

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

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**



THÈSE

**Plasmas induits par laser
(métaux & hydrogène)**
(interaction plasma paroi - fusion)

Numérique / expérimental
CORIA - CEA Saclay & Cadarache



POST-DOC

**LIBS sur
aérosols radioactifs**
(sûreté - démantèlement)

Numérique / expérimental
ASNR - CEA Saclay & URN



POST-DOC

**Détritiation de particules
micrométriques**
(combustible nucléaire)

Expérimental
URN & CEA Saclay

RECHERCHE

oct. 2019



déc. 2022



mars 2025



UFR Sciences
et Techniques



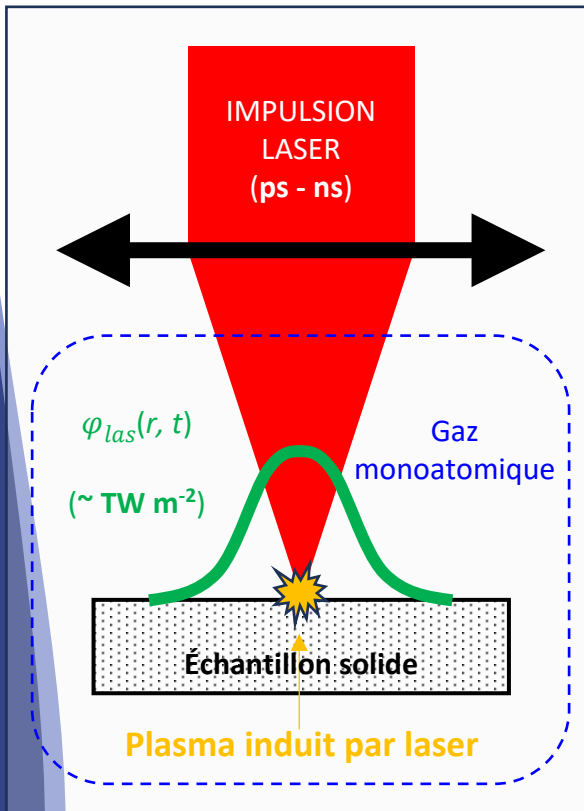
INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
ROUEN NORMANDIE



**Missions enseignement
ATER
Vacations**

~ 500 heures

ENSEIGNEMENT



Expansion **hypersonique**

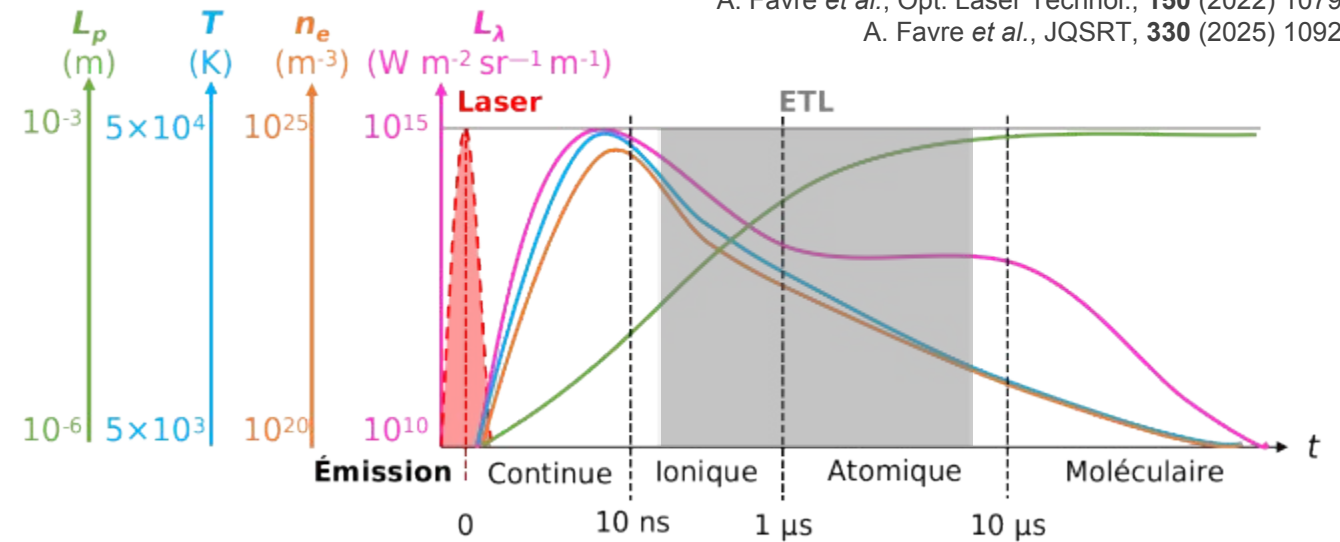
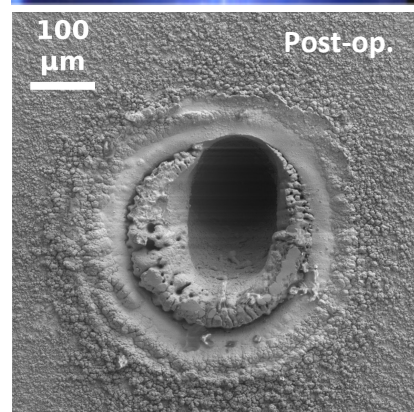
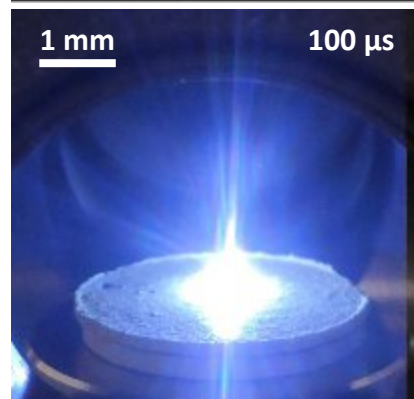
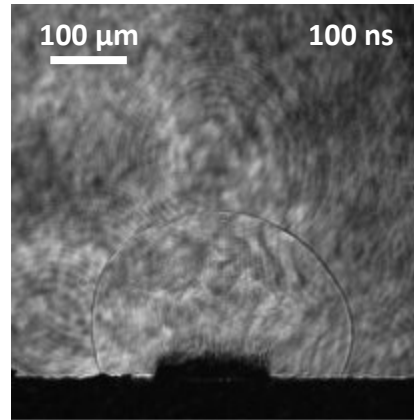
Fortement **instationnaire**

Objet **millimétrique**

Présence de **gradients**

Interaction **laser-matière**

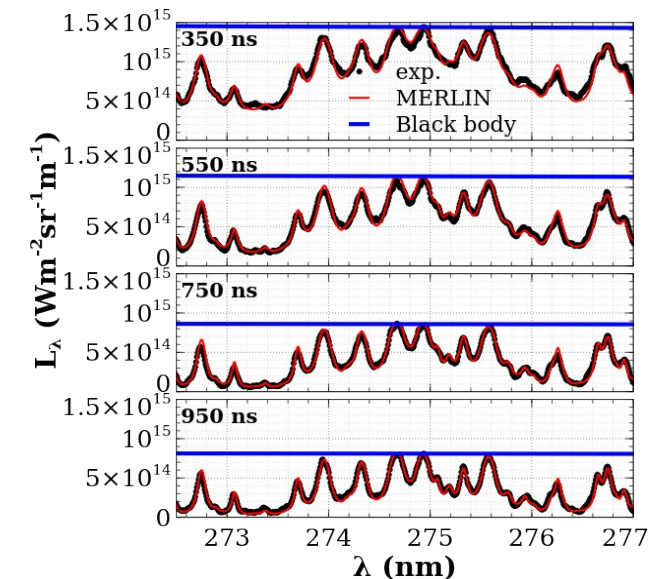
micro-destructive



ETL
Équilibre
Thermodynamique
Local



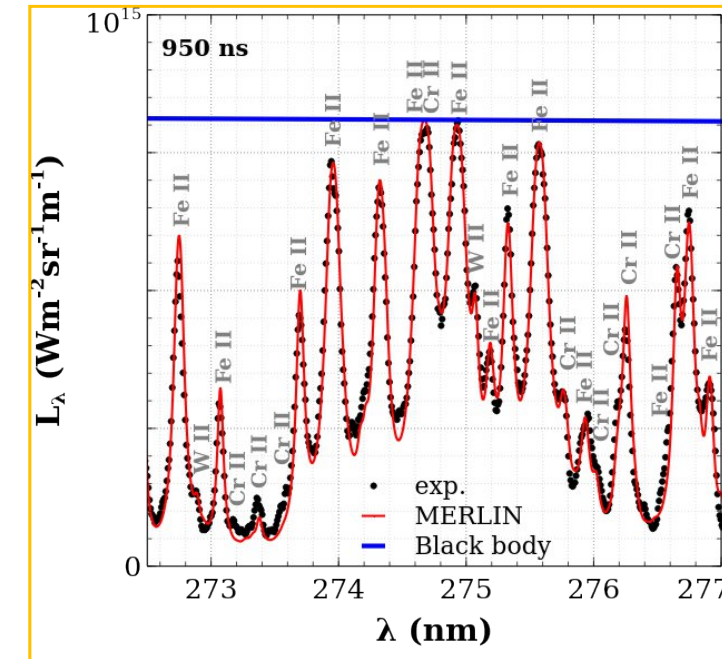
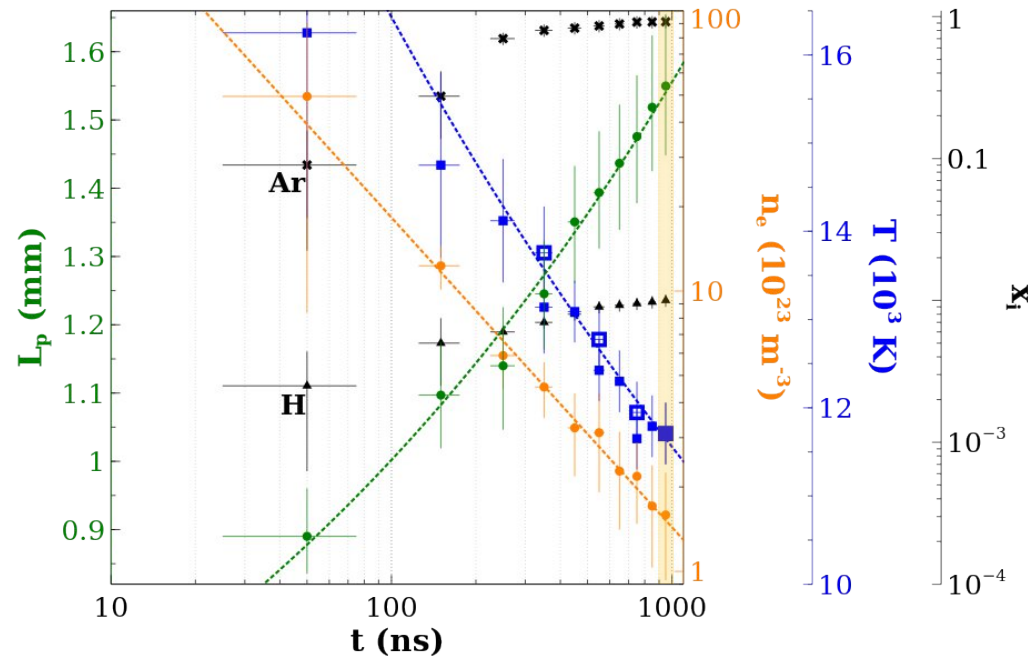
CF-LIBS
Calibration Free
Laser-Induced Breakdown
Spectroscopy



MERLIN (MultiElemental Radiative equilibrium emissionN)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 $0,5p_{atm}$ 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

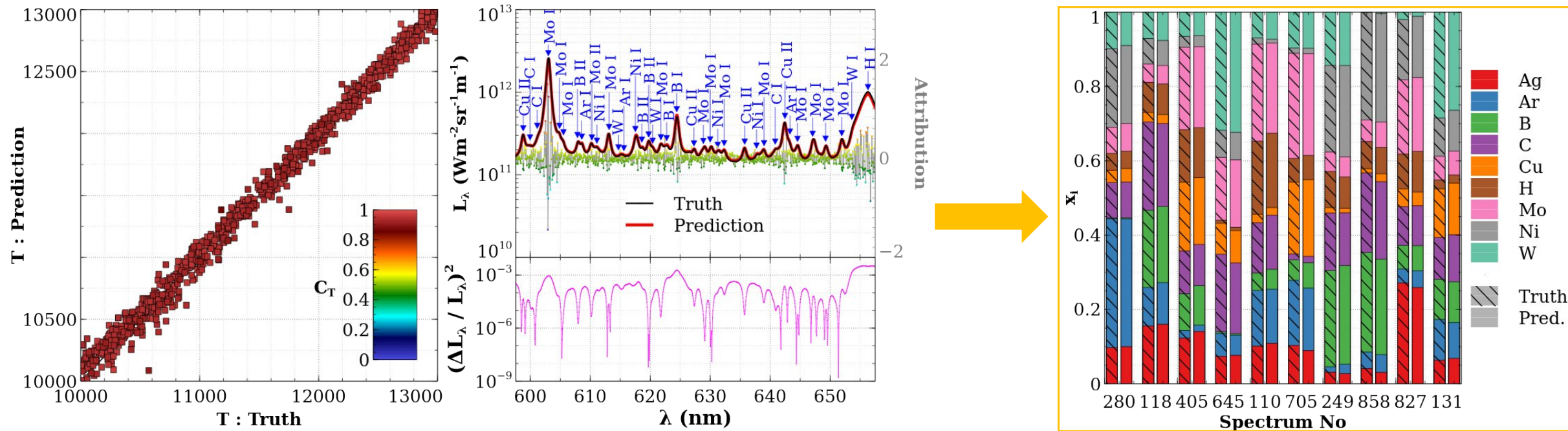
Validation :

- 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)



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 :

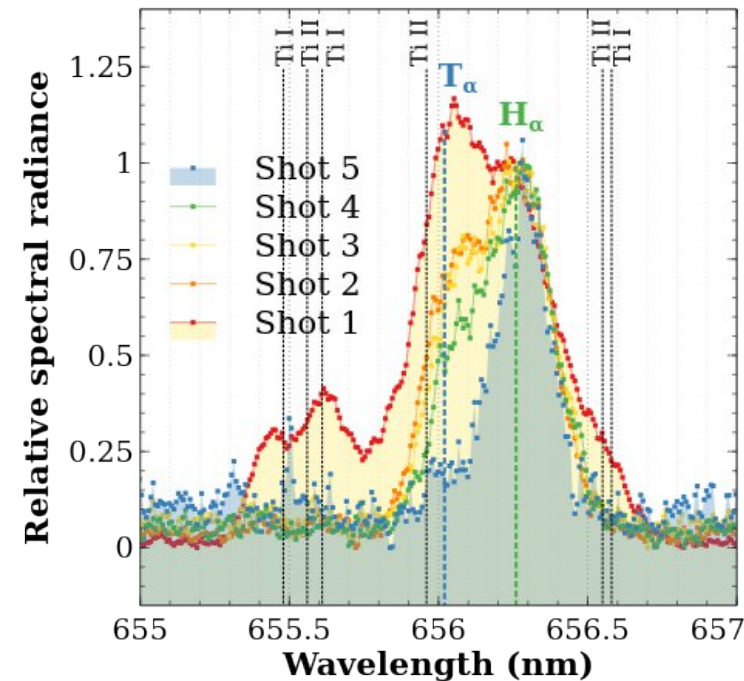
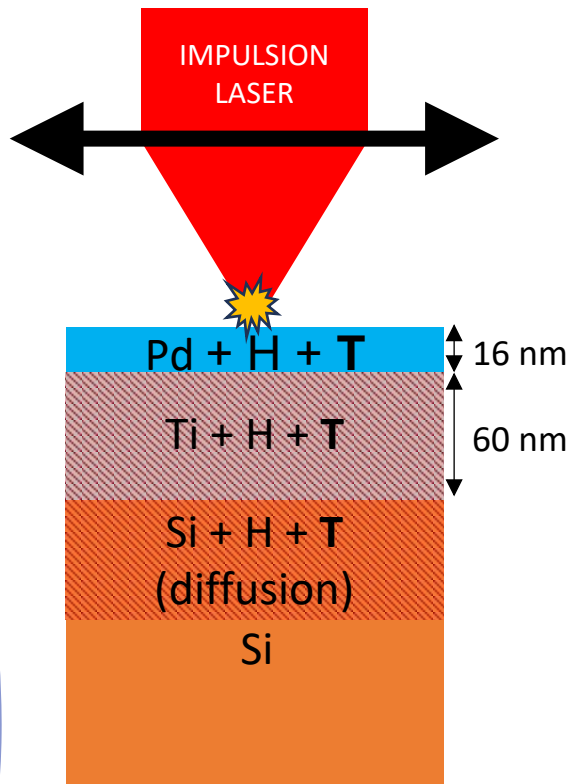
- (n_e, T) à $\pm 5\%$ sans couplage
- Sensibilité spectrale (*ex.* : H)
- x_i à $\pm 10\%$ selon $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$
- Exécution $< 0,1$ s (10 Hz)

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

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

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



Tir N°1 :

Ti I, Ti II, T I, H I et

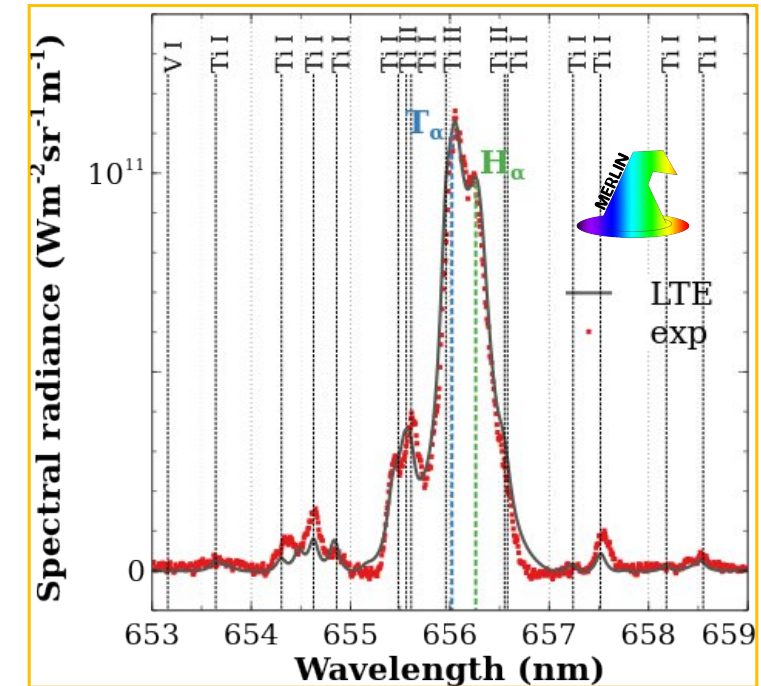
Pd I, Si I (non présenté ici)

Tir N°5 :

H I (gaz ambiant) et Si I

coRia
UMR 6614

cea

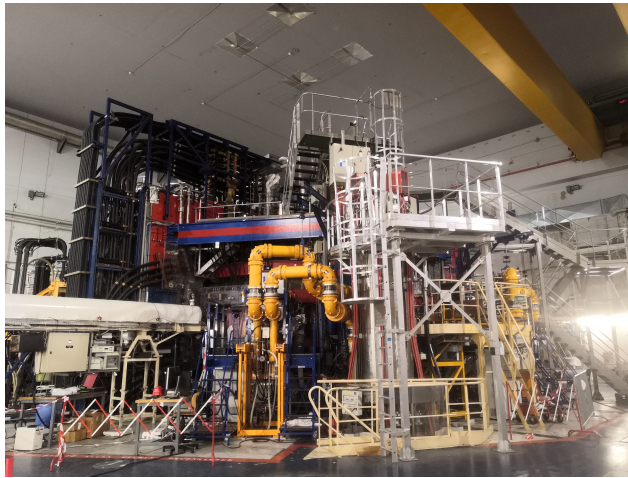
Simulation **MERLIN** émission tir N°1 :Mesure de x_T → Diffusion T dans Pd, Ti
mais aussi dans Si

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



Implantation en T et stabilisation
(CEA Saclay)





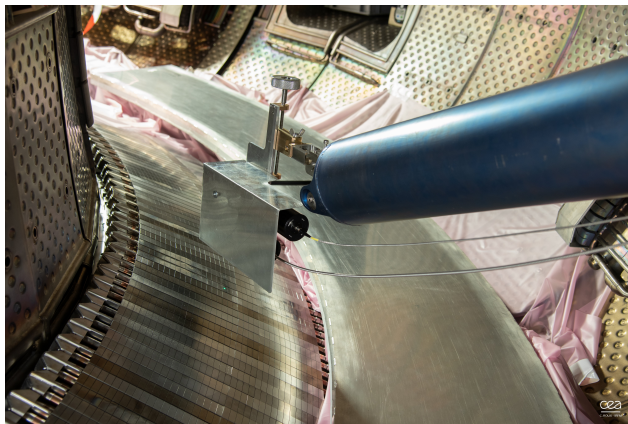
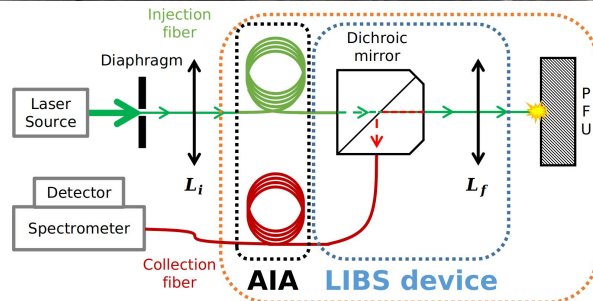
Campagne **LIBS4WEST** (IRFM - CEA Cadarache)
 A. Favre *et al.*, Phys. Scr., **99** (2024) 035609

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

$$\lambda_{las} = 1064 \text{ nm}, \tau_{las} = 4 \text{ ns}$$

$$\varphi_{las} \approx 10^{14} \text{ W m}^{-2}$$

Cible MB4 dans l'air à p_{atm}
 $t = 0,2 \mu\text{s}$ (intégré sur $10 \mu\text{s}$)



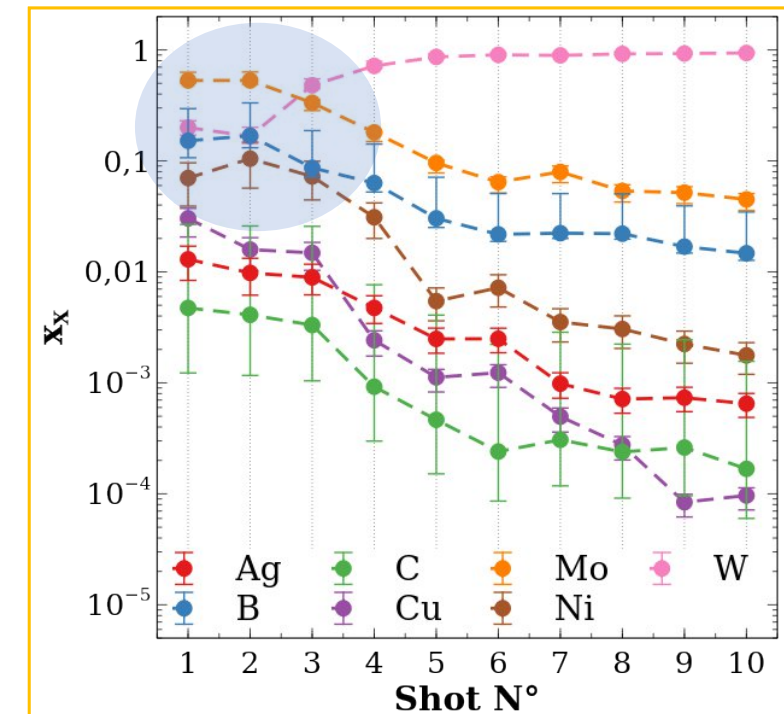
Profilométrie LIBS semi-quantitative :

✓ **Co-déposition** (Mo, W, B, Ni, Cu, Ag et C)

✓ **W majoritaire** à partir du tir N°3

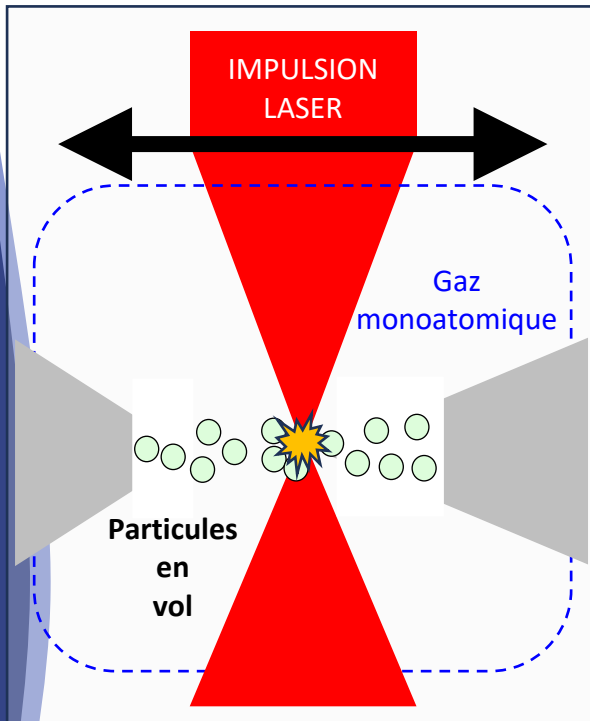
✗ **Effets d'intégration**

✗ **Taux d'ablation** difficilement mesurable
 → Épaisseur couche co-déposée
 (1-10 μm : 100-1000 nm tir⁻¹)



LIBS sur aérosols contrôlés :

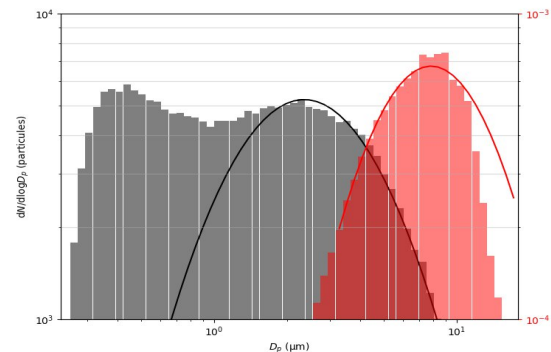
Granulométrie
Écoulement
Concentration



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

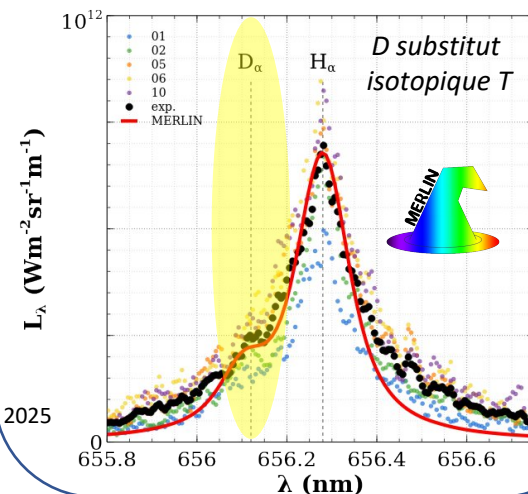
Aérosol de ciment deutéré

- $D_{50} = (3,1 \pm 1,7) \mu\text{m}$
- $v_{\text{particules}} \sim 30 \text{ m s}^{-1}$
- $C_m = (178 \pm 21) \text{ mg m}^{-3}$



$$m_D \approx 10^{-14} \text{ kg}$$

$$\rightarrow a_T \approx 5 \times 10^{12} \text{ Bq}$$



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

Mon post-doc

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 !