



Expériences de mesure des équations d'état

A. Benuzzi-Mounaix

Groupe PHYHDEL (« Physique de la matière à haute densité d'énergie par laser »)
Laboratoire LULI, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France

Ecole d'Aussois: Physique Stellaire autour des Grands Lasers
(28 septembre - 3 octobre 2008)

Plan du cours



- ✦ **Introduction** (*Définition EOS; Quelles EOS? Pourquoi?*)
- ✦ **Chocs laser - diagnostics**
- ✦ **Contraintes pour les mesures d' Equations d'État et principe des mesures**
- ✦ **Diagnostics "classiques"**
- ✦ **Applications à la planétologie** (*cas du fer*)
- ✦ **Les développements en cours** (*compression isentropique et Diagnostics X - radiographie et diffusion*)
- ✦ **Conclusions**

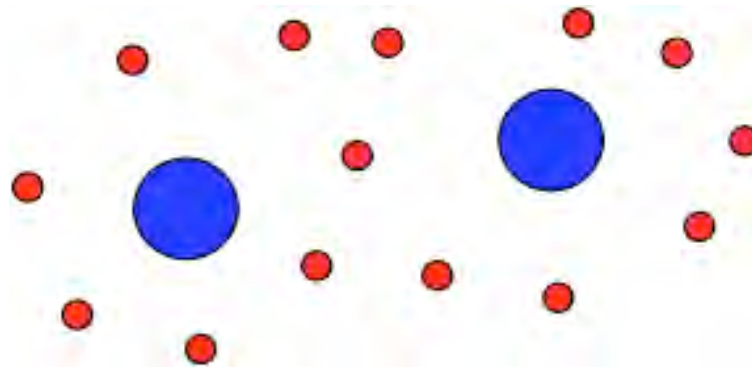
INTRODUCTION

Définition d'équation d'état



Relation qui relie les variables macroscopiques ρ , P , E décrivant un système à l'équilibre thermodynamique

Exemples:



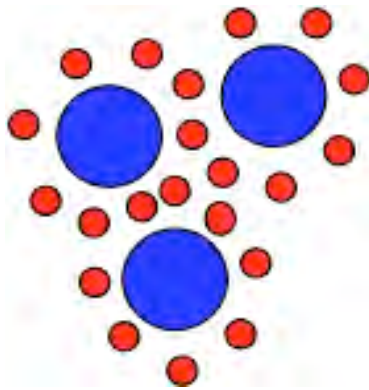
un gaz ou plasma dilué

Equation d'état simple: $PV = nRT$

La Matière Dense et Chaude (ou **Warm Dense Matter - WDM**)



$$\rho_0 < \rho < 10 \rho_0 \text{ \& } 0.1 \text{ eV} < T < 100 \text{ eV}$$



Matière dense

Plasma

Corrélié $\Gamma = E_c / E_{th} \div T^{-1} n_e^{1/3} > 1$

E_c : Energie Coulomb

E_{th} : Energie thermique

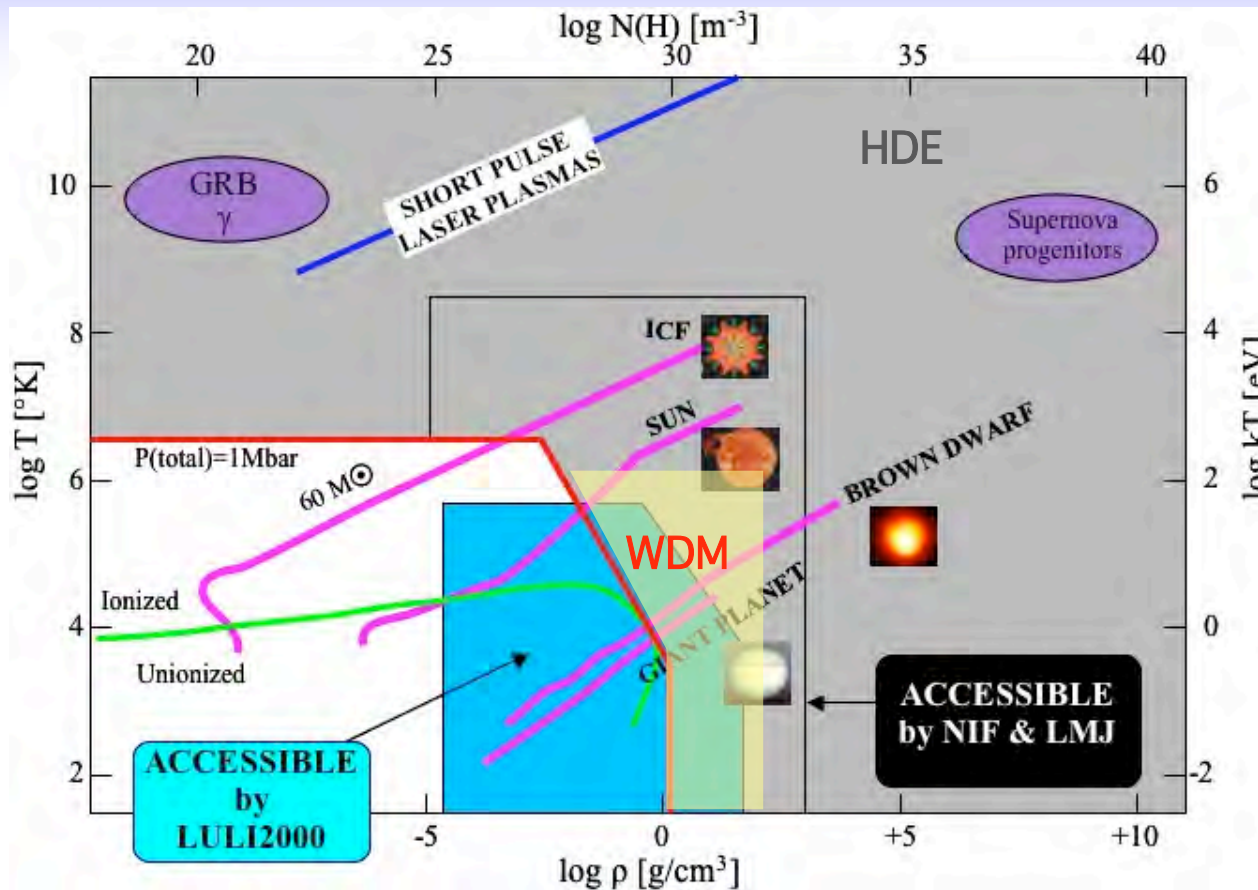
Dégénéré $T < T_F$

Le gaz parfait ne s'applique pas

$P = f(E, \rho, \dots)$

Les modèles de physique des solides ou plasmas ne sont pas valables. Besoin de nouveaux modèles (codes) pour décrire WDM

La matière à Haute Densité d'Énergie (HDE)



HDE → **P > 1 Mbar** Densité d'énergie fournie ≈ densité d'énergie interne à T ambiante

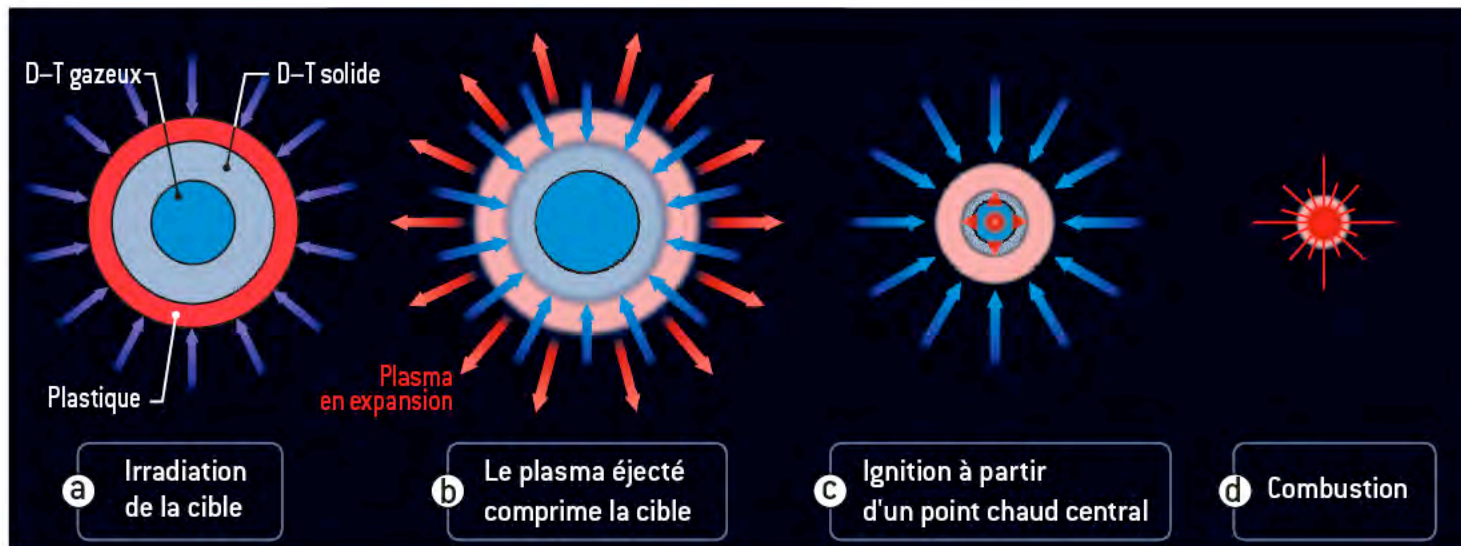
↪ Volume typique d'une cible laser ≈ 10⁻⁹ m³

↪ Typiquement: 10⁹ - 10¹¹ J/m³ → Facilement accessible avec un laser de puissance de quelques centaines de joules

Pourquoi les EOS & HDE sont importants?



Physique FCI



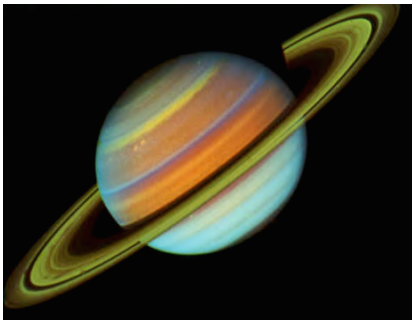
Besoin de données sur des matériaux complexes: **CHBr** , **BeCu**, **CHGe**
pour la conception des cibles à gain et leur performance

Bonne connaissance du comportement du **D₂**

Pourquoi les EOS & HDE sont importants?



Astrophysique



Planètes géantes
Planètes telluriques (terre)
Évolution des naines brunes et blanches
Evolution des exoplanètes
Intérieurs stellaires
....

Comment comprimer la matière?

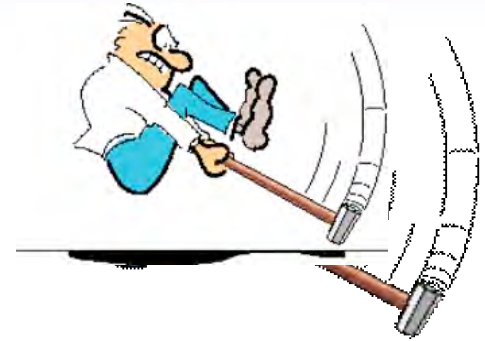


- **Compression isotherme**

Voie statique



Cellules diamant

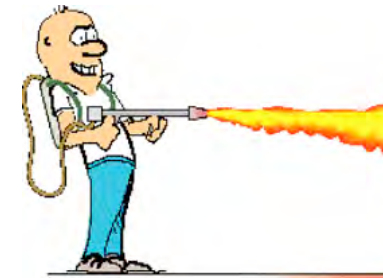


- **Compression par choc**

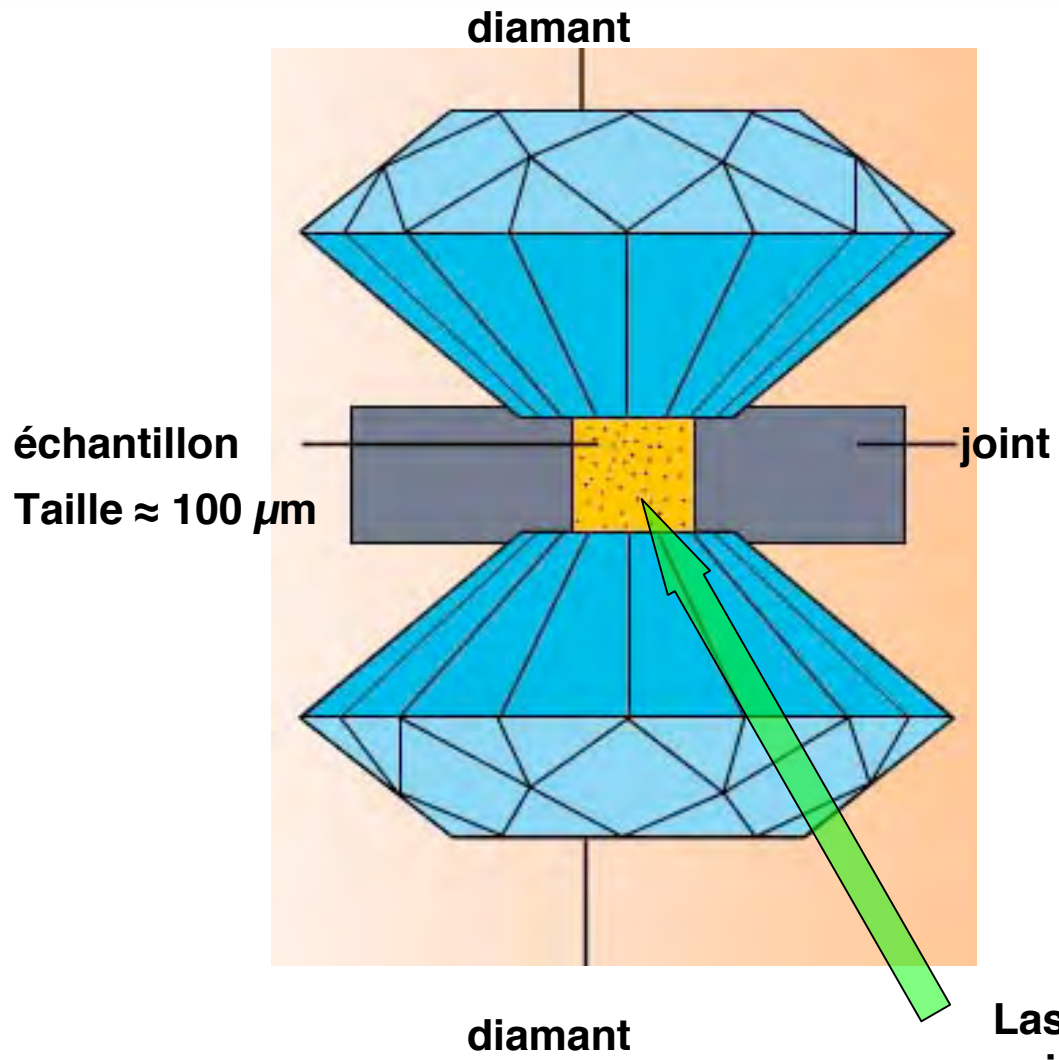
Voie dynamique



**Explosions chimiques, canons à gaz
Faisceaux d'ions et *lasers de puissance***



Compression avec une cellule diamant

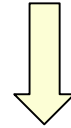


Laser annexe
qui chauffe l'échantillon

Qu'est ce qu'un choc ? (1)



On considère le mouvement hydrodynamique d'un fluide parfait



Equations d'Euler -> équations de conservation: masse, moment & énergie

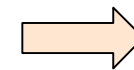
Une petite perturbation en pression ou en densité / aux valeurs initiales
→ son évolution est traitée dans le cadre de l'approx. linéaire (onde sonore)



Équation des ondes sonores

Deux familles de solutions

Des ondes qui se propagent avec la vitesse C_s

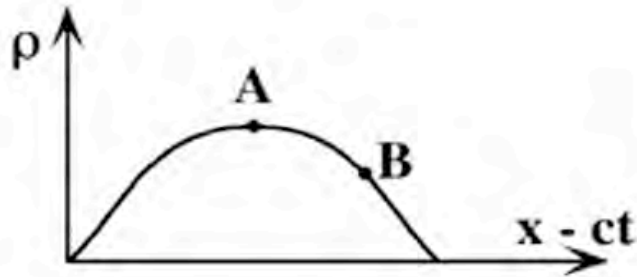


$$C_s = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s^{1/2}$$

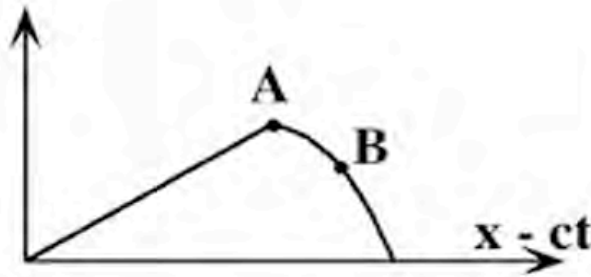
Gaz parfait

$$C_s = \left(\frac{\gamma P}{\rho} \right)^{1/2} = C_o (\rho / \rho_0)^{\gamma-1/2}$$

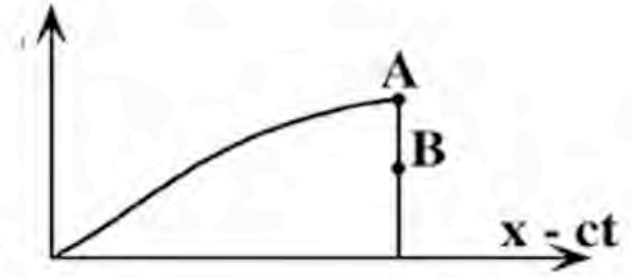
Qu'est ce qu'un choc ? (2)



Densité en $A > B$

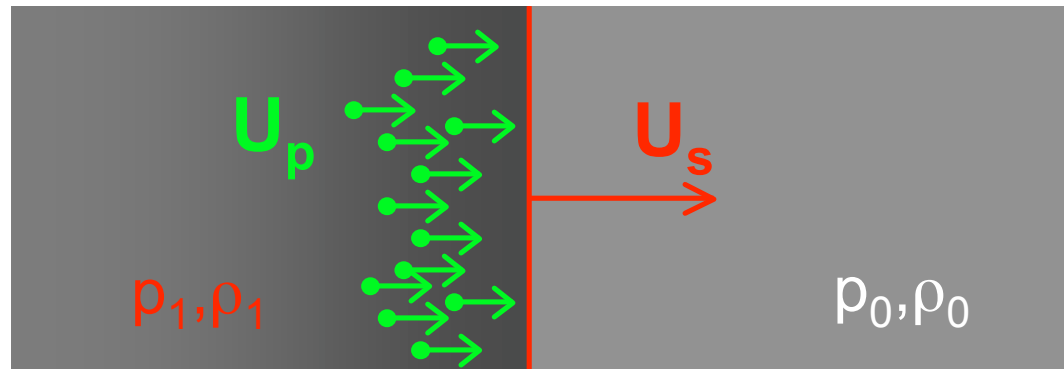


La vitesse du son augmente

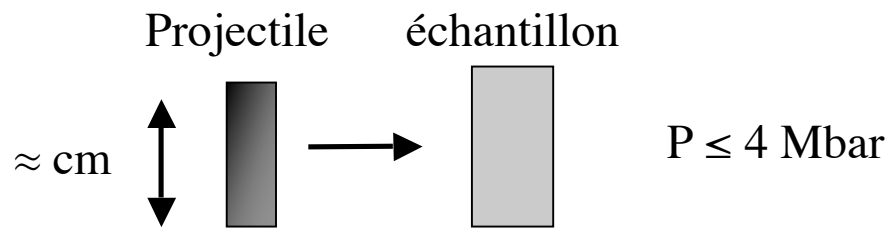
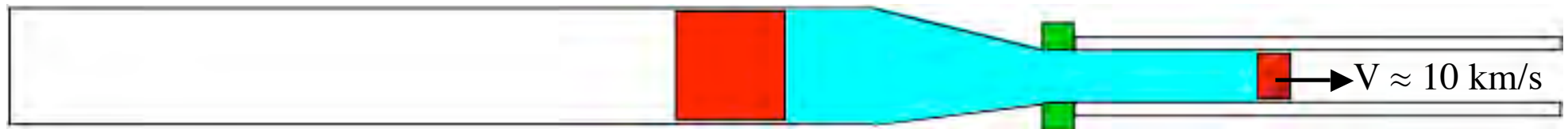
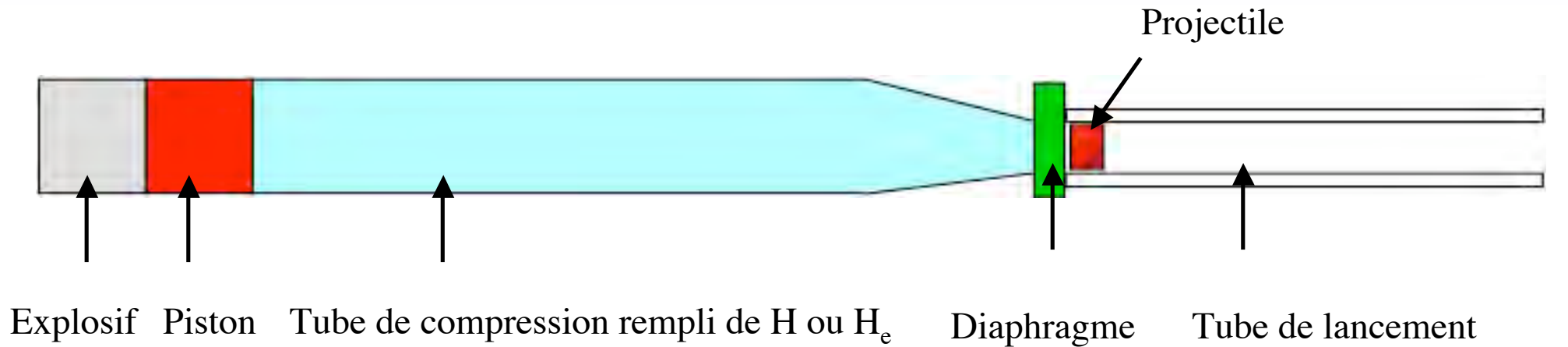


Apparition d'une discontinuité, c.à.d. une onde de choc

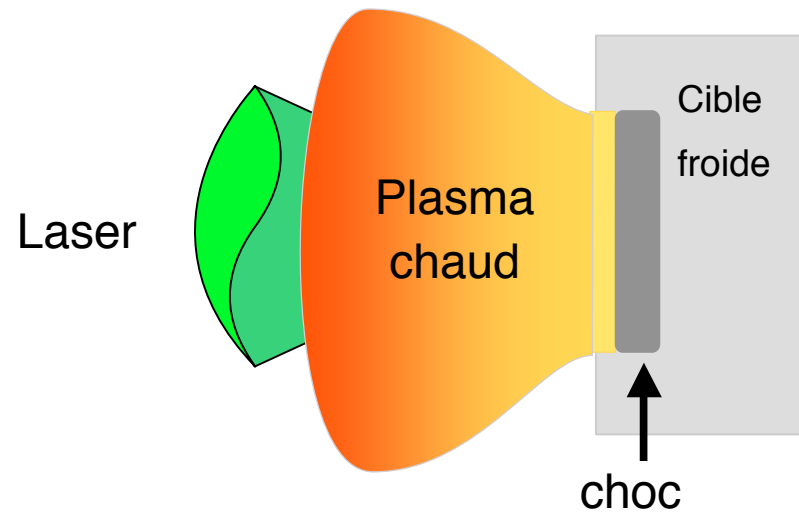
La formation d'une onde de choc n'est donc que le développement des effets non linéaires qui déforment le profil des ondes sonores.



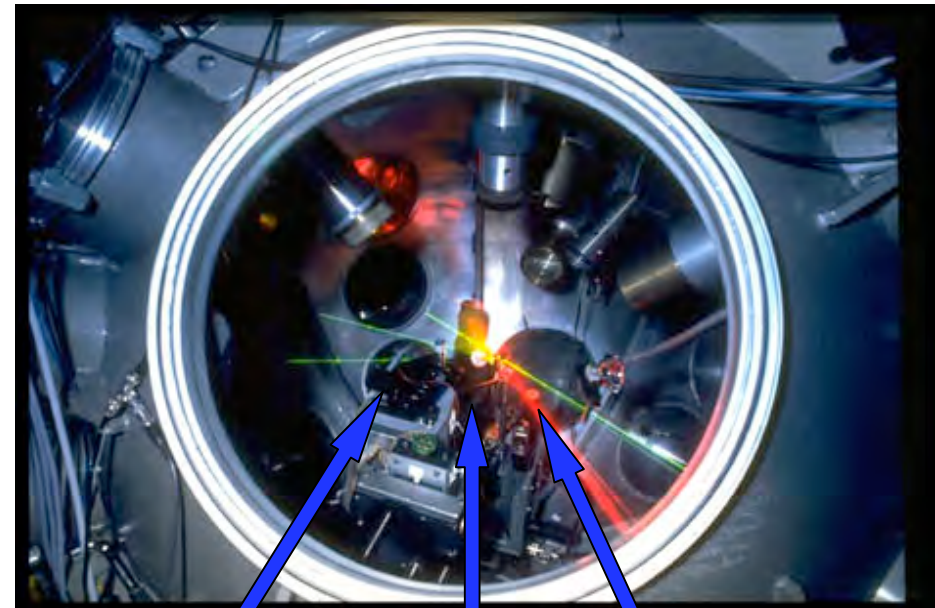
Canons à gaz



Lasers de puissance



Chambre expérimentale



Pression d'ablation

$$P \approx 12(I_L / \lambda)^{2/3}$$

I_L en 10^{14} W/cm²

λ en μm

P en Mbar

Faisceaux d'interaction

Cible

Faisceaux sonde

CHOCS LASER

Relations de Rankine-Hugoniot



masse

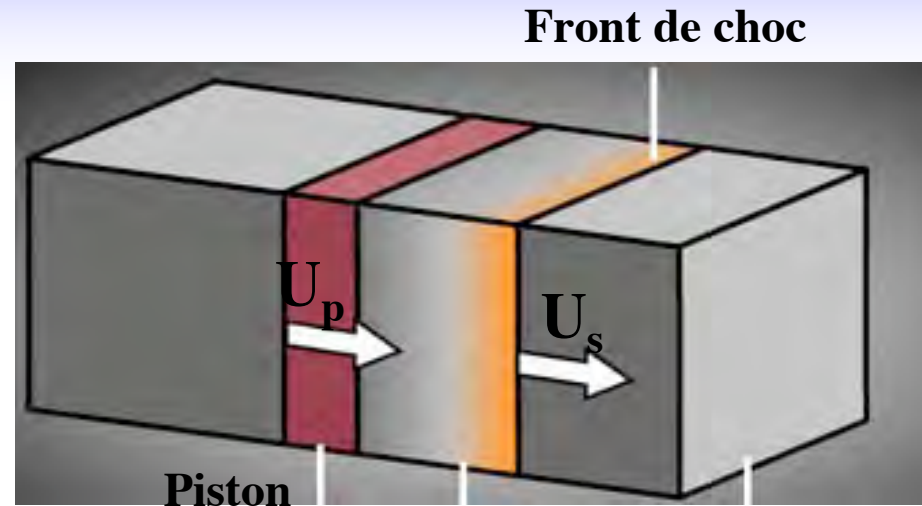
$$\rho_0 U_s = \rho (U_s - U_p)$$

moment

$$\rho_0 U_s U_p = P - P_0$$

$$\rho_0 U_s (E - E_0 + U_p^2/2) = P U_p$$

Energie



Matière comprimée
 U_s, U_p, P, ρ, E

Matière non comprimée
 P_0, ρ_0, E_0

3 équations, 5 inconnues (U_s, U_p, P, E, ρ)

✓ 2 paramètres - *mesure absolue*

2 vitesses U_s and U_p → temps et distance
(Expériences *D2 & Fe*)

✓ 1 paramètre - *mesure relative*

Vitesse de choc U_s dans 2 matériaux (un comme référence)

Comment mesurer une équation d'état ?



- **MESURE ABSOLUE :** 2 paramètres différents

U_s
 U_p } mesures directes

ρ & T \Rightarrow mesures indirectes

- **MESURE RELATIVE :** 1 paramètre dans 2 matériaux

Un des matériaux sert de référence

En général c'est l'**aluminium** dont l'EOS est connue \rightarrow 40 Mbars

Comment diagnostiquer l'échantillon ?



● OBJECTIFS

Mesurer les paramètres avec la précision nécessaire ($\approx qq\%$)
pour une cible $< 1\text{ mm}$ pendant un temps $\approx 10^{-9}\text{ s}$



Haute résolution instrumentale
 $< 10\ \mu\text{m}$ et $\approx 10^{-12}\text{ s}$

● DIAGNOSTICS

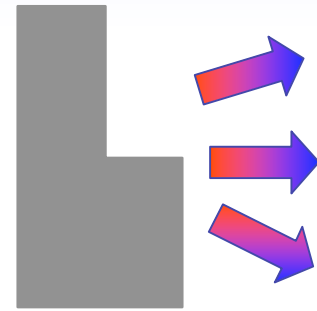
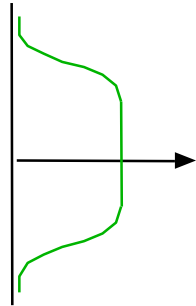
2 sortes



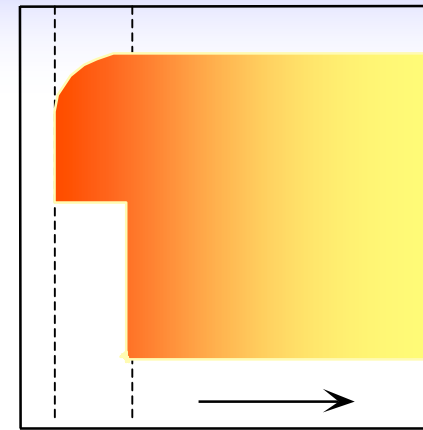
Les diagnostics passifs



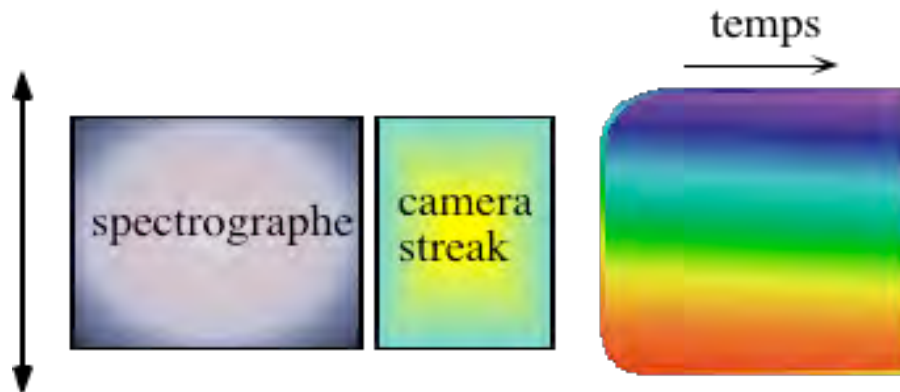
Laser



$P \approx 10 \text{ Mbar}$
 $\rho \approx 3 \rho_0$
 $T \approx \text{eV}$



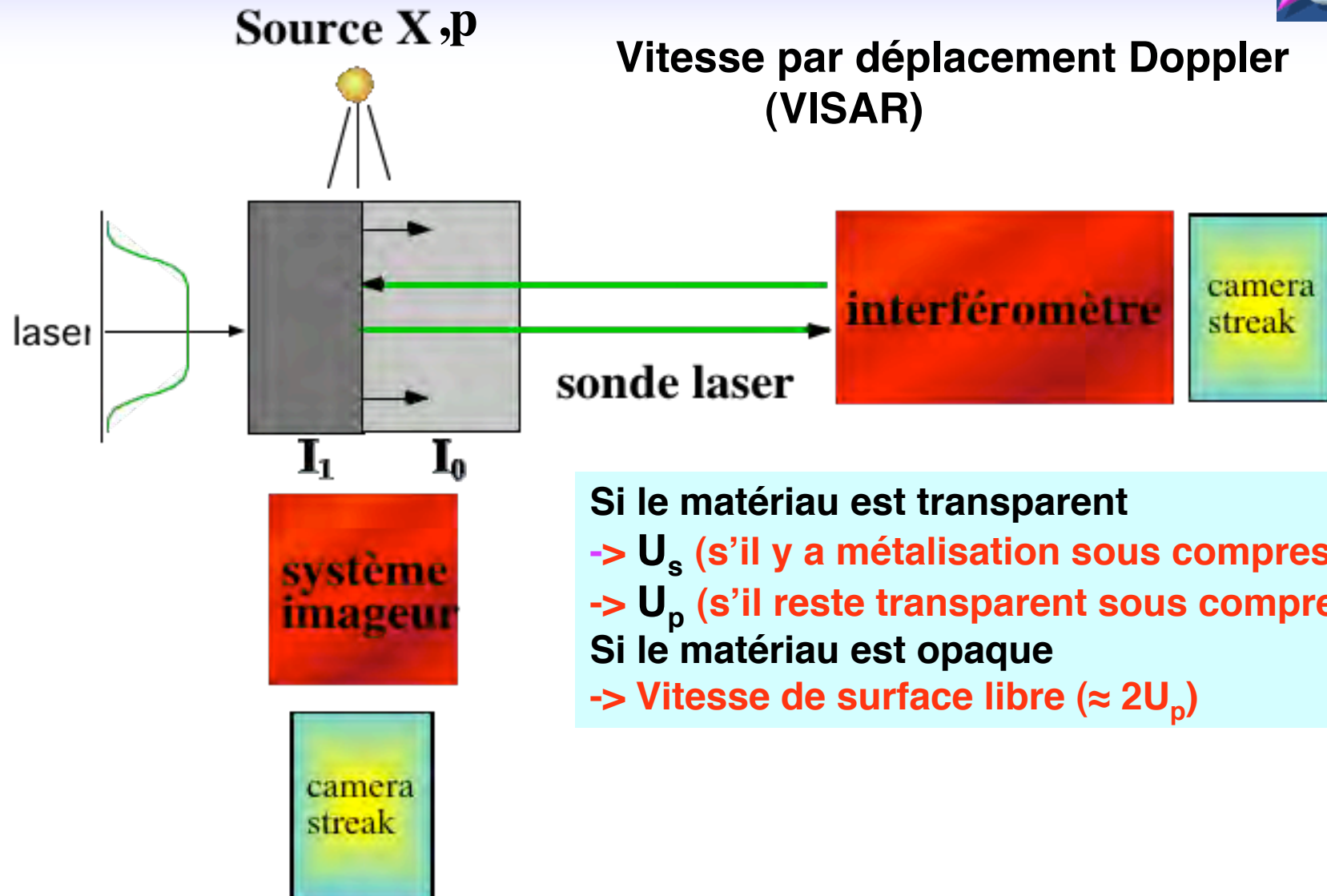
$\Delta t + \text{épaisseur} \rightarrow U_s$



spectre de l'émission propre

$E(\lambda) + \text{corps noir ou gris} \rightarrow T$

Les diagnostics actifs



MESURES

Besoins pour une mesure fiable



- **Produire des chocs de grande qualité**

Uniformes Spatialement

Stationnaires

Sans préchauffage

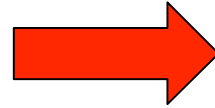
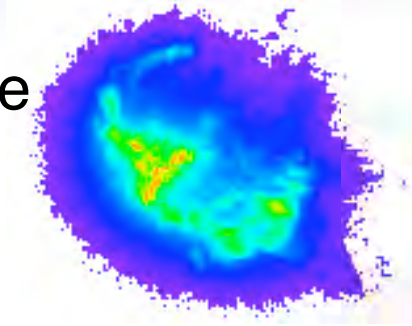


Atteindre une précision de qq % pour discriminer les modèles

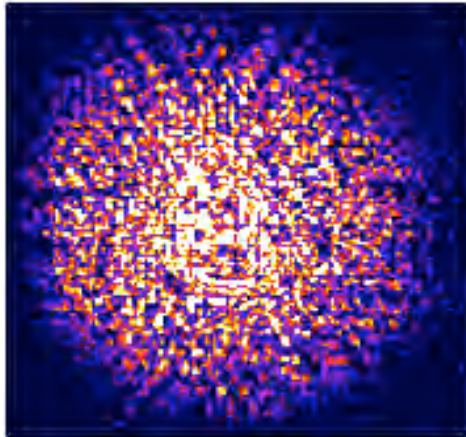
Peut-on déposer l'énergie uniformément ?



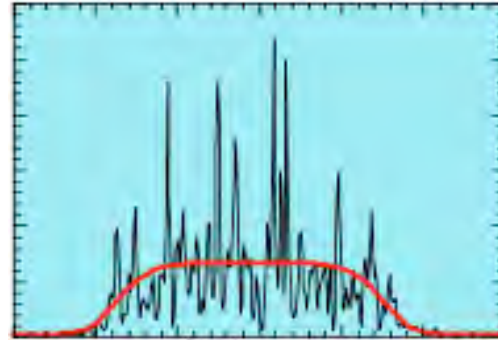
Tache focale classique



Techniques de lissage optique

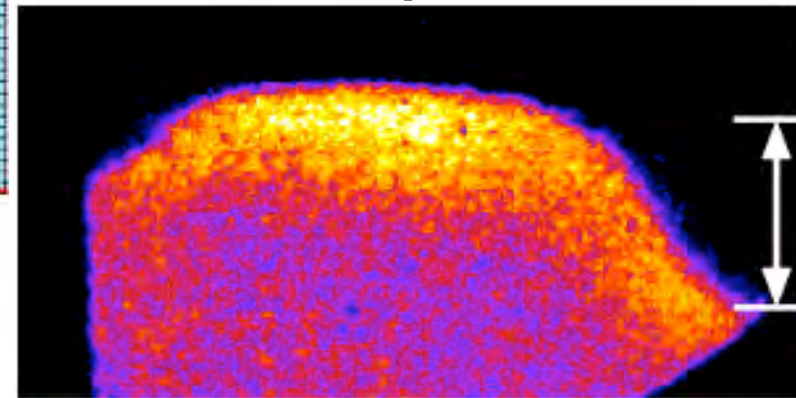


PZP



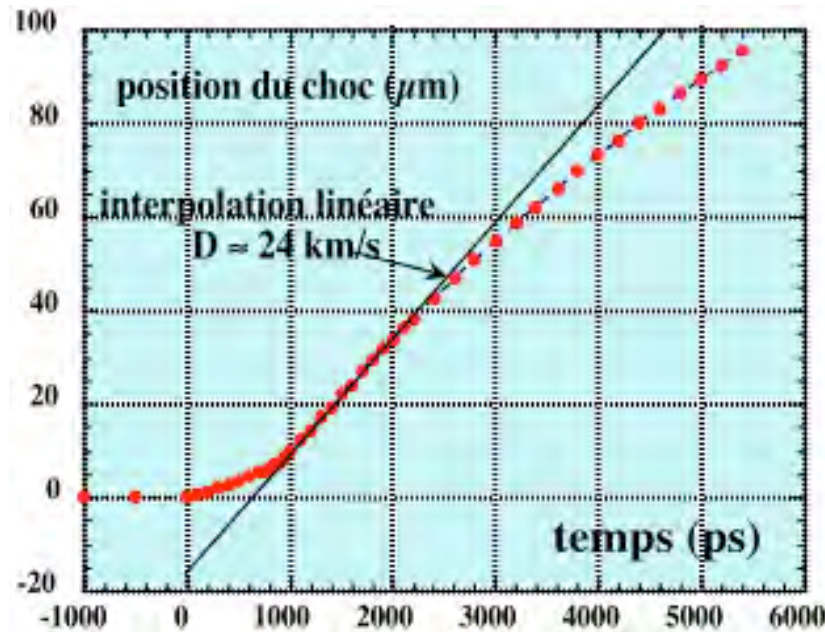
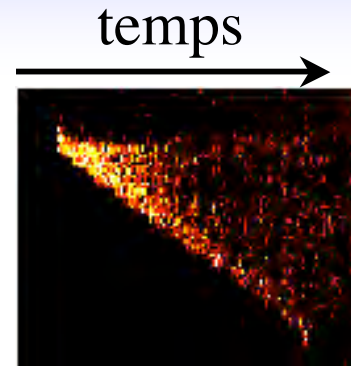
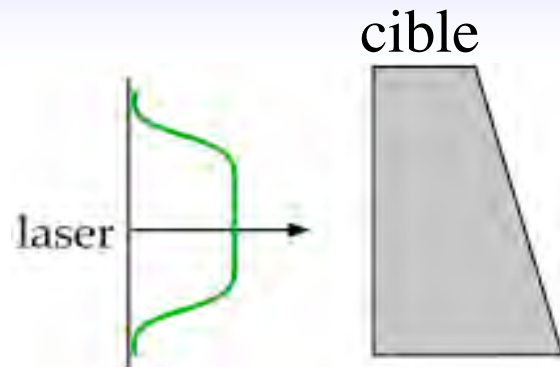
Tache focale

Débouché de choc
 $200 \mu\text{m}$



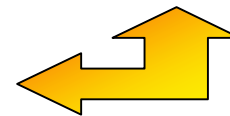
3
0
0
ps

La stationnarité du choc

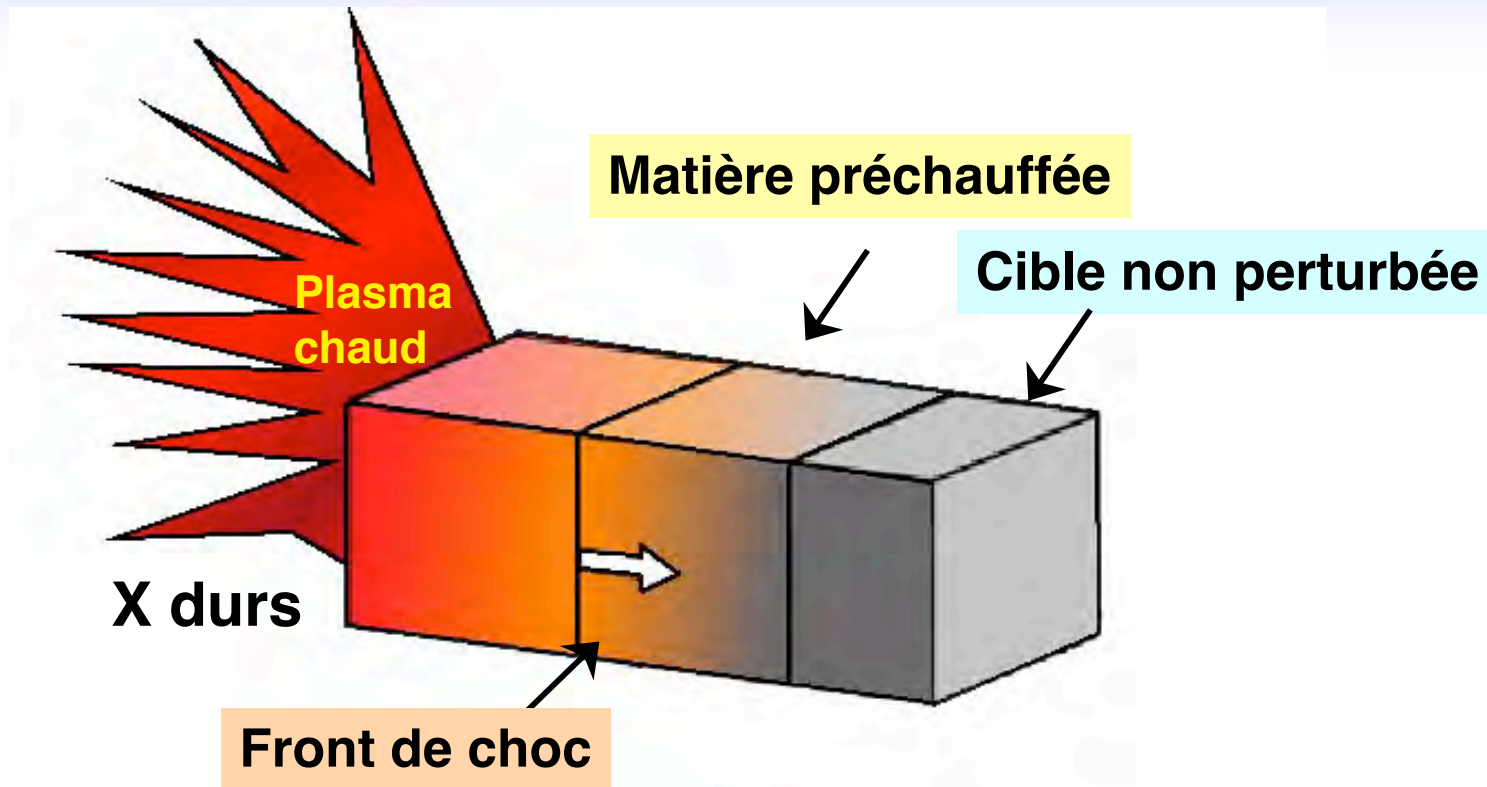


Simulations hydrodynamiques :
1D + radiatif + EOS + laser ...

Vitesse constante
 $10 \mu\text{m} \leq e \leq 30 \mu\text{m}$



Le préchauffage



Les relations de Rankine-Hugoniot ne peuvent plus être utilisées
Car les conditions initiales ne sont plus connues

Comment minimiser le préchauffage ?



Il faut considérer 2 étapes dans ce processus

La production de rayons- X

- Conversion augmente avec w
- Conversion augmente avec IL
- Le flux d' X augmente avec Z

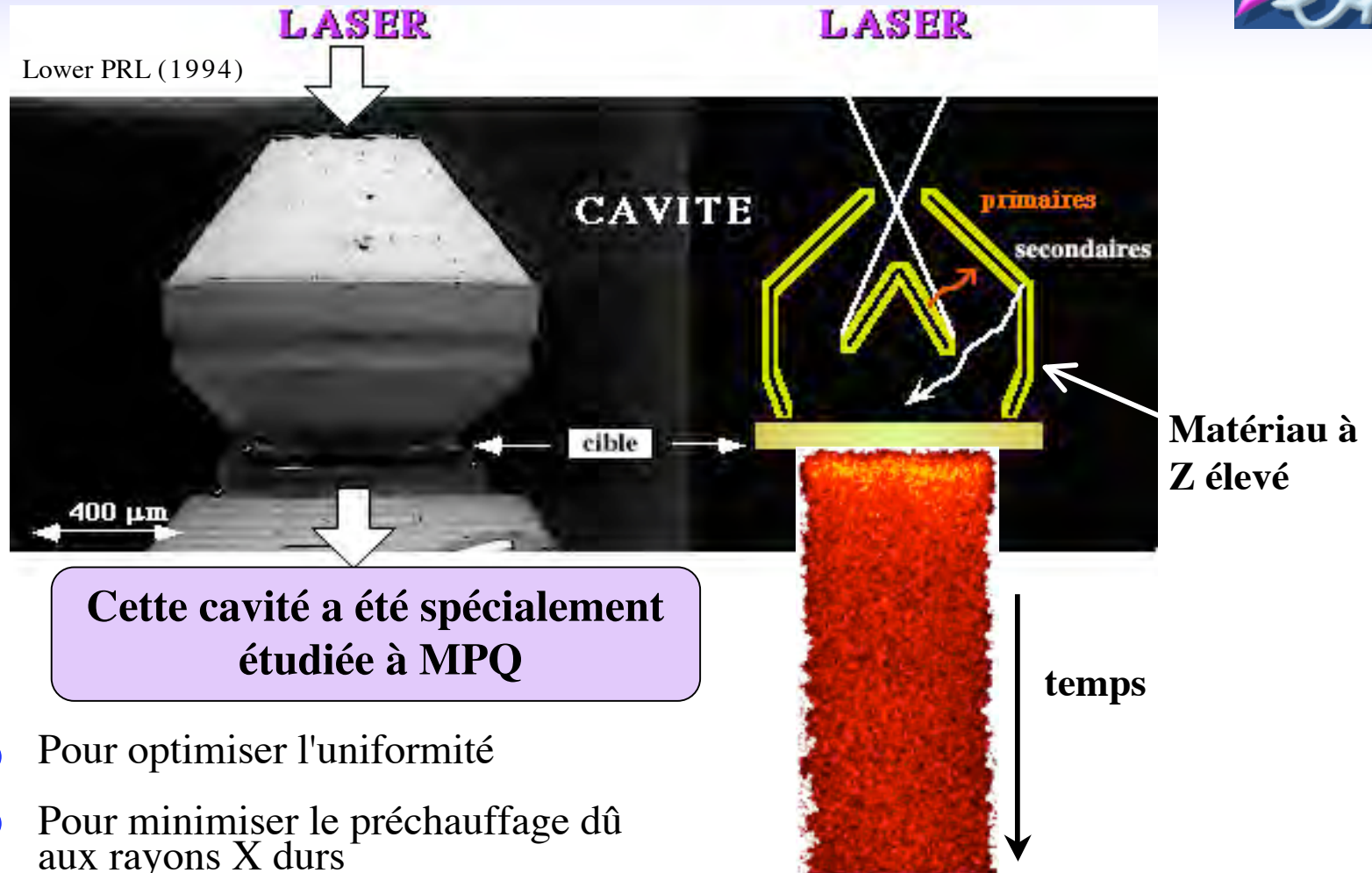
L'absorption

- Les matériaux à haut Z absorbent plus efficacement les X durs
- L'absorption augmente avec l'épaisseur de la cible

remèdes

- Choisir un "ablateur" d'éléments légers
- Prévoir une petite couche d'élément lourd au milieu
- Avoir une épaisseur suffisamment importante

Attaque indirecte



Cette cavité a été spécialement étudiée à MPQ

- Pour optimiser l'uniformité
- Pour minimiser le préchauffage dû aux rayons X durs
- Pour obtenir une température radiative élevée ($E_L \approx 300 \text{ J} \rightarrow T_R \approx 130 \text{ eV}$)

Quelle méthode utiliser ?



Attaque directe

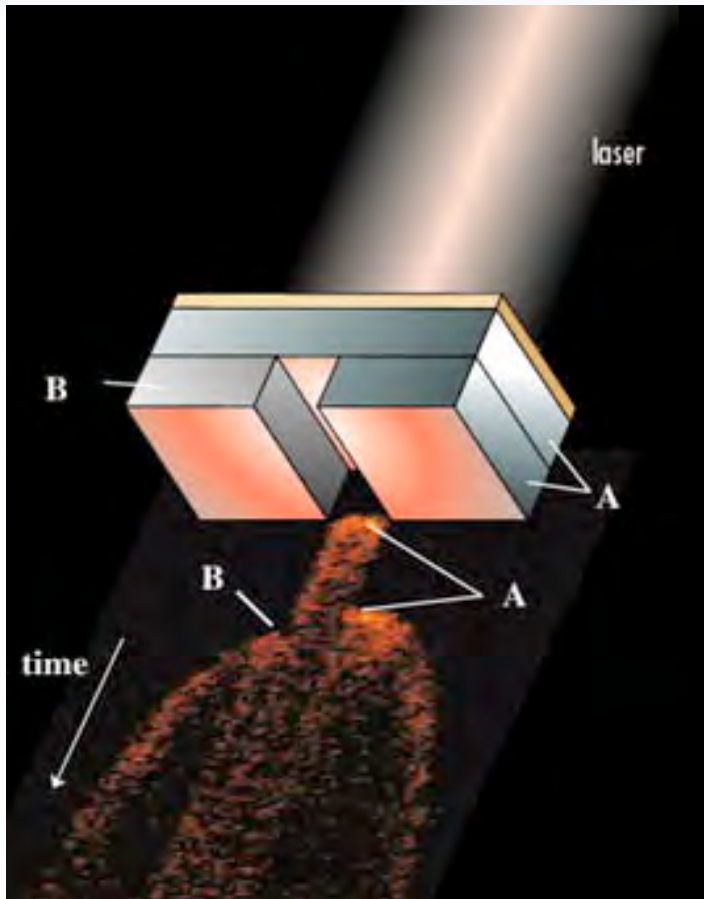
- Bonne uniformité
- Couplage efficace
- Possibilité de générer un choc long et stationnaire
- Facile de réduire le préchauffage

Attaque indirecte

- Excellente uniformité
- Couplage faible
- Difficile de générer un choc long et stationnaire
- Le préchauffage peut être un problème

La plupart des mesures ont été effectuées en attaque directe

Principe d'une mesure relative d'EOS



On mesure la vitesse de choc dans A et B

D_A et D_B

EOS du matériau A connue

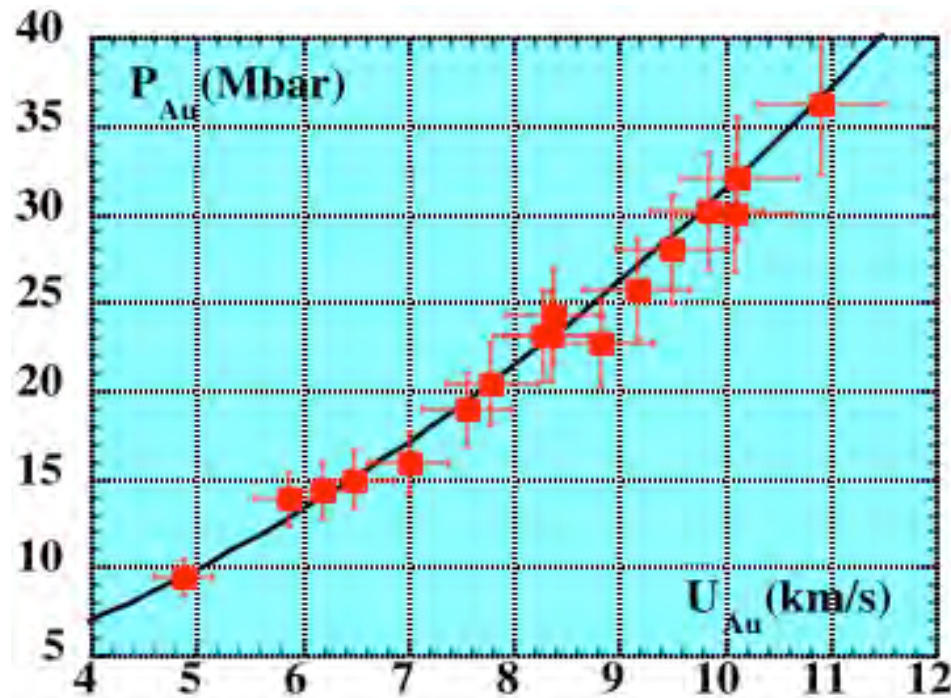


On obtient un point sur
l'EOS du matériau B

Première démonstration d'une mesure

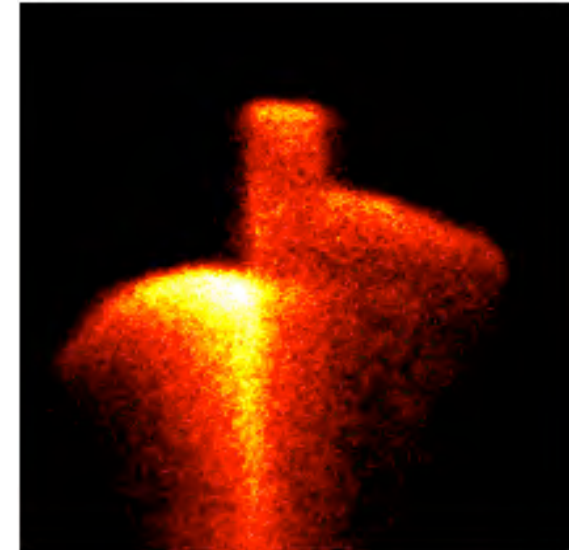


M. Koenig et al., PRL, 1995



■ Expérience: $4.5 \text{ Mbar} < P_{Al} < 16 \text{ Mbar}$
 $10 \text{ Mbar} < P_{Au} < 37 \text{ Mbar}$
— Théorie

Démonstration d'une mesure "précise" d'EOS
avec un laser de taille moyenne $E \approx 100 \text{ J}$



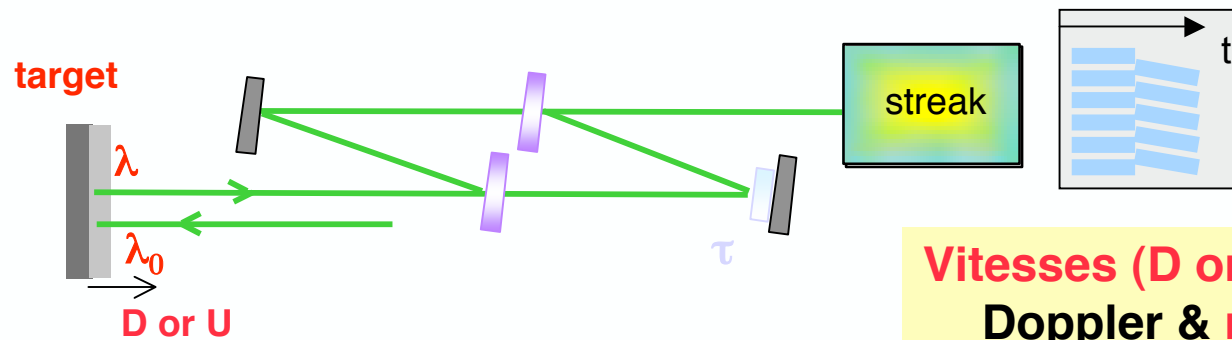
DIAGNOSTICS "CLASSIQUES"

Principaux diagnostics



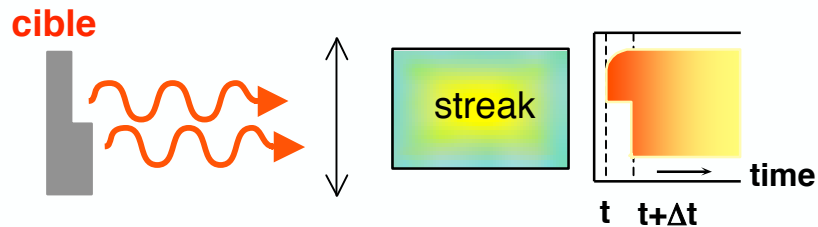
Diagnostics typiques

Velocity Interferometer System for Any Reflector (VISAR)



Vitesses (D or U) par effet Doppler & réflectivité

Emission propre

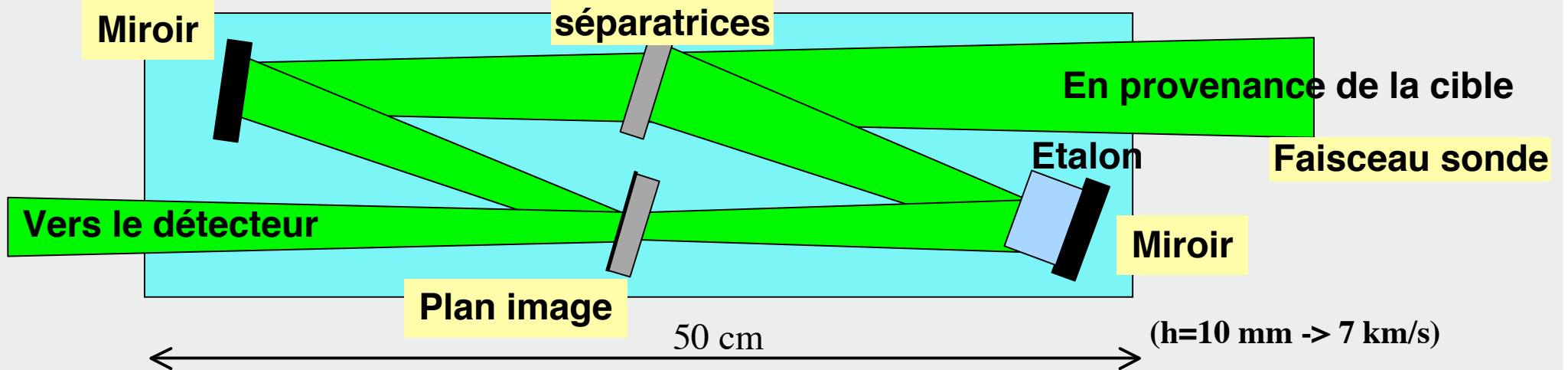


D & Température T

Le VISAR comment ça marche ?



P.Celliers et al., RSI, 75, 11, p4916 (2004)



Etalon $\tau = 2h/c (n - 1/n)$

Au repos : $k_0 = 2h/\lambda_0 (n-1/n)$

A un instant t : $k = 2h/\lambda (n-1/n)$

Variation de l'ordre d'interférence : $k - k_0 = F$



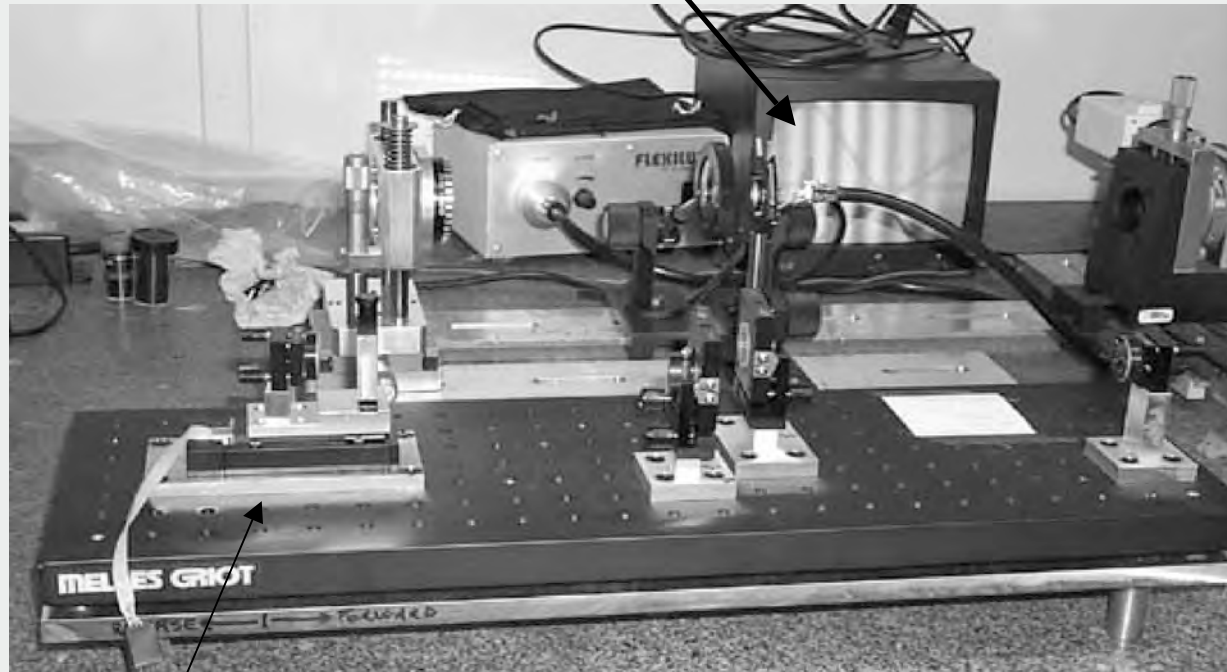
$(\lambda_0 - \lambda) / \lambda_0 = 2V/c$ \Rightarrow

$V = \lambda_0 F / 2\tau$

Le VISAR comment ça marche ?

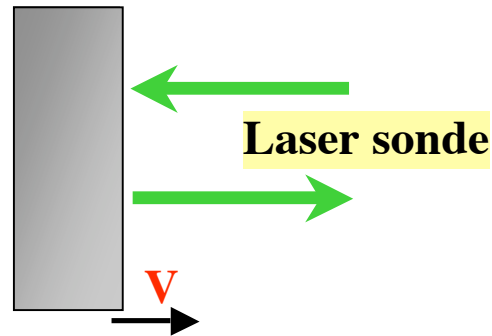


Franges en lumière blanche



Platine motorisée

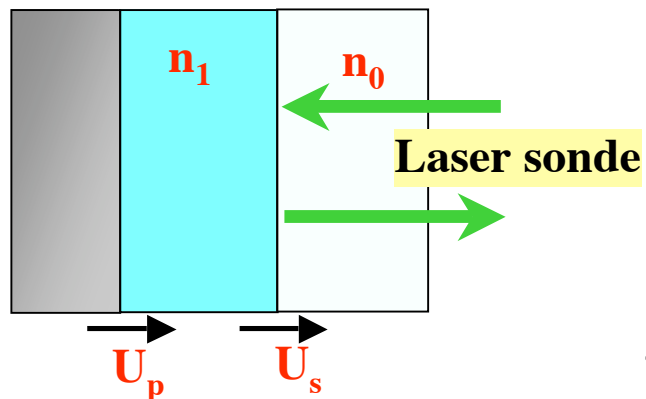
Que mesure-t-on avec le VISAR?



- A. métal

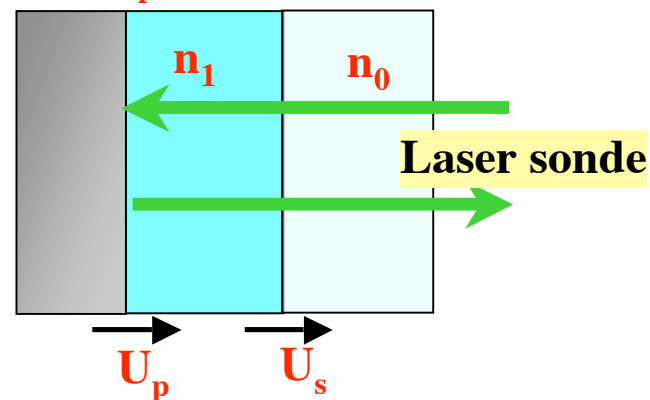
$$V = \frac{\lambda_0}{2\tau} F$$

F=décalage
 τ = retard



- B. métal - (n_0) -> **matériau métallique**

$$U_s = \frac{\lambda_0}{2\tau n_0} F$$



- C . métal - (n_1) - (n_0) -> **matériau reste transparent**

$$n_0 U_s - n_1 (U_s - U_p) = \frac{\lambda_0}{2\tau} F$$

Pourquoi la température est importante ?



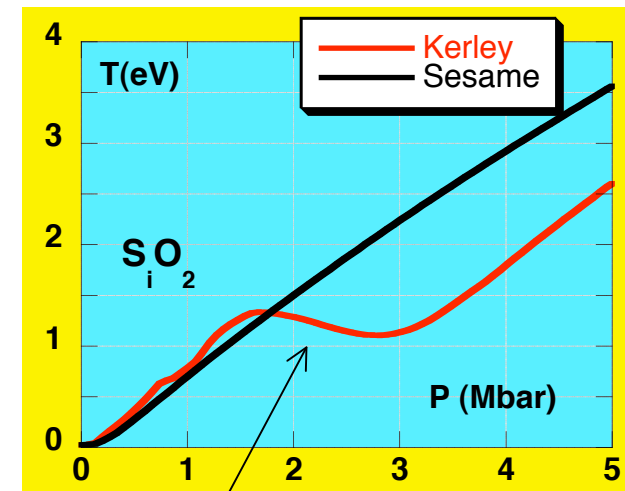
La température est un des paramètres pour lequel les modèles diffèrent le plus



Seule une mesure directe de la température permet de discriminer les modèles



C'est un paramètre clef dans les changements de phase ou d'état



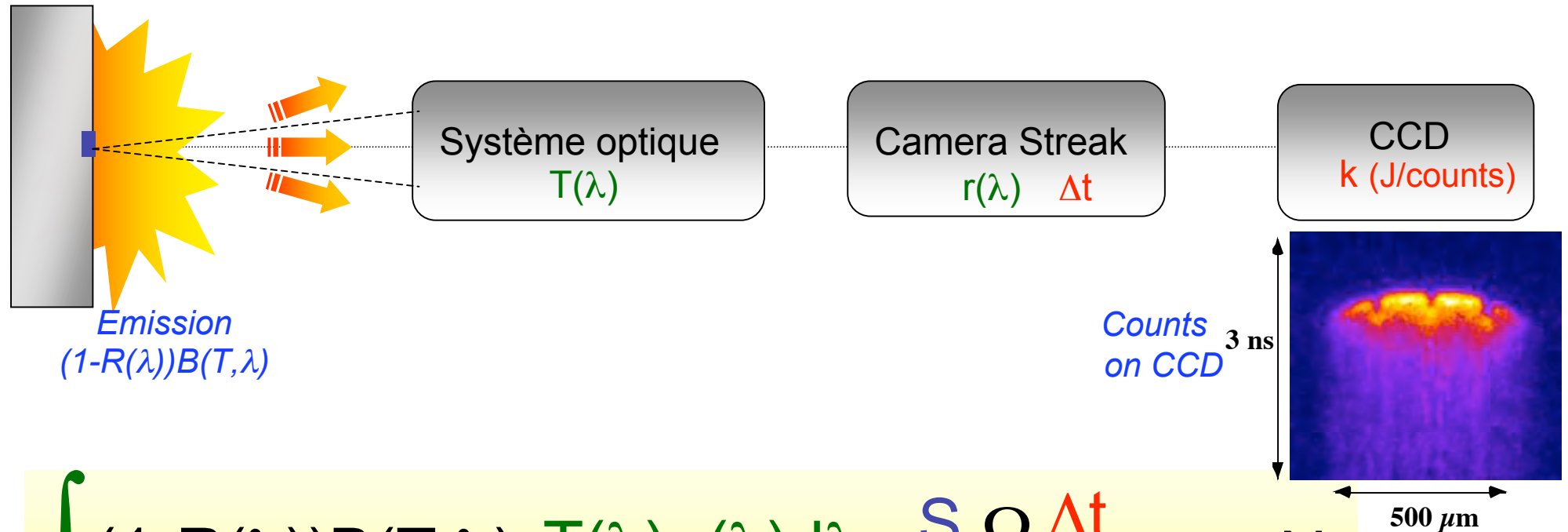
Processus de dissociation
(d'un fluide moléculaire à un fluide monoatomique)

Comment mesurer la température ?



- **Température de couleur** -> principe de la méthode
Rapport de l'intensité émise à 2 longueurs d'onde
- **Température de brillance** -> Ex sur l'eau
Nombre de photons arrivant sur le détecteur (radiance) dans un intervalle de fréquence fixé (visible)

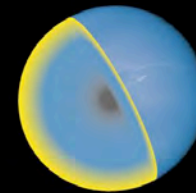
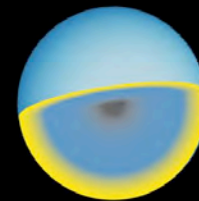
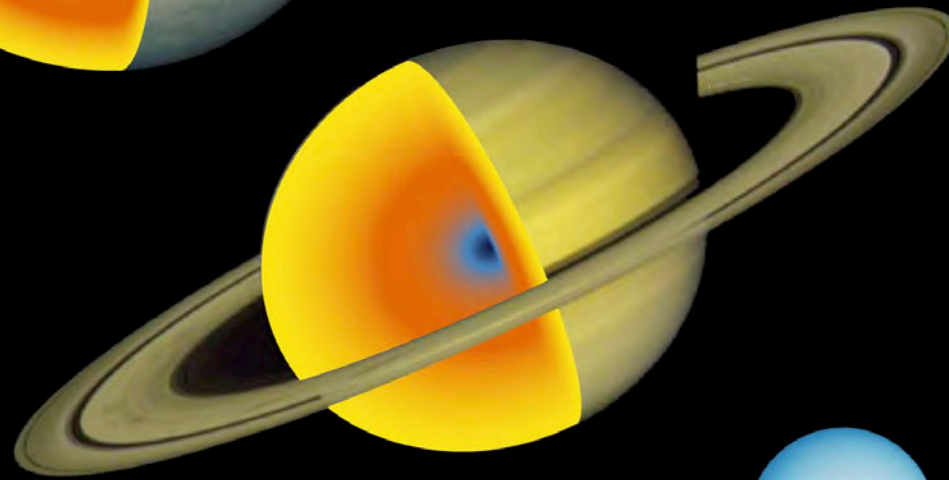
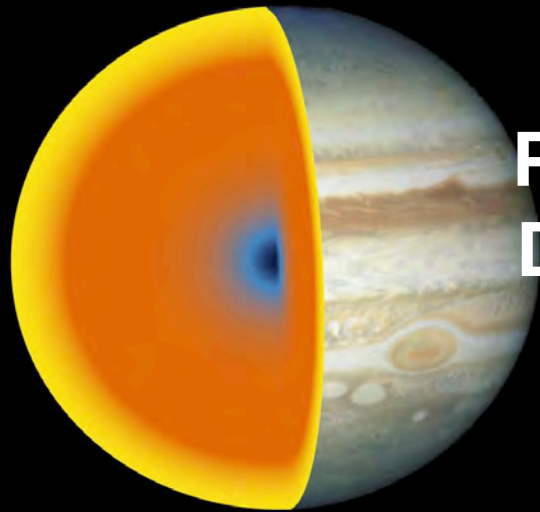
Emission propre



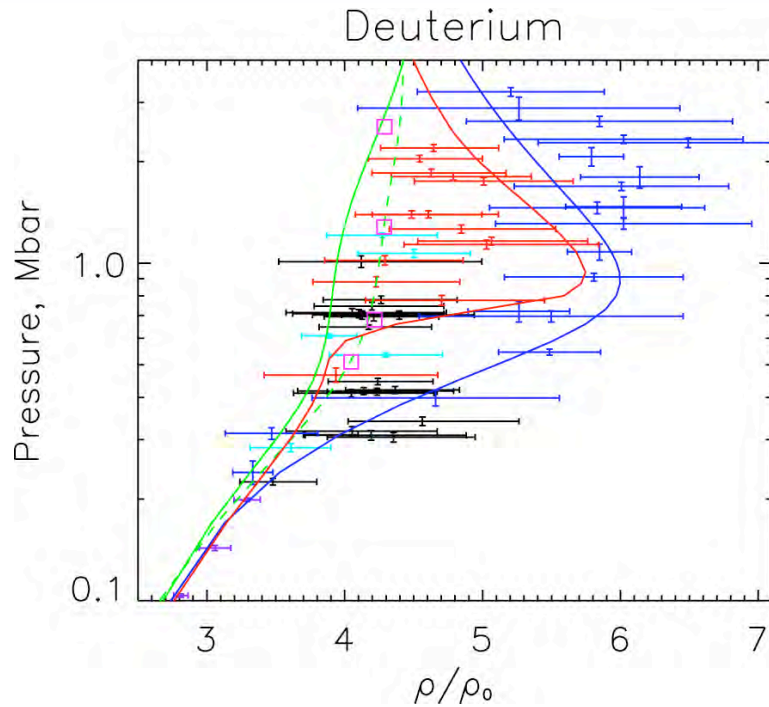
$$\int (1-R(\lambda))B(T,\lambda) T(\lambda) r(\lambda)d\lambda \frac{S \Omega \Delta t}{k} = N$$

Calibration complète du diagnostic conduit à la température

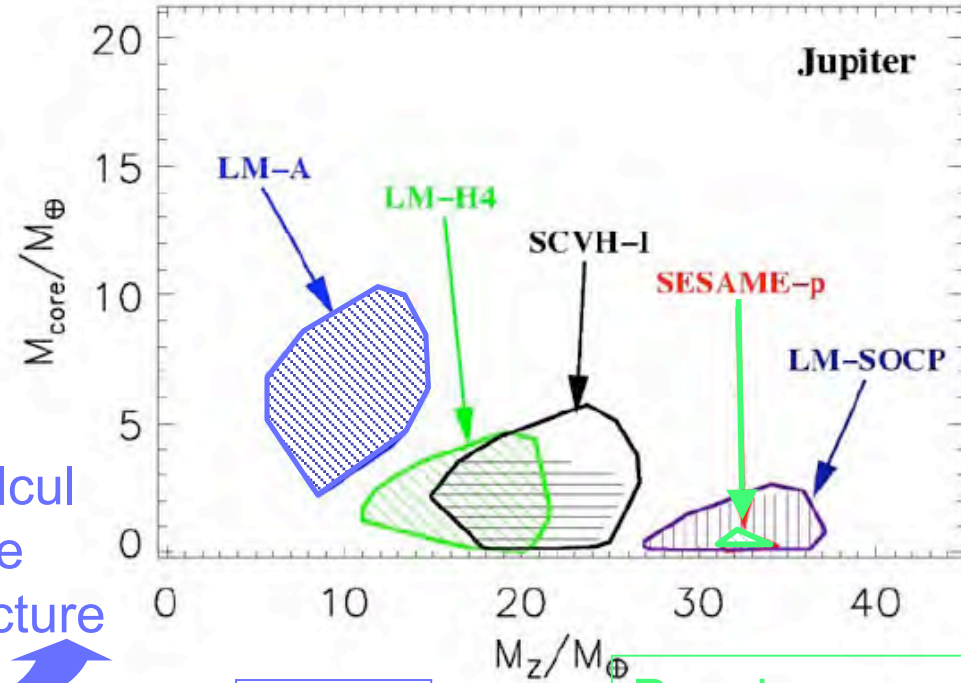
**EOS et CHANGEMENTS DE
PHASE A HAUTES PRESSIONS
DE MATÉRIAUX D'INTÉRÊT EN
PLANÉTOLOGIE**



Le poids des EOS en planétologie (controverse hydrogène)



Calcul
de
structure



Noyau

Pas de noyau
ou petit noyau

•Saumon & Guillot, *ApJ* 2004.

•W.B Hubbard, *Nature* 2004.

•Accrétion autour
d'une masse solide

• Effondrement
gravitationnel par
condensation

➔ Expérience de laboratoire peut résoudre un problème d'astrophysique important!

LE FER

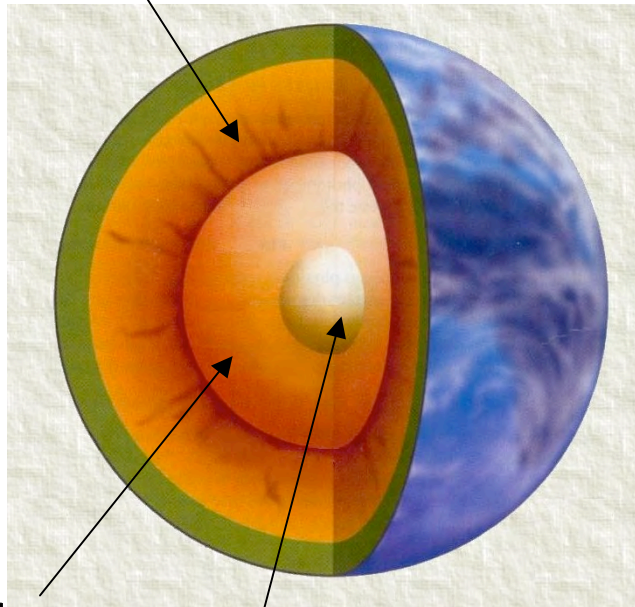
Pourquoi s'intéresse-t-on au fer?



Température de fusion du fer à l'interface solide liquide du noyau terrestre?

$$T_m(P)$$

Manteau



Coeur
Fer liquide

Graine
Fer solide

Chaleur latente de cristallisation $\approx 1 \text{ MJ/kg}$

$$\Delta H_m = \frac{T_m \Delta V_m}{dT_m / dP}$$

Puissance émise par la graine $P \approx 1 - 4 \text{ TW}$

Thermodynamique du coeur

Phénomène de dynamo auto-entretenu



Diagramme de phase du fer

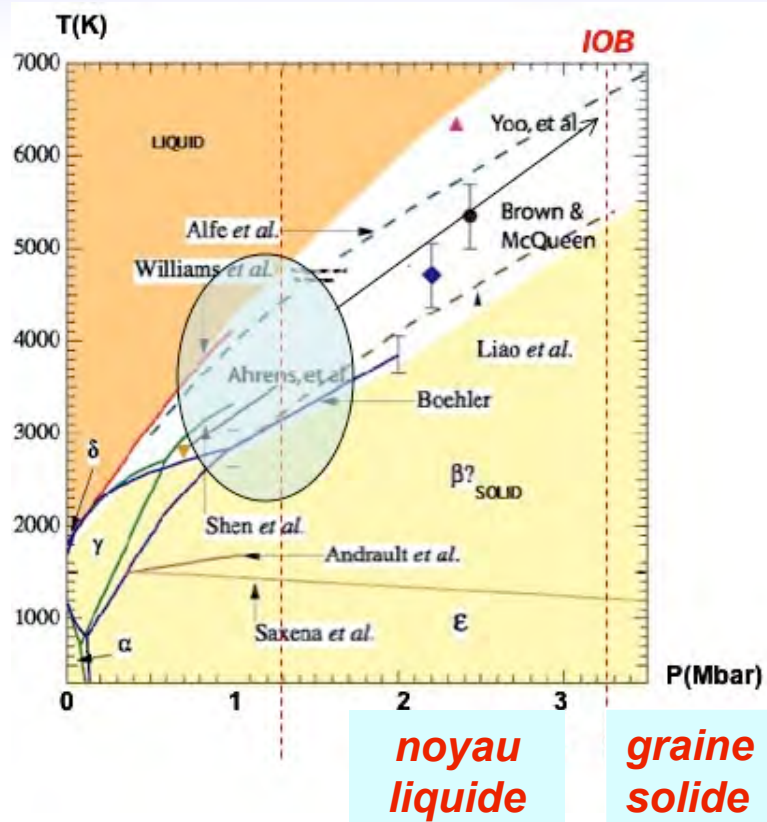


Diagramme de phase pour $P < 5$ Mbar,
 $T < 15.000$ °K (e.g. T_{melting} at Earth's Inner-Outer core boundary $P=3.3$ Mbar)



Nombreuses expériences et calculs,
mais toujours pas de consensus sur la
courbe de fusion

But de notre expérience



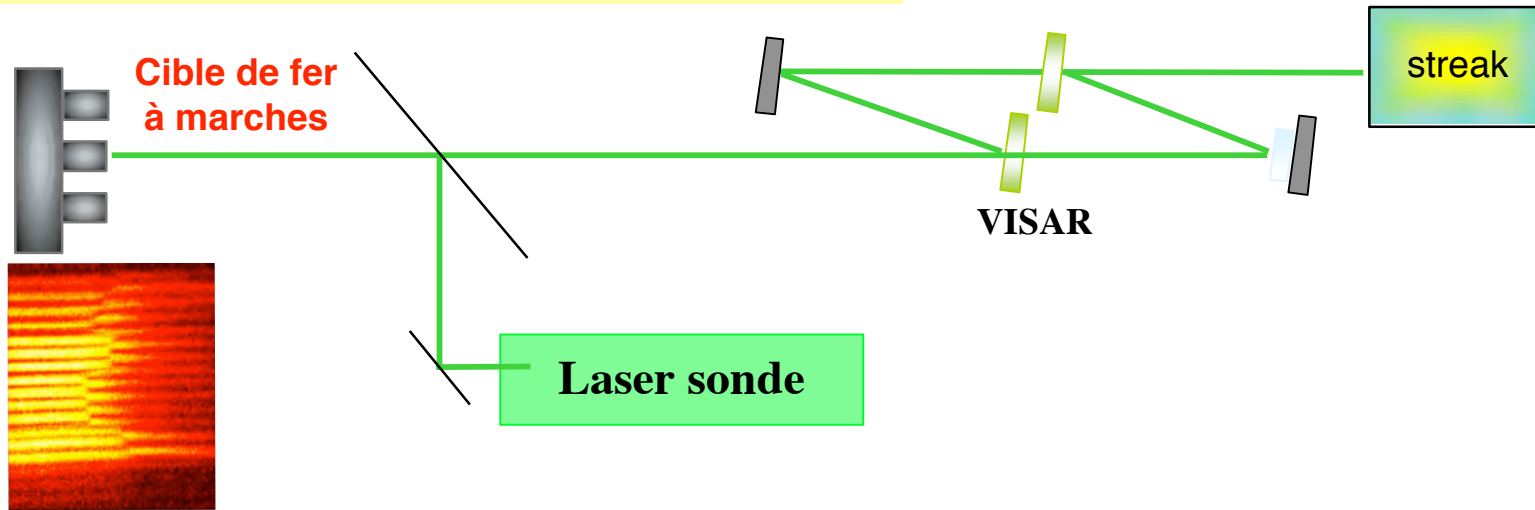
Mesure de l'équation d'état
&
Mesure simultanée de Température/Pression à travers
la région de fusion $\rightarrow T_{\text{melting}}$

Mesure absolue



★ Nécessaire de mesurer 2 paramètres → D & U

★ Diagnostic actif indispensable → VISAR



D = 11.8 km/s; V = 10.8 km/s

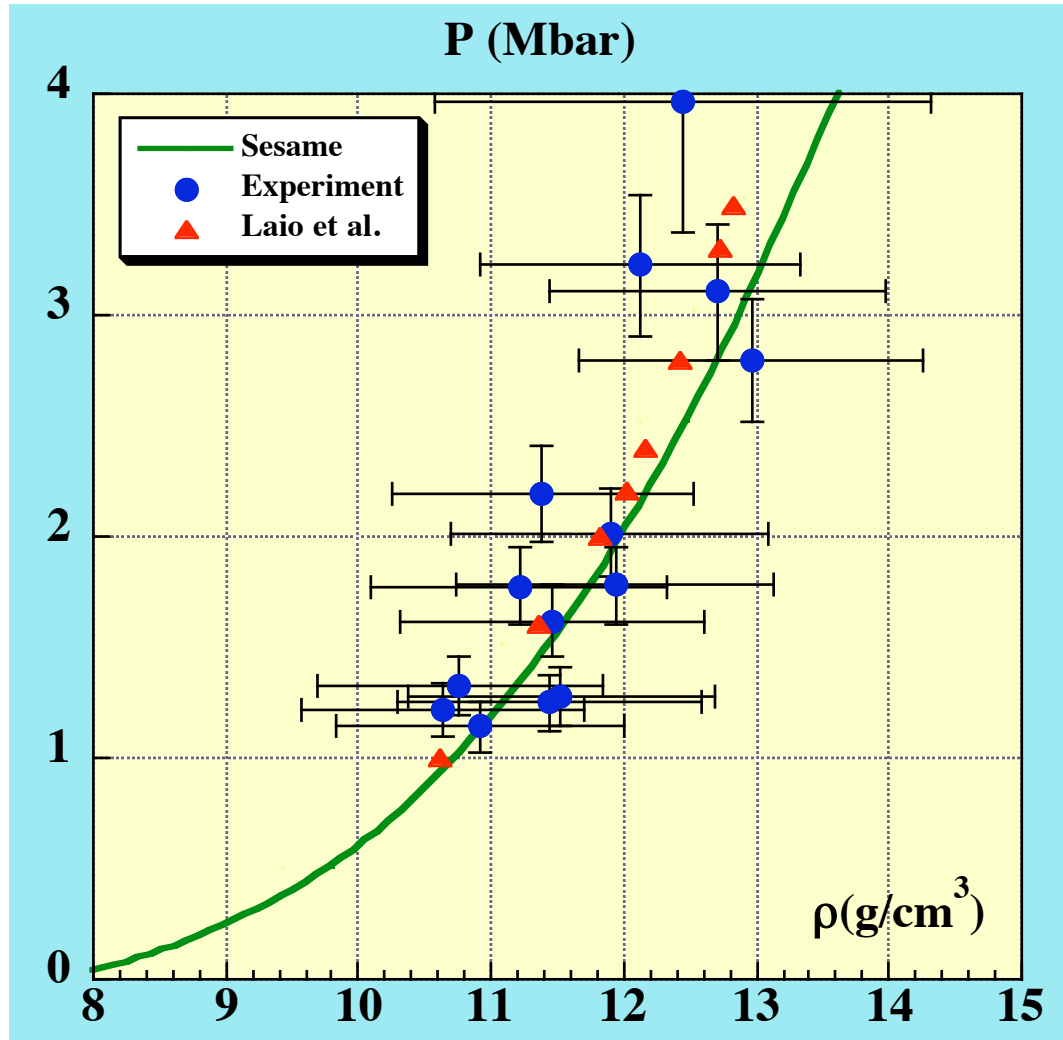
Mesure de D

Les franges bougent au niveau de la base et de la marche à des temps différents e → D

Mesure de U

U est déduit de la vitesse de surface libre $V \approx 2U$
La mise en vitesse de cette surface provoque un décalage des franges (effet Doppler)

Hugoniot principale



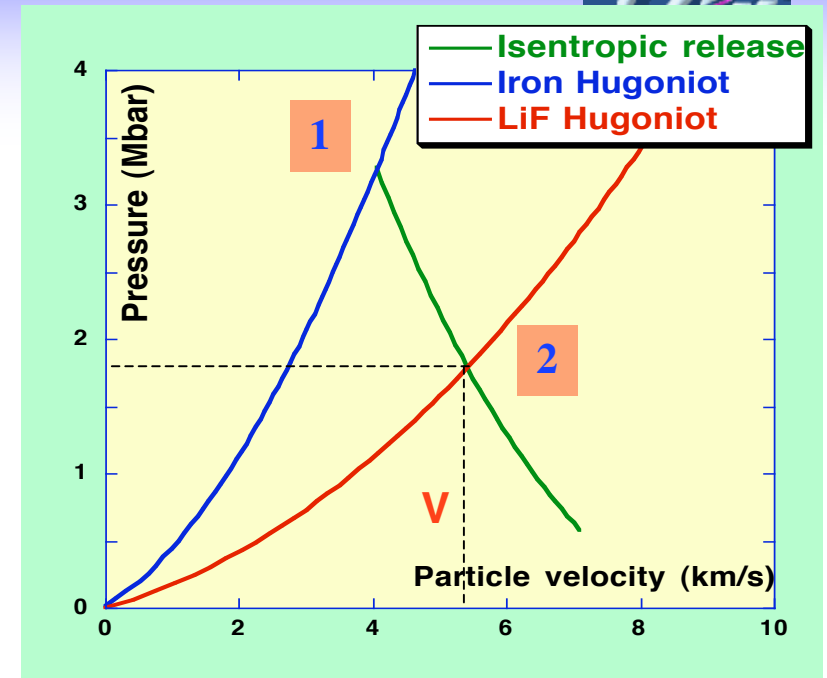
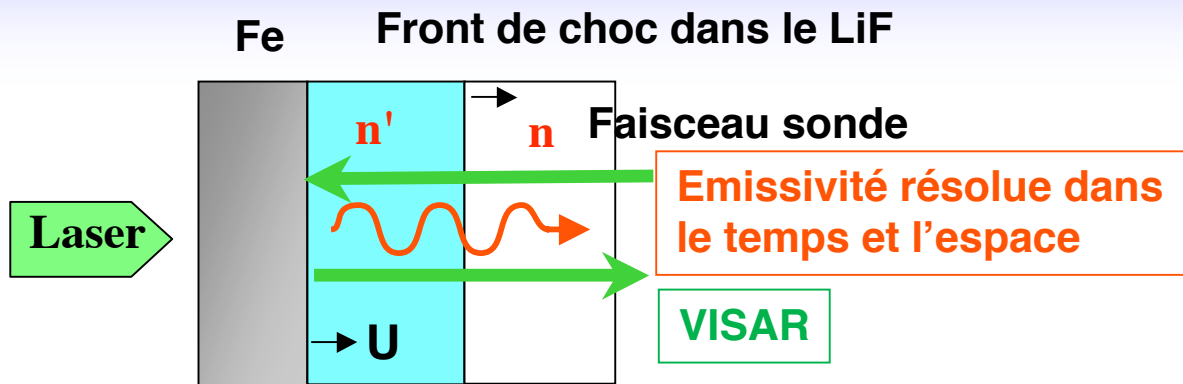
✳ Pour les pressions < 4 Mbar

➤ Précision de $\pm \approx 10\%$

✳ Pour les pressions > 4 Mbar

➤ Précision plus faible $\pm 25\%$,
principalement due à
l'approximation $V=2U$

Etats du fer avec une fenêtre de LiF



Conditions requises pour la mesure de U et T

LiF doit rester transparent



Vrai jusqu'à 2.2 Mbar

(D. Hicks et al. PRL (2003);
J. Clerouin et al. Phys. Rev. B (2006))

L'indice de réfraction du LiF
comprimé doit être connu



Modèle de Kormer

U + SESAME EOS
(validée)



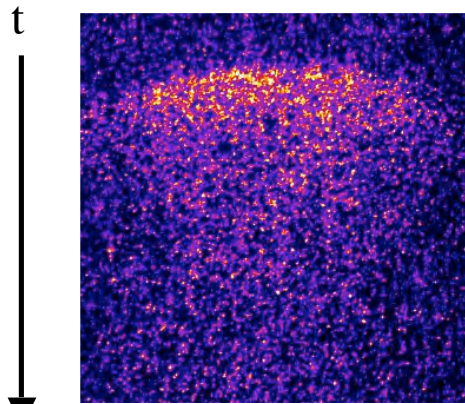
Pressure

Benuzzi et al PoP 2002

Images expérimentales et analyse



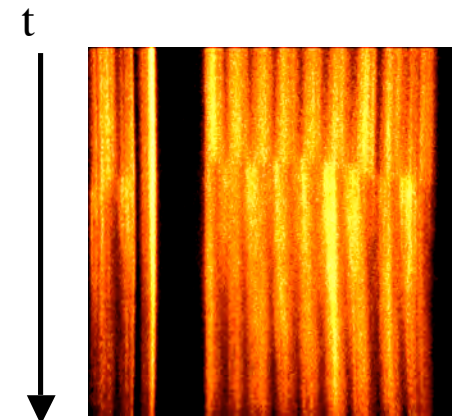
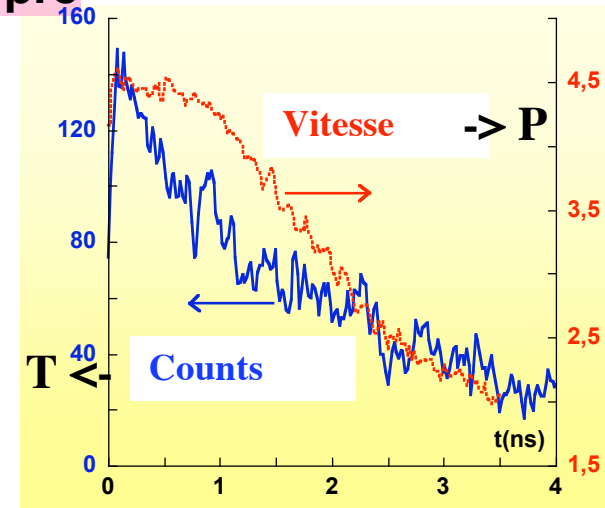
Mesures simultanées



Avec l'émission propre

Radiance = I

$$I = (1-R) B(T)$$

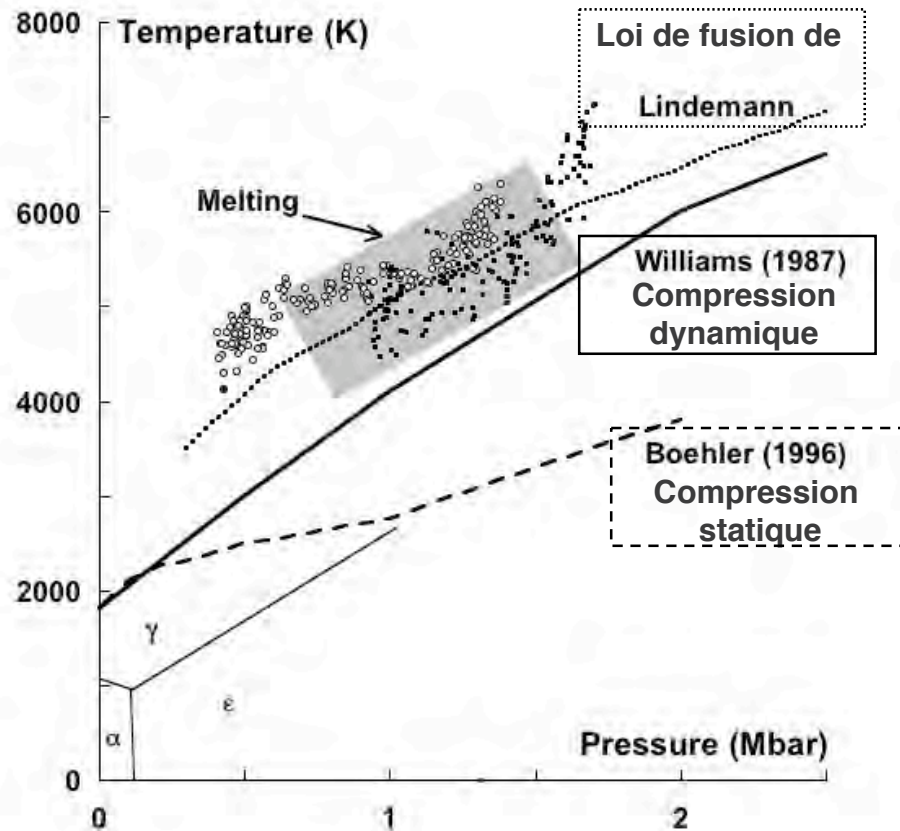


Avec le VISAR

Vitesse d'interface -> P

Réflectivité = R

Température & courbe de fusion



Données extrapolées
 $\Rightarrow T_f(3,3\text{Mbar})=7800\pm 1200\text{K}$

Le désaccord entre données statiques et dynamiques persiste

Taux de chauffage élevée

Fer solide pour $T > T_{\text{fusion}}$?

$10^{12}\text{K/s} \Rightarrow \text{Surfusion} = 23\%$


Luo et Ahrens, APL (2003)

Huser et al., PoP (2005)

**LES DEVELOPPEMENTS EN
COURS POUR LES MESURES
DES EQUATIONS D'ETAT**

Deux points clés pour avancer

 Etudier la région la plus vaste possible de la surface d'état
(→ se rapprocher des *isentropes planétaires*, étudier *la région de fusion* , etc....)

 Le développement de diagnostics X pour caractériser la matière dans des conditions extrêmes (→ sonder le cœur de la microbille,)

Radiographie X

Diffusion X

Il faut savoir se déplacer sur la surface d'état



L'idée est de modifier les conditions initiales : P_0 , T_0 , ρ_0

Densité initiale différente

Matériaux poreux

Koenig et al. Phys. Plasma 6, 3296 (1999)

Préchauffer l'échantillon

Faisceau de protons

(Patel et al. PRL 2003)

Fenêtre transparente

-> états en détente (*Huser PoP 2004*)

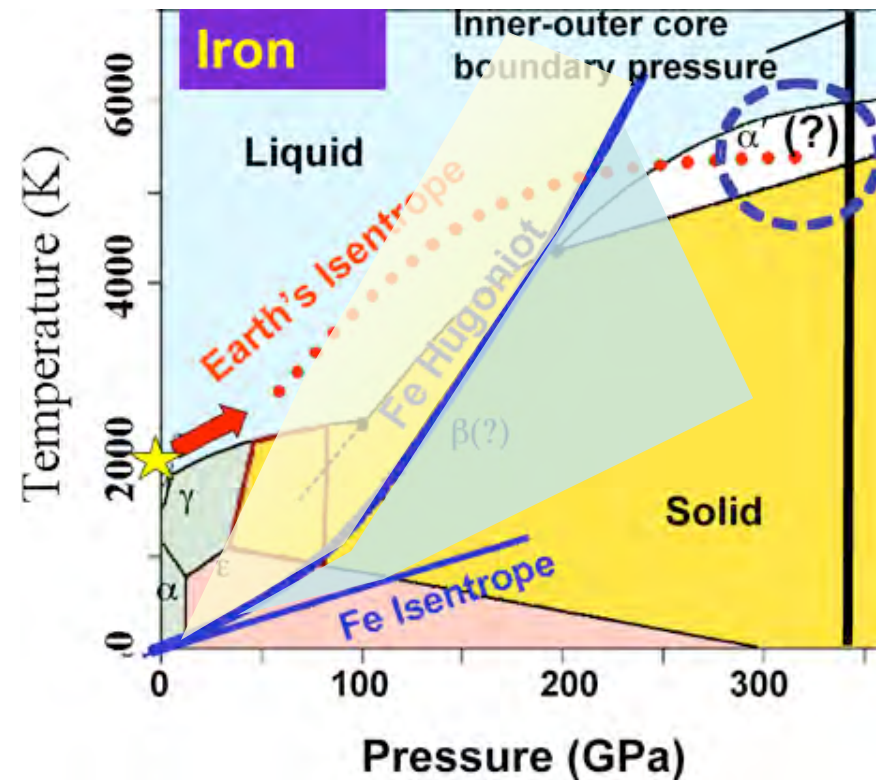
Précomprimer l'échantillon avec un DAC (*Loubeyre et al. 2004*)

Double shock

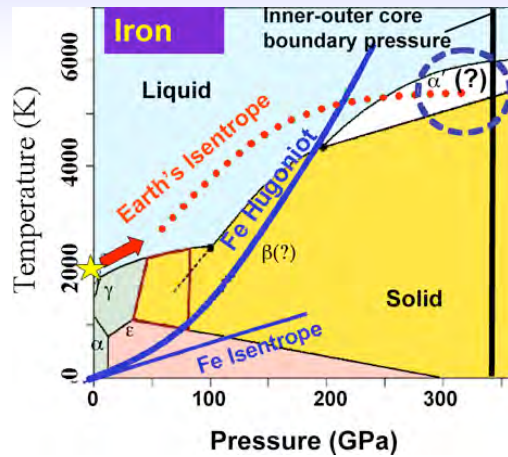
(Benuzzi et al. PRE 2004)

Technique du réservoir

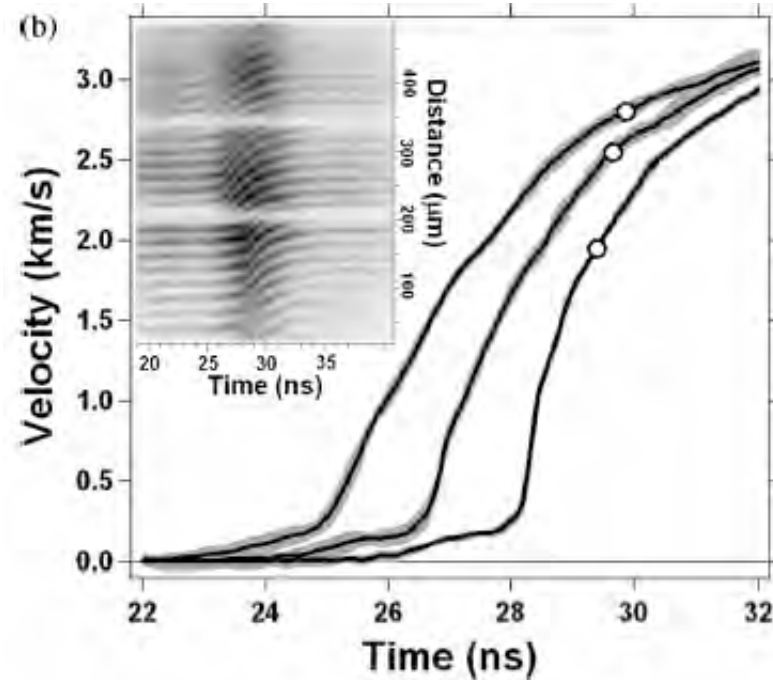
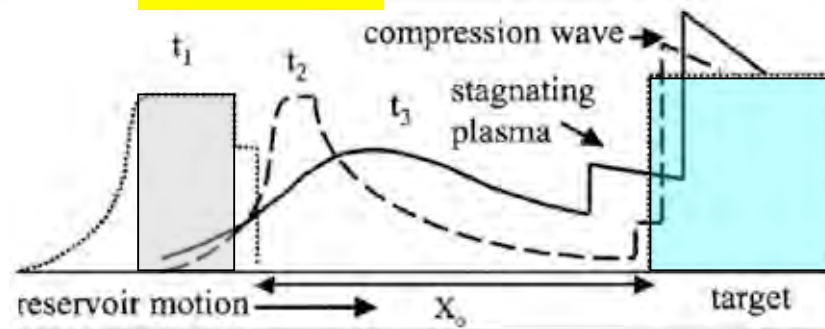
(Edwards et al. PRL2004)



Compression isentropique



réservoir



Smith PRL 2007

Les diagnostics X - Objectifs principaux



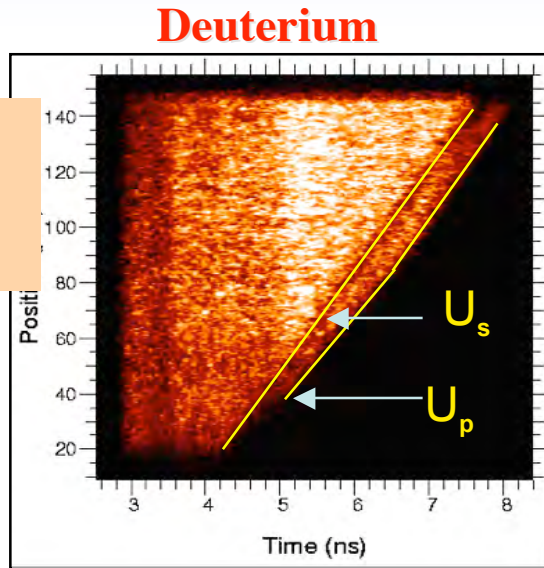
- Caractériser la matière très dense
- Mesurer d'autres paramètres thermodynamiques que les vitesses : **DENSITE, TEMPERATURE, IONISATION, etc..**
- Réduire les barres d'erreur pour les concurrencer autres moyens de compression: Enclumes, canons à gaz or Z pinch

RADIOGRAPHIE X

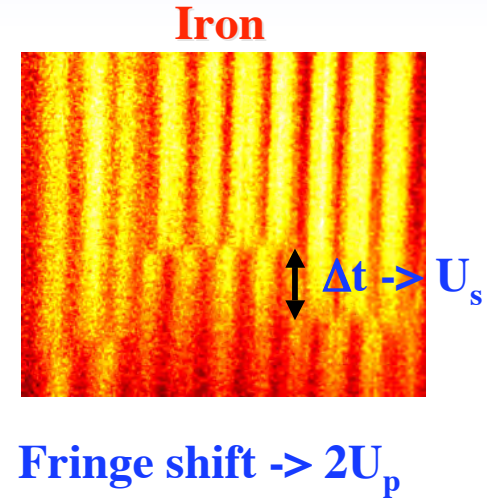
Les mesures "classiques" d'EOS ne donnent pas la densité directement



Radiographie X résolue en temps:



VISAR



Les mesures de $U_s - U_p$ \rightarrow $\rho = \rho_0 (1 - U_p / U_s)^{-1}$

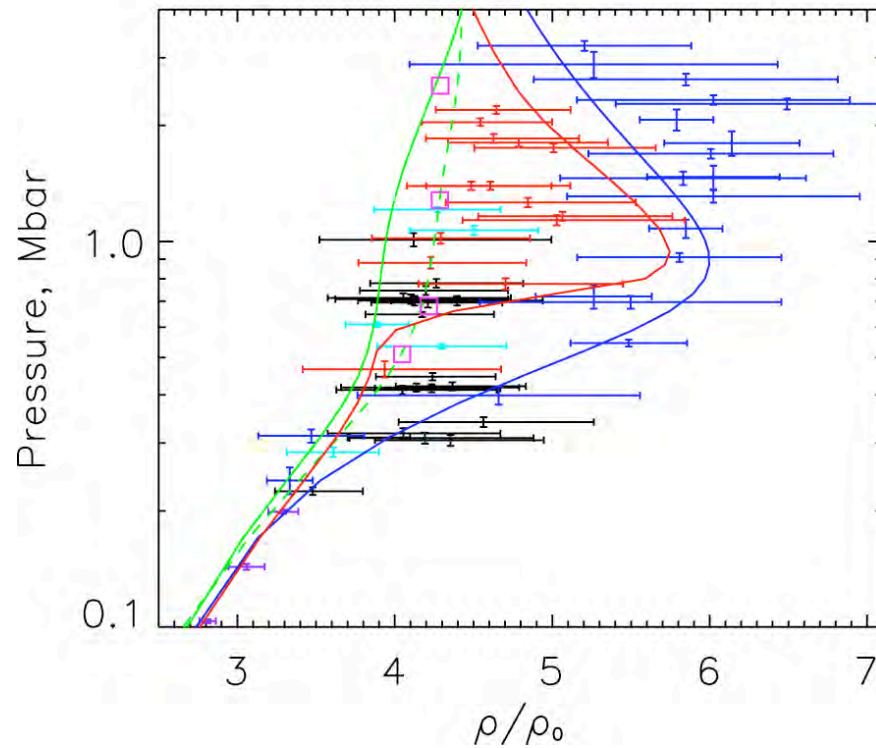
Erreurs sur ρ sont très sensibles à δU_s and δU_p

$$\frac{\delta \rho}{\rho} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) \sqrt{\left(\frac{\delta U_s}{U_s} \right)^2 + \left(\frac{\delta U_p}{U_p} \right)^2}$$

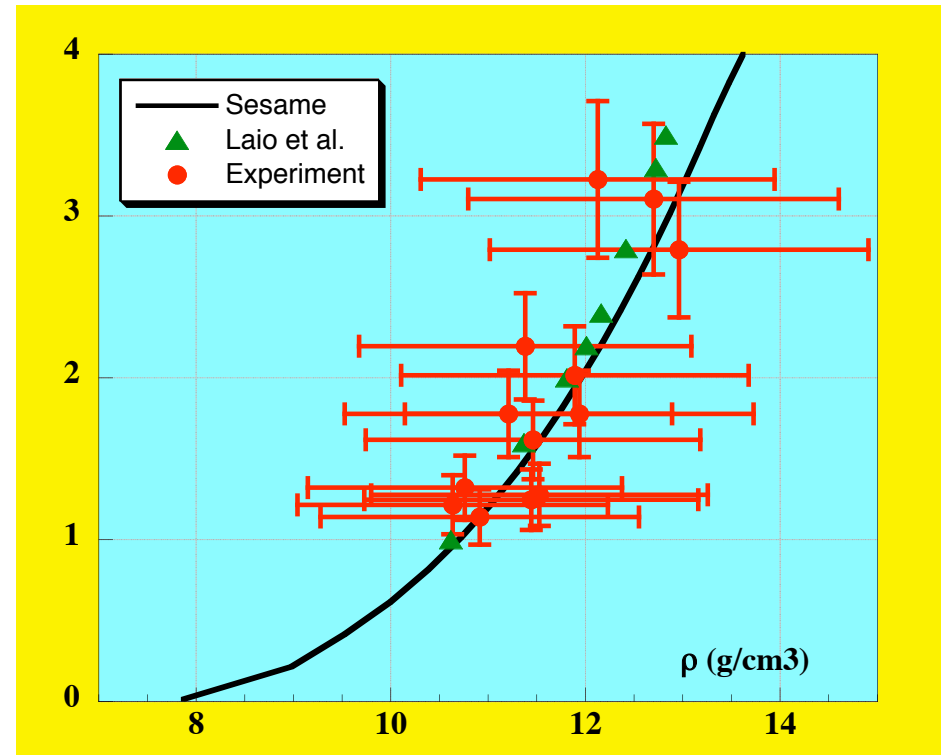
Résultats dans le plan (P,ρ)



Deutérium Deuterium



Fer



Les barres d'erreur sont trop importantes pour bien discriminer les modèles

Radiographie X avec Imagerie 2D monochromatique

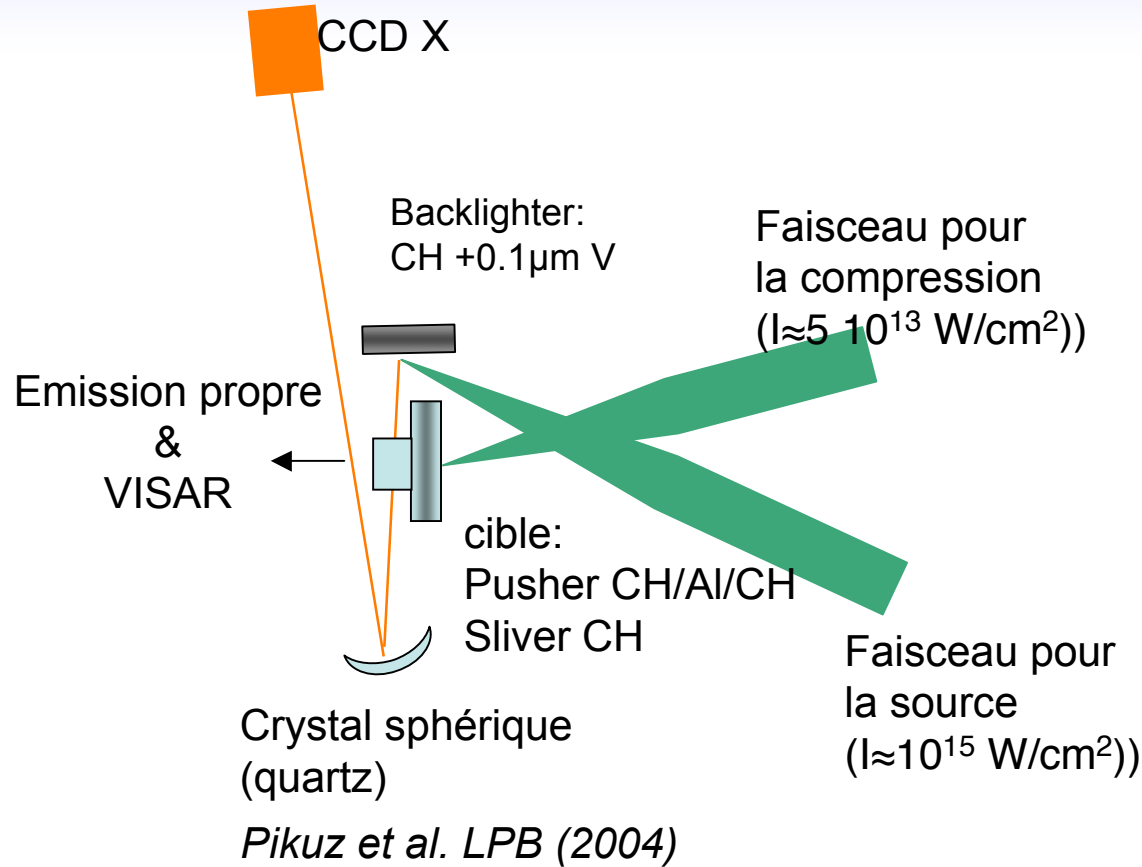


Image d'une grille en or (400 lpi)

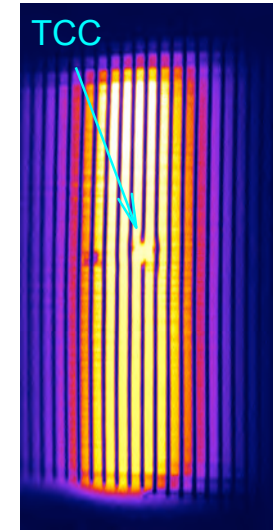


Image à **5keV** (He like V)

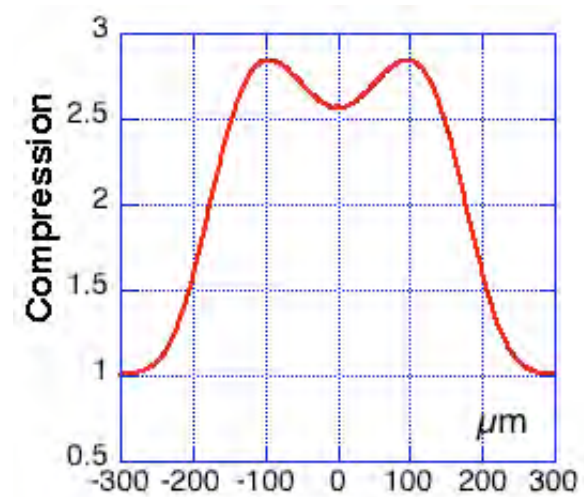
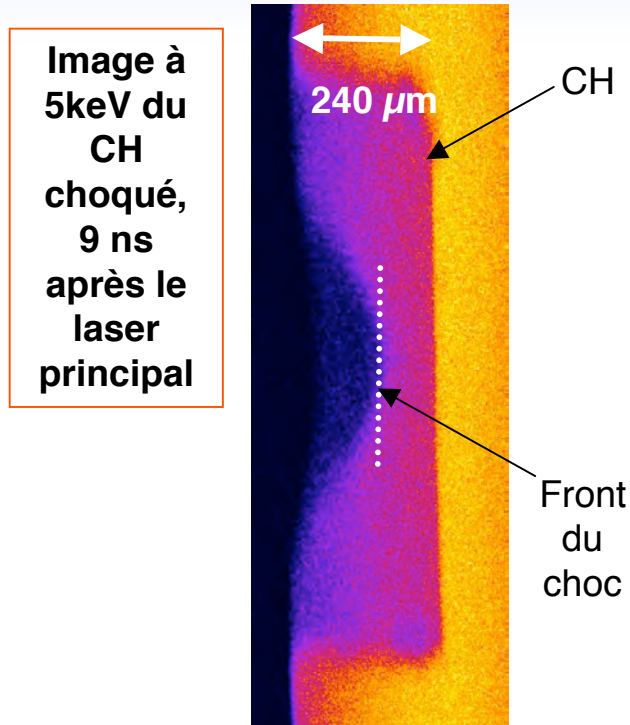


Résolution spatiale: $\Delta r < 17 \mu\text{m}$

Avantages

- ✦ **Monochromaticité**
- ✦ **Très bonne résolution**

Résultats



Compression ≈ 2.85

Les résultats sont en très bon accord avec les diagnostics face arrière et simulations hydrodynamiques

Diagnostic prometteur pour les matériaux à faible Z

Benuzzi-Mounaix et al. PRE (2008)

Les rayons X thermiques \leq qq keV!!!

Besoin de rayons X durs et d'autres diagnostics (plus de paramètres)

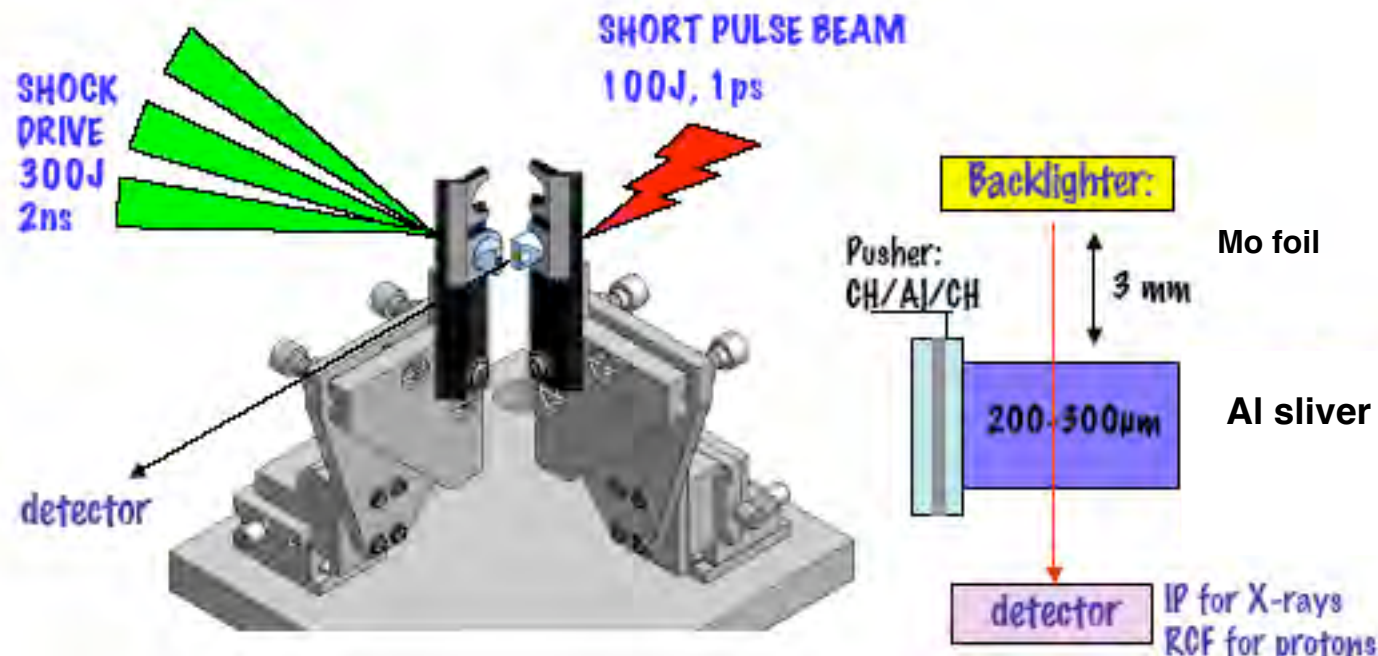
Radiographie X en impulsion courte



Une technique nouvelle pour sonder des matériaux à Z élevé

Impulsion courte → génération de rayonnement X dur ka via les électrons relativistes

Impulsion longue → génération de l'onde de choc

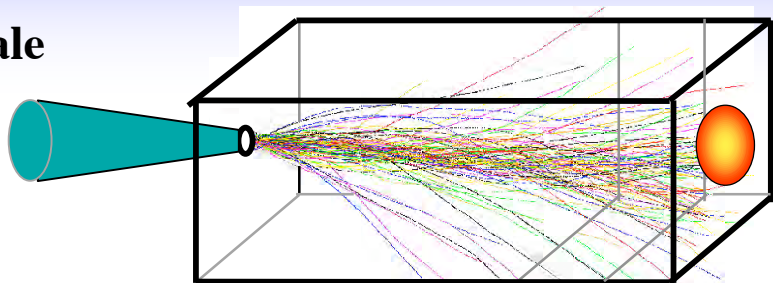


Aluminum sondé par une source $k\alpha$ du Mo à 17.5 KeV

Expérience réalisé au RAL laboratory

Résolution

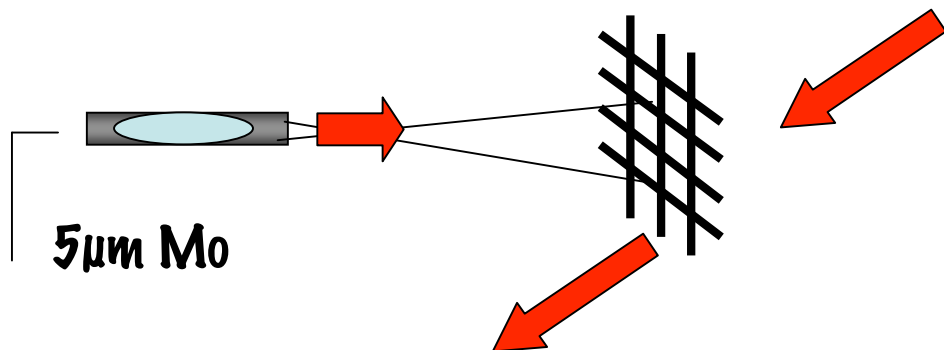
Tache focale
< 20 μm



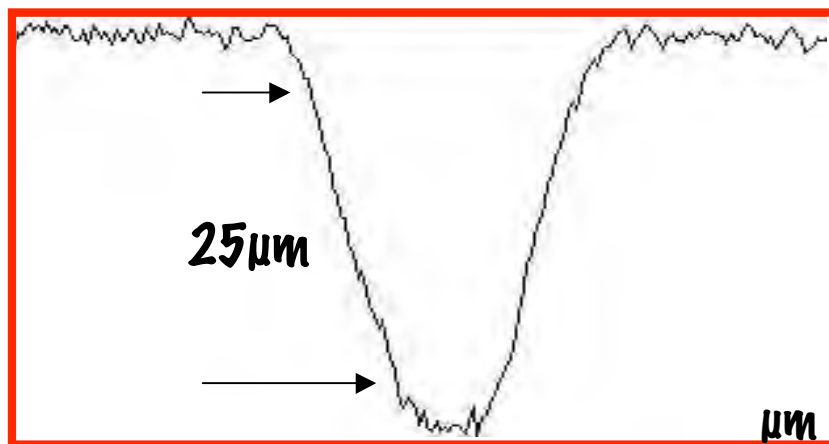
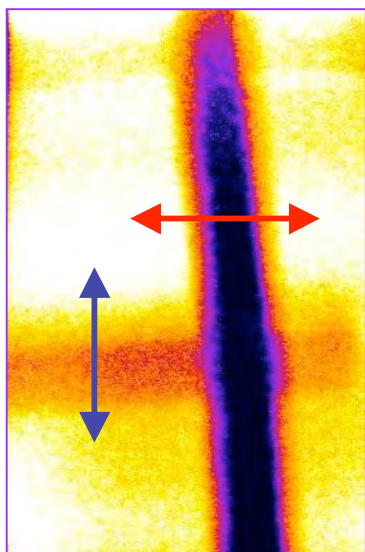
Source $K\alpha$
> 50 μm



Utilisation de drapeau (Mo)
l'épaisseur définit la taille de la source
Résolution 1D



5 μm Mo



Résolution
 $\sim 25 \mu\text{m}$ dans la
direction du
choc ($\approx 70 \mu\text{m}$
dans l'autre):

Radiographie d'un choc dans l'aluminium



Après 5 ns, le choc a
parcouru 85 μm .
Après 8 ns, 130 μm



Vitesse moyenne



$D \approx 15 \text{ km/s}$

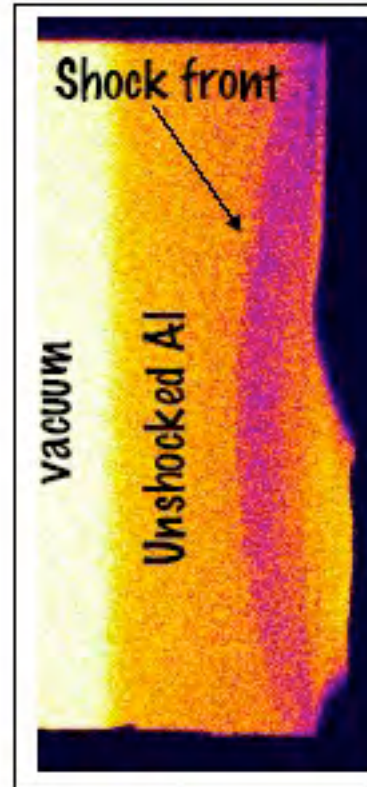
Une mesure de
 U_s plus précise
est obtenue par
l'émission propre



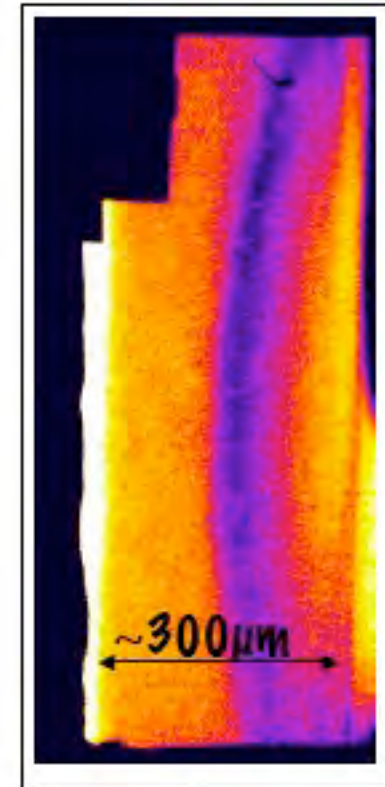
SESAME EOS



$P \approx 3 \text{ Mbar}$ and $\rho/\rho_0 \approx 2$



@5ns

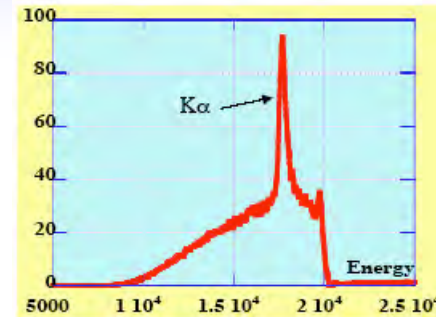


@8ns

Résultats de compression

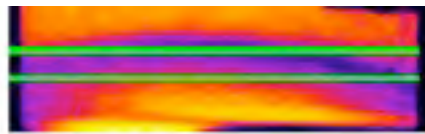


Spectre de la source (Single photon counting CCD)
→ spectre étroit \approx monochromatique



$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu \rho z)$$

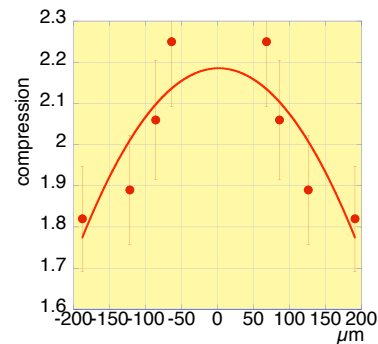
Measured by absorption



Tabulated values

Areal density
 $\overline{\rho z} = f(\rho)$ (Abel inversion)

Compression ρ/ρ_0



Bon accord avec les simulations 2D (DUED code by S. Atzeni)

Ravasio et al. PoP (2007)

Radiographie X en impulsion courte très énergétique (60 Kev)

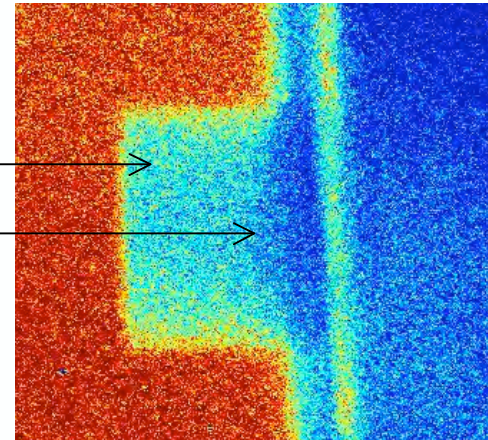


Source X \longrightarrow $K\alpha$ du tungstène

Utilisation d'un fil de $18 \mu\text{m}$ pour avoir la résolution dans les deux directions

Cylindre non perturbé

Front de choc



Radiographie d'un cylindre de $500 \mu\text{m}$ de diamètre de Fer

DIFFUSION X

Généralités

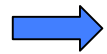
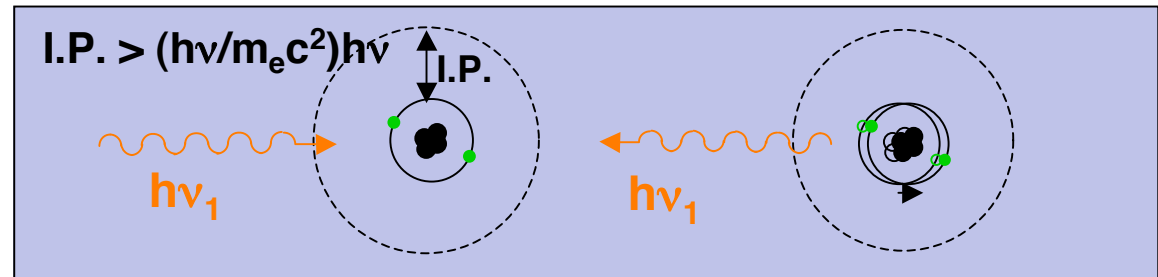


La section efficace de la diffusion des rayons X \Rightarrow 3 contributions:



e- fortement liés

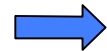
Composante élastique
(pic Rayleigh)



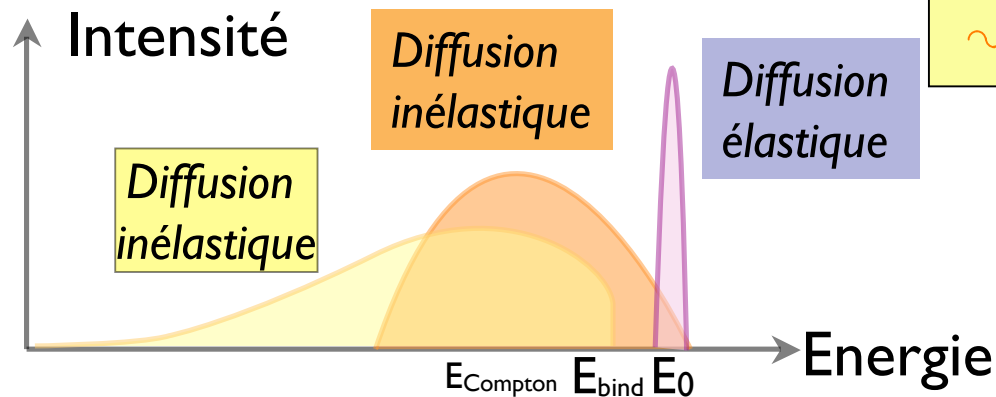
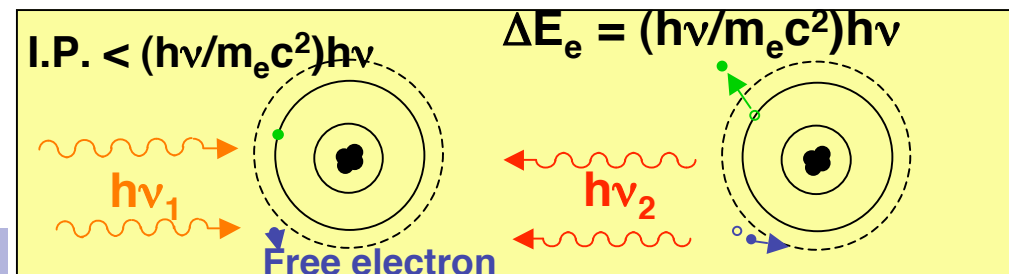
e- libres



Composantes inélastiques élargies par le mouvement thermique



e- faiblement liés



Dans un plasma

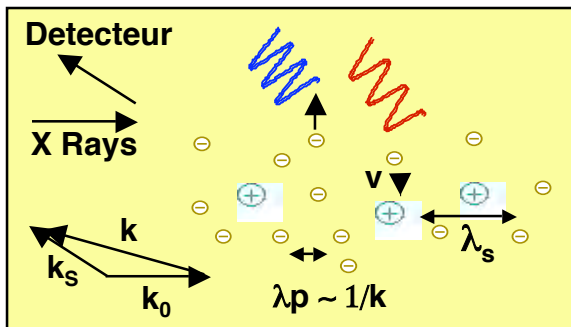


Deux régimes

Paramètre de diffusion $\alpha = \lambda_p / \lambda_s$ $\lambda_p = \lambda_0 / (2 \sin(\theta/2))$

λ_s est la longueur d'écrantage

λ_p est la longueur d'onde sonde

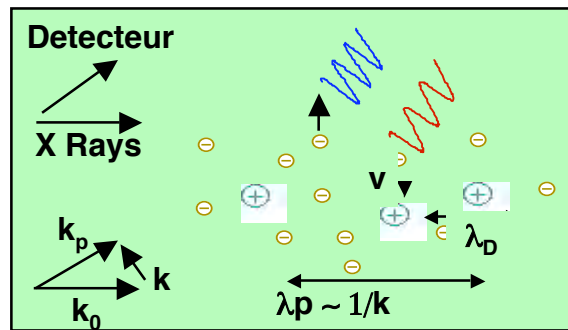


If λ_p is $< \lambda_s$ i.e. $\alpha < 1$

Régime non collective

Scattering sur les électrons

T_e & Z^*

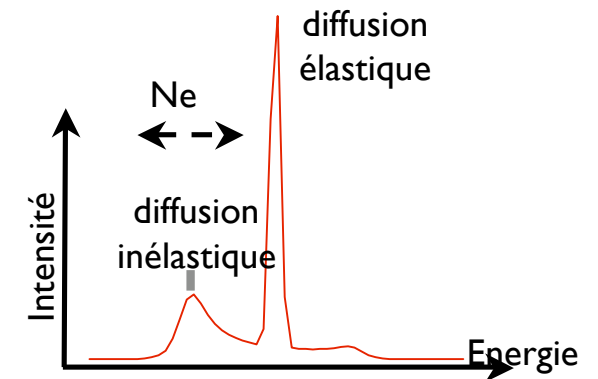


If λ_p is $> \lambda_s$ i.e. $\alpha > 1$

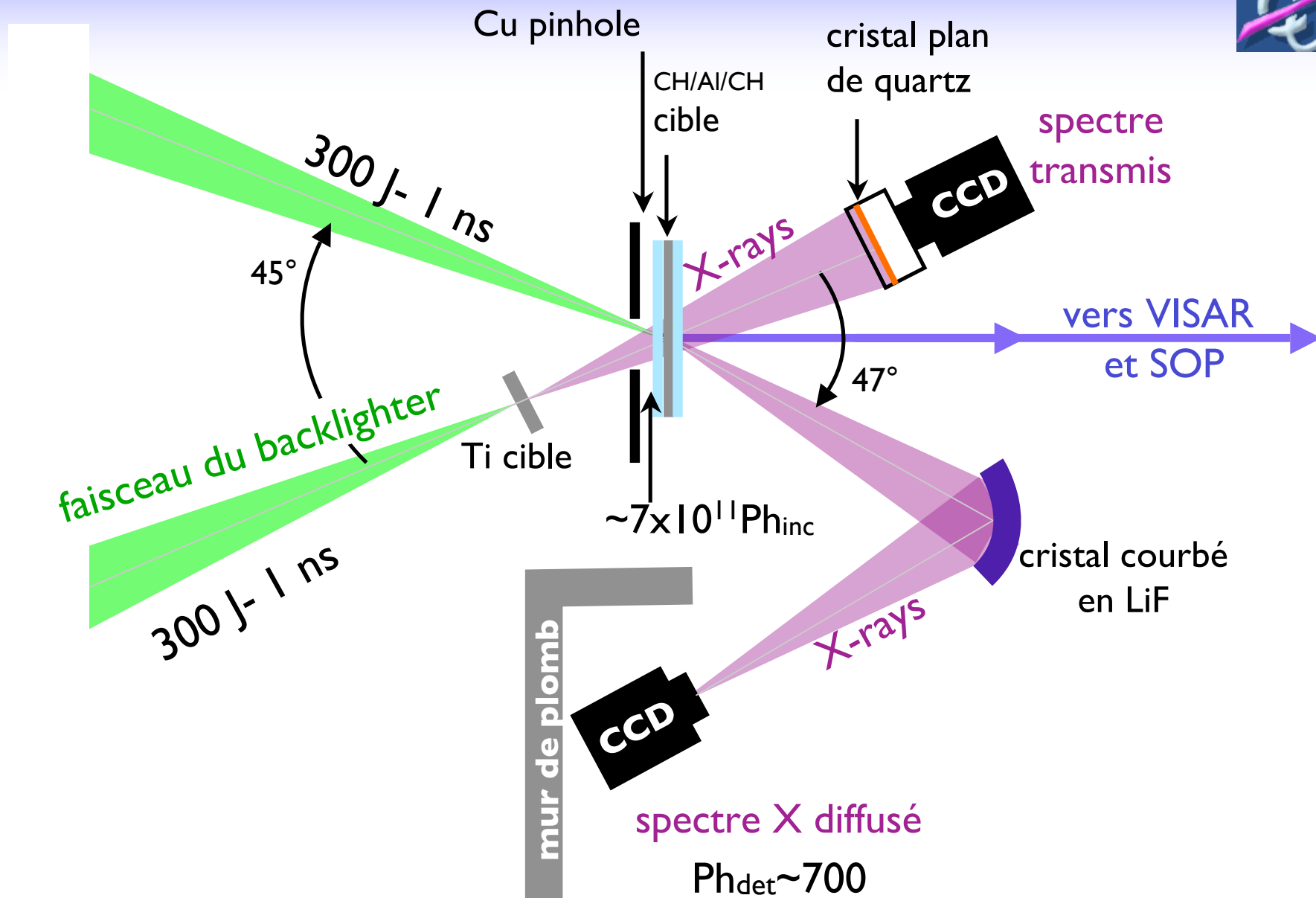
Régime collective

Scattering sur les ondes électroniques

n_e & T_e



Dispositif expérimental



Spectre diffusé à 500 ps



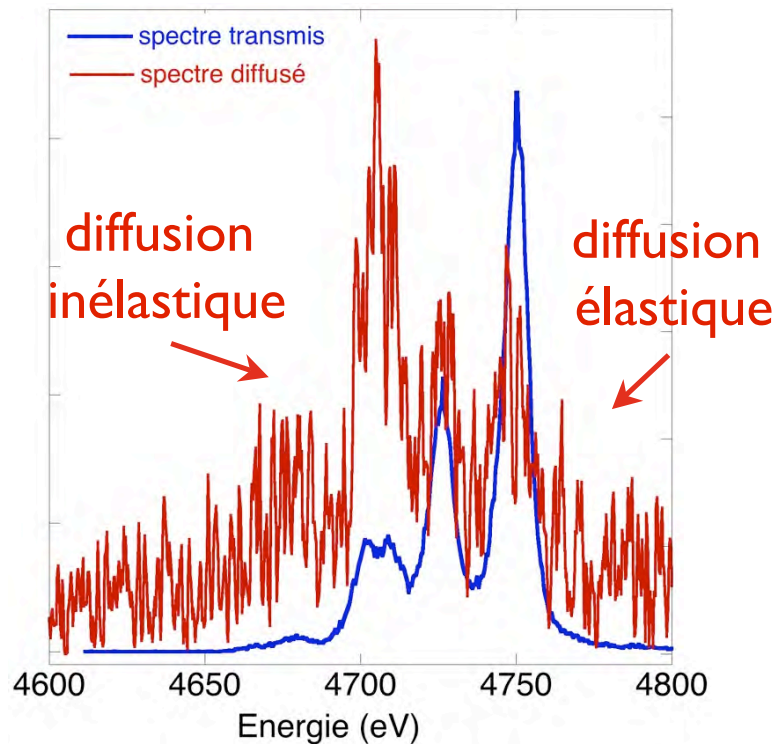
simulation
hydrodynamique:

$$\Delta t = 500 \text{ ps}$$

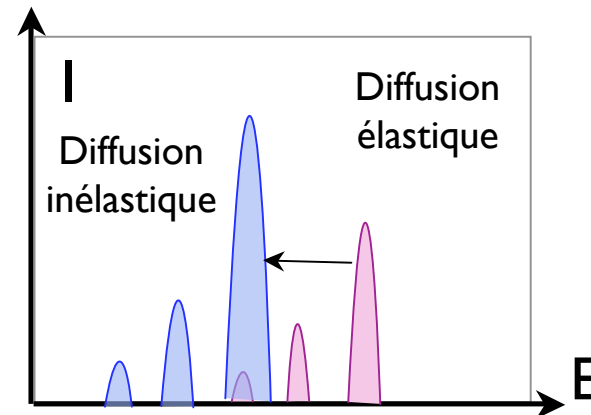
$$T_e \sim 0.8 \text{ eV}$$

$$Z^* \sim 2.7$$

$$N_e \sim 2.1 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$$

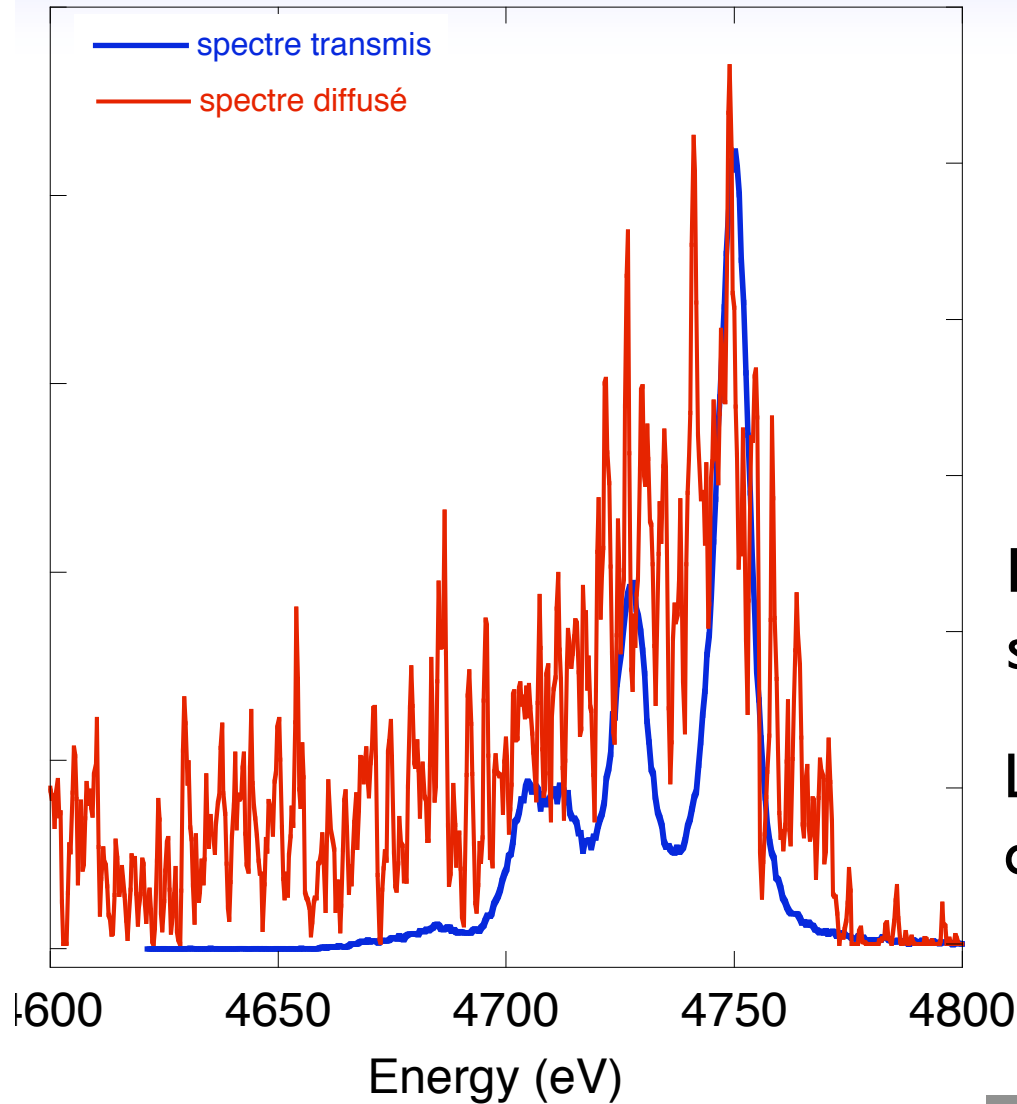


Le signal à l'énergie des satellites est plus intense qu'à la résonance contrairement au spectre incident.



- diffusion inélastique > diffusion élastique

Spectre diffusé à 5 ns



simulation
hydrodynamique:

$$\Delta t = 5 \text{ ns}$$

$$T_e \sim 0.35 \text{ eV}$$

$$Z^* \sim 1.7$$

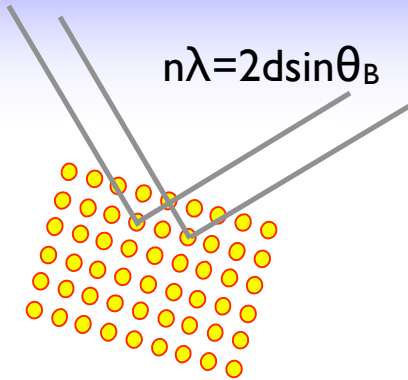
$$N_e \sim 4.2 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

Le spectre diffusé est identique au spectre incident.

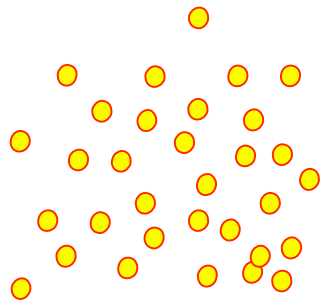
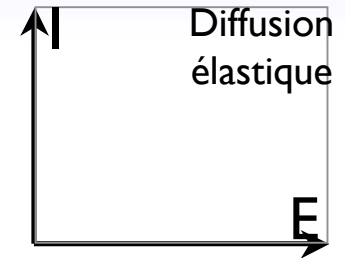
La diffusion élastique est de nouveau la composante la plus intense

Pourquoi ? Quelles différences ?

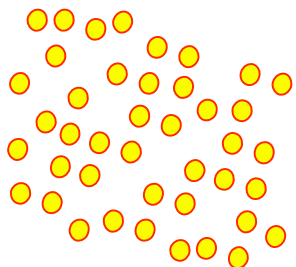
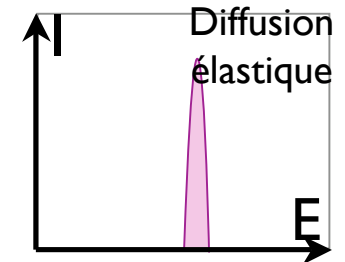
Effets des corrélations



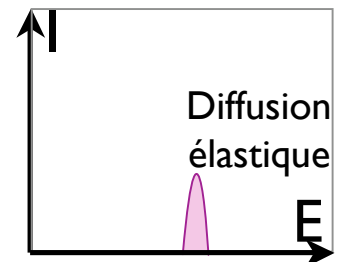
- le solide a une structure ionique bien définie (réseaux) $\Gamma_{ii} \rightarrow \infty$
 - diffusion est déterminée par la loi de Bragg
 - il n'y a pas de diffusion en dehors de l'angle de Bragg



- plasma non corrélé n'a pas de structure définie $\Gamma_{ii} < 1$
 - diffusion est possible aussi en dehors de l'angle de Bragg



- un ordre à longue portée apparaît dans le plasma $\Gamma_{ii} > 1$
 - il y a diffusion en dehors de l'angle de Bragg mais moins intense

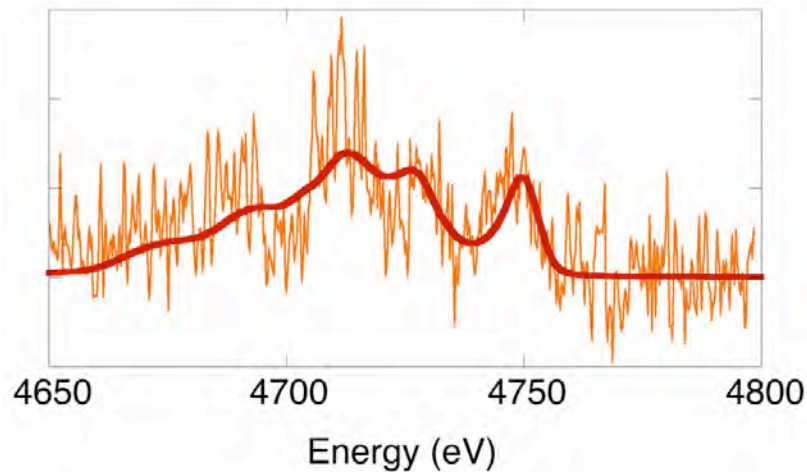


Comparaison avec les simulations $\rightarrow T_e$ et n_e



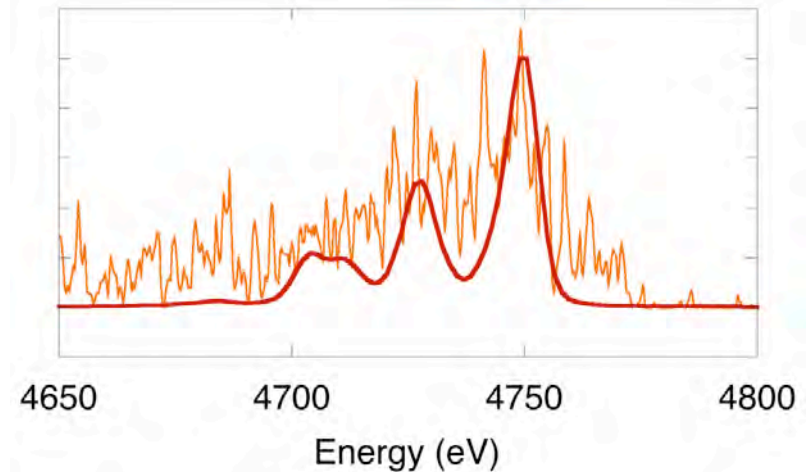
$\Delta t = 500$ ps régime à fort couplage :

$$\Gamma_s \sim 19$$



$\Delta t = 5$ ns régime à couplage modéré :

$$\Gamma_s \sim 5$$



Simulations du spectre diffusé tenant compte des effets dus aux corrélations

- On peut reproduire les spectres diffusés
- On trouve des paramètres du plasma en bon accord avec ceux déduits des diagnostics de vitesse

Conclusions



Au cours des dix dernières années, les chocs laser sont devenus un instrument fiable et unique pour étudier les états extrêmes de la matière

Transitions de phase à hautes pressions ont été mises en évidence et étudiées pour des matériaux d'intérêt en planétologie (température de fusion du fer à IOB, etc...)

Des méthodes de compression quasi-isentropiques sont en cours d'étude pour pouvoir s'écarter de l'Hugoniot et se rapprocher des isentropes planétaires

Des nouveaux diagnostics X sont en cours de développement pour avoir des mesures directes de la densité, de la température, de la densité électronique de la matière fortement comprimée (radiographie et diffusion X)

Perspectives



A court terme

Efforts pour le développement de nouveaux diagnostics

Installations de dimension moyenne (e.g. LULI) ↔ Indispensables

A long terme

Amélioration de la précision des mesures

NIF, LMJ & HIPER ↔ Tâche focale ↑

Erreur ↓

& l'étude de régimes plus extrêmes

Collaborations



**M. Koenig, A. Ravasio, E. Brambrink, N. Ozaki,
M. Rabec le Gloahec, B. Louprias, B. Barbrel**

LULI (France)

G. Hüser,

CEA (France)

Y. Aglitskiy,

Sc. App. Int. Corp. (USA)

A. Faenov, T. Pikuz

VNIIFRTI (Russie)

D. Batani, B. Telaro, M. Tommasini

Univ of Milan (Italie)

K. Tanaka, N. Ozaki

ILE (Japon)

T. Boehly

LLE (USA)

G. Gregori

Oxford Un (UK)

D. Hicks, P. Patel, H.S. Park, S. Le Pape, R. Smith

LLNL (USA)

M. Notley, R. Clark

RAL (UK)