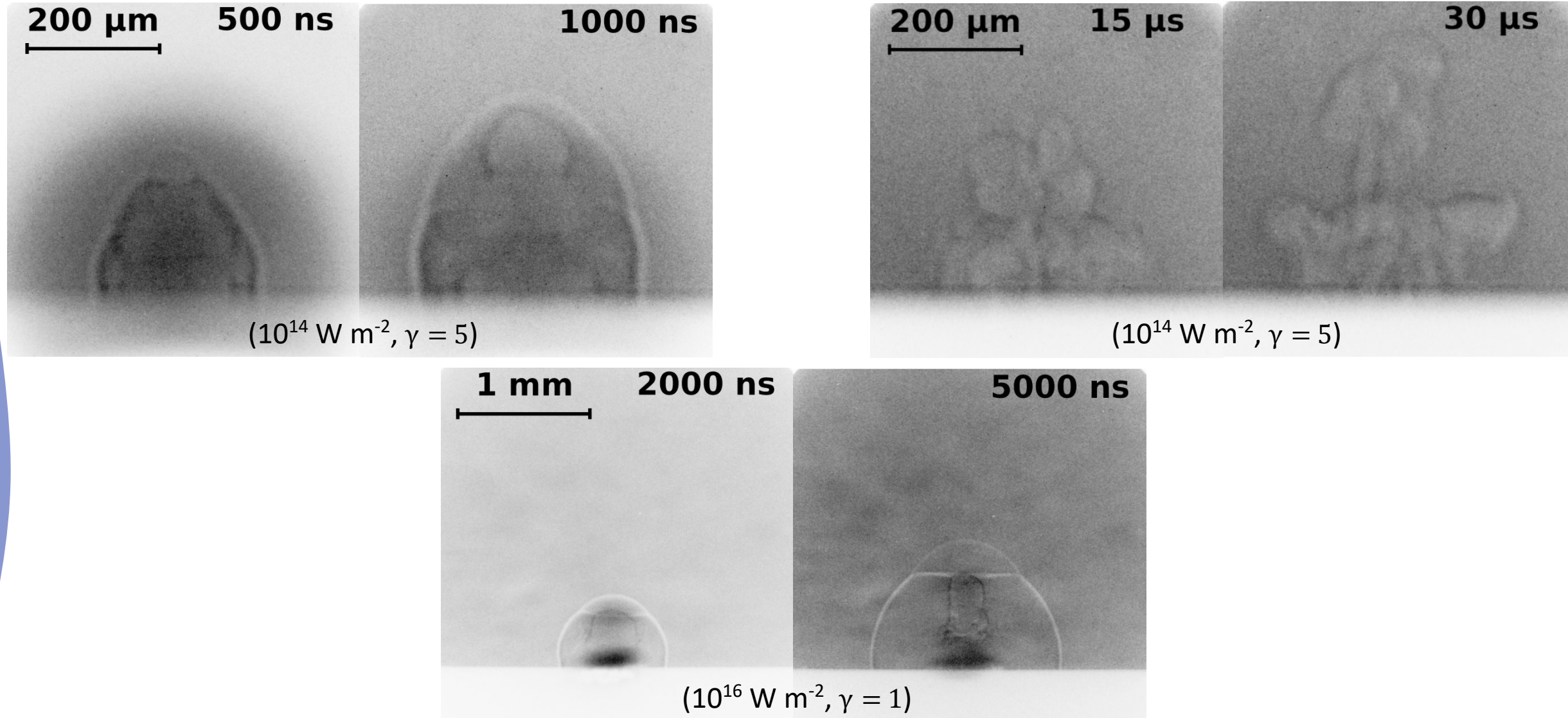
Al dans l'air (10^5 Pa, 30 ps, 1064 nm, 10^{16} W m $^{-2}$)

Strioscopie **thermique** ($\gamma = 1$)

A. Favre *et al.*, TBPublished, 2026

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

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



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

Exploitation : suivi d'interface numérique...

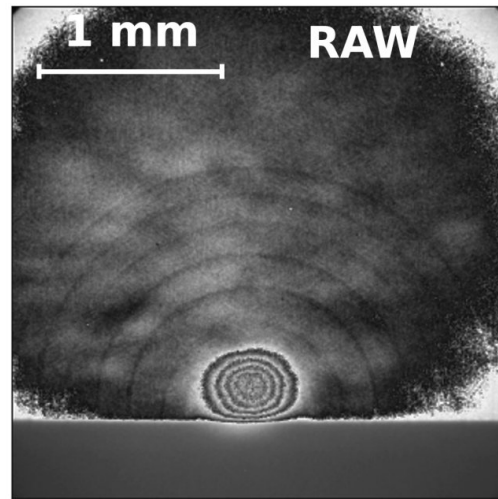
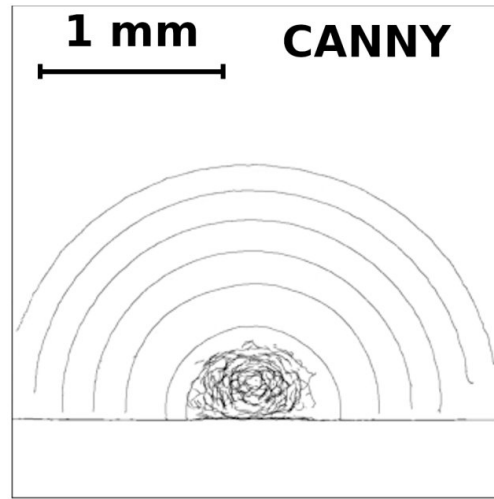
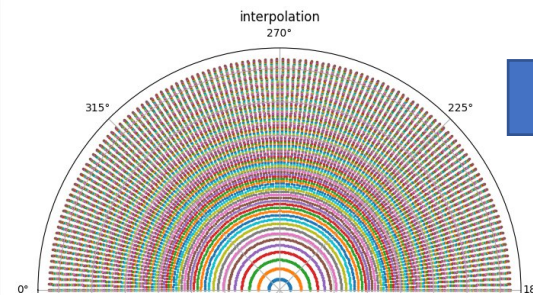


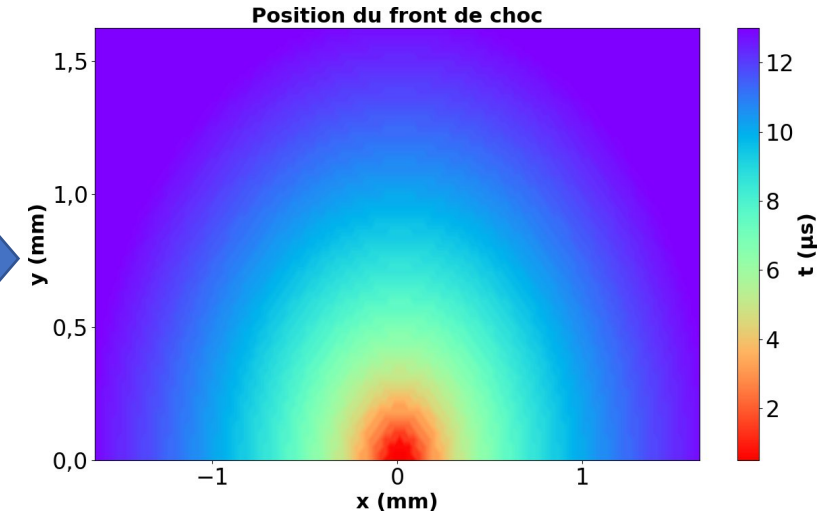
Image cumulée



Filtrage de contours



Filtrage artefacts numériques



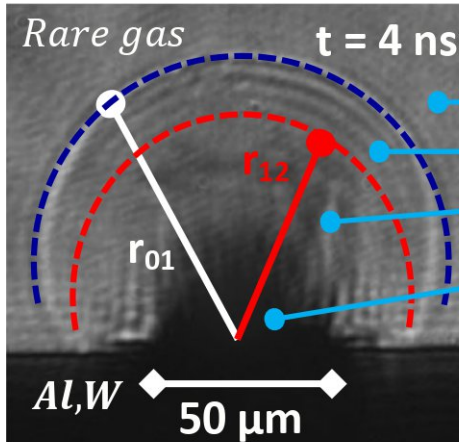
→ Reconstruction des champs
(position, vitesse, accélération...)

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

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**

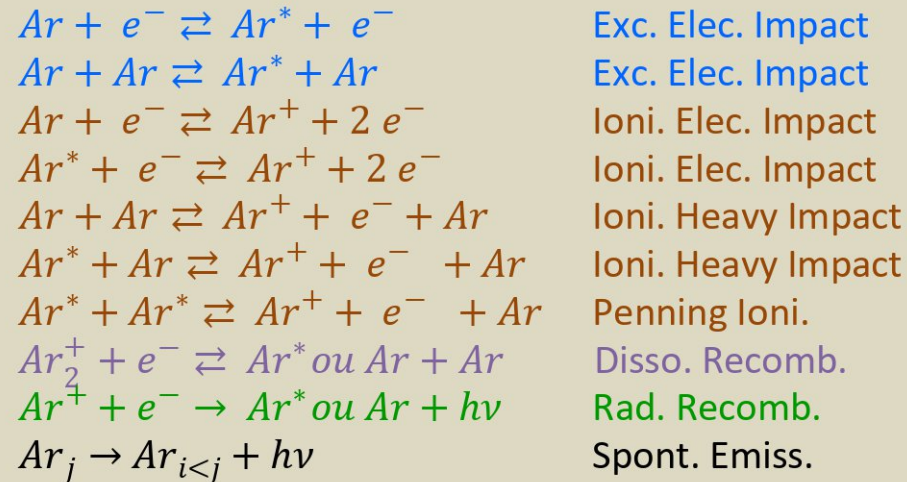
Mass $M_2 = \frac{2\pi}{3} \rho_2 r_{12}^3 \Leftrightarrow \frac{d\rho(\{Al,W\}_j^{Z+})}{dt} = \dot{\rho}(\{Al,W\}_j^{Z+}) - 3\rho(\{Al,W\}_j^{Z+}) \frac{u_2(r_{12})}{r_{12}}$

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

The ECHREM* code*Eulerian **C**hemically **R**eactive
Multi-component plasma code**Shock layer - Argon**

Collisional-Radiative model CoRaM-RG

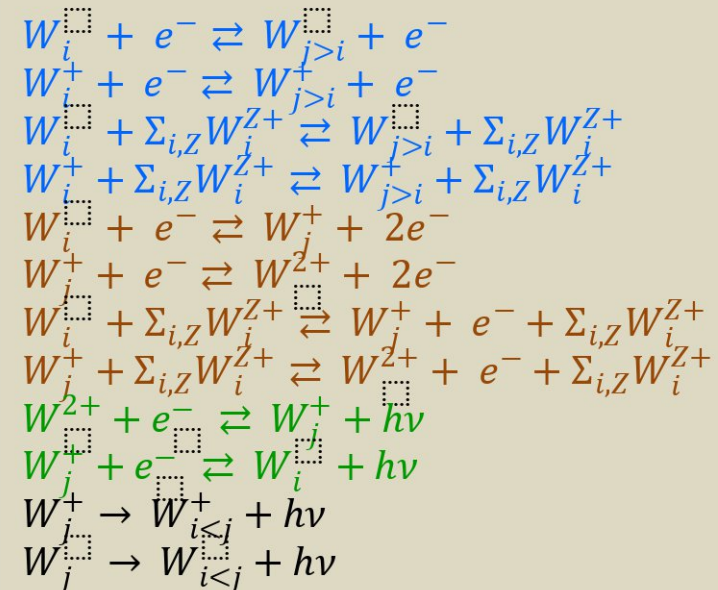
**30 000** elementary processes**Collisional Database**

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

- $\sigma_i(x)$ 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

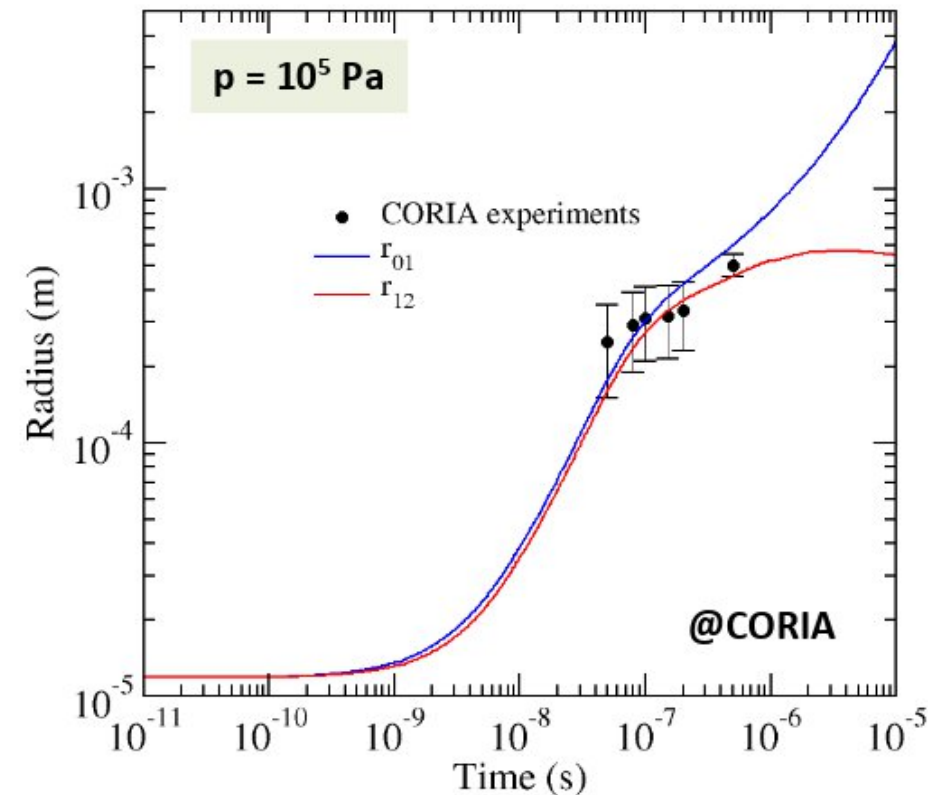
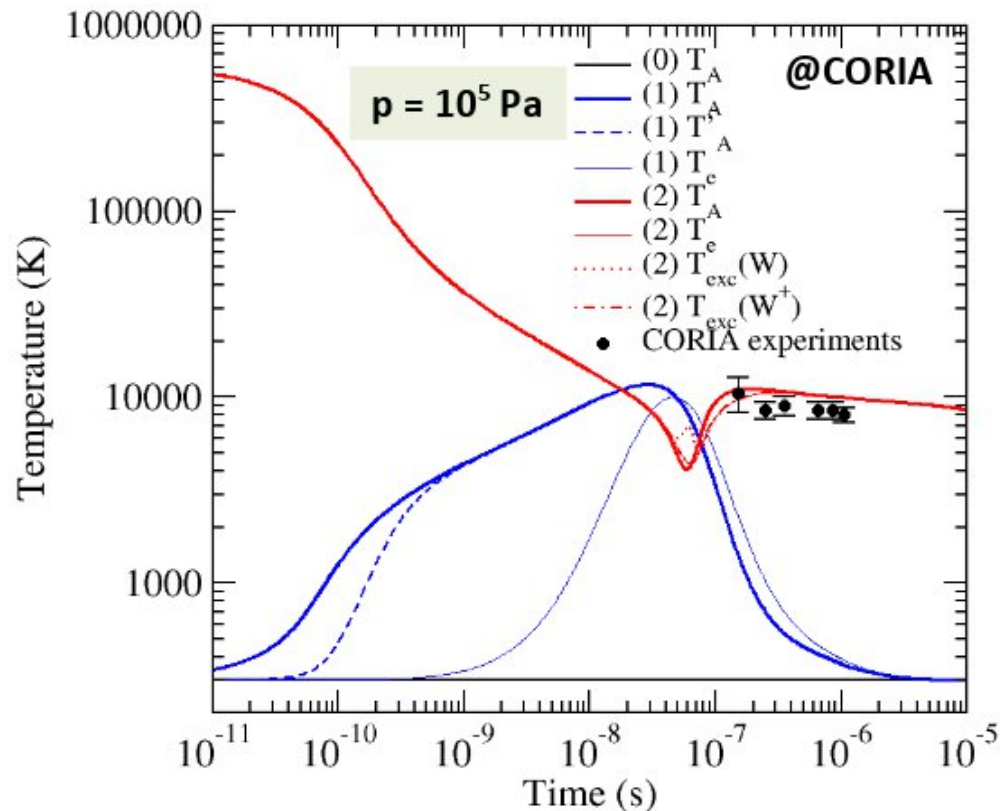
**Thermal Bremsstrahlung****520 000** elementary processes**Radiative Database**

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 :

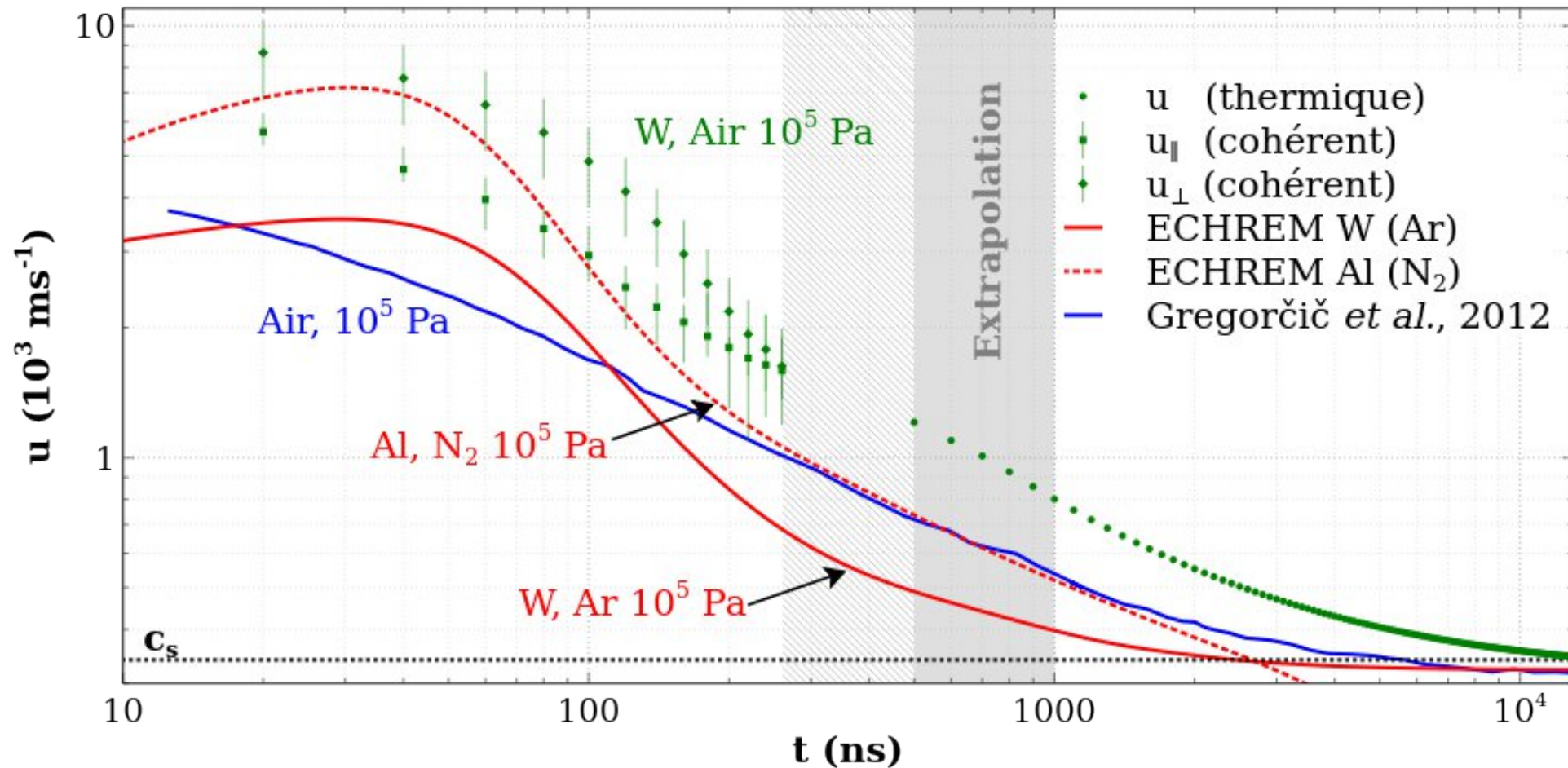
W(Ar à 10^5 Pa)

10 ps

532 nm

10 J cm^{-2}

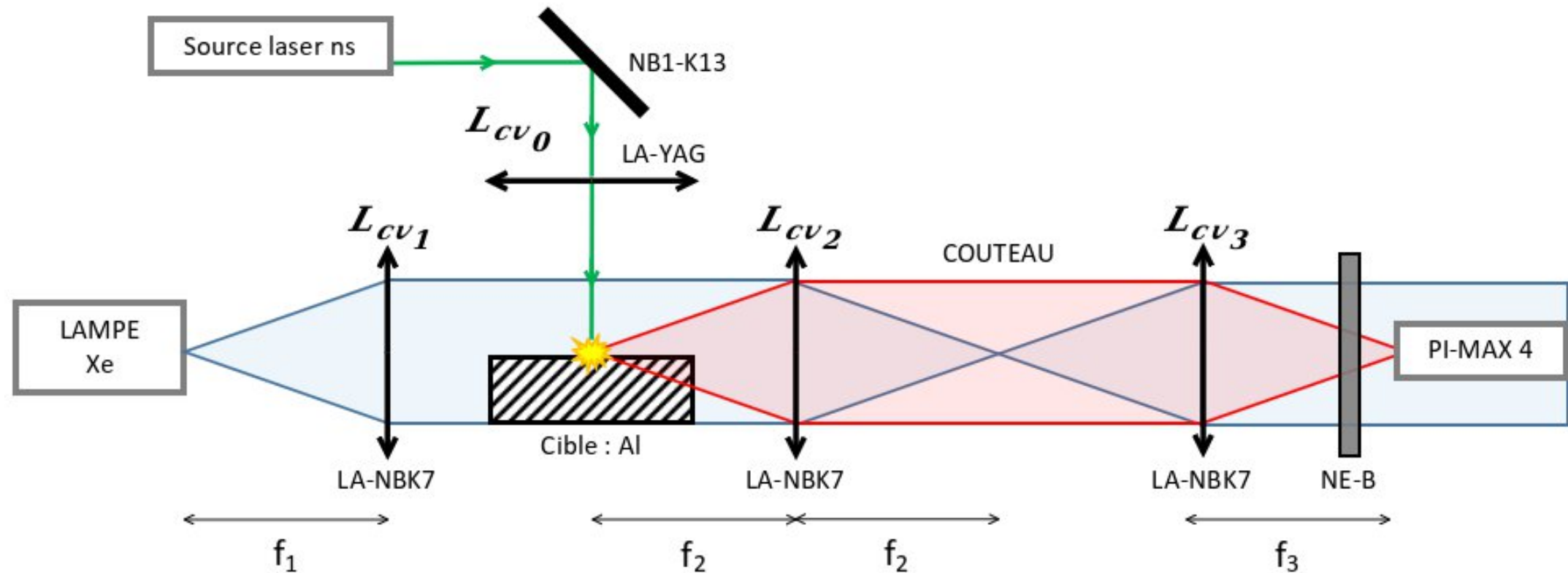
Comparaison strioscopie - ECHREM : PIL W (Air, ps) - en **soumission**



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

Strioscopie **thermique & cohérente**

A. Favre *et al.*, TBPublished, 2026

Ombroscopie thermique avec système imageur de grandissement γ 

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

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

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

→ $\gamma = 2$ ou $1/2$ en intervertissant L_{cv2} et L_{cv3} ... : observer différents instants en restant dans le champ caméra !!

Merci de votre attention !