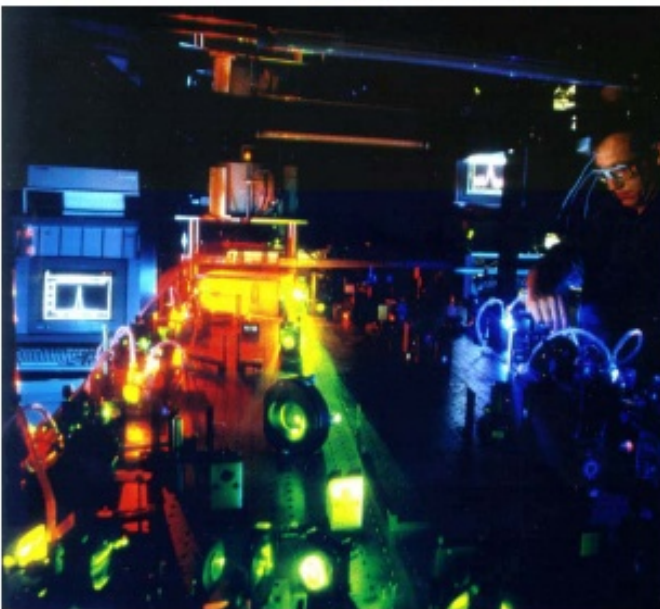


Expériences laser et quelques principes de mesures physiques

Frédéric THAIS



Installation laser femtoseconde



LUCA (DSM/DRECAM/SPAM)

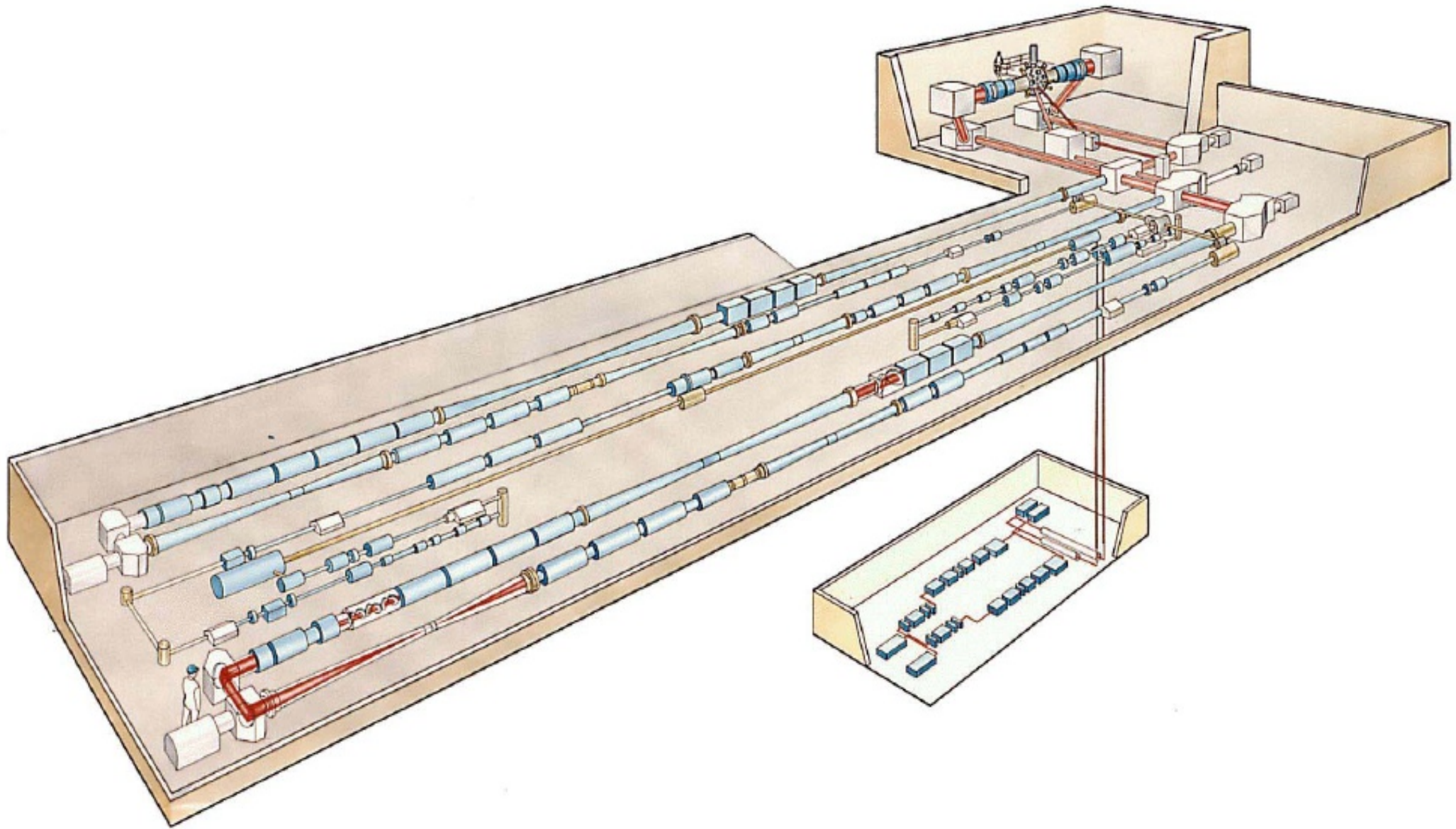
- Durée d'impulsion : 60 fs (10^{-15} s)
- Fréquence des tirs : 20 Hz
- Longueur d'onde : $0,8 \mu\text{m}$
- Énergie : 1,5 à 85 mJ
- Puissance crête : 40 à $1,5 \text{ GW}$ (10^9 W)

typiquement :
 $\Delta t \sim 1 \text{ ns}$ @ $\lambda \sim 540 \text{ nm}$

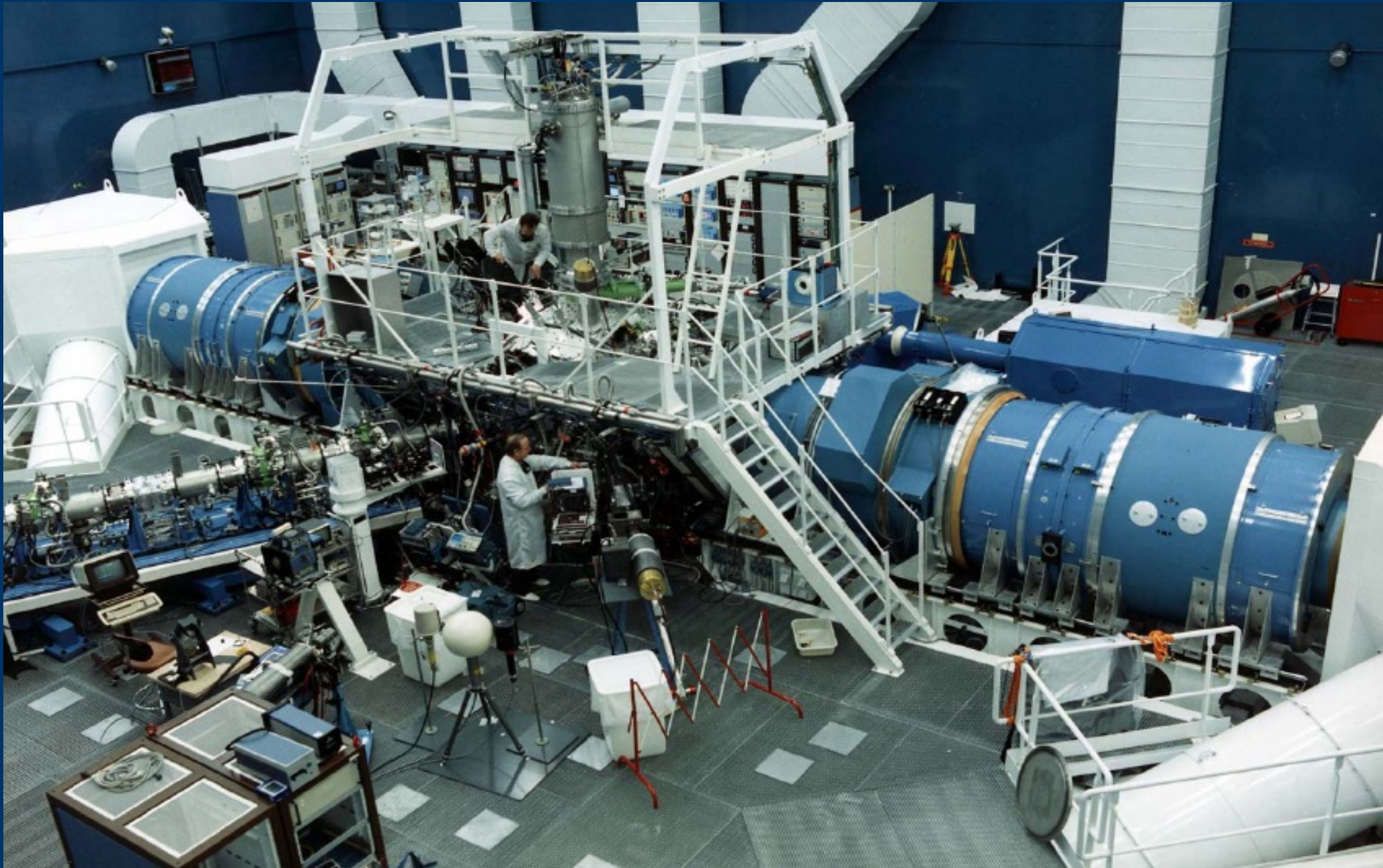
Les « grands » lasers

- [→ 1999] PHÉBUS 2500 J (x2)
- [→ 2003] LULI 6F 30 J (x6)
- [1983 →] GEKKO XII 1000 J (x12)
- [1999 →] PALS (Prague) 400 J (x1)
- [2004 →] LULI 2000 500 J (x2)
- [2007 →] LULI 2000+ps 500 J + 60 J (1ps)
- [2005 →] LIL 4000 J (x4)
7500 J (x8) + PW
- [2012 →] NIF, LMJ 7500 J (x240 ?)

PHÉBUS : plan d'ensemble



PHÉBUS : salle d'expériences



PHÉBUS : chambre d'expérience

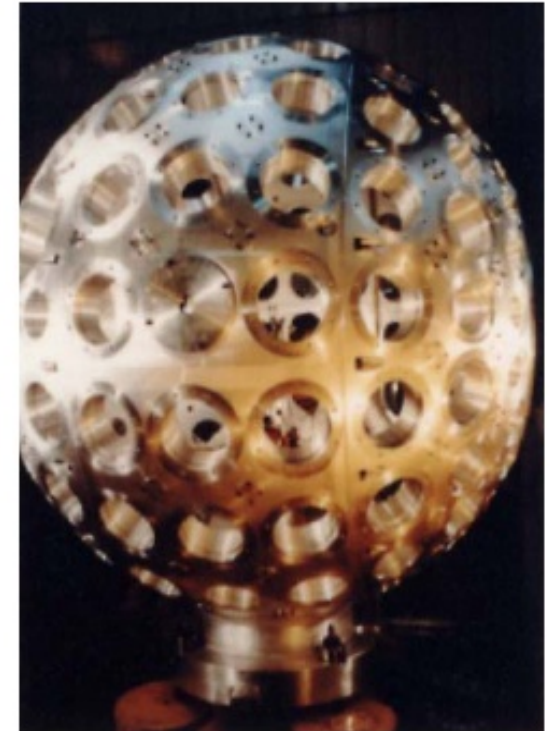
Fin de chaîne laser

- Diamètre du faisceau : 740 mm (dernier miroir $\varnothing = 1\,000$ mm)
- Précision de pointage sur cible : $10\ \mu\text{m}$
- Synchronisation des chaînes : $0,01\ \text{ns}$
- Tache focale $> 150\ \mu\text{m}$
- Techniques de lissage et de conversion de fréquence (2ω et 3ω)

Deux chambres d'interaction, dont :

PHÉBUS-1 :

- aluminium
 - poids : 5 tonnes
 - hublots concourants dans $300\ \mu\text{m}$
 - porte-cibles
- $\varnothing = 2,30\ \text{m}$, épaisseur = $0,12\ \text{m}$
 - 280 trous
- $(x,y,z) \pm 10\ \text{mm}$; $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \pm 1\ \mu\text{m}$
 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z) \pm 7^\circ$; $(\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z) \pm 1/100^\circ$



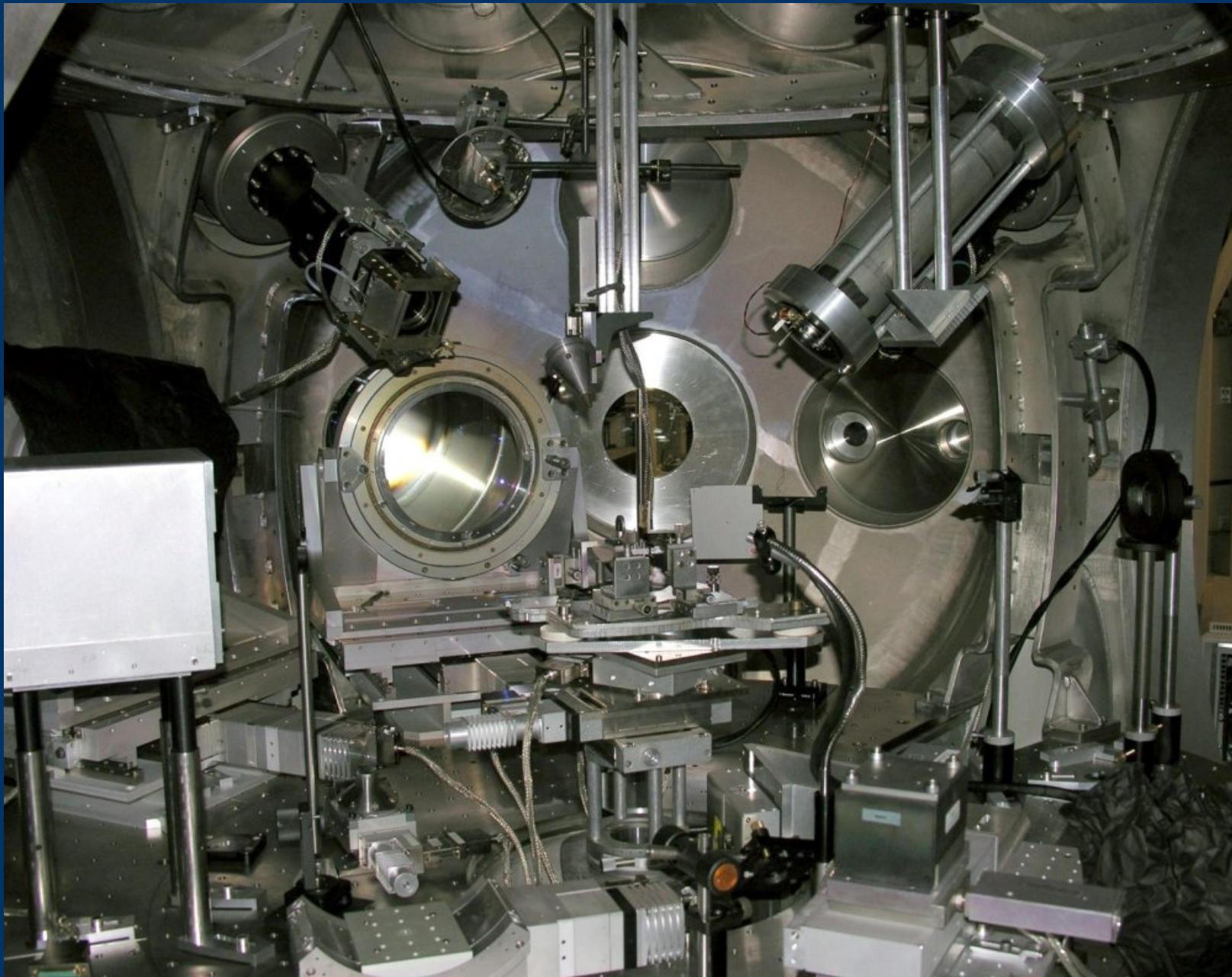
LULI 2000 : *hall laser*



LULI 2000 : chambre d'expérience « Milka »



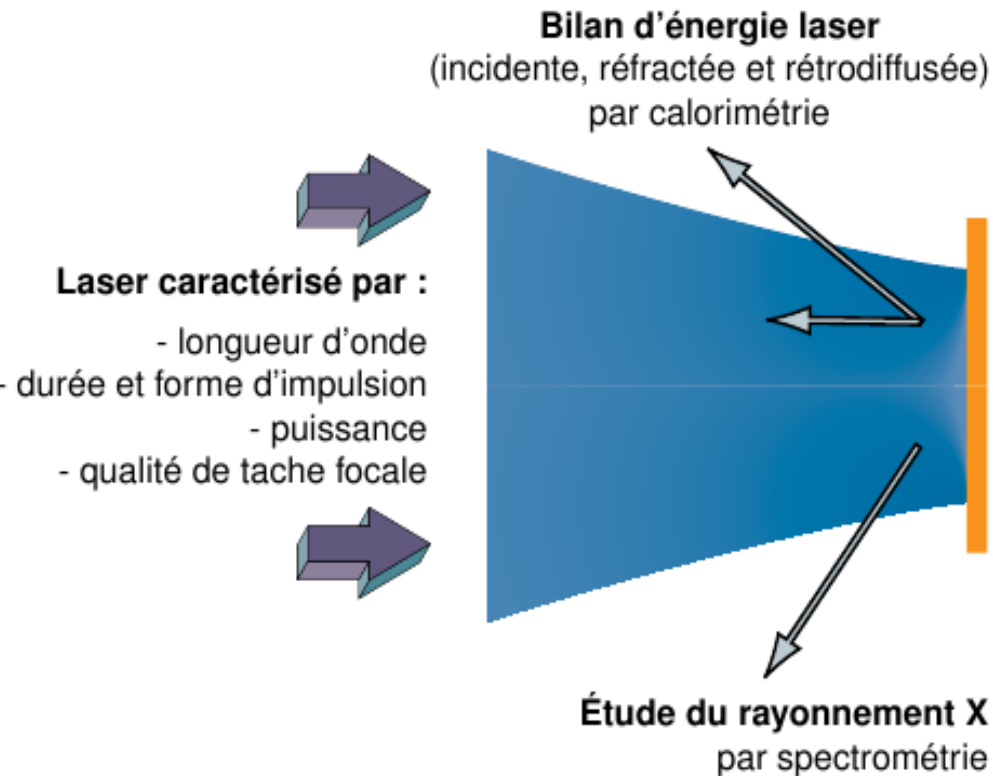
LULI 2000 : chambre d'expérience « Milka »





Mesures des conditions initiales - bilan d'énergie et conversion X

Principe des mesures

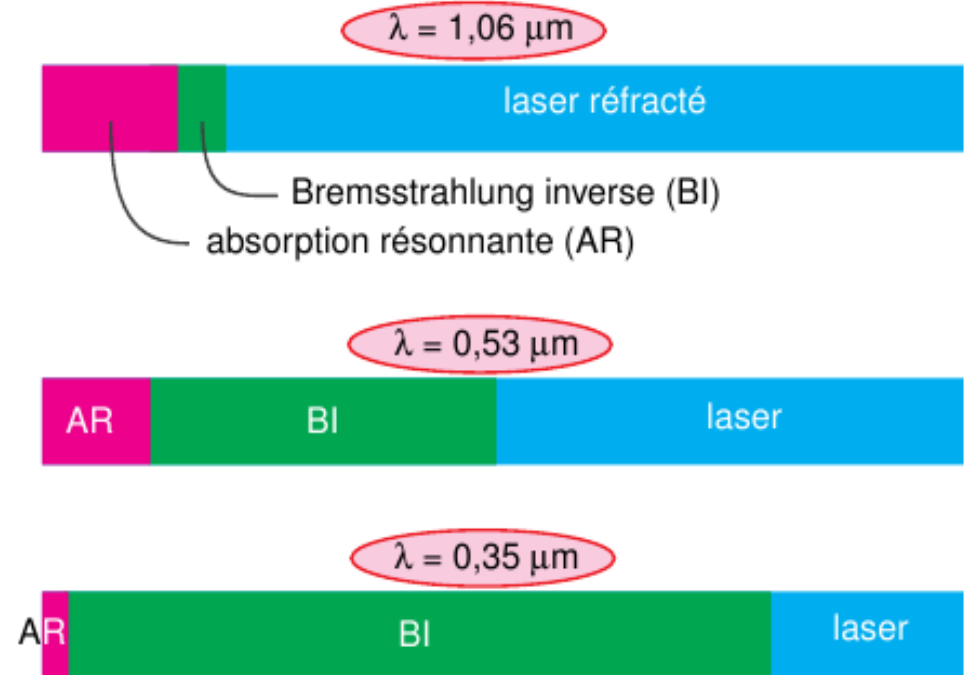


- ◆ spectromètres à *diodes* « larges-bandes » (couverture spectrale étendue avec une mesure « absolue », mais avec une résolution limitée)
- ◆ spectromètres par *réseaux en transmission* ou bien par *cristaux* (résolution continue, mesure relative)

Phénomènes physiques dominants

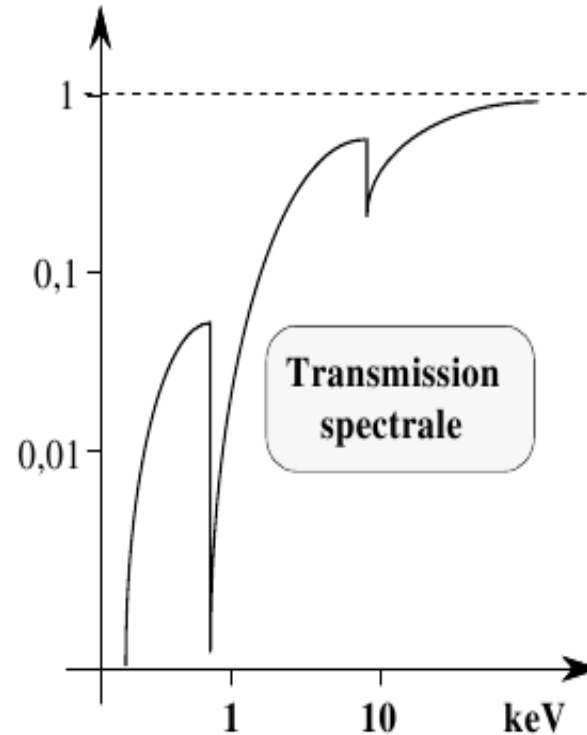
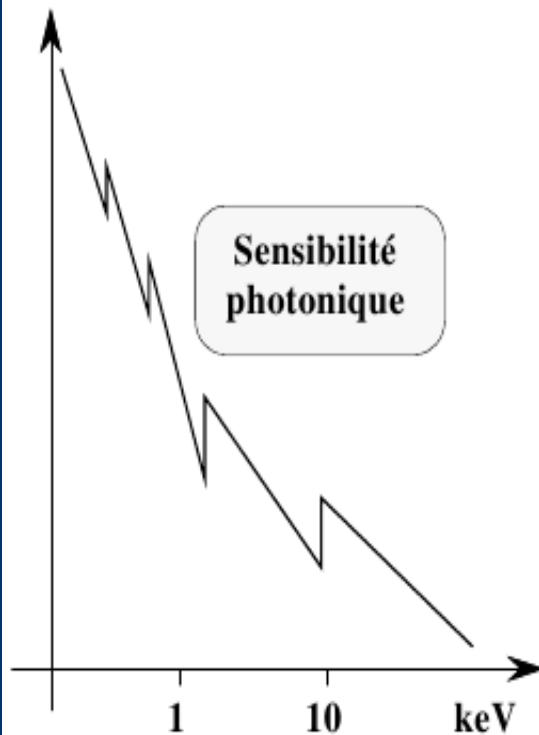
Mécanismes d'absorption de l'énergie laser

Pour un flux incident de l'ordre de $\Phi = 10^{15} \text{ W/cm}^2$
l'énergie se répartit comme suit :

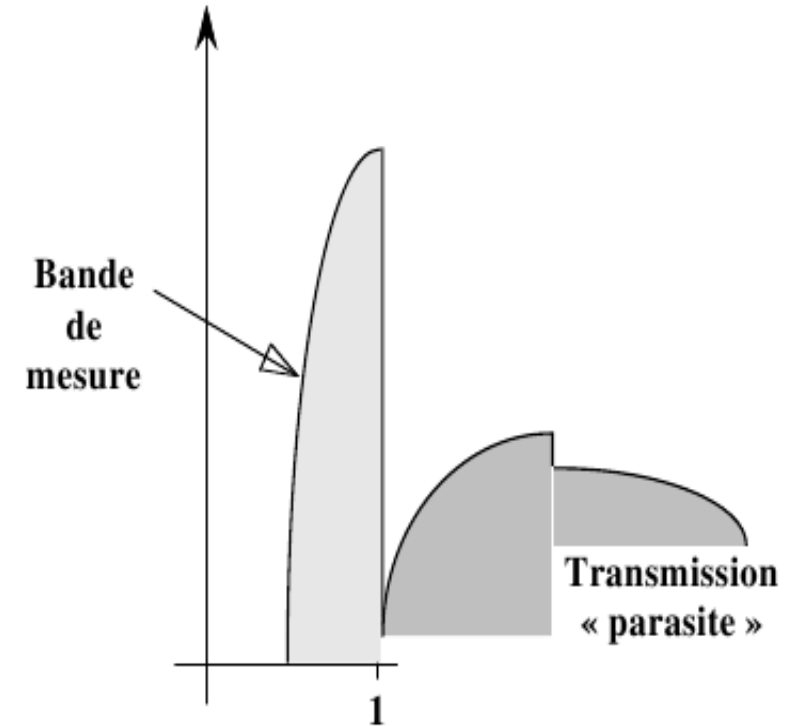


Spectrométrie X larges-bandes

Voie de mesure = photocathode + filtre



Réponse à un spectre d'émission

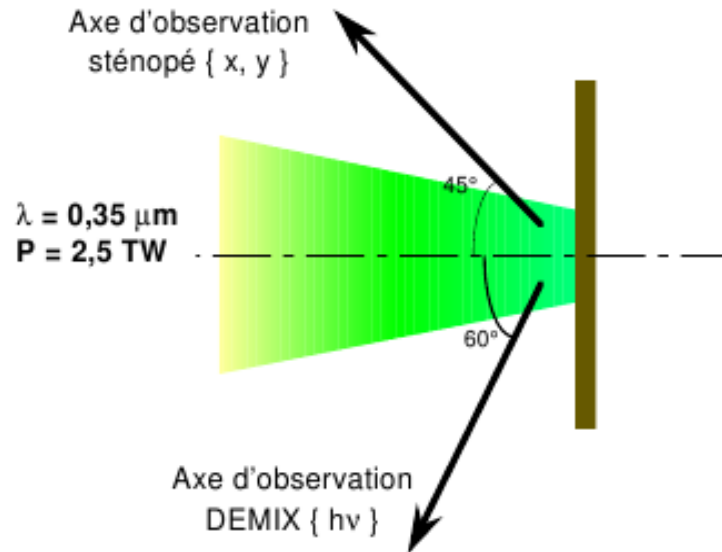


Diodes : X → é

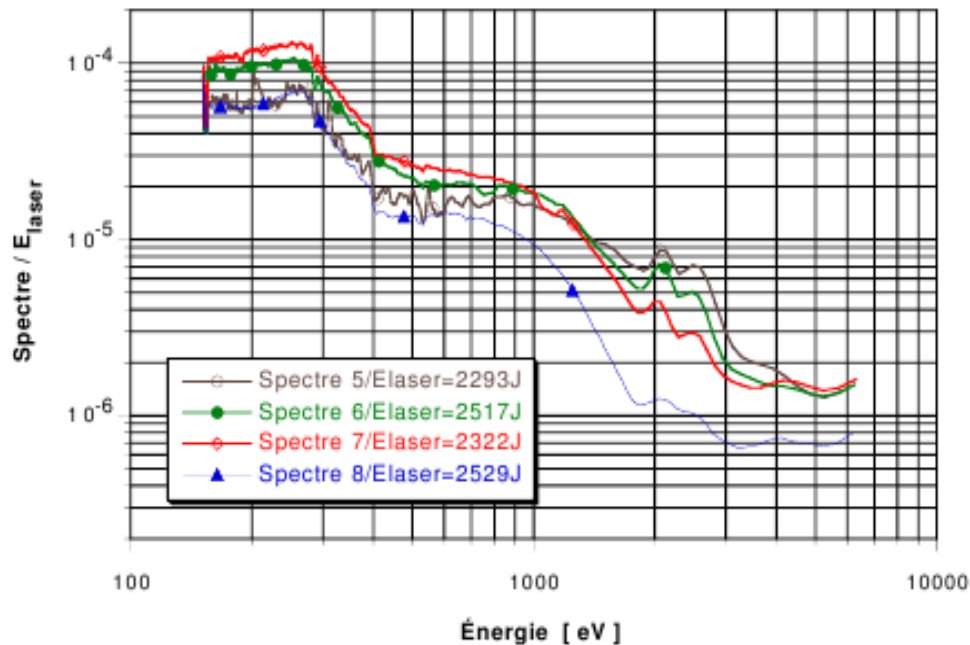
Acquisition du signal : intégrateur ou oscilloscope rapide (7 GHz)

Mesure de la conversion X

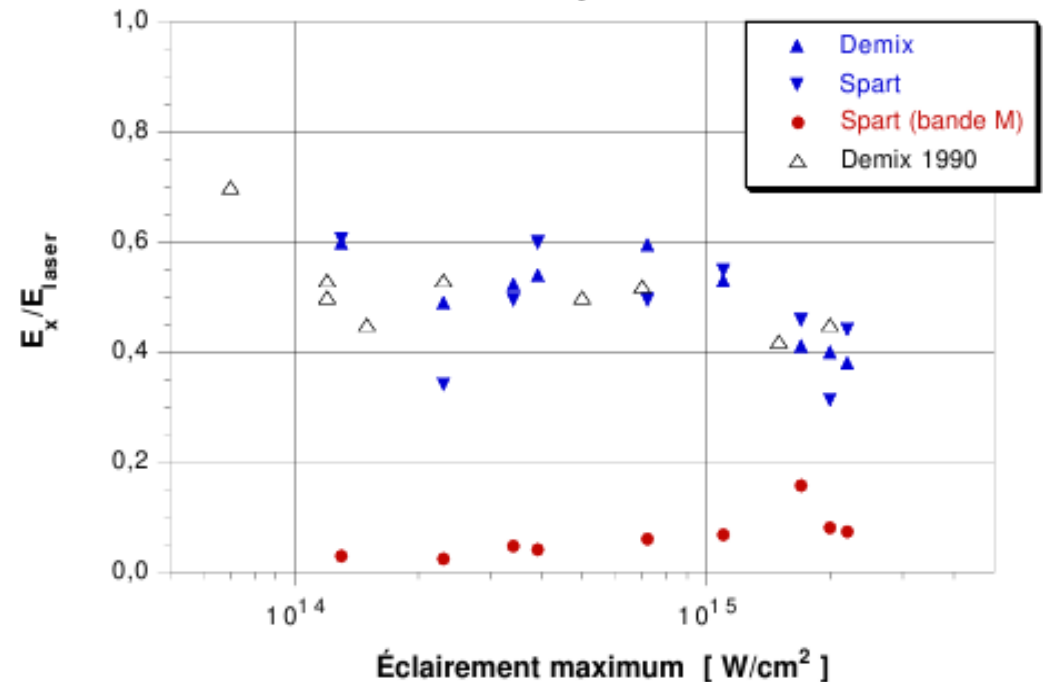
- L'énergie laser est convertie d'autant plus efficacement que le Z de la cible est élevé



Spectres mesurés avec SPART
Contraste = 10 %



Taux de conversion X moyen



Diagnostique de base de l'imagerie X : application à l'implosion

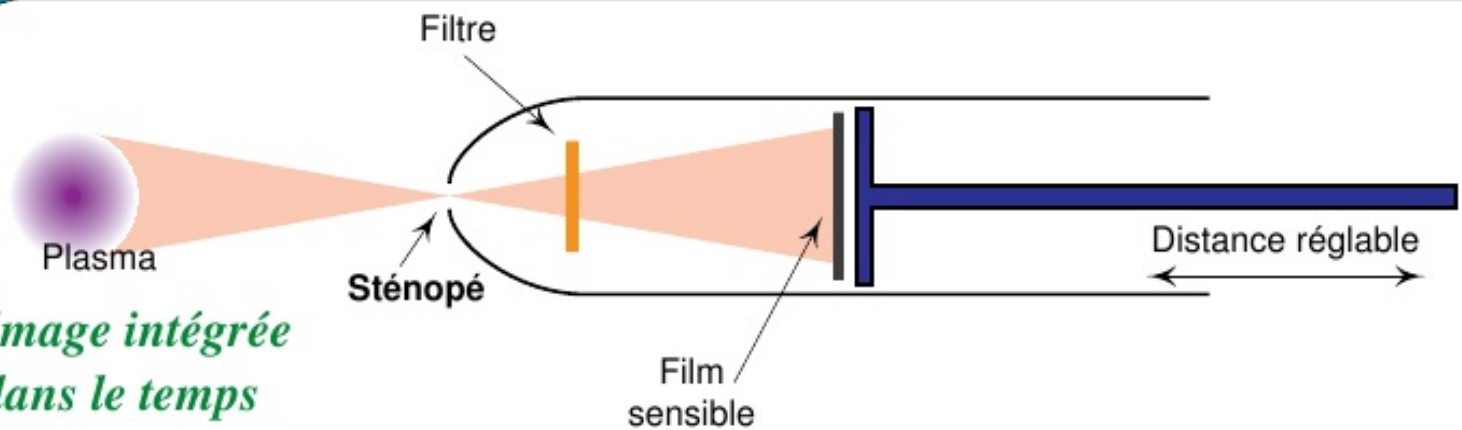
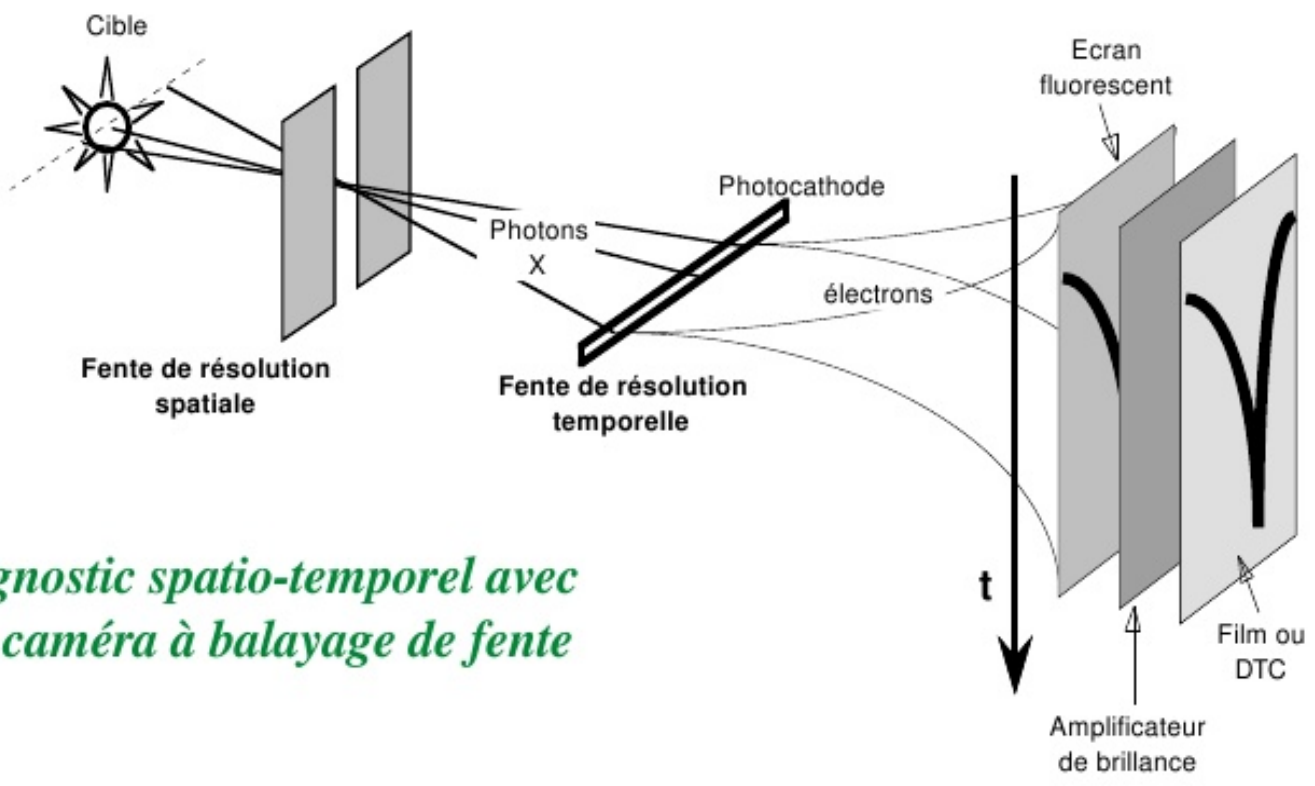
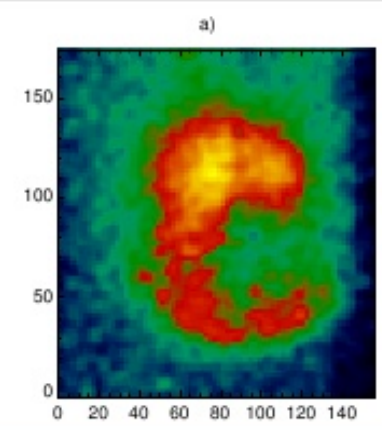
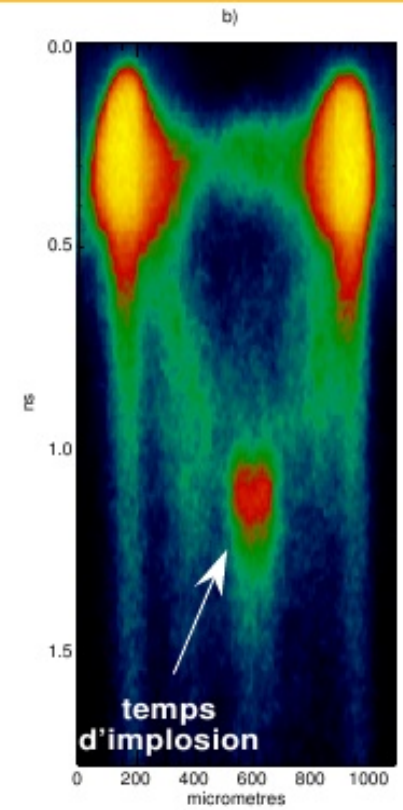


Image intégrée dans le temps



Diagnostic spatio-temporel avec une caméra à balayage de fente



Comment faire une image sans dispositif focalisant ? Un vieux problème...

- Chambre format demi-plaque en noyer, soufflet court et rallonge téléobjectif, sténopé à vanne.



- Chambre panoramique, objectif à sténopé.



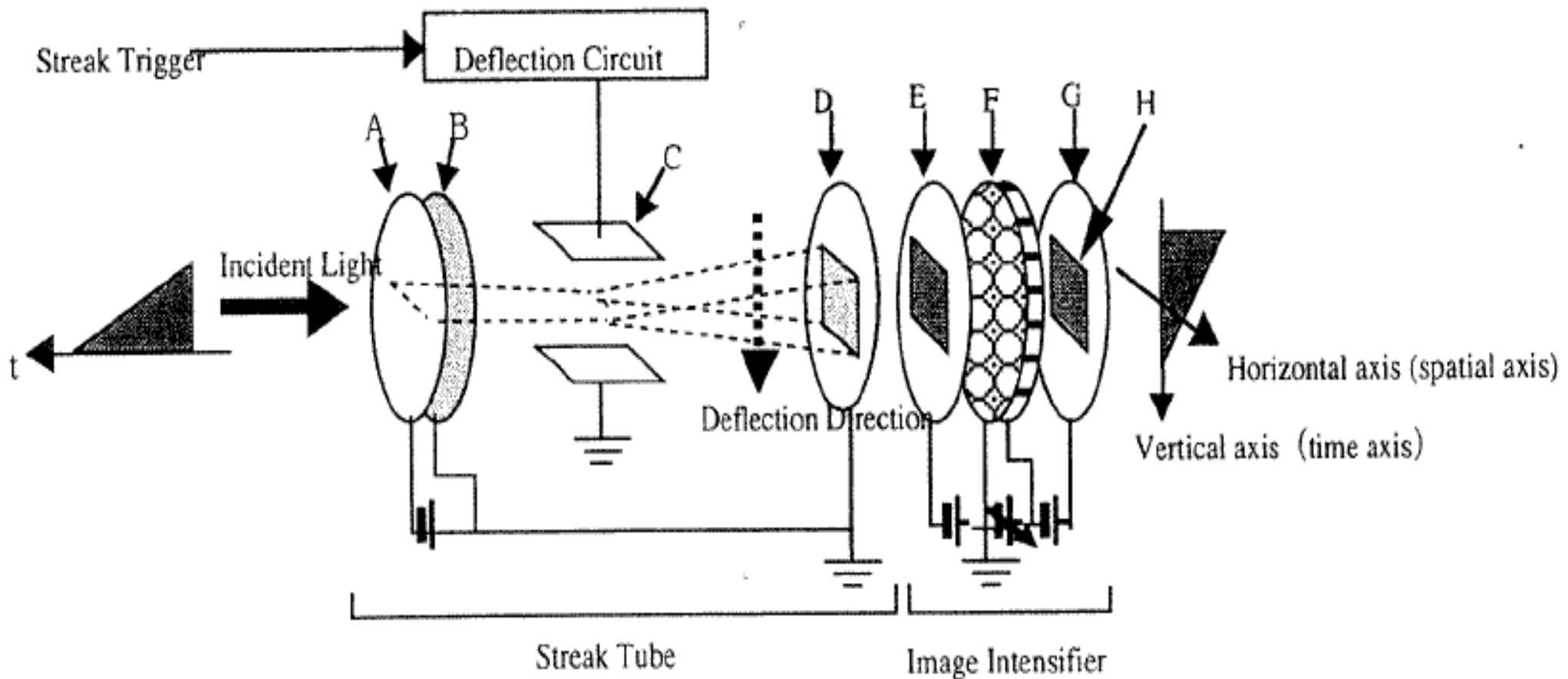
- Chambre miniature en noyer pour plaques 4,5 x 6, objectif à sténopé.



- Chambre en noyer quart de plaque, objectif sténopé-photographe n° 6, Dehors & Deslandres 1889.



Caméra à balayage de fente



A : Photocathode B : Acceleration Mesh C : Deflection Electrode
D : Phosphor Screen E : Photocathode F : MCP
G : Phosphor Screen H : Streak Image

Diagnostiques liés à la fusion

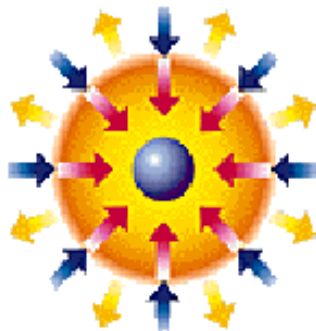
Processus identiques, mais à des échelles différentes !!

- Cœur des étoiles (150 MK) $4 p \rightarrow He (25 \text{ MeV}) + \gamma + \nu$ Confinement par gravité
- Explosion thermonucléaire
- Tokamak *Fusion par Confinement Magnétique*
- Implosion microsphère par laser $D+T (200 \text{ MK}) \rightarrow He (3,5 \text{ MeV}) + n (14 \text{ MeV}) \approx 20 \text{ keV}$
Fusion par Confinement Inertiel

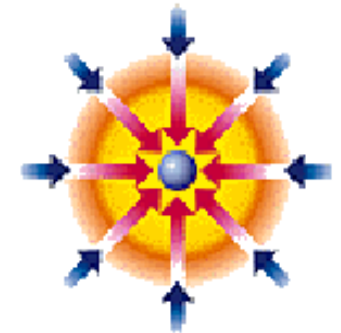
Sphère de silice
remplie de D-T
 \varnothing 0,01 à 0,8 mm



Énergie déposée en un
temps court (0,2 à 2 ns)



Compression inertielle
par *effet fusée* et
chauffage du cœur



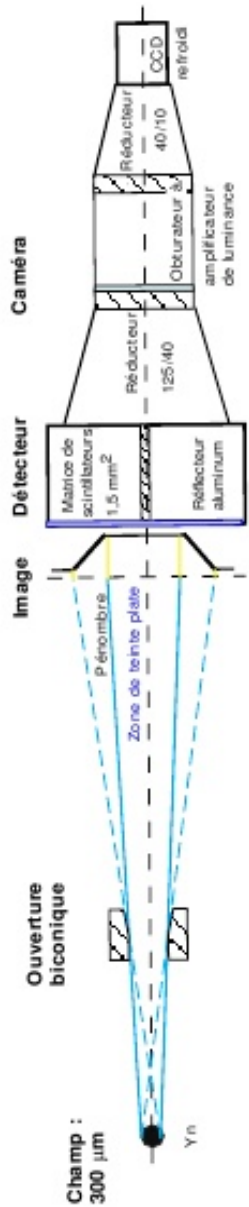
Fusion (qq 0,01 ns)
 $T = 10\text{-}50 \text{ MK}$
 $\rho = 1\text{-}10 \text{ g/cm}^3 ; 10^7\text{-}10^{10} \text{ n}$

Gain = énergie restituée / énergie laser



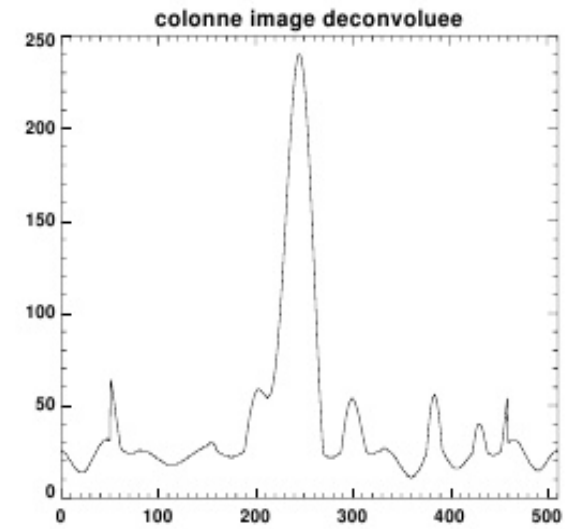
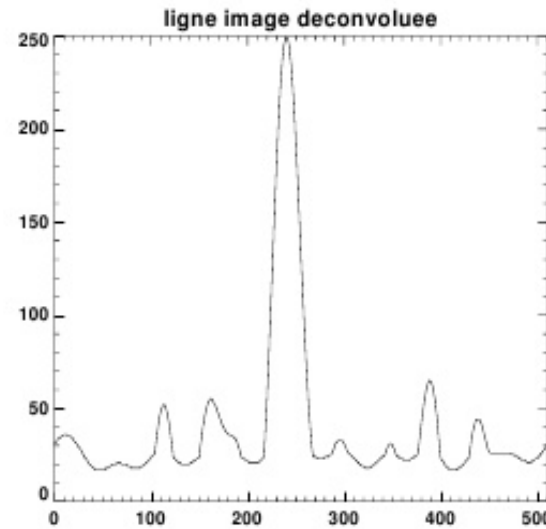
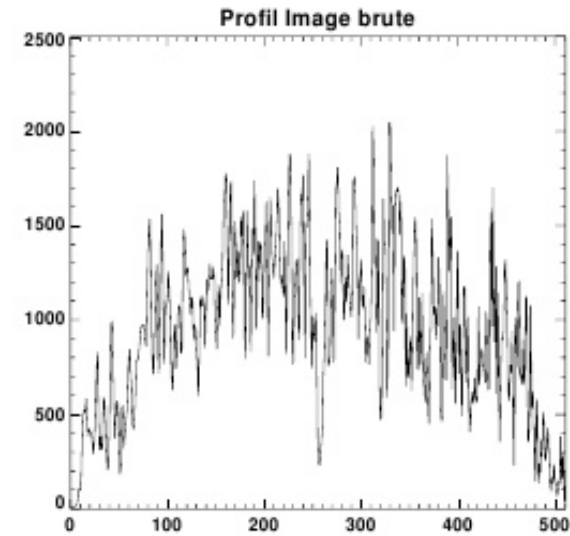
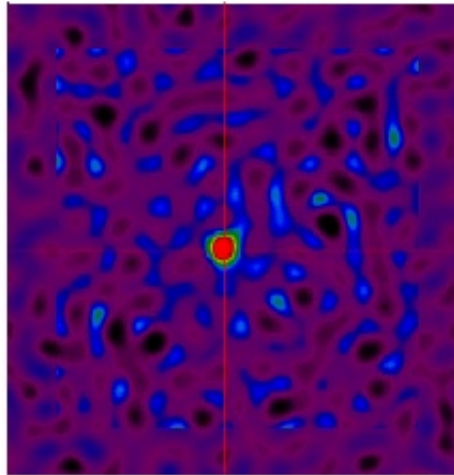
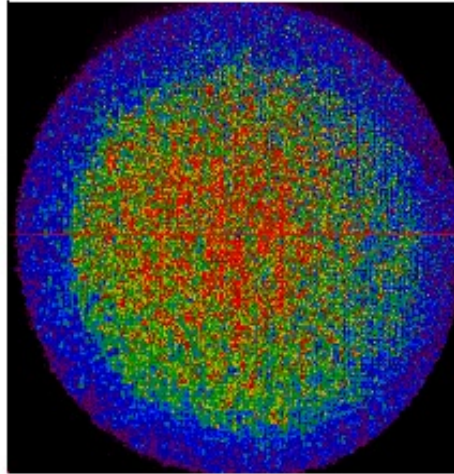
**Avec les lasers du futur
le gain passe de 0,00001 à 10 ?**

Imagerie neutronique par pénombre



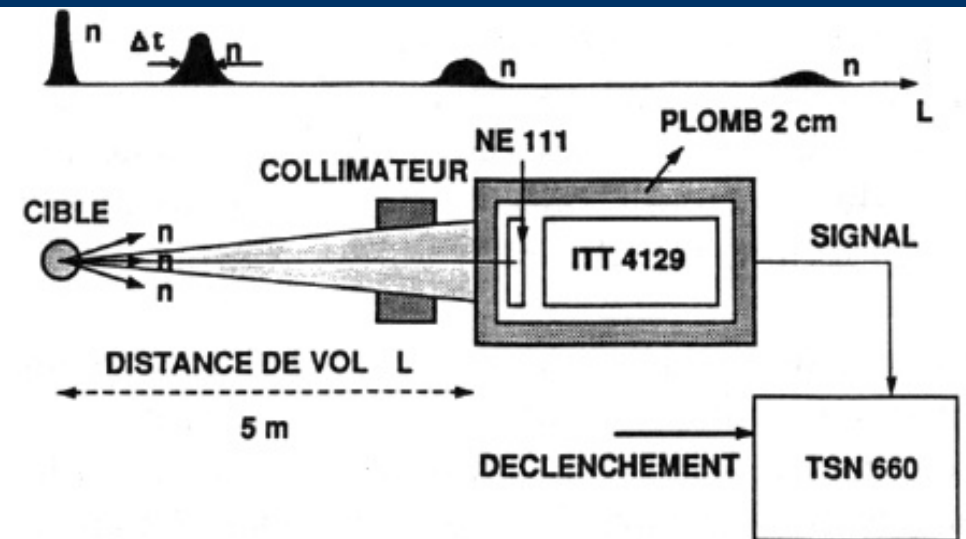
Sensibilité = 3 photo-électrons / neutron incident

Grandissement = 53
Résolution (2 pt) = 56 μm



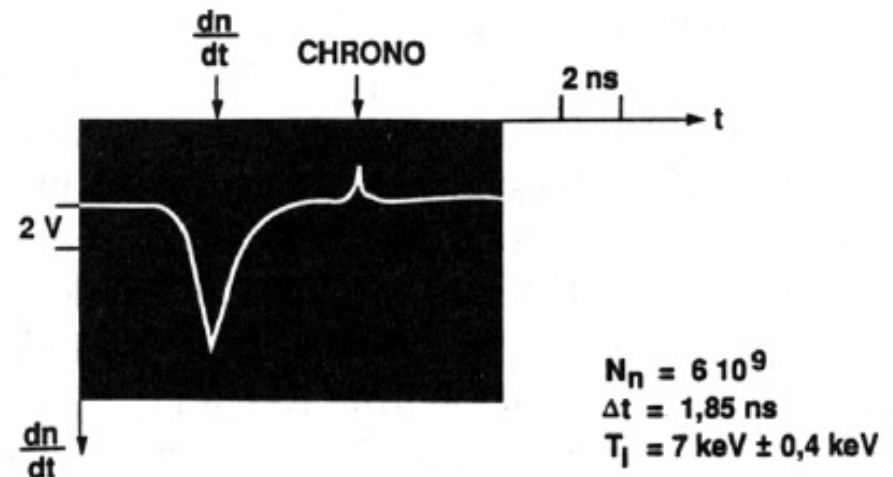
Spectrométrie neutronique

- La température au cœur du plasma est connue par la dispersion Doppler de particules s'en échappant.
- Pour les neutrons de 14 MeV, la transmission de la coquille est dans certaines conditions (CH) suffisamment faible pour mesurer la température ionique à partir de l'élargissement spectral des neutrons émis (mesure par temps de vol).
- Sur l'exemple ci-contre, le signal enregistré sur oscilloscope donne : $\Delta t = 1,85 \text{ ns}$ pour $N = 6,2 \cdot 10^9$
on démontre (pour le deutérium-tritium) : $\Delta E = 177 (T_i)^{1/2}$
- Une amélioration de la précision se fait au moyen d'un spectromètre numérique ≈ 1 chaîne de mesure par point du spectre.

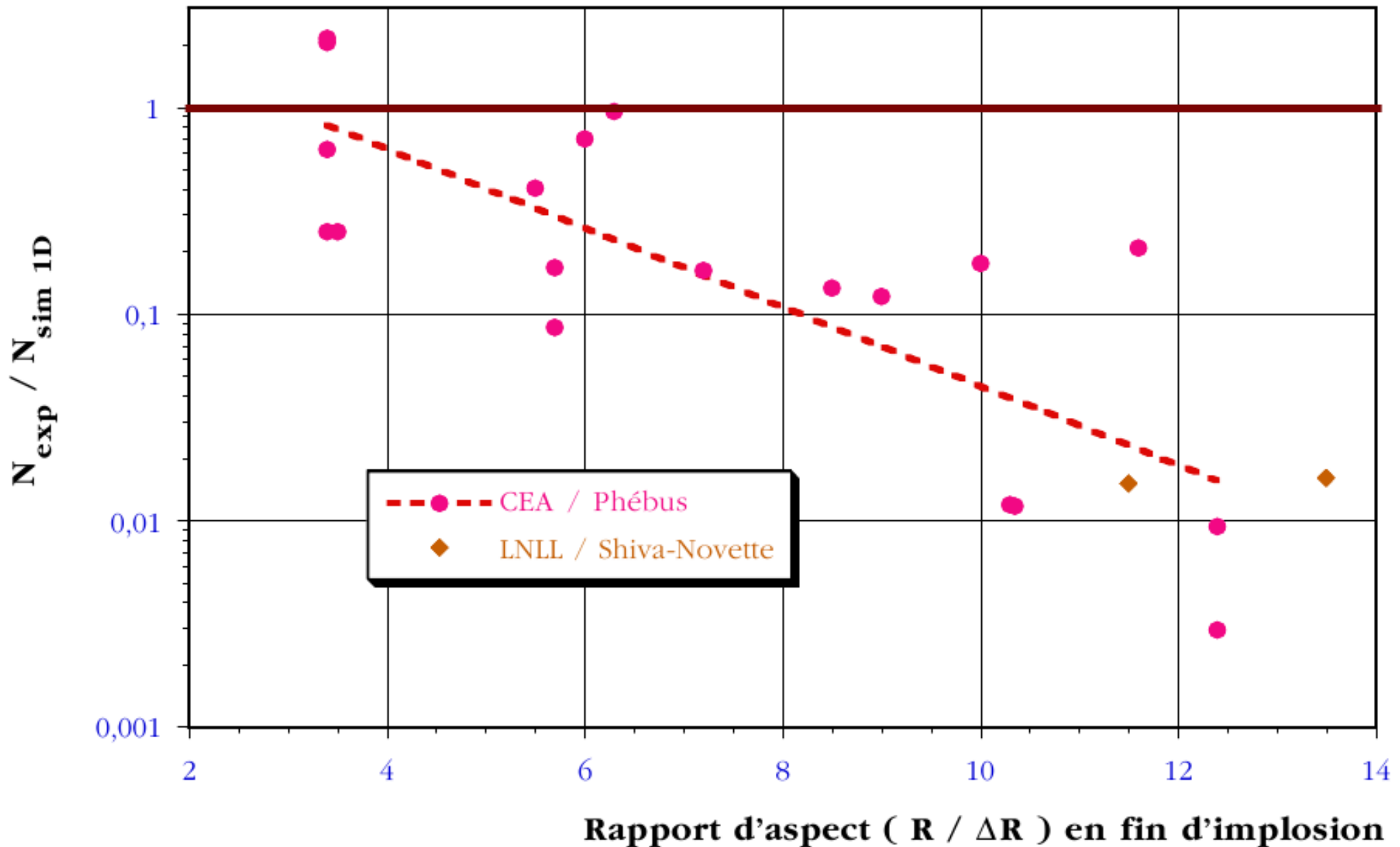


$$\Delta t \text{ (ps)} = 1,21 L \text{ (cm)} \sqrt{T_i \text{ (keV)}}$$

$$N_p = \frac{N_n \epsilon S}{4 \pi L^2}$$

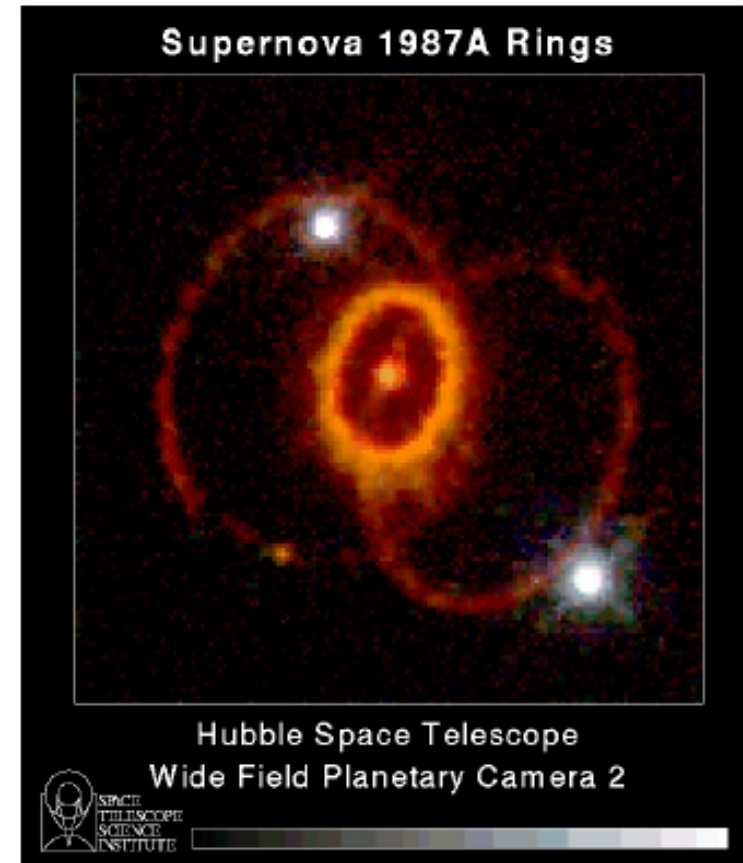
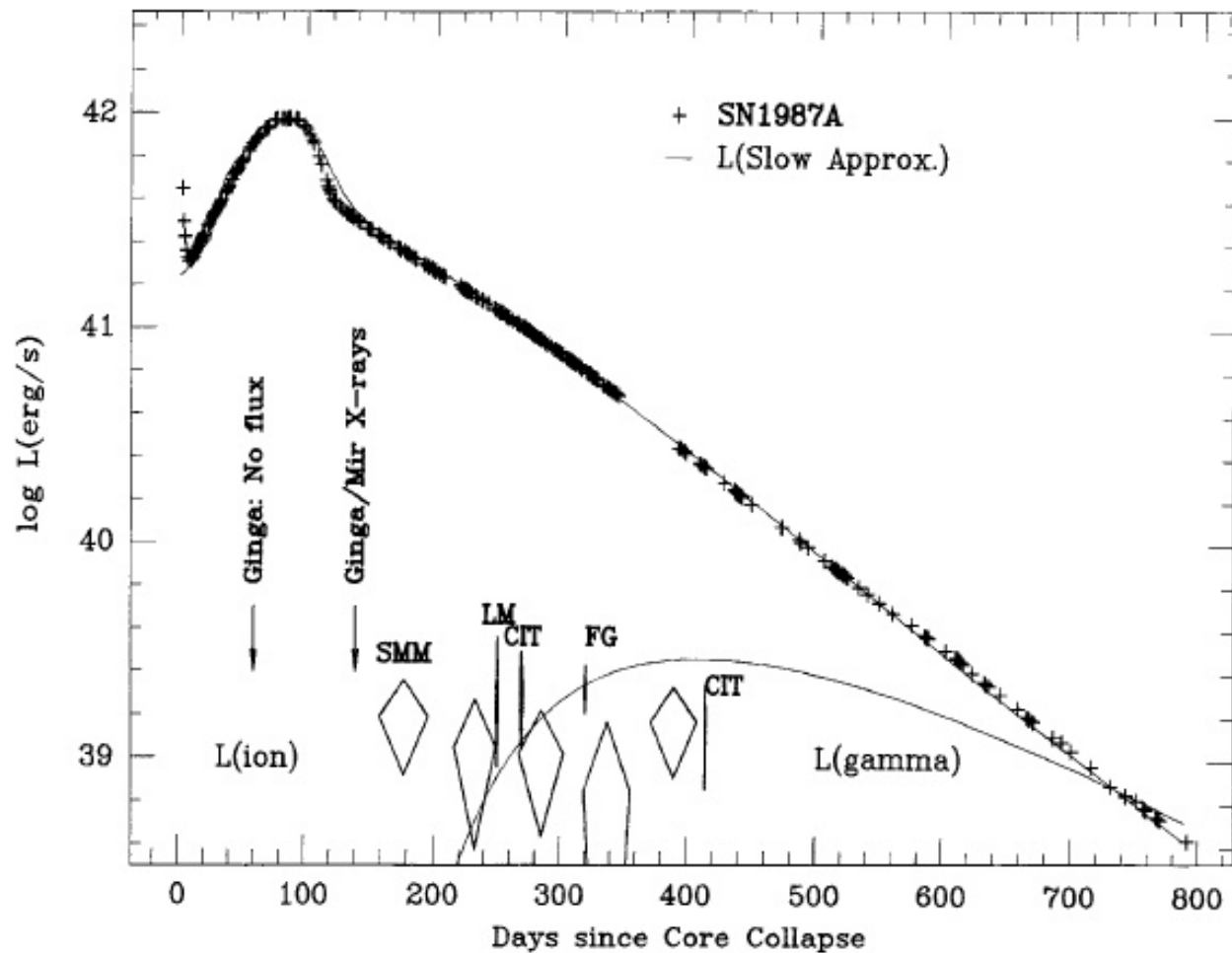


Instabilités hydrodynamiques : peuvent-elles « détruire » l'implosion ?



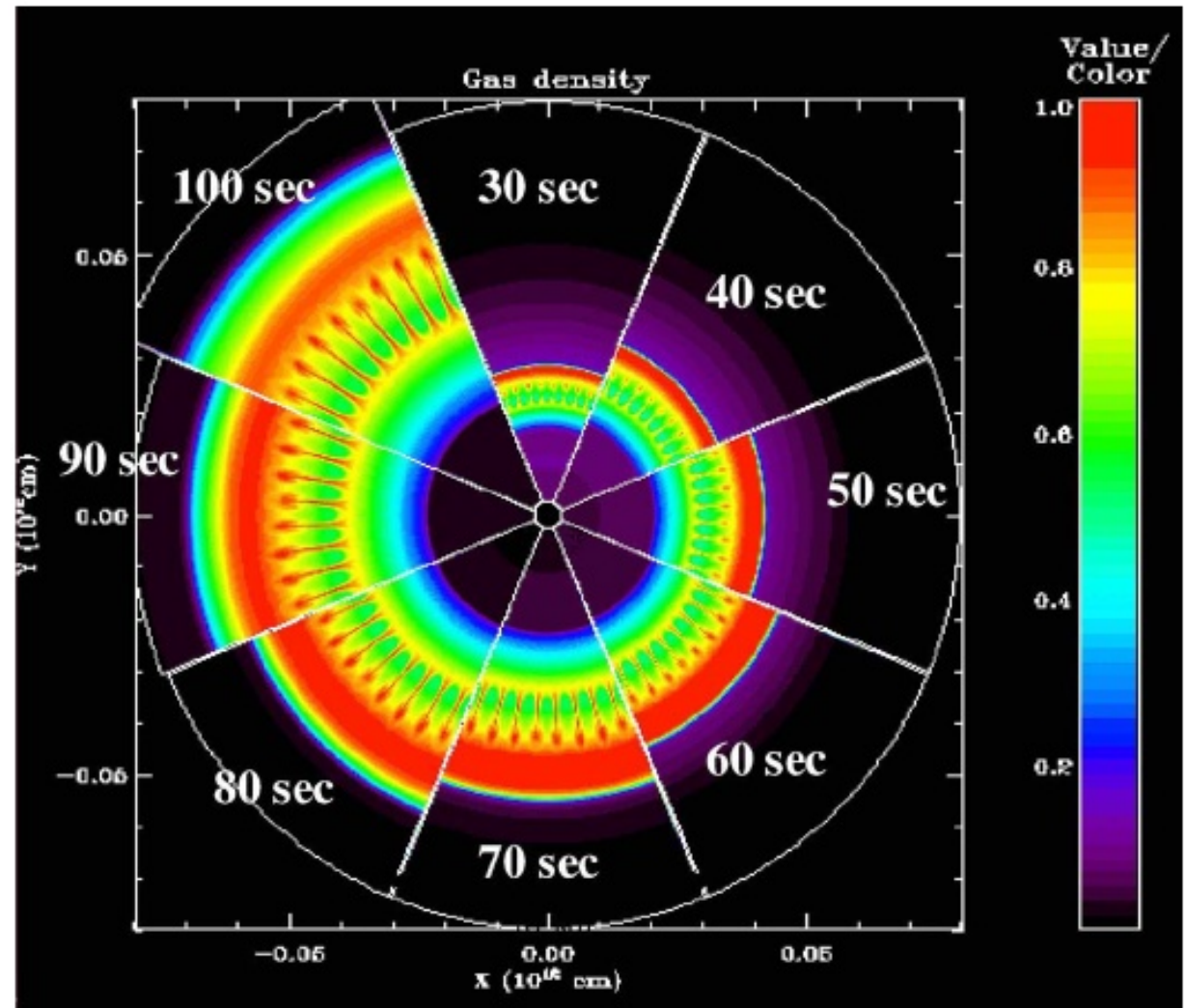
Instabilités hydrodynamiques : comme une supernova...

- La courbe de lumière de la SN-1987-A présente des anomalies par rapport à la théorie en cours

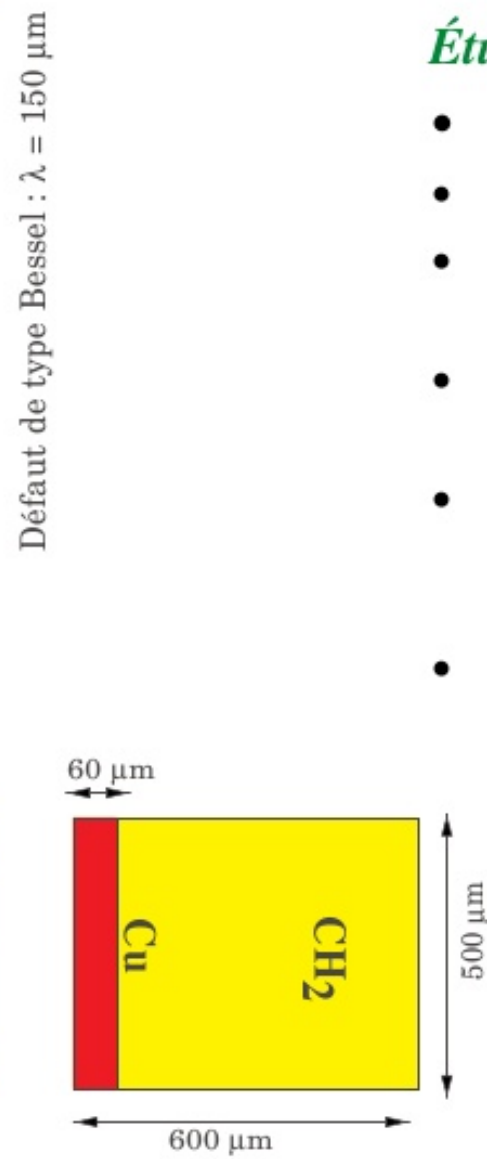
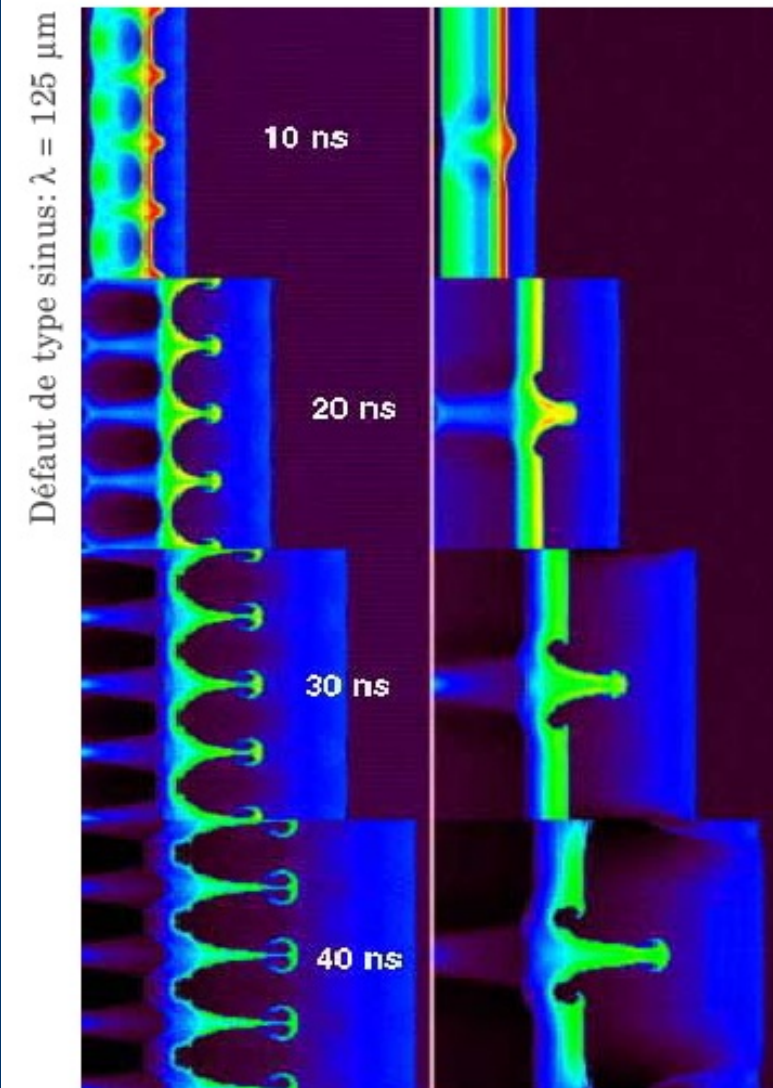


Simuler et interpréter les observations

- Le modèle « en oignon » imagine une stratification en couches de plus en plus « lourdes » vers le centre
- **Hypothèse d'une instabilité** à l'interface entre deux couches profondes pour expliquer la remontée précoce d'une couche centrale
- Développement d'une simulation numérique bidimensionnelle
- Nécessité de valider cette simulation



Trouver une loi d'échelle = transcrire un phénomène physique à l'échelle du laboratoire

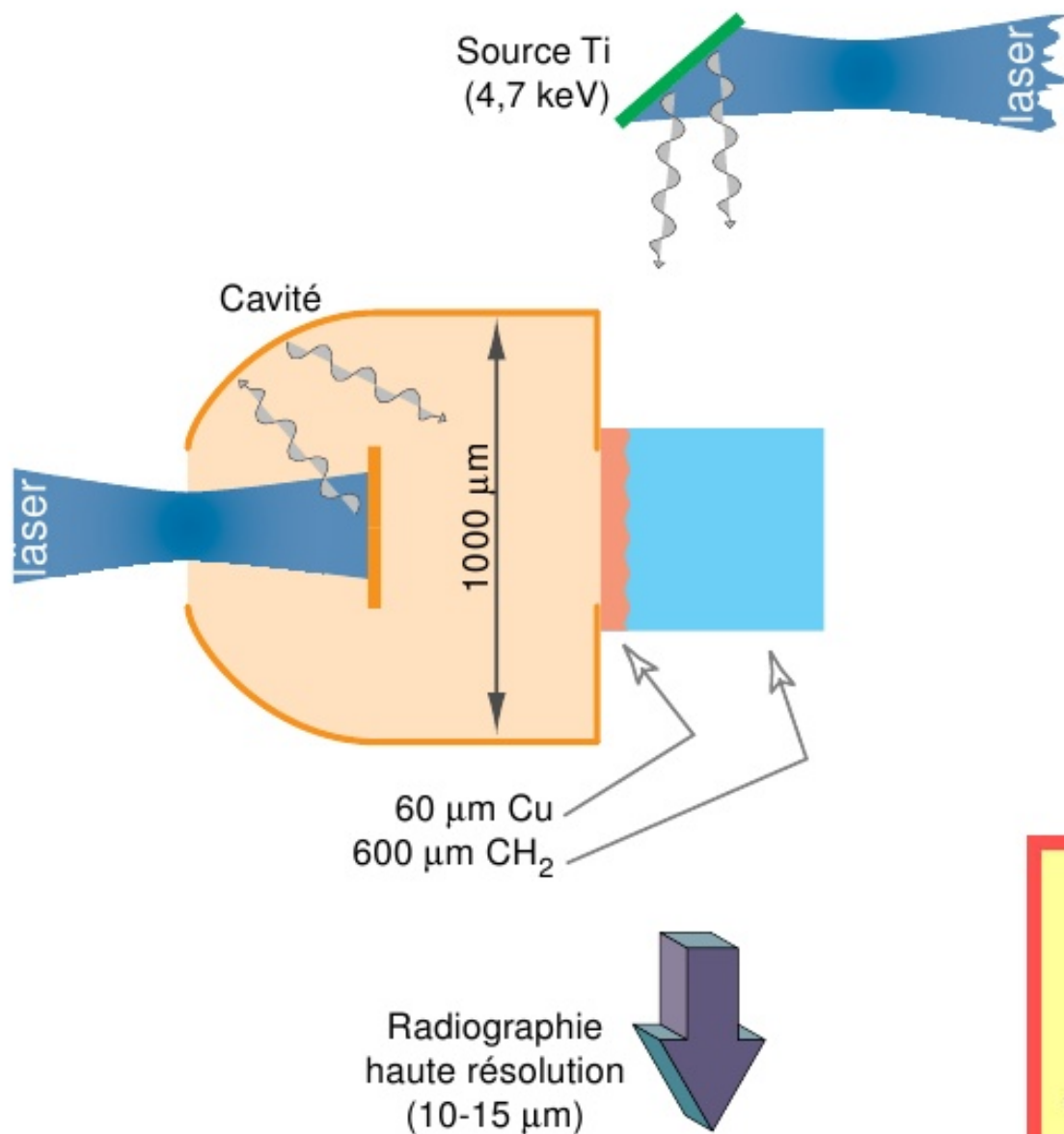


Étudier les instabilités d'interface

- Diviser les grandeurs physiques
- Définir des matériaux réalistes
- Imposer un défaut à l'interface (sinusoïde ou fonction de Bessel)
- Utiliser la même simulation numérique
- En déduire une « observation numérique » : évolution de l'interface à différents instants
- Confronter cette simulation à l'expérience

Grandeurs caractéristiques
distances : $10^{10} \rightarrow 10^{-4} \text{ m}$
vitesse : $3 \cdot 10^6 \rightarrow 10^4 \text{ m/s}$
accélération : $10^3 \rightarrow 5 \cdot 10^{11} \text{ m/s}^2$

Expérience de « simulation » astrophysique : schéma de principe

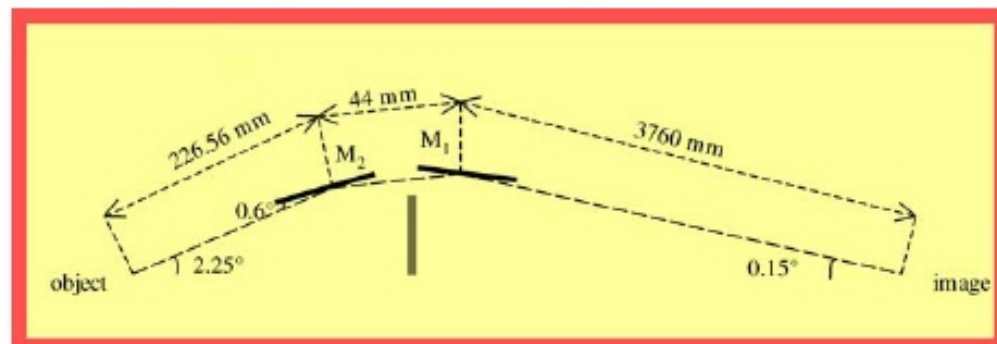


Création d'une onde de choc traversant l'interface entre deux matériaux de densités différentes (cuivre et plastique).

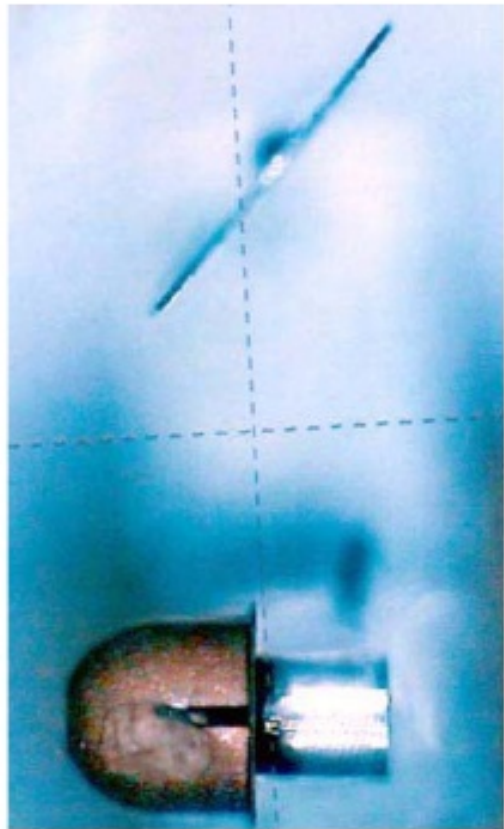
Par construction, l'interface est affectée d'un défaut de géométrie.

L'observation et interprétation de la croissance du défaut doit valider la simulation numérique.

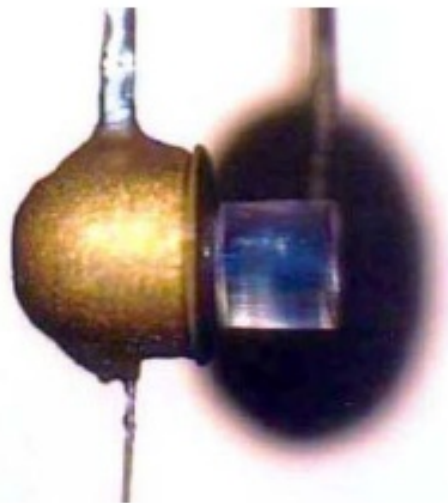
Un microscope de Wolter sert à "photographier" l'interface pendant son évolution (le cuivre est opaque, le plastique semi-transparent).



Du principe à la réalité....



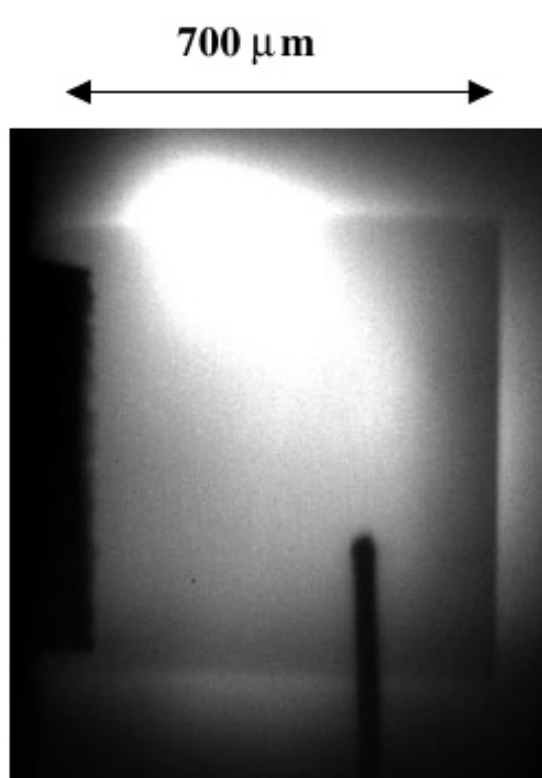
3 mm



3 mm

L'observation de l'évolution de l'interface perturbée permet de valider (ou d'amender) la théorie

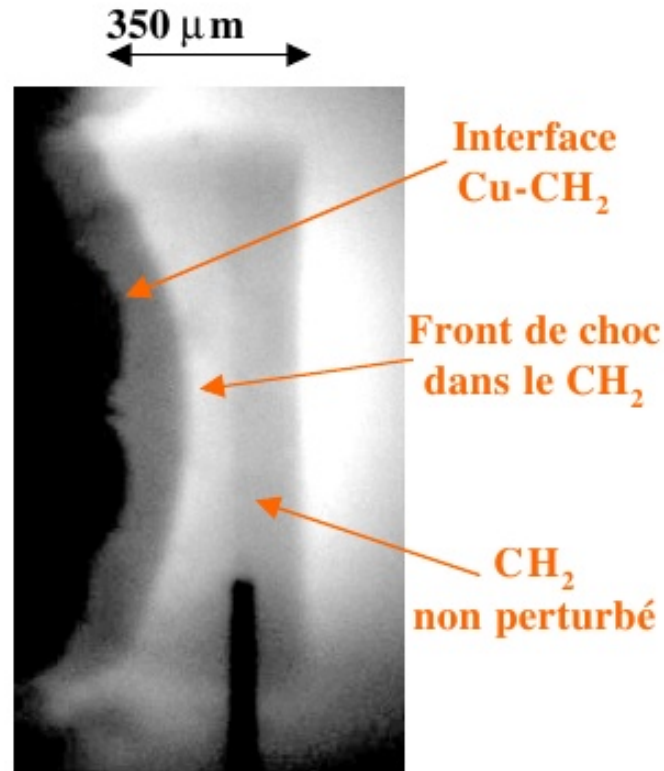
Radiographies à 5 keV



SANS CHOC

$t = 0$

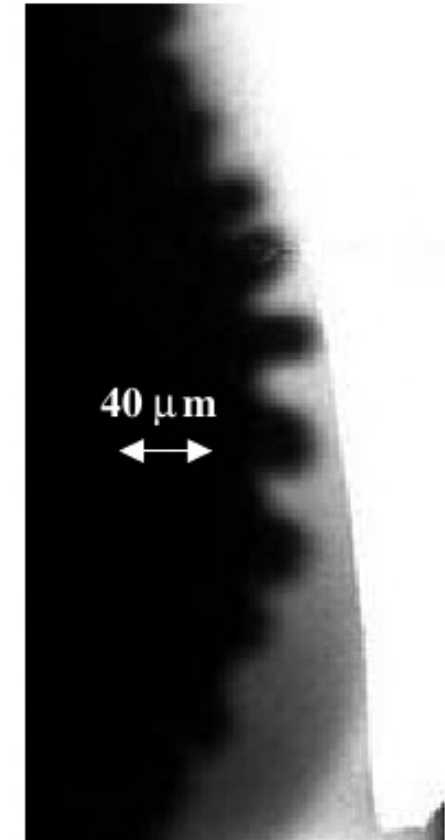
Résolution spatiale : 10 μm



AVEC CHOC

$t = 30$ ns

Perturbation initiale :
 $\lambda = 125$ μm ; $a = 12,5$ μm



DÉTAIL DE L'INTERFACE Cu-CH₂

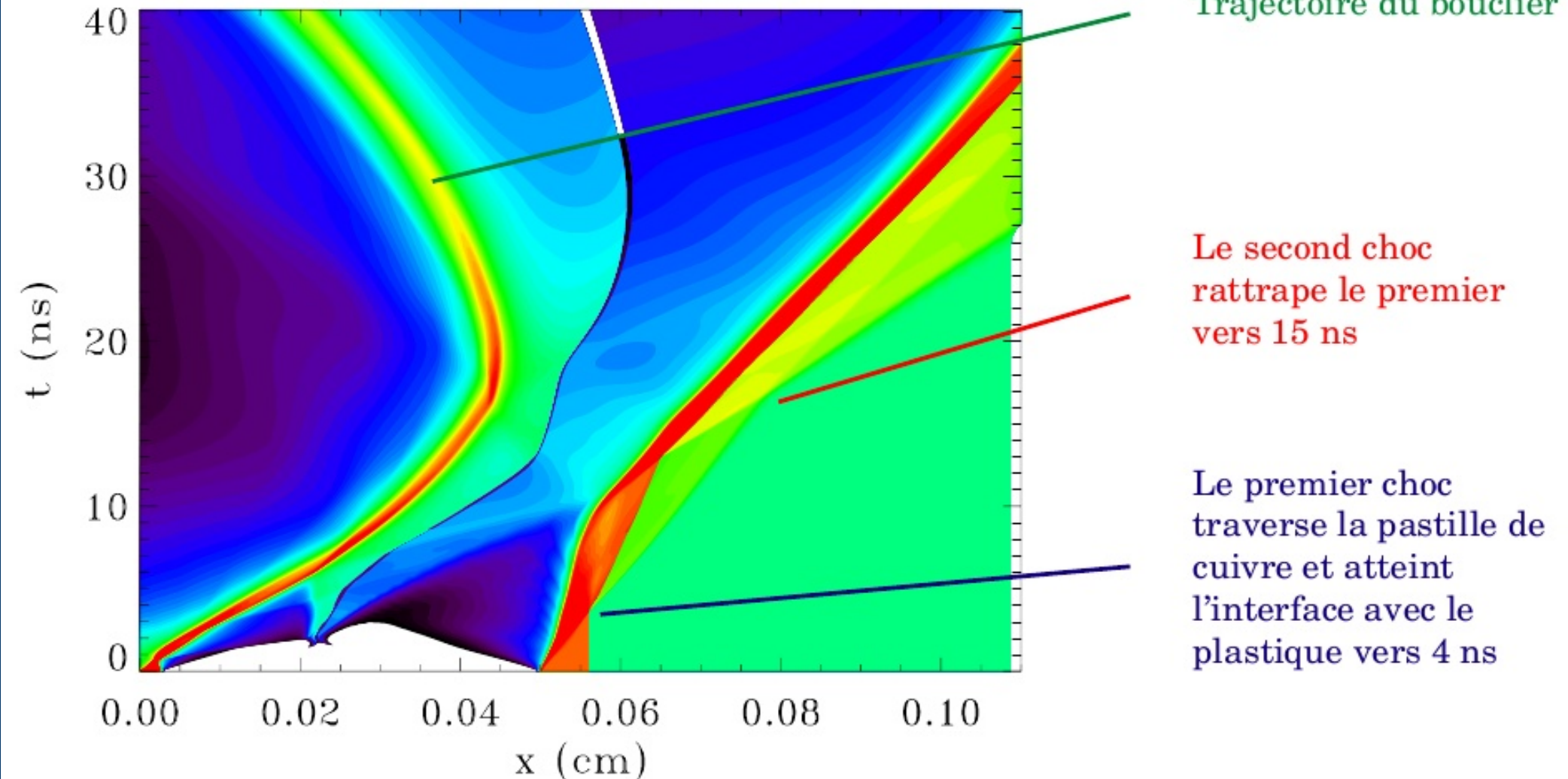
Régime de croissance non-linéaire

$t = 30$ ns

Perturbation initiale :
 $\lambda = 30$ μm ; $a = 3$ μm

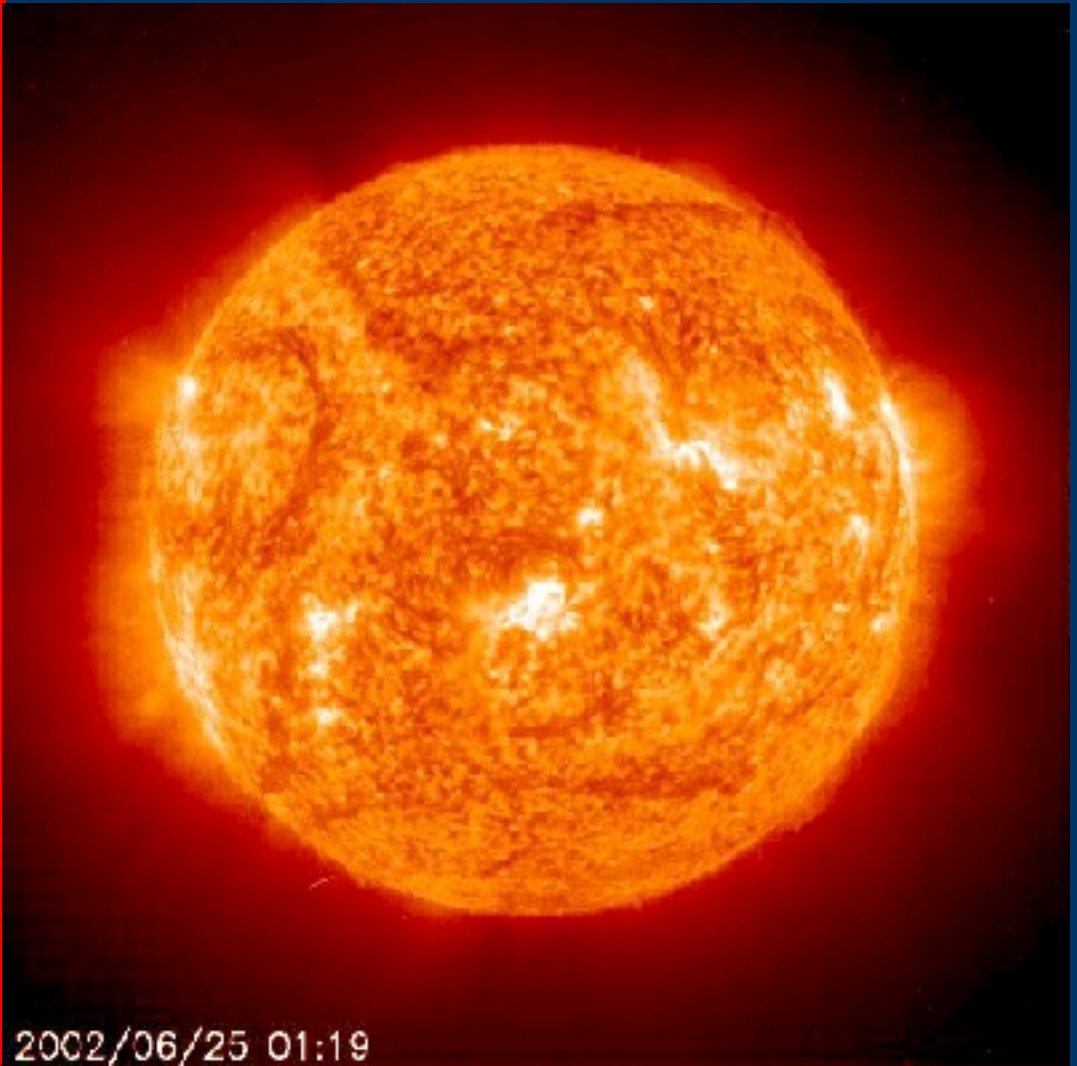
Une simulation 1D montre que la configuration avec un axe commun pour le laser et la propagation présente un effet annexe qui « tue » le développement de l'instabilité

Density evolution, run=AuCuCH2



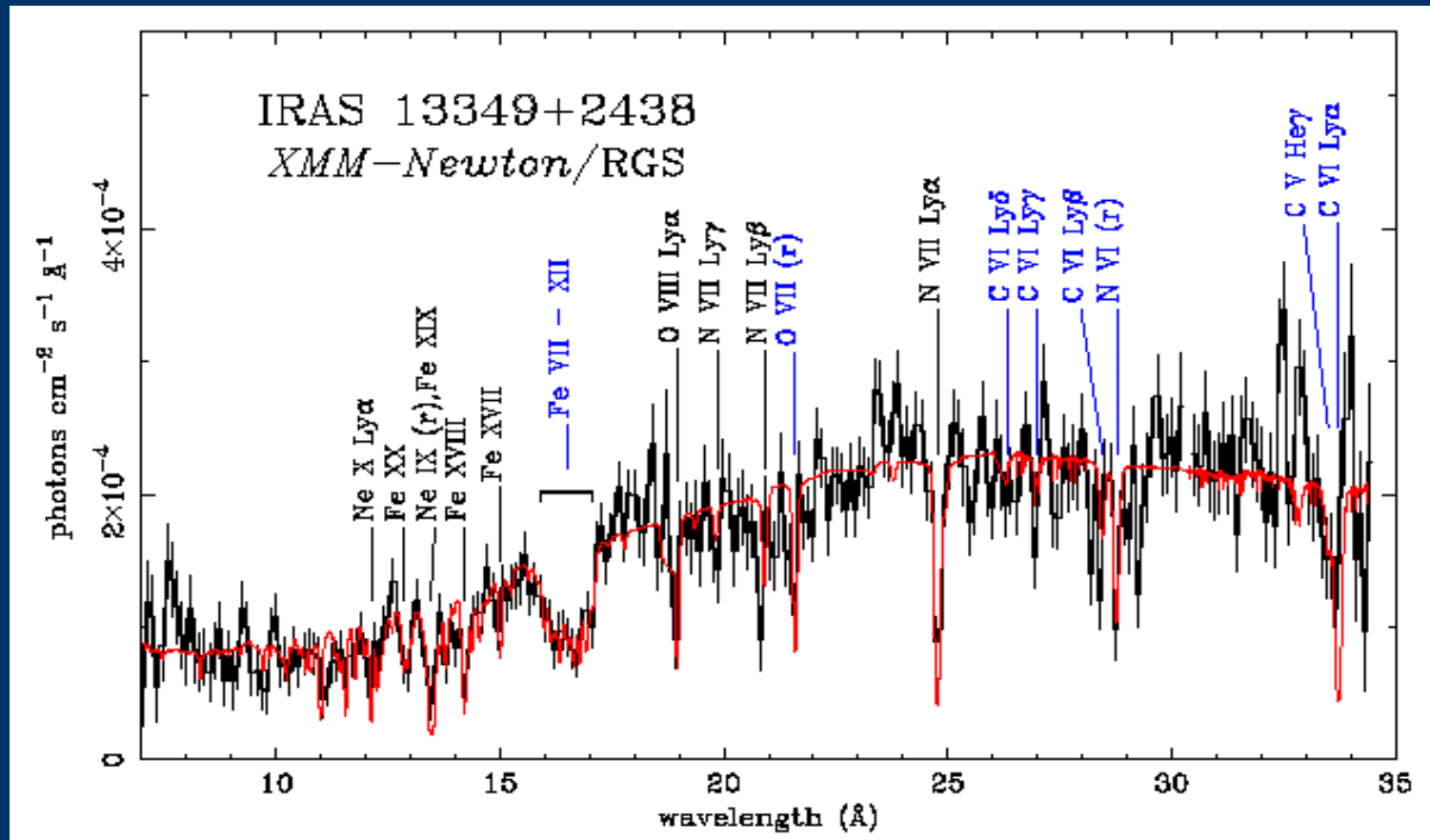
Motivation, calcul et mesure de la photoabsorption

- **Le fer** est un élément important qui régit le transfert de rayonnement à l'intérieur **du Soleil**, même s'il ne représente que quelques 10^{-4} .
- En utilisant des coefficients d'absorption « améliorés », différents problèmes ont été éclaircis, comme la **pulsation des céphéïdes**, ou les **oscillations du Soleil**.
- Étudiée en laboratoire, une structure d'absorption du fer, a été identifiée dans un **quasar**.



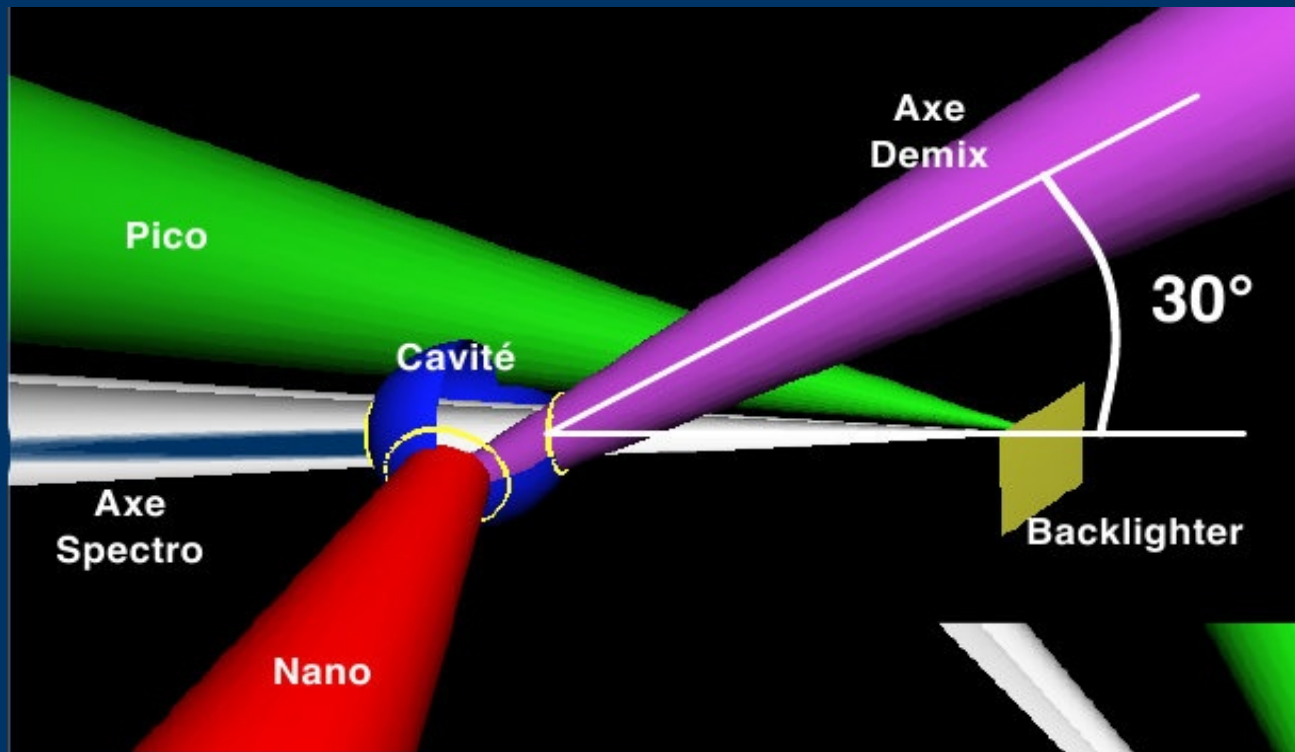
2002/06/25 01:19

L'absorption du fer mesurée dans un plasma laser identifiée dans un spectre astrophysique



M. Sako et al, *Astronom. Astrophys.* 365L, 168 (2001)

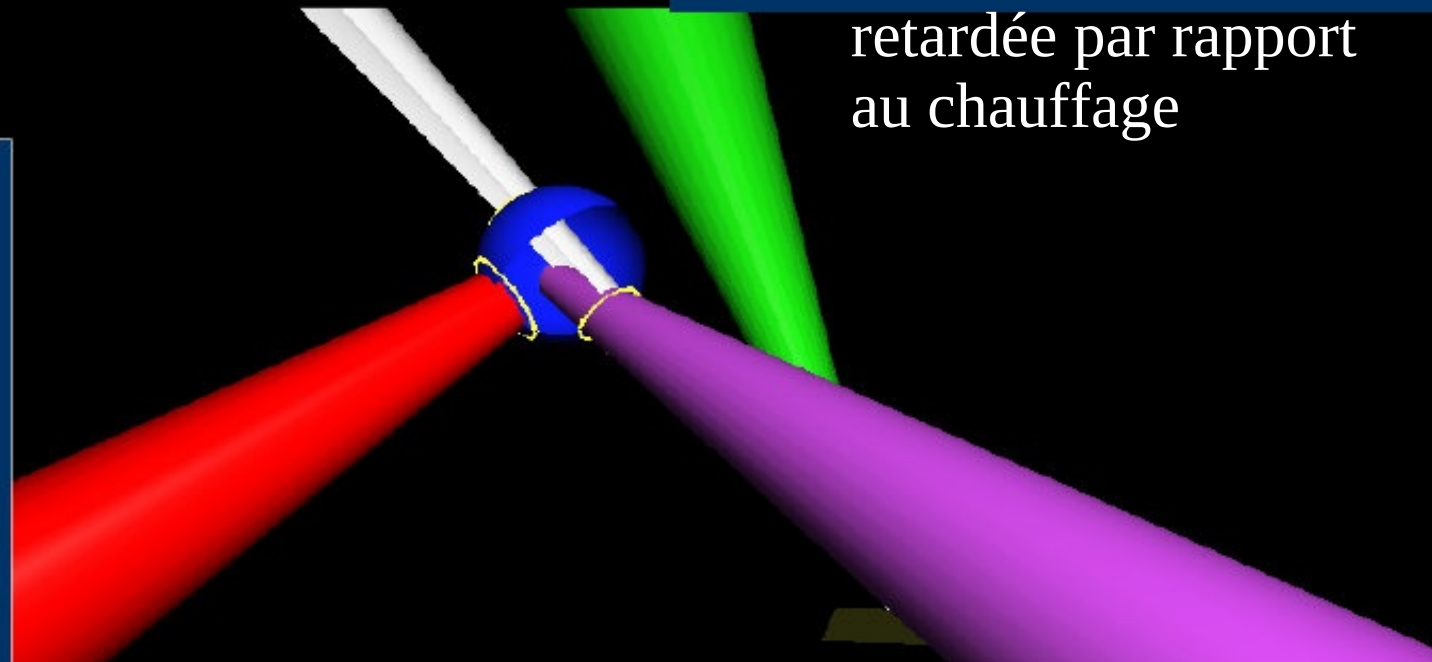
Principe des mesures d'opacités en cavité



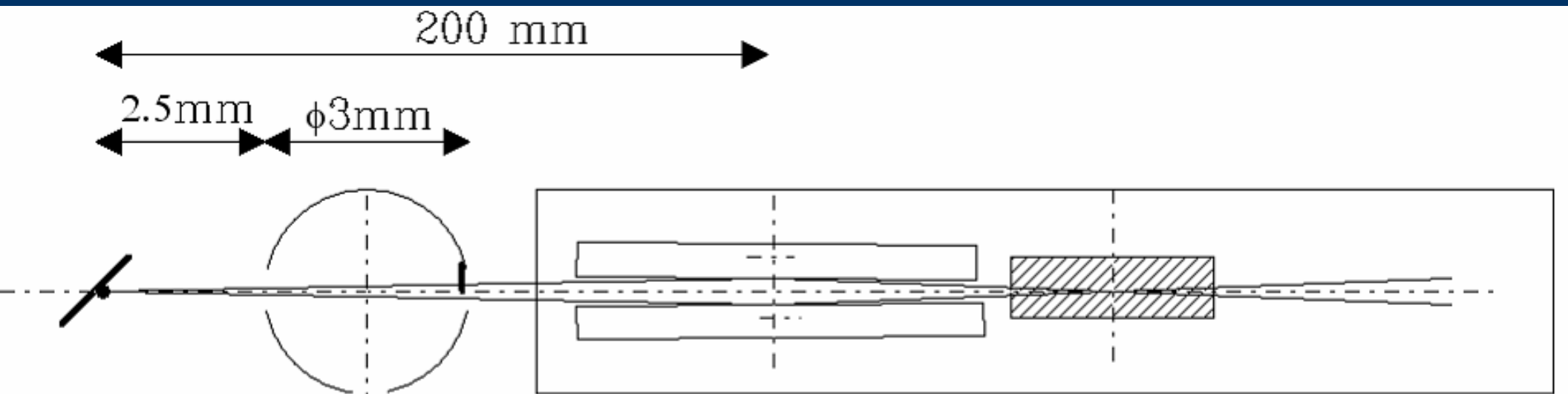
Évolution hydrodynamique de l'échantillon suivie par simulations

==>

la radiographie est retardée par rapport au chauffage



Spectromètre X dur à deux voies indépendantes



échantillon:
écart axe = 0.1
largeur = $82.5\mu\text{m}$ +
diamètre source

angle incidence miroir = 1.5°

écart miroirs 6.98 mm

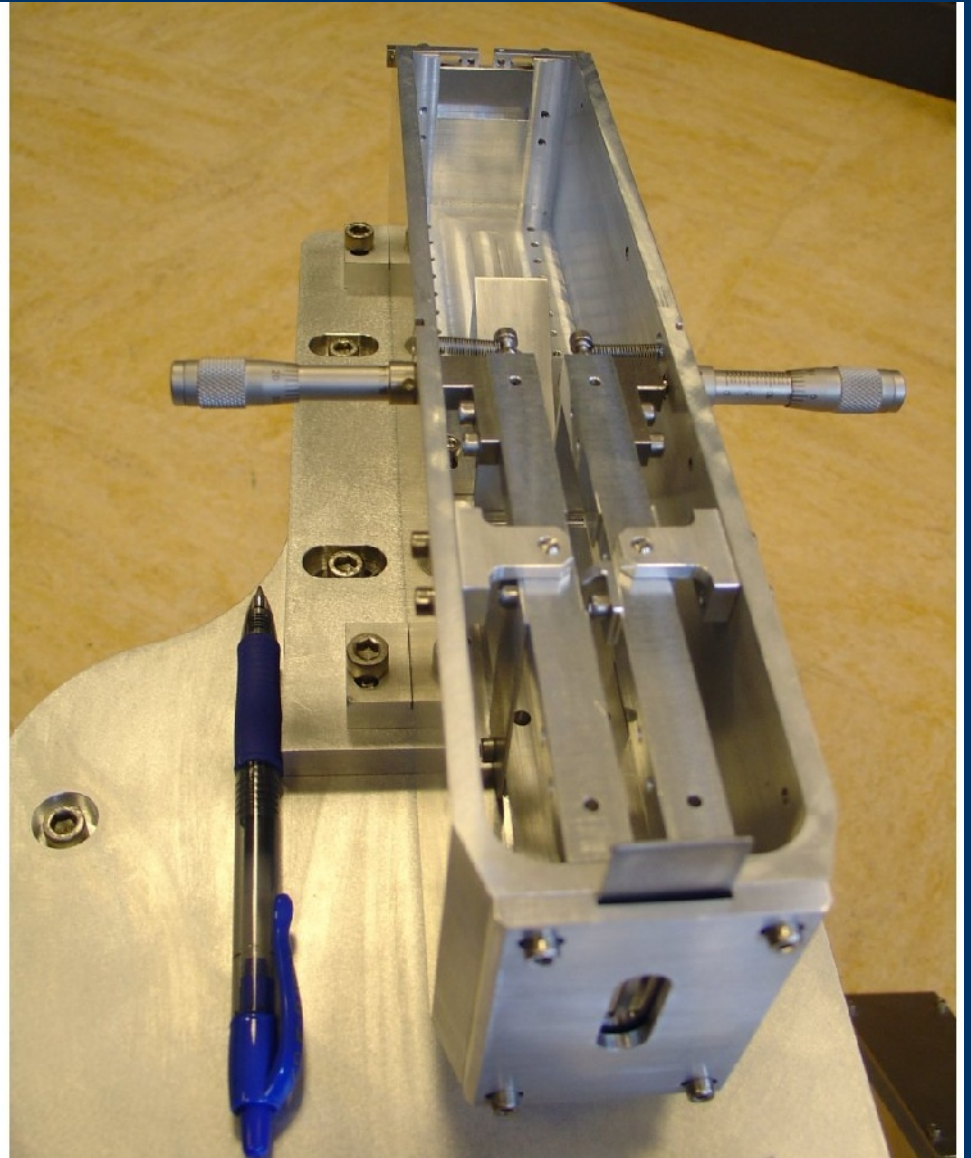
angle miroir -0.5°

écart images 9 mm

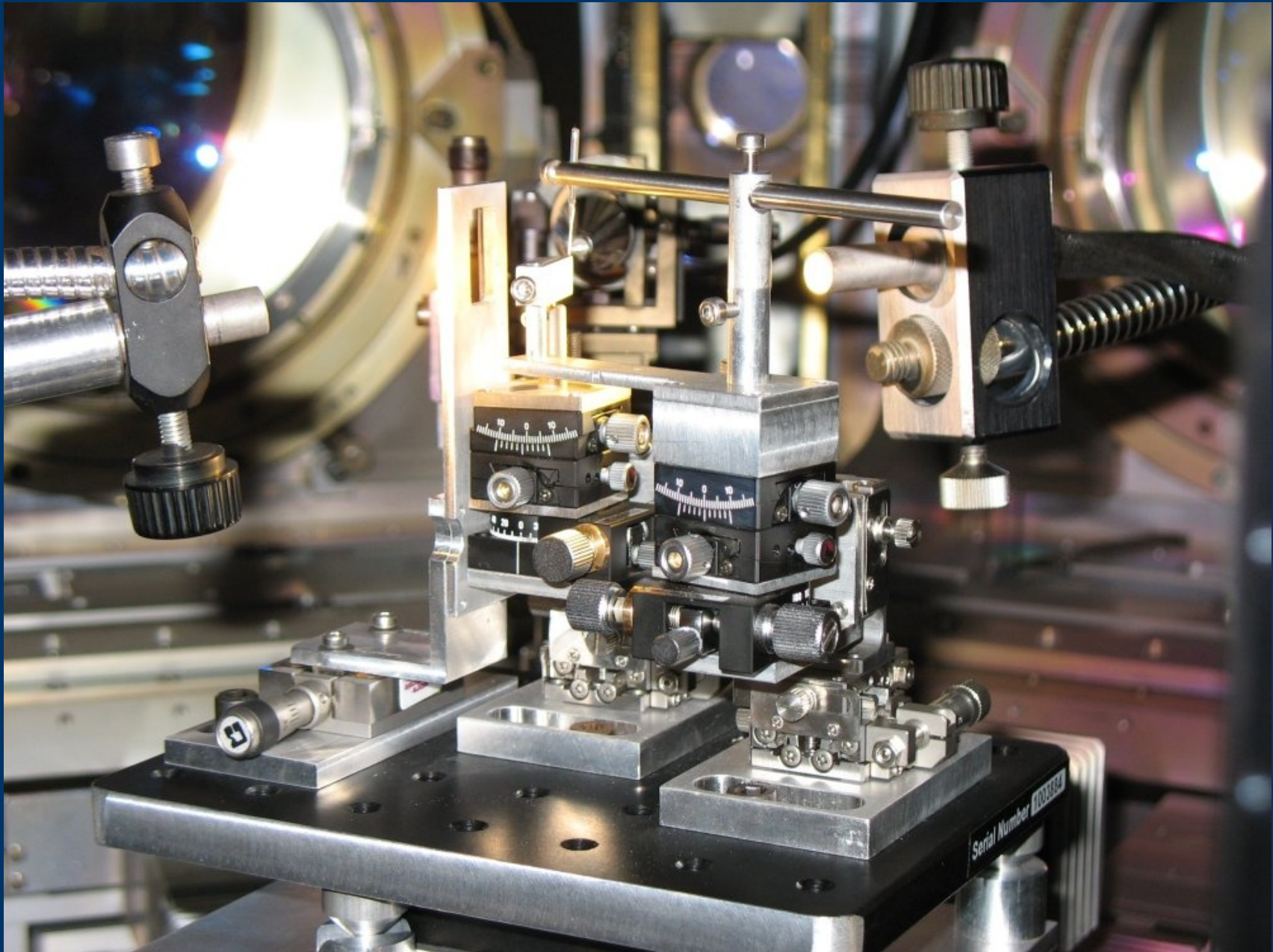
rayon incident $+1^\circ$

rayon réfléchi -2°

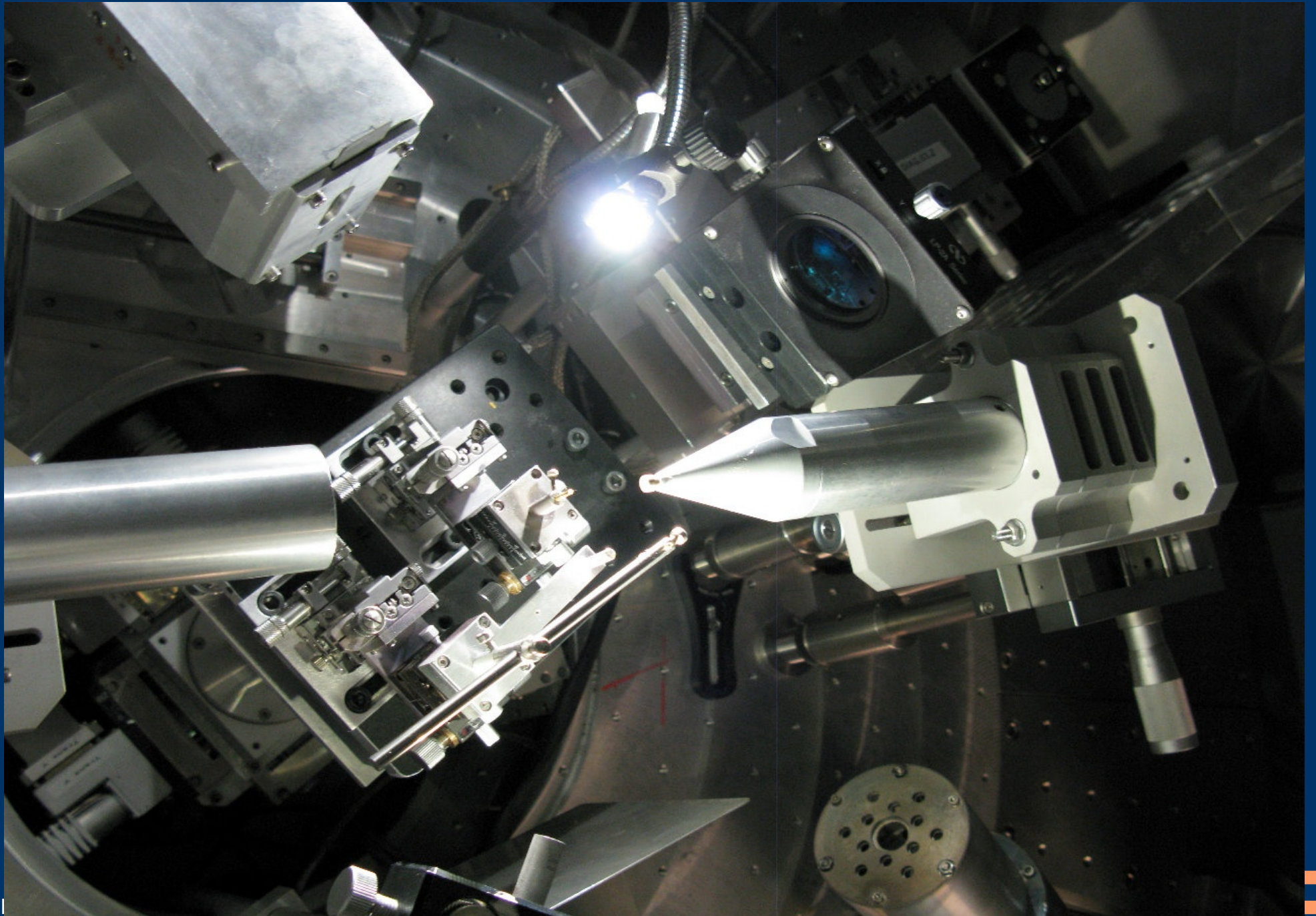
Spectromètre X dur à deux voies indépendantes



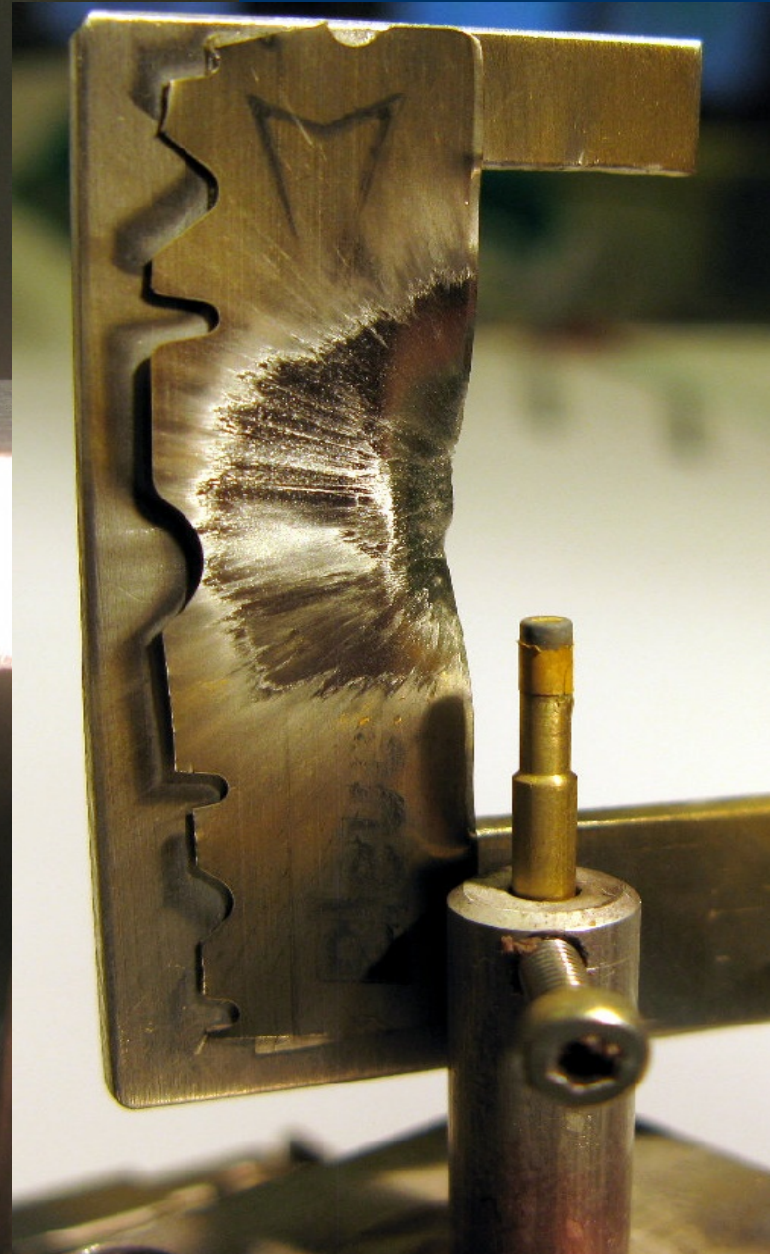
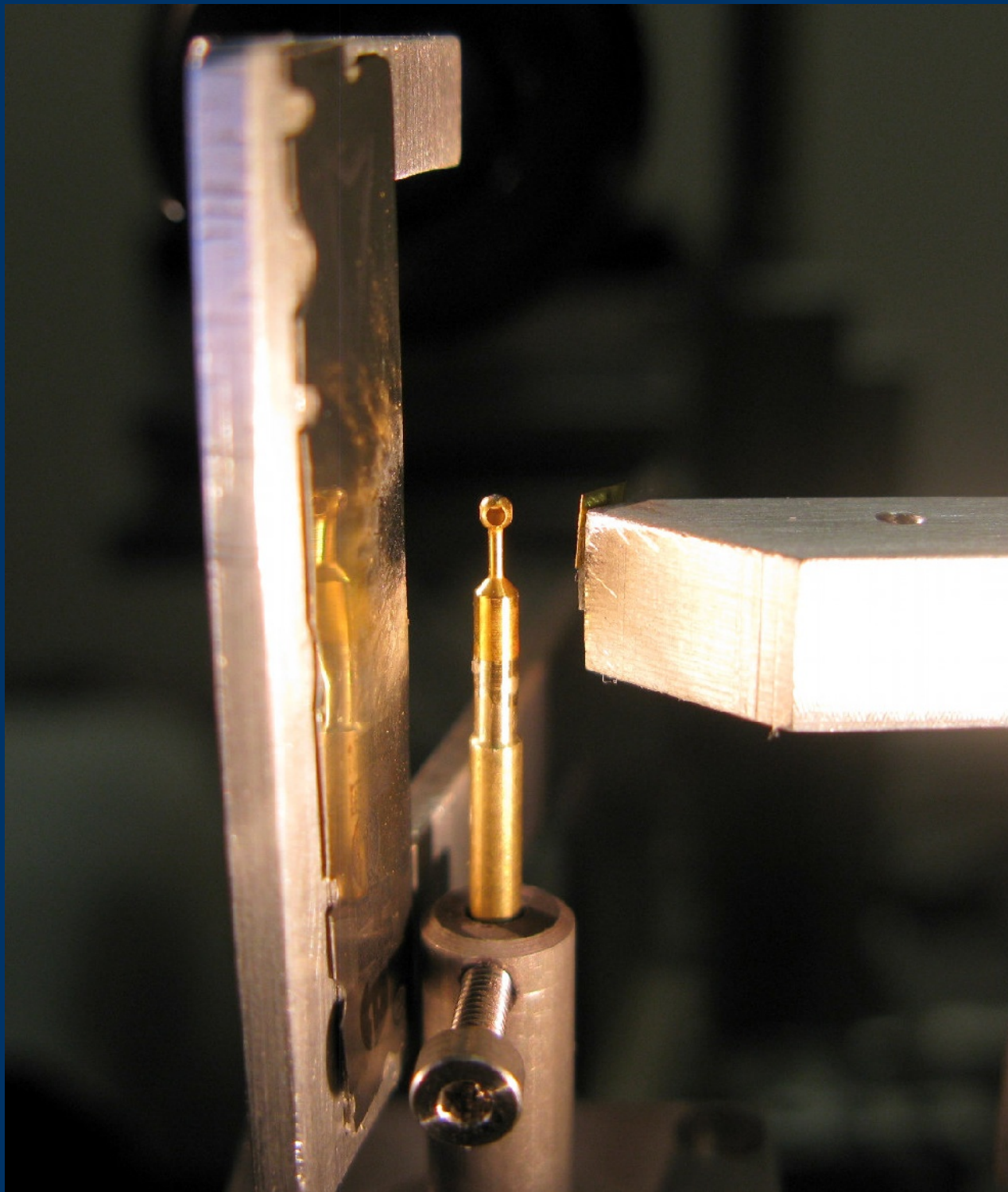
Mise en place de la cible : alignement



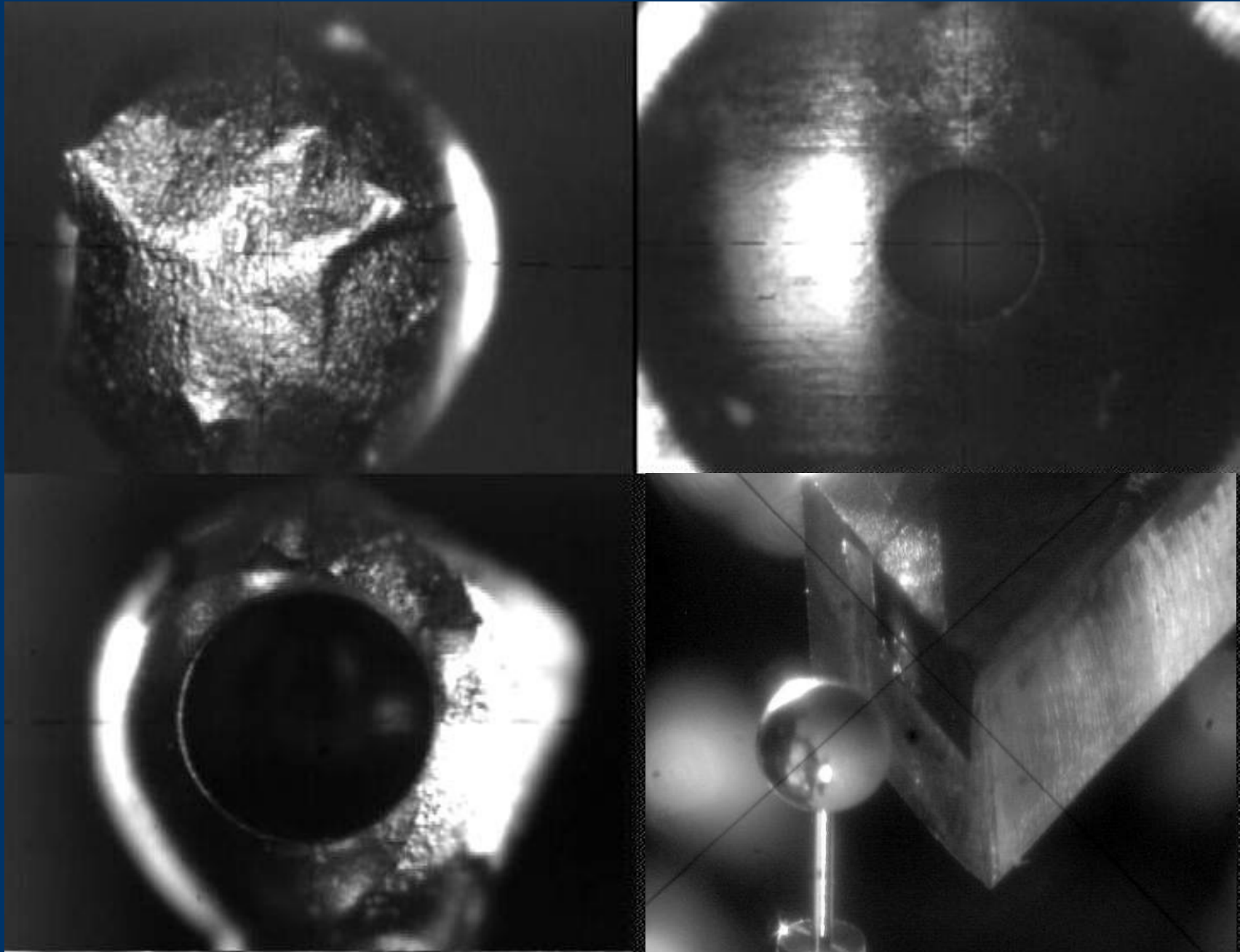
Vue d'ensemble



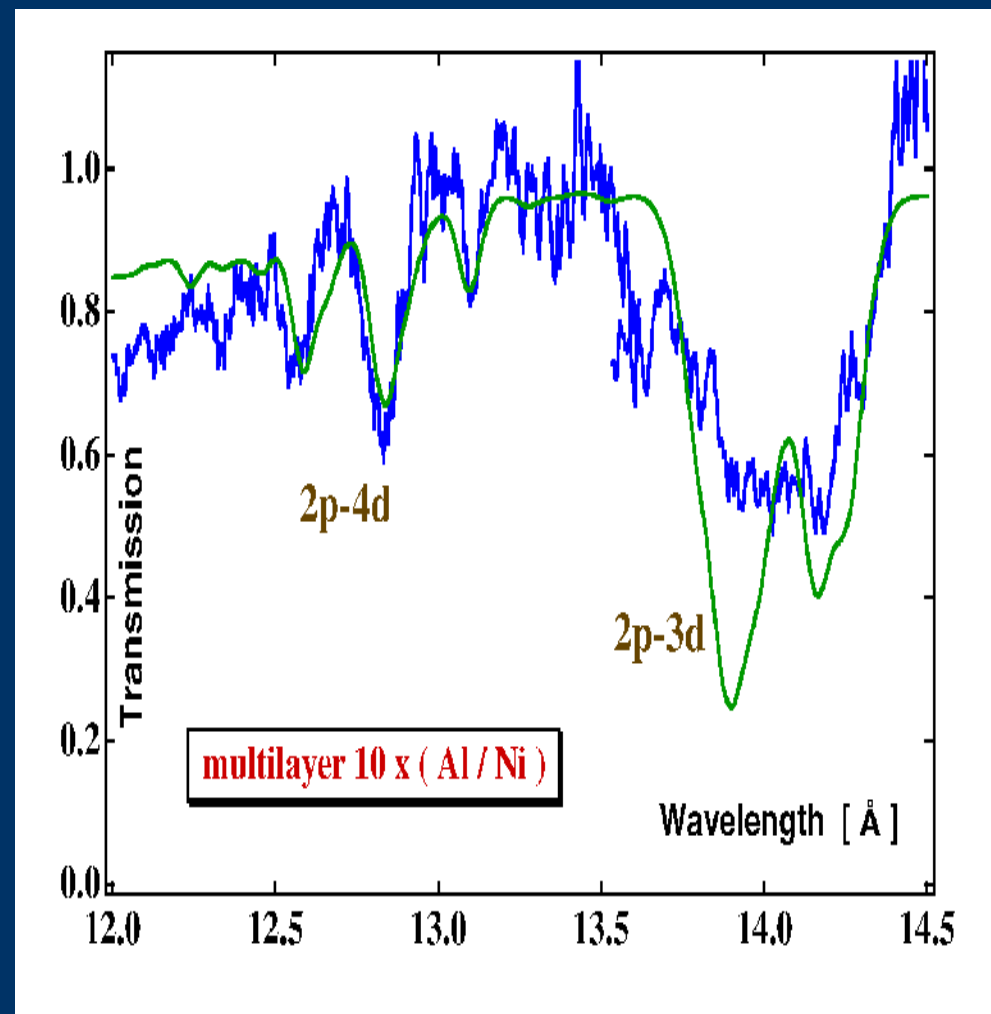
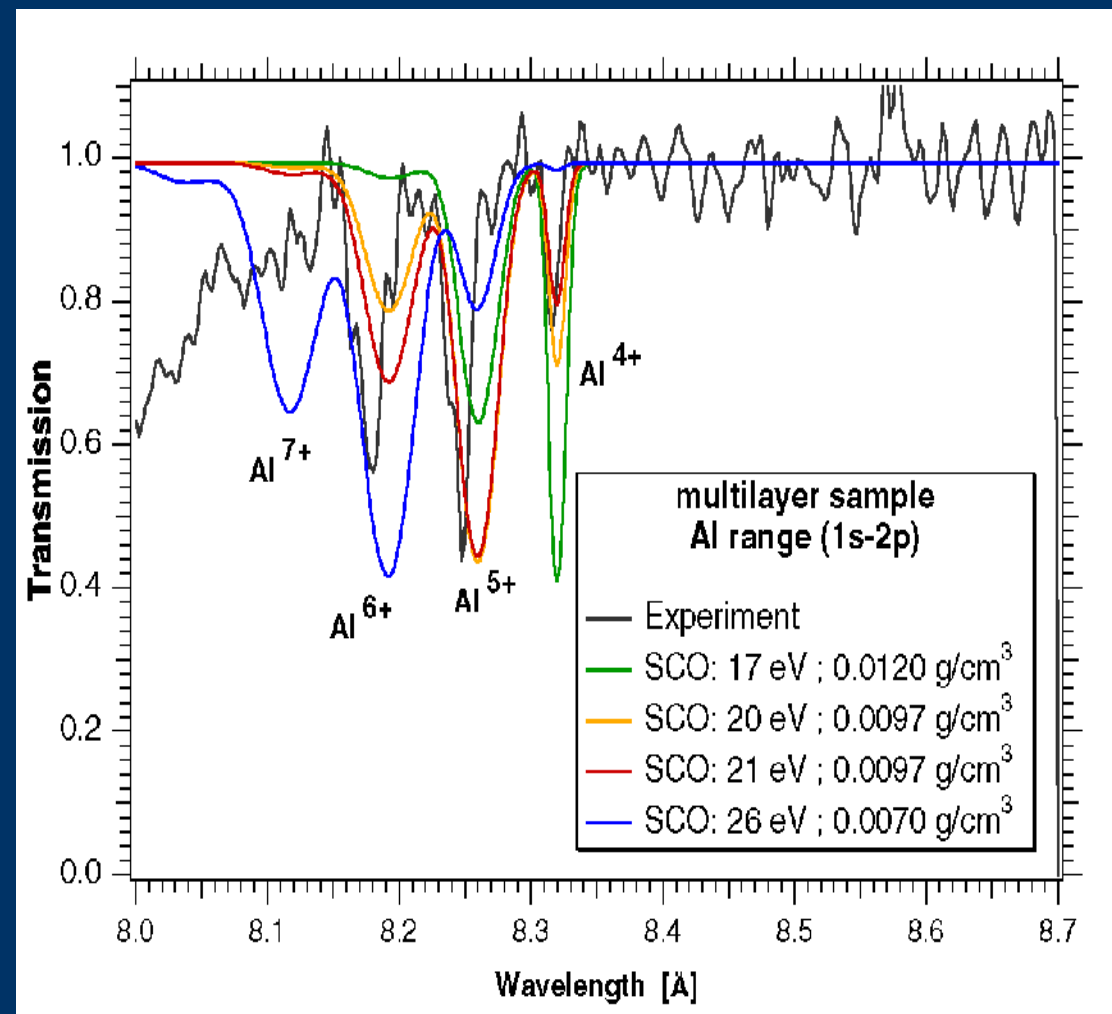
*Cible en place
avant et... après tir*



Cible suivant trois axes de visée microscopiques



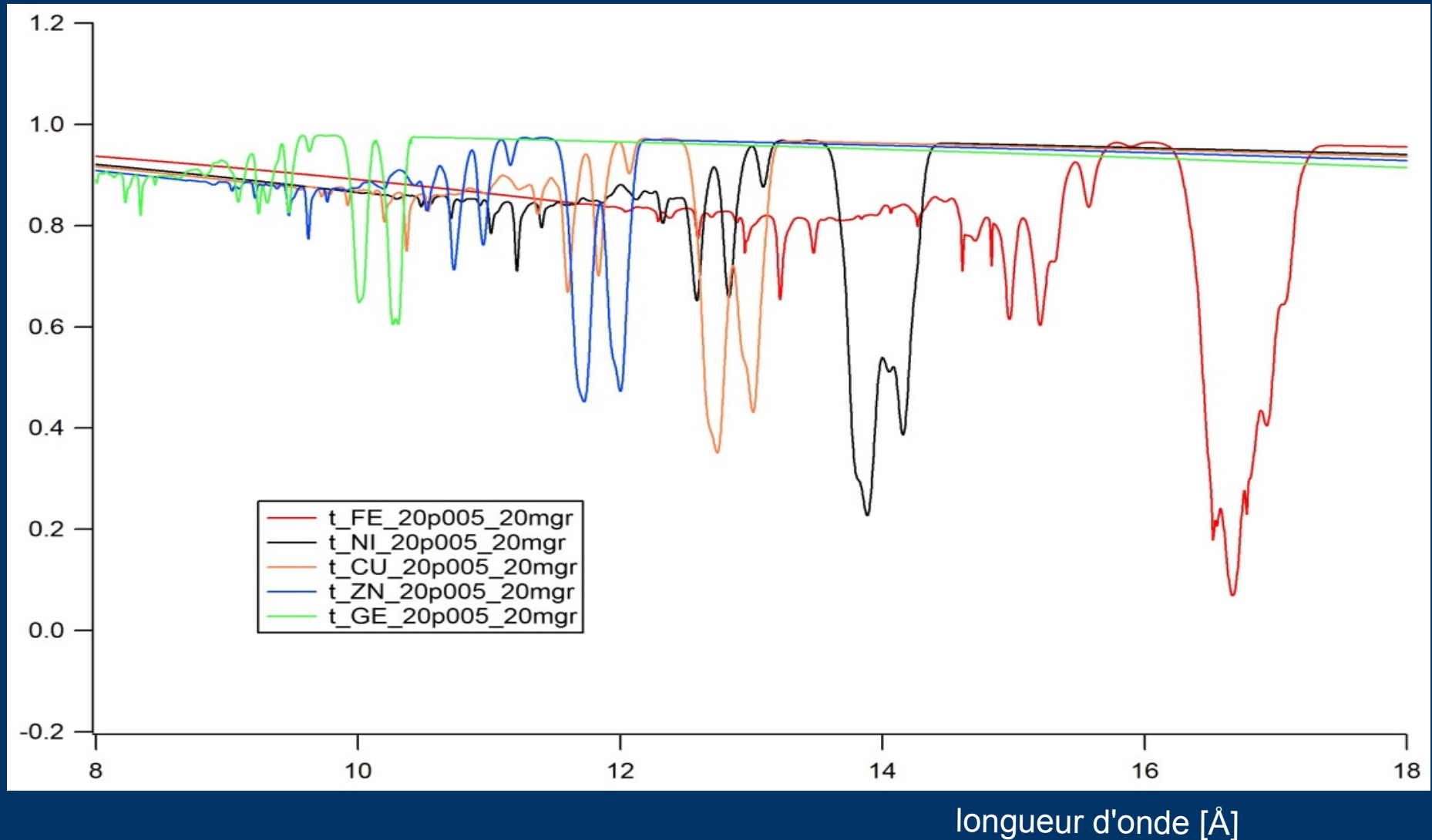
*Rappel des expériences précédentes sur LULI-6F :
l'aluminium comme thermomètre
le nickel, voisin du fer, pour tester les $\langle Z \rangle$ moyens*



Campagne LULI 2008

Transmission des plasmas des métaux Fe, Ni, Cu, Zn, Ge

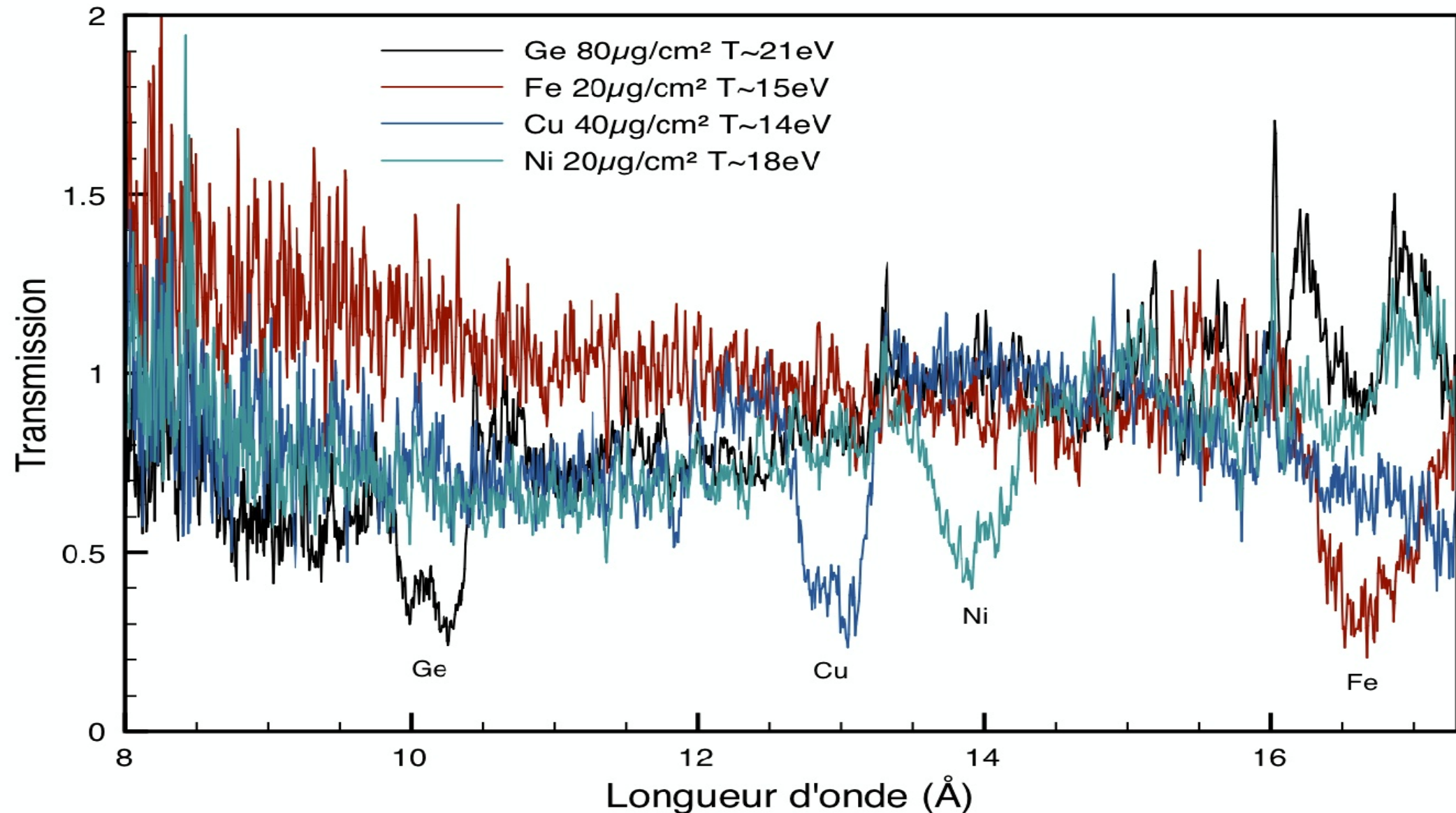
à $T=20-30$ eV, $\rho = 0.005$ g/cm³. Les structures correspondent aux transitions $2p-3d$, $2p-4d$ et $2p-5d$. La séparation spin-orbite visible dans le Ge, devient ensuite non-résolue pour les Z inférieurs



Campagne LULI 2008

Transmission des plasmas des métaux Fe, Ni, Cu, Zn, Ge

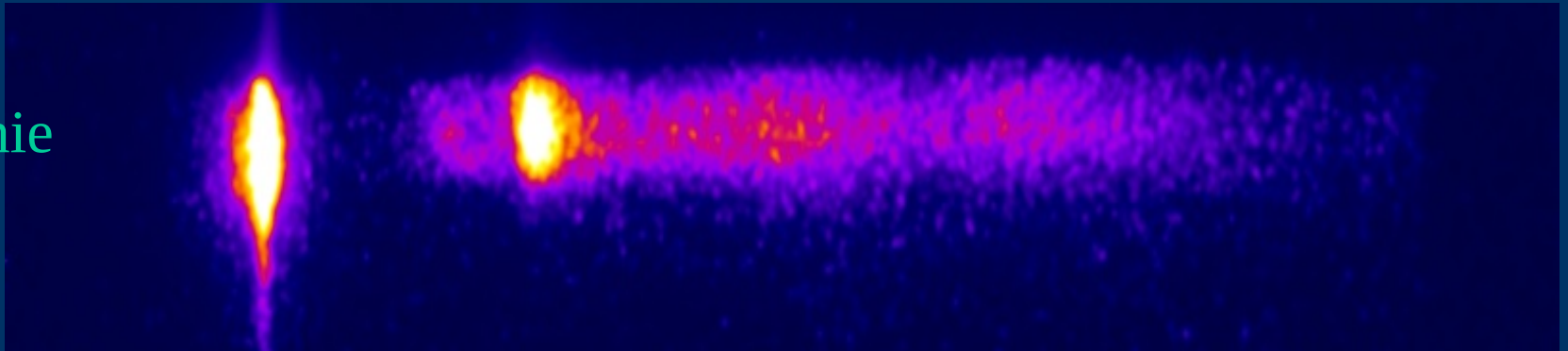
à $T=20-30$ eV, $\rho = 0.005$ g/cm³. Les structures correspondent aux transitions $2p-3d$, $2p-4d$ et $2p-5d$. La séparation spin-orbite visible dans le Ge, devient ensuite non-résolue pour les Z inférieurs



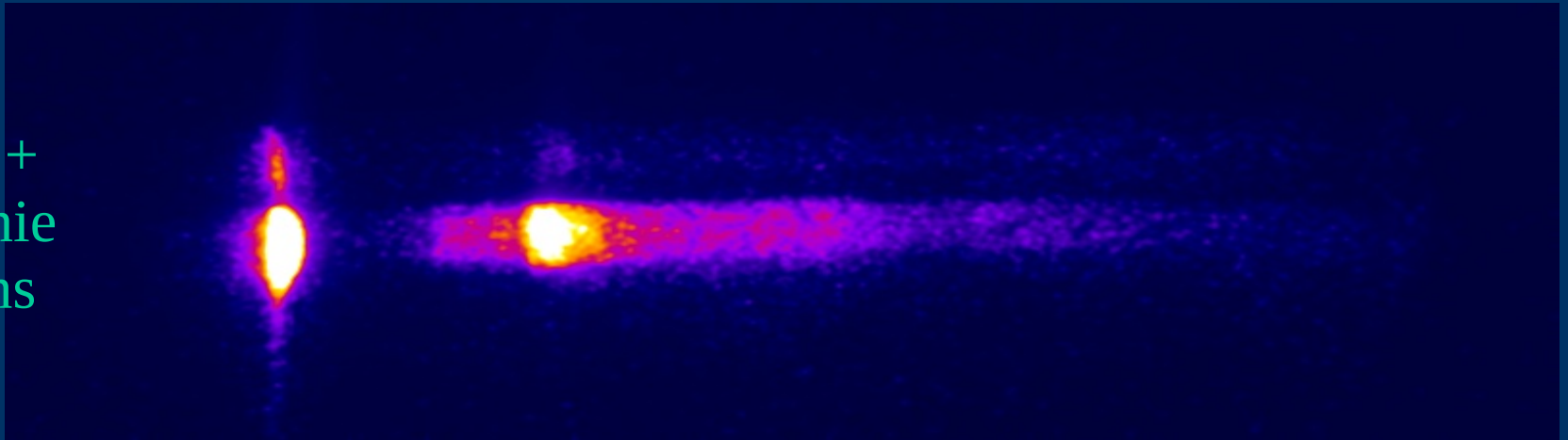
Campagne 2006 : opacités de mélange (ZnS)

- impulsion laser : 0.5 ns
- spectres X-UV (40 – 150 Å) : l'émission propre de la cavité impose une résolution temporelle

radiographie
seule



chauffage +
radiographie
à $t_0 + 0.8$ ns

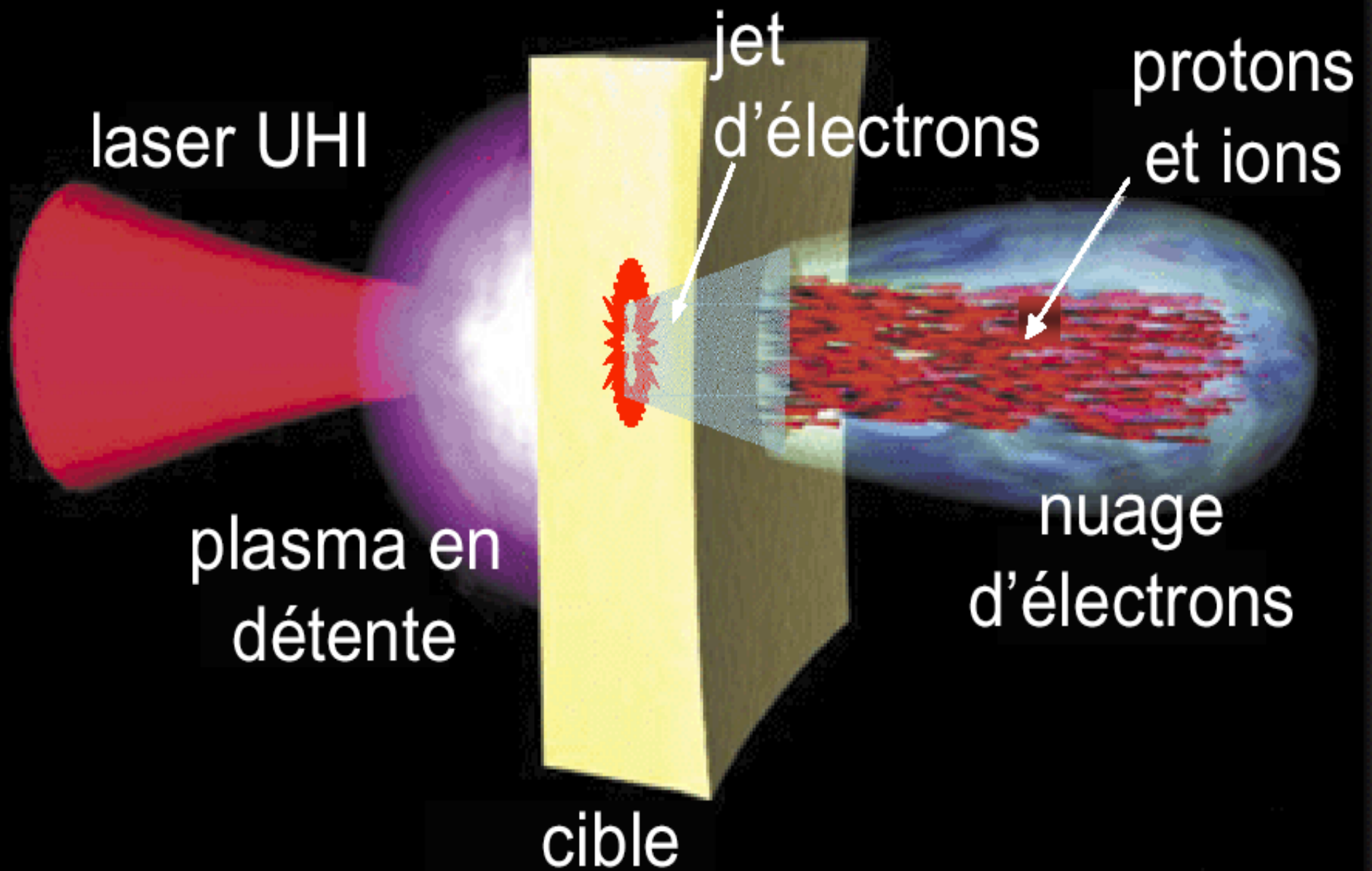


$1 / \lambda$

t

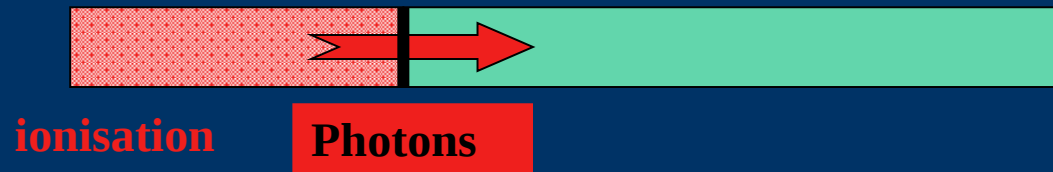
Mesures d'opacités : perspectives

- Lasers en impulsions ns
 - efficaces pour la température ETL (20 à 150 eV)
 - mais détente hydrodynamique... $\rho \sim 10^{-2} \text{ g/cm}^3$
- Évolutions ?
 - Maintenir un équilibre sur de grands volumes (LIL, LMJ)
 - Solutions alternatives ?
ex. dépôt d'un « flash » de protons

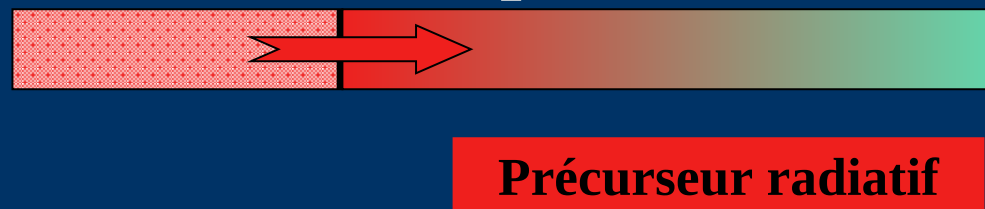


Matière et rayonnement

- Choc fort \Rightarrow matière ionisée et émissive



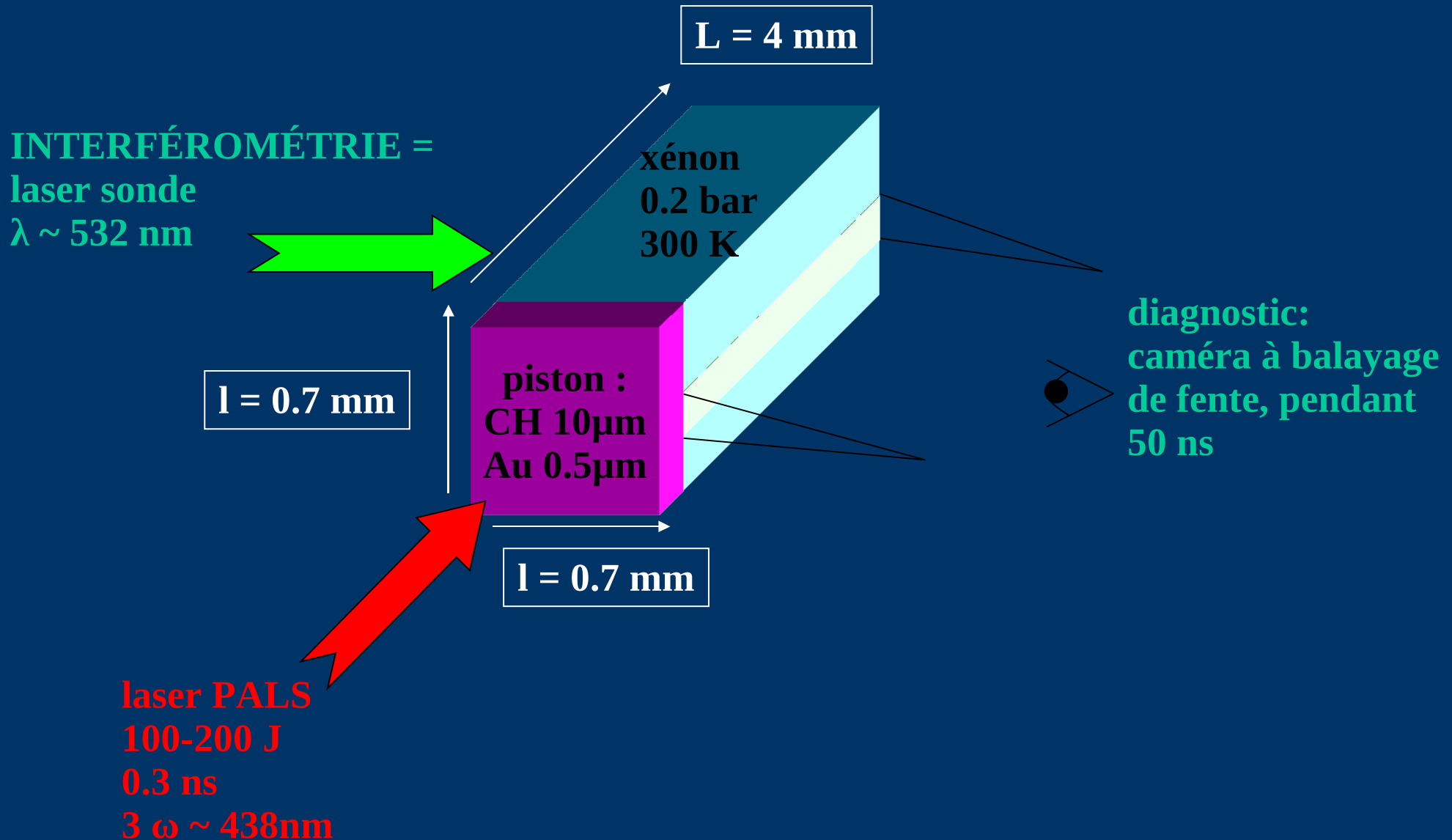
- Dans certaines conditions, une onde radiative se détache du choc et le devance en se propageant à une vitesse nettement supérieure



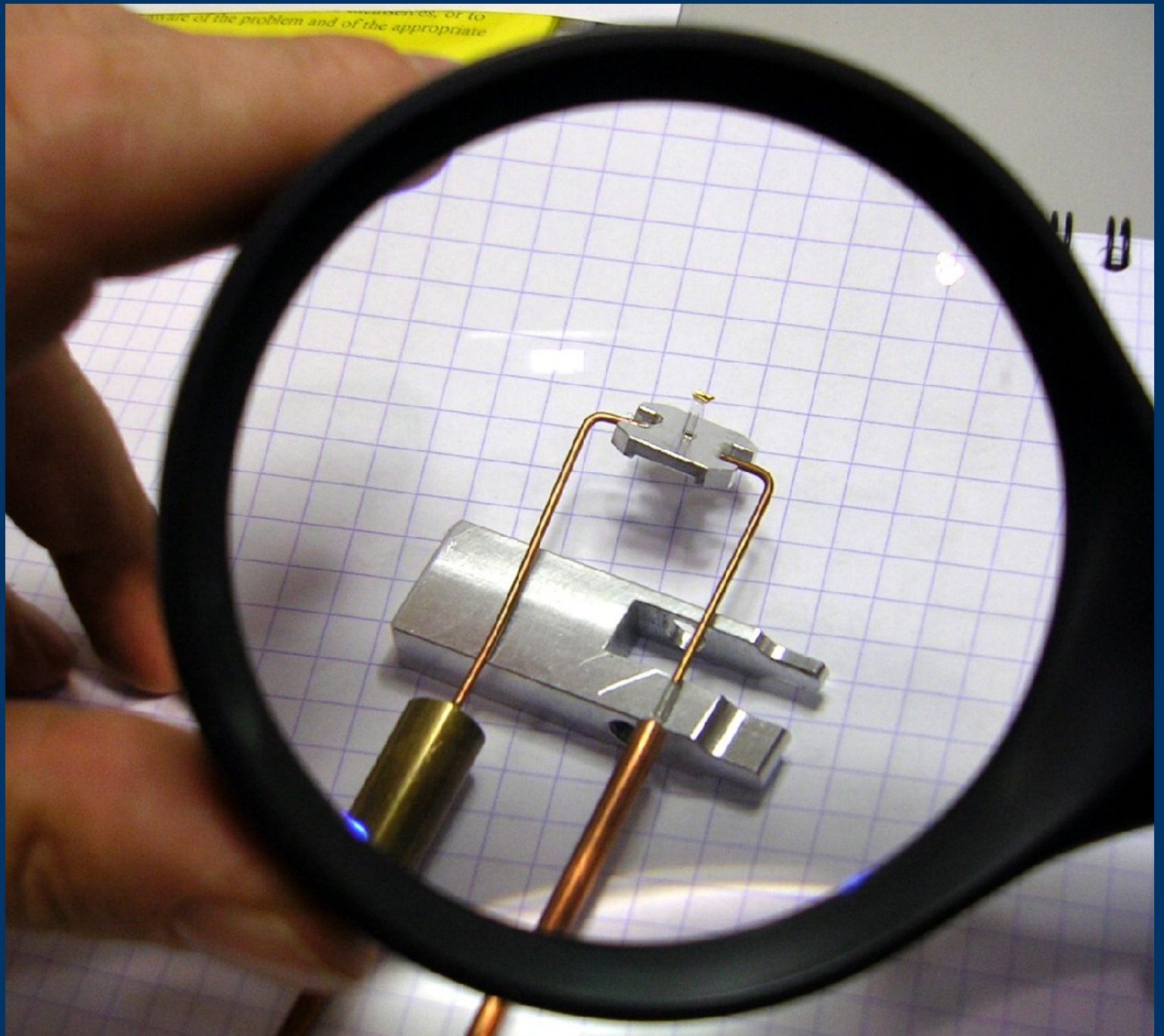
Couplage fort entre transfert radiatif et hydrodynamique

- En astrophysique :
 - Jets
 - Étoiles pulsantes
 - Chocs d'accrétion
 - ...
- En laboratoire ?

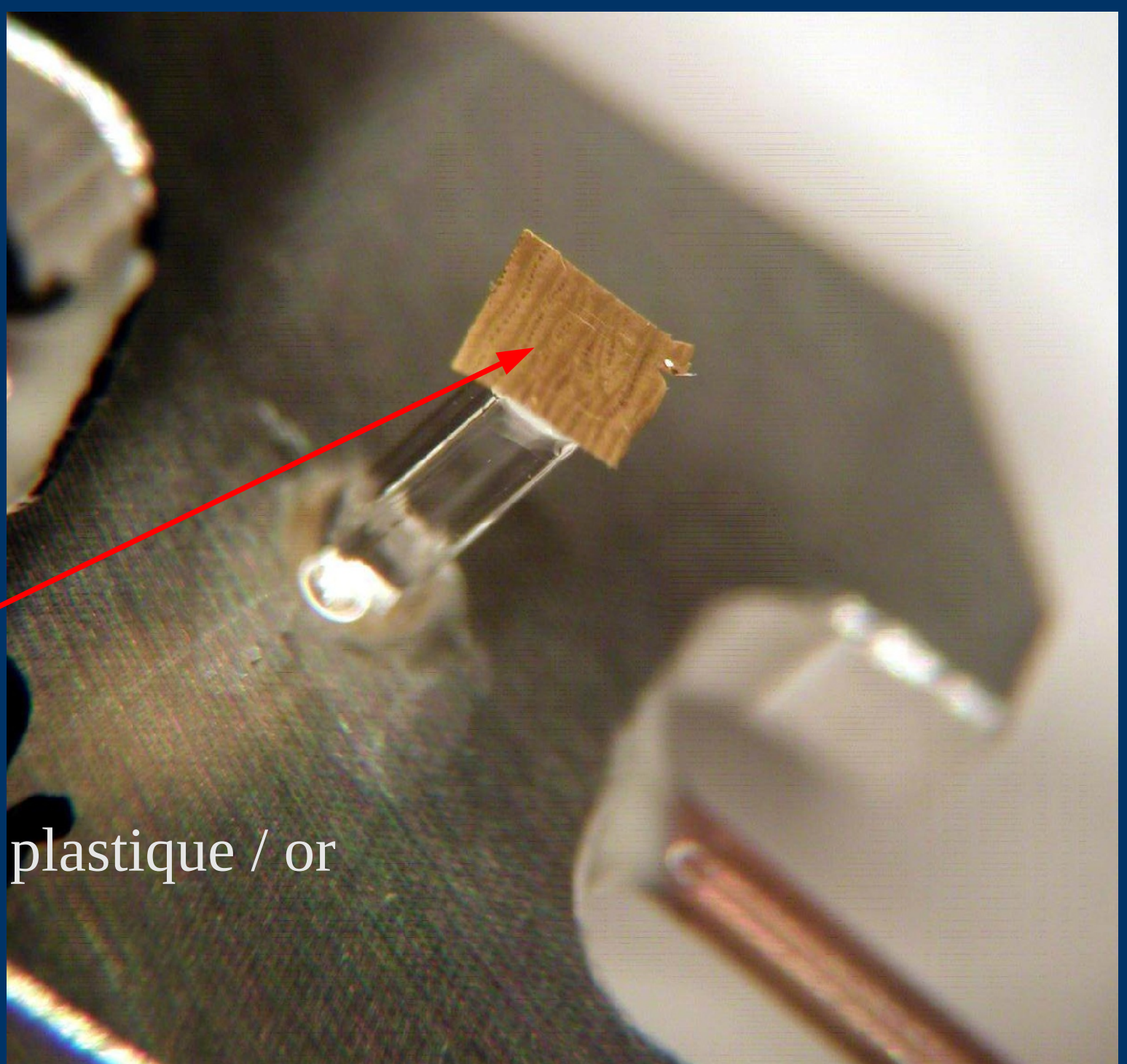
Expérience au PALS (Prague)



**Cellule de
xénon à
0.2 bar**

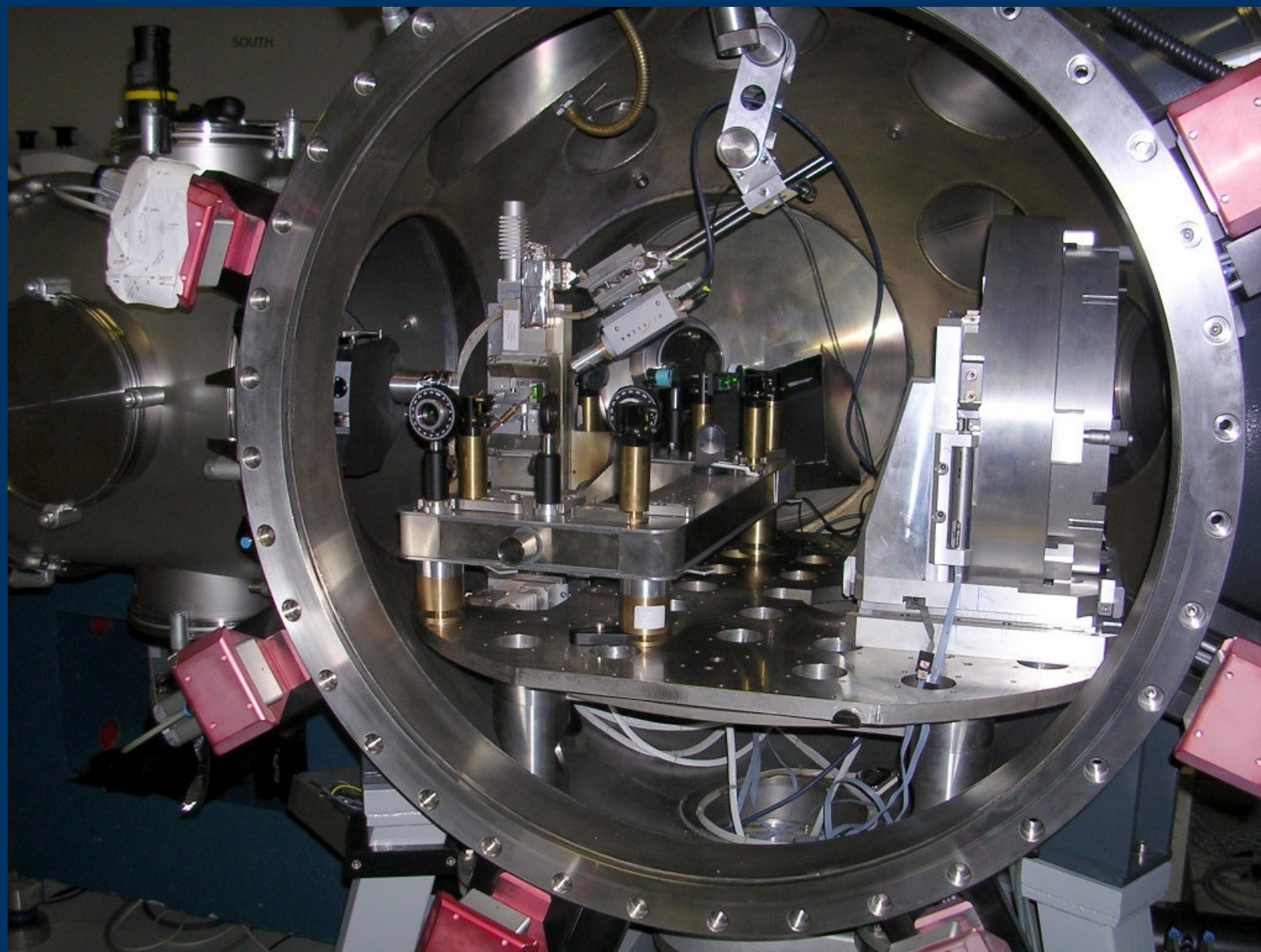


*Cellule de
xénon à
0.2 bar*

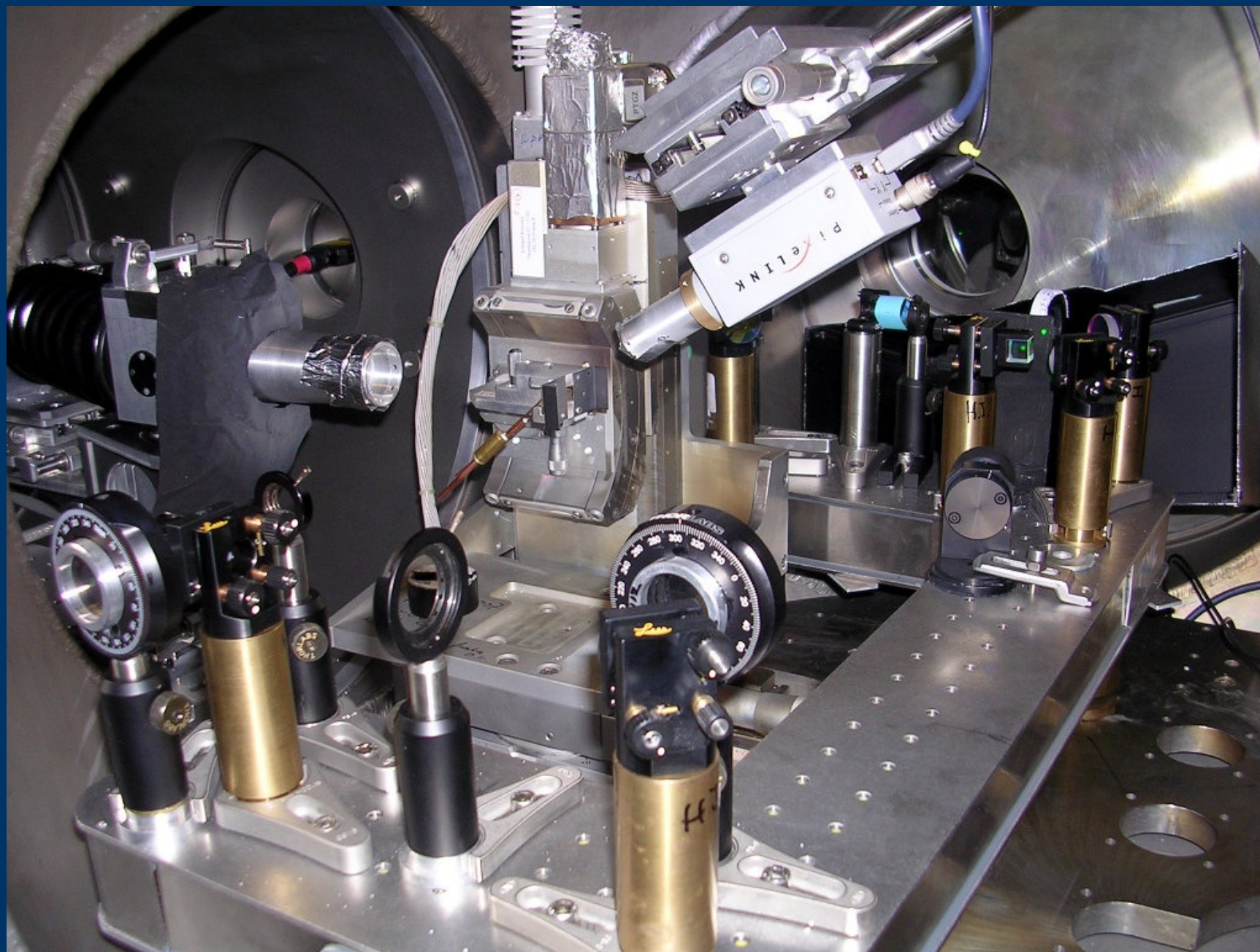


- Pousseur =
bi-couches plastique / or

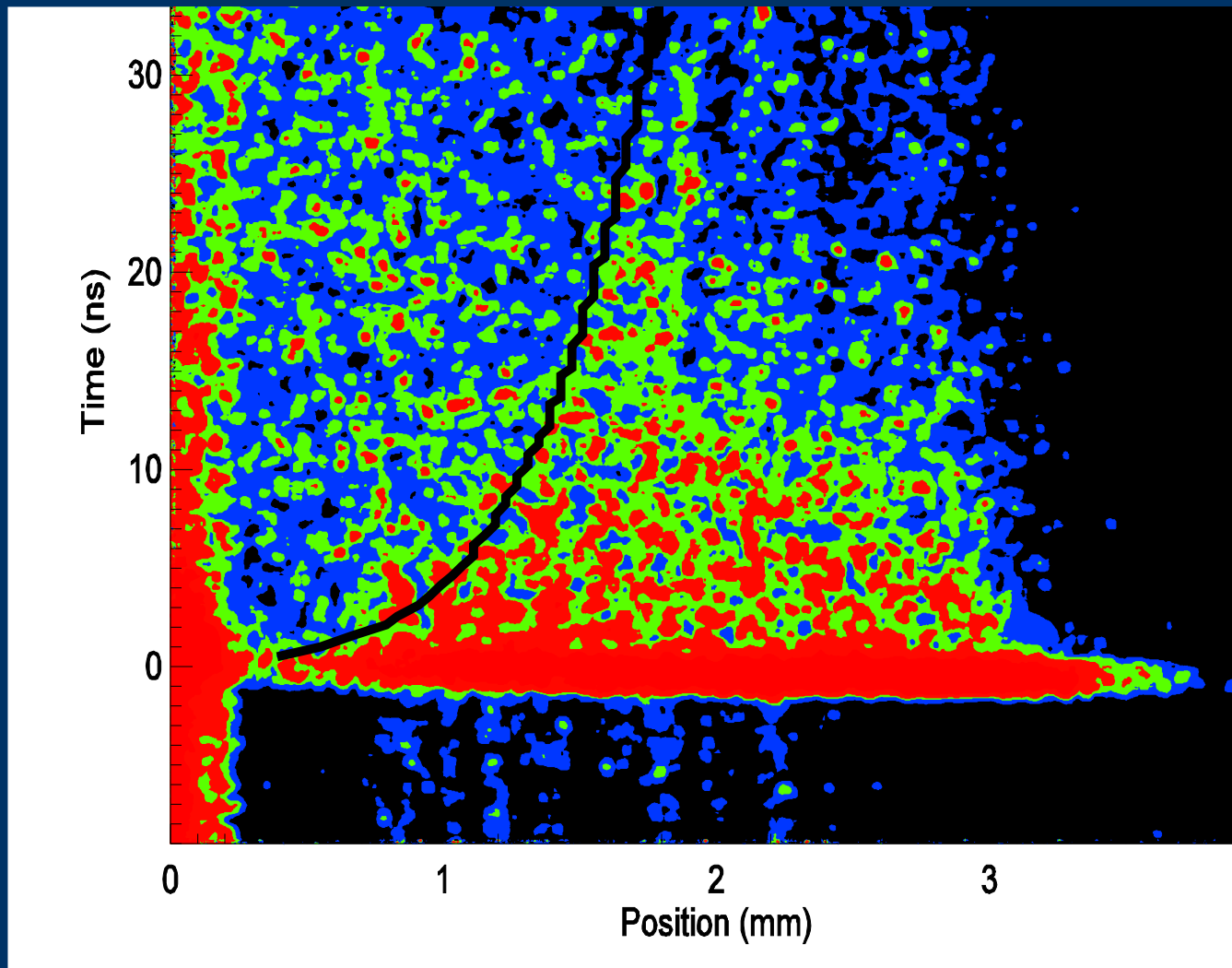
Interféromètre de Mach-Zehnder dans la chambre PALS



Interféromètre de Mach-Zehnder dans la chambre PALS



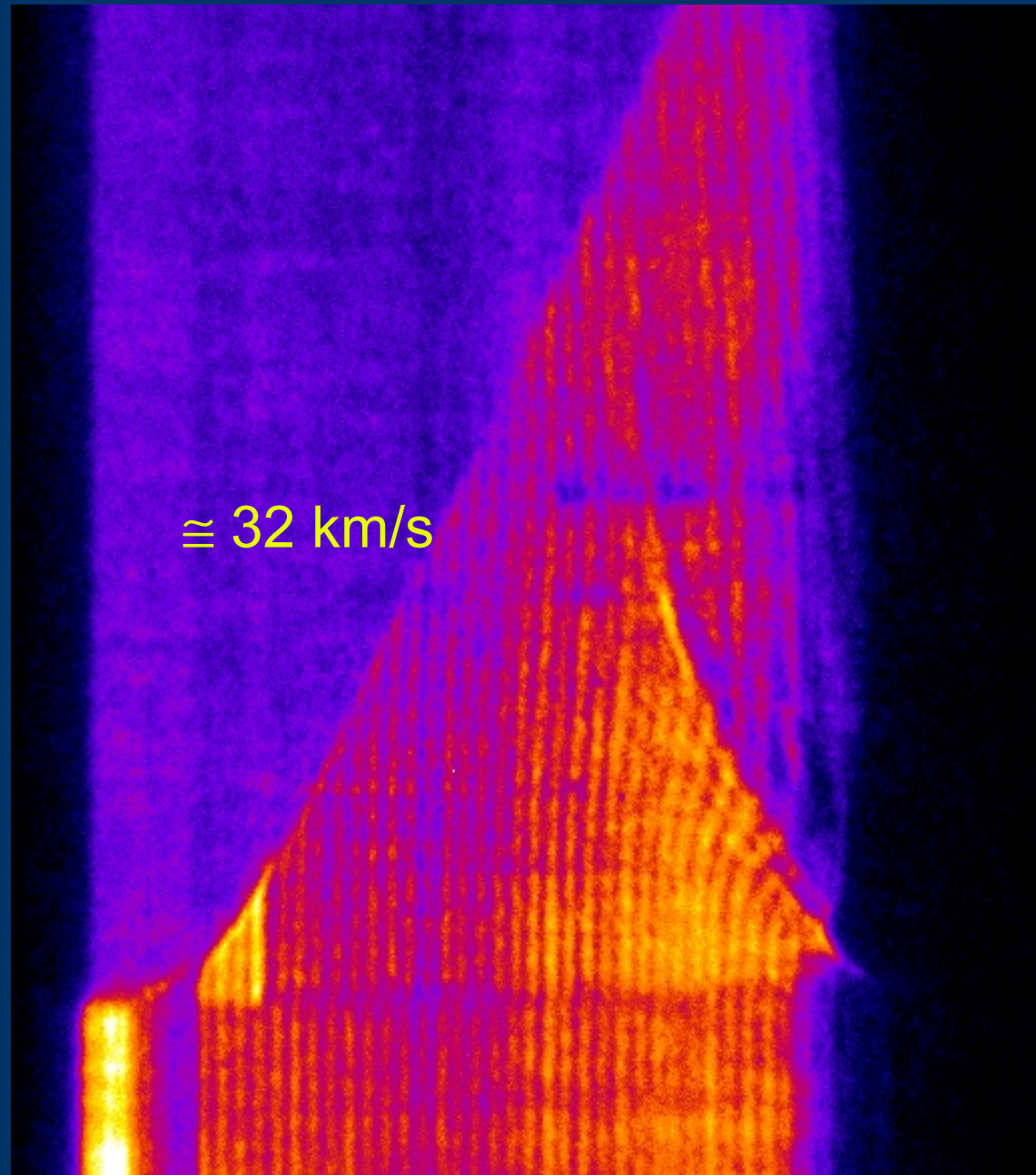
Campagne 2005 : interférogamme et modélisation de la propagation dans le xénon



Courbe noire =
simulation
HERACLES
(E. Audit &
M. González)
avec albedo des
parois à 40%

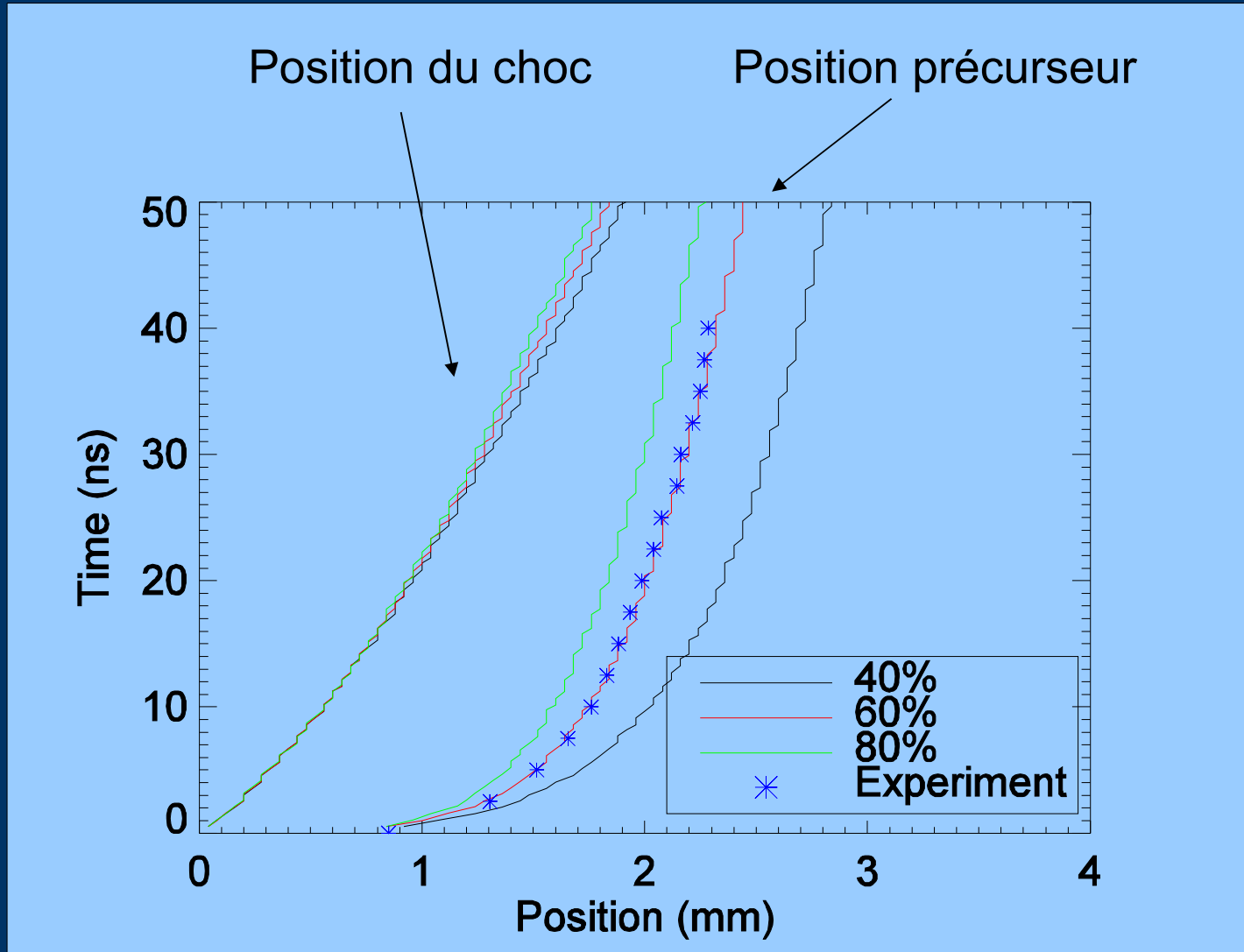
4,75 mm

*Campagne 2007 :
interférogramme
spatio-temporel en
lumière visible de la
propagation dans le
xénon*



100 ns

Modélisation : très sensible à l'albédo des pertes latérales
→ expérience spécifique pour fixer ce paramètre
ALISE 2009



Étude des chocs radiatifs : reste à faire...

- Effets 2D, pertes latérales
- Spectroscopie et opacités
- Observation à plus courte longueur d'onde
laser X ??
- Mesure de la vitesse du pousseur
- Voir la structure du choc ?
- etc.

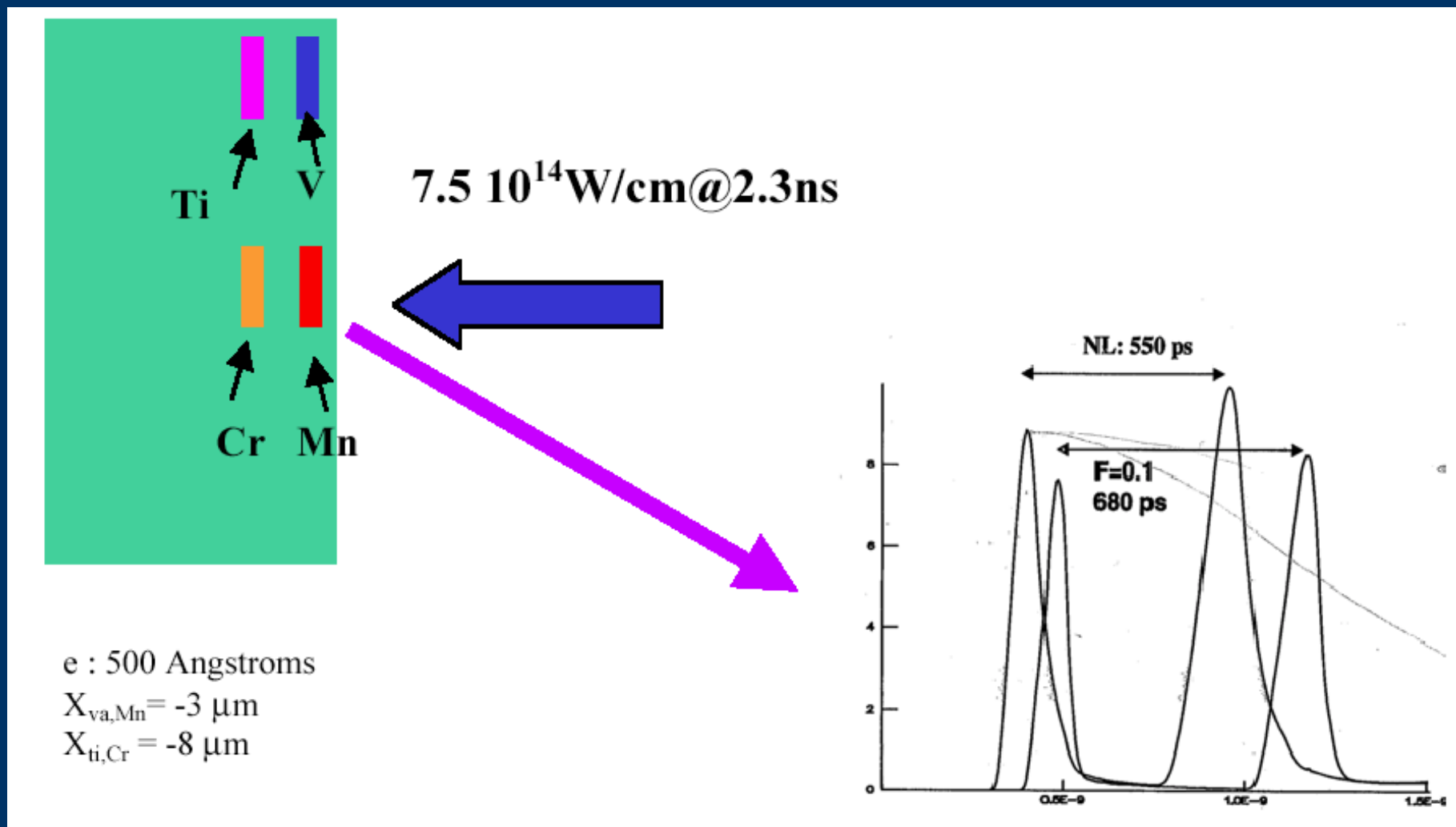
Flux de chaleur dans un plasma

- Un très « vieux » problème dans la modélisation des plasmas laser
 - Saturation de la loi de Fourier (transport thermique proportionnel au gradient)
- Résolution très arbitraire et empirique dans les codes
 - un « limiteur de flux » : $f = 0.03 ? 0.07 ?$

Vérifier un modèle de « flux délocalisé »

- Pour remplacer la conductivité de Spitzer
 - En prenant en compte le bilan du transfert d'énergie sur une zone élargie
 - G. Schurtz *et al.*, Phys. of Plasmas 7, 4238 (2000)
 - Ph. Nicolai *et al.*, Phys. of Plasmas 13, 032701 (2006)
 - En calculant les champs magnétiques auto-générés
- Nécessité d'une vérification expérimentale

Observer l' « allumage » de traceurs implantés dans une cible de plastique



La LIL en 2005-2006

6 Imageries X

3 mesures d'énergie V-UV

3 spectromètres X

Microscope X sur CBF

Microscope X sur CBF

Sténopé sur Film X

Microscope X sur CII

Quadruplet

Spectro Raman Brillouin

Énergie Diffusée

DP 1.02

Énergie Transmise

DP 1.03

Spectro X sur CBF

Microscope X sur CBF

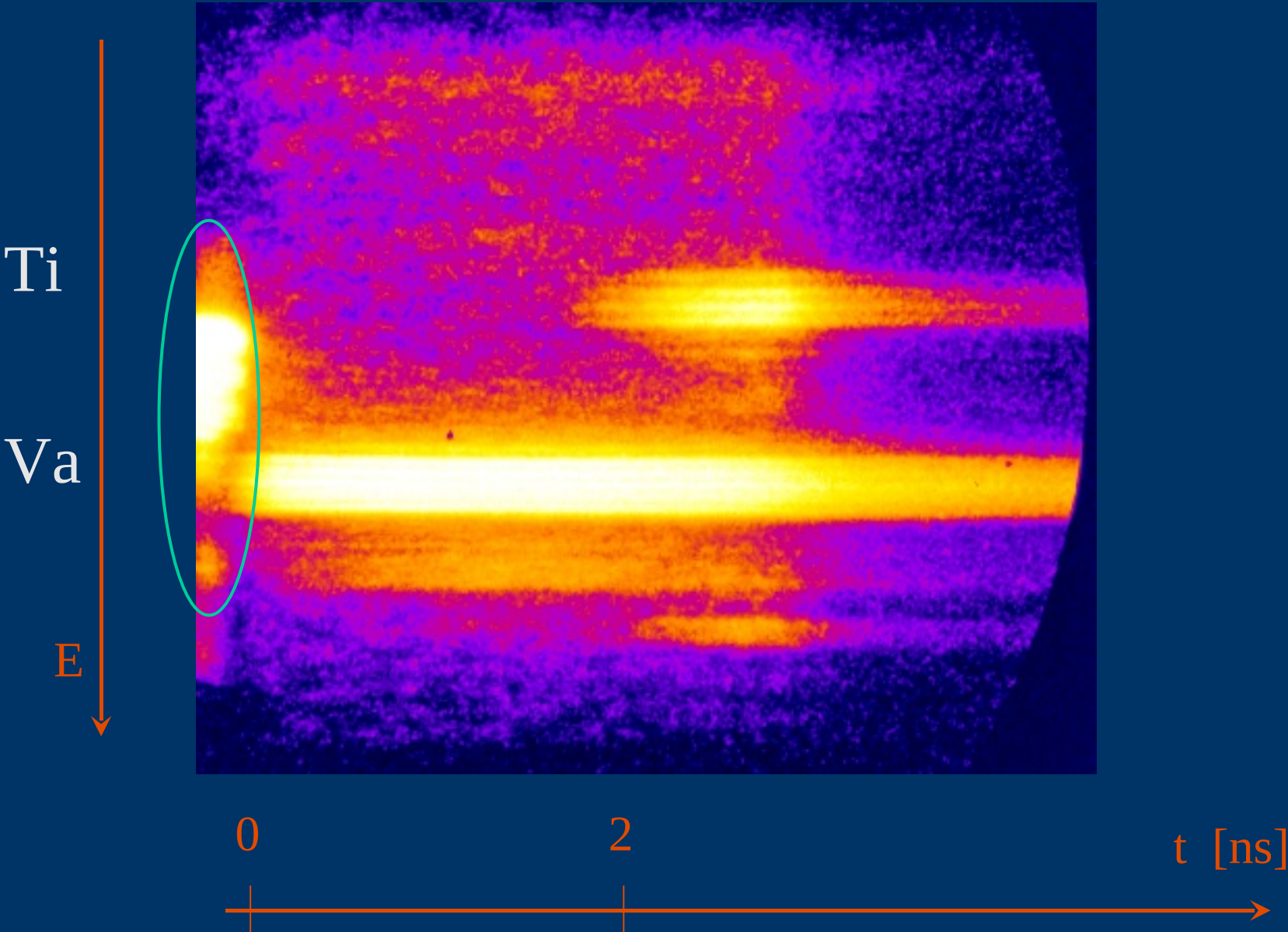
Spectromètre DMX

Spectromètre X Durs

Microscope X sur CII

DP 1.09

Spectromètre X dur résolu en temps



Avec les grands lasers du futur (proche)...

- Plus grande densité d'énergie
- Matière plus homogène dans de plus grands volumes
- Couplage des impulsions longues (haute énergie) avec des faisceaux « courts » (haute intensité) de classe **PW** -> mesures de plasmas en conditions « figées »

Les mesures : aperçu général

Objectif

Dimensions : de 100 à qq 1000 μm , résolution $< 10 \mu\text{m}$

Temps : de 0,1 à 5 ns, résolution $< 0,05 \text{ ns}$

Spectres : de 0,1 à 1 keV (X-mous) et de 1 à 10 keV (X-durs)

Distance d'observation :
20 à 2000 mm

Mesures optiques

- laser incident, absorption laser, réfraction : calorimètres
- Interférogrammes

Mesure du rayonnement X

Émission propre ou transmise (radiogr.)

- Imagerie (espace, temps, énergie)
- Spectres large-bande
mesures absolues, intégrées ou $f(t)$
- Spectres haute-résolution

- sténopé

- miroirs incid. rasante

- réseau par transmission

- cristaux

- diodes

- lentilles de Fresnel

- films

- CCD

Mesures neutroniques

- N (absolu), $f(t)$, spectre, image

*Il faut faire des campagnes d'étalonnage
(métrologie en laboratoire, in situ, synchrotron,...)*