

1^{ers} résultats de la campagne ILP « Shock Ignition » sur l'installation laser LMJ-PETAL

Sophie D. Baton



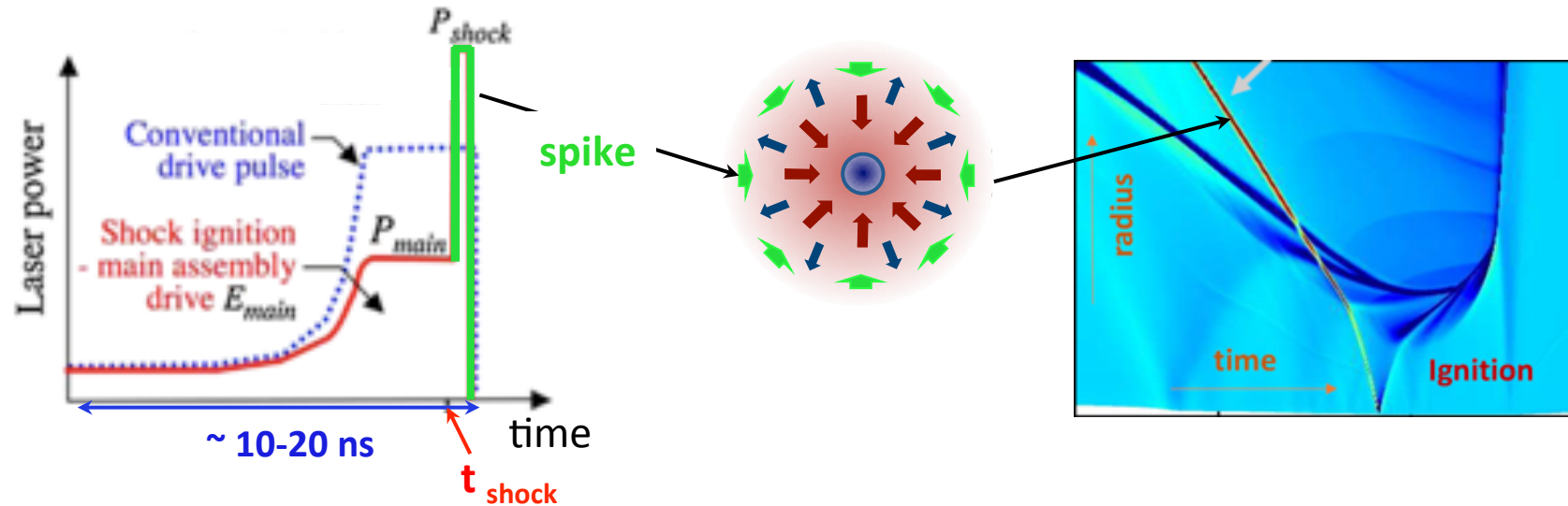
FORUM ILP, Belgodère, 27 septembre – 1 octobre 2021

Ignition par Shock : schéma alternatif pour la FCI en attaque directe



Schéma proposé par Shcherbakov (1983) et repris par Betti (2007)

➔ Dissocier les phases de compression et d'ignition :
compression modérée suivie par un choc violent convergent



Avantages :

- gain fort
- laser conventionnel
- cibles

Points clef:

- génération d'un choc fort > 300 Mbar
- Synchronisation des chocs
- Contrôle des électrons chauds

Shcherbakov, SJPP 9 (1983)

Betti, PRL 98, (2007)

Ribeyre, PPCF 51 (2009)

Atzeni, NJP 15 (2013)



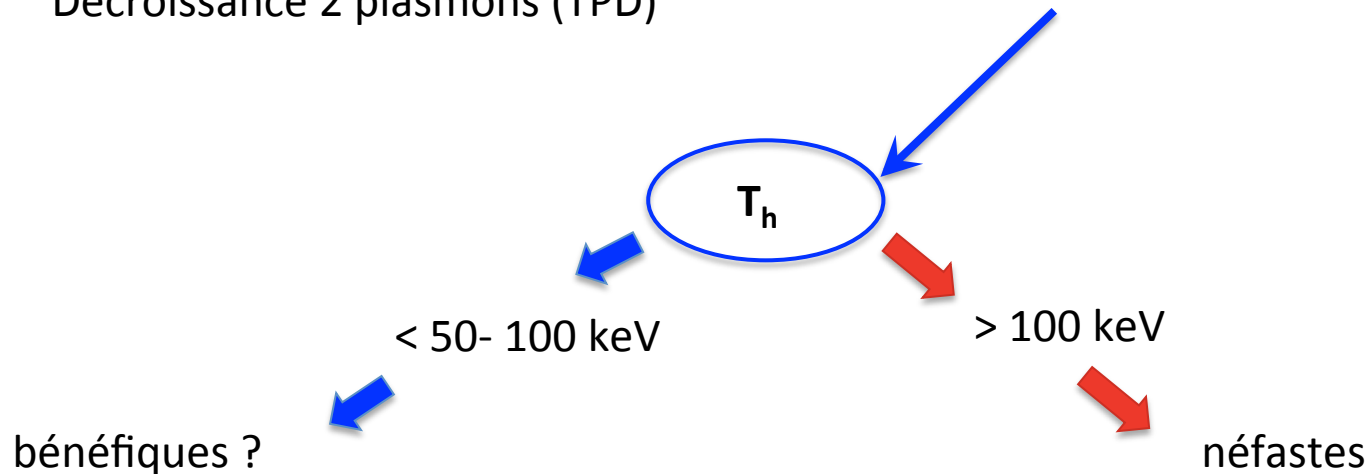
Contrôle des électrons chauds



Intensités laser pour le choc fort $\sim 10^{16}$ W/cm² nécessaire

Pour $I > 10^{15}$ W/cm², les instabilités paramétriques deviennent prépondérantes

Diffusion Brillouin stimulée (SBS) → Perte d'énergie
Diffusion Raman stimulée (SRS) → électrons chauds
Décroissance 2 plasmons (TPD) → électrons chauds



Les électrons chauds doivent être pris en compte => nécessité d'expériences

Gus'kov et al., PRL 109 (2012)
Piriz et al., PoP 19, (2012)
Ribeyre et al., PoP 20 (2013)
Batani et al., Nucl. Fusion 54 (2014)

Genèse de la campagne SI LMJ-PETAL



Thématique Shock Ignition menée en collaboration depuis 2010 avec le LULI, le CEA et le CELIA, et Rochester (LLE)

- Expériences au LULI en 2010, 2013
 - Nombreuses expériences à PALS
- Campagne sur la LIL (2014)



« Effect of hot electrons on strong shock generation in the context of shock ignition »

- Lettre d'intention fin 2014
- Full proposal avril 2015
- Sélection en juillet 2015
- Réunion de lancement : déc 2016
- Campagne SI en 2 parties : avril 2019 et mars 2020

Large collaboration internationale



Sophie Baton
Michel Koenig



Christophe Rousseaux
Stéphanie Brygoo



Isabelle Lantuéjoul
Charles Reverdin
Laurent Jacquet
Guillaume Boutoux
Laurent Le Déroff



Wolfgang Theobald



•••

Edouard Le Bel
Arnaud Colaitis



Leo Gizzi
Gabriele Cristoforetti
Lucas Labate
Petra Koester



Jocelain Trela
Dimitri Batani
Didier Raffestin
Xavier Ribeyre
Alexis Casner
Guillaume Duchateau
Vladimir Tikhonchuk



Keisuke Shigemori



Les enjeux de l'expérience sur LMJ-PETAL

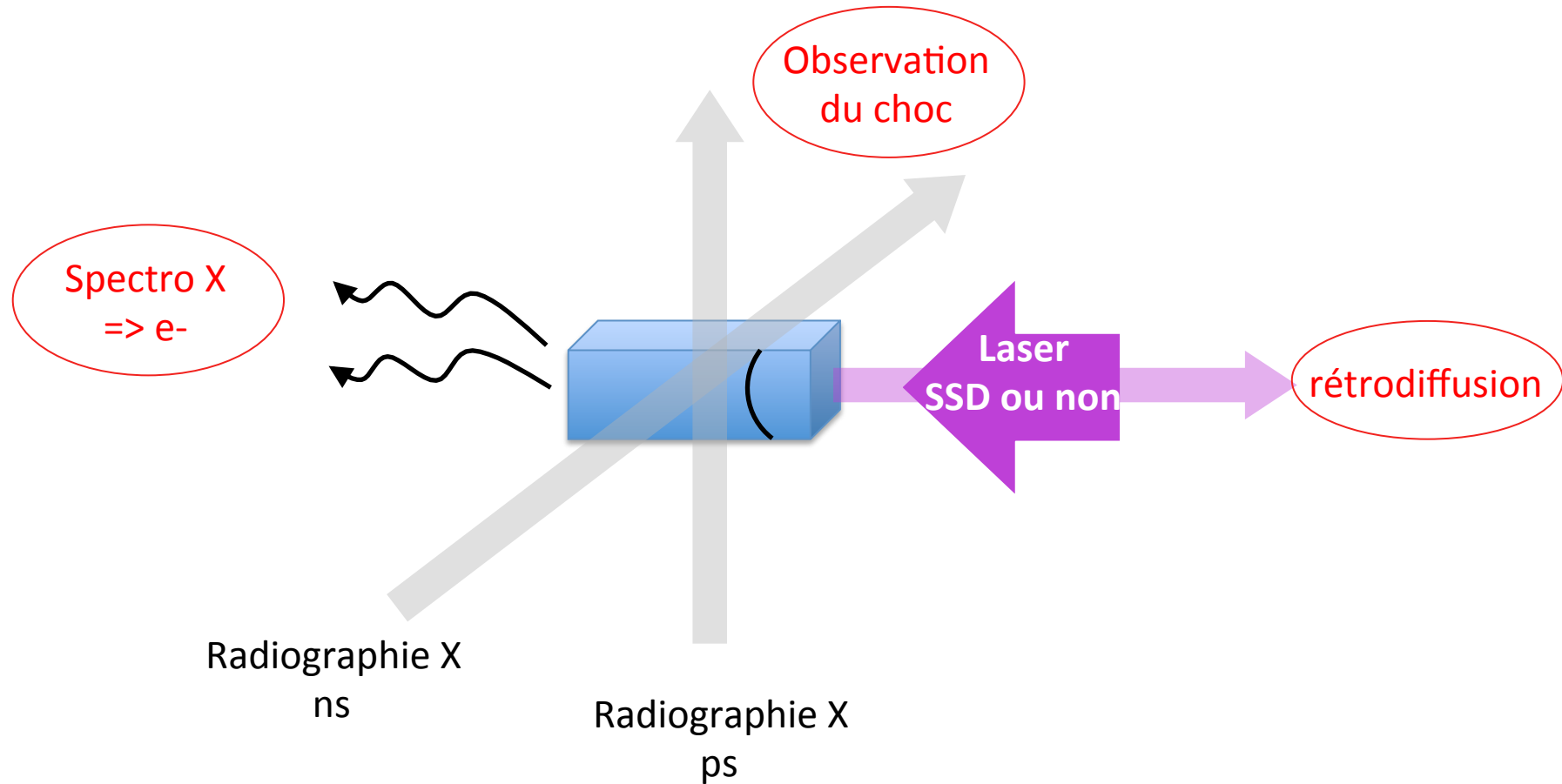


- ➡ **Générer un choc fort ~ 200 Mbar** dans des conditions pertinentes pour SI
 - => *Réaliser un plasma de couronne de caractéristiques pertinentes pour FCI*
 - => *Profiler une impulsion avec plateau et spike*

- ➡ **Etudier l'interaction laser-plasma à haute intensité**
 - $I \sim 10^{16}$ W/cm²
 - => Spike à une intensité maximale pour favoriser les électrons chauds

- ➡ **Estimer les effets des électrons chauds sur la propagation du choc à différent temps**
 - => *caractérisation de la population des électrons chauds*
 - => *Influence du lissage laser*

Schéma de principe de l'expérience sur LMJ-PETAL



2019 : caractérisation des électrons chauds
2020 : étude de l'influence des électrons chauds

2019 : caractérisation des électrons chauds



CRACC-X
Bremsstrahlung cannon
Spectre X dur des e- chauds

CH ablateur +
Multilayer Cu / Ag / Mo

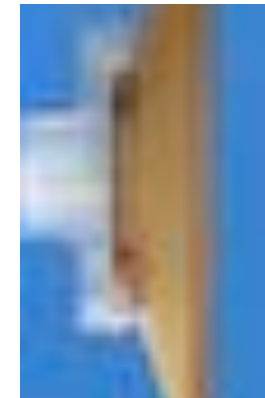
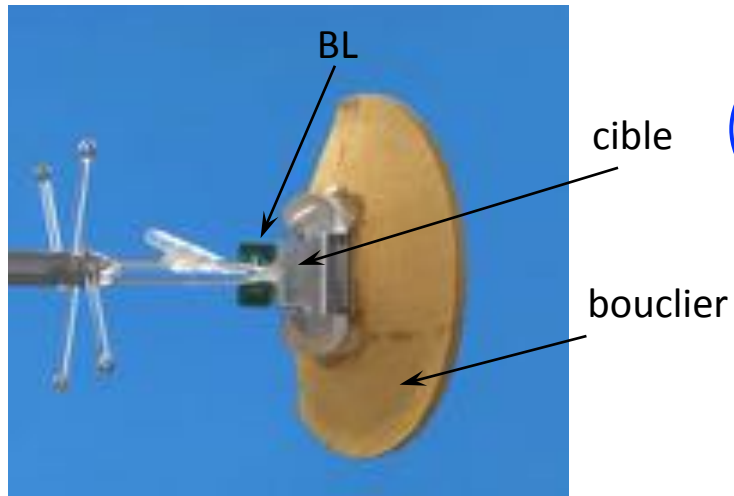
backlighter Fe

CH Target

FABS
LPI (SBS, SRS)

SPECTIX
spectromètre $K\alpha$
=> Évaluation population
électrons chauds

GXI
imageur X 2D avec
portes temporelles
=> Propagation du choc

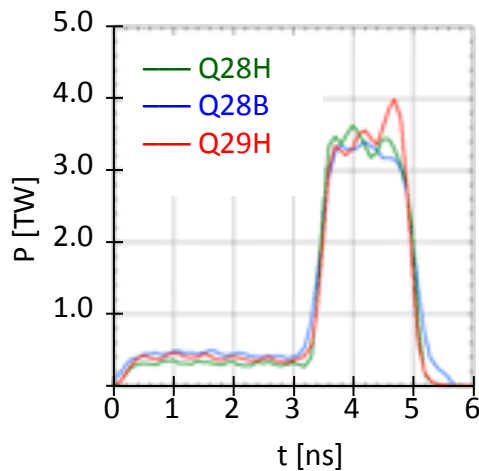
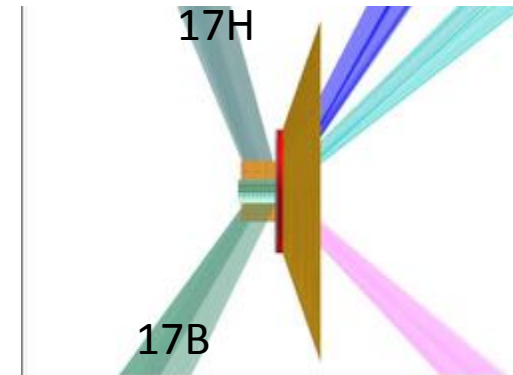
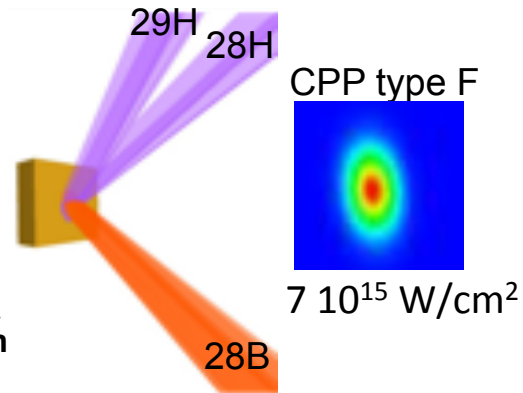
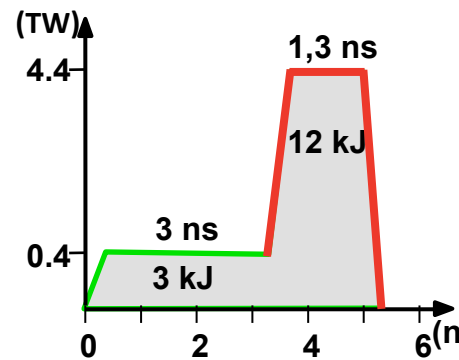


2019 : laser et géométrie



- 3 quads profiler en temps pour
 - (i) préformer le long plasma et
 - (ii) pour le spike

- 2 quads pour le backlighter X (Fe)
 - => observation de la propagation du choc



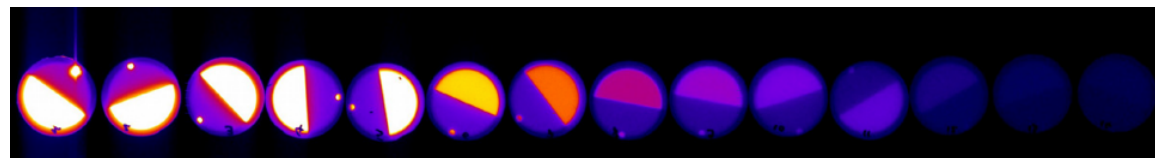
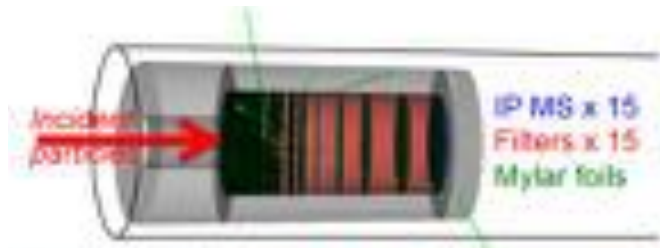
Puissance dans le spike

	Tir # 1	Tir # 2	Tir # 3
Sans SSD	10,7 Tw	9,7 TW	
Avec SSD 14 GHz			10,1 TW

Caractérisation des électrons chauds : plusieurs températures



CRACCX



2 voies Al et Mo

Analyse par Geant4 (+ Penelope) => hypothèse distribution à 3 températures*

Prévisions CHIC : SRS => $T_{h1} \sim 45 \text{ keV}$, TDP => $T_{h2} \sim 95 \text{ keV}$

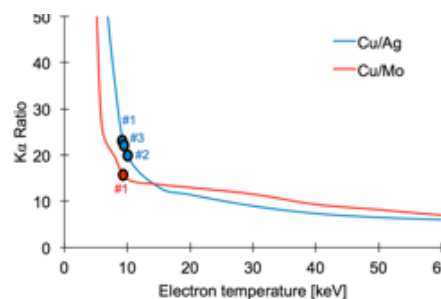
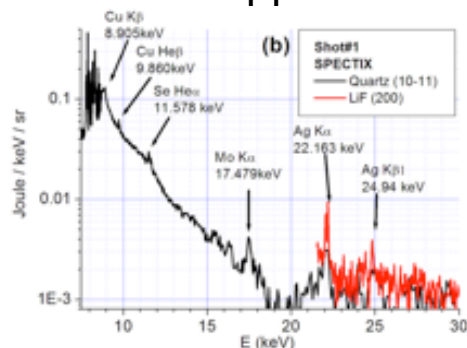
Th1 => qq keV / Th2 => $\sim 20\text{-}30 \text{ keV}$ / Th3 => plusieurs dizaines de keV

Décroissance importante de la Th3 pour le tir avec SSD, mais pas des autres Th

SPECTIX

Spectres d'émission Ka dans 2 gammes d'énergie : 7,5-10 keV et 7,5-30 keV

Rapport des raies Cu/Mo et Cu/Ag permet d'estimer la température



Cu / Mo ~ 16

Cu / Ag ~ 21



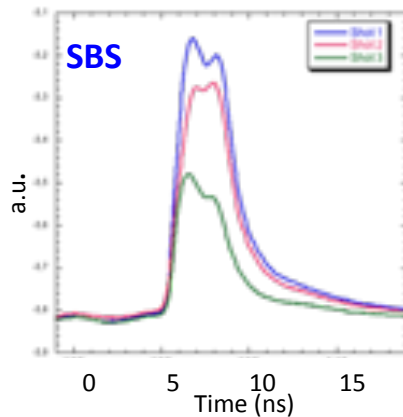
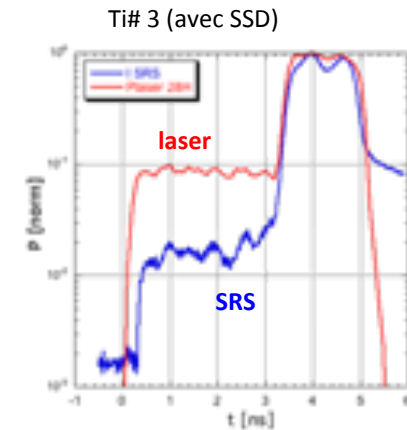
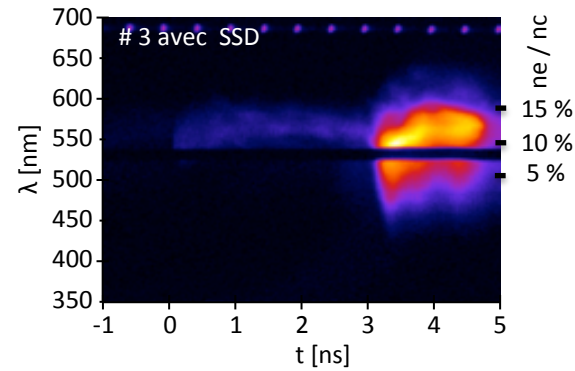
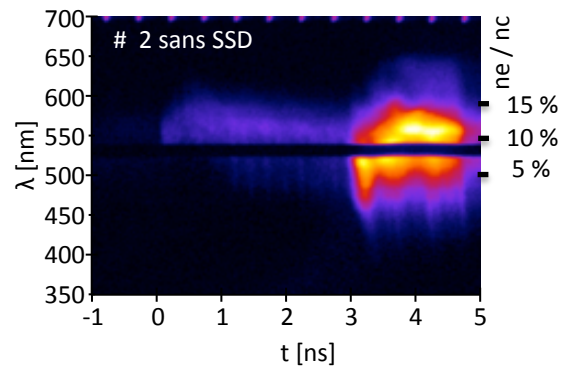
$T_h \sim 10\text{keV} \pm 2 \text{ keV}$

*P. Koester et al., Rev. Sci. Instrum. 92, 013501 (2021)

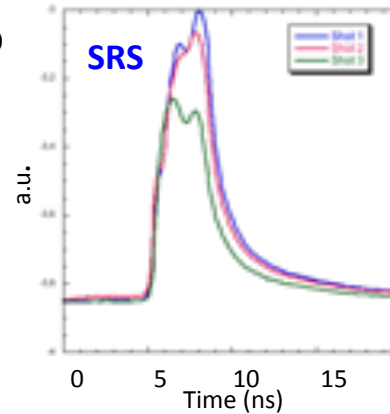


DP7 (FABS) : faible effet du SSD sur le SRS

- SRS principalement entre 0.08 et $0.15 n_e / n_c$
Hypothèse (simulations) : température du plasma $T \sim 4$ keV $\Rightarrow T_h \sim 20$ keV
- Réduction faible du SRS avec 14 GHz SSD (tir # 3)



1-2 sans SSD
3 avec SSD



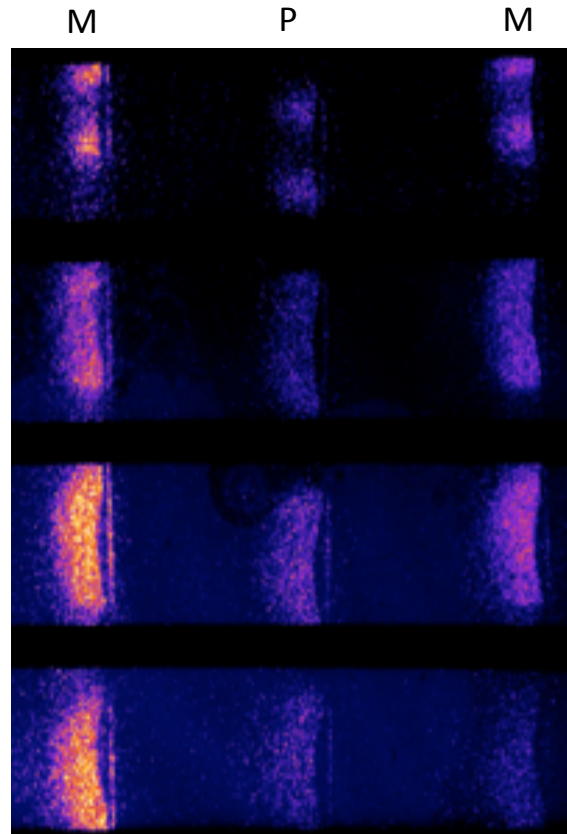
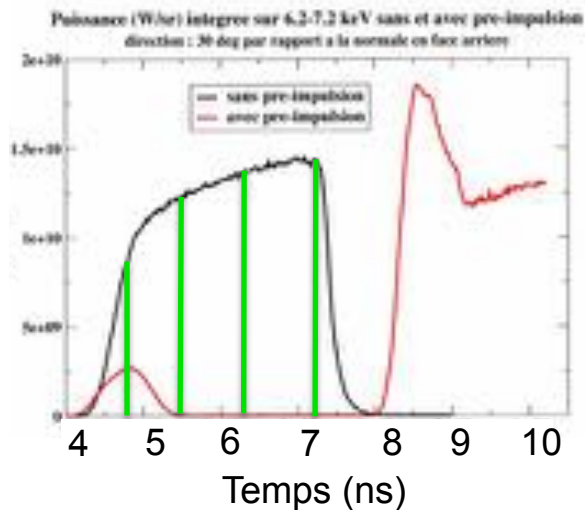
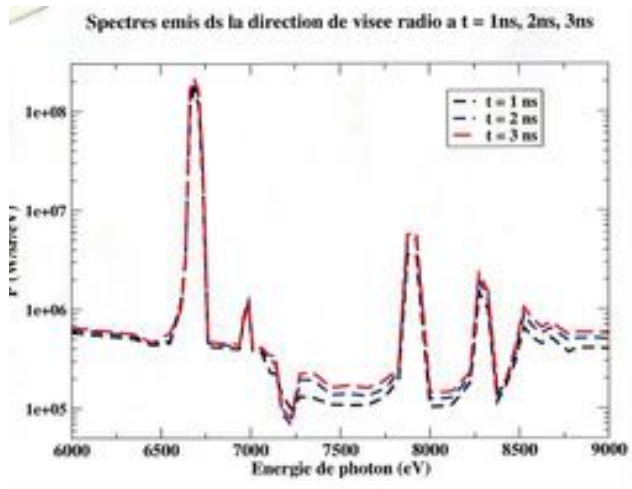
Calibrations en énergie
en attente ...

➤ Effet modeste du lissage SSD

DP1 (GXI) : test de radiographie avec source X à 6,7 keV (Fe)



Choix d'un BL à 6.7 keV (Fe) de 3 ns validé par simulation FCI2
=> Comparaison avec différentes configurations
(Face avant vs Face arrière)



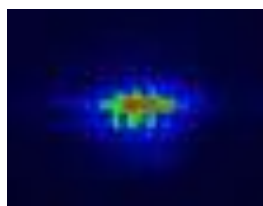
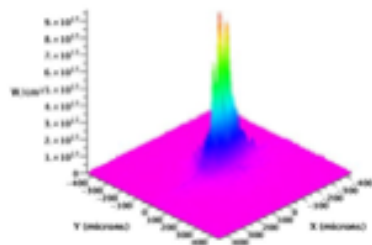
- Problème de pointage
- Source un peu faible
- Choc lent



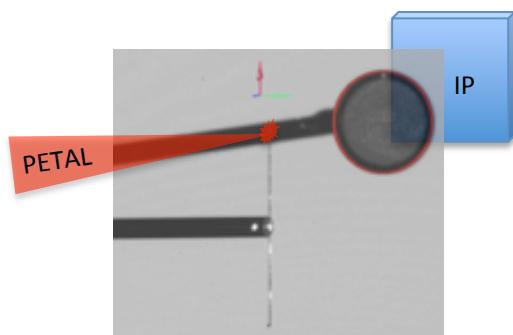
Tir test avec PETAL en radiographie point source



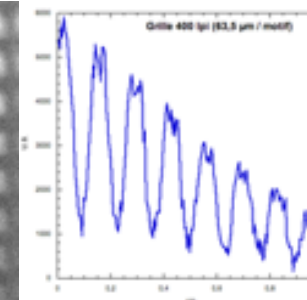
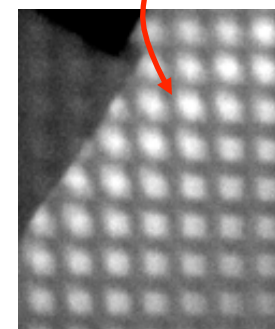
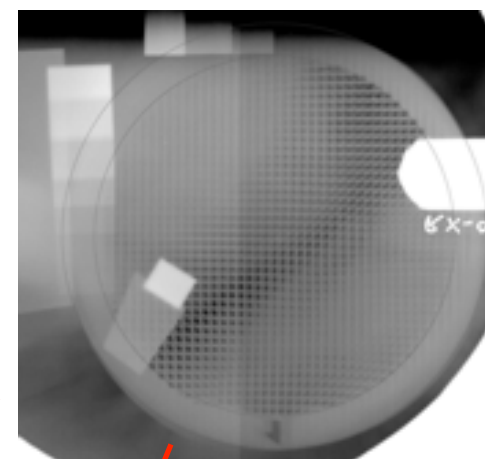
- radiographie X à 8 keV en point source sur fil de Cu \varnothing 25 μm
- Mise en forme de la tache focale (4 compresseurs indépendants)
 $\sim 100 \times 25 \mu\text{m}^2$ (*tache focale mesurée à pleine énergie*)



$0.77 \cdot 10^{18} \text{ W/cm}^2 < I < 1.18 \cdot 10^{18} \text{ W/cm}^2$
(396 J @ 3 ps)



grille (400 LPI) + steps



resolution 2D $\sim 25\text{-}30 \mu\text{m}$!

Conclusion de la 1ere partie



- 3 tirs LMJ avec tous les diagnostics qui ont fonctionné
- Radiographie avec BL Fe
- 1 tir PETAL : démonstration d'une radiographie en point source

- Choc moins fort que prévu
- Problème de pointage des quads pour le BL (résolu depuis)
- Source BL Fe modifiée pour 2^e partie => plus longue et en face avant
- FABS : calibration en énergie compliquée ...

Résultats présentés à l'IFSA à Osaka (Sept. 2019)

S.D. Baton, A. Colaitis, C. Rousseaux et al, HEDP 36, 100796 (2020)

P. Koester et al., Rev. Sci. Instrum. 92, 013501 (2021)

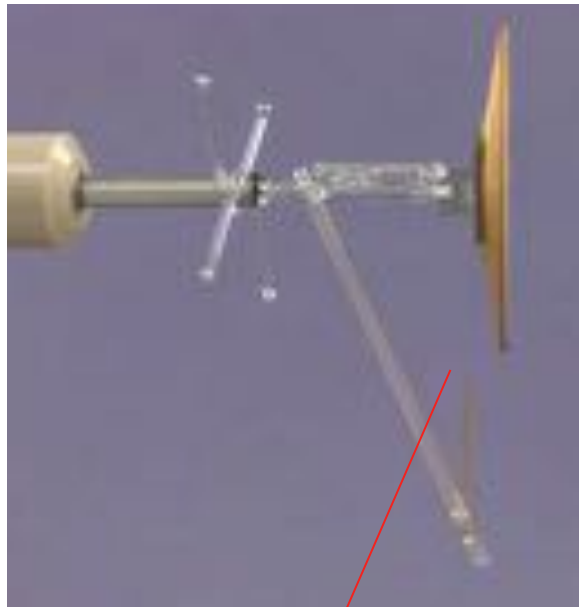
2020 : effets des électrons chauds sur le choc



- Radiographie de la propagation du choc
- Estimation de l'effet des électrons chauds sur le choc
- Radiographies croisées ns & ps (PETAL) simultanées



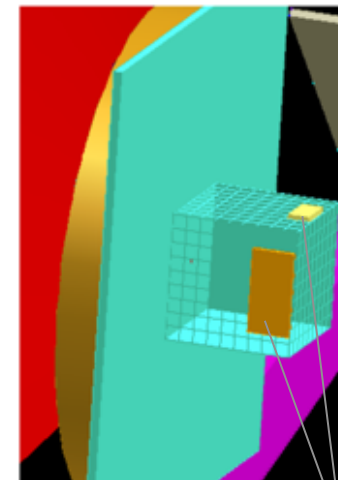
Nouvelles cibles compatibles avec les radiographies perpendiculaires



Fil 25 μm



BL Fe



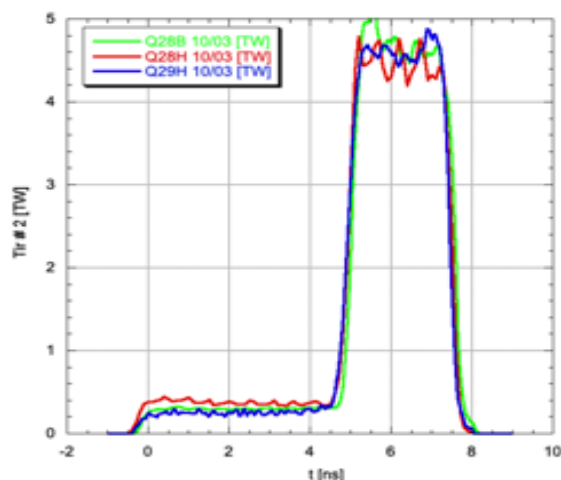
Grilles

Modification des impulsions principales et BL



Simulations CHIC Changement du profil

Pre-plateau de 5ns à / Spike de 2,3 ns à 4,5 TW



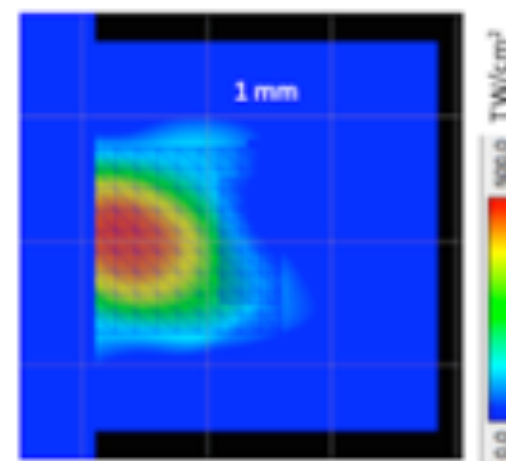
=> Meilleur contrôle de la puissance laser

Changement de la source X ns Fe

Source face avant

4 ns (3,5 TW / quad)

nouveaux quads : 10H&B, 29B

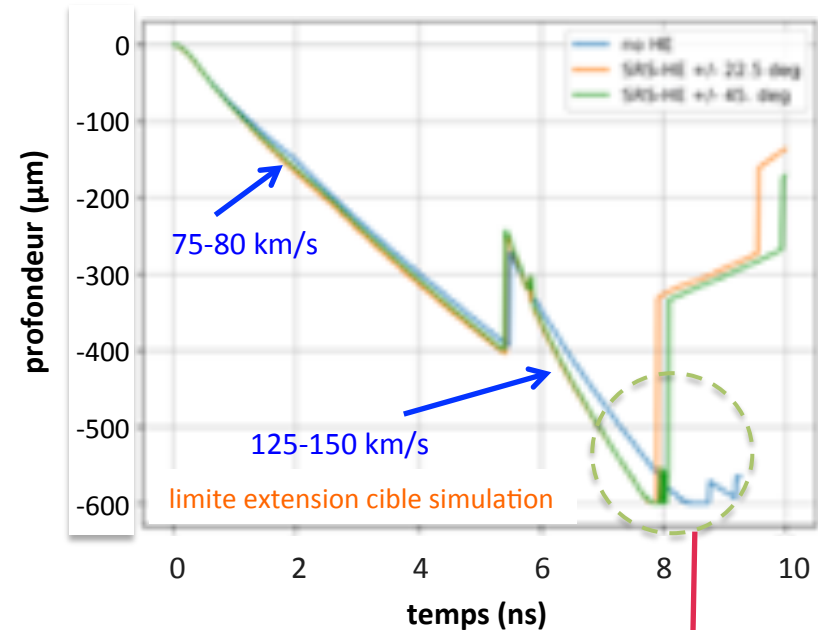
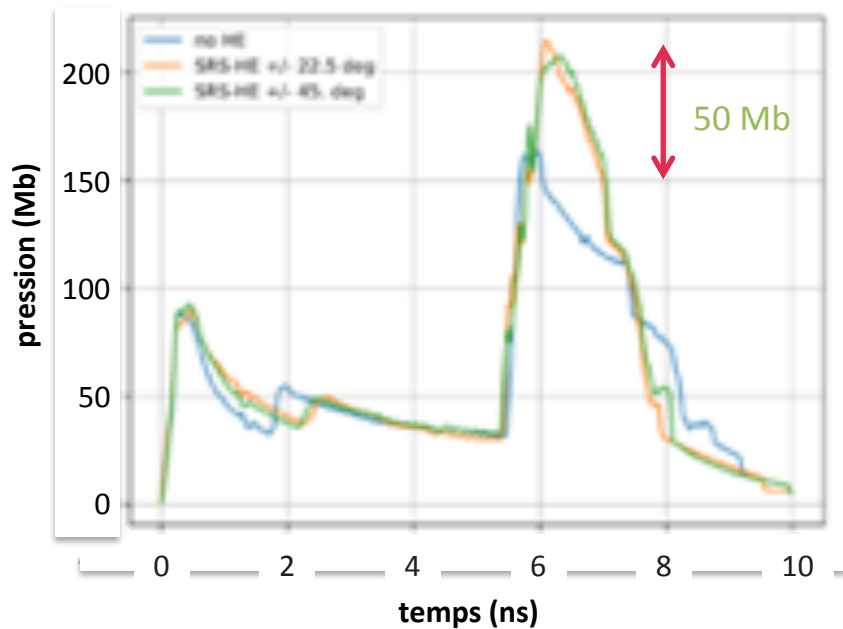


	# 1	# 2	# 3 (SSD)	# 4
Energie totale	37,5 kJ	40,2 kJ	40,7 kJ	38 kJ
Energie spike	33,7 kJ	35,8 kJ	34,3 kJ	33,5 kJ
Puissance spike	13 TW	13,8 TW	13,2 TW	12,9 TW
Intensité spike (W/cm ²)	6,2 10 ¹⁵	6,6 10 ¹⁵	6,3 10 ¹⁵	6,15 10 ¹⁵

Simulations hydrodynamiques 2D avec/sans électrons chauds



palier de 5 ns => longueur de gradient de densité électronique de 350 μm à $n_c/4$



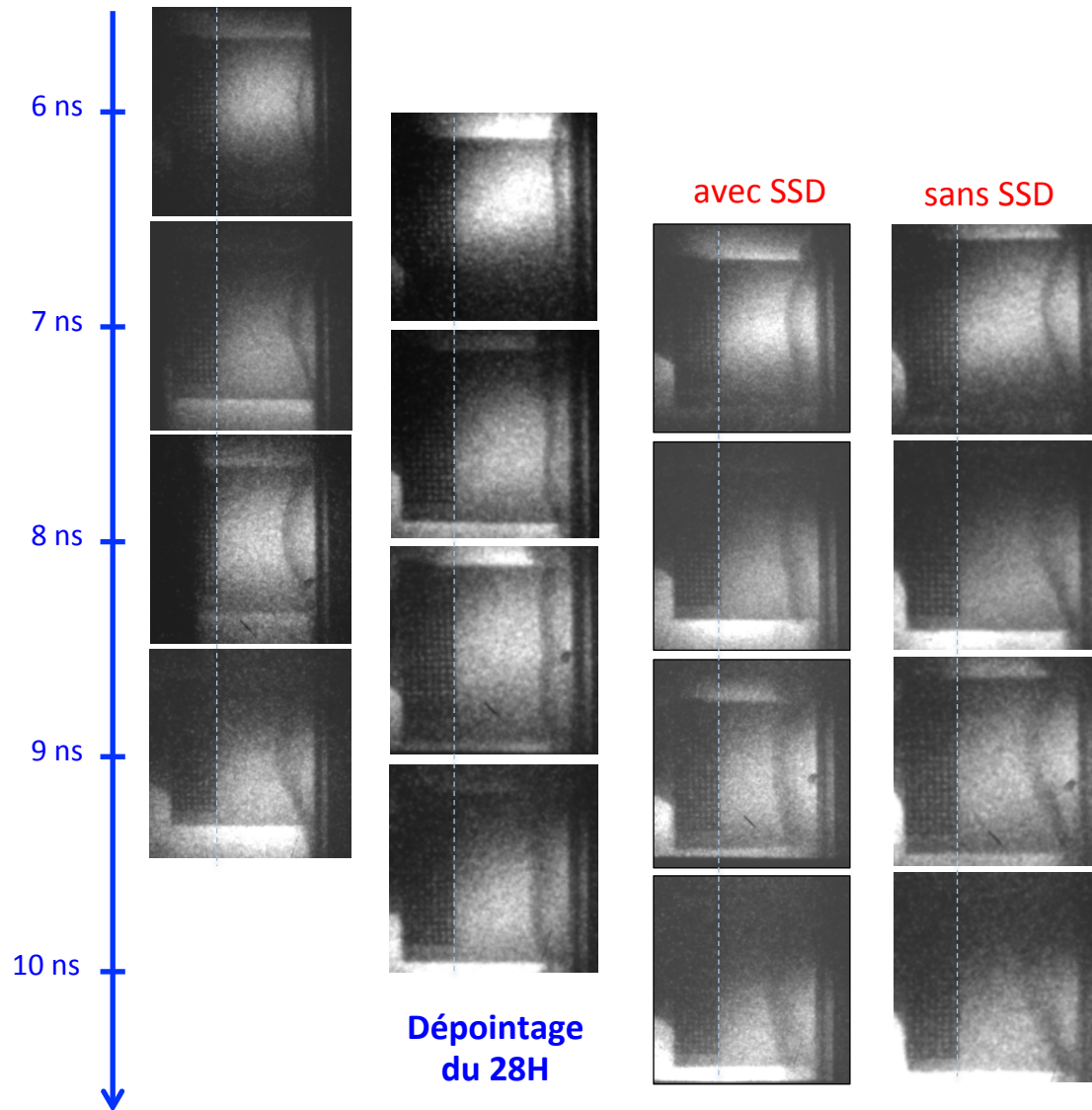
Apport du dépôt d'énergie des électrons chauds :

- pression accrue d'1/3 => +50 Mbar *après* coalescence des chocs
- + 25 km/s (vitesse jusqu'à 150 km/s) *après* coalescence des chocs

mesures DP1 les plus discriminantes...

Temps radiographie ns : 6 – 7 – 8 – 9 ns
PETAL à + 8 ns

DP1 (GXI) : suivi de la propagation du choc

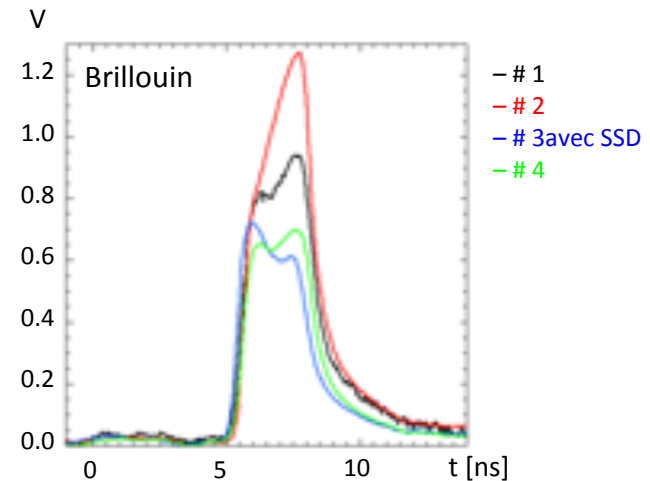
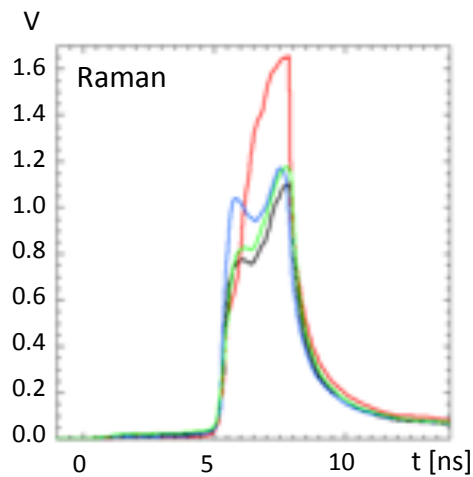
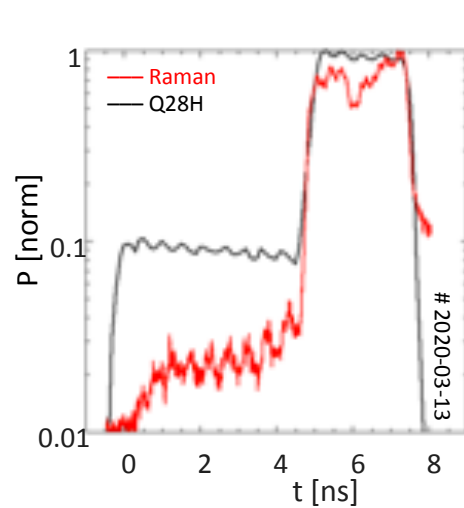
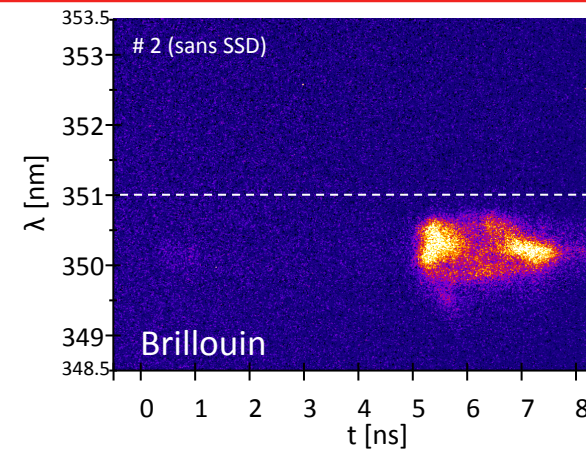
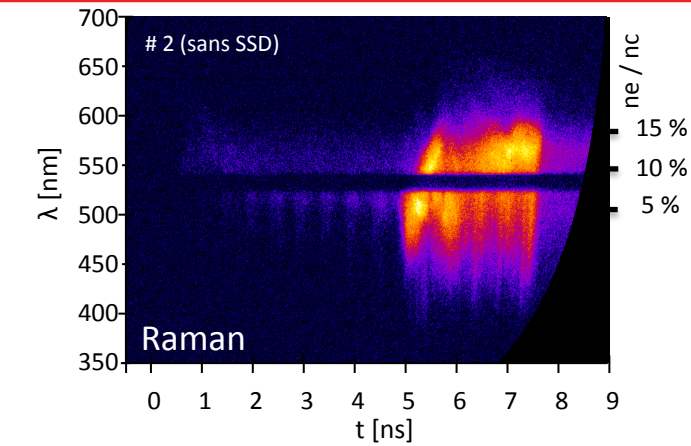


comparaison des tirs 3 et 4



- un peu plus rapide sans SSD
=> 78 km/s sans SSD
=> 73 km/s avec SSD
- Pas d'évidence du choc du spike

DP7 (FABS) : résultats préliminaires



- Résultats seulement en relatif (en attente de calibration)
- peu d'influence du SSD-14 GHz sur les instabilités dans cette configuration

Estimation de la population des électrons chauds



CRACCX => Bremsstrahlung cannon

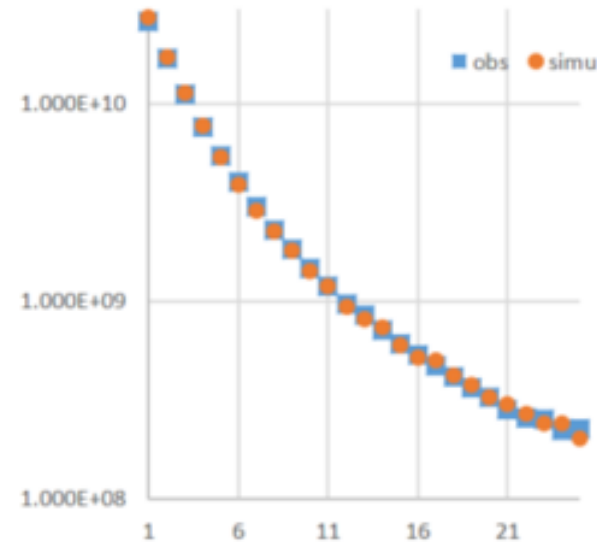
Emplacement du BC différent / 2019
(tube ré-entrant à 374 cm du TCC)

25 IP (MS) empilées, sensibles aux $X \geq 30$ keV

=> signaux faibles mais exploitables

=> Extrapolation à une température ~ 6 keV

=> Pas de composante haute énergie



PETAL et CRACCOPOLE

Réalisation de radiographie en point source avec détecteur au pôle

=> *merci aux collègues du CEA !!*

- 😊 PETAL a bien éclairé la tige $\varnothing 25 \mu\text{m}$ (IEM)
- 😞 contribution X Cu-8 keV de PETAL insuffisante
- 😞 discrimination spectrale insuffisante

Bilan et conclusion campagne SI LMJ-PETAL



Bilan campagnes SI

- conditions expérimentales 2020 nettement améliorées par rapport à 2019
- radiographie par point source avec PETAL techniquement possible
mais optimisations nécessaires

- effet du SSD-14 GHz assez peu sensible *a priori*
- pas d'évidence du choc lié au spike
- Raman et Brillouin plus importants qu'en 2019, mais intensité plus forte aussi

- ➡ Attente de la calibration en énergie de DP7 pour lancer de nouvelles simulations plus proches des conditions expérimentales et conclure
 - Processus long : appel en 2014, campagne en 2019 et 2020
 - Point critique : cibles (coût, fabrication , métrologie)