



Expériences de mesure d'opacité

Serena Bastiani

Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses

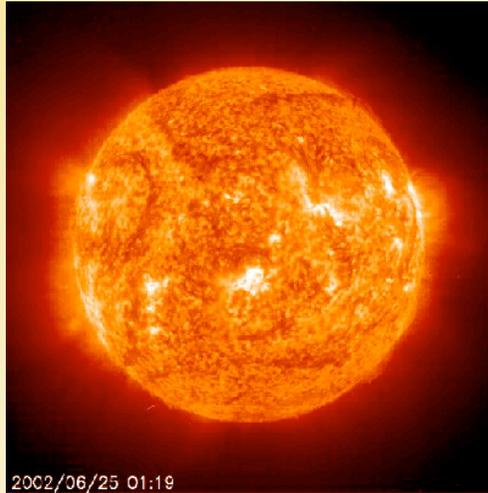
Ecole Polytechnique

Palaiseau

Motivation des mesures d'absorption



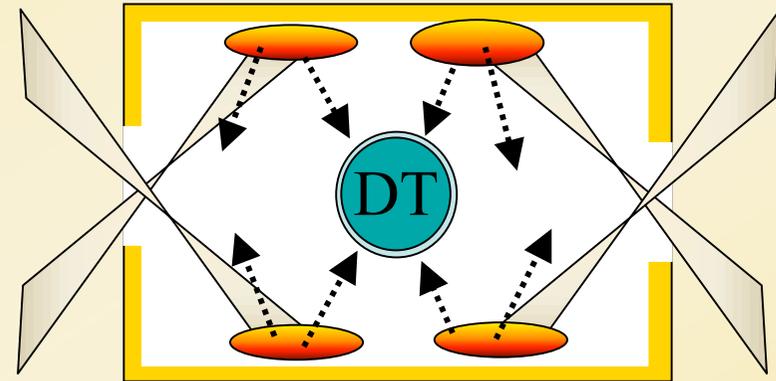
pour la physique stellaire
(cf. cours F. Delahaye)



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.

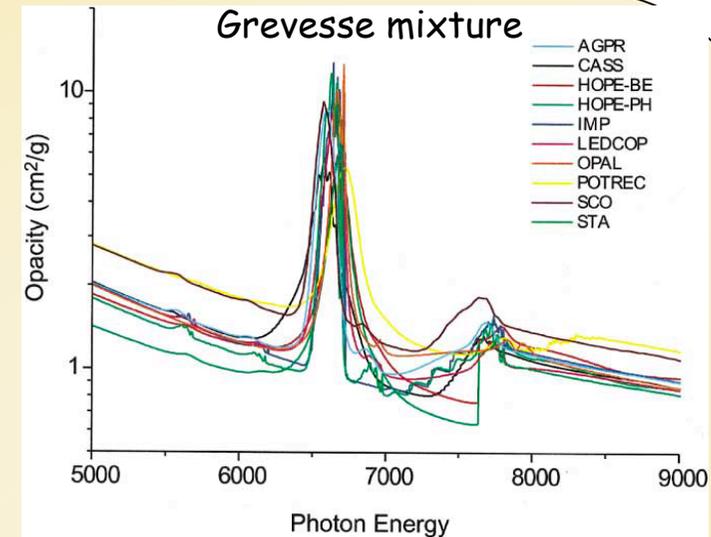
pour la fusion inertielle



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.

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/cm³, mélange de 20 éléments
allants de l'H au Ni

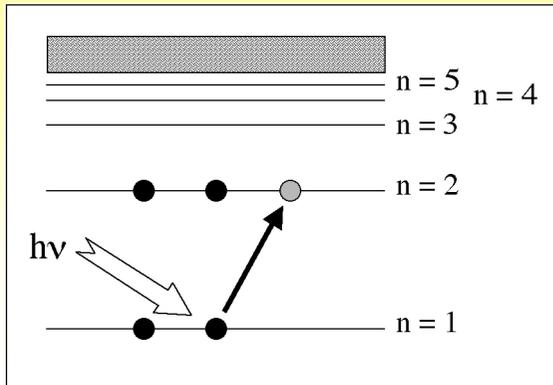
Il y a aller-retour entre expérience et simulations

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

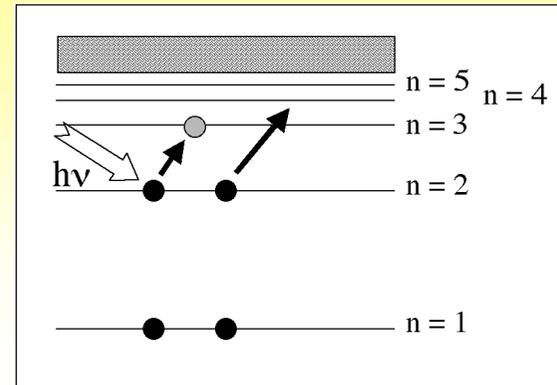
- Simulations **hydrodynamiques radiatives** du plasma.
- Modèles **collisionnels-radiatifs** pour connaître les **populations ioniques**.
- Codes d'**opacités** ou de **structure atomique**
=> **spectres détaillés d'absorption et d'émission**

- 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



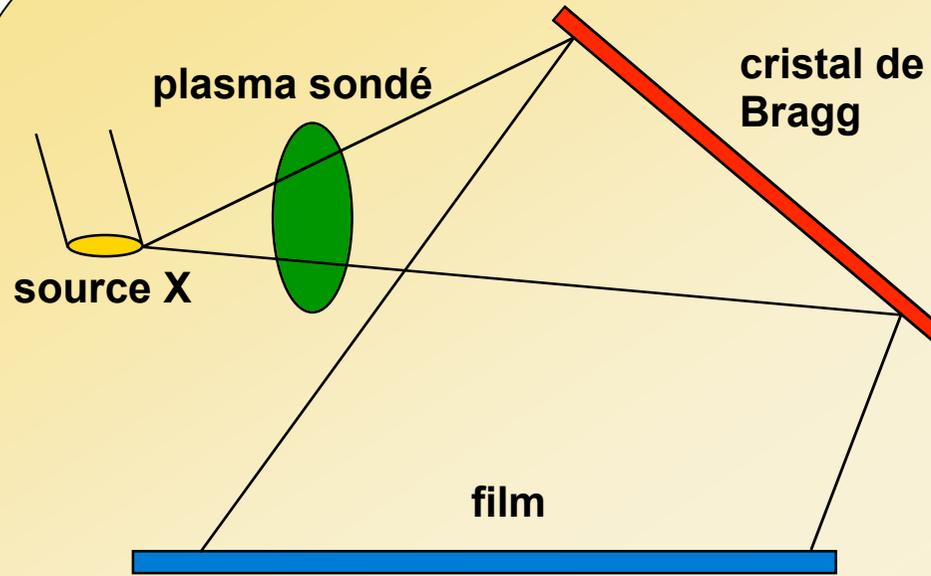
- Un photon d'énergie égale à la différence d'énergie des couches est absorbé et excite un électron de couche $n=1$ vers la couche $n=2$.
- Il faut un trou en couche $n=2$
=> ions fluoroïdes à heliumoïdes



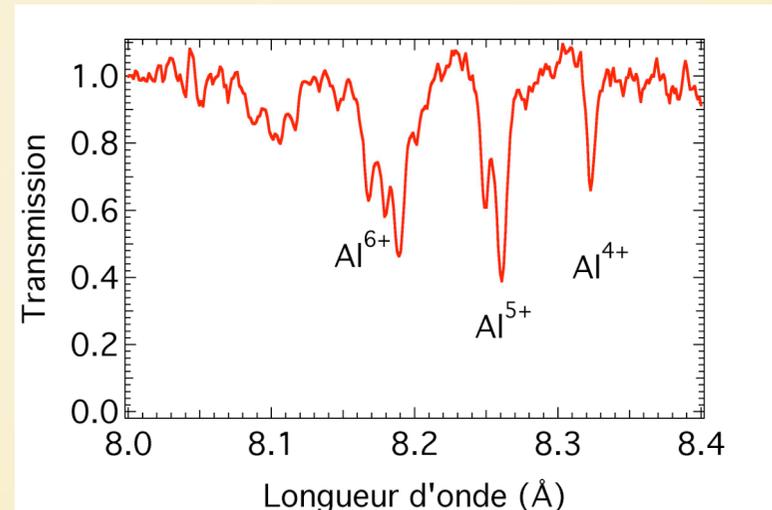
- Une transition de couche 2 vers 3, 4, 5... peut aussi être excitée.
- Des milliers de transitions absorbent :
par ex : **2p-3d, 2p-4d, 2p-4s**

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

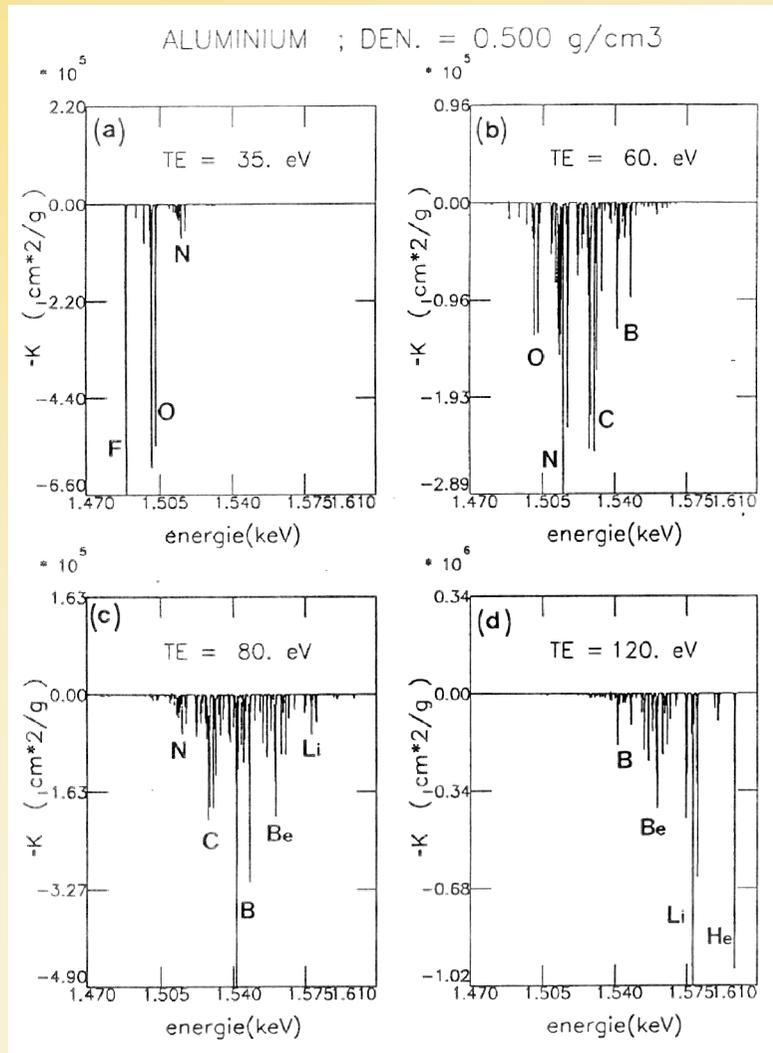


Résolution temporelle : (qq ps - ns)
durée de la source X
Résolution spatiale : (qq 10 μm)
dimension de la source X
parallèlement à l'axe d'observation

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

Al⁴⁺ = F-like

Al⁵⁺ = O-like

Al⁶⁺ = N-like

Al⁷⁺ = C-like

Al⁸⁺ = B-like

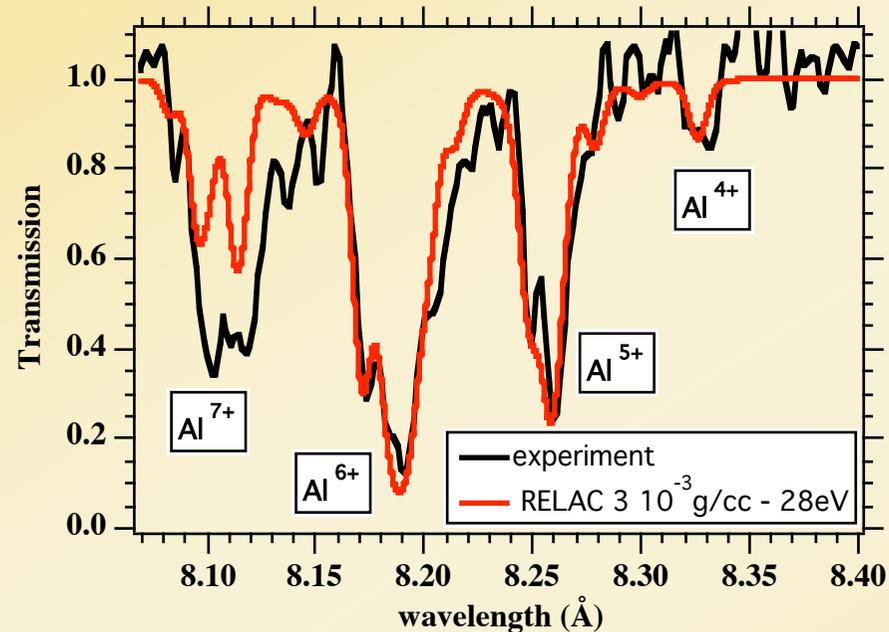
Al⁹⁺ = Be-like

Al¹⁰⁺ = Li-like

Al¹¹⁺ = He-like

Les structures des ions Al⁷⁺ et Al⁸⁺ sont composées d'une centaine de transitions.

Absorption de l'aluminium: mesure de la température



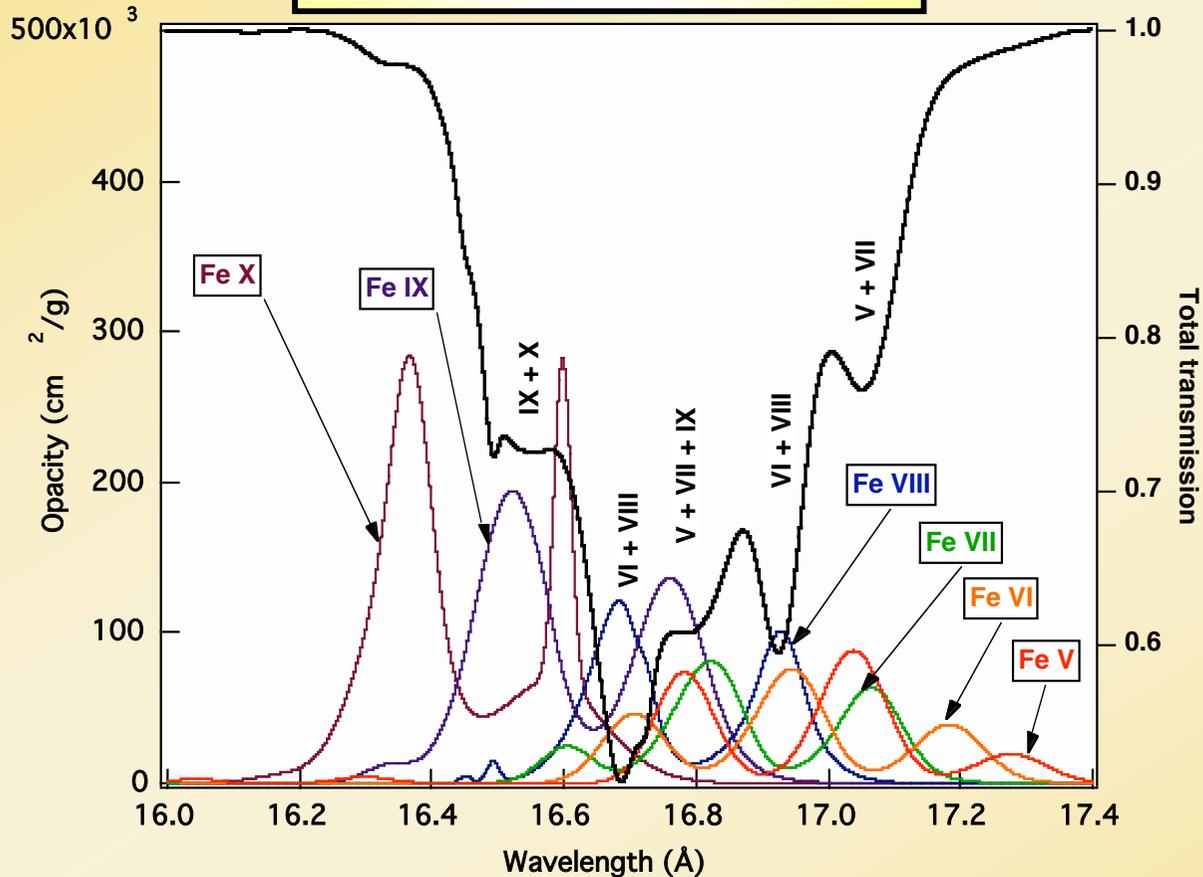
Aluminium $e = 150$ nm
 $\langle Z \rangle = 6.1$, $T_e = 28$ eV
16% Al⁵⁺, 55% Al⁶⁺, 26% Al⁷⁺

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

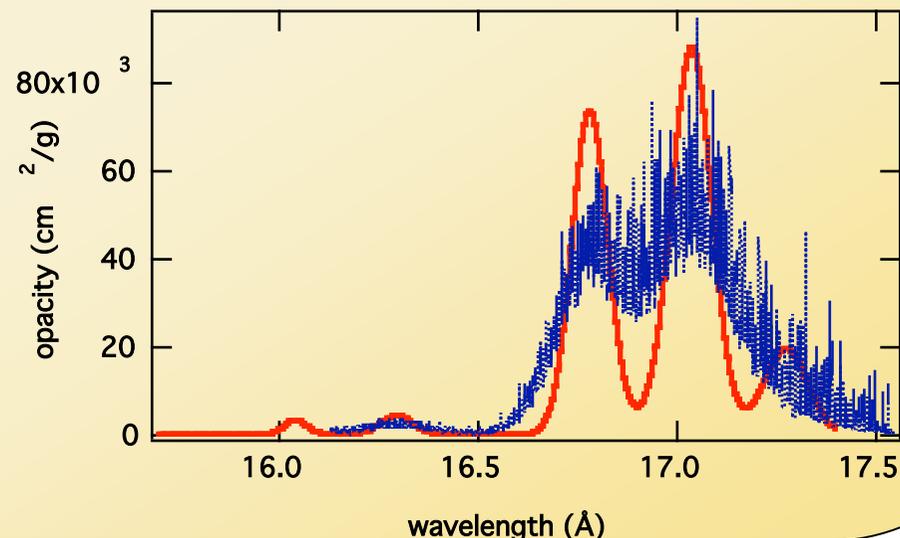
Éléments légers : aluminium, magnésium, chlore

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).



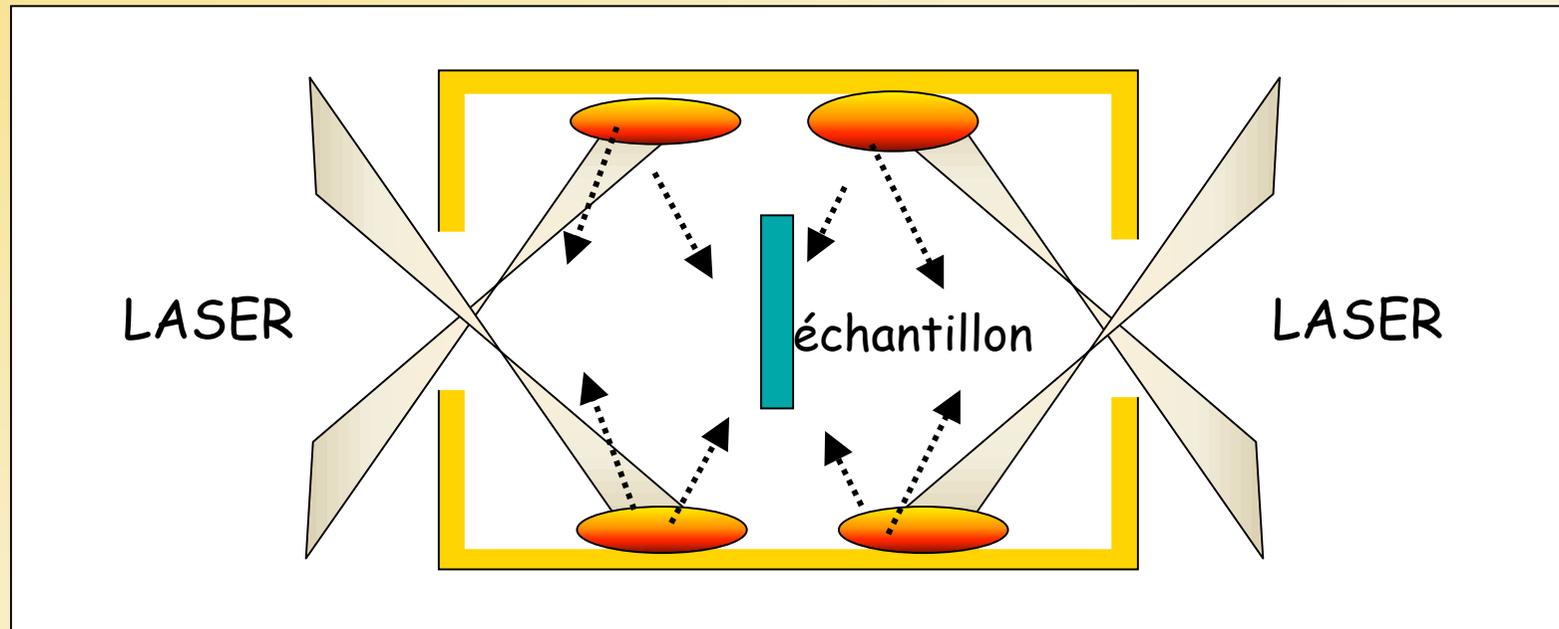
Notions de base sur l'absorption

Différentes techniques expérimentales

Contraintes expérimentales pour des expériences de
« bonne qualité »

Quelques expériences, plus ou moins récentes

Attaque indirecte : chauffage radiatif



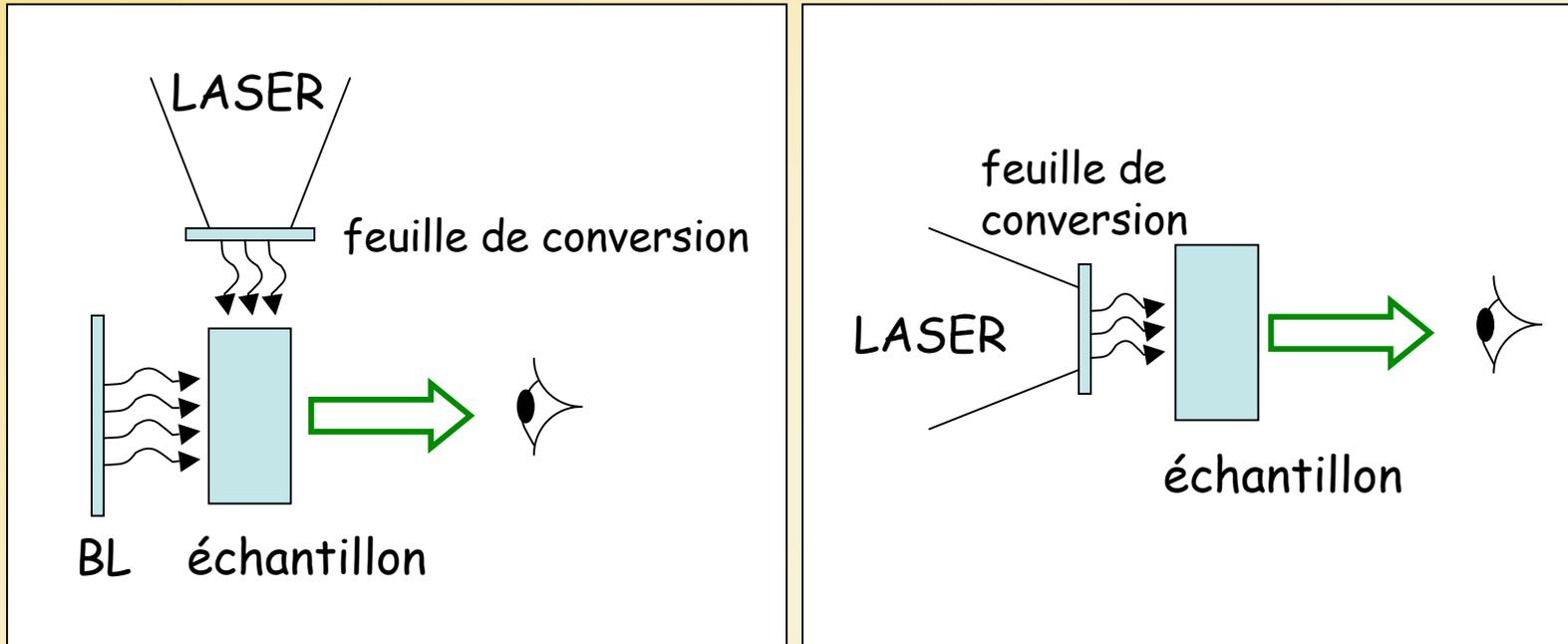
$T_e < 100 \text{ eV}$, $\rho = 0.01 \times \rho \text{ solide}$

Mesure de l'opacité spectrale :

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

Avantage : ETL, moins de gradients

Attaque indirecte : propagation de l'onde thermique



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

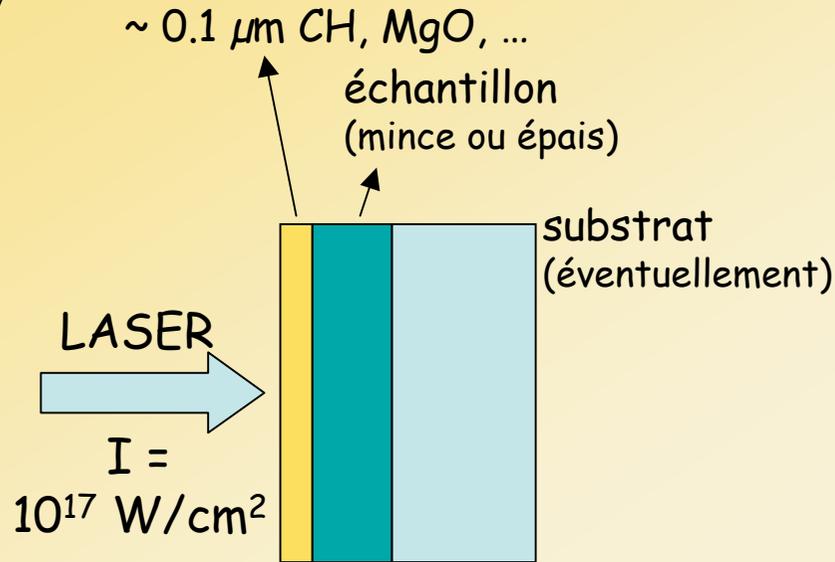
Mesure de l'opacité de Rosseland :

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

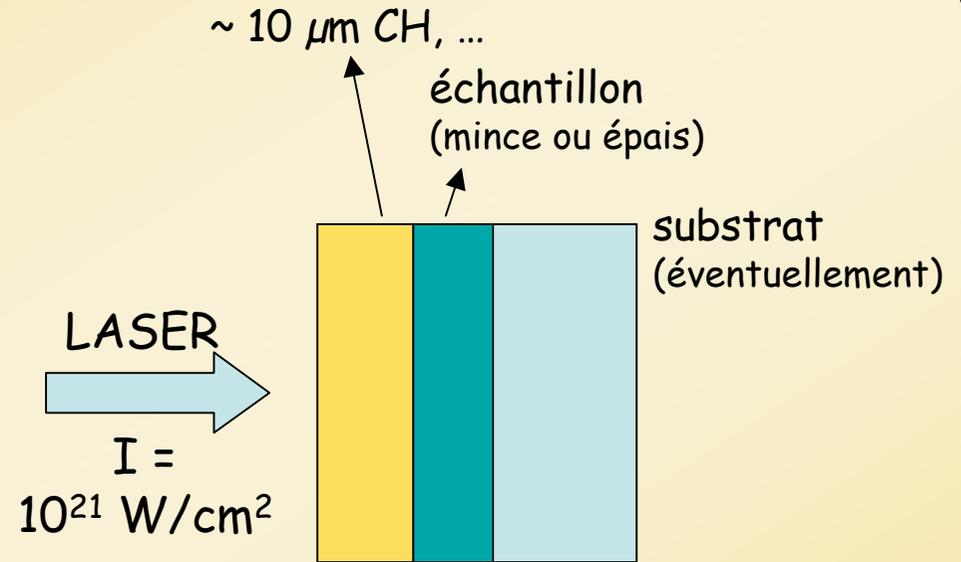
Chauffage par les électrons ou les protons



- 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^3

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

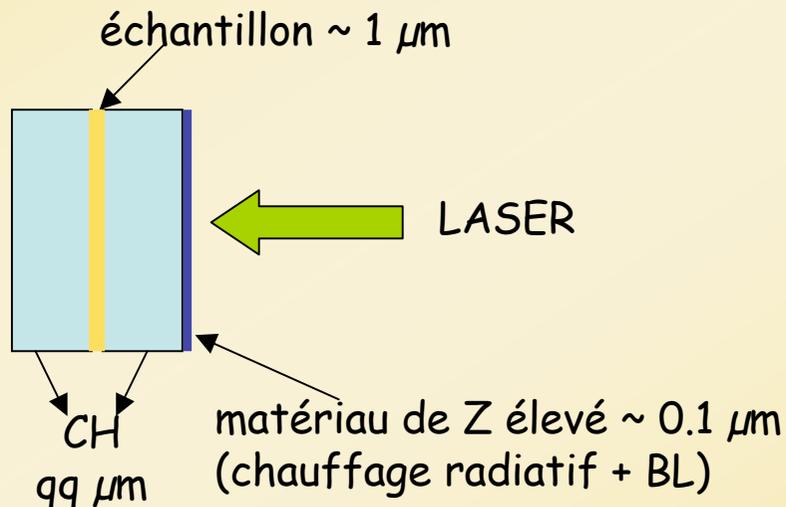
Autres techniques récentes



- 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 g/cm³, 200 eV

- Combinaison de choc et de chauffage radiatif



1 g/cm³, 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)

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

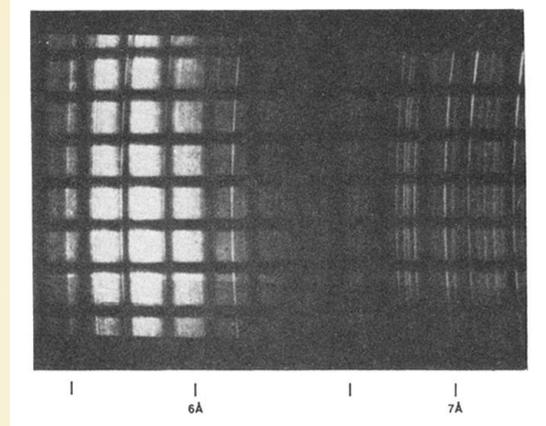
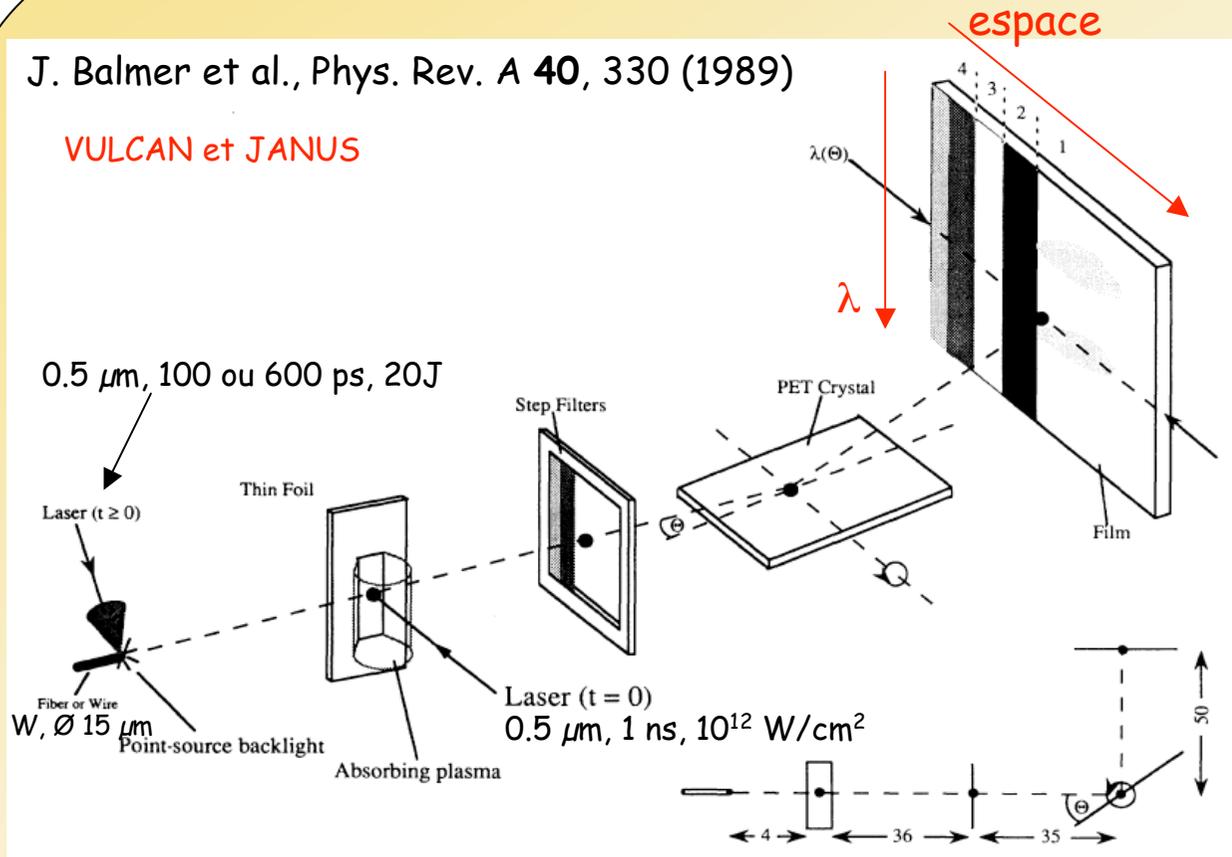
Mesure sur tirs laser différents introduit généralement des fluctuations redoutables

Point projection spectroscopy (1)



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

VULCAN et JANUS

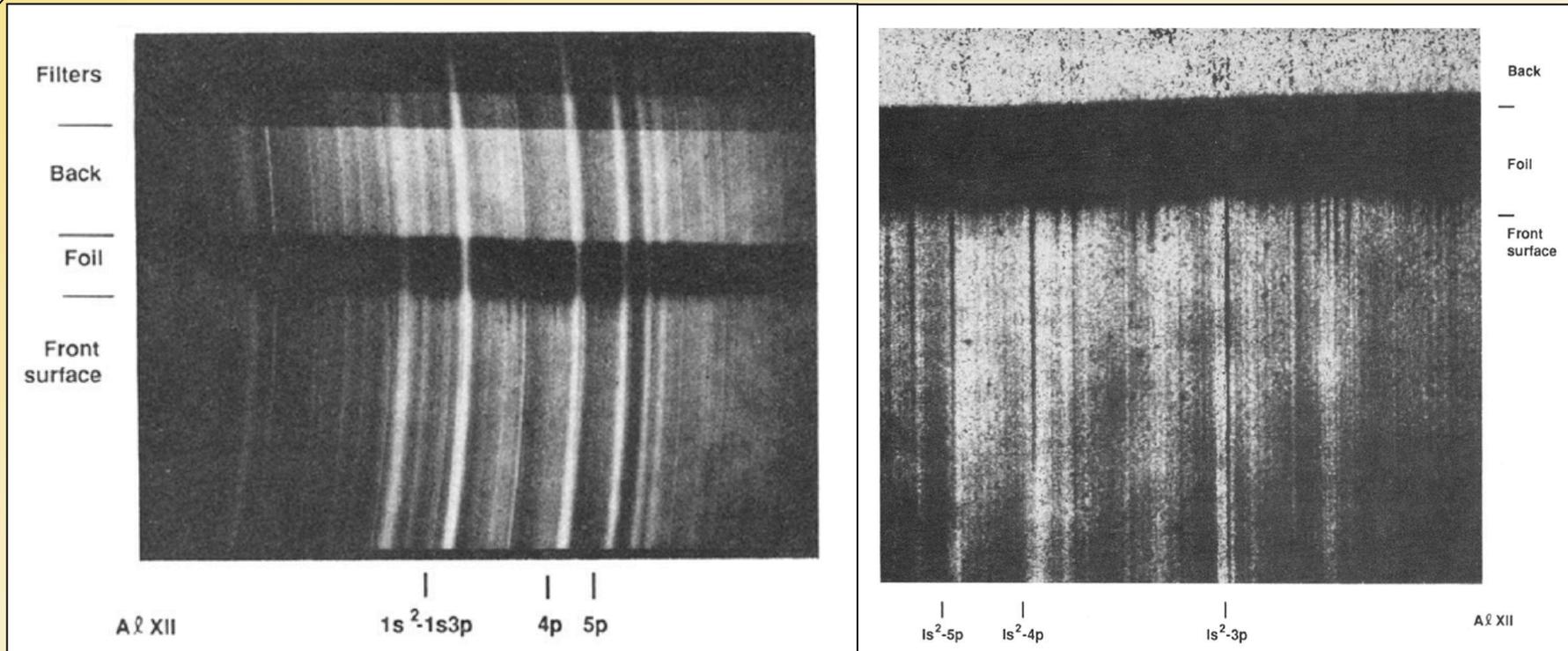


Grille : fils 30 μm diamètre
et 120 μm période

Résolution : 10 μm

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)



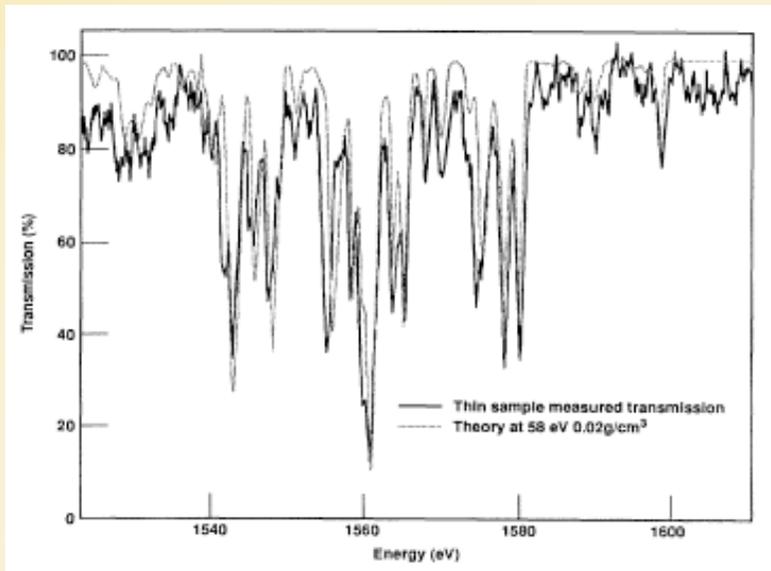
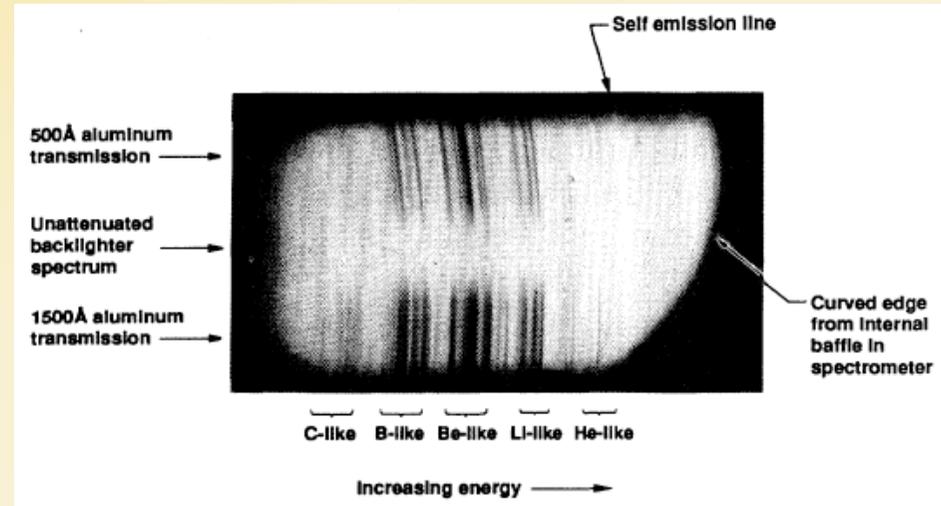
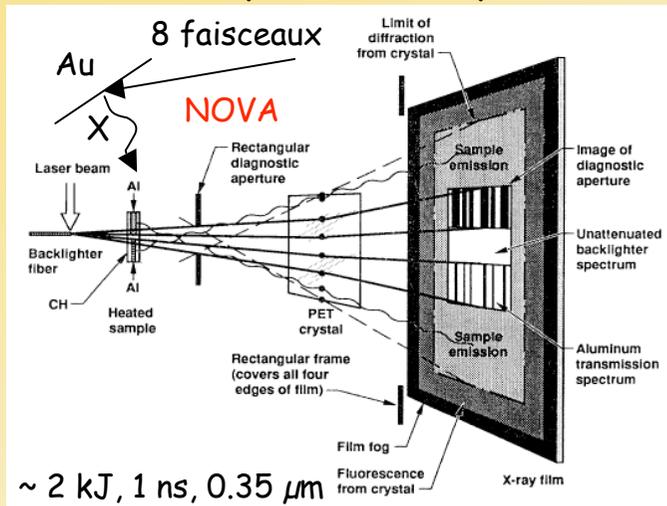
Correction de courbure
Soustraction de l'émission propre
Division par l'émission du BL



Point projection spectroscopy (3)



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

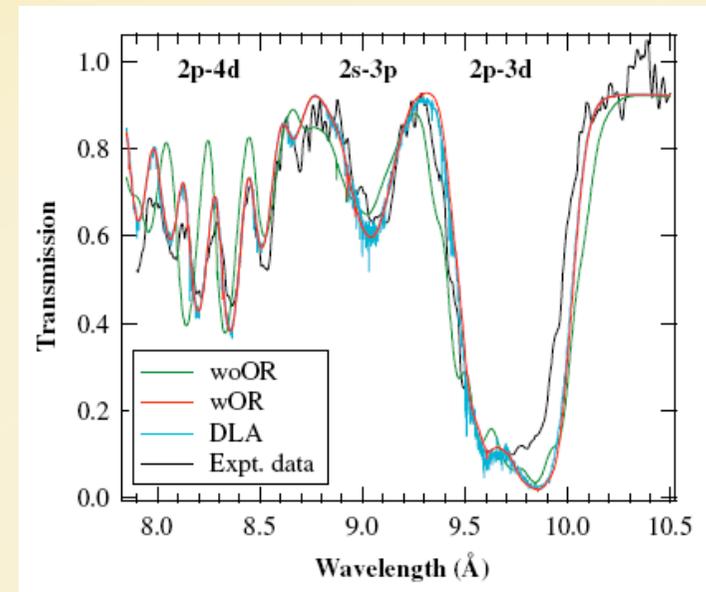
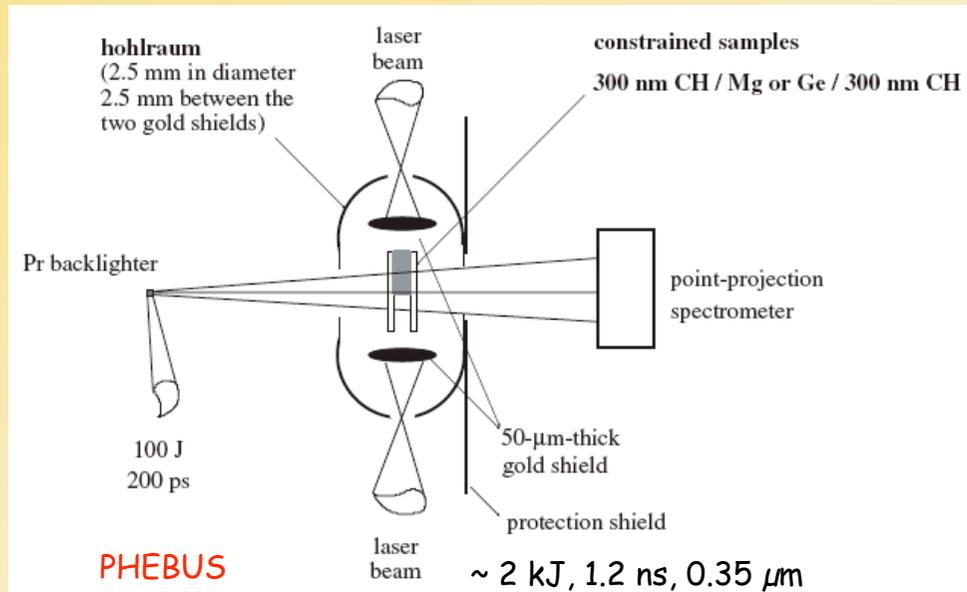


- Densité et température mesurées dans des tirs dédiés : 0.02 g/cm^3 , 58 eV.
- Plasma à l'ETL.
- Comparaison avec le code.

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 : $T_e = 60 \text{ eV}$, $\rho = 0.01 \text{ g/cm}^3$.

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

Facteurs décisifs de la mesure

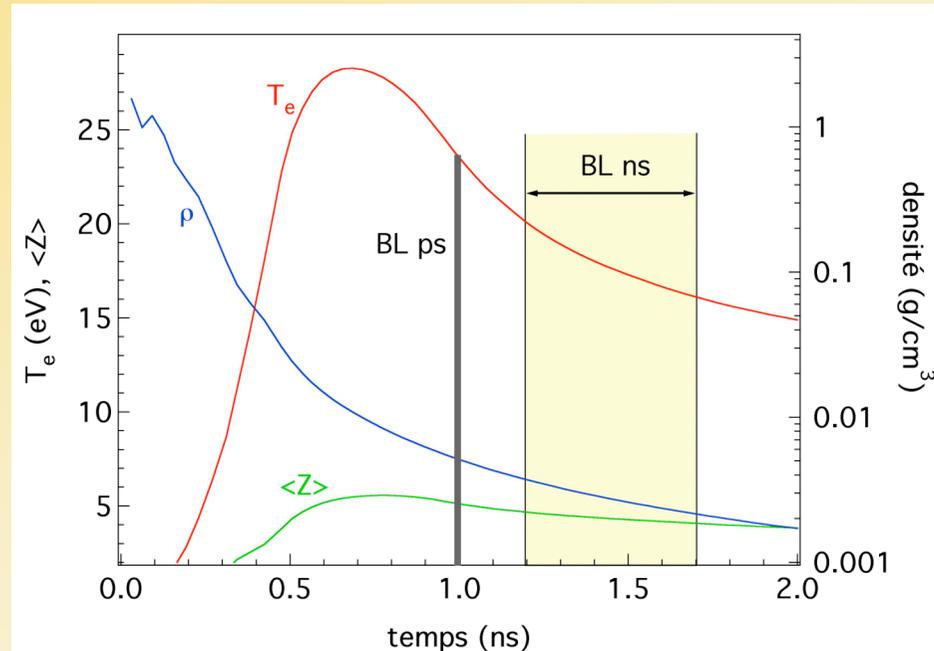


- $I_{BL} > \text{émission propre}$ (signal mesurable)
- Source petite, **courte** (résolution spatiale et temporelle)
- BL plat (détection des structures d'absorption)
- **ETL/HETL** (interprétation des données)
- **Mesure indépendante** des paramètres du plasma

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 $T_R = 40 \text{ eV}$

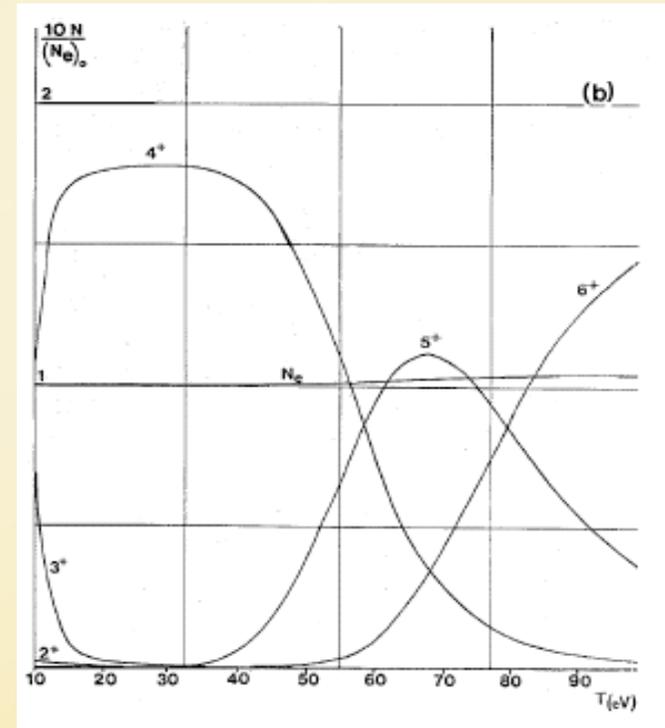
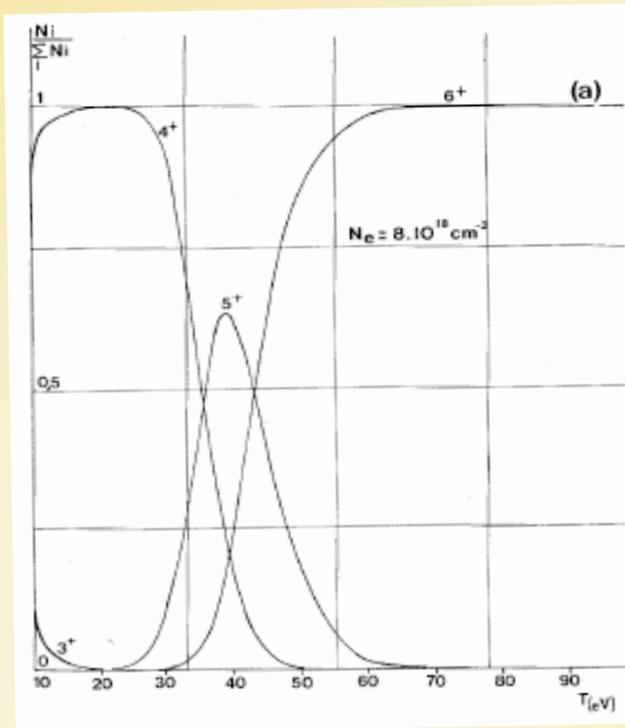
Avec un BL ps, les conditions plasma couvrent une large gamme de densités
0.003 à 0.1 g/cm^3
de températures et d'ionisations
 $T_e = 15 - 28 \text{ eV}$ et $\langle Z \rangle = 3 \text{ à } 6$

Plasmas ETL et HETL



L'échantillon à sonder peut être créé :

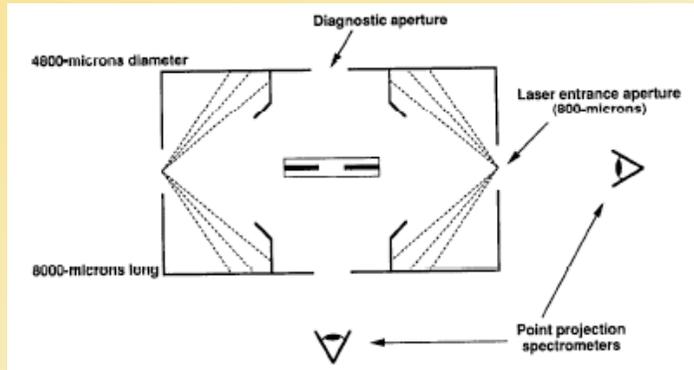
- P. ex. par chauffage « indirect » (réémission des parois d'une cavité = corps noir) \Rightarrow plasma à l'ETL
- P. ex. par chauffage « direct » par un faisceau laser \Rightarrow plasma transitoire



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

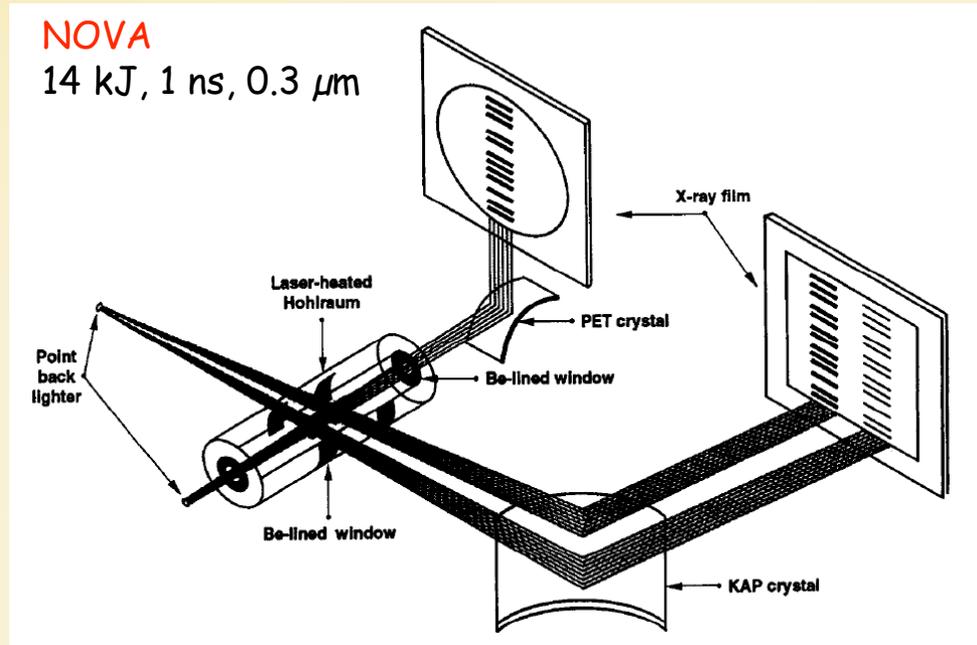
Mesure indépendante des paramètres plasma

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.



NOVA
14 kJ, 1 ns, 0.3 μm

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**

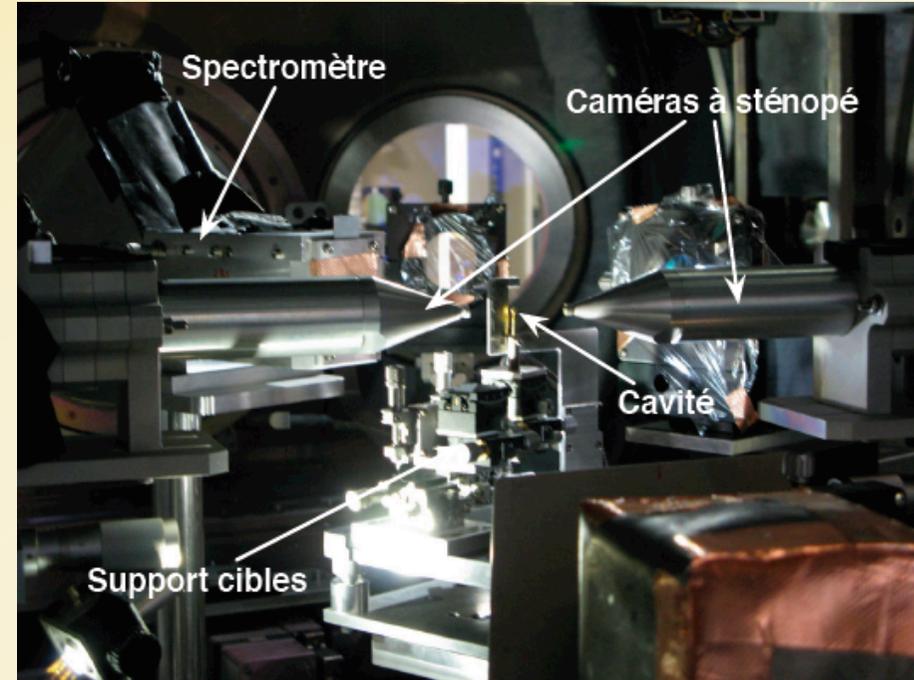
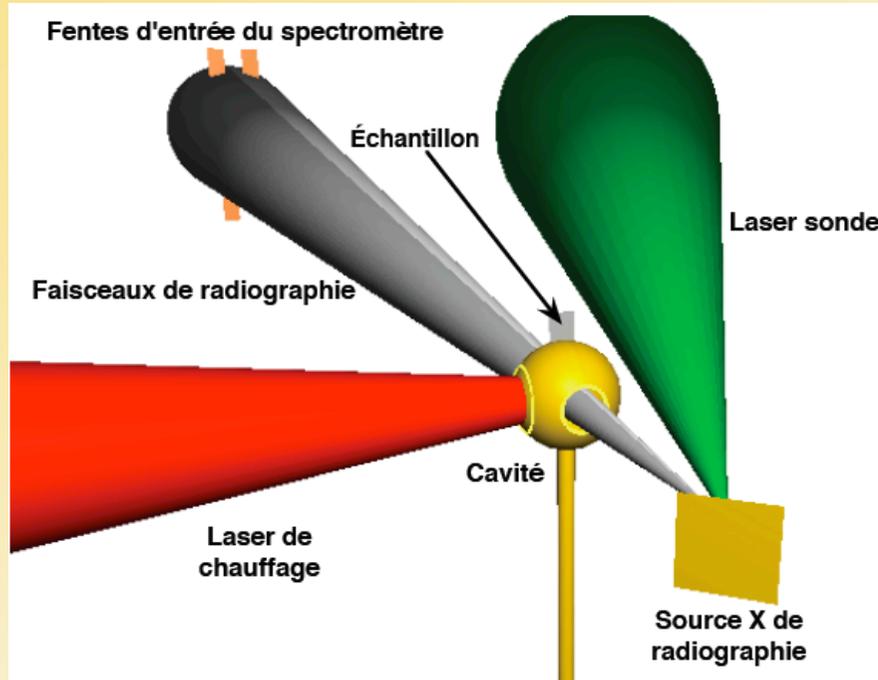
Différentes techniques expérimentales



- 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, 500eV , 1 g/cm^3
 - chauffage par protons (20 eV , densité du solide)
- Impulsions ultra-courtes (10 fs), 0.5 g/cm^3 , 100eV
- Combinaison de choc et de chauffage radiatif, 1 g/cm^3 , 50 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

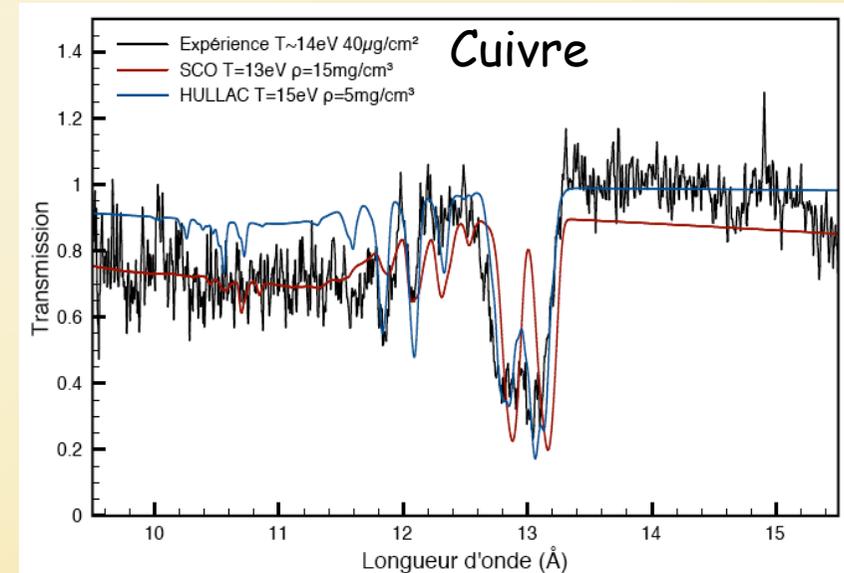
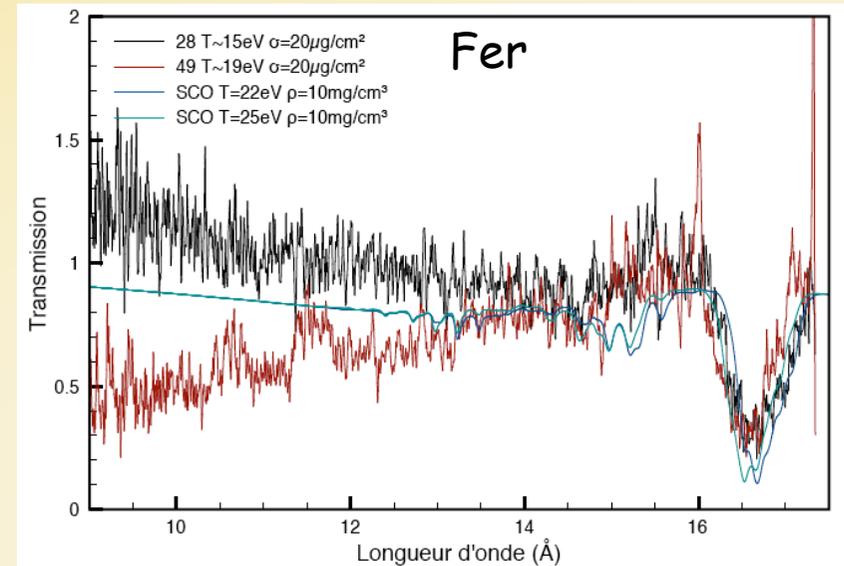
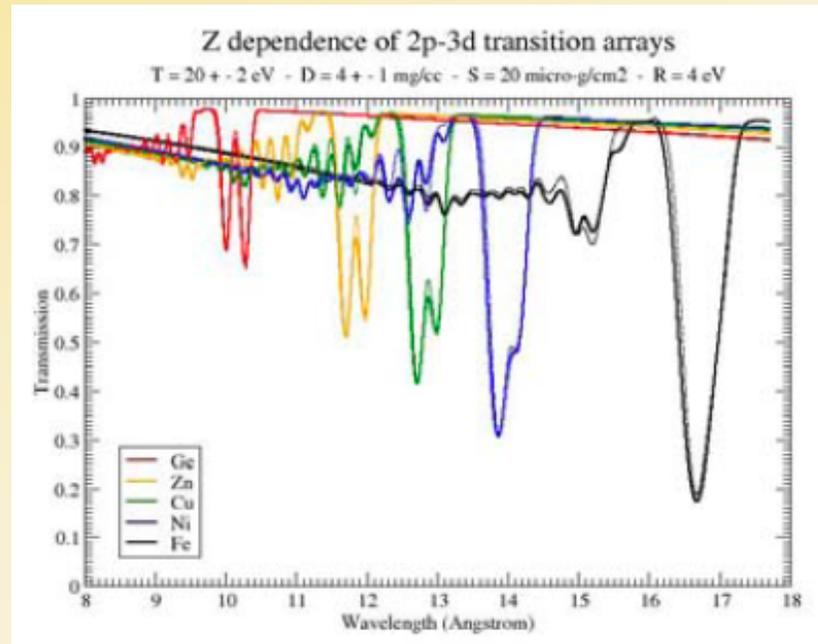
Installation LULI2000

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

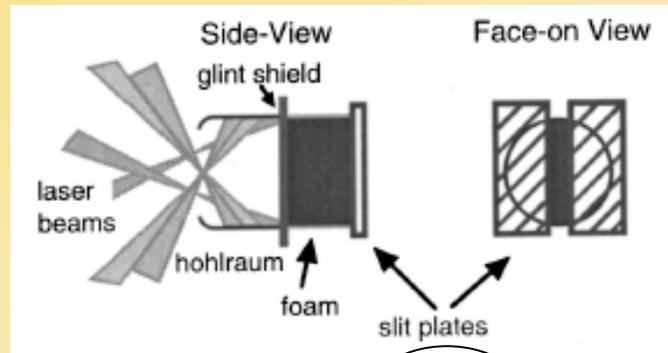
Résultats (très) préliminaires



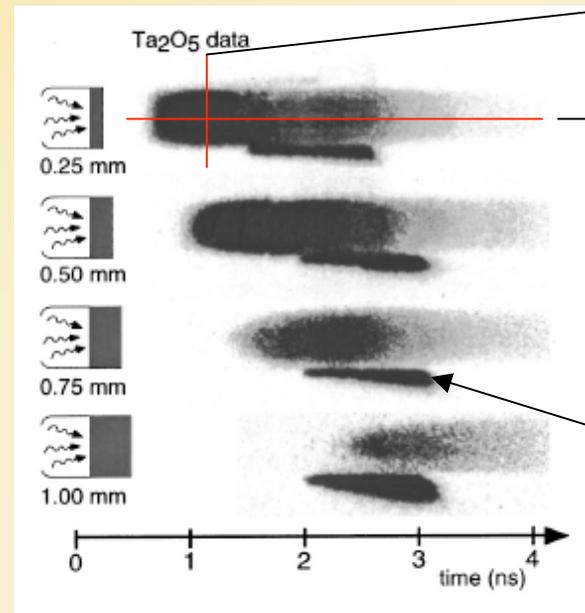
Objectif :
Mise en évidence expérimentale
d'une prévision théorique



Attaque indirecte, propagation de l'onde radiative



Omega, 10 kJ, 2.4 ns, 0.35 μm ,
 $5 \cdot 10^{14}$ W/cm²
 $T_r = 190$ eV
2x1.2 ns



profil radial
de l'émissivité

émissivité en fct
du temps et temps
de débouché de
l'onde thermique

timing
fiducial

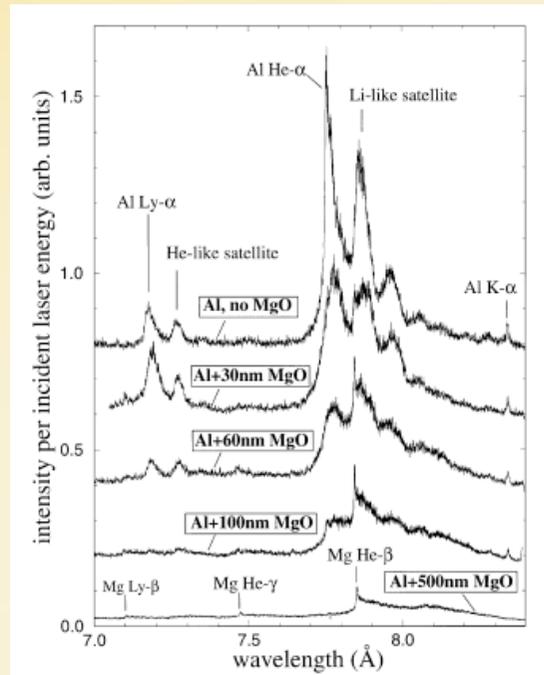
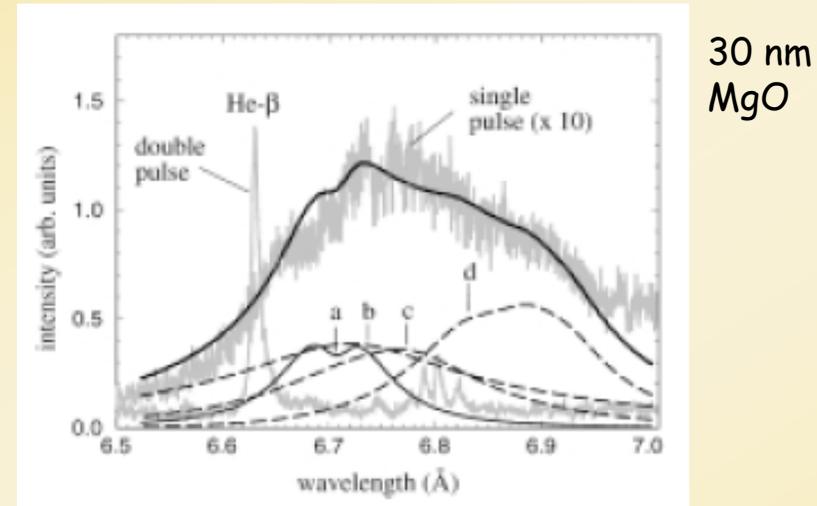
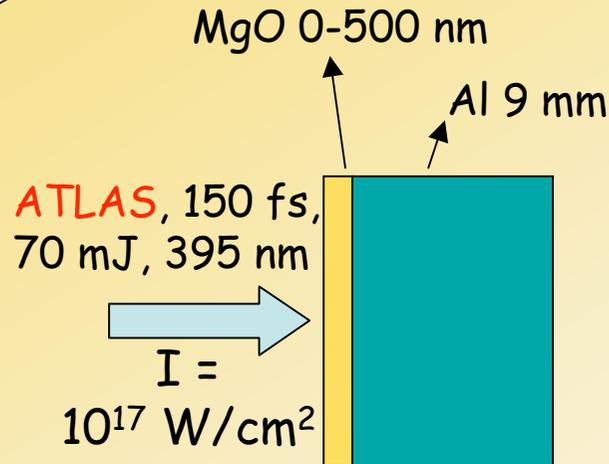
Validation des solutions analytiques de l'équation du transport du rayonnement, validation des modèles d'opacité.

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



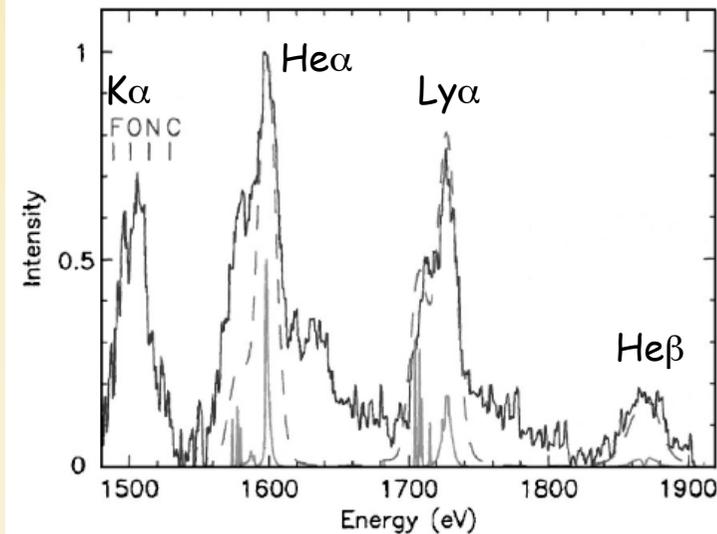
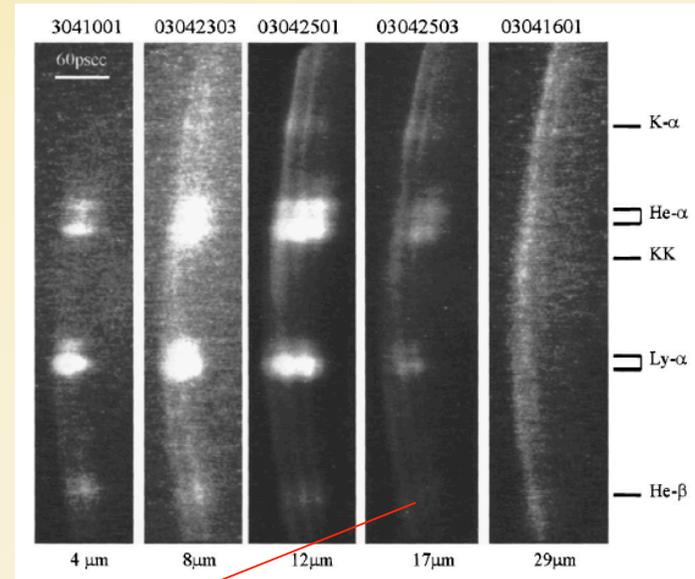
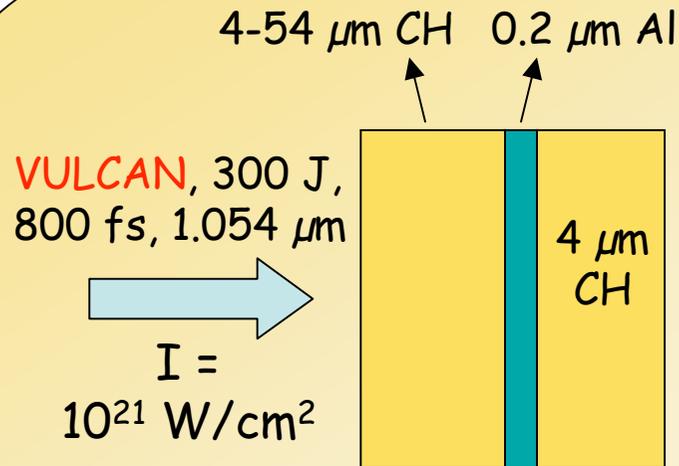
Le fit des spectres permet de déduire $n_e = (8 - 10) \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ et $T_e = 250 \text{ eV}$.

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

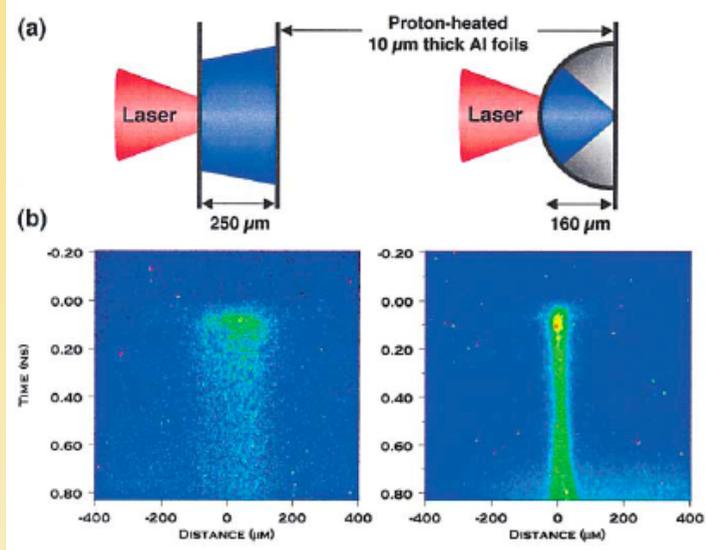


Les simulations effectuées avec FLY donnent $T_e = 550 \text{ eV}$ et $n_e = 1 \text{ g/cm}^3$.

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

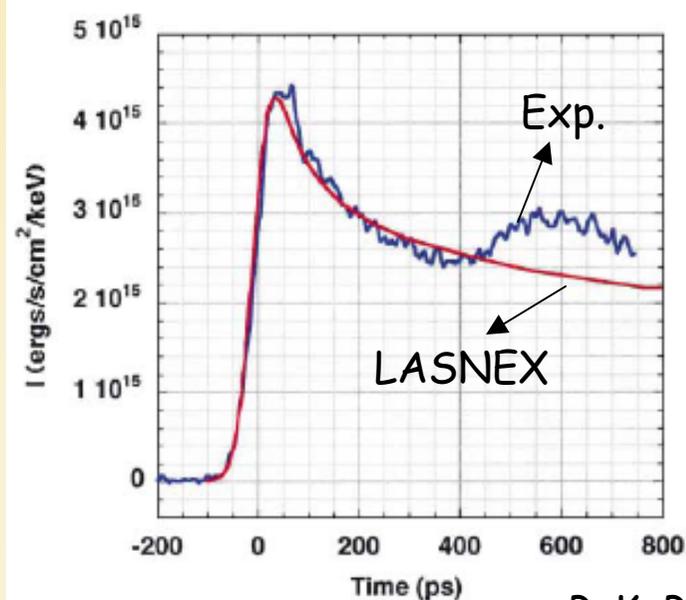
R. G. Evans et al., Appl. Phys. Lett. **86**, 191505 (2005)

Chauffage par les protons

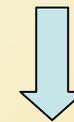


LASER : JanUSP, 10J, 100 fs, 800 nm,
 $5 \cdot 10^{18}$ W/cm²

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



Emission calculée par LASNEX



$T_e = 23$ 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

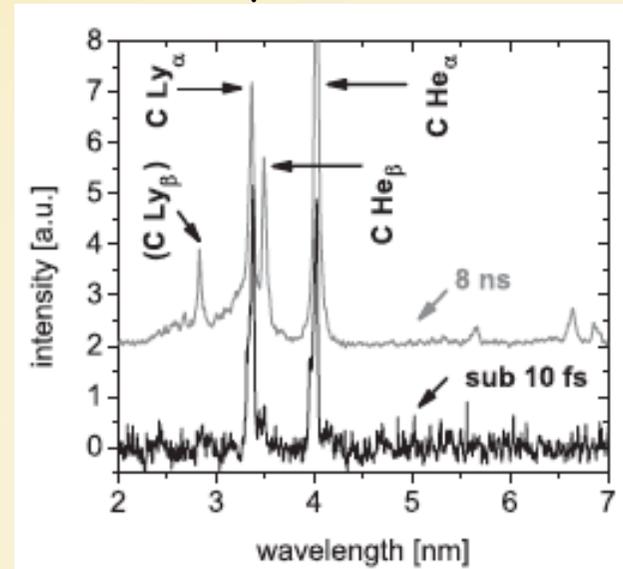


Ti:saphir, 8 fs, 200 μJ ,
 10^{16} W/cm²

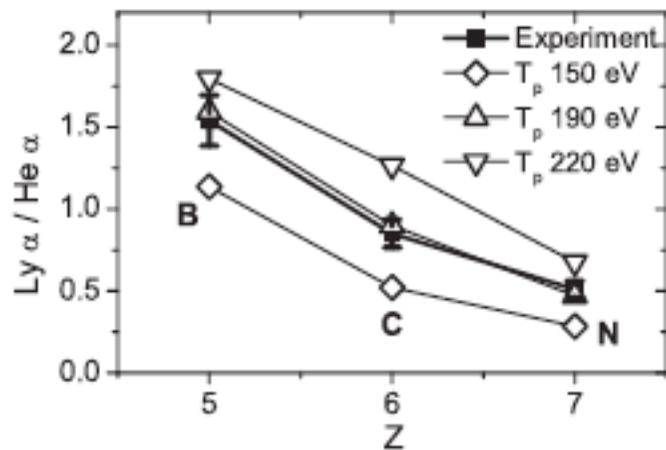
Spectromètre XUV,
accumulation sur
 $2-8 \times 10^5$ tirs

BN ou C, 2 mm d'épaisseur

Spectre du C



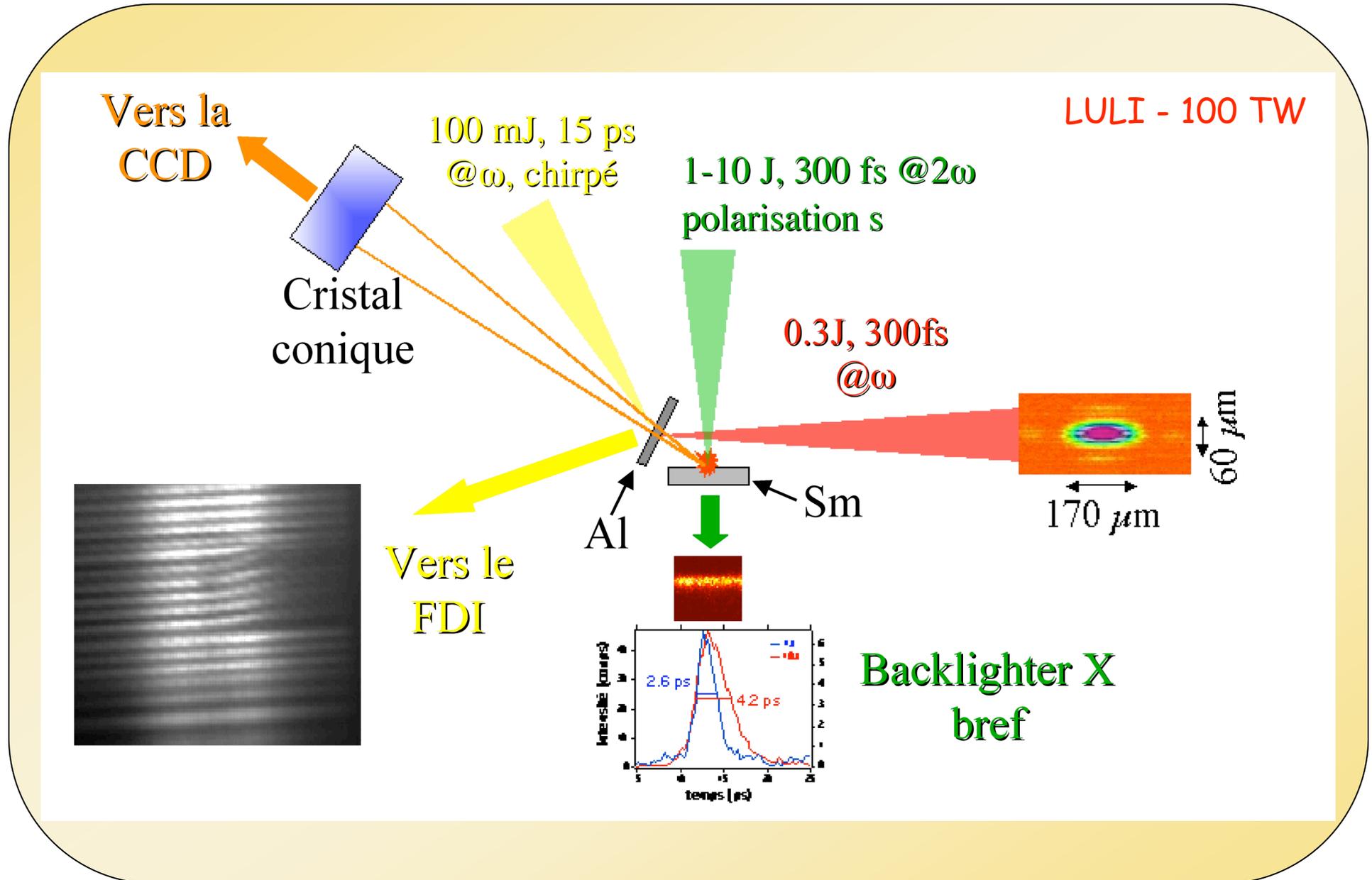
FLY calculations



- Pas de Ly β \Rightarrow densité entre 0.2 et 1.3 g/cm³
- 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

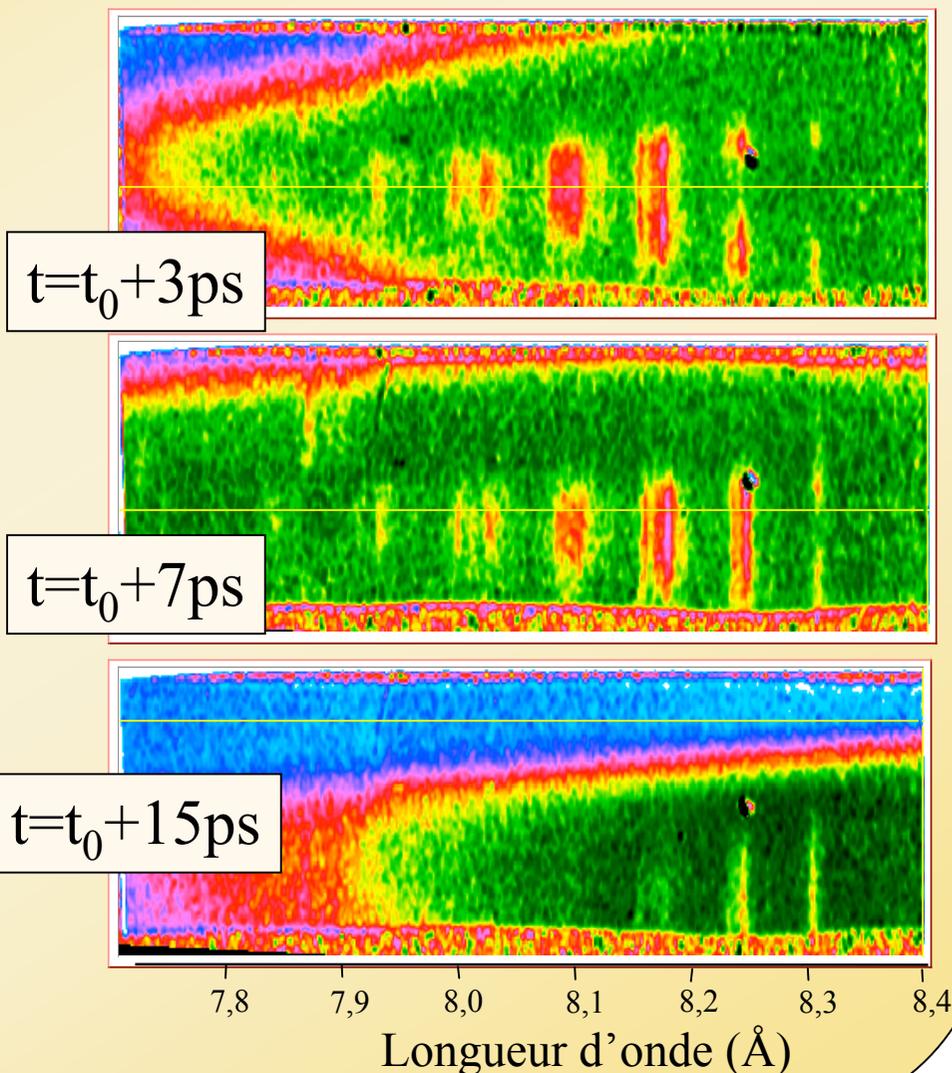
$\text{Al}^{4+} = \text{F-like}$,

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

...

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

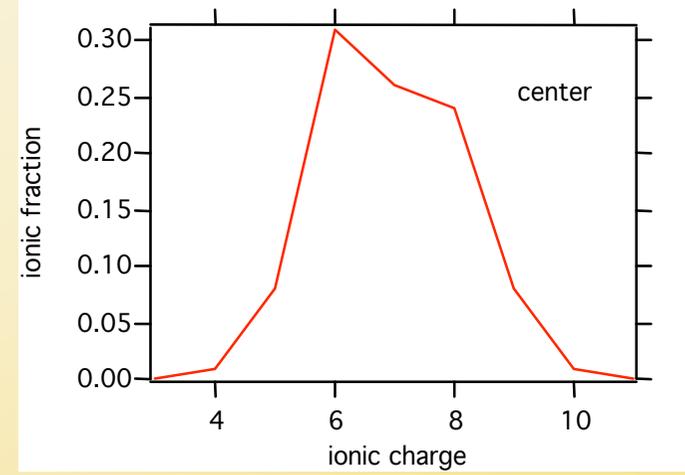
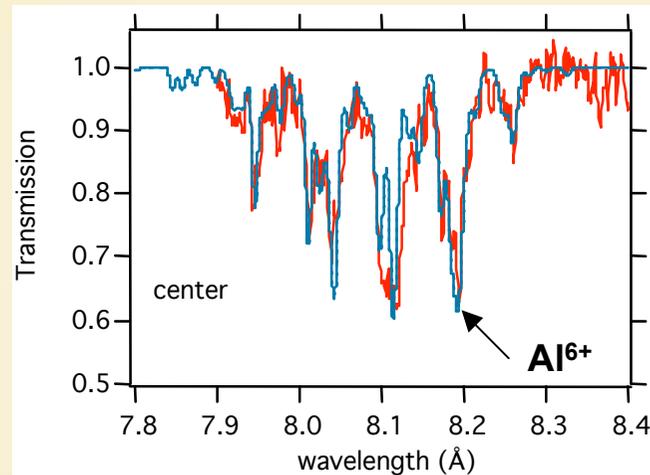
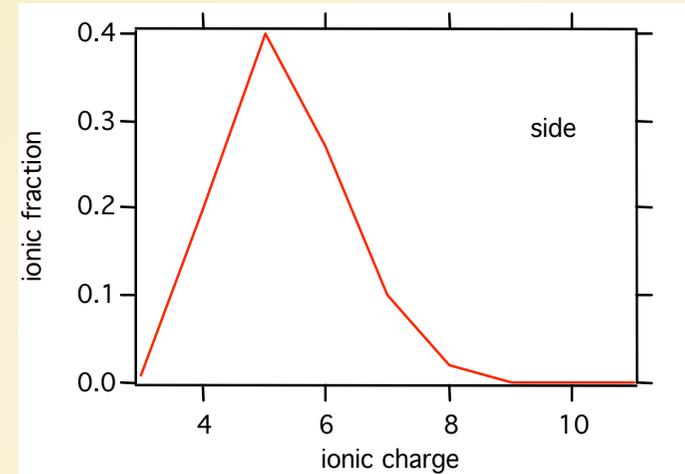
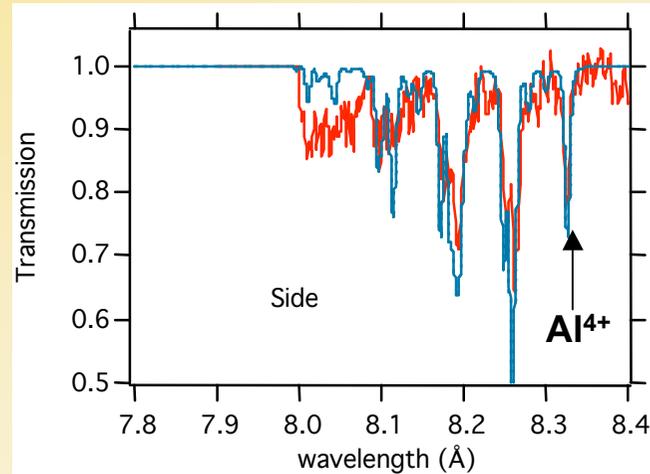
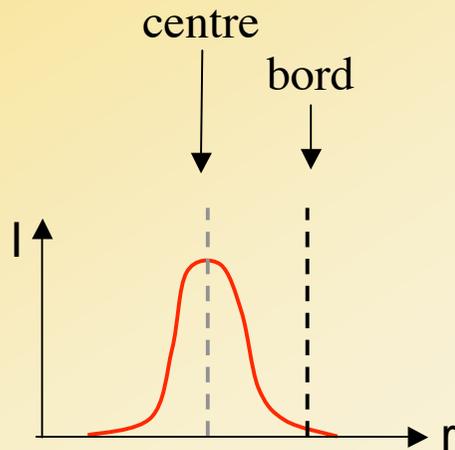
Be B C N O F



Spectres en fonction de la position



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



Evolution de l'ionisation moyenne

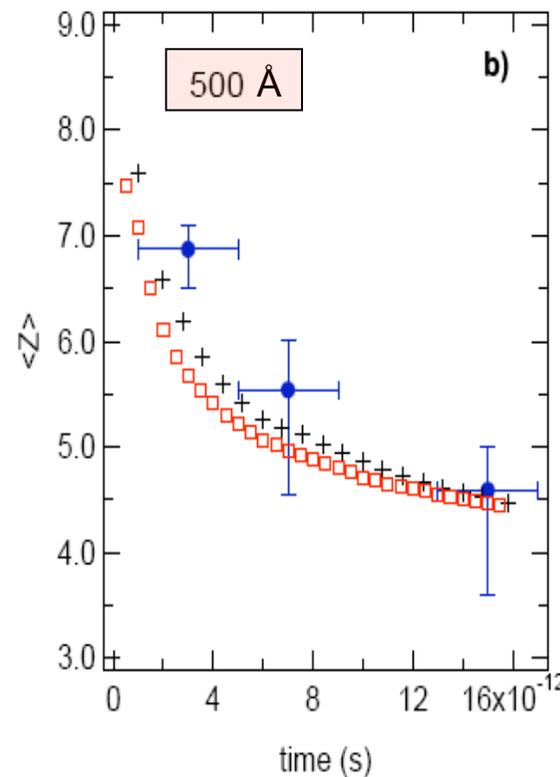
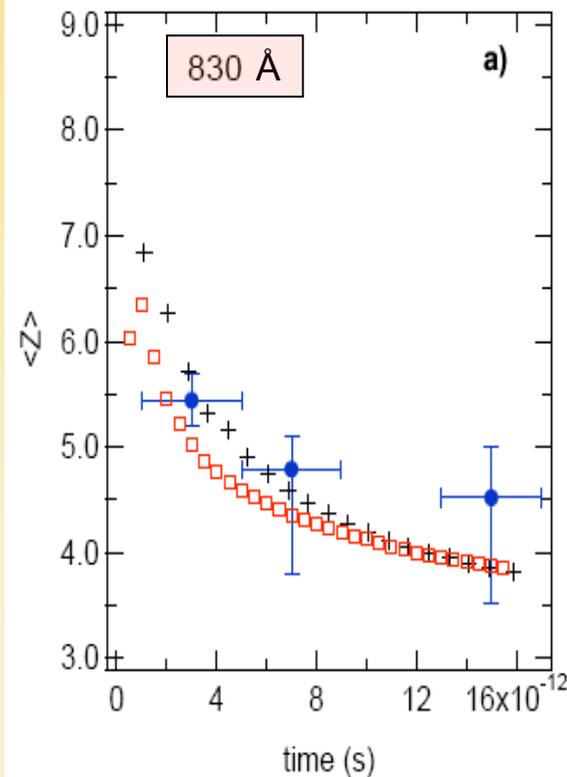


- Mesuré
- + Simulation LTE
- Simulation NLTE



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

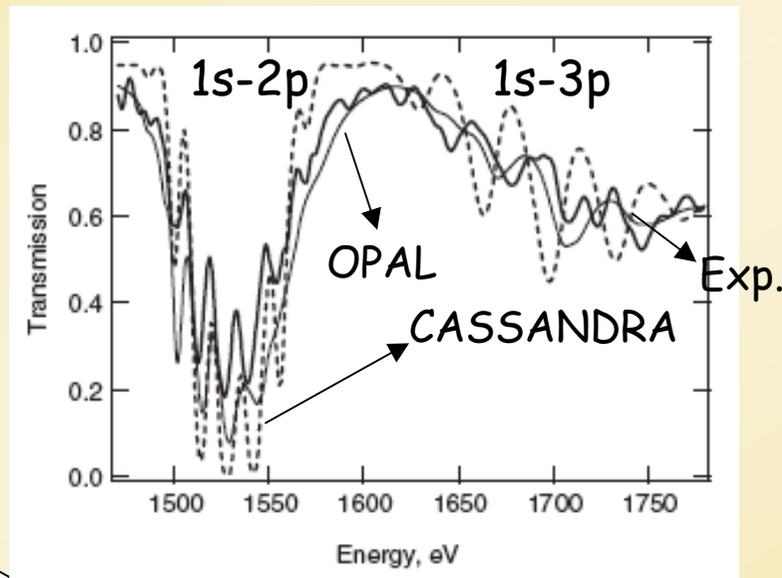
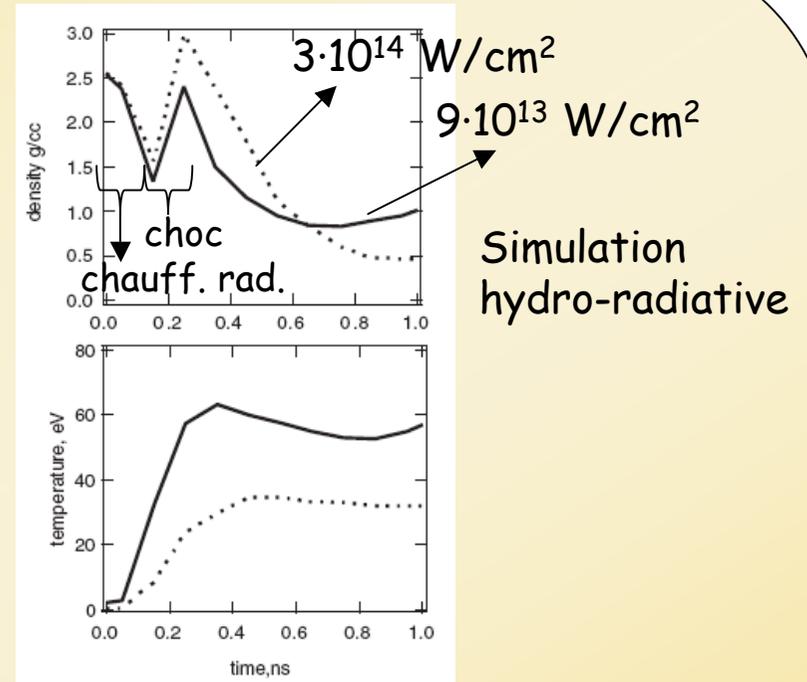
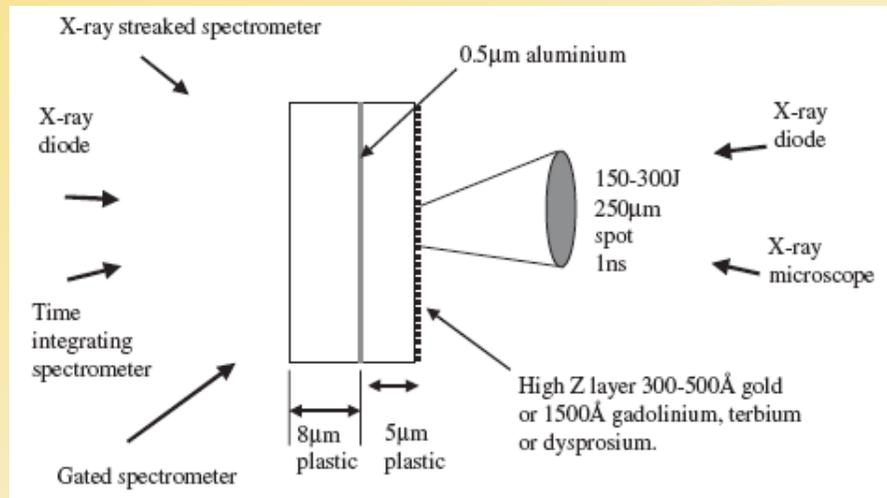
* K. Eidmann *et al.*, Phys. Rev. E 62, 1202 (2000)

** 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

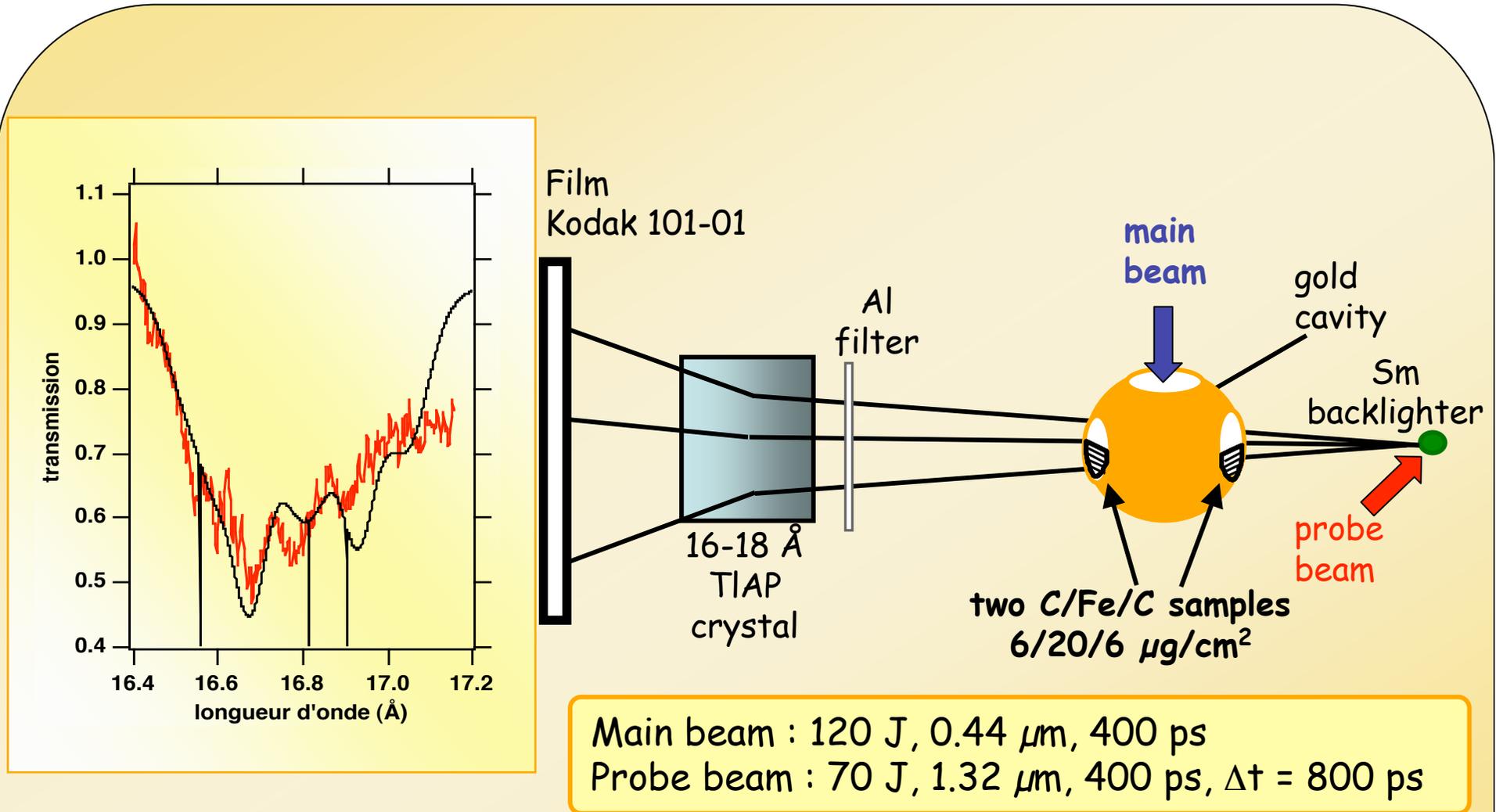
Laser HELEN



- 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.

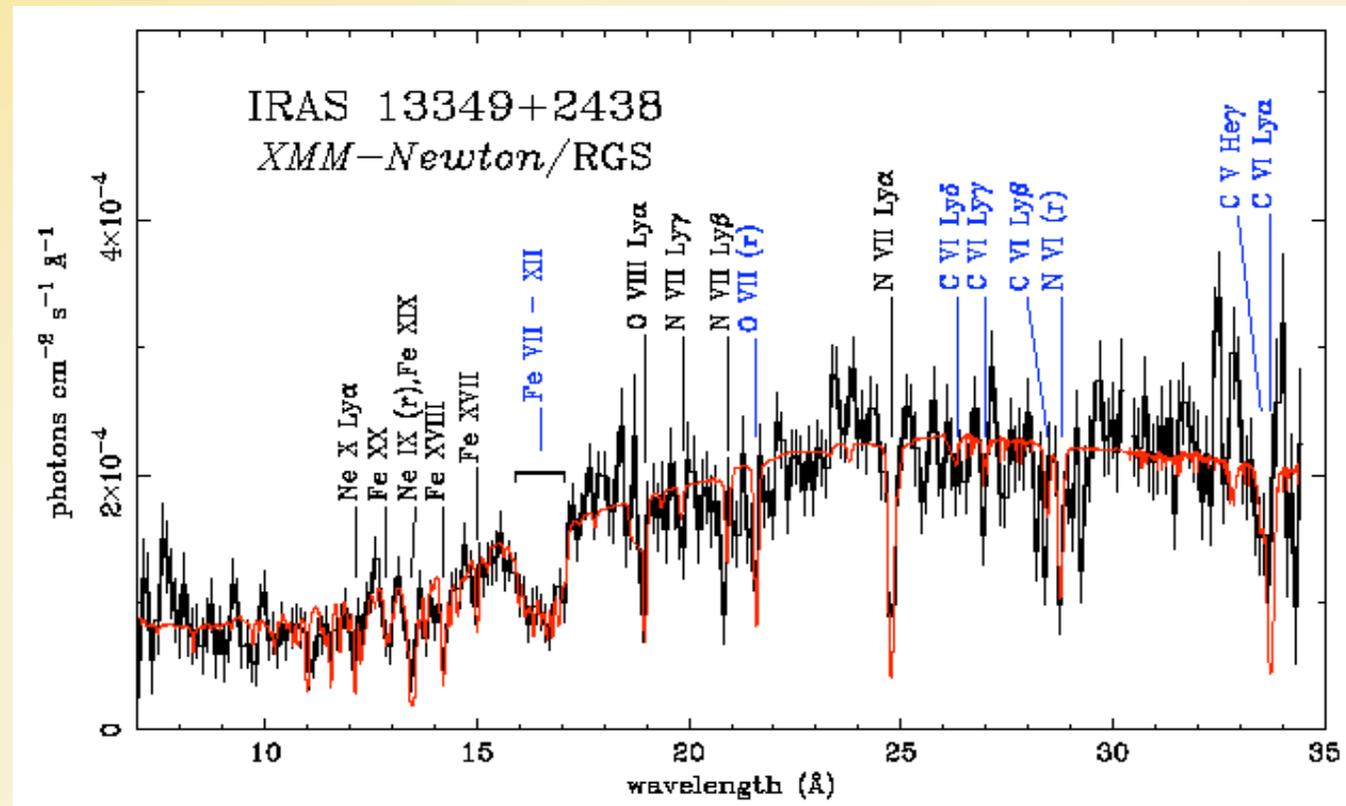
D. J. Hoarty et al., JQSRT **99**, 283 (2006)

Mesure de l'absorption en couche L du fer



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.