

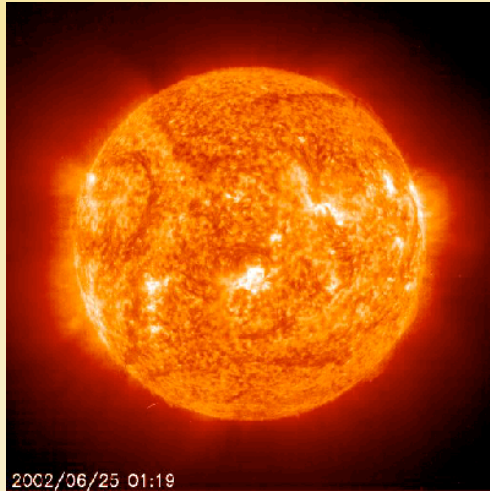
# *Expériences de mesure d'opacité*

Serena Bastiani  
Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses  
Ecole Polytechnique  
Palaiseau

# Motivation des mesures d'absorption



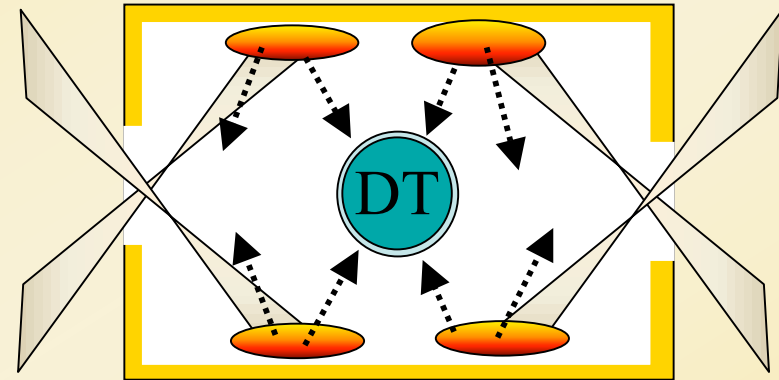
pour la physique stellaire  
(cf. cours F. Delahaye)



En **astrophysique**, les coefficients d'absorption sont des ingrédients majeurs de la **connaissance des plasmas stellaires**.

Le **transfert radiatif** gère la durée de vie des étoiles et leur évolution.

pour la fusion inertielle



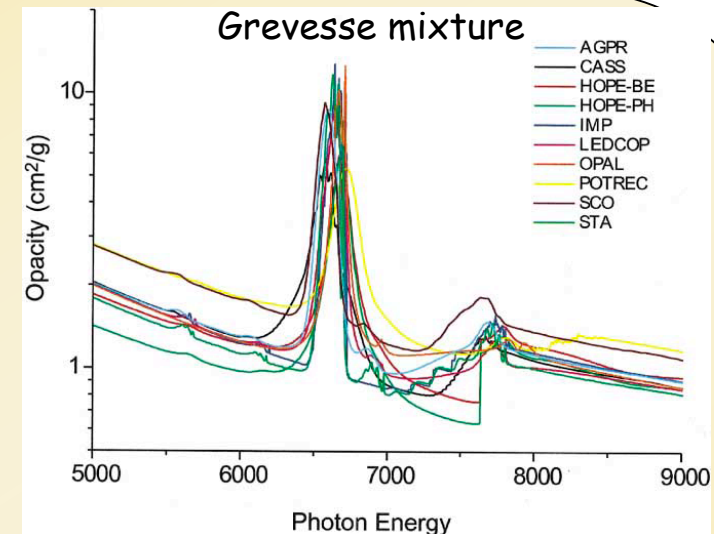
Dans le schéma **indirect**, le hohlraum est chauffé par rayonnement X qui est absorbé par le **micro-ballon** : les coefficients d'absorption des éléments de la capsule doivent être connus.

# Motivation des simulations et expériences



## Transfert radiatif et simulations

- Pour l'astrophysique et la fusion inertielle, un calcul fiable du **transfert radiatif** est essentiel
- La **comparaison expérience / simulations** des coefficients d'absorption dans des expériences d'interaction laser-plasma assure la fiabilité des calculs.



Opacité au centre du soleil  
1.3 keV, 150 g/cm<sup>3</sup>, mélange de 20 éléments  
allants de l'H au Ni

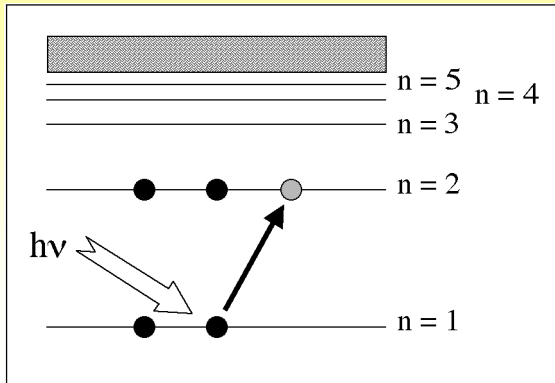
## Il y a aller-retour entre expérience et simulations

La mesure des coefficients d'absorption des plasmas chauffés par rayonnement X s'appuie sur un travail numérique:

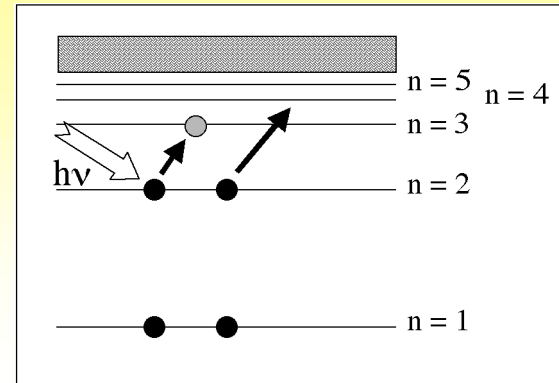
- Simulations **hydrodynamiques radiatives** du plasma.
- Modèles **collisionnels-radiatifs** pour connaître les **populations ioniques**.
- Codes d'**opacités** ou de **structure atomique**  
=> **spectres détaillés d'absorption et d'émission**

- Notions de base sur l'absorption
- Différentes techniques expérimentales
- Contraintes expérimentales pour des expériences de « bonne qualité »
- Quelques expériences, plus ou moins récentes

# Principe de l'absorption en couche K et L



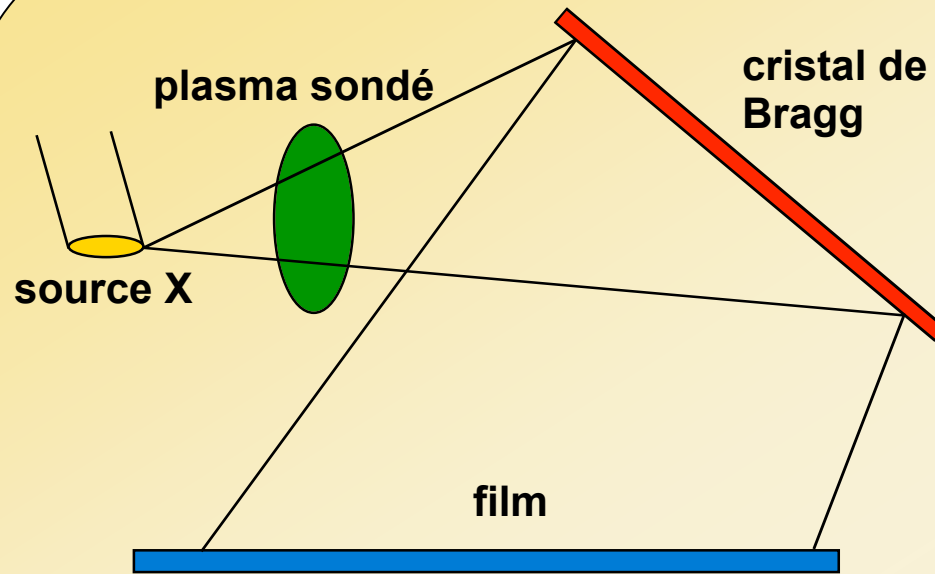
- Un photon d'énergie égale à la différence d'énergie des couches est absorbé et excite un électron de couche  $n=1$  vers la couche  $n=2$ .
- Il faut un trou en couche  $n=2$   
 $\Rightarrow$  ions fluoroïdes à heliumoïdes



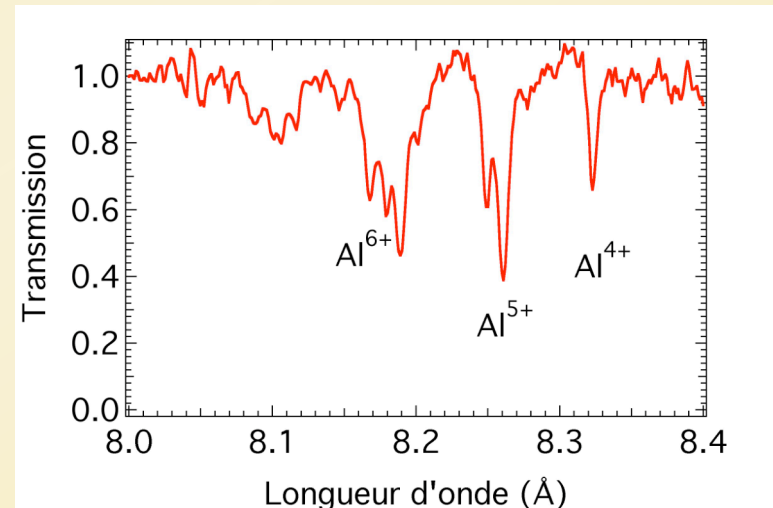
- Une transition de couche 2 vers 3, 4, 5... peut aussi être excitée.
- Des milliers de transitions absorbent :  
par ex :  $2p-3d$ ,  $2p-4d$ ,  $2p-4s$

Nécessité d'avoir une source X large bande, dans la gamme spectrale adaptée

# Principe de la spectroscopie d'absorption



Source X synchronisée,  
à spectre large  
=> un faisceau sur une cible  
d'élément lourd

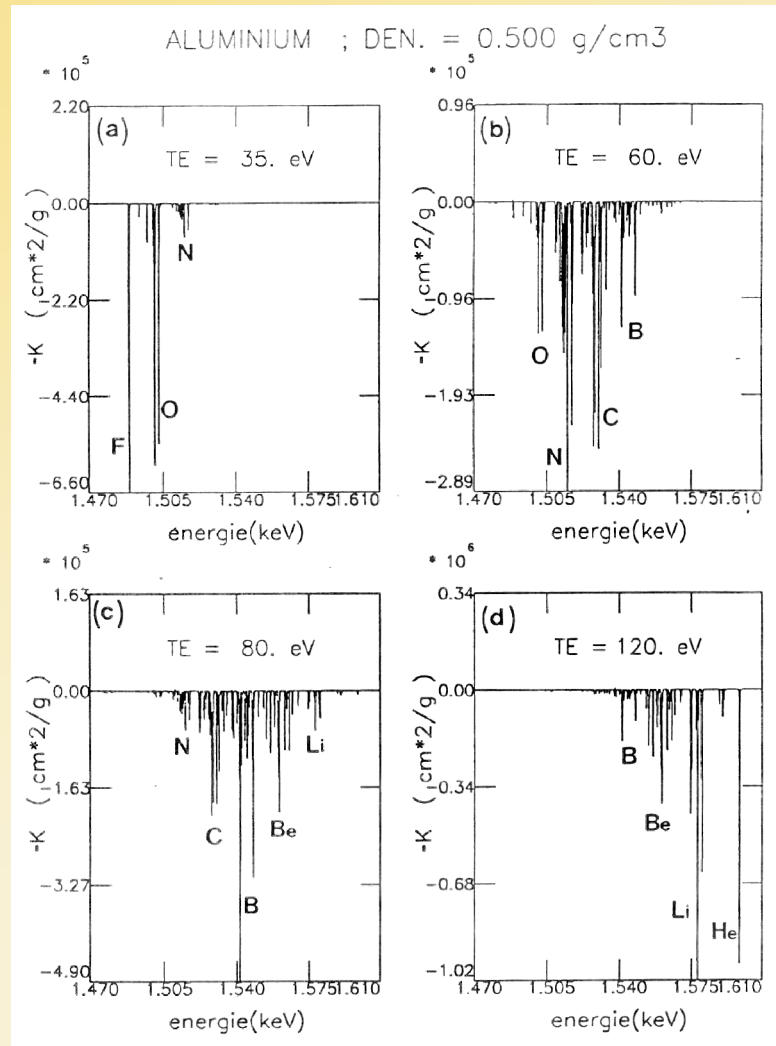


Résolution temporelle : (qq ps - ns)  
durée de la source X  
Résolution spatiale : (qq 10  $\mu\text{m}$ )  
dimension de la source X  
parallèlement à l'axe d'observation

La transmission est relié à l'opacité  
par la loi de Beer-Lambert :

$$T = \exp(-K(\nu)\rho L)$$

# Les structures d'absorption varient avec la température



On voit apparaître les différents états ioniques, au fur et à mesure que le plasma est chauffé

$\text{Al}^{4+}$  = F-like

$\text{Al}^{5+}$  = O-like

$\text{Al}^{6+}$  = N-like

$\text{Al}^{7+}$  = C-like

$\text{Al}^{8+}$  = B-like

$\text{Al}^{9+}$  = Be-like

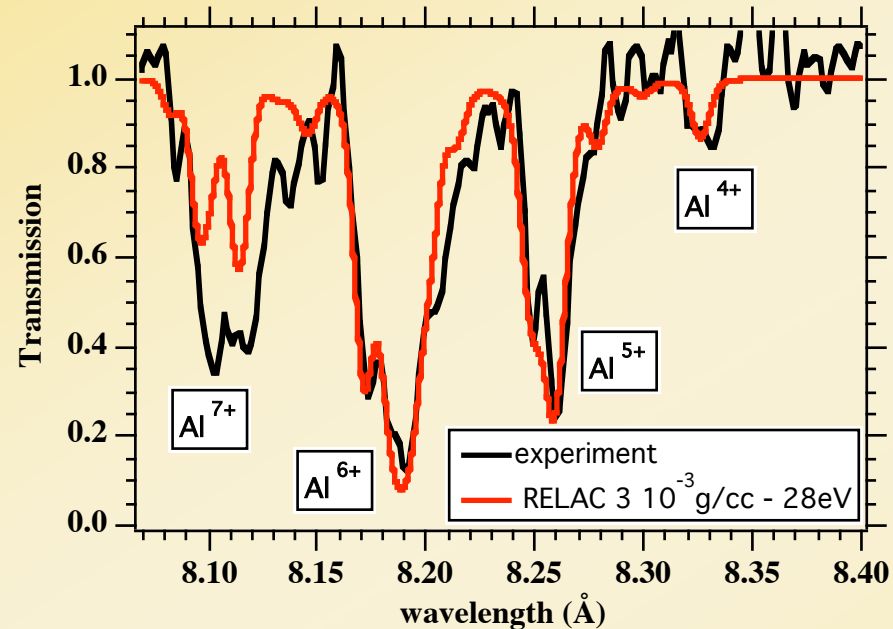
$\text{Al}^{10+}$  = Li-like

$\text{Al}^{11+}$  = He-like

Les structures des ions  $\text{Al}^{7+}$  et  $\text{Al}^{8+}$  sont composées d'une centaine de transitions.



# Absorption de l'aluminium: mesure de la température



Aluminium  $e = 150$  nm  
 $\langle Z \rangle = 6.1$ ,  $T_e = 28$  eV  
16% Al<sup>5+</sup>, 55% Al<sup>6+</sup>, 26% Al<sup>7+</sup>

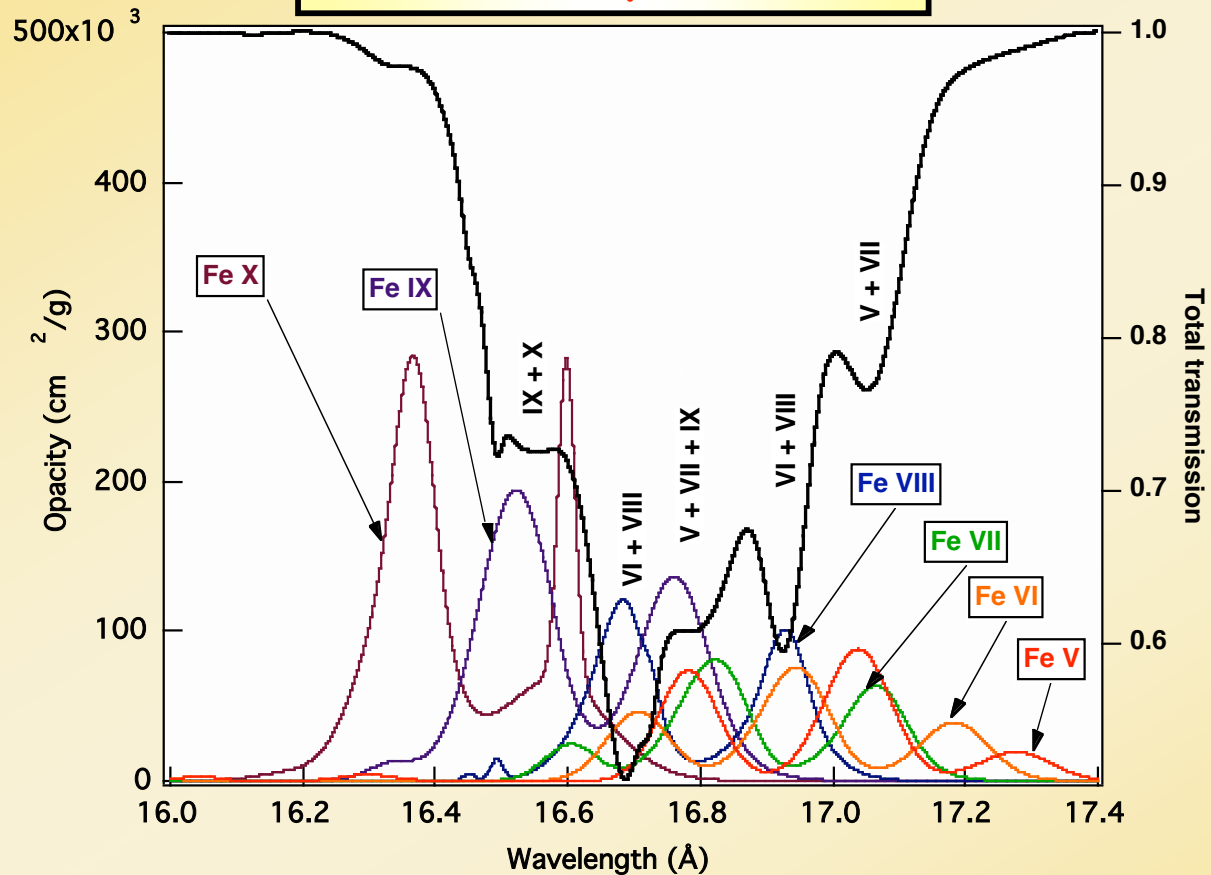
Transitions K de l'aluminium :  
les ions donnent des structures bien séparées



# La transmission est la somme des contributions ioniques



## Transitions 2p-3d du fer



**Z élevé : les contributions des différents ions se superposent**

(Transitions K de l'aluminium : les ions donnent des structures bien séparées)

# Comparaison des coefficients d'absorption mesurés et calculés



Comparaison de l'expérience à des calculs de coefficients d'absorption

- => Mesure de l'état d'ionisation
- => Mesure de la température (Z léger, hypothèse de l'ETL)
- => Validation des modèles

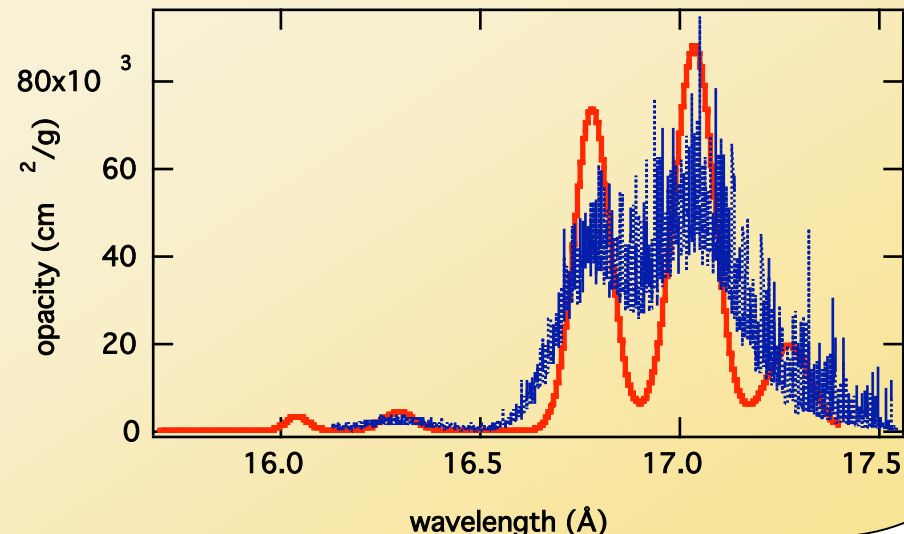
Éléments légers : aluminium, magnésium, chlore

L'absorption est calculée avec un modèle de structure atomique détaillé. Le code HULLAC part d'un calcul *ab-initio* des énergies de niveaux, forces d'oscillateur dans un potentiel paramétrique relativiste.

Éléments plus lourds :

nickel, germanium, samarium, ...

L'absorption est calculée par la méthode statistique des faisceaux de transitions (UTA).



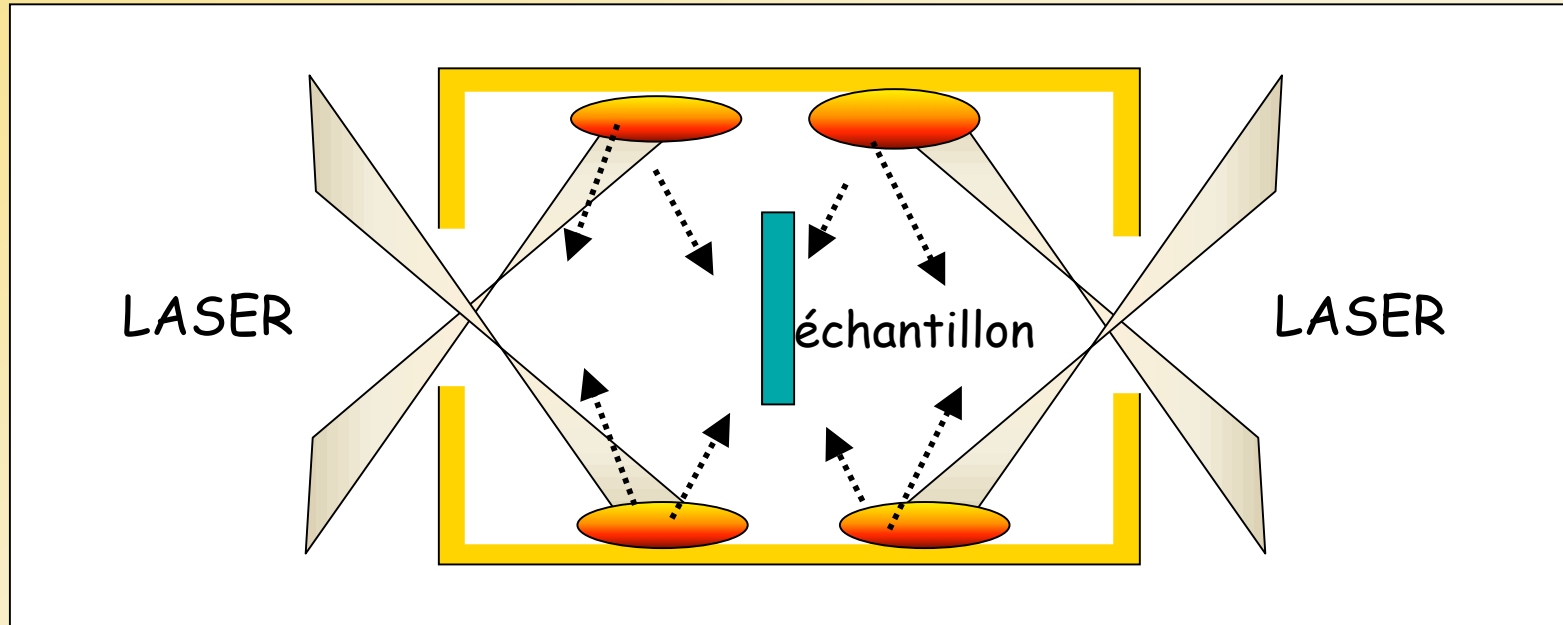
Notions de base sur l'absorption

**Différentes techniques expérimentales**

Contraintes expérimentales pour des expériences de  
« bonne qualité »

Quelques expériences, plus ou moins récentes

# Attaque indirecte : chauffage radiatif



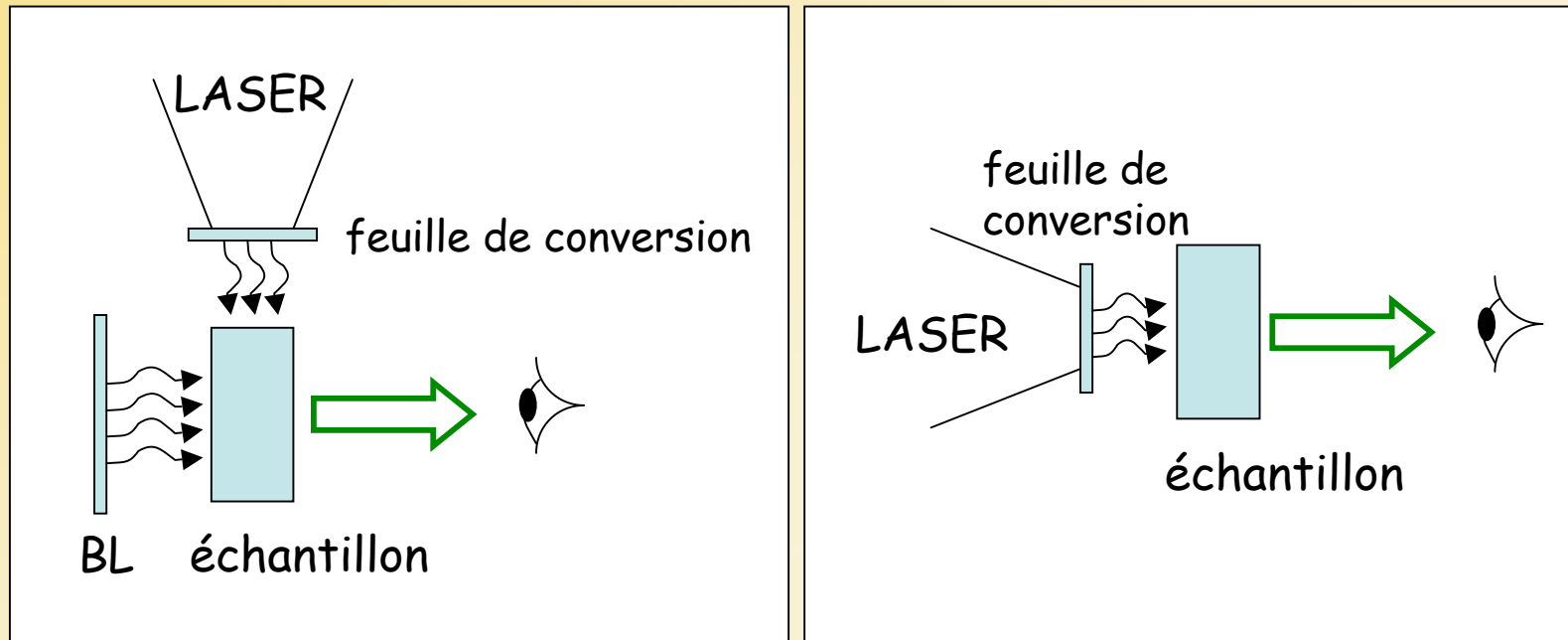
$T_e < 100 \text{ eV}$ ,  $\rho = 0.01 \times \rho \text{ solide}$

Mesure de l'opacité spectrale :

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp(-\rho \kappa(\nu) x)$$

Avantage : ETL, moins de gradients

# Attaque indirect : propagation de l'onde thermique



$T_e < 100 \text{ eV}$ ,  $\rho = 0.01 \times \rho \text{ solide}$

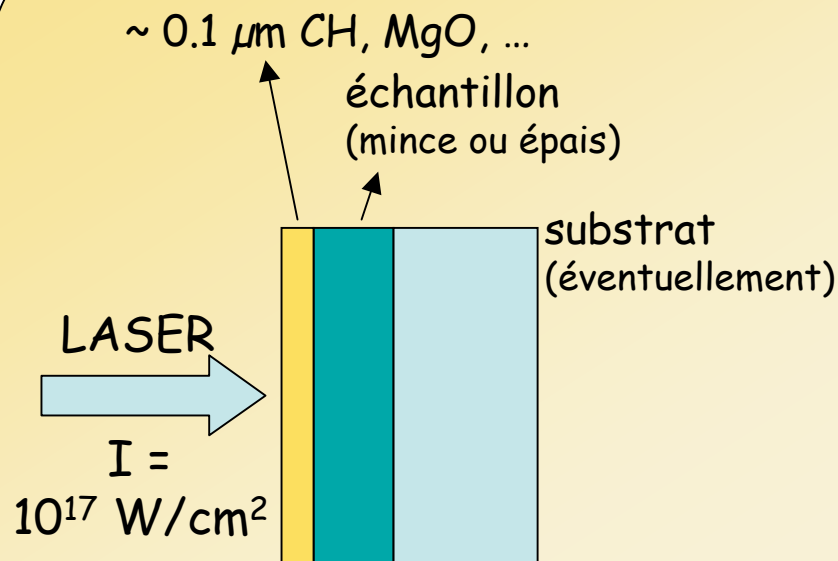
Mesure de l'opacité de Rosseland :

$$\kappa_R^{-1} = \frac{\int_0^\infty \kappa^{-1}(\nu) \frac{dB(\nu, T)}{dT} d\nu}{\int_0^\infty \frac{dB(\nu, T)}{dT} d\nu}$$

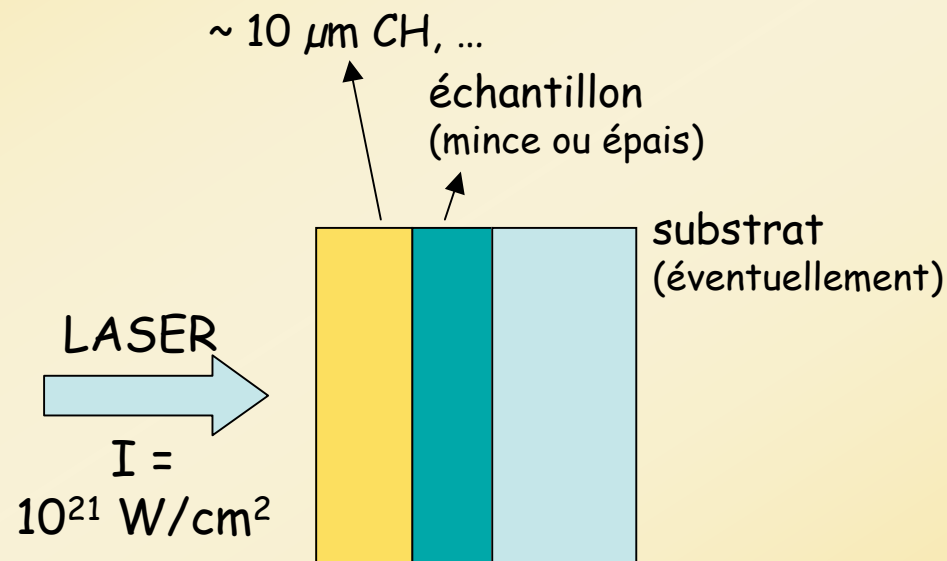
# Chauffage par les électrons ou les protons



- Extension du chauffage radiatif à  $T_e$  la + élevée possible



cible enterrée, chauffage par les électrons thermiques



cible enterrée en profondeur, chauffage par les électrons suprathermiques

qq 100 eV, 1 g/cm<sup>3</sup>

- Chauffage par protons (20 eV, densité du solide)

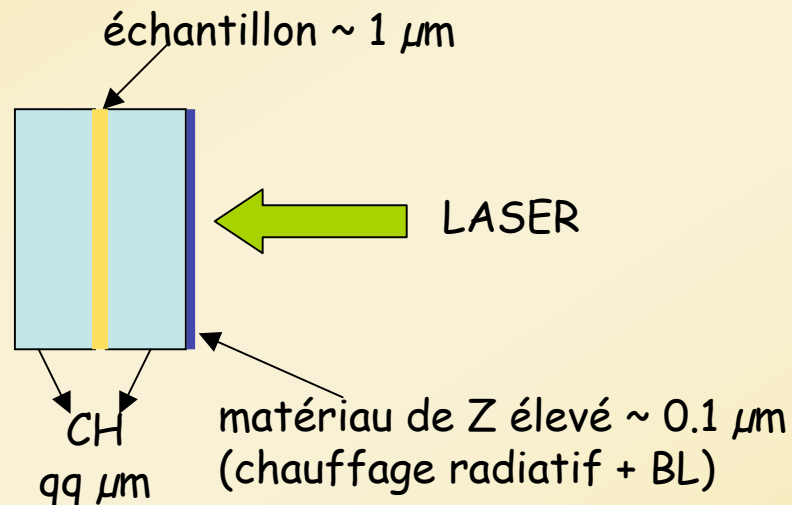
# Autres techniques récentes



- Impulsions ultra-courtes (10 fs)
  - taille caractéristique du plasma < épaisseur de peau des électrons
  - le champ évanescent du laser pénètre le solide
  - absorption collisionnelle dans l'épaisseur de peau

$0.5 \text{ g/cm}^3$ , 200 eV

- Combinaison de choc et de chauffage radiatif



$1 \text{ g/cm}^3$ , 50 eV



- Notions de base sur l'absorption
- Différentes techniques expérimentales
- **Contraintes expérimentales pour des expériences de « bonne qualité »**
- Quelques expériences, plus ou moins récentes

# Ingrédients d'une mesure d'absorption



- Spectre incident (BL)
- Spectre transmis (mesuré)
- Emission propre de l'échantillon
- Fond (fluorescence des différents composants)

$$T(\lambda) = \exp(-\rho L \kappa(\lambda)) = \frac{I_m - I_{ep} - I_f}{I_{BL} - I_f}$$

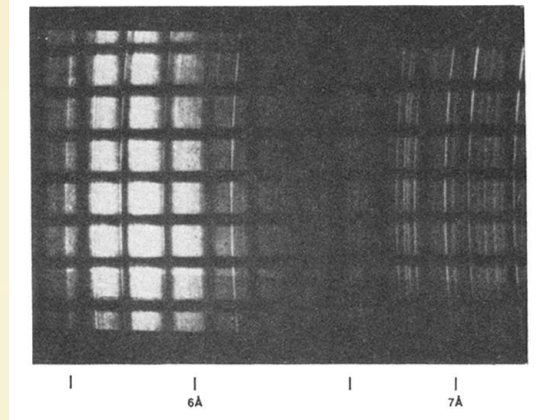
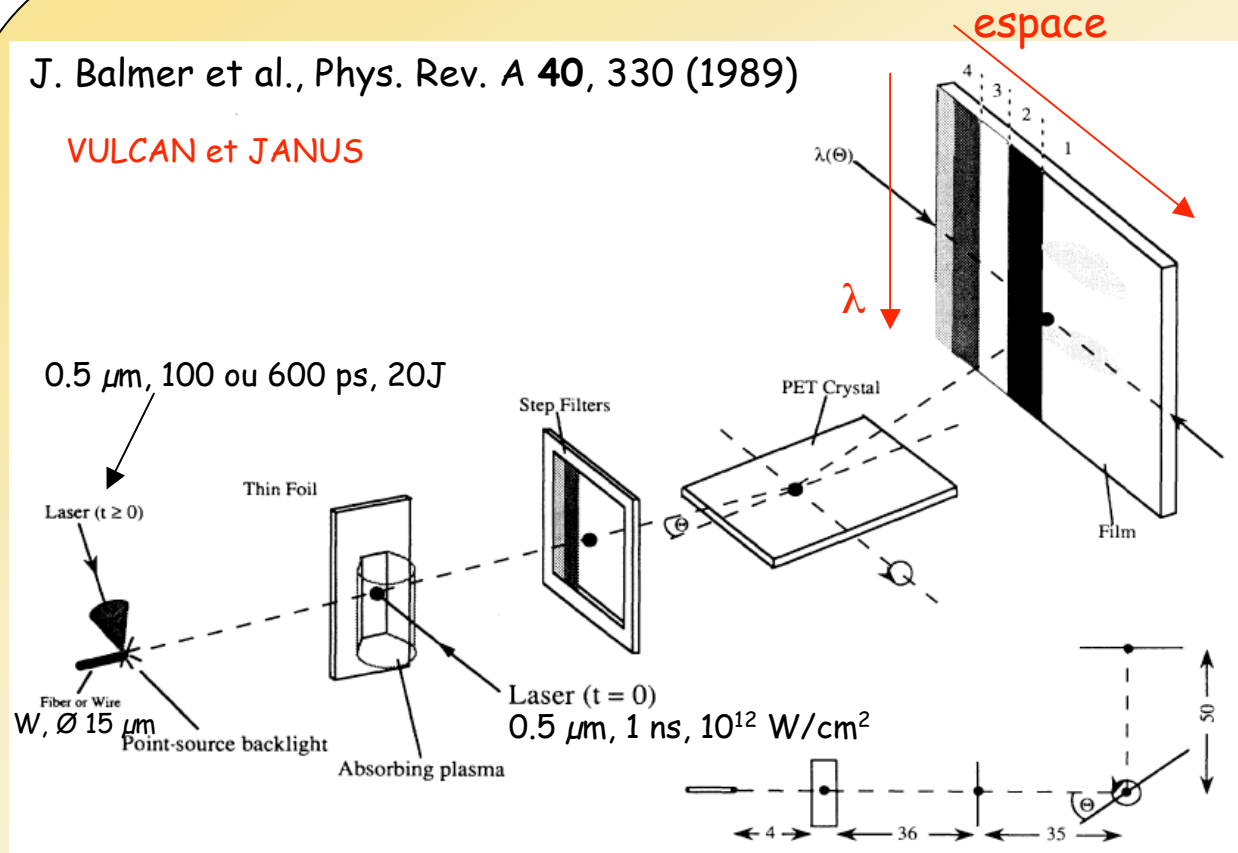
Mesure sur tirs laser différents introduit généralement  
des fluctuations redoutables

# Point projection spectroscopy (1)



J. Balmer et al., Phys. Rev. A **40**, 330 (1989)

VULCAN et JANUS

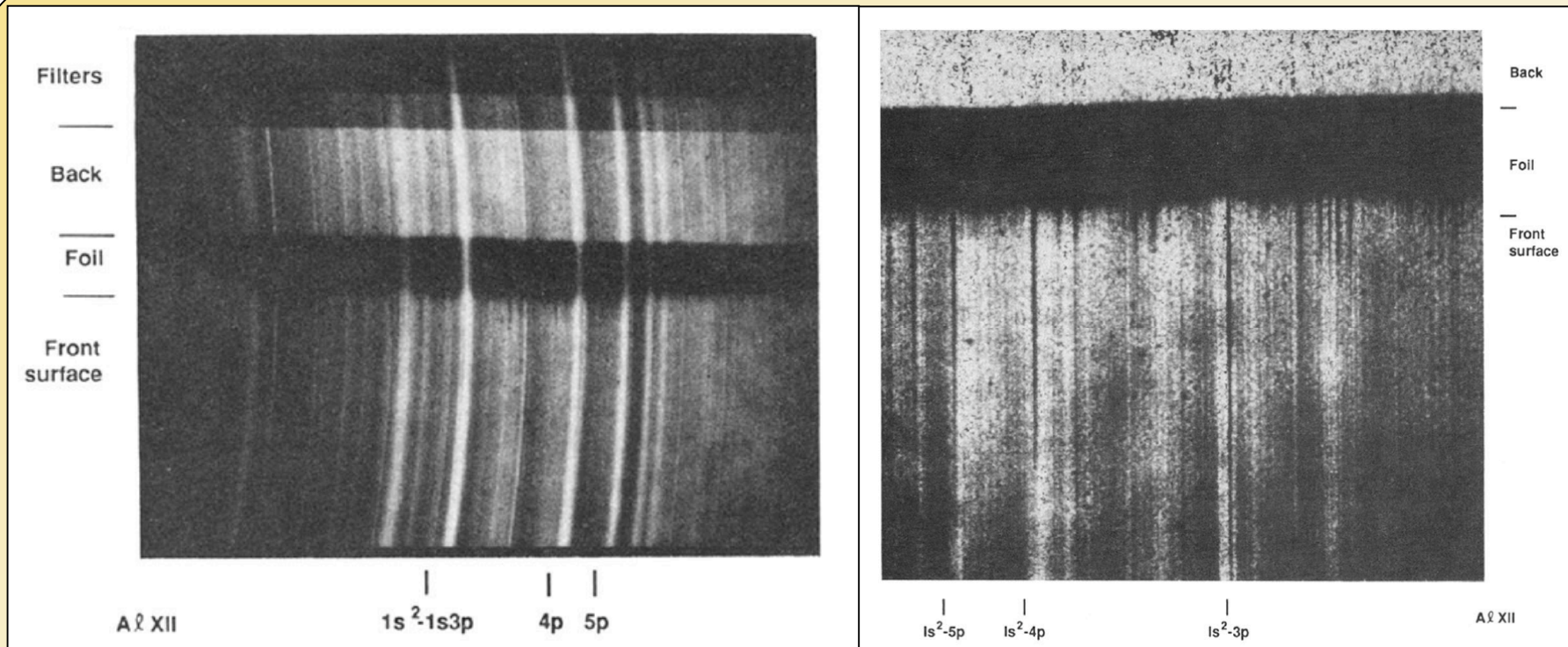


Grille : fils 30  $\mu\text{m}$  diamètre  
et 120  $\mu\text{m}$  période

Résolution : 10  $\mu\text{m}$

1. Spectre abs + émission raies
2. Ombre de la feuille (ém. propre + fluoresc. + test alignement)
3. Spectre BL
4. Spectre BL filtré (calibration du film)

# Point projection spectroscopy (2)



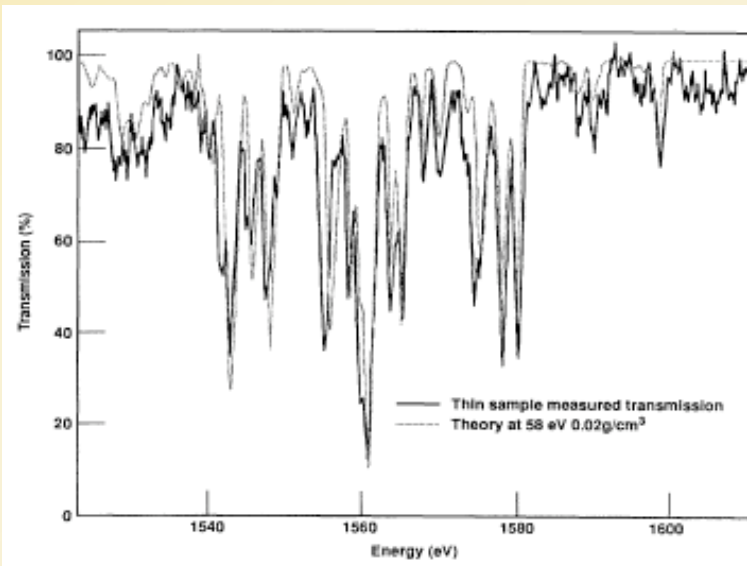
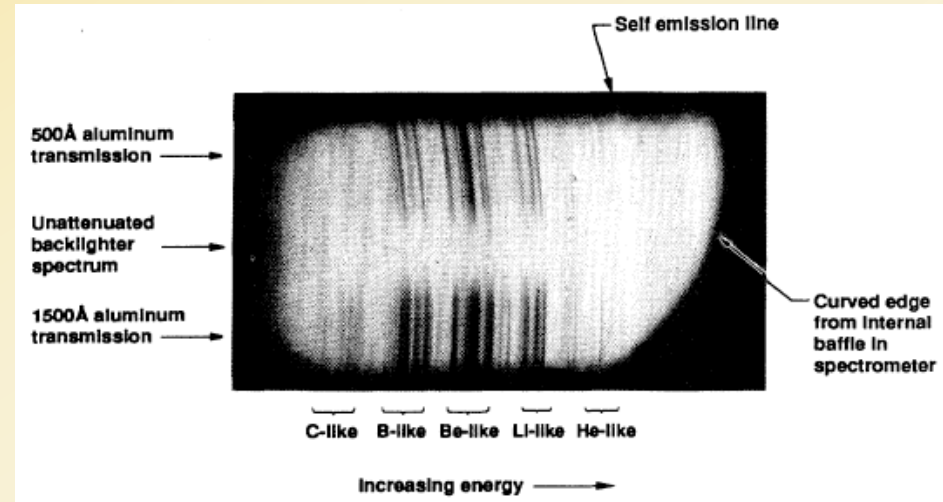
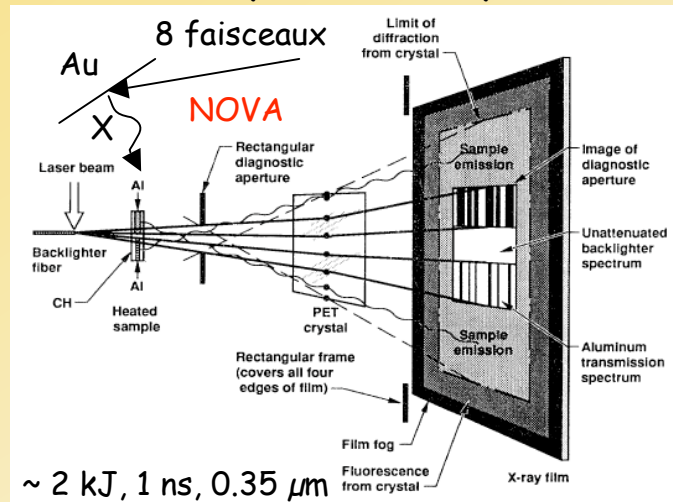
Correction de courbure  
Soustraction de l'émission propre  
Division par l'émission du BL



# Point projection spectroscopy (3)



T. S. Perry et al., Phys. Rev. Lett. 67, 3784 (1991)



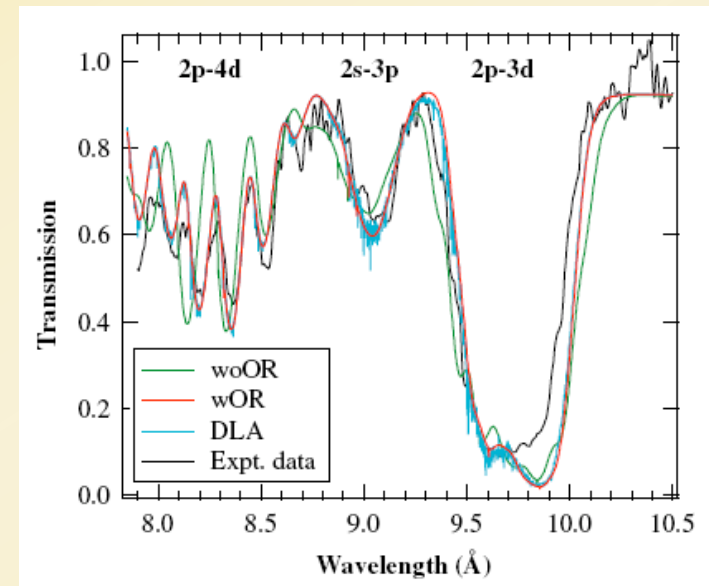
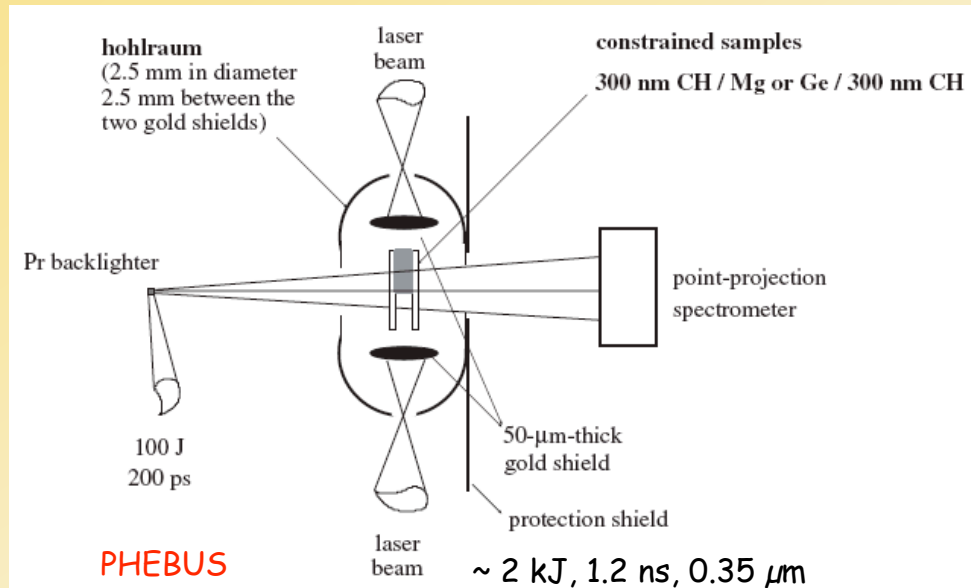
- Densité et température mesurées dans des tirs dédiés : 0.02 g/cm<sup>3</sup>, 58 eV.
- Plasma à l'ETL.
- Comparaison avec le code.



# Point projection spectroscopy (4)



P. Renaudin et al., JQSRT **99**, 511 (2006)



Température estimée via l'absorption de couche K du Mg, et croisée avec les résultats des simulations hydro-radiatives.

Ainsi validés, les calculs hydro-radiatifs sont utilisés pour estimer les paramètres du plasma de Ge :  $T_e = 60$  eV,  $\rho = 0.01$  g/cm<sup>3</sup>.

Les résultats expérimentaux permettent de discriminer entre différents modèles de calculs d'opacité de couche L.

# Facteurs décisifs de la mesure



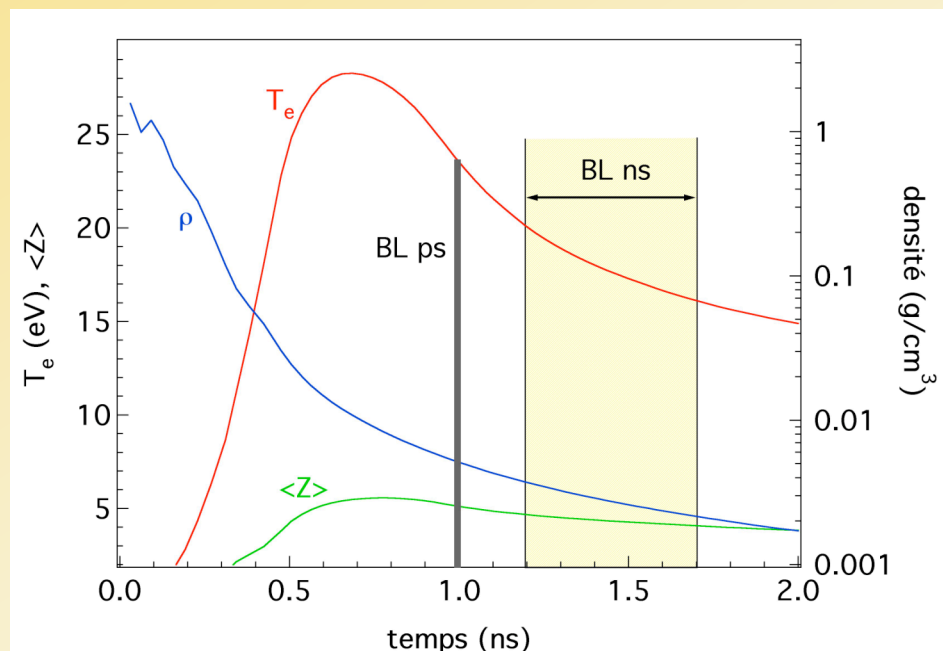
- $I_{BL} > \text{émission propre}$  (signal mesurable)
- Source petite, **courte** (résolution spatiale et temporelle)
- BL plat (détection des structures d'absorption)
- **ETL/HETL** (interprétation des données)
- **Mesure indépendante** des paramètres du plasma



# Effet de la durée du BL



Conditions plasma explorées avec un backlighter (BL) ns ou ps pendant l'expansion de l'échantillon



Simulation de  
l'hydrodynamique radiative  
d'un échantillon  
**C/Al/C (8/40/8  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )**,  
chauffé par la radiation de  
corps noir à  $T_R = 40 \text{ eV}$

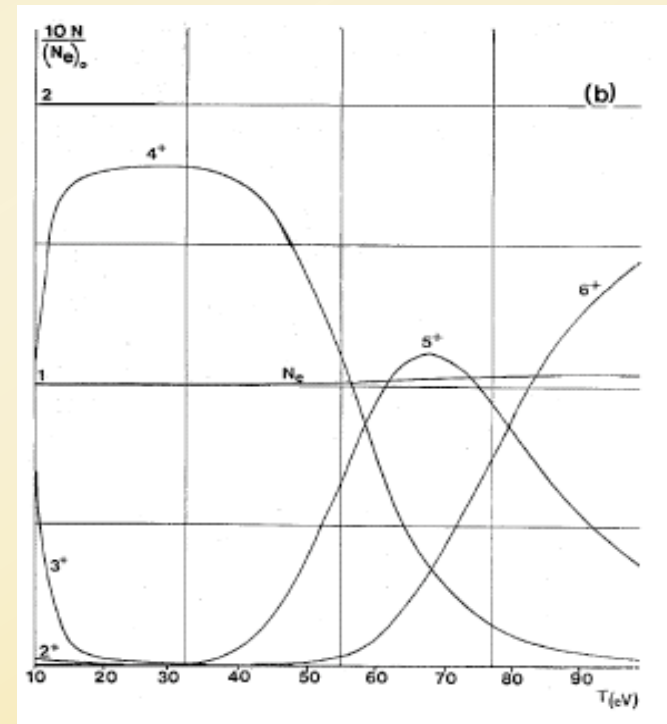
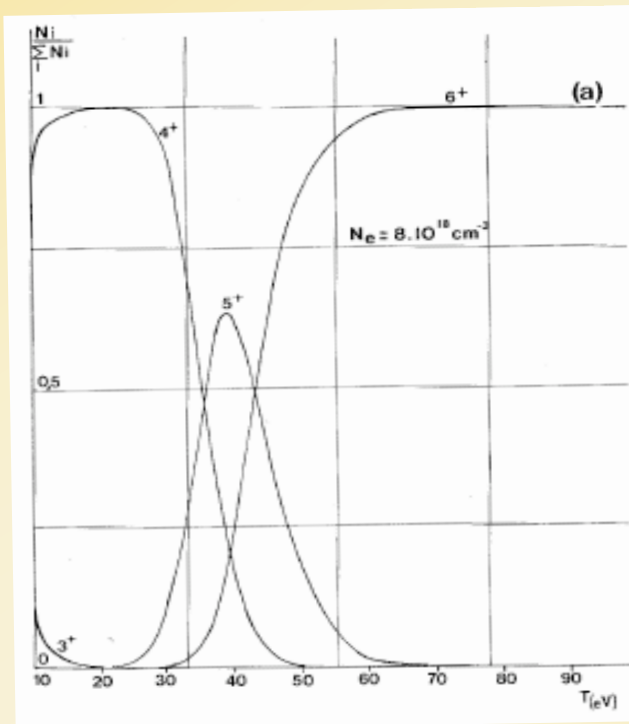
Avec un BL ps, les conditions plasma couvrent une large gamme de densités  
**0.003 à 0.1  $\text{g}/\text{cm}^3$**   
de températures et d'ionisations  
 **$T_e = 15 - 28 \text{ eV}$  et  $\langle Z \rangle = 3 \text{ à } 6$**

# Plasmas ETL et HETL



L'échantillon à sonder peut être créé :

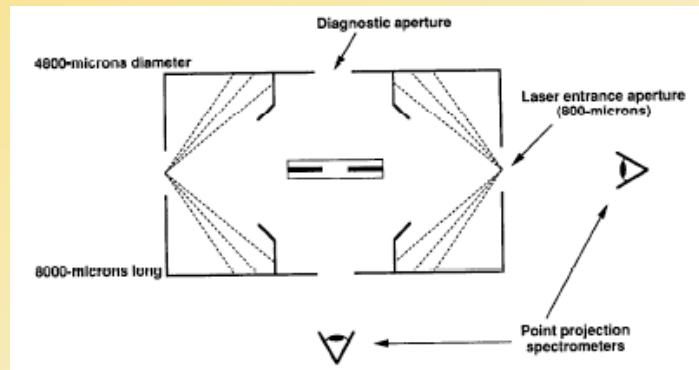
- P. ex. par chauffage « indirect » (réémission des parois d'une cavité = corps noir)  $\Rightarrow$  plasma à l'ETL
- P. ex. par chauffage « direct » par un faisceau laser  $\Rightarrow$  plasma transitoire



A température égale, le plasma est plus ionisé à l'ETL que hors ETL :  
Le processus de désexcitation et recombinaison radiative est négligeable

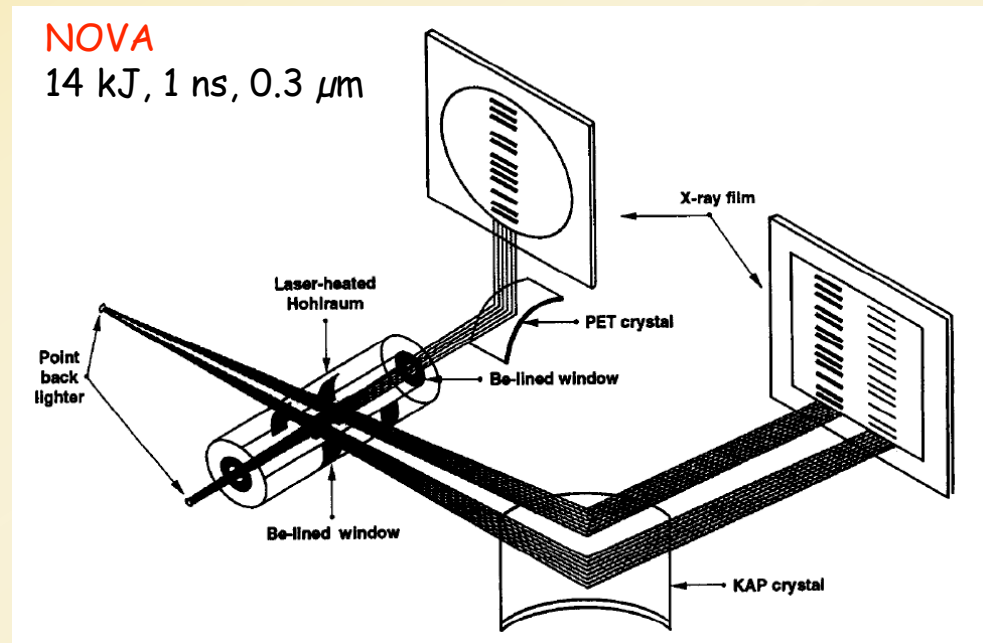
# Mesure indépendante des paramètres plasma

**CAPITALE** pour une interprétation non ambiguë des résultats



T. S. Perry et al., JQSRT **54**, 317 (1995)

Idée : utilisation de mélanges  
comme outils de diagnostic  
de densité et température.



Echantillon : mélange Ge/Al

Mesure de densité :  $\rho = 12 \pm 3 \text{ mg/cm}^{-3}$

L'absorption de l'Al donne la température pour cette densité :

$$T_e = 38 \pm 2 \text{ eV}$$

- Notions de base sur l'absorption
- Différentes techniques expérimentales
- Contraintes expérimentales pour des expériences de « bonne qualité »
- Quelques expériences, plus ou moins récentes

# Différentes techniques expérimentales

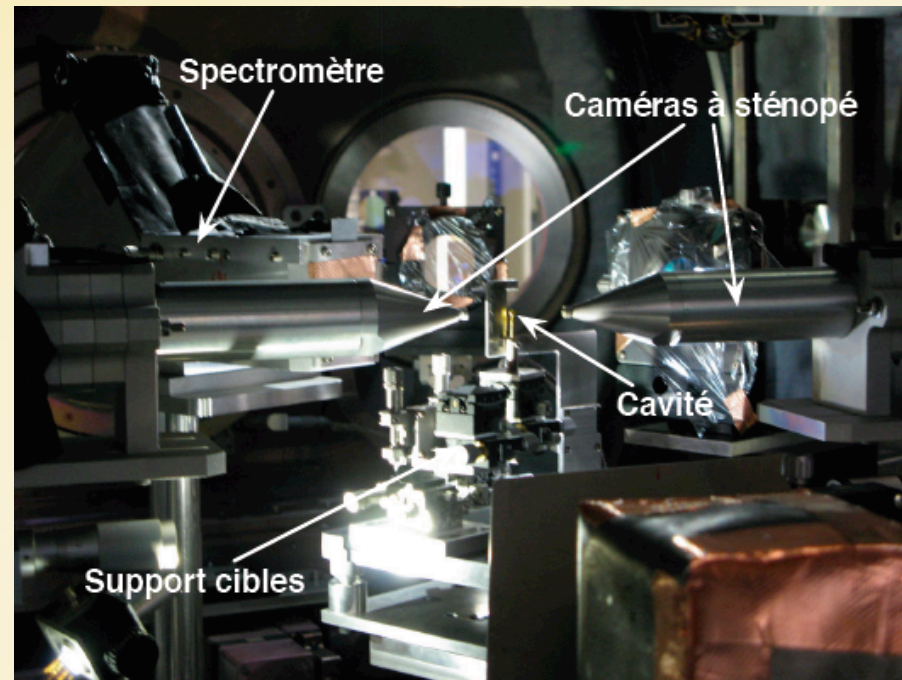
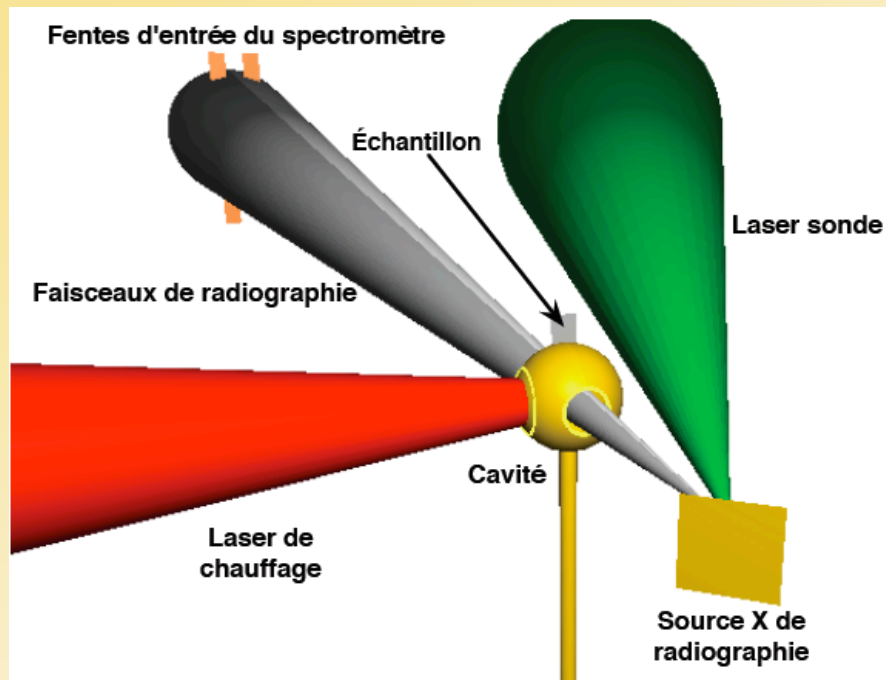


- Attaque indirect, chauffage radiatif,  $T_e < 100\text{eV}$ ,  $\rho = 0.01 \times \rho_{\text{solide}}$ .  
Avantage : ETL, moins de gradients
- Attaque indirect, propagation de l'onde radiative
- Extension du chauffage radiatif à  $T_e$  la + élevée possible
  - cible enterrée,  $I=10^{17}$ , chauffage par les électrons thermiques
  - cible enterrée en profondeur,  $I=10^{21}$ , chauffage par électrons suprathermiques,  $500\text{eV}$ ,  $1\text{ g/cm}^3$
  - chauffage par protons ( $20\text{ eV}$ , densité du solide)
- Impulsions ultra-courtes ( $10\text{ fs}$ ),  $0.5\text{ g/cm}^3$ ,  $100\text{eV}$
- Combinaison de choc et de chauffage radiatif,  $1\text{ g/cm}^3$ ,  $50\text{ eV}$
- P.S. Z-pinch aussi

Clé du succès = mesure indépendante des paramètres plasma



# Chauffage d'un échantillon en attaque indirecte



## PRINCIPE

- Spectrométrie sur deux voies de mesure :
  - BL seul
  - BL à travers l'échantillon
- Mesure de Trad par diodes

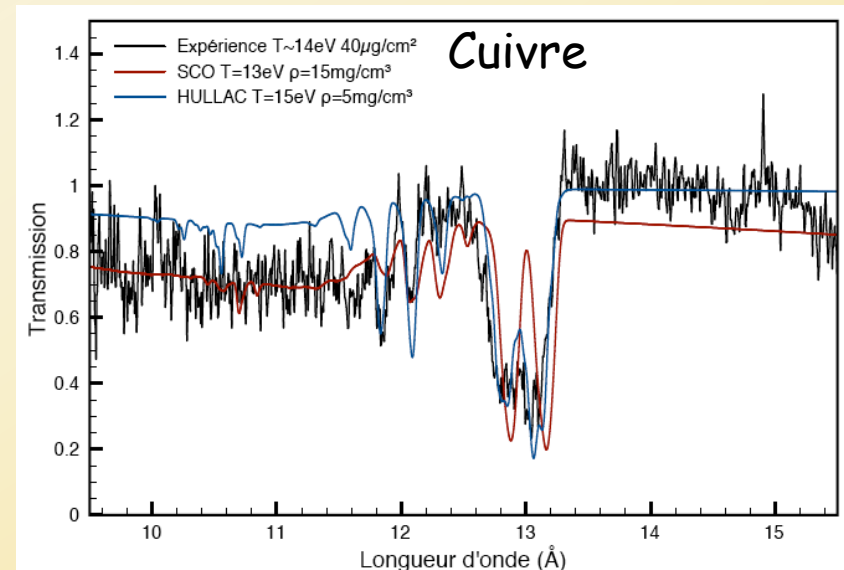
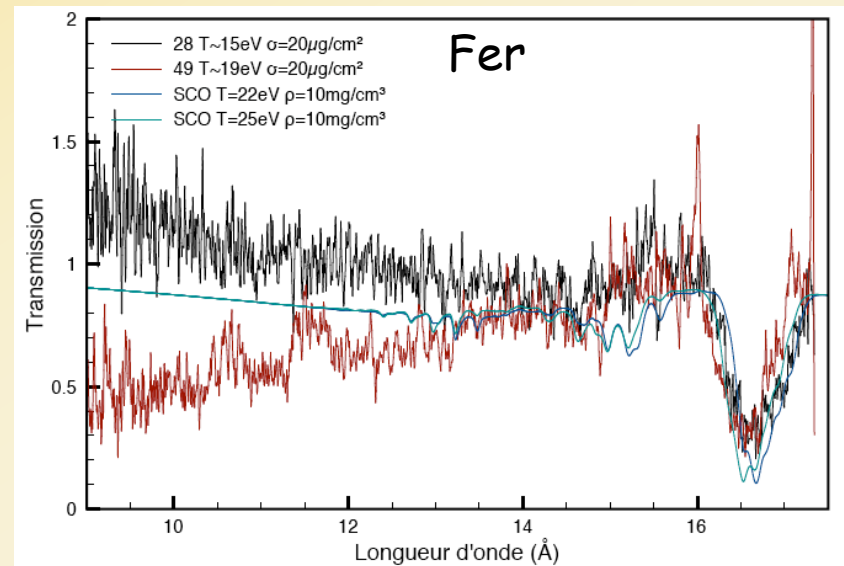
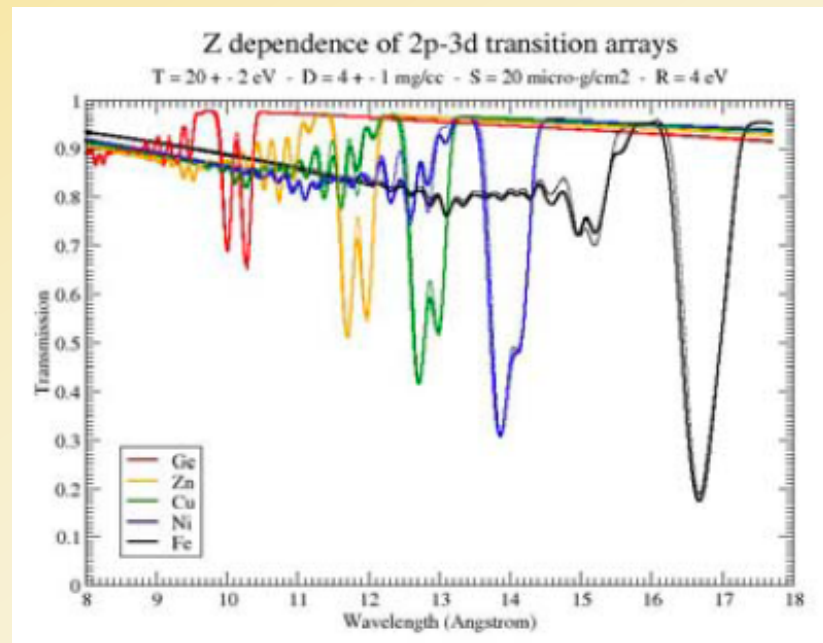
## Installation LULI2000

- Laser de chauffage : 100-200J, 500 ps,  $0.54 \mu\text{m}$
- Laser « sonde » : 10-20 J, 10 ps,  $1.05 \mu\text{m}$ ,  $\Delta t = 1.5 \text{ ns}$
- Cavité : 1.2 mm
- Échantillons : feuilles C/métal/C (métal = Fe, Ni, Cu, Zn, Ge)

# Résultats (très) préliminaires

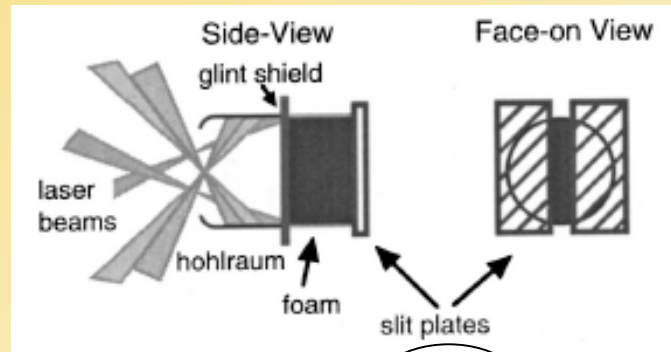


Objectif :  
Mise en évidence expérimentale  
d'une prévision théorique

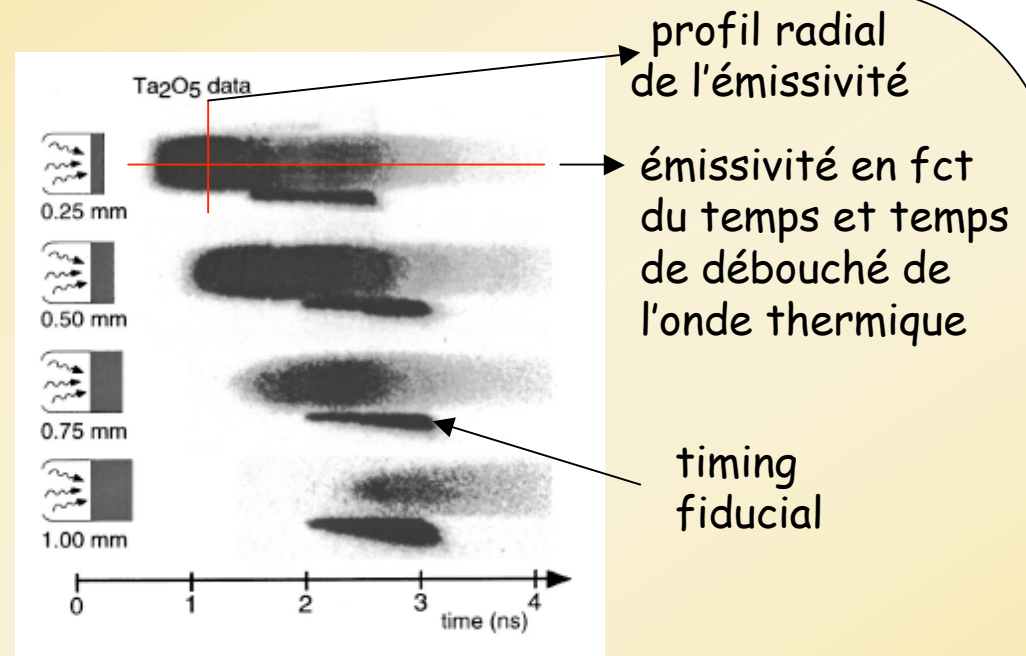




# Attaque indirect, propagation de l'onde radiative



**Omega**, 10 kJ, 2.4 ns, 0.35  $\mu\text{m}$ ,  
 $5 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$   
 $T_r = 190 \text{ eV}$   
2x1.2 ns



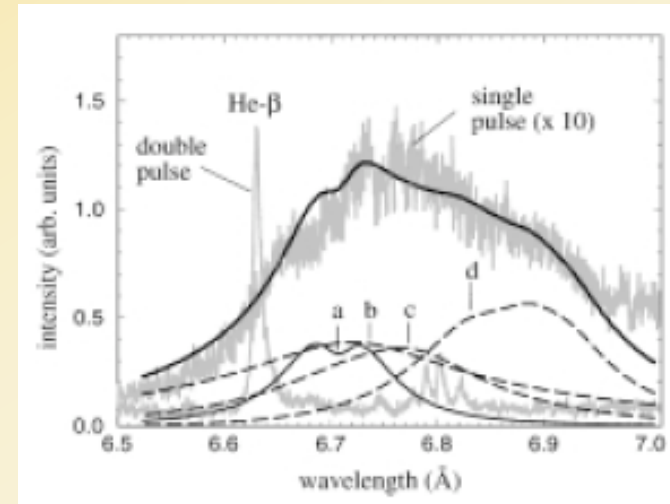
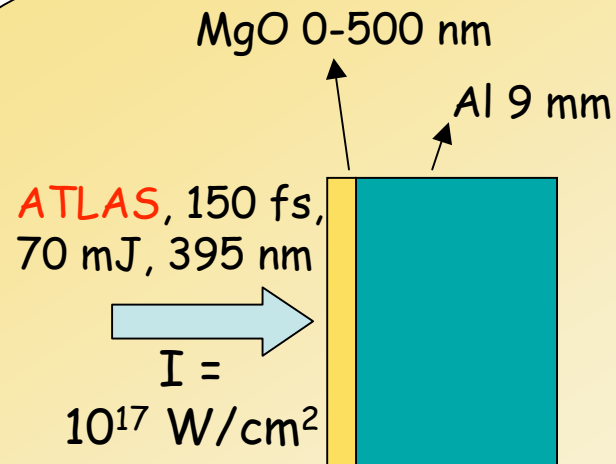
Validation des solutions analytiques de l'équation du transport du rayonnement, validation des modèles d'opacité.

C. A. Back et al., Phys. Plasmas **7**, 2126 (2000)

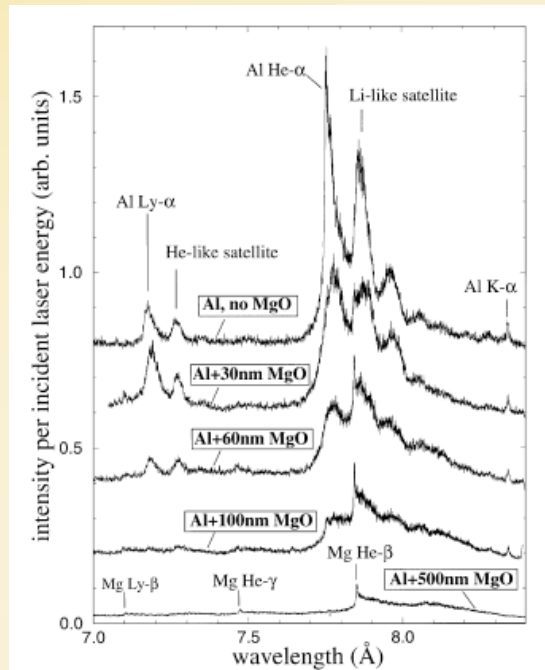
V. J. L. White et al., Phys. Rev. E **49**, R4803 (1994)

T. Afshar-rad et al., Phys. Rev. Lett. **73**, 74 (1994)

# Chauffage par les électrons thermiques



30 nm  
MgO



Le fit des spectres permet de déduire  $n_e = (8 - 10) \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$  et  $T_e = 250 \text{ eV}$ .

Peu de  $K\alpha \Rightarrow$  peu d'électrons rapides dans l'Al  $\Rightarrow$  pas de chauffage « suprathermique ».

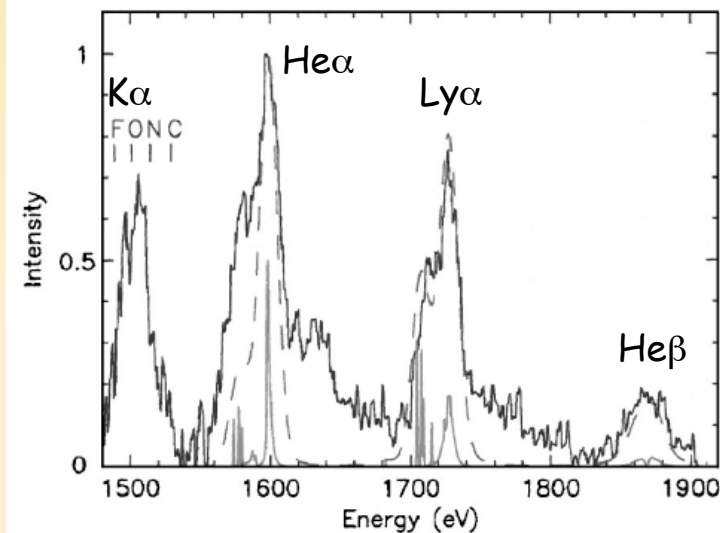
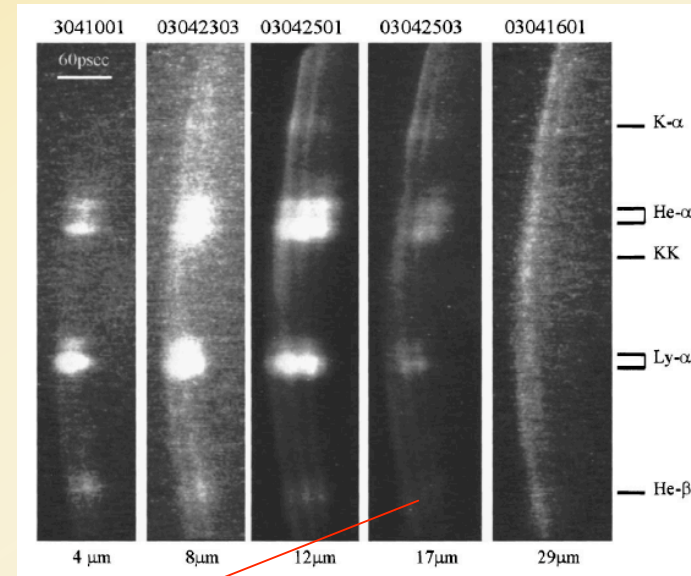
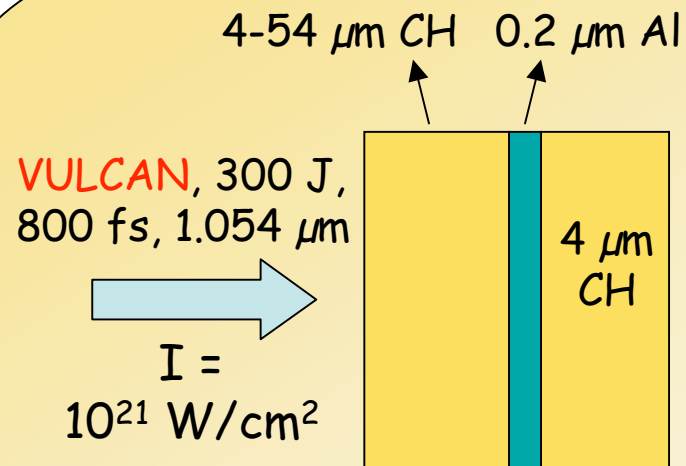
A terme, test de calculs d'opacité intégrée, à l'ETL.

K. Nazir et al. Appl. Phys. Lett. **69**, 3686 (1996)

K. Eidmann et al., JQSRT **65**, 173 (2000)

K. Eidmann et al., JQSRT **81**, 133 (2003)

# Chauffage par les électrons suprathermiques

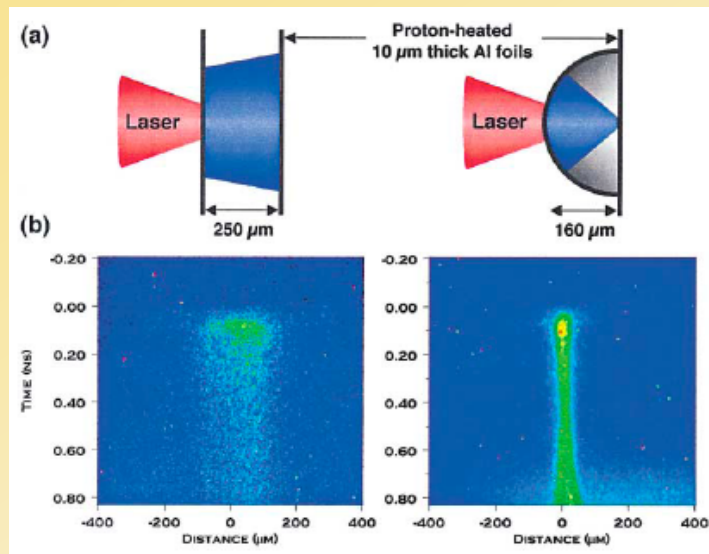


Les simulations effectuées avec FLY donnent  $T_e = 550 \text{ eV}$  et  $n_e = 1 \text{ g/cm}^3$ .

Point délicat : préimpulsion (réduit la pénétration de l'onde de chaleur dans l'Al).

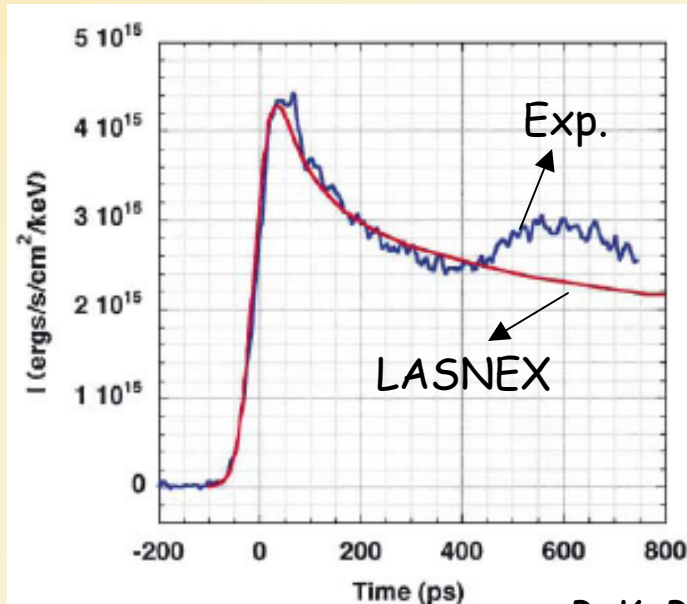
R. G. Evans et al., Appl. Phys. Lett. **86**, 191505 (2005)

# Chauffage par les protons



LASER : JanUSP, 10J, 100 fs, 800 nm,  
 $5 \cdot 10^{18} \text{ W/cm}^2$

Emission (@ 570 nm) de la feuille  
chauffée par les protons



Emission calculée par LASNEX



$T_e = 23 \text{ eV}$  à la densité du solide  
(dans le cas de la cible en demi-  
sphère)

P. K. Patel et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 125004 (2003)

# Chauffage par impulsion ultra-courte

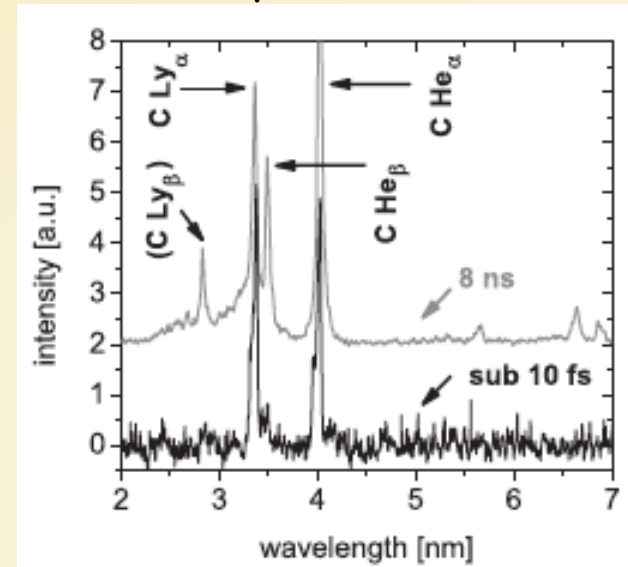


Ti:saphir, 8 fs, 200  $\mu\text{J}$ ,  
 $10^{16} \text{ W/cm}^2$

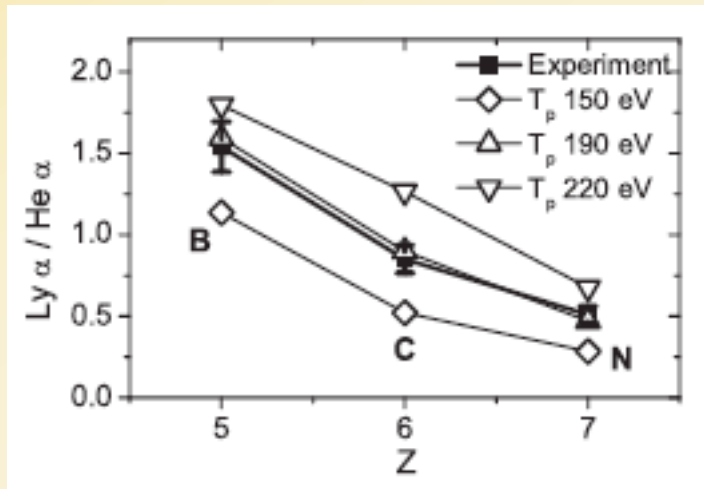
Spectromètre XUV,  
accumulation sur  
 $2-8 \times 10^5$  tirs

BN ou C, 2 mm d'épaisseur

Spectre du C



FLY calculations

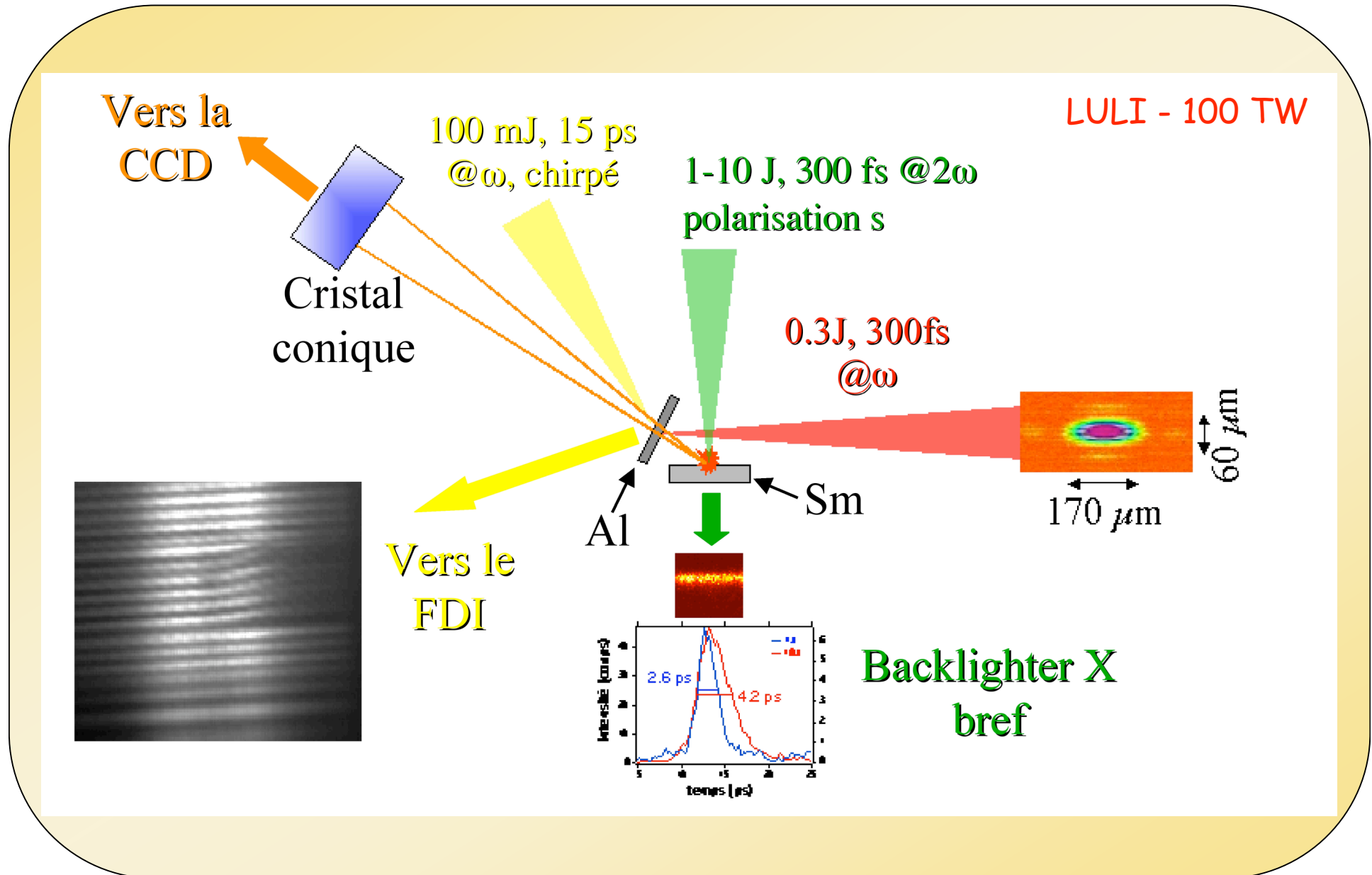


- Pas de Ly $\beta$   $\Rightarrow$  densité entre 0.2 et 1.3 g/cm<sup>3</sup>
- Pas de contribution significative du préplasma
- Pas d'expansion significative pendant l'impulsion laser
- Refroidissement rapide du plasma après l'impulsion

J. Osterholz et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 085002 (2006)



# Mesure de l'ionisation par spectroscopie d'abs.



# Absorption des raies 1s-2p en fonction du temps et de l'espace



$I = 3 \cdot 10^{15} \text{ W/cm}^2$ ,  $e = 50 \text{ nm Al}$

On observe le profil radial des ions de bas état de charge

$\text{Al}^{4+} = \text{F-like}$ ,

$\text{Al}^{5+} = \text{O-like}$

...

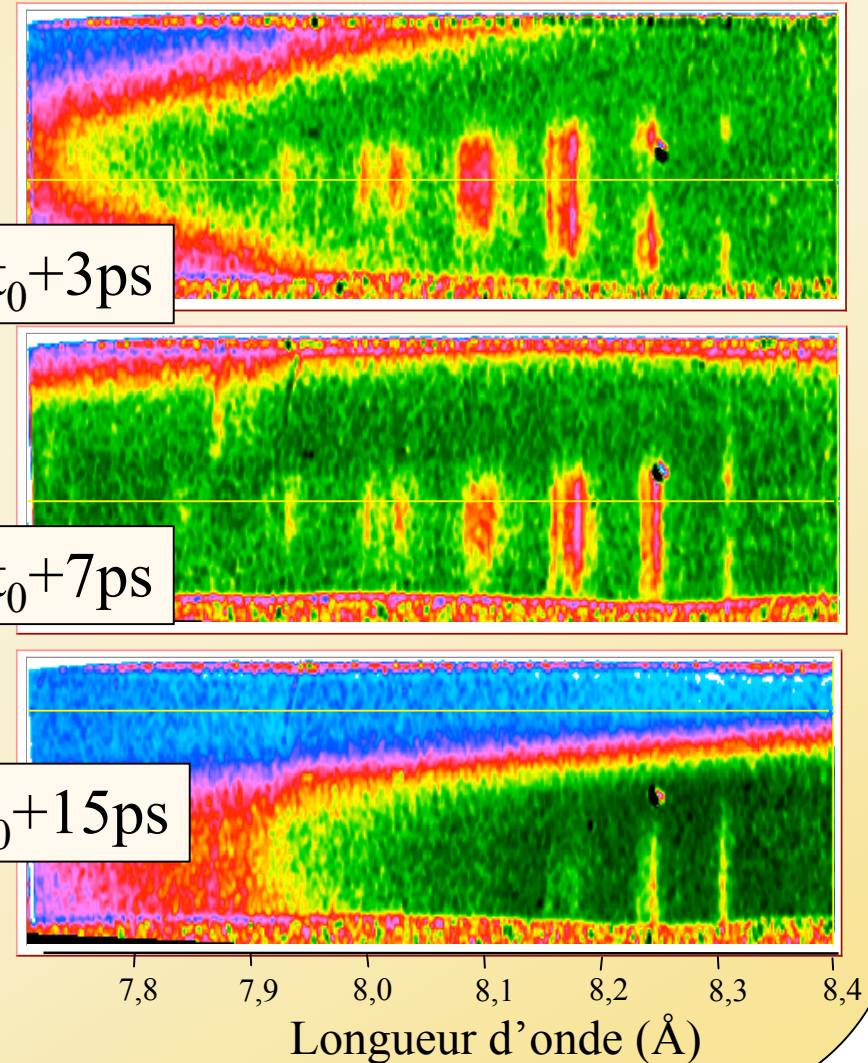
Le plasma est plus ionisé au centre :  $\text{Al}^{4+}$  et  $\text{Al}^{5+}$  disparaissent

Be B C N O F

$t = t_0 + 3 \text{ ps}$

$t = t_0 + 7 \text{ ps}$

$t = t_0 + 15 \text{ ps}$

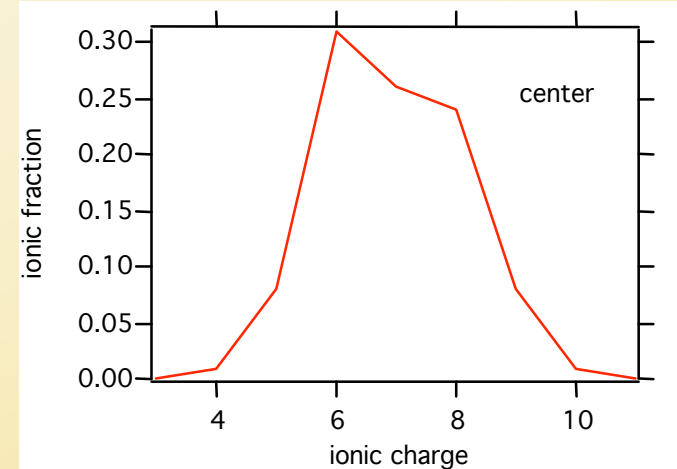
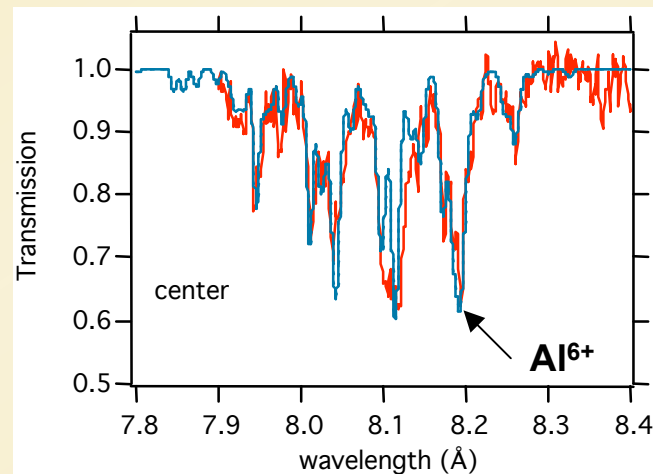
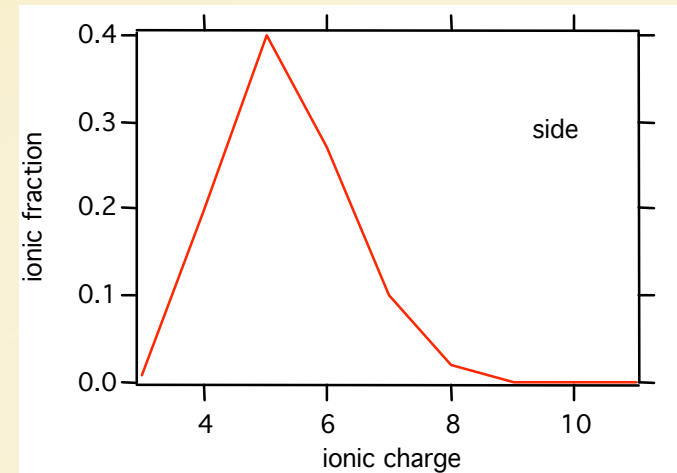
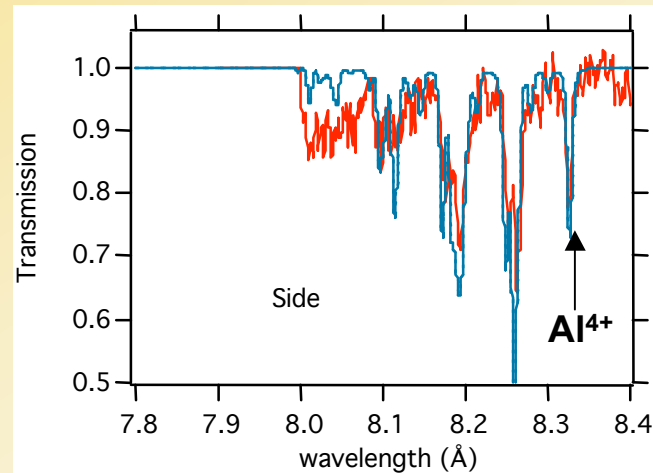
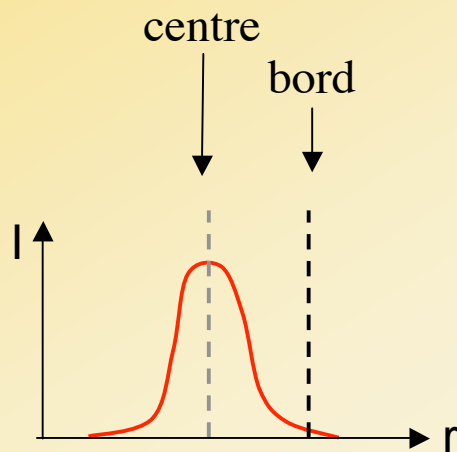




# Spectres en fonction de la position



50 nm Aluminium,  $t=t_0+3$  ps



# Evolution de l'ionisation moyenne



● Mesuré

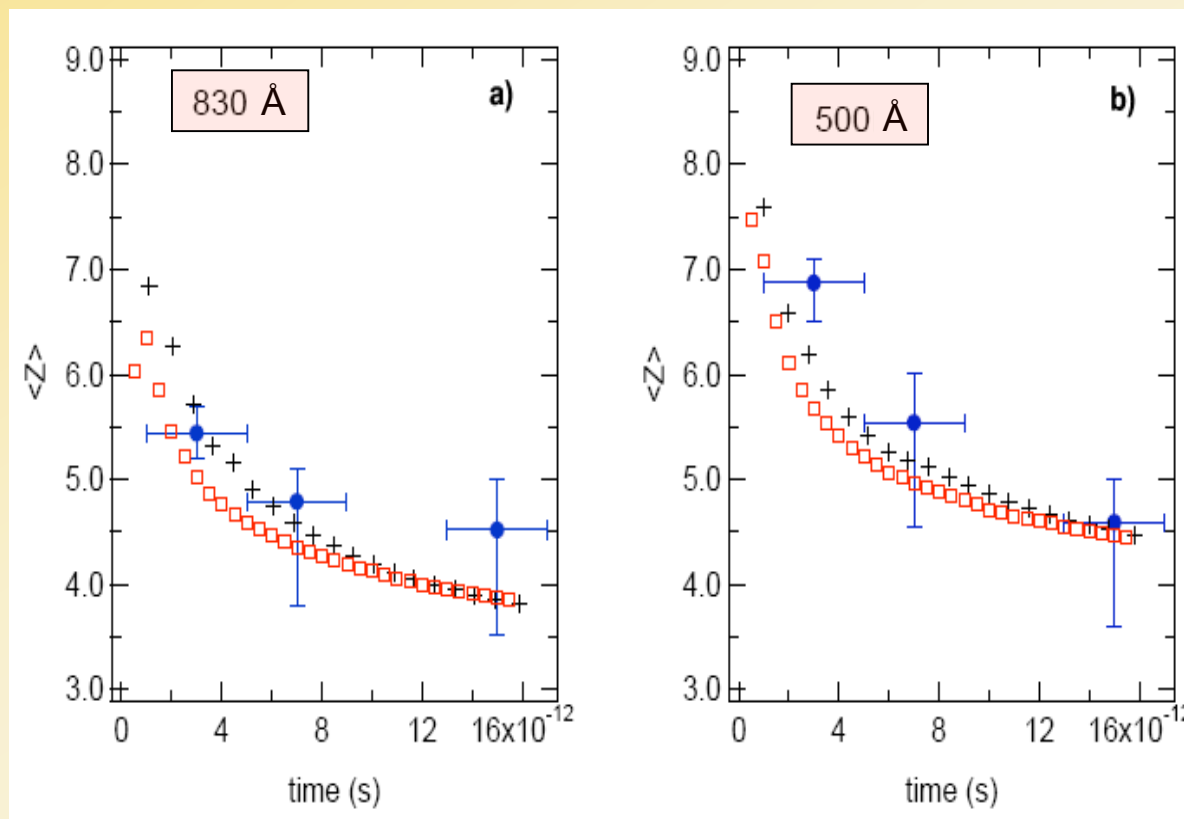
+ Simulation LTE

□ Simulation NLTE



MULTI-fs\* couplé à  
TRANSPEC-AVERROES\*\*

$5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ , 50 eV



- Les résultats expérimentaux sont bien reproduits par un modèle collisionnel-radiatif couplé à un code hydrodynamique radiatif
- Le plasma est en état transitoire, proche de l'équilibre thermodynamique local, du fait de la haute densité du plasma

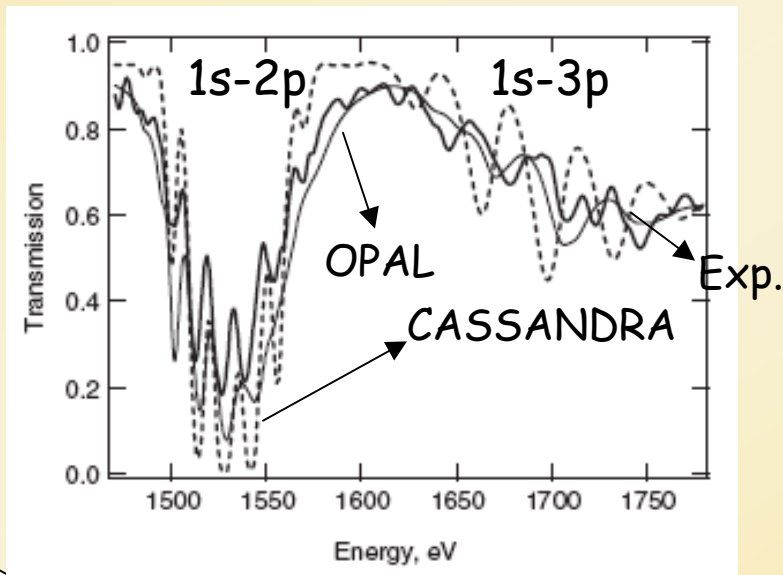
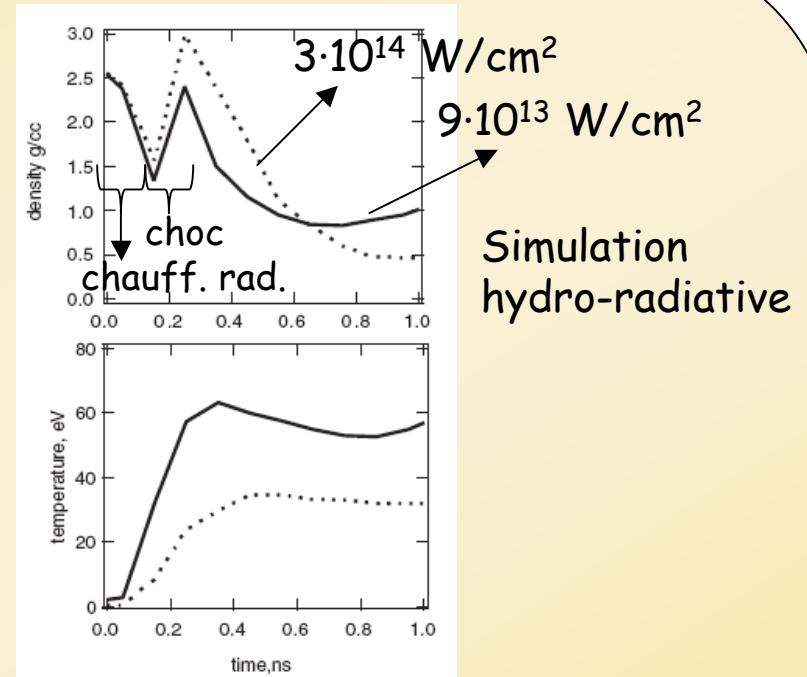
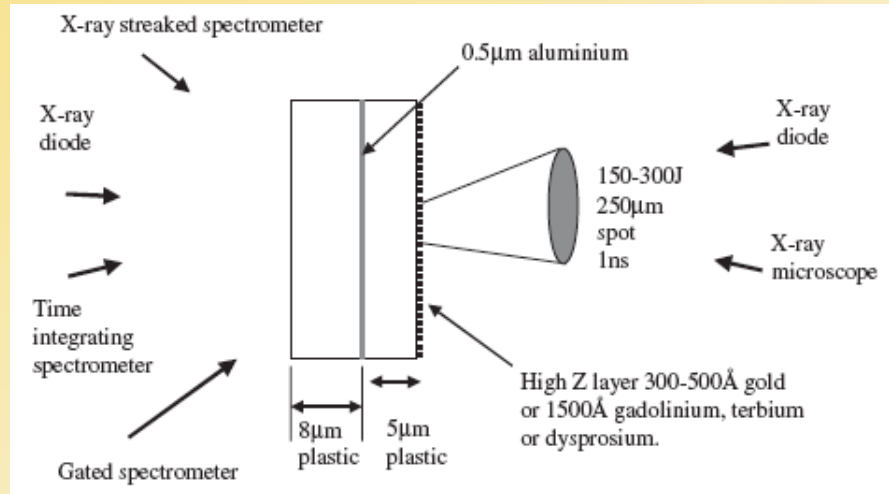
\* K. Eidmann *et al.*, Phys. Rev. E 62, 1202 (2000)

\*\* O. Peyrusse, J. Phys. B 33, 4303 (2000)

P. Audebert *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 025004 (2005)

# Combinaison de choc et de chauffage radiatif

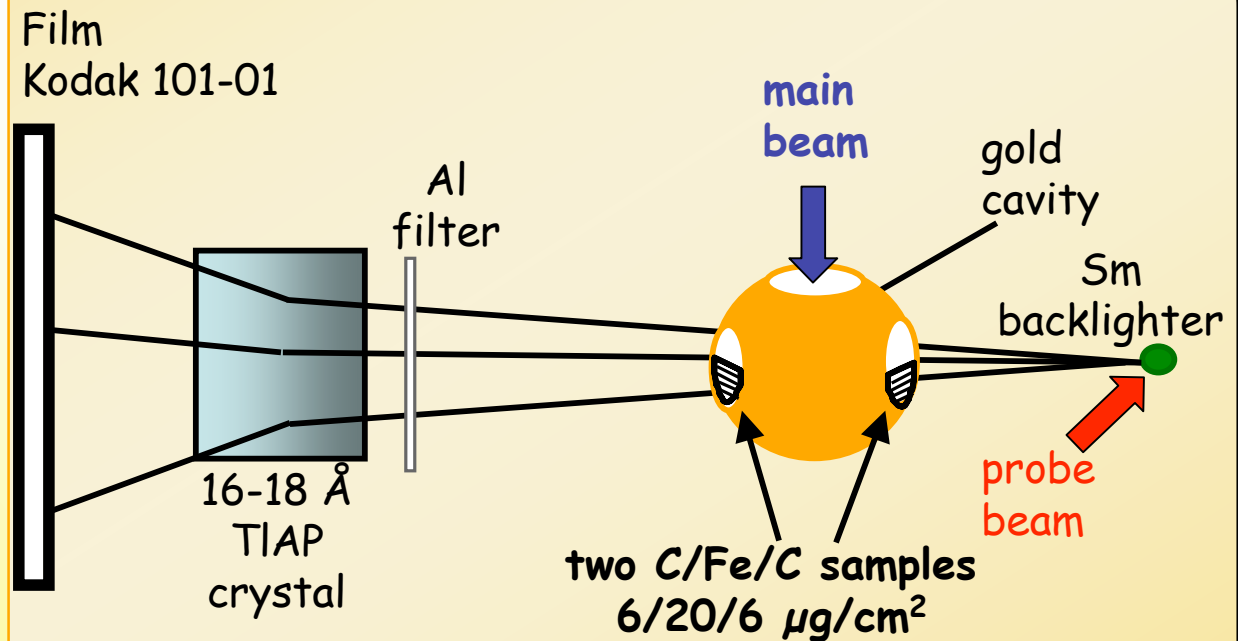
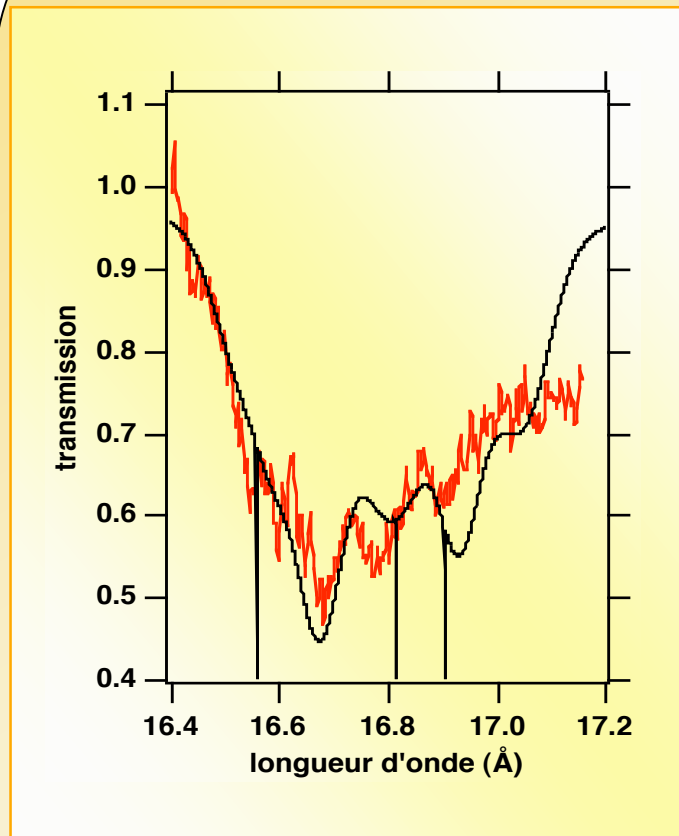
## Laser HELEN



- Mesures d'opacité à  $0.5\text{--}2\text{ g/cm}^3$ .
- OPAL prédit le chevauchement des structures 1s-3p et les ailes des structures 1s-2p.
- Test des calculs d'élargissement par impact électronique.

D. J. Hoarty et al., JQSRT **99**, 283 (2006)

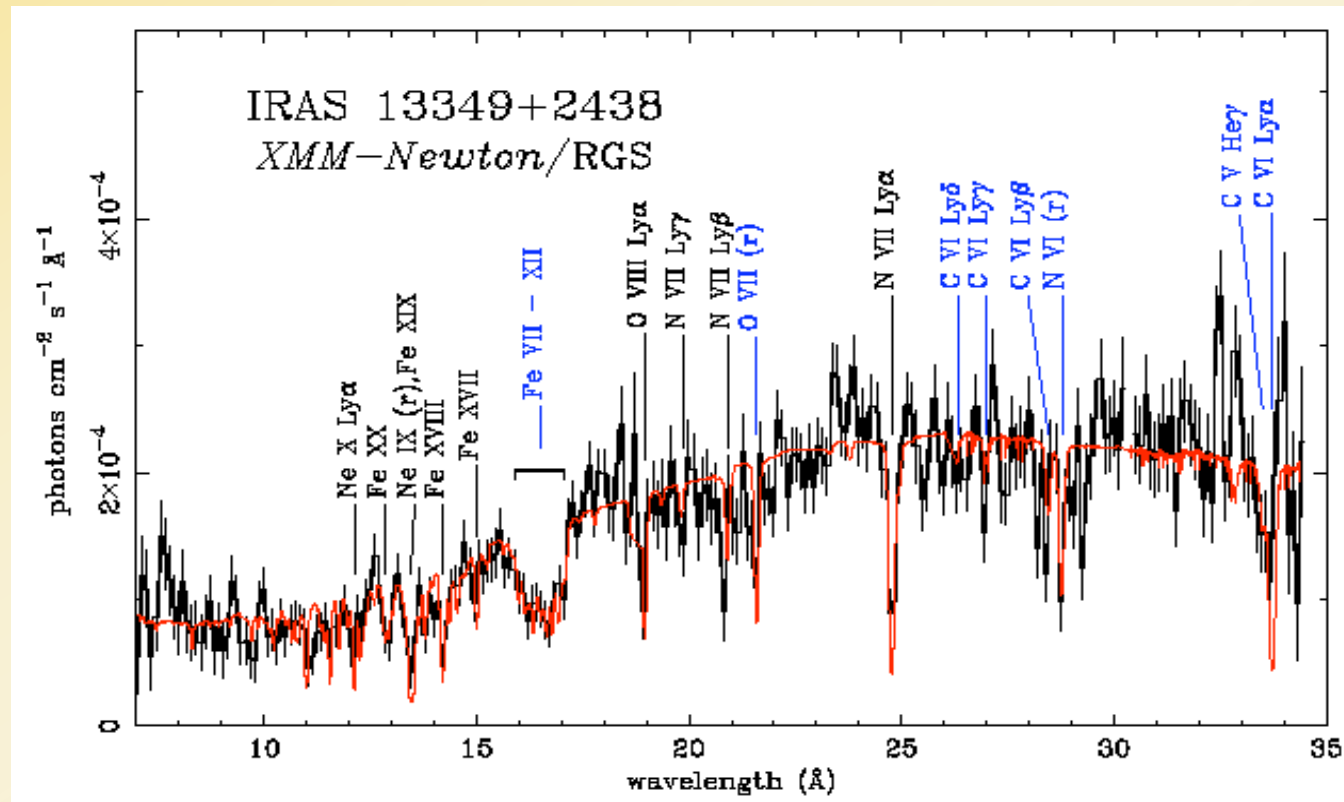
# Mesure de l'absorption en couche L du fer



Main beam : 120 J, 0.44 μm, 400 ps  
Probe beam : 70 J, 1.32 μm, 400 ps, Δt = 800 ps

C. Chenais-Popovics et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **127**, 275 (2000)

# La même structure d'absorption a été identifiée dans un spectre astrophysique



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

# Conclusions - Points à retenir



- Mesure des opacités XUV (transfert radiatif plus efficace) et en particulier des transitions  $\Delta n = 0$  (mais émission propre gênante, et difficulté accrue des mesures).
- Faisceaux ps & ns synchronisés = gamme plus étendue de  $n_e$  et  $T_e$ .
- Meilleure résolution temporelle (exploration de l'échantillon pendant toute la durée de vie du plasma).
- Approche des conditions typiques de l'intérieur du soleil ( $< 0.5 R_\odot$ )...
- ...mais il est essentiel d'avoir un diagnostic indépendant des paramètres hydro du plasma.