



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Diffraction X *en réflexion* sur une installation laser : du LULI2000 au LMJ

FORUM ILP, le 27 septembre 2021

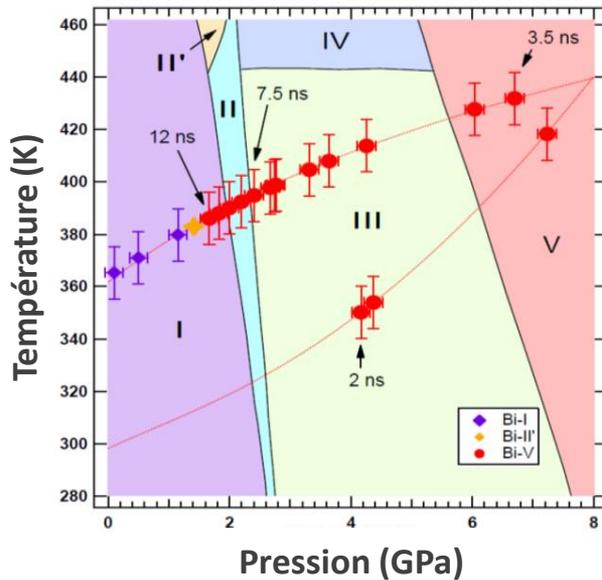
A. Denoeud, S. Brygoo, B. Fraisse, A. Sollier, L. Videau (CEA-DAM)

J.-A. Hernandez (ESRF), A. Benuzzi-Mounais, T. Vinci, A. Ravasio, A. Berlioux (LULI), E. Brambrink (XFEL)

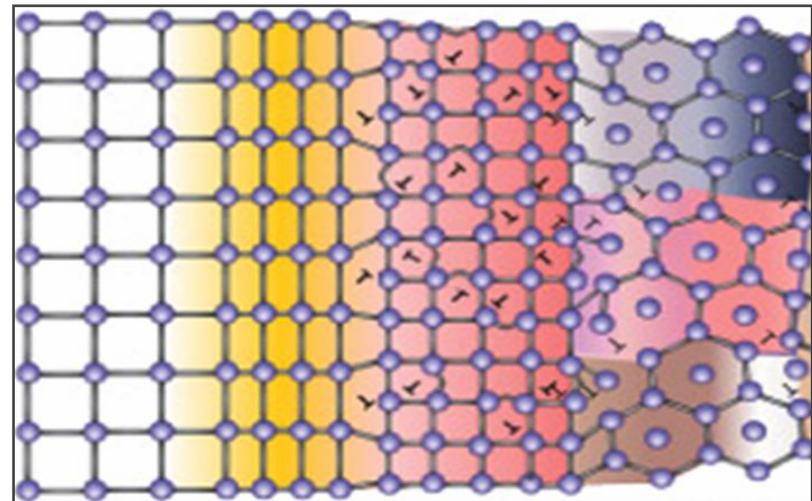
Intérêt : étudier l'arrangement cristallin de matériaux comprimés

- Identifier le diagramme de phase (P, ρ , T) de matériaux solides
- Etudier la cinétique des changements de phase solide/solide et solide/liquide
- Mesurer les courbes de fusion de matériaux fortement comprimés

Diagramme de phase du Bismuth



Réarrangement cristallin sous compression



Intérêt : étudier l'arrangement cristallin de matériaux comprimés

- Identifier le diagramme de phase (P, ρ , T) de matériaux solides
- Etudier la cinétique des changements de phase solide/solide et solide/liquide
- Mesurer les courbes de fusion de matériaux fortement comprimés

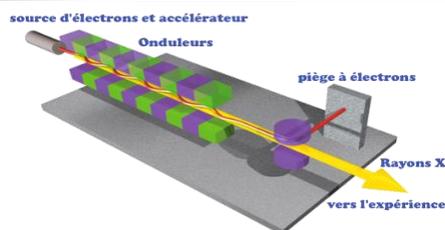
Diffraction X et Grands Instruments :

Synchrotron



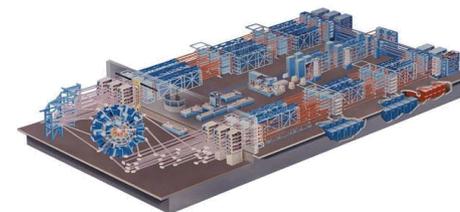
- * Diagnostic développé depuis 40 ans
- * Source X Synchrotron = producteur d'X ($> 10^7$ photons / impulsion, $\Delta\tau \approx 100$ ps)
- * Couplé à des presses gros volume, à des DAC, voire à des laser multi-J
- * Possibilité de cumuler du signal en statique
- * Domaine (P,T) limité

XFEL



- * Diagnostic récent (≈ 5 ans)
- * Source X XFEL = producteur d'X ($> 10^{12}$ photons / impulsion, $\Delta\tau \approx 100$ fs)
- * Couplé à des laser multi-J
- * Intérêt certain pour l'étude de la dynamique des transitions de phase
- * Domaine (P,T) limité

Laser



- * Diagnostic récent, en configuration *transmission* (OMEGA : 9 ans, NIF : 3 ans)
- * Source X par interaction laser-matière : émission He_α approuvé ($\Delta\tau \approx 1$ ns), émission $\text{K}\alpha$ à tester ($\Delta\tau \approx 1$ ps)
- * Domaine (P,T) élargi
- * En développement en configuration *réflexion...*

Intérêt : étudier l'arrangement cristallin de matériaux comprimés

- Identifier le diagramme de phase (P, ρ , T) de matériaux solides
- Etudier la cinétique des changements de phase solide/solide et solide/liquide
- Mesurer les courbes de fusion de matériaux fortement comprimés

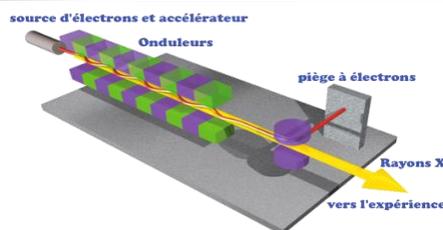
Diffraction X et Grands Instruments :

Synchrotron



- * Diagnostic développé depuis 40 ans
- * Source X Synchrotron = producteur d'X ($> 10^7$ photons / impulsion, $\Delta\tau \approx 100$ ps)
- * Couplé à des presses gros volume, à des DAC, voire à des laser multi-J
- * Possibilité de cumuler du signal en statique
- * Domaine (P,T) limité

XFEL



- * Diagnostic récent (≈ 5 ans)
- * Source X XFEL = producteur d'X ($> 10^{12}$ photons / impulsion, $\Delta\tau \approx 100$ fs)
- * Couplé à des laser multi-J
- * Intérêt certain pour l'étude de la dynamique des transitions de phase
- * Domaine (P,T) limité

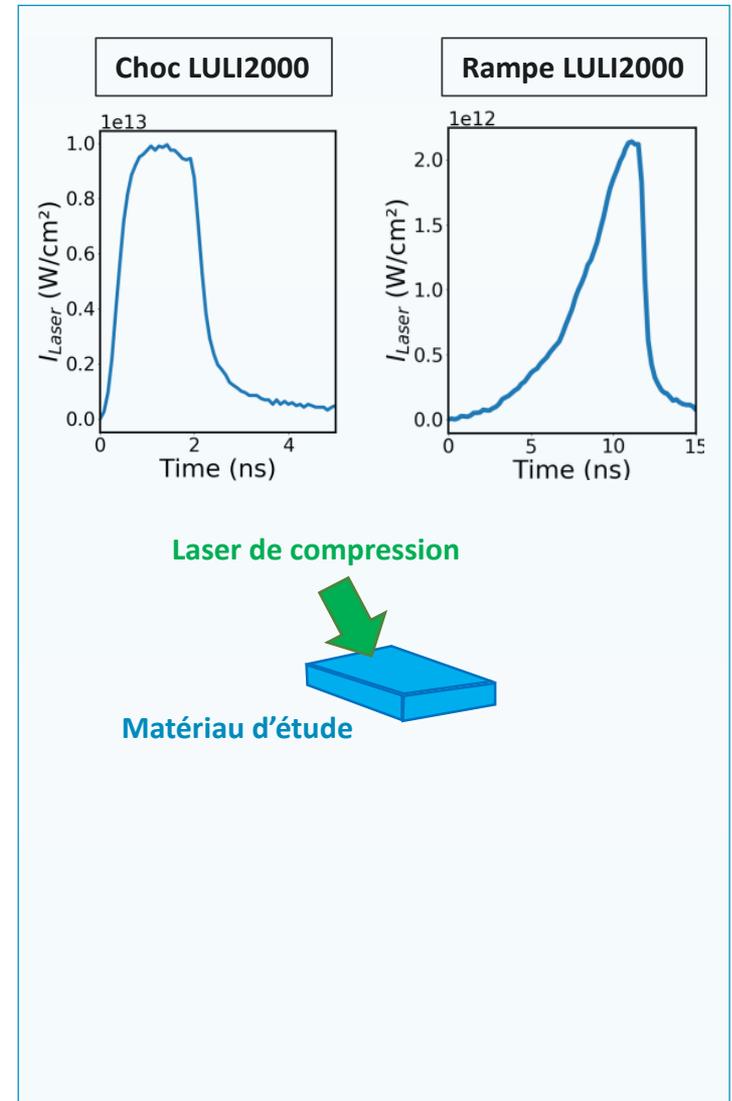
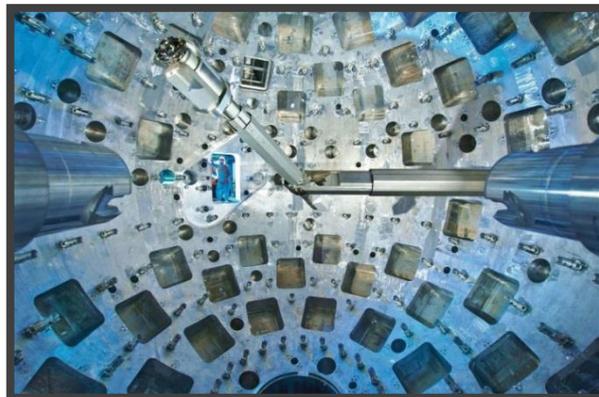
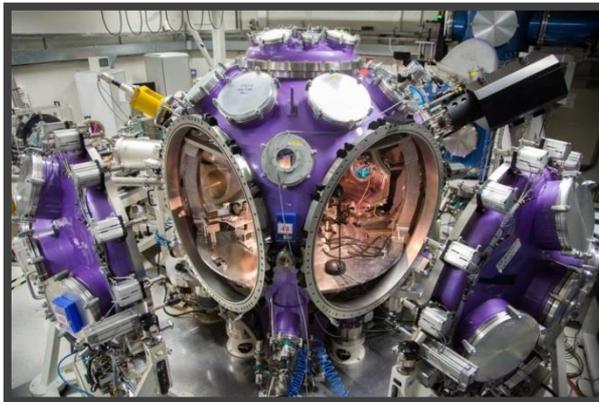
Laser



- * Diagnostic récent, en configuration *transmission* (OMEGA : 9 ans, NIF : 3 ans)
- * Source X par interaction laser-matière : émission He_α approuvé ($\Delta\tau \approx 1$ ns), émission $\text{K}\alpha$ à tester ($\Delta\tau \approx 1$ ps)
- * Domaine (P,T) élargi
- * En développement en configuration *réflexion...*

* Comprimer fortement la matière

- Par choc ou par rampe laser
- Installation laser de puissance :
 - Premiers tests au LULI en 2019
 - Puis au LMJ à partir de 2022

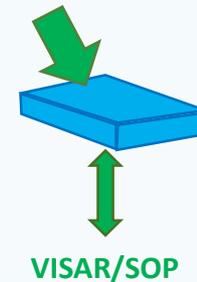
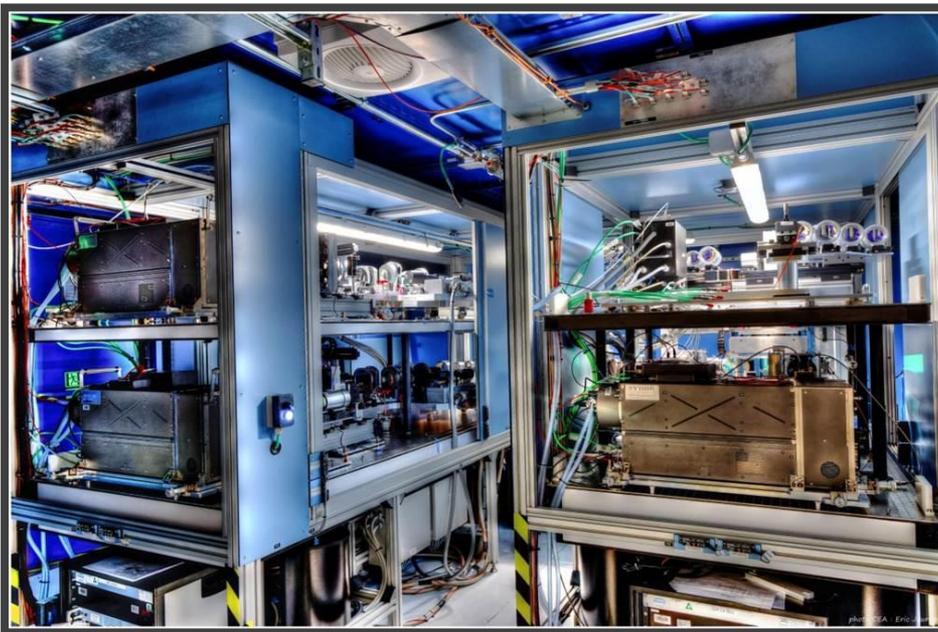


* Comprimer fortement la matière

- Par choc ou par rampe laser
- Installation laser de puissance :
 - Premiers tests au LULI en 2019
 - Puis au LMJ à partir de 2022

* Maitriser les conditions (P,T) atteintes

- Diagnostics optiques {VISAR et SOP}
- Simulations hydrodynamiques (ESTHER)



* Comprimer fortement la matière

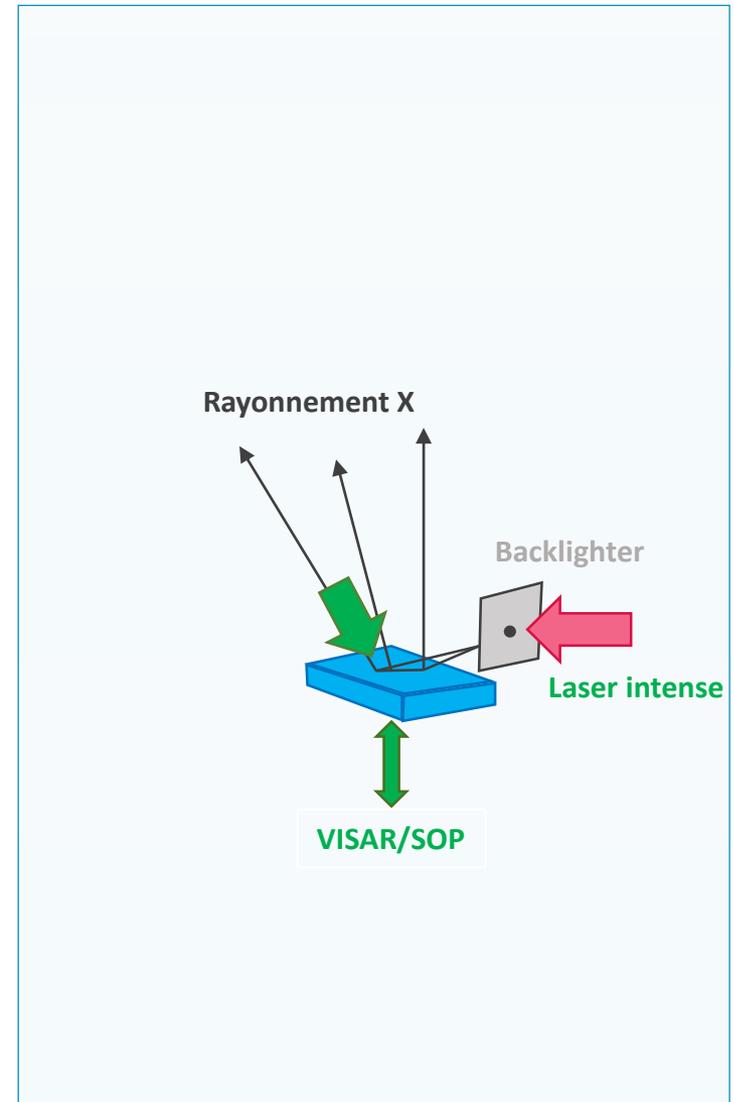
- Par choc ou par rampe laser
- Installation laser de puissance :
 - Premiers tests au LULI en 2019
 - Puis au LMJ à partir de 2022

* Maitriser les conditions (P,T) atteintes

- Diagnostics optiques {VISAR et SOP}
- Simulations hydrodynamiques (ESTHER)

* Créer une source X intense, monochromatique et courte temporellement

- Interaction d'un laser intense avec un matériau bien choisi (émission K_α ou He_α)



* Comprimer fortement la matière

- Par choc ou par rampe laser
- Installation laser de puissance :
 - Premiers tests au LULI en 2019
 - Puis au LMJ à partir de 2022

* Maitriser les conditions (P,T) atteintes

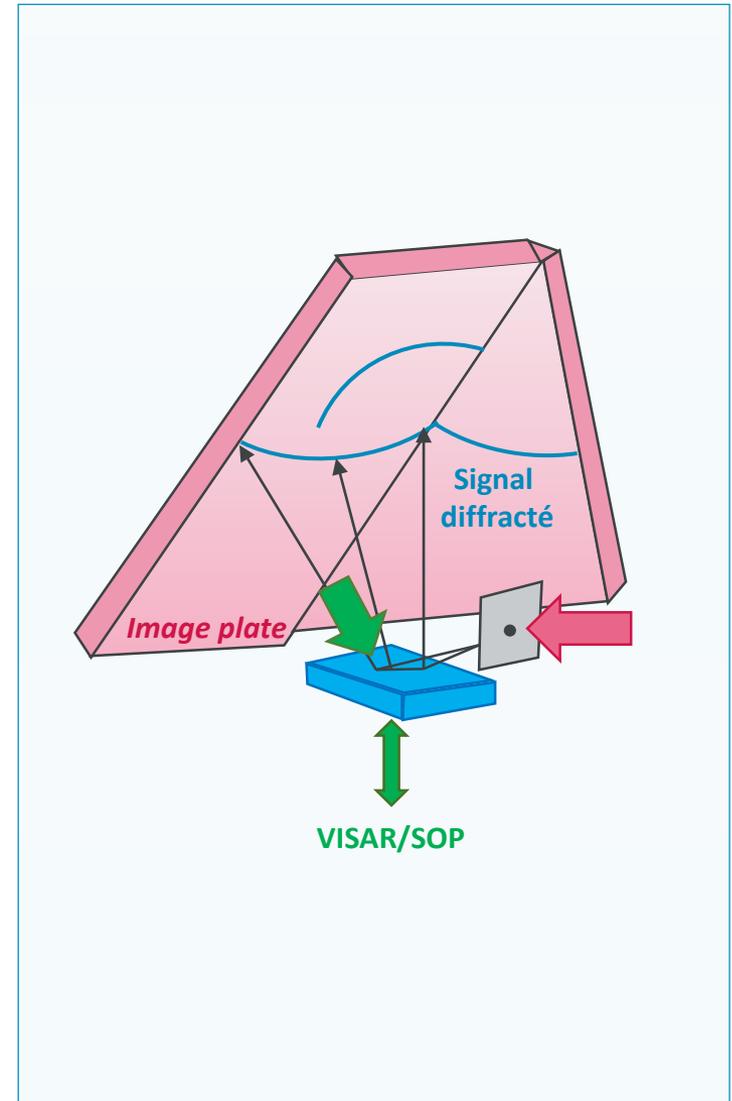
- Diagnostics optiques {VISAR et SOP}
- Simulations hydrodynamiques (ESTHER)

* Créer une source X intense, monochromatique et courte temporellement

- Interaction d'un laser intense avec un matériau bien choisi (émission K_{α} ou He_{α})

* Détecter le signal X diffracté...

- Utilisation d'*image plates* et de filtres



* Comprimer fortement la matière

- Par choc ou par rampe laser
- Installation laser de puissance :
 - Premiers tests au LULI en 2019
 - Puis au LMJ à partir de 2022

* Maitriser les conditions (P,T) atteintes

- Diagnostics optiques {VISAR et SOP}
- Simulations hydrodynamiques (ESTHER)

* Créer une source X intense, monochromatique et courte temporellement

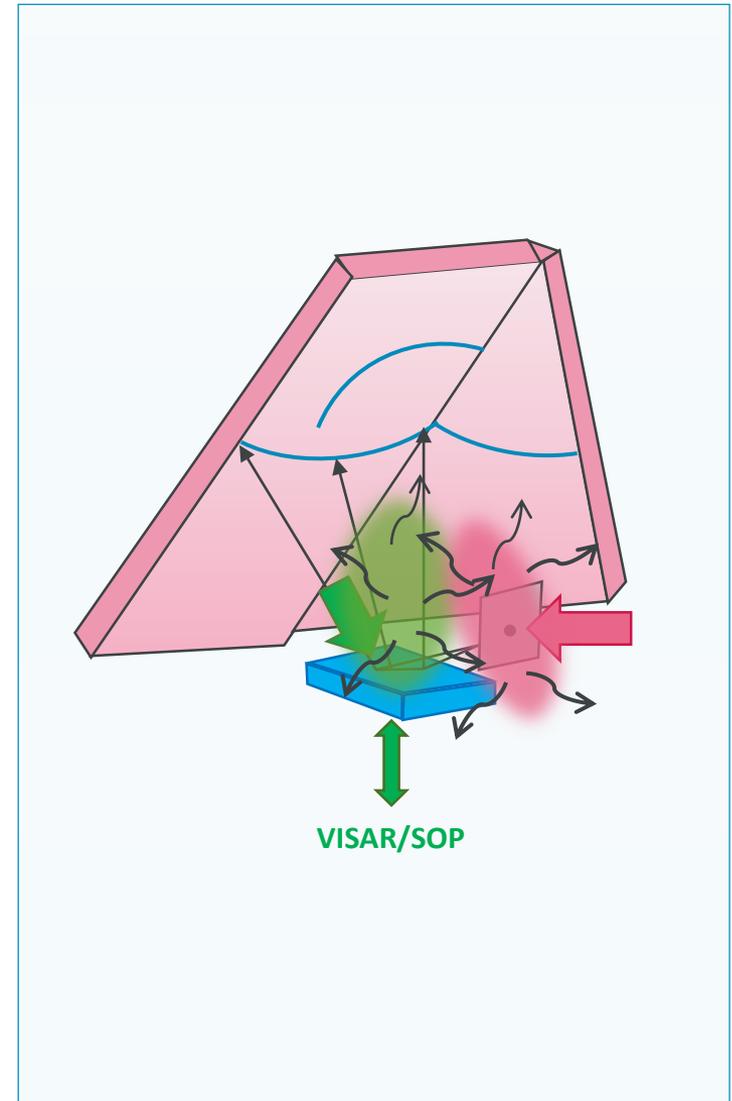
- Interaction d'un laser intense avec un matériau bien choisi (émission K_α ou He_α)

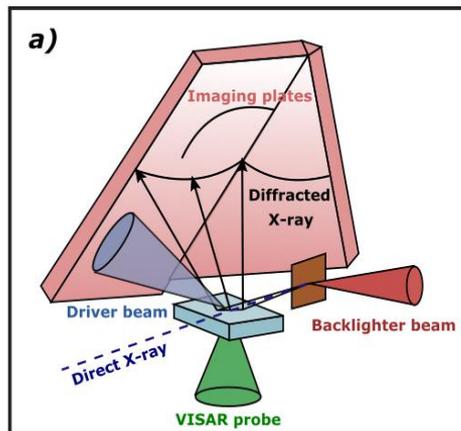
* Détecter le signal X diffracté...

- Utilisation d'*image plates* et de filtres

* ... sans être aveuglé par le rayonnement X provenant de partout...

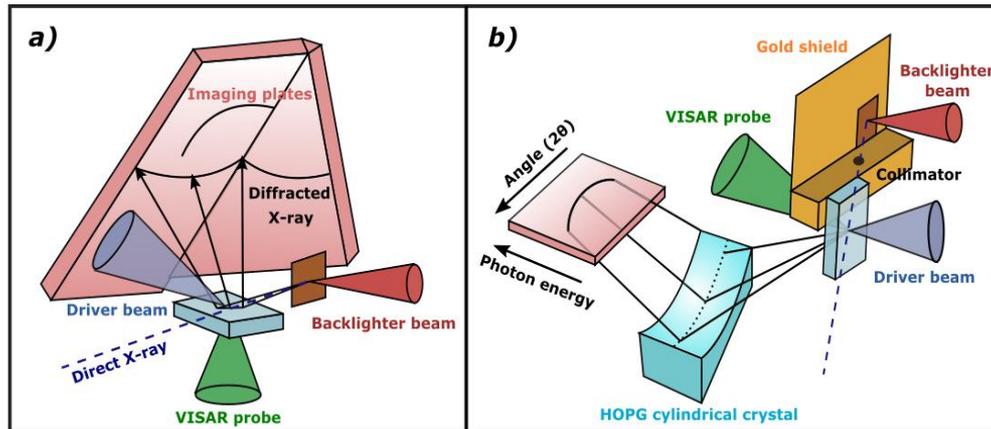
- Utilisation d'un blindage adéquat :
 - Boîtier lourd + Filtres
 - Design de la cible principale





a) Premières expériences anglo-saxonnes (VULCAN, JLF) *Kalantar et al., PRL 95 (2005) ; Hawreliak et al., PRB 83 (2011)*

- ★ Technique : Simples IP entourant l'échantillon, géométrie en réflexion face avant
- ★ Inconvénients : Problème de bruit au-delà de 30 GPa, Conditions hydrodynamiques sondées non homogènes

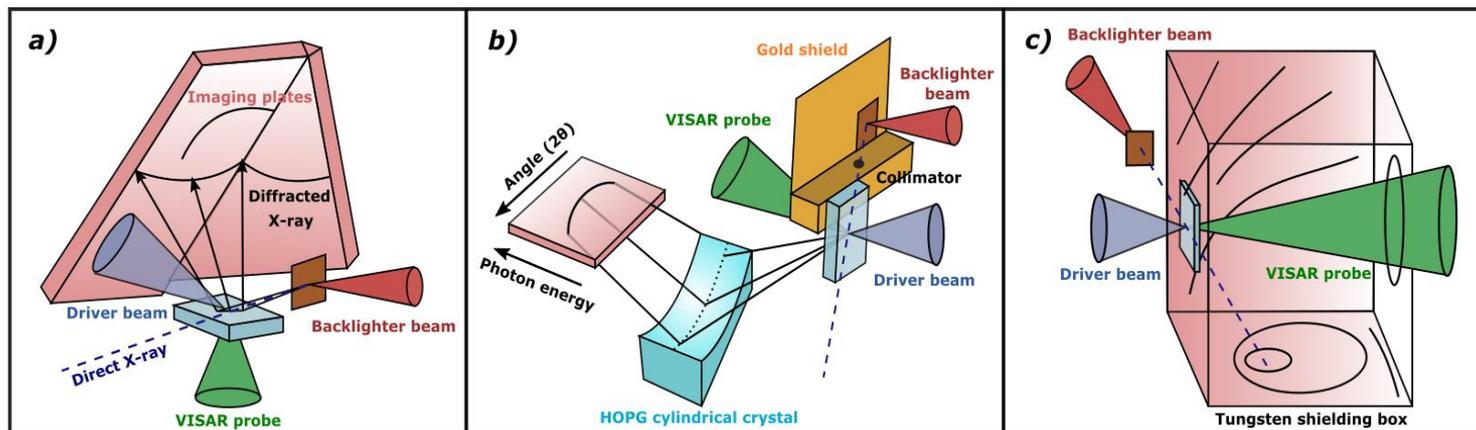


a) Premières expériences anglo-saxonnes (VULCAN, JLF) *Kalantar et al., PRL 95 (2005) ; Hawreliak et al., PRB 83 (2011)*

- ★ Technique : Simples IP entourant l'échantillon, géométrie en réflexion face avant
- ★ Inconvénients : Problème de bruit au-delà de 30 GPa, Conditions hydrodynamiques sondées non homogènes

b) Spectromètre X franco-japonais résolu spatialement (GEKKO, LULI) *Denoeud et al., PNAS 113 (2015)*

- ★ Technique : Utilisation d'un cristal analyseur défocalisé pour filtrage spectral, géométrie en réflexion face arrière
- ★ Inconvénients : Plage angulaire de collection très réduite, Pas de diffraction 2D : impossibilité d'étudier des monocristaux



a) Premières expériences anglo-saxonnes (VULCAN, JLF) *Kalantar et al., PRL 95 (2005) ; Hawreliak et al., PRB 83 (2011)*

- ★ Technique : Simples IP entourant l'échantillon, géométrie en réflexion face avant
- ★ Inconvénients : Problème de bruit au-delà de 30 GPa, Conditions hydrodynamiques sondées non homogènes

b) Spectromètre X franco-japonais résolu spatialement (GEKKO, LULI) *Denoeud et al., PNAS 113 (2015)*

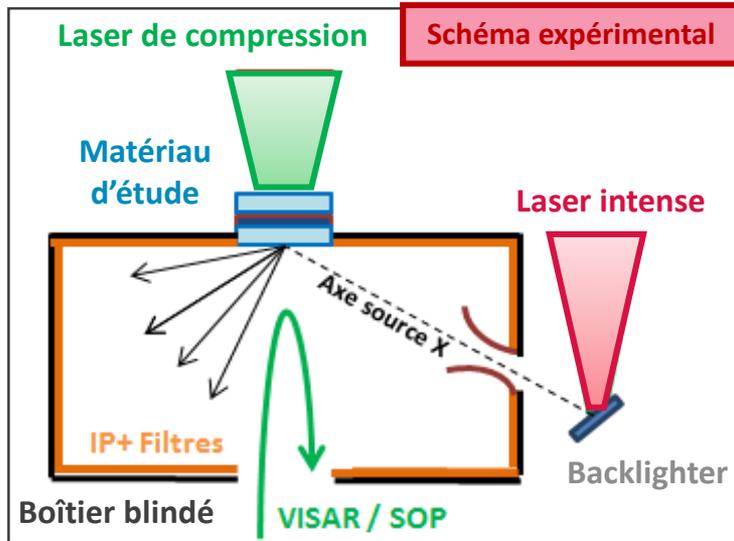
- ★ Technique : Utilisation d'un cristal analyseur défocalisé pour filtrage spectral, géométrie en réflexion face arrière
- ★ Inconvénients : Plage angulaire de collection très réduite, Pas de diffraction 2D : impossibilité d'étudier des monocristaux

c) Diffractomètre en transmission américain (OMEGA, NIF) *Rygg et al., RSI 83 (2012) ; Rygg et al., RSI 91 (2020)*

- ★ Technique : Boîtier blindé, géométrie en transmission, compression par rampe de matériaux en étaux
- ★ Inconvénients : Intégration des conditions hydrodynamiques sur toute l'épaisseur de la cible, impossibilité d'étudier des matériaux sous choc, impossibilité d'étudier des matériaux lourds sur une installation kJ type LULI2000

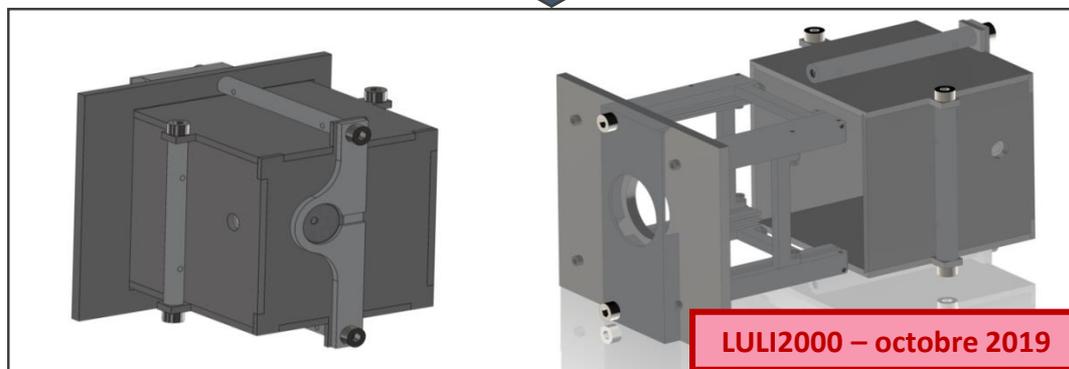
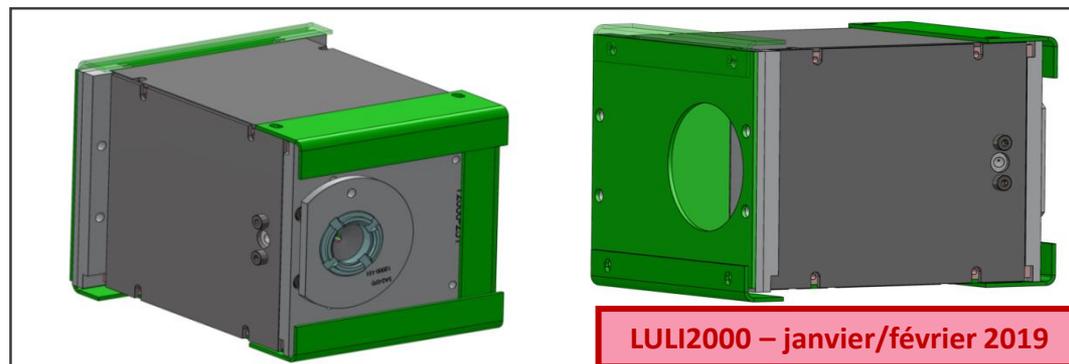
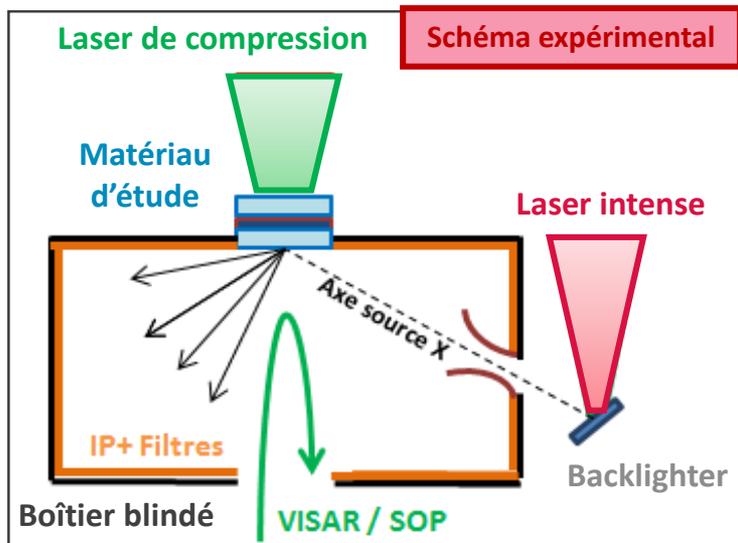
Intérêts de la configuration en réflexion :

- * Sonder des conditions hydrodynamiques homogènes en face arrière des échantillons d'intérêt...
- * ... sans être limité dans la dynamique de compression (choc, rampe, multi-choc, ...)
- * Stopper le rayonnement X provenant de la couronne en incluant un matériau adéquat dans la cible principale
- * Etudier des matériaux lourds avec une source X générée sur une installation de type LULI2000



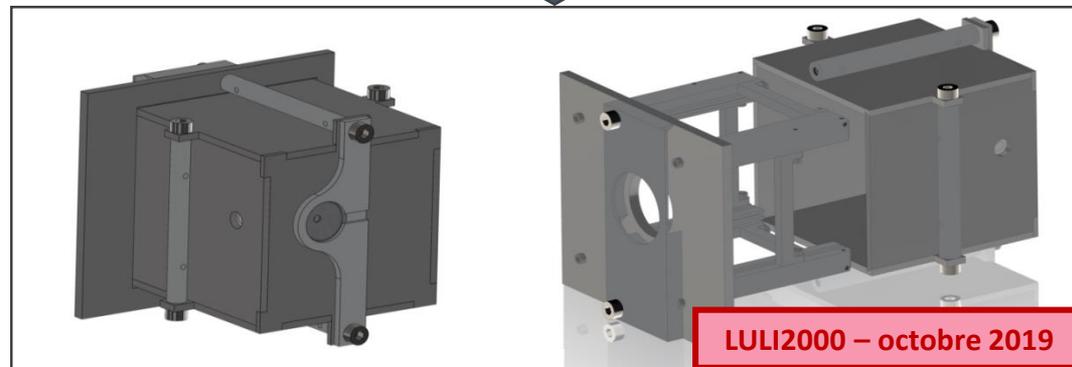
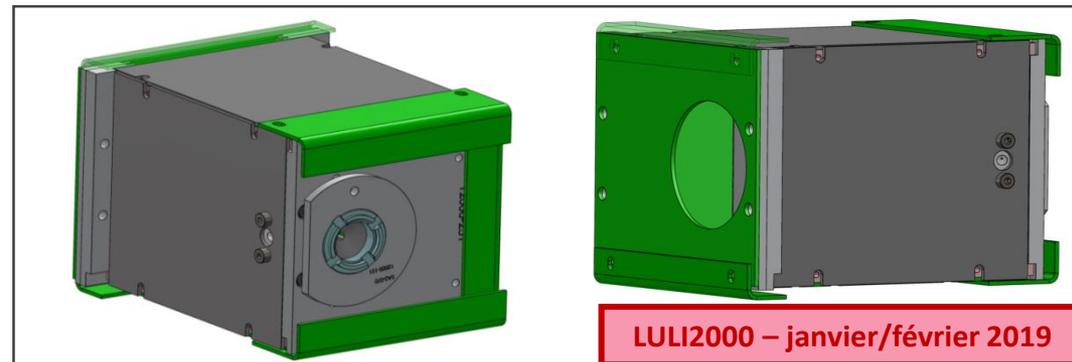
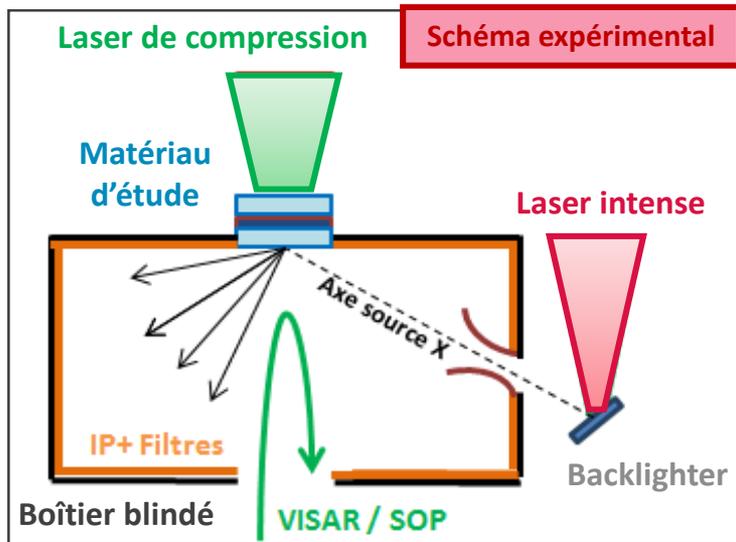
Intérêts de la configuration en réflexion :

- * Sonder des conditions hydrodynamiques homogènes en face arrière des échantillons d'intérêt...
- * ... sans être limité dans la dynamique de compression (choc, rampe, multi-choc, ...)
- * Stopper le rayonnement X provenant de la couronne en incluant un matériau adéquat dans la cible principale
- * Etudier des matériaux lourds avec une source X générée sur une installation de type LULI2000



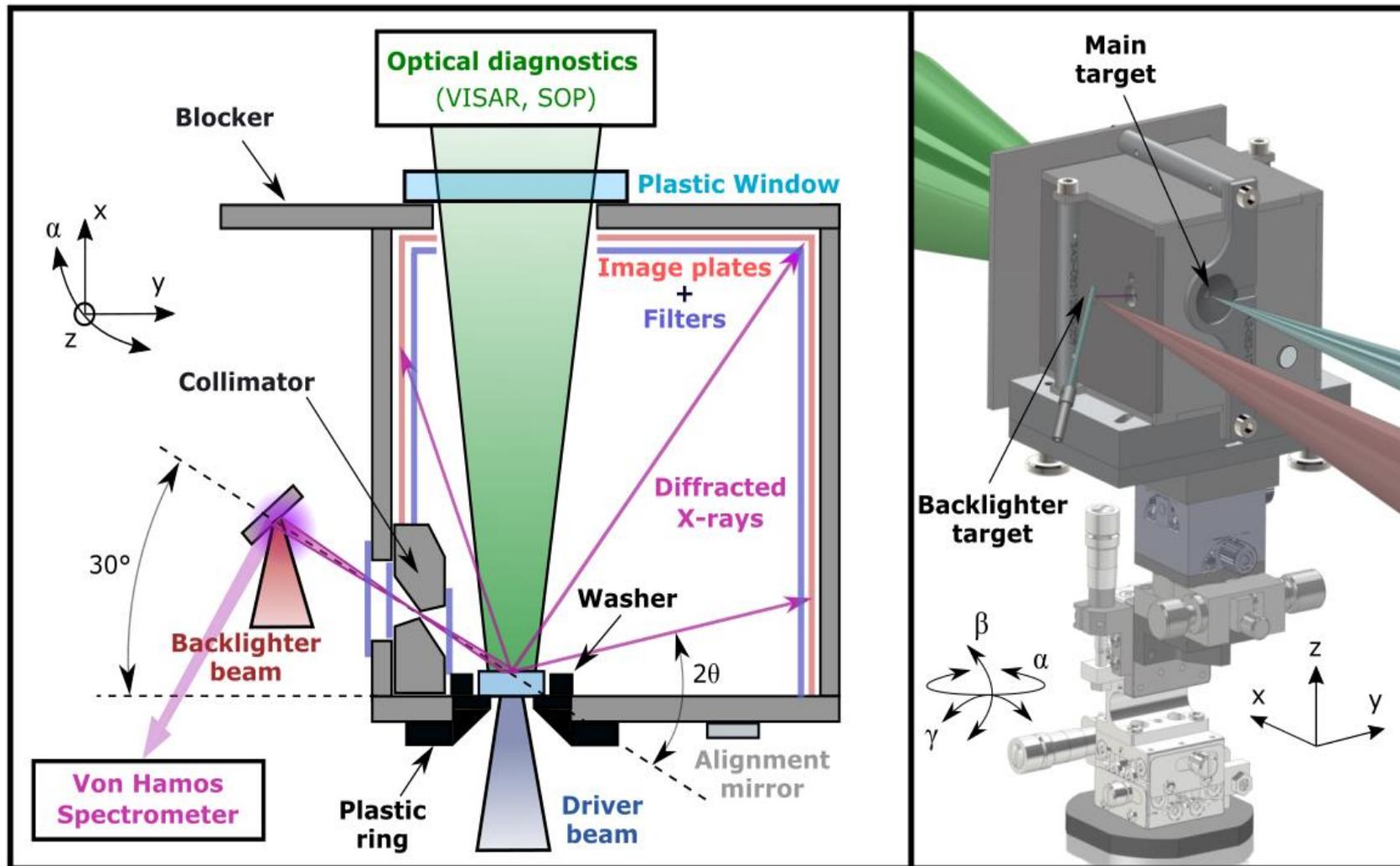
Intérêts de la configuration en réflexion :

- * Sonder des conditions hydrodynamiques homogènes en face arrière des échantillons d'intérêt...
- * ... sans être limité dans la dynamique de compression (choc, rampe, multi-choc, ...)
- * Stopper le rayonnement X provenant de la couronne en incluant un matériau adéquat dans la cible principale
- * Etudier des matériaux lourds avec une source X générée sur une installation de type LULI2000



Principales difficultés :

- * Rapport Signal sur Bruit faible (blindage, filtrage, source X)
- * Alignement

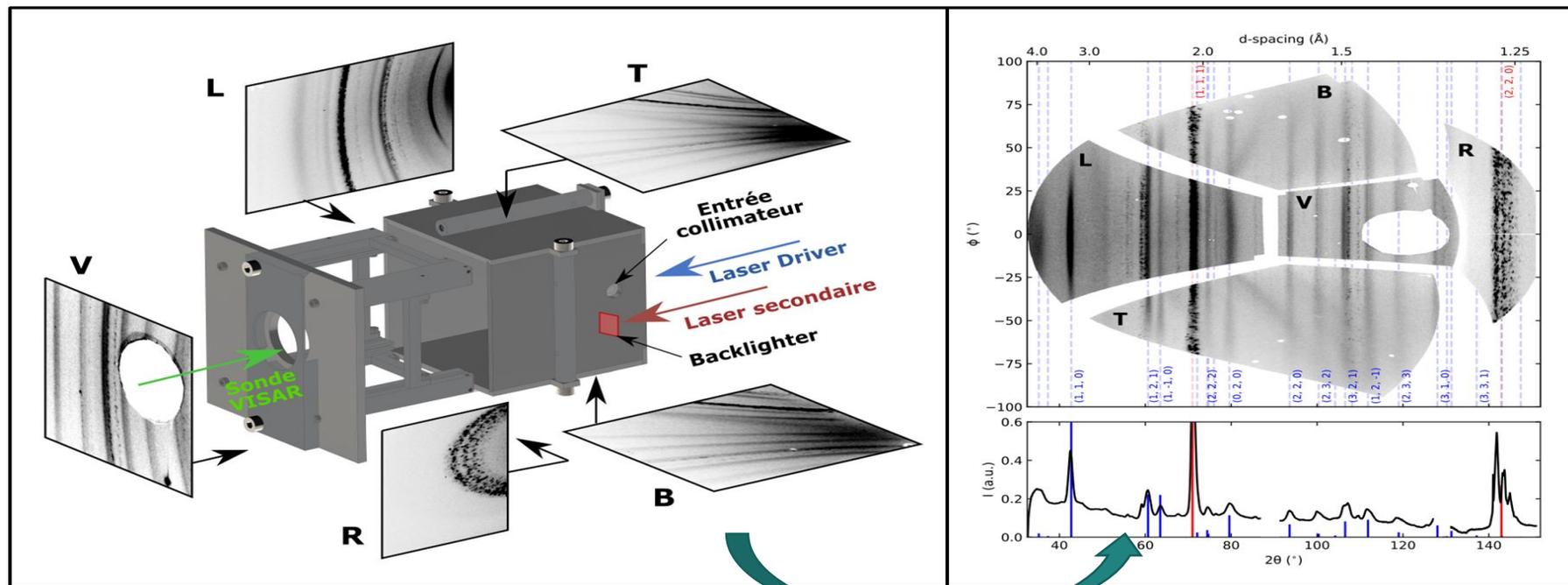


Denoeud et al., RSI 113 (2021)

- * Larges plages angulaires de collection ($2\vartheta \approx [30^\circ, 150^\circ]$, $\varphi > [-50^\circ, 50^\circ]$) : Etude possible des monocristaux / textures
- * Résolutions & précisions :
 - Temporelles : $\delta\tau \approx 500$ ps (He_α LULI) / $\delta\tau \approx 700$ ps (He_α LMJ) / $\delta\tau < 10$ ps (K_α PETAL, à tester)
 - Spatiales : $\delta\theta < 0,2^\circ$ / $\sigma_{\text{instr}}(\theta, \phi) \approx 0,5$ à 2°
- * 3 techniques de calibration *in situ* approuvées

Denoeud et al., RSI 113 (2021)

Caractérisation des performances à froid sur une phase complexe (Bi-I)

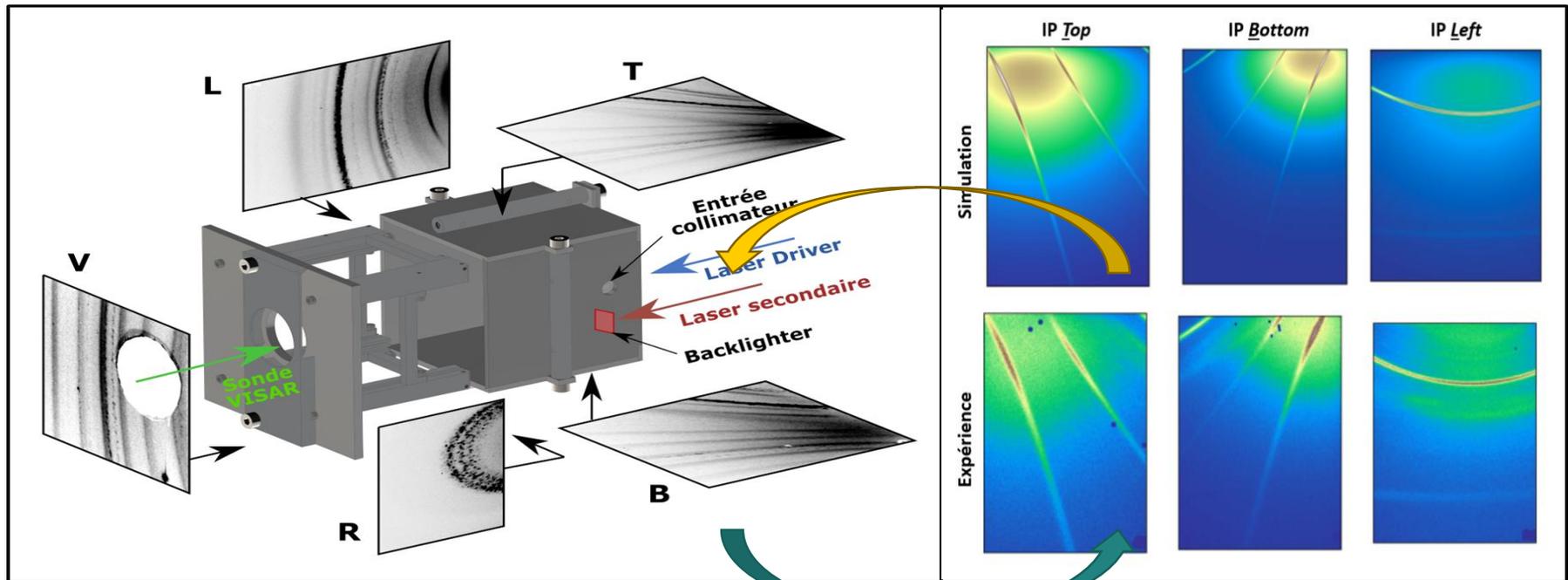


Développement d'un logiciel de dépouillement

- * Larges plages angulaires de collection ($2\vartheta \approx [30^\circ, 150^\circ]$, $\varphi > [-50^\circ, 50^\circ]$) : Etude possible des monocristaux / textures
- * Résolutions & précisions :
 - Temporelles : $\delta\tau \approx 500$ ps (He_α LULI) / $\delta\tau \approx 700$ ps (He_α LMJ) / $\delta\tau < 10$ ps (K_α PETAL, à tester)
 - Spatiales : $\delta\theta < 0,2^\circ$ / $\sigma_{\text{instr}}(\theta, \phi) \approx 0,5$ à 2°
- * 3 techniques de calibration *in situ* approuvées

Denoeud et al., RSI 113 (2021)

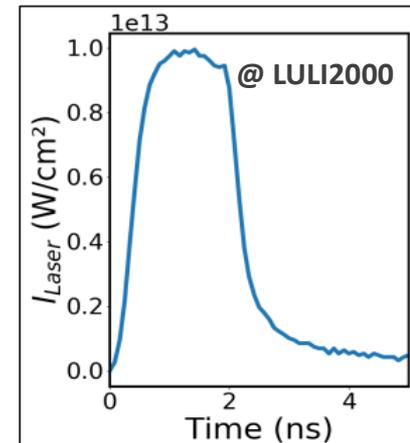
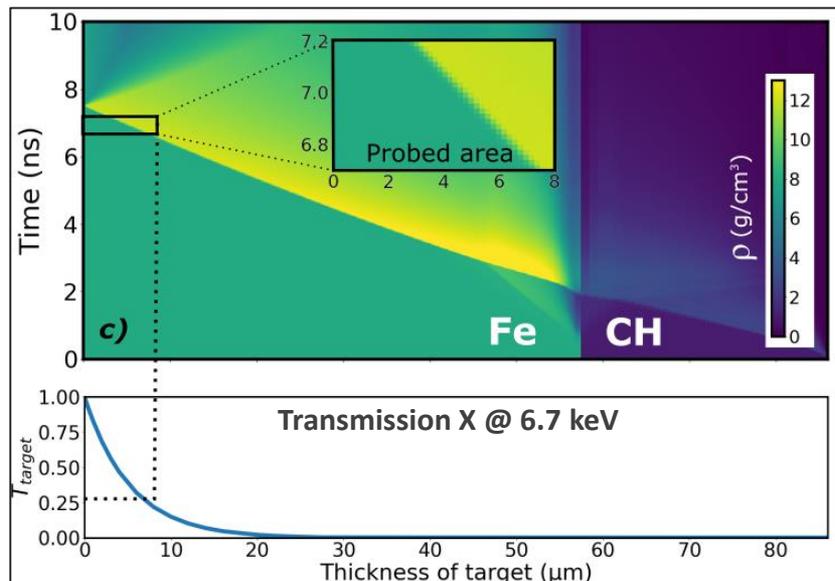
Caractérisation des performances à froid sur une phase complexe (Bi-I)



Développement d'un logiciel de dépouillement et de prévisions

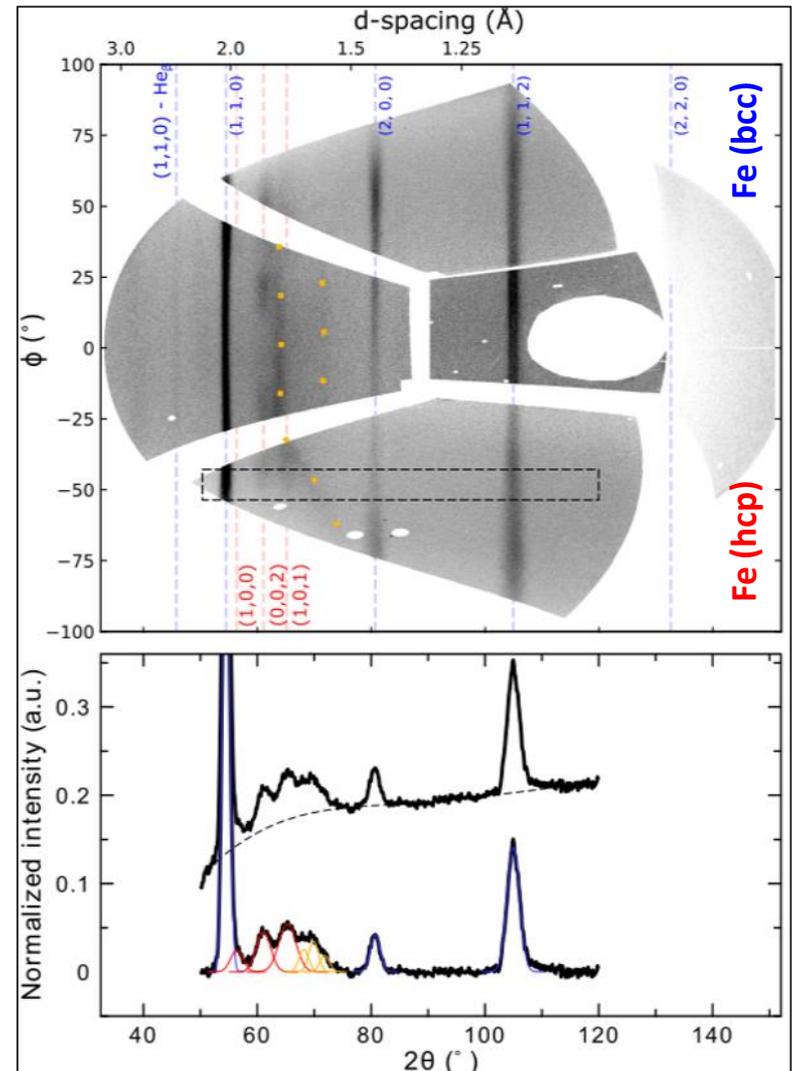
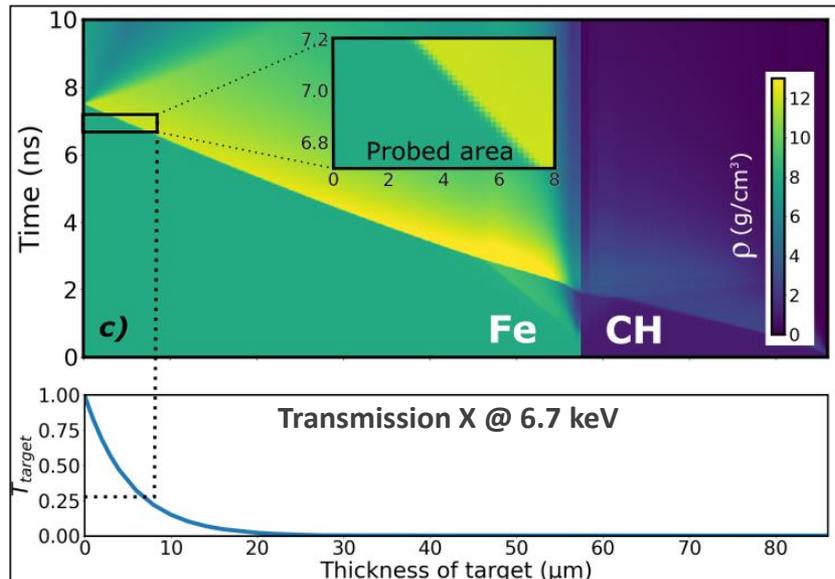
Etude de matériaux choqués :

- * Stratégie : sonde des derniers μm d'une cible comprimée par choc :
 - Sonde d'une partie froide : calibrant temporel
 - Sonde d'une zone choquée homogène
- * Idéal pour étudier les courbes de fusion de matériaux choqués



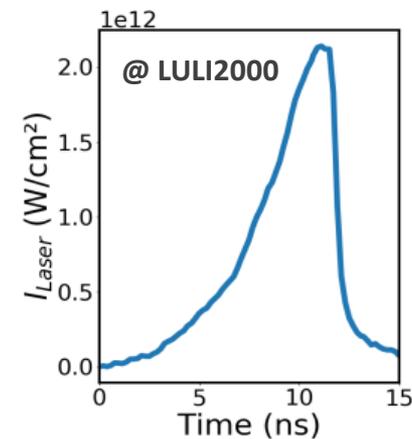
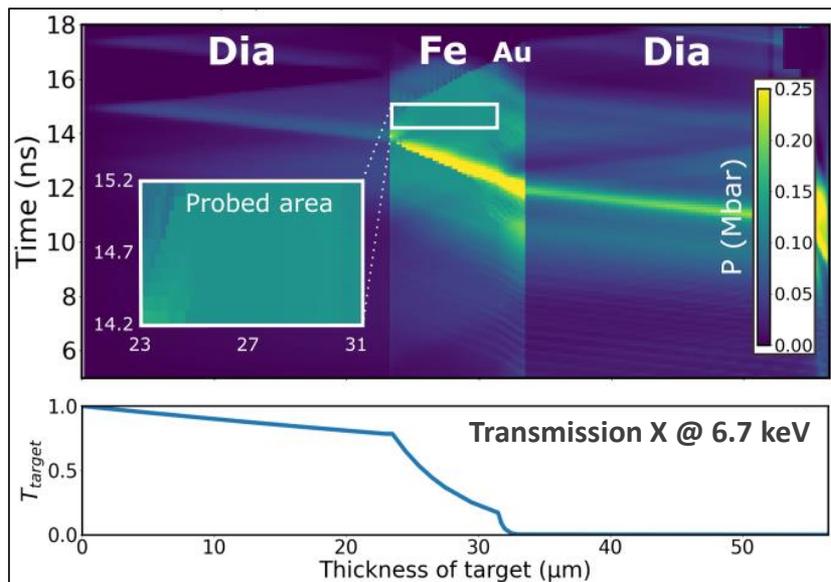
Etude de matériaux choqués :

- ★ Stratégie : sonde des derniers μm d'une cible comprimée par choc :
 - Sonde d'une partie froide : calibrant temporel
 - Sonde d'une zone choquée homogène
- ★ Idéal pour étudier les courbes de fusion de matériaux choqués
 - Montée en densité du fer *hcp* jusqu'à 12 g/cm^3



Etude de matériaux comprimés par rampe :

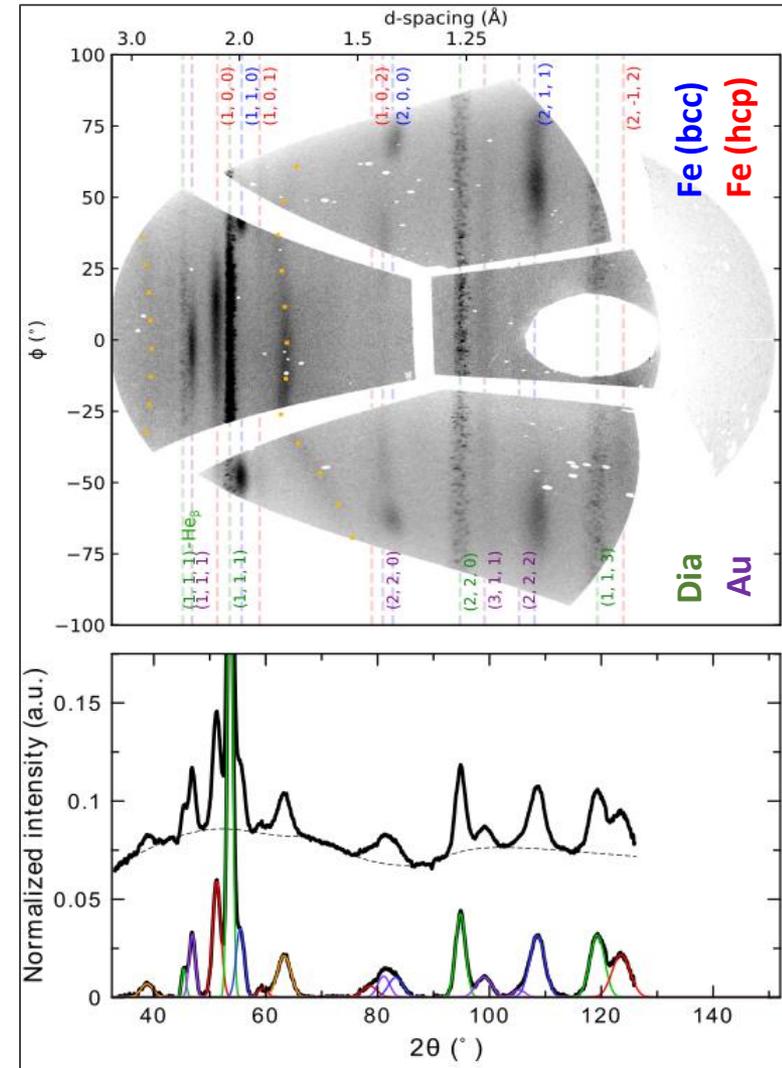
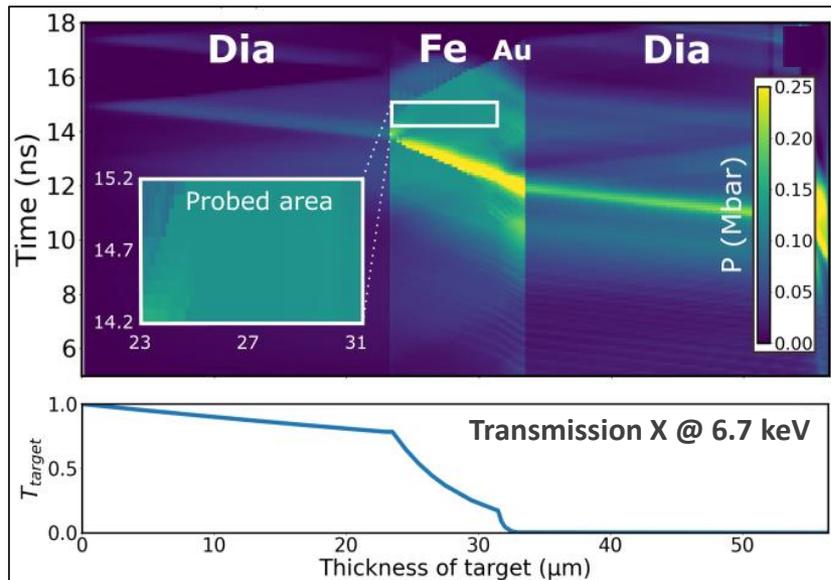
- * Stratégie américaine : Compression du matériau d'intérêt fin placé en étaux entre deux diamants :
 - Multi-compressions jusqu'à stabilisation
 - Possibilité de sonder des conditions hydrodynamiques homogènes pendant plusieurs ns
 - Calibration interne par la fenêtre de diamant



Etude de matériaux comprimés par rampe :

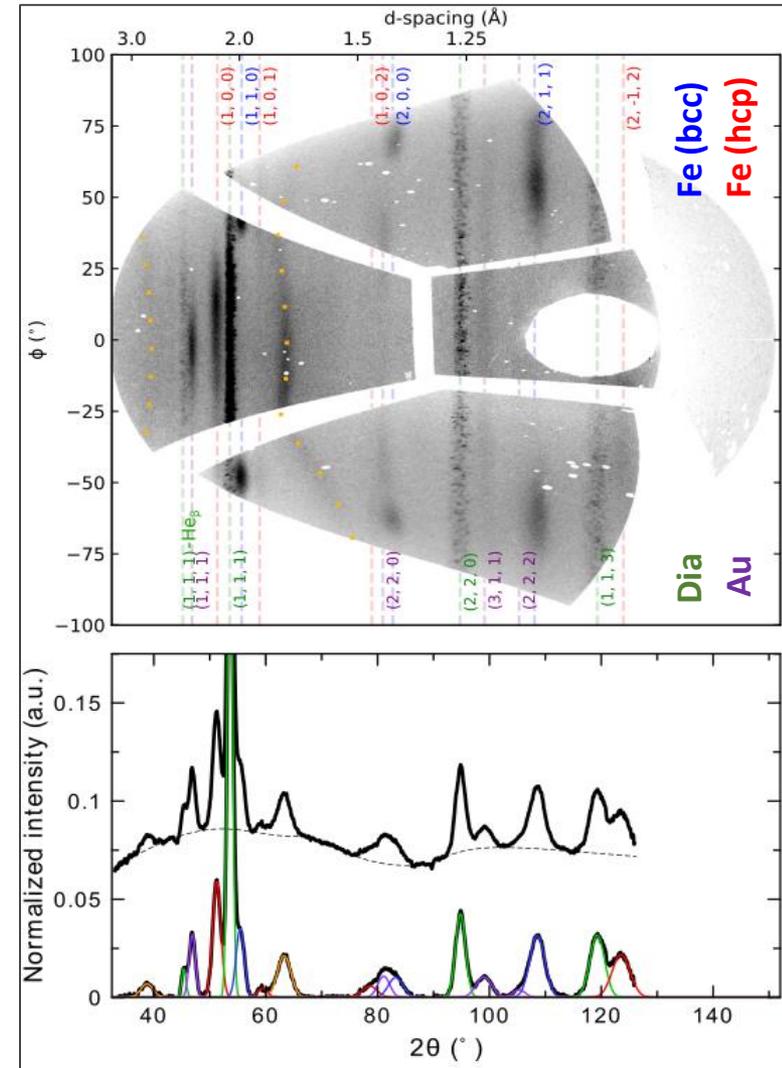
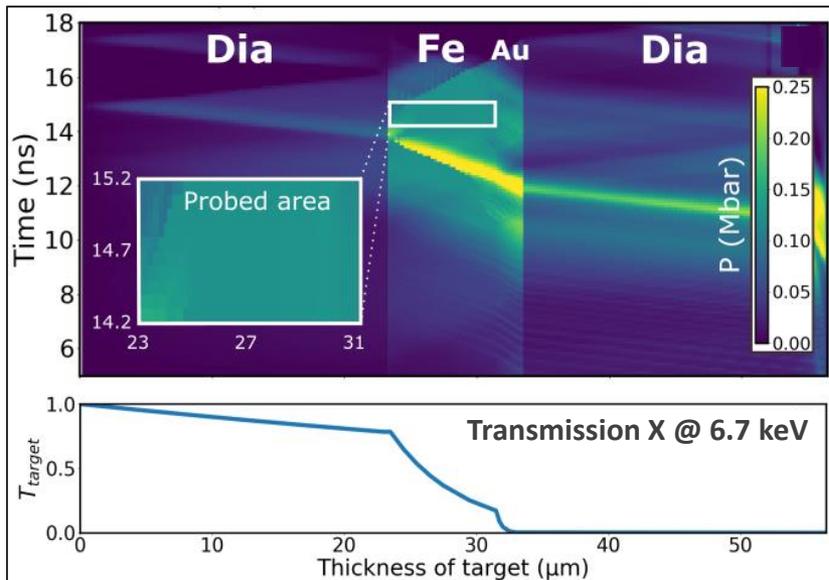
★ Stratégie américaine : Compression du matériau d'intérêt fin placé en étaux entre deux diamants :

- Multi-compressions jusqu'à stabilisation
- Possibilité de sonder des conditions hydrodynamiques homogènes pendant plusieurs ns
- Calibration interne par la fenêtre de diamant
- Observation de la transition *bcc-hcp* à 13 GPa



Etude de matériaux comprimés par rampe :

- ★ Stratégie américaine : Compression du matériau d'intérêt fin placé en étaux entre deux diamants :
 - Multi-compressions jusqu'à stabilisation
 - Possibilité de sonder des conditions hydrodynamiques homogènes pendant plusieurs ns
 - Calibration interne par la fenêtre de diamant
 - Observation de la transition *bcc-hcp* à 13 GPa
- Autre possibilité pour approcher l'isentrope : sonde ps des derniers μm d'un matériau épais (LMJ-Brambrink)

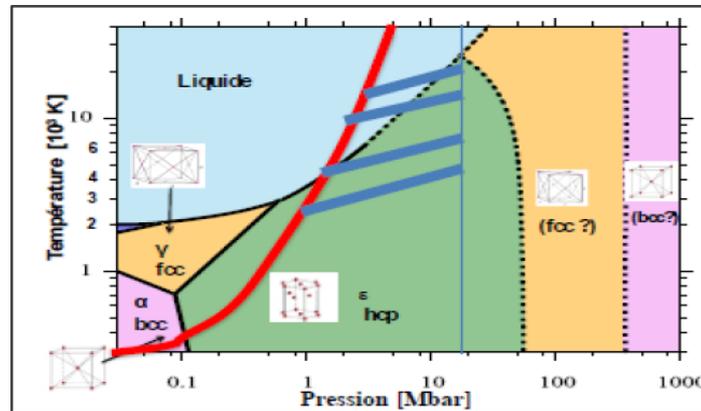


Expérience LMJ-PETAL Brambrink :

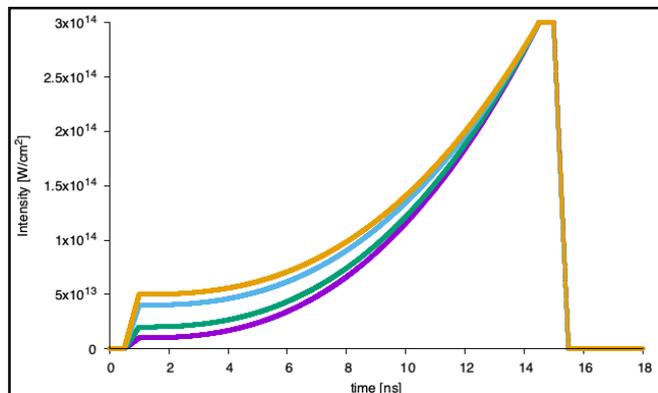
* Intérêt géophysique

- Ramp compression of iron in the TPa regime: a way to investigate super-earths' interiors

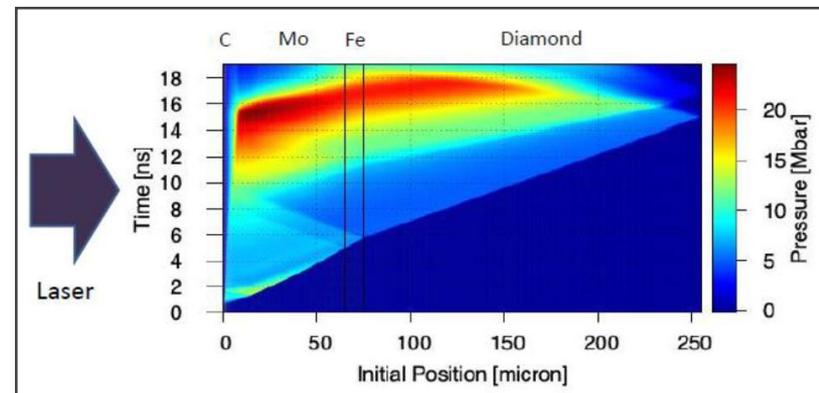
Diagramme de phase du fer



Profils laser LMJ demandés



Simulation hydrodynamique prévisionnelle



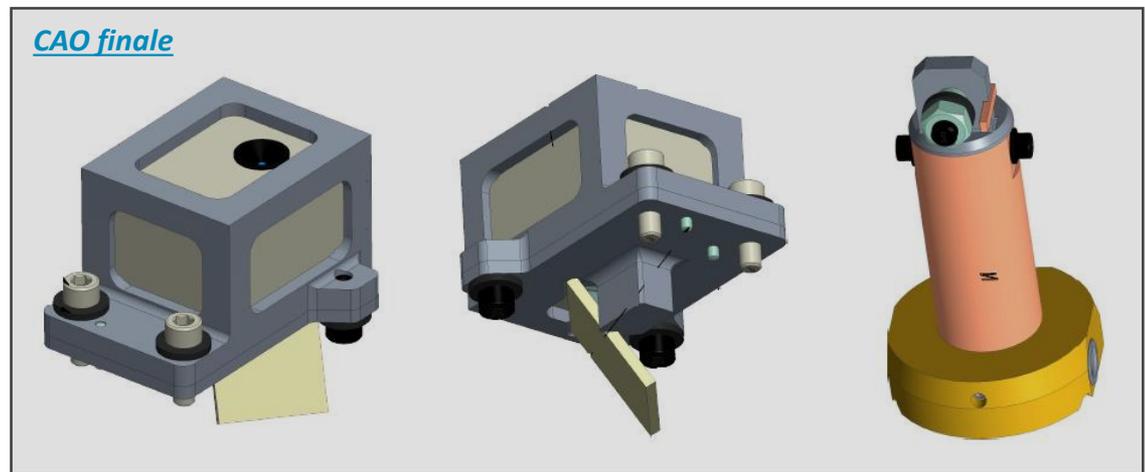
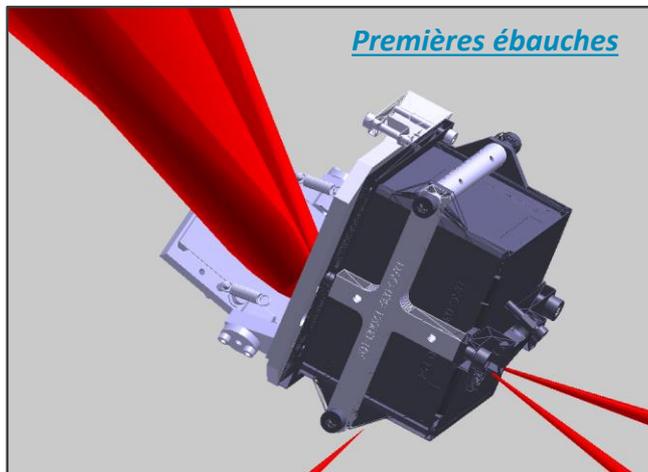
Expérience LMJ-PETAL Brambrink :

* Intérêt géophysique

- *Ramp compression of iron in the TPa regime: a way to investigate super-earth's interiors*

* Adaptation du diffractomètre dans l'environnement LMJ

- Très nombreux défis physiques et techniques :
 - Adaptation à l'environnement X LMJ-PETAL
 - Contraintes de taille et de poids
 - Contraintes de supportage et d'alignement
 - Compatibilité Irradiation & pointage simultané des faisceaux LMJ / PETAL / EOS-Pack
 - Contraintes de matériaux PETAL-compatibles
 - Contraintes débris



Expérience LMJ-PETAL Brambrink :

* Intérêt géophysique

- *Ramp compression of iron in the TPa regime: a way to investigate super-earth's interiors*

* Adaptation du diffractomètre dans l'environnement LMJ

- Très nombreux défis physiques et techniques :
 - Adaptation à l'environnement X LMJ-PETAL
 - Contraintes de taille et de poids
 - Contraintes de supportage et d'alignement
 - Compatibilité Irradiation & pointage simultané des faisceaux LMJ / PETAL / EOS-Pack
 - Contraintes de matériaux *PETAL-compatible*
 - Contraintes débris

* 1^{ère} partie :

- 2 tirs sans compression : Etude de la source X et du blindage extérieur
 - 1 tir avec source X K_{α} (PETAL, 10 ps)
 - 1 tir avec source X He_{α} (LMJ, 700 ps, 6-8 quads)
- 1 tir avec compression : Etude du blindage interne à la cible principale (rayonnement X de couronne)

Expérience LMJ-PETAL Brambrink :

* Intérêt géophysique

- *Ramp compression of iron in the TPa regime: a way to investigate super-earth's interiors*

* Adaptation du diffractomètre dans l'environnement LMJ

- Très nombreux défis physiques et techniques :
 - Adaptation à l'environnement X LMJ-PETAL
 - Contraintes de taille et de poids
 - Contraintes de supportage et d'alignement
 - Compatibilité Irradiation & pointage simultané des faisceaux LMJ / PETAL / EOS-Pack
 - Contraintes de matériaux *PETAL-compatible*
 - Contraintes débris

* 1^{ère} partie :

- 2 tirs sans compression : Etude de la source X et du blindage extérieur
 - 1 tir avec source X K_{α} (PETAL, 10 ps)
 - 1 tir avec source X He_{α} (LMJ, 700 ps, 6-8 quads)
- 1 tir avec compression : Etude du blindage interne à la cible principale (rayonnement X de couronne)

* 2^{ème} partie :

- 4 tirs de physique avec différentes compressions (modification des énergies laser, du profil d'impulsion, du choc initial)



Merci de votre attention

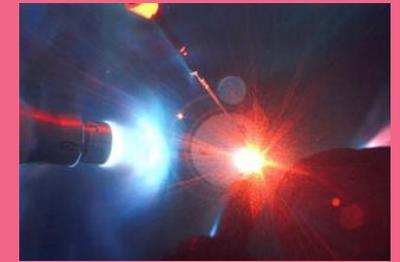


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Canons à gaz



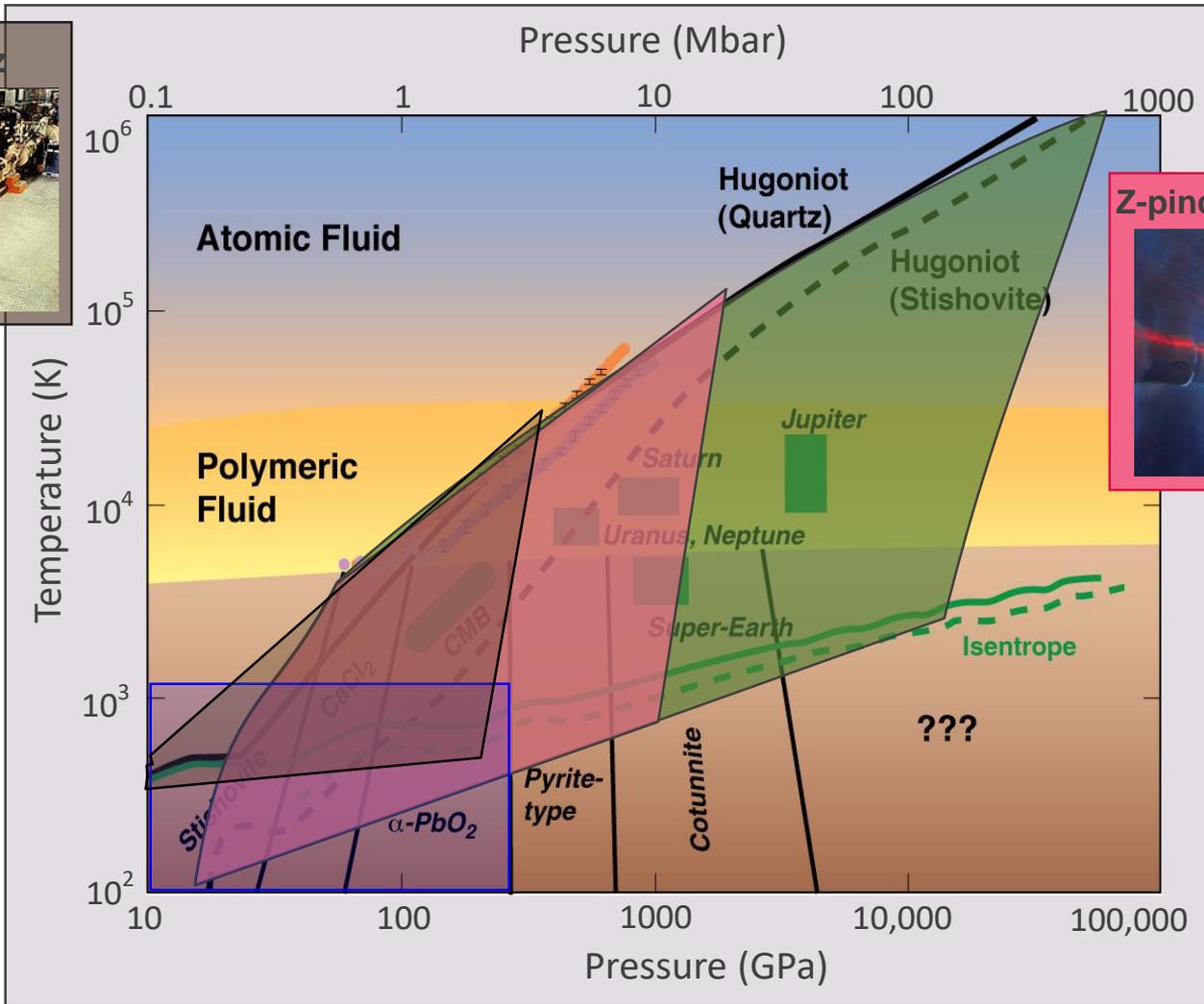
Z-pinch & Laser multi-kJ



LMJ & NIF

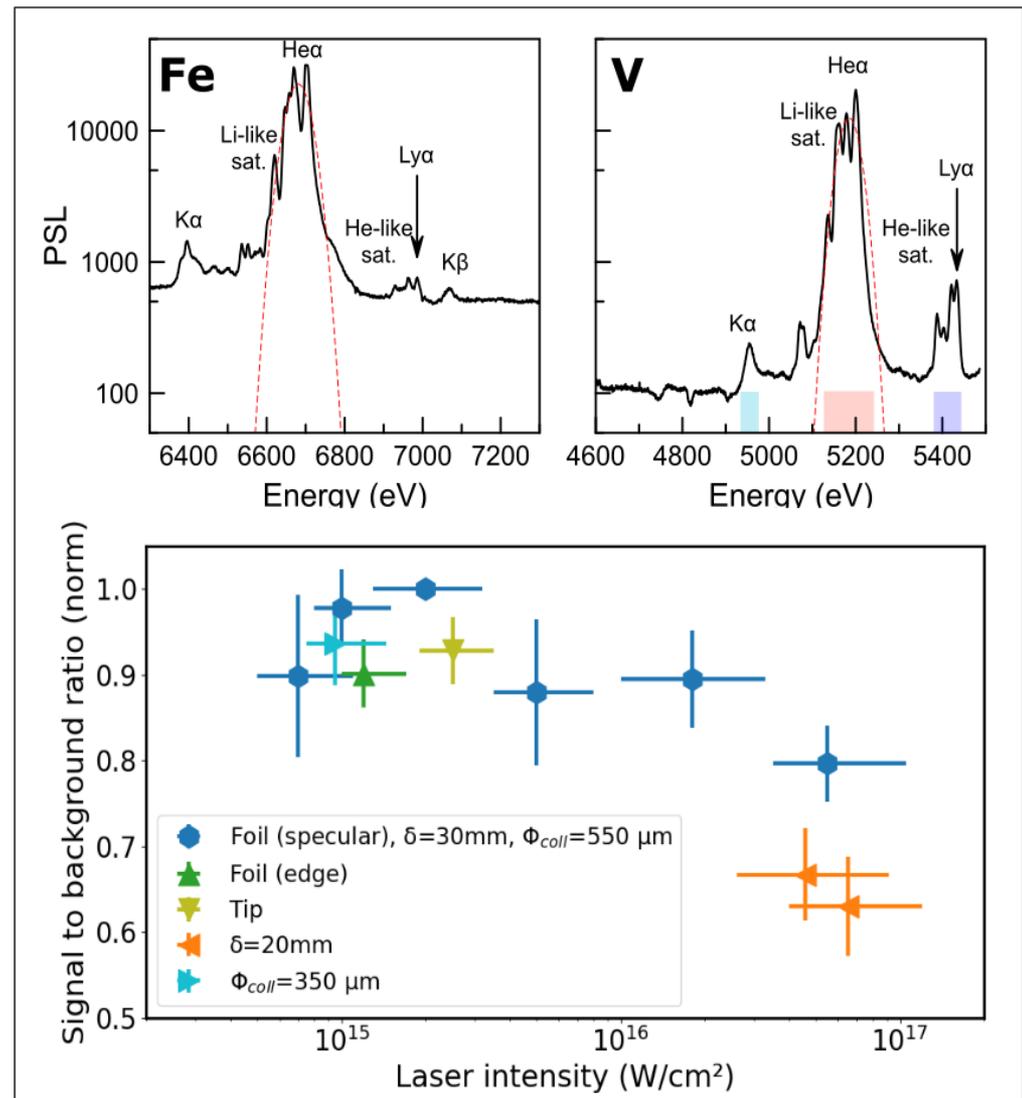


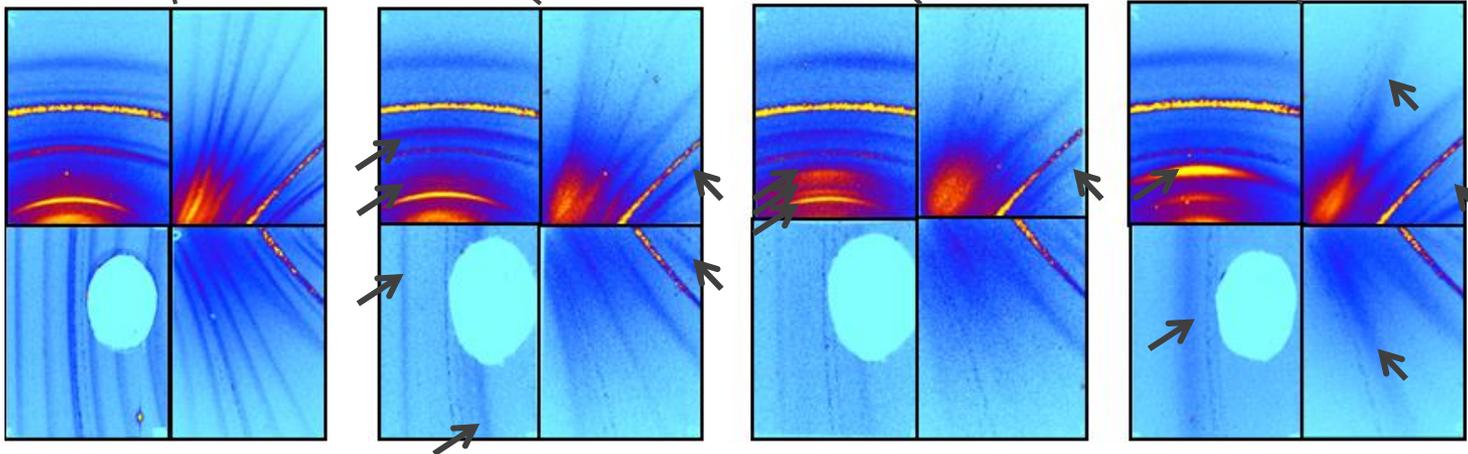
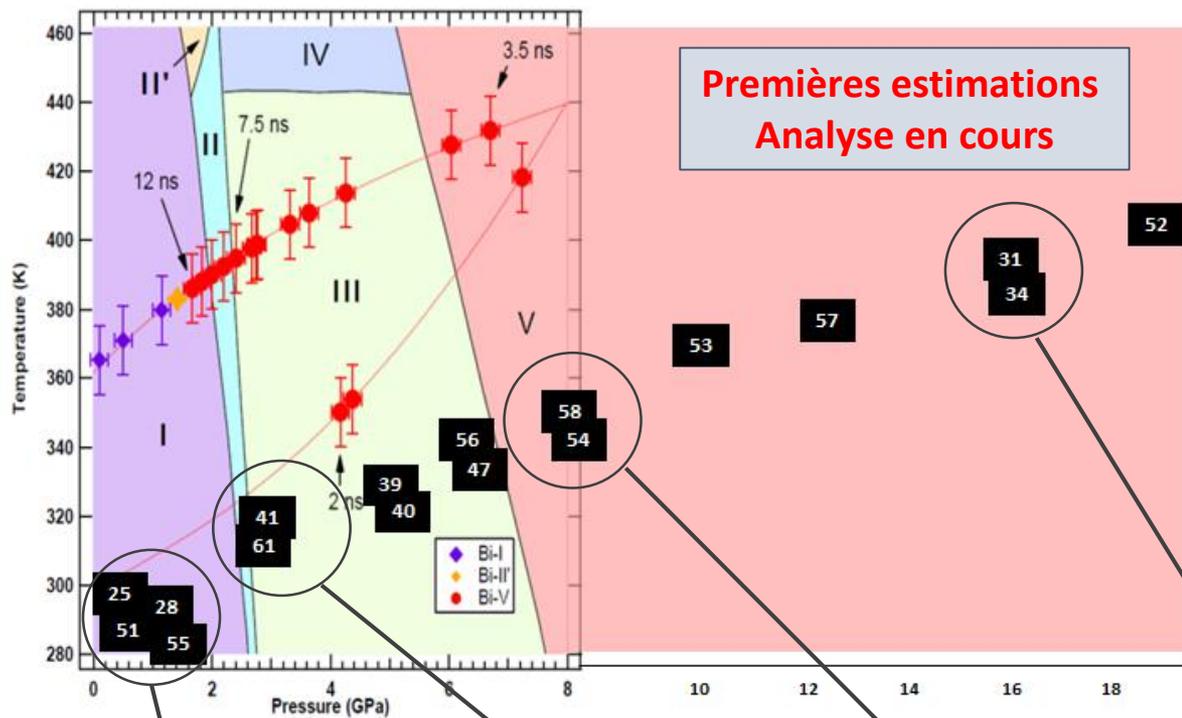
DAC

Diagramme de phase du SiO_2

Source X au LULI2000 :

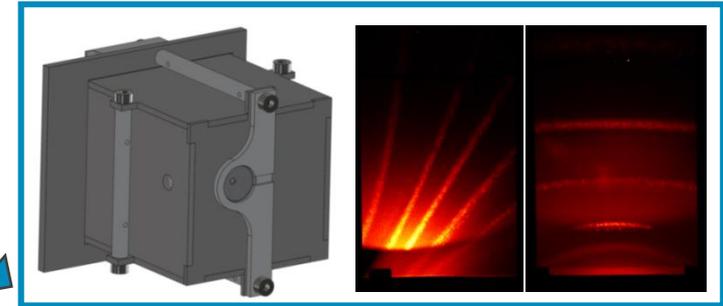
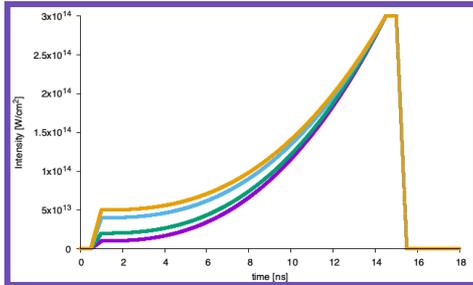
- * Emission He_α (interaction laser ns / solide)
- * $\Delta\tau \approx 0,5 - 1$ ns
- * $E \approx 5$ à 8 keV (backlighter : V, Mn, Fe, Cu)
- * Optimisation du RSB avec :
 - $I \approx 2.10^{15}$ W/cm² : Confirmation des résultats de Coppari *et al.*, RSI **90** (2019)
 - l'utilisation d'un feuille en spéculaire
 - une distance source X-échantillon importante (max autorisé : 30 mm)
- * Optimisation de la mono-chromaticité :
 - Utilisation d'un spectromètre X
 - En baissant de l'intensité...
 - ... mais certaines raies restent encore visibles et nécessitent d'être vigilant dans l'interprétation





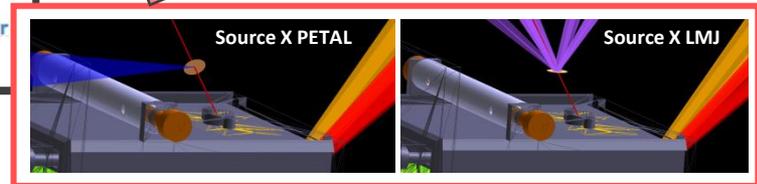
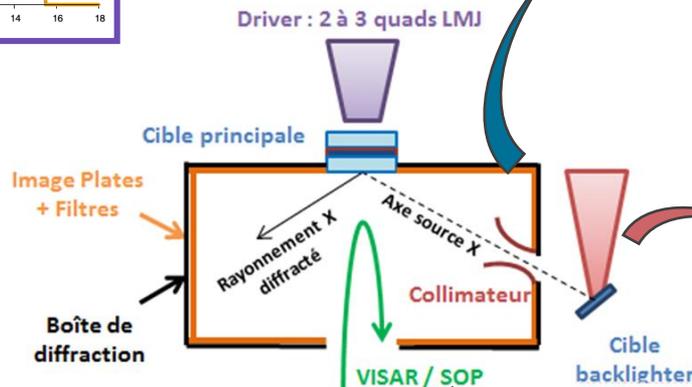
Driver : Compression par choc + rampe laser

- Atteinte de conditions hydrodynamiques extrêmes d'intérêt géophysique
- Premier choc + rampe : compression douce de fer soit solide en phase hcp, soit liquide
- Profil temporel laser long et exotique sur LMJ



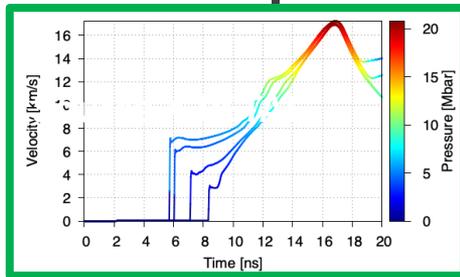
Diagnostic principal 1 : Diffractomètre X en réflexion

- Mesure de la structure ionique du fer (transitions de phase)
- Nécessité d'un rapport signal X sur bruit très exigeant : blindage externe en WC + blindage interne de la cible principale
- En cours de développement au LULI
- Objet lourd et encombrant au centre chambre LMJ : réel défi d'intégration et d'alignement



Sonde : source X à haut flux

- Génération de la source X avec PETAL ($K\alpha$) ou avec 6-7 quads LMJ (Hex)
- Première partie de l'expérience : test de la meilleure source X
- Spectre et flux X caractérisés par SpectiX, DMX et un canon à Bremsstrahlung



Diagnostic principal 2 : VISAR ($\omega/2\omega$) + SOP

- Mesure du chemin thermodynamique (P-T) indépendant de la diffraction X
- Temps de sonde > temps de compression (> 30 ns)

The image shows a software interface for X-ray diffraction simulation and analysis. The interface is divided into several sections, with callout boxes pointing to specific settings:

- Simulation / analyse**: Points to the radio buttons for "Simulation (x,y)", "Simulation azimutale", and "Analyse".
- Spectre émission X**: Points to the "Matériau cible" dropdown menu, which is set to "Fer (Fe)".
- Matériau cible**: Points to the "Matériau backlighter" dropdown menu, also set to "Fer (Fe)".
- Filtres**: Points to the "Matériau et épaisseur (µm) des filtres" section, which contains a 4x4 grid of dropdown menus for filter material and thickness. The top row is set to "CH" and "600".
- Coupure SNIP**: Points to the "Correction du fond diffus" section, specifically the "SNIP 1D" and "SNIP 2D" input fields, both set to "20".
- Absorptions**: Points to the "Corrections physiques" section, specifically the "Correction absorption" checkbox, which is unchecked.
- Angle solide**: Points to the "Correction angle solide" checkbox, which is unchecked.
- Précision du spectre**: Points to the "Précision du spectre en angle de Bragg (°)" input field, set to "0,10".

At the bottom of the interface is a button labeled "Lancer le calcul".