

Journées 2025 du GDR EMILI

Université Jean Monnet, Saint-Etienne

Les plasmas induits par laser pour la quantification d'éléments légers en rétention dans les métaux : applications nucléaires

A. Favre¹, A. Bultel¹, E. Bernard², F. Montupet-Leblond², S. Peillon³, F. Gensdarmes³

¹*CORIA UMR 6614, Université de Rouen – Normandie, 76801 Saint-Etienne du Rouvray, France*

²*CEA, IRFM, F-13108, Saint Paul-lez-Durance, France*

³*IRSN, PSN-RES/SCA/LPMA, CEA Saclay, Gif-sur-Yvette, 91192, France*

✉ : aurelien.favre@coria.fr

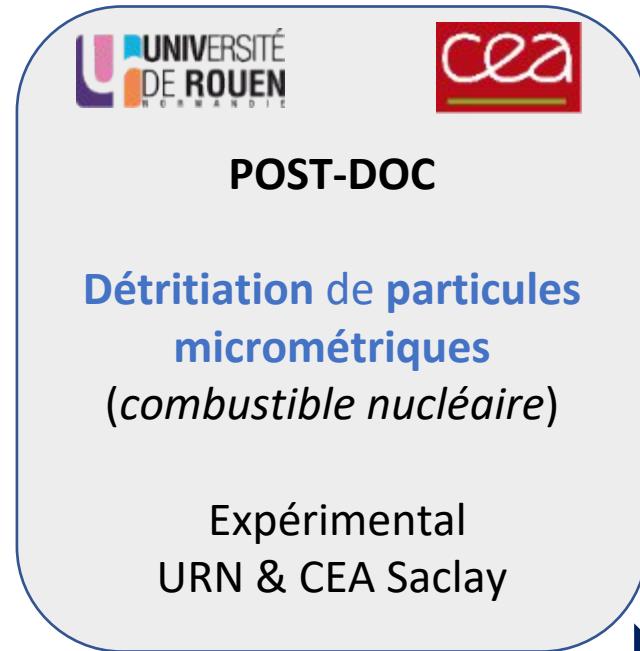
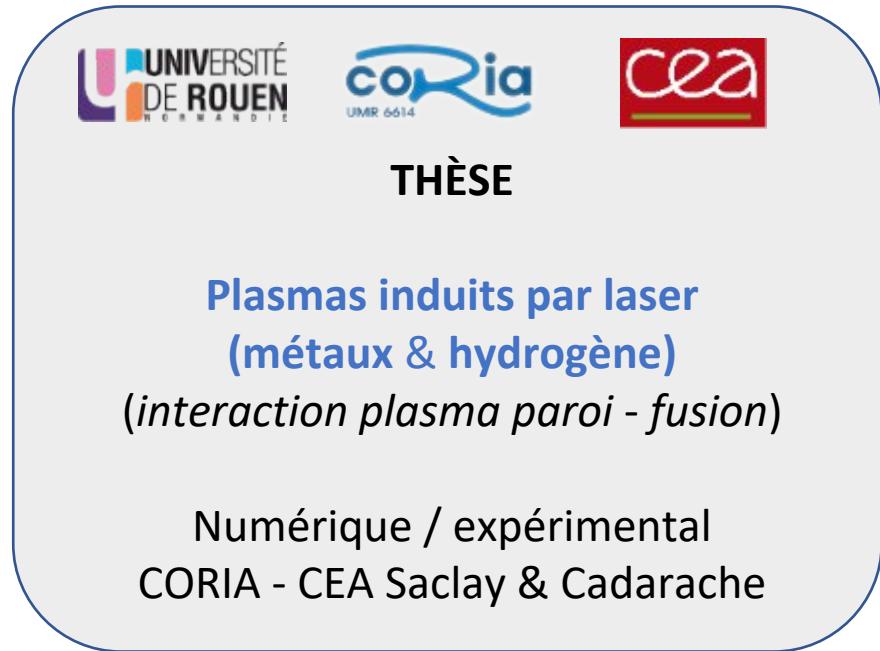
29/10/2025

Présentation *nouvel entrant...*

1. Mon **parcours** avant d'être nommé MCF

2. Les grandes lignes de ma recherche
 - a. Physique d'un **plasma induit par laser**
 - b. Simulation : développement du code **MERLIN**
 - c. Analyse intelligente de spectres d'émission (**IA, ML**)
 - d. Principales campagnes expérimentales
 - i. Première quantification CF-LIBS du tritium (**LIBS3H**)
 - ii. Première mesure LIBS *in situ* (tokamak WEST : **LIBS4WEST**)

3. Quelques mots sur mon **projet de recherche**



RECHERCHE

oct. 2019



déc. 2022



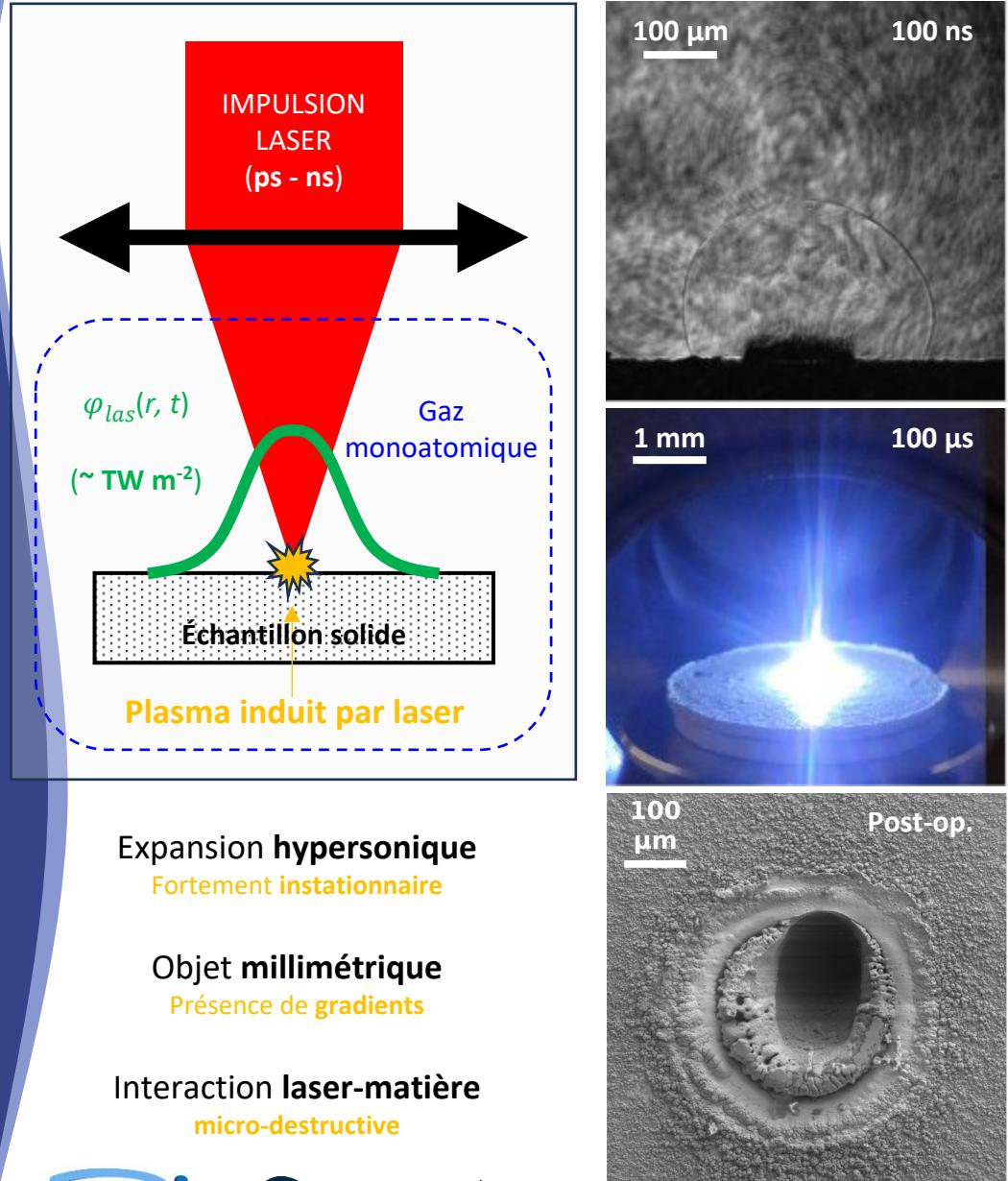
mars 2025



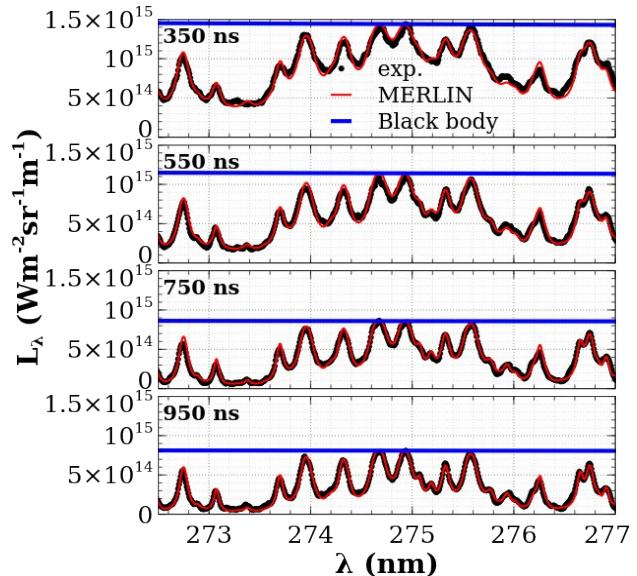
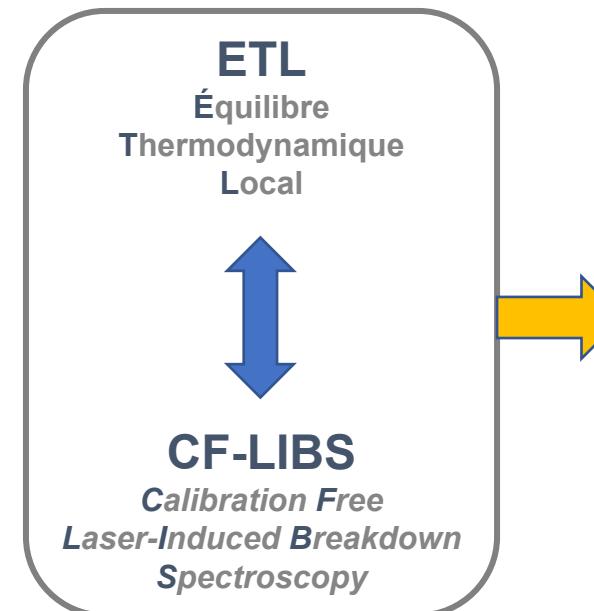
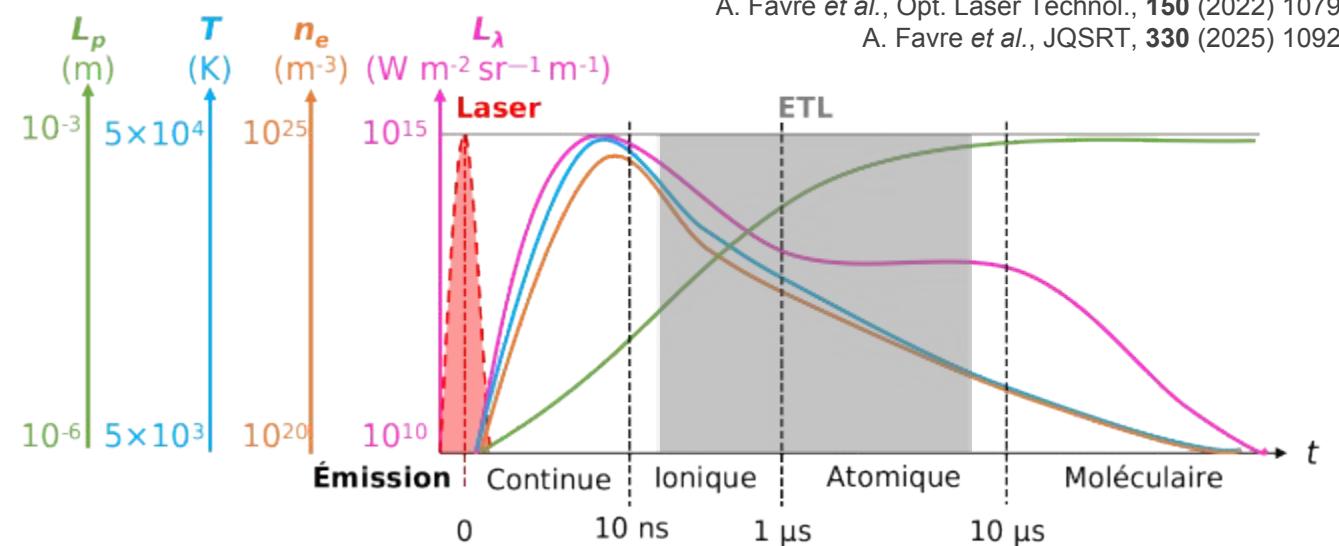
ENSEIGNEMENT



a. Physique d'un plasma induit par laser

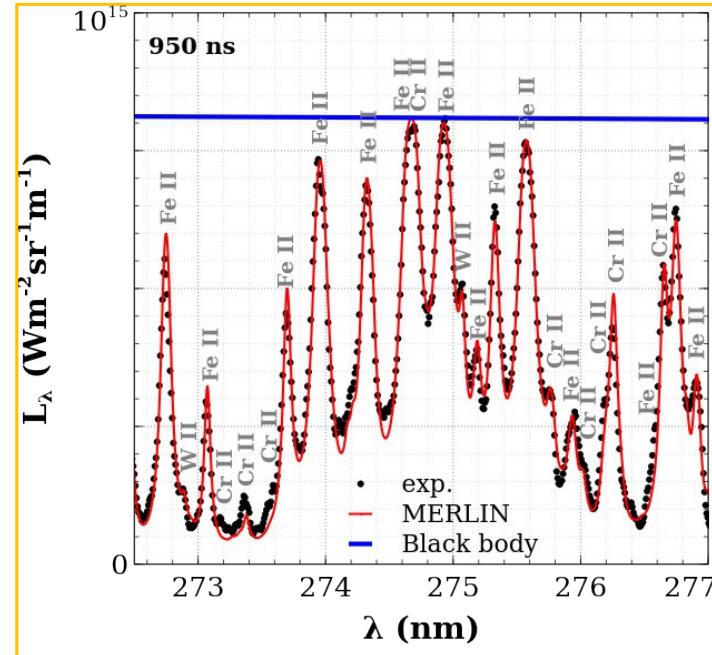
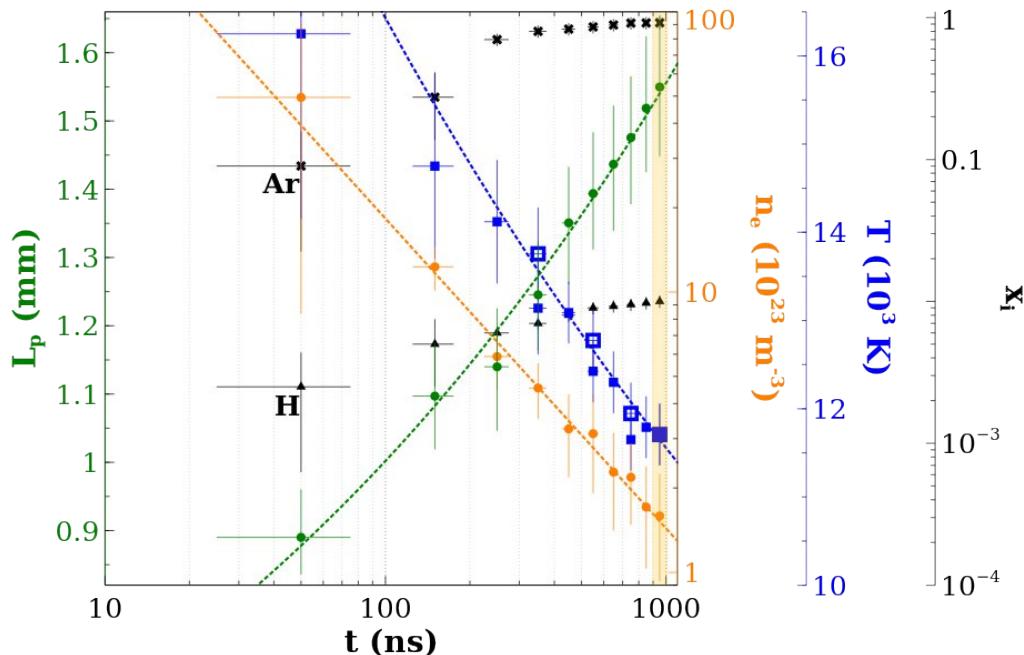


2. Les grandes lignes de ma recherche

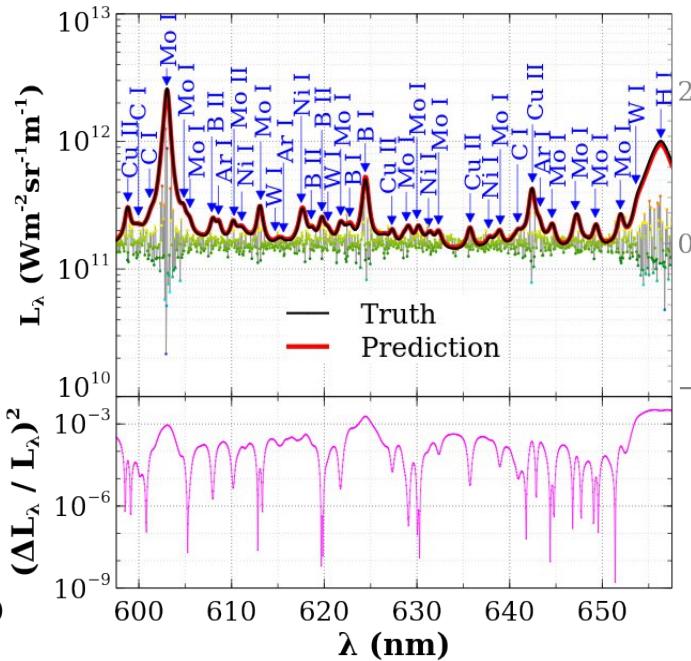
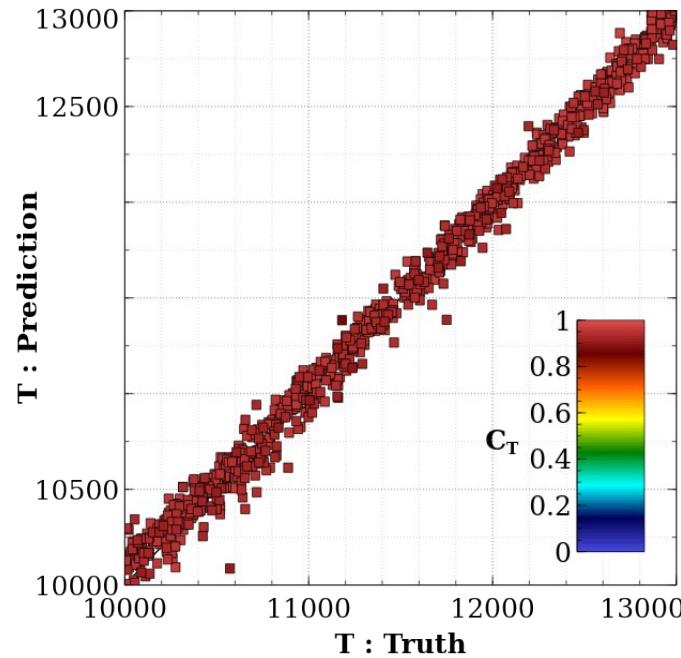


MERLIN (*MultiElemental Radiative equiLibrium emissioN*)

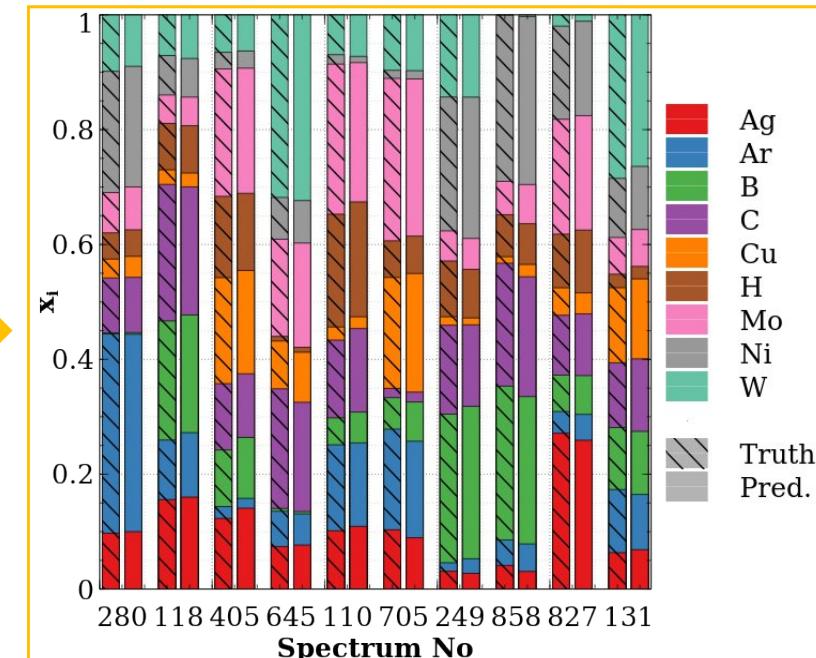
A. Favre et al., JQSRT, 330 (2025) 109222

**Transfert radiatif pour un système réactif quelconque à l'ETL**
 $\lambda_{las} = 1064 \text{ nm}$ $\tau_{las} = 6 \text{ ns}$ $\varphi_{las} = (2,5 \pm 0,7) \times 10^{14} \text{ W m}^{-2}$
 Eurofer97 dans $0,5 p_{atm}$ d'Ar (α -Gaz 2) : intégration sur 100 ns
**Mesures expérimentales des entrées de MERLIN :** L_p : imagerie n_e : élargissement Ar I, Ar II et H I T : Saha-Boltzmann Fe I/Fe II et $L^0_{\lambda \sim 275 \text{ nm}, T}$ x_{Ar}, x_H (par LIBS) x_{EF97} (par XRF) f_{AP} : par spectroscopie lampe Hg basse pression**Validation :**

- Calcul de composition à l'ETL
- Transfert radiatif : condition limite d'auto-absorption
- Profils spectraux (élargissements et convolutions)

ELIAS (Efficient Learning for Inference and Analysis of Spectra)A. Favre *et al.*, Spectrochim. Acta B, **224** (2025) 107082**Preuve de faisabilité sur des données synthétiques**
(MERLIN - 9 éléments, tokamak WEST)

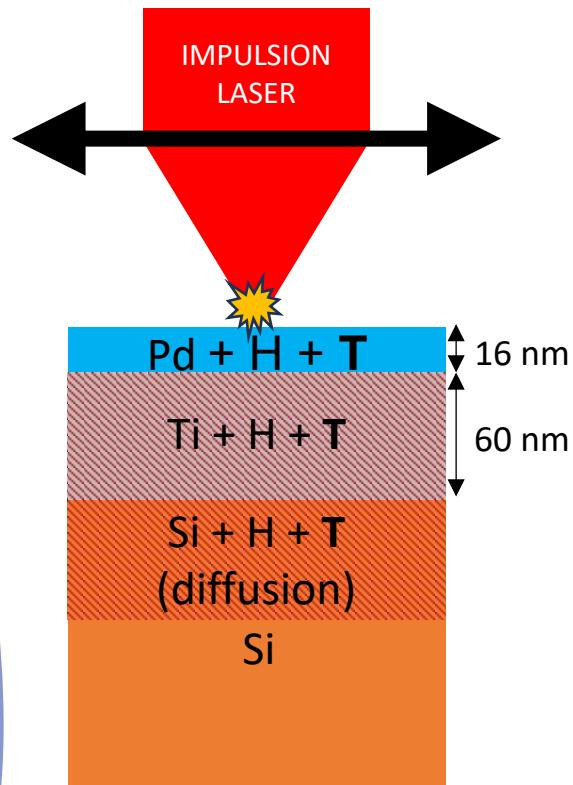
Attribution

**Protocole :**

- Réseau de type CNN (*Convolutional Neural Network*)
- Entraînement sur 10^6 spectres aléatoirement générés par MERLIN
- Fonction de perte dédiée à ce type de données structurées

Performances :

- (n_e, T) à $\pm 5\%$ sans couplage
- Sensibilité spectrale (ex. : H)
- x_i à $\pm 10\%$ selon $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$
- Exécution < 0,1 s (10 Hz)



Dépôt PVD de Ti puis Pd
sur substrat de Si
(Institut Jozef Stefan, Slovénie)



Implantation en T et stabilisation
(CEA Saclay)

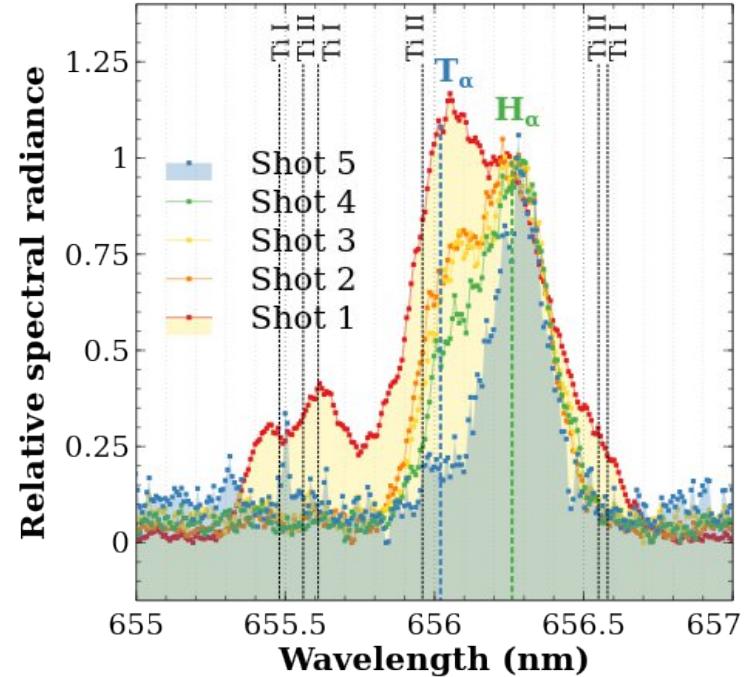


Campagne LIBS3H (SCBM - CEA Saclay)
A. Favre *et al.*, J. Nucl. Mat., 591 (2024) 154924

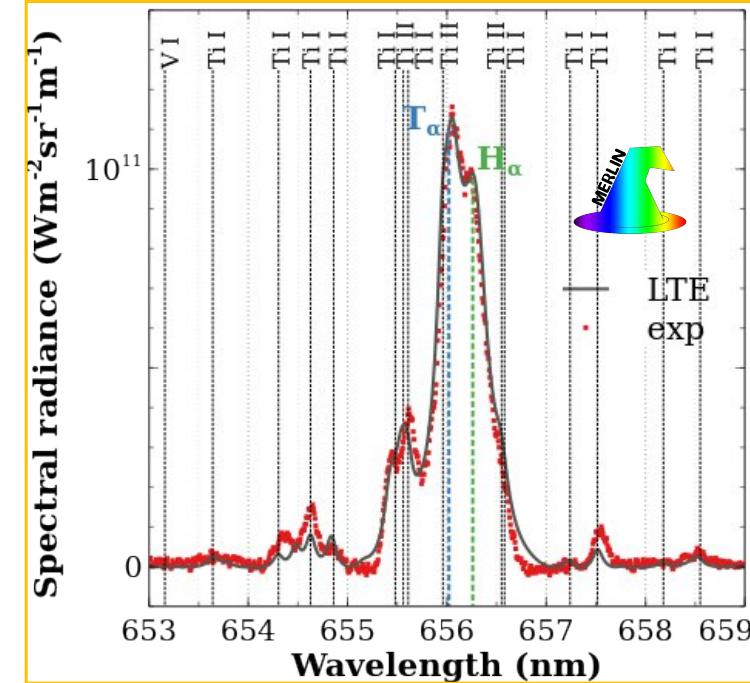
Quantification CF-LIBS du tritium en rétention dans un solide

$$\lambda_{las} = 532 \text{ nm} \quad \tau_{las} = 7 \text{ ns} \quad \varphi_{las} = (3,7 \pm 0,5) \times 10^{14} \text{ W m}^{-2}$$

Pd-Ti/T-Si dans p_{atm} d'Ar (α -Gaz 2) : $t = 10 \mu\text{s}$ (intégré sur 2 μs)

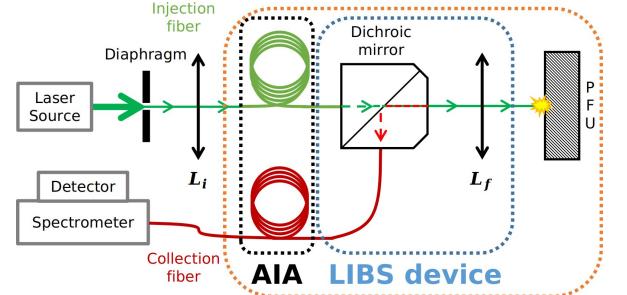


Tir N°1 :
Ti I, Ti II, T I, H I et
Pd I, Si I (non présent ici)
Tir N°5 :
H I (gaz ambiant) et Si I



Simulation MERLIN émission tir N°1 :
Mesure de x_T

→ Diffusion T dans Pd, Ti
mais aussi dans Si



Campagne LIBS4WEST (IRFM - CEA Cadarache)

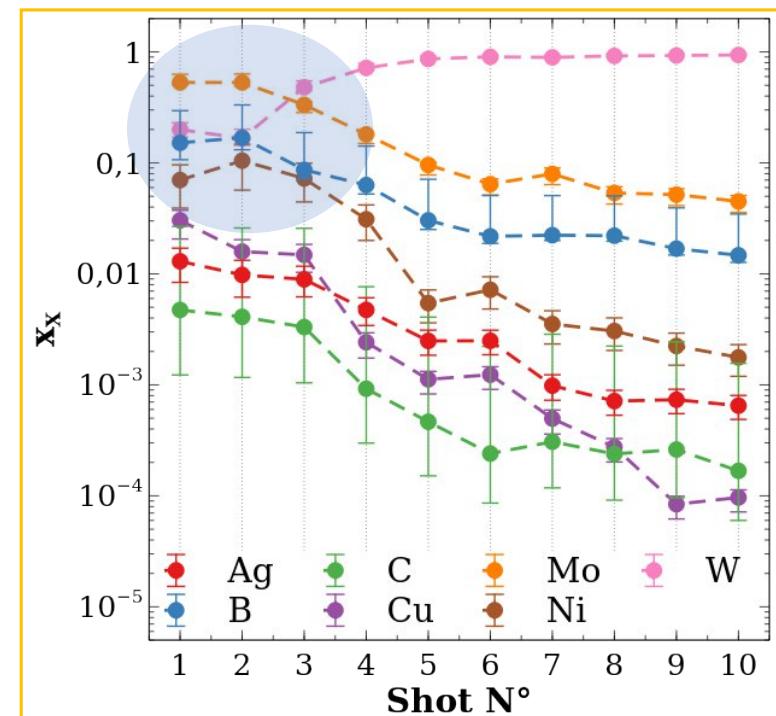
A. Favre *et al.*, Phys. Scr., 99 (2024) 035609

Démonstration de faisabilité :
LIBS fibrée via le bras robotisé AIA du tokamak WEST

$$\begin{aligned}\lambda_{las} &= 1064 \text{ nm}, \tau_{las} = 4 \text{ ns} \\ \varphi_{las} &\approx 10^{14} \text{ W m}^{-2} \\ \text{Cible MB4 dans l'air à } p_{atm} \\ t &= 0,2 \mu\text{s (intégré sur 10 } \mu\text{s)}\end{aligned}$$

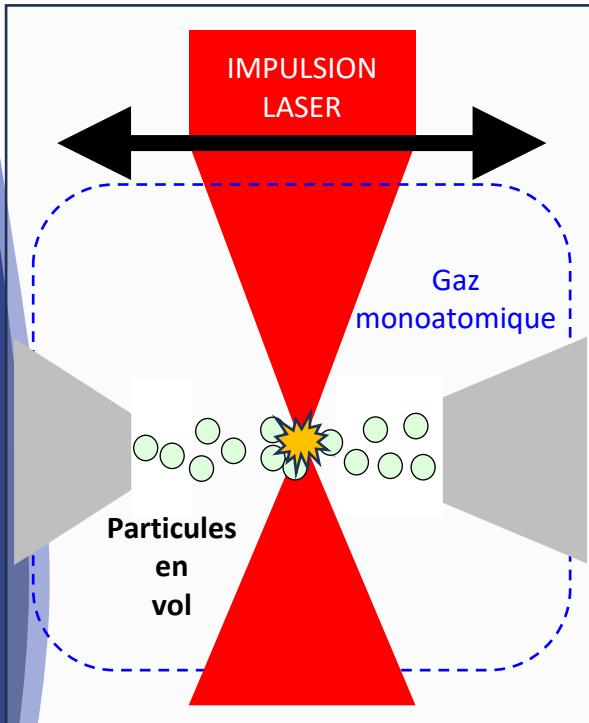
Profilométrie LIBS semi-quantitative :

- ✓ Co-déposition (Mo, W, B, Ni, Cu, Ag et C)
- ✓ W majoritaire à partir du tir N°3
- ✗ Effets d'intégration
- ✗ Taux d'ablation difficilement mesurable
→ Épaisseur couche co-déposée
(1-10 μm : 100-1000 nm tir $^{-1}$)

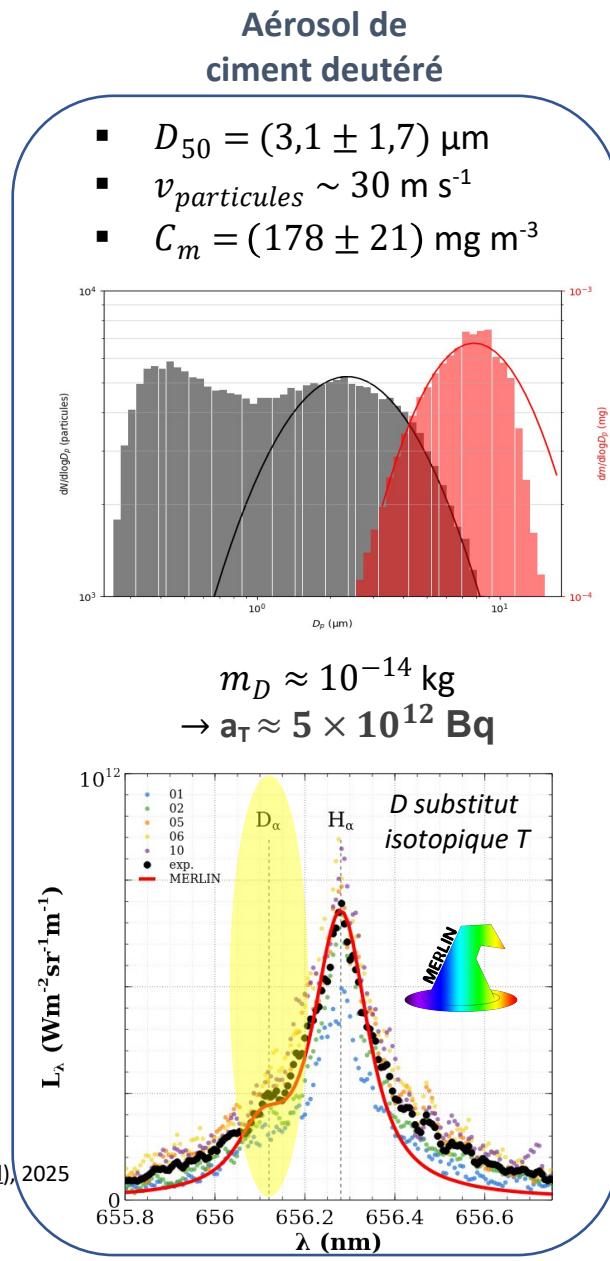


LIBS sur aérosols contrôlés :

Granulométrie
Écoulement
Concentration



A. Favre, F. Gensdarmes, S. Peillon, A. Bultel, V. Morel
Rapport d'expertise interne ASNR N°2025-00104 (confidentiel), 2025



Développement d'un savoir-faire unique basé sur un partage de compétences...



Ma thèse

Physico-chimie des milieux plasmas

Aspects fondamentaux
PIL

Savoir faire LIBS

Physique des tokamaks

Perméation
d'éléments légers

Savoir-faire tritium

Physique des aérosols

Génération et mise en suspension de particules

Sûreté nucléaire

Analyse de plasmas induits par laser sur des particules micrométriques en suspension : application au nucléaire de fission et de fusion

Merci de votre attention !