

Projet ASTRAW – Arc stabilisé dans l'argon pour la mesure des probabilités de transition de W I et W II

Arnaud BULTEL, Aurélien FAVRE UMR CNRS 6614 CORIA

Djamel BENREDJEM UMR CNRS 9188 LAC

W.-Ü Lydia TCHANG-BRILLET UMR CNRS 8112 LERMA

Jean-François WYART UMR CNRS 9188 LAC

Philippe TEULET UMR CNRS 5213 LAPLACE

Ioan SCHNEIDER UMR CNRS 6294 LOMC

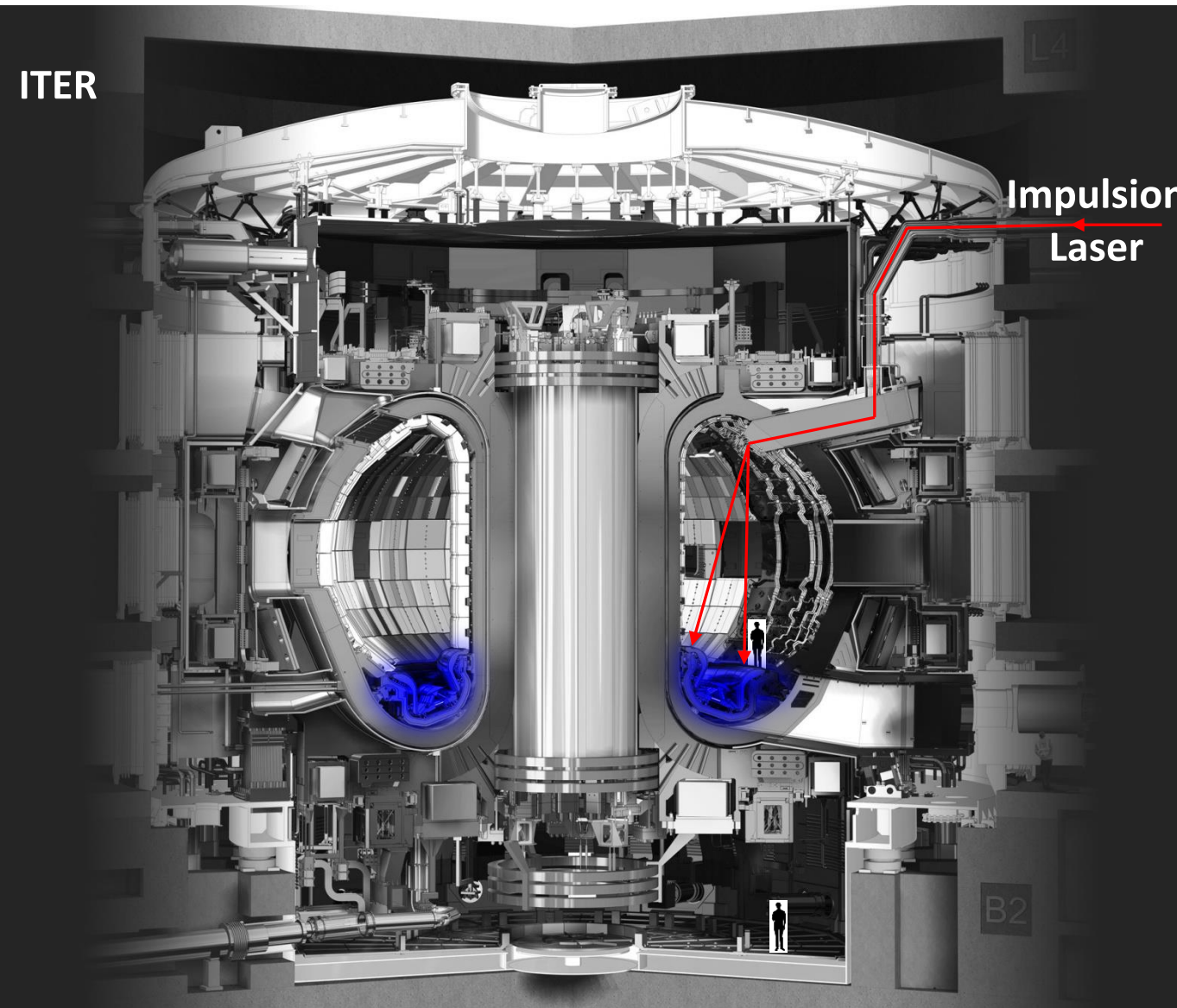


Sommaire

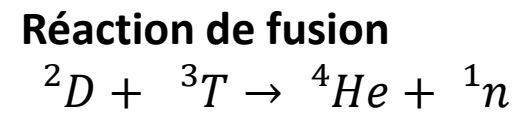
1. Contexte – Problématique
2. Expérience ASTRAW
3. Etat d'avancement
4. Perspectives

Sommaire

1. Contexte – Problématique
2. Expérience ASTRAW
3. Etat d'avancement
4. Perspectives



ITER



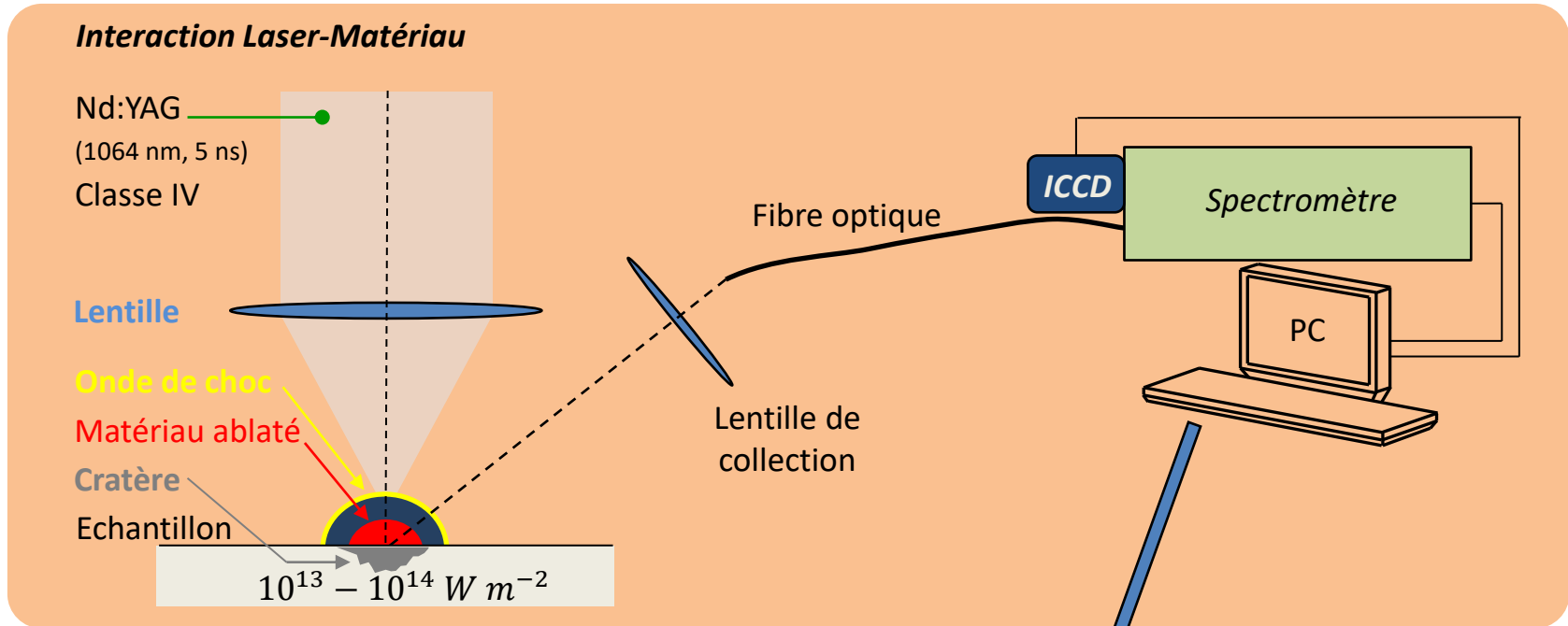
3T radioactif

3T surveillé

Implantation de 3T ainsi que 2D et ${}^{14}N, {}^{16}O$... (impuretés) dans le divertor en **W**

Mesure *in situ* par plasma induit par laser
LIBS

Analyse de composition par Laser-Induced Breakdown Spectroscopy – LIBS



Fusion
 Evaporation – explosion de phase
 Ionisation (MPI & IB)
 Plasma (100 bar, 10000 K)
 Onde de choc

Analyse spectroscopique

- $0 < t < 100 \text{ ns}$ intense fond continu
 - $t < 500 \text{ ns}$ fort déséquilibre
 - $t > 500 \text{ ns}$ déséquilibre modéré (ray. atom. et moléc.)
- ⇒ Exploitation diagrammes de **Saha-Boltzmann**

CORIA LIBS platform

Czerny-Turner Spectrometer
Focal length $f = 0.32$ m
Aperture $f / 4.6$
Spectral resolution ≈ 0.08 nm at 700 nm

Pi-MAX 4 ICCD Camera
110 nm – 400 nm or 400 nm – 800 nm
Minimum gate 1 ns

Pi-MAX 2 ICCD Camera
400 nm – 800 nm
Minimum gate 1 ns

Ebert-Fastie Spectrometer
Focal length $f = 2$ m
Aperture $f / 15$
Spectral resolution ≈ 0.05 nm at 700 nm

Pumping system
Primary + turbomolecular pumps
Pumping speed 5 m³ h⁻¹

For 10 mJ at 532 nm :

- $f = 50$ cm Fluence $F \approx 10$ J cm⁻² (center)
Irradiance $\phi \approx 10^{12}$ W cm⁻² (center)
Waist diameter ≈ 250 μ m
- $f = 5$ cm Fluence $F \approx 1000$ J cm⁻² (center)
Irradiance $\phi \approx 10^{14}$ W cm⁻² (center)
Waist diameter ≈ 25 μ m

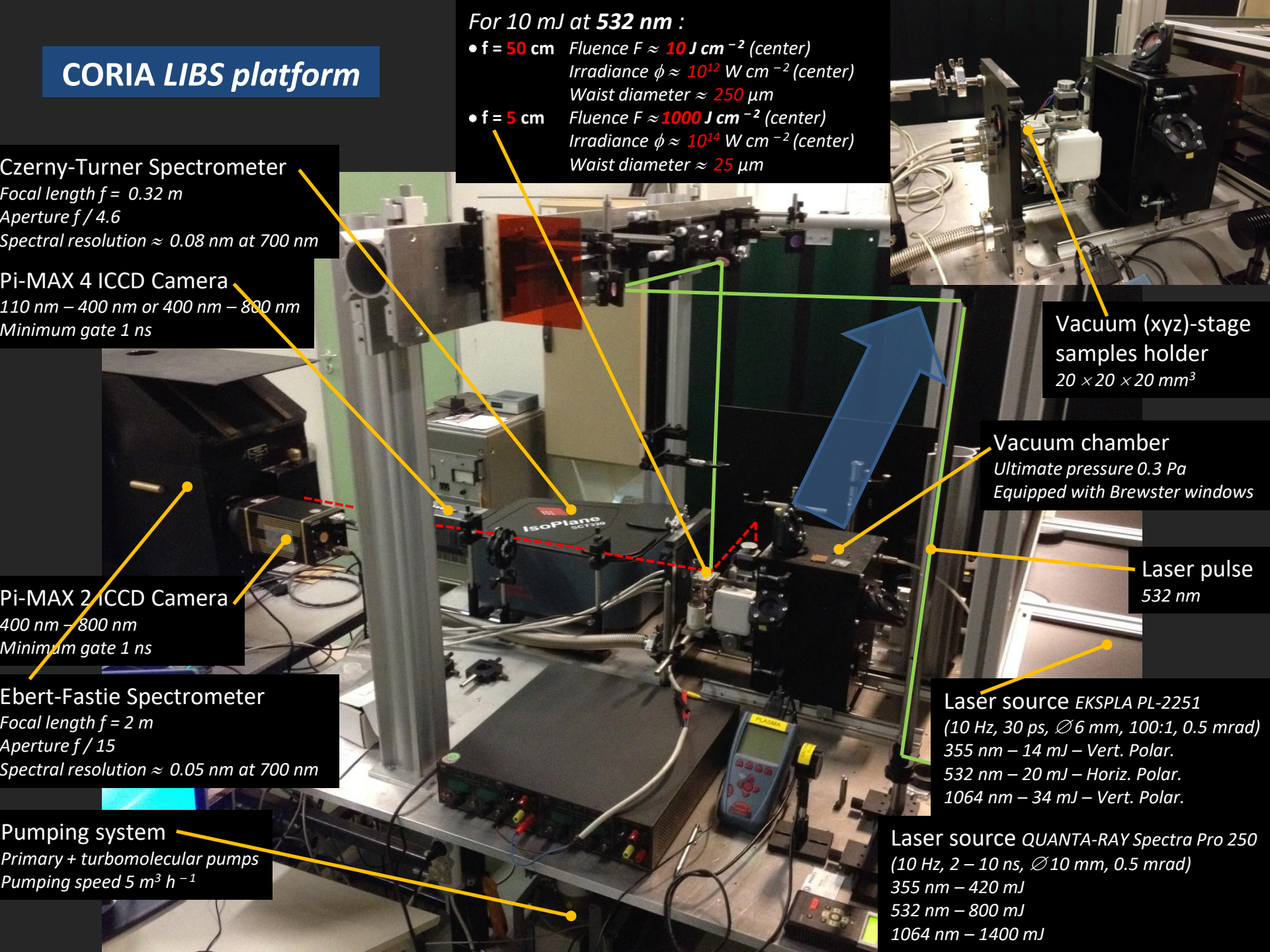
Vacuum (xyz)-stage samples holder
 $20 \times 20 \times 20$ mm³

Vacuum chamber
Ultimate pressure 0.3 Pa
Equipped with Brewster windows

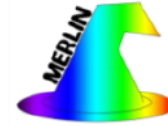
Laser pulse
532 nm

Laser source EKSPLA PL-2251
(10 Hz, 30 ps, $\varnothing 6$ mm, 100:1, 0.5 mrad)
355 nm – 14 mJ – Vert. Polar.
532 nm – 20 mJ – Horiz. Polar.
1064 nm – 34 mJ – Vert. Polar.

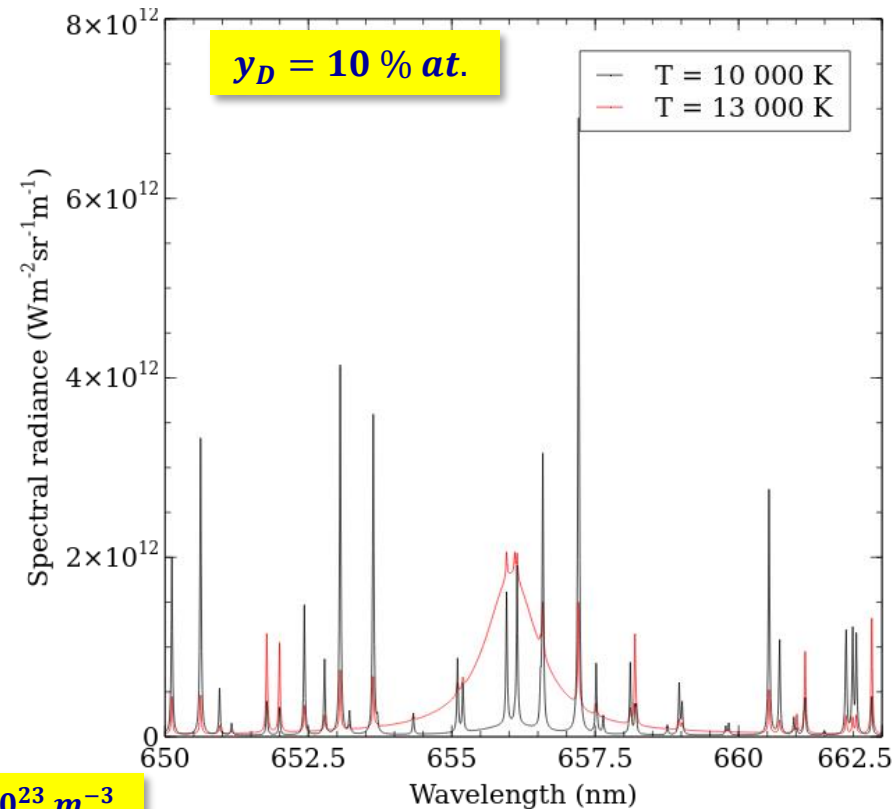
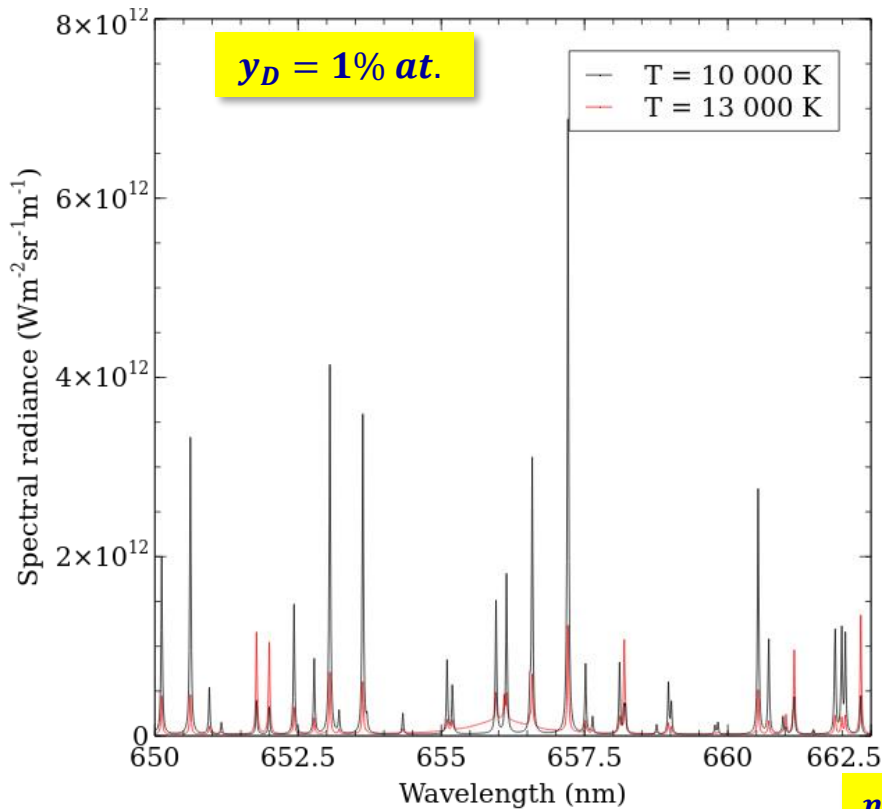
Laser source QUANTA-RAY Spectra Pro 250
(10 Hz, 2 – 10 ns, $\varnothing 10$ mm, 0.5 mrad)
355 nm – 420 mJ
532 nm – 800 mJ
1064 nm – 1400 mJ



Difficulté mesure de **D** dans **W** ($\approx 10^5$ Pa, $n_e = 10^{23} \text{ m}^{-3}$)



MultiElemental Radiative equilibrium emission



$n_e = 10^{23} \text{ m}^{-3}$

A. Favre, M. Lesage, V. Morel, A. Bultel, P. Boubert
[International Workshop on LIBS, Dec. 1-2, 2020, Szeged, Hungary](#)

Sommaire

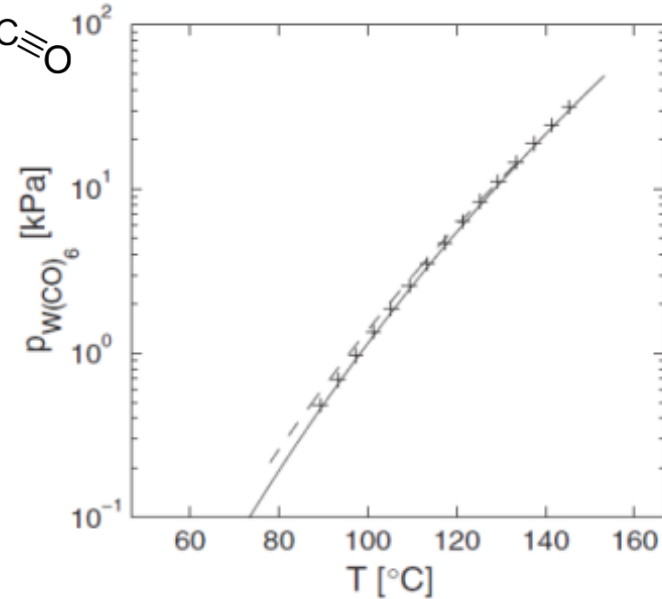
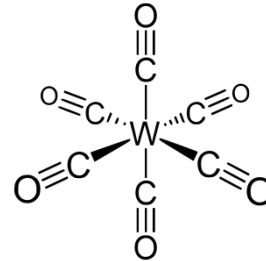
1. Contexte – Problématique
2. **Expérience ASTRAW**
3. Etat d'avancement
4. Perspectives

Arc STabilisé pour la mesure du RAYonnement de W - ASTRAW

W(CO)₆



Allure des cristaux de W(CO)₆



Pression de vapeur saturante en fonction de la température
 M. Kocan *et al.* Rev. Sci. Instrum. **84** (2013) 073501

Emission plasma à l'équilibre (opt. mince)

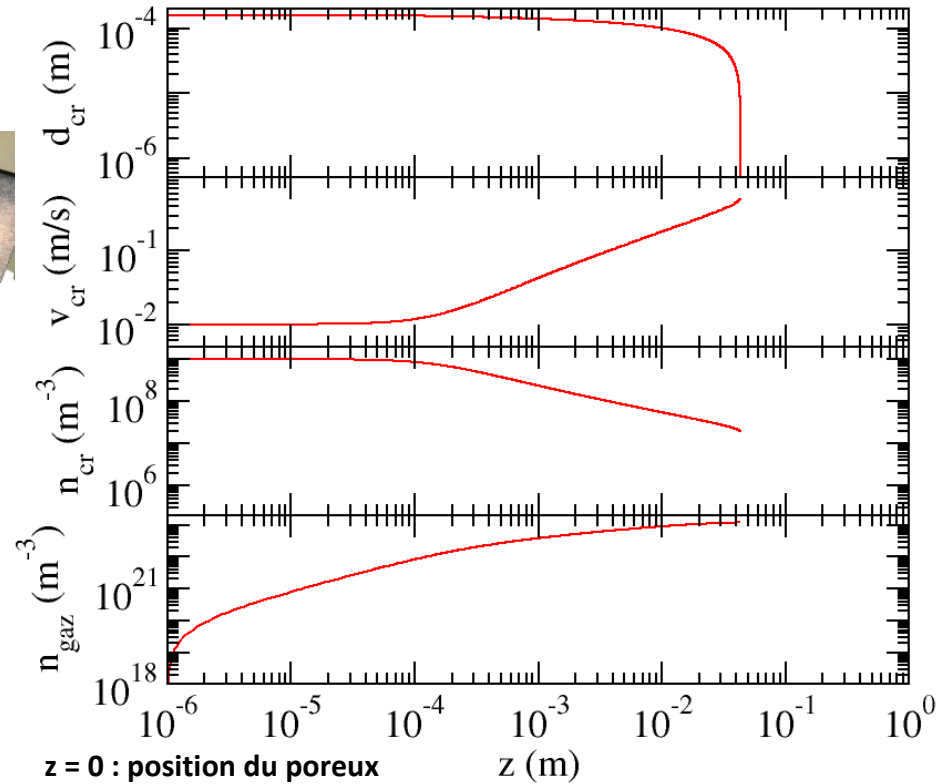
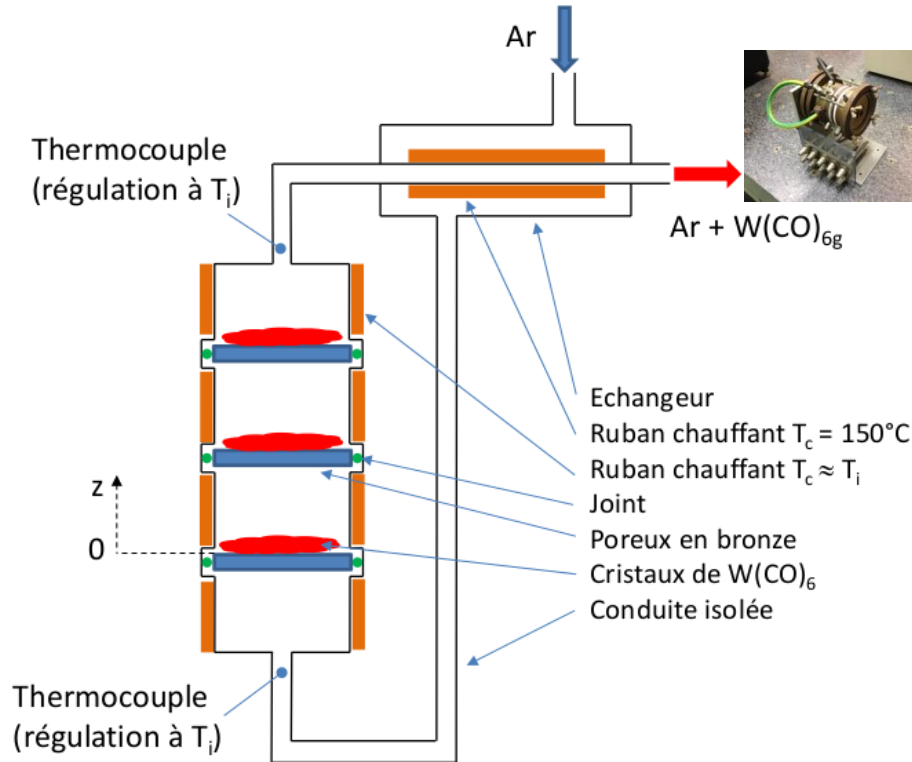
$$\varepsilon_{ki}(p, T, x) = \frac{hc}{4\pi \lambda_{ki}} A_{ki} [W_k(p, T, x)]$$



$$A_{ki} = \frac{4\pi \lambda_{ki}}{hc} \frac{\varepsilon_{ki}(p, T, x)}{[W_k(p, T, x)]}$$

Arc STabilisé pour la mesure du RAYonnement de W - ASTRAW

Injection...

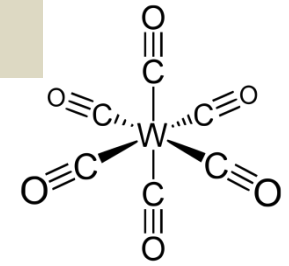
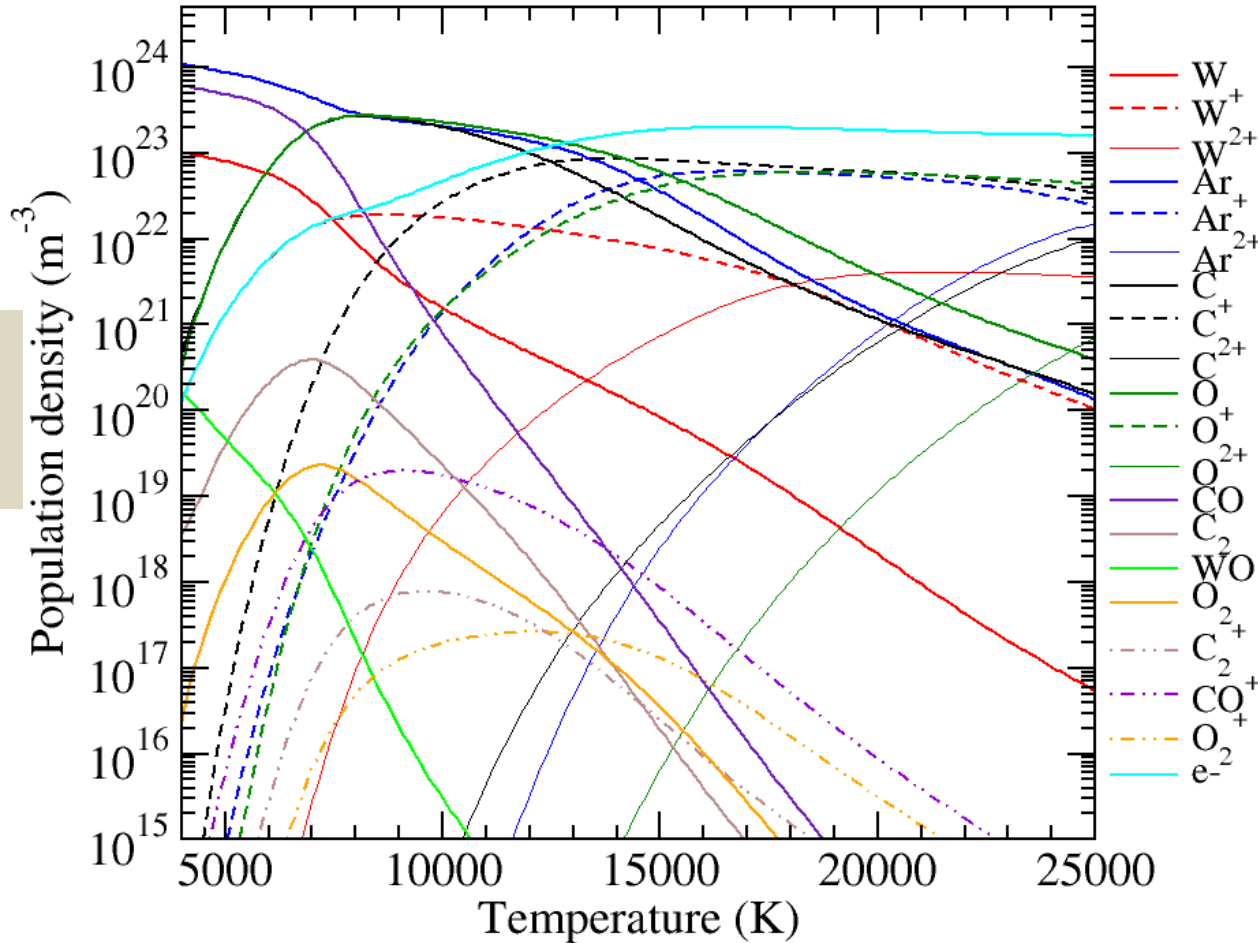


| | |
|-------------------------|---|
| Débit Argon | $q_{v,Ar} = 10 \text{ slm min}^{-1}$ |
| Pression | $p = p_{atm}$ |
| Diamètre chambre | $d = 2 \text{ cm}$ |
| Température | $T_i = 140^\circ\text{C}$ |
| Consommation | $q_{m,W(CO)_6} = 10 \text{ g min}^{-1}$ |

Arc STabilisé pour la mesure du RAYonnement de W - ASTRAW

3 étapes

1. Calculs de composition à l'équilibre...

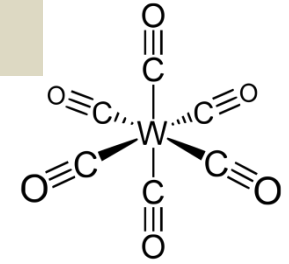


Ar + W(CO)₆

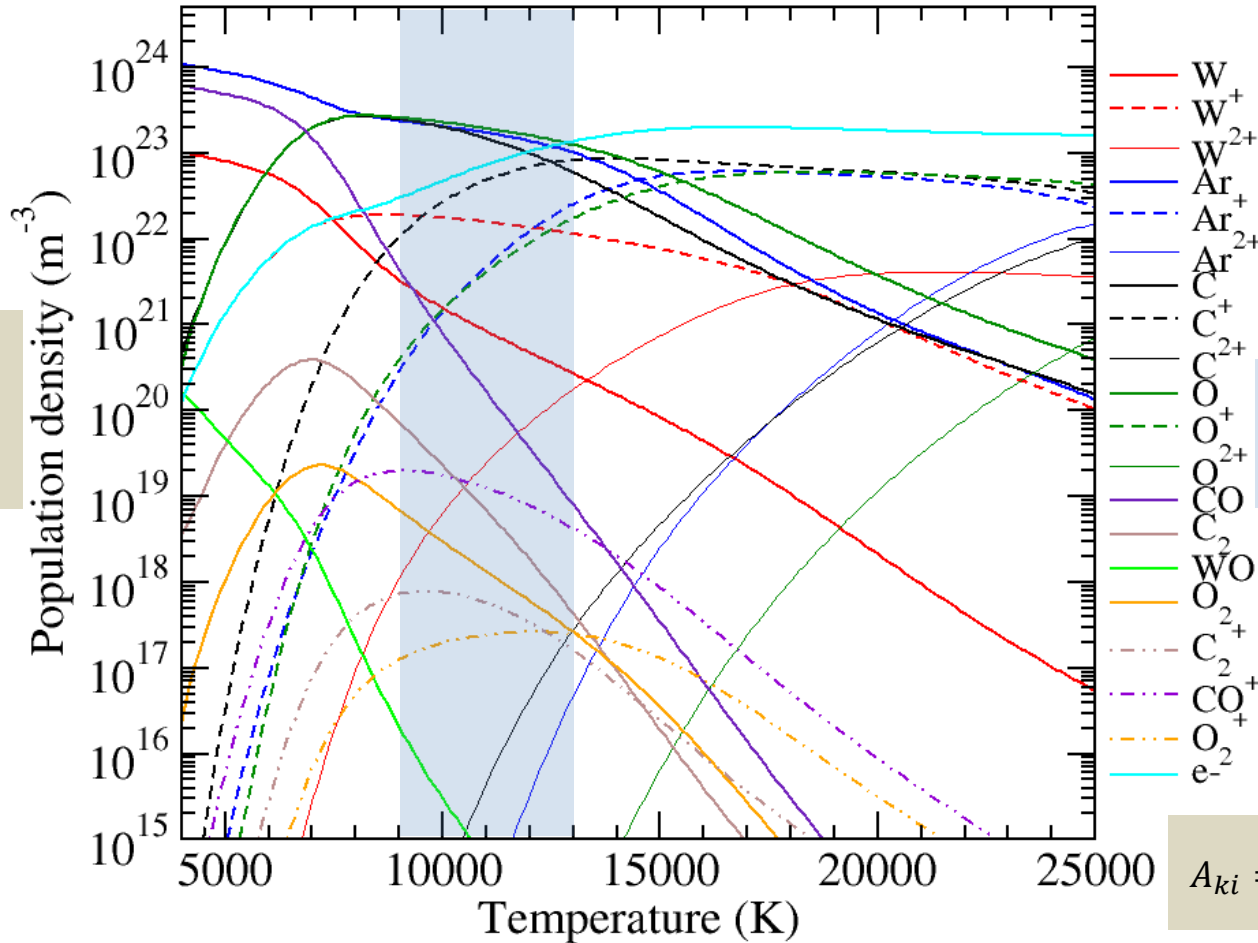
Arc STabilisé pour la mesure du RAYonnement de W - ASTRAW

3 étapes

1. Calculs de composition à l'équilibre...



Ar + W(CO)₆



$p = p_{atm}$
 $T_i = 140^\circ C$
 $p_{W(CO)_6} = 40 \text{ kPa}$
 $p_{Ar} = 61 \text{ kPa}$

Domaine T_{arc}
 W et W⁺ observables
 [W_k] et [W_k⁺] connues

$$A_{ki} = \frac{4\pi \lambda_{ki}}{hc} \frac{\varepsilon_{ki}(p, T, x)}{[W_k(p, T, x)]}$$

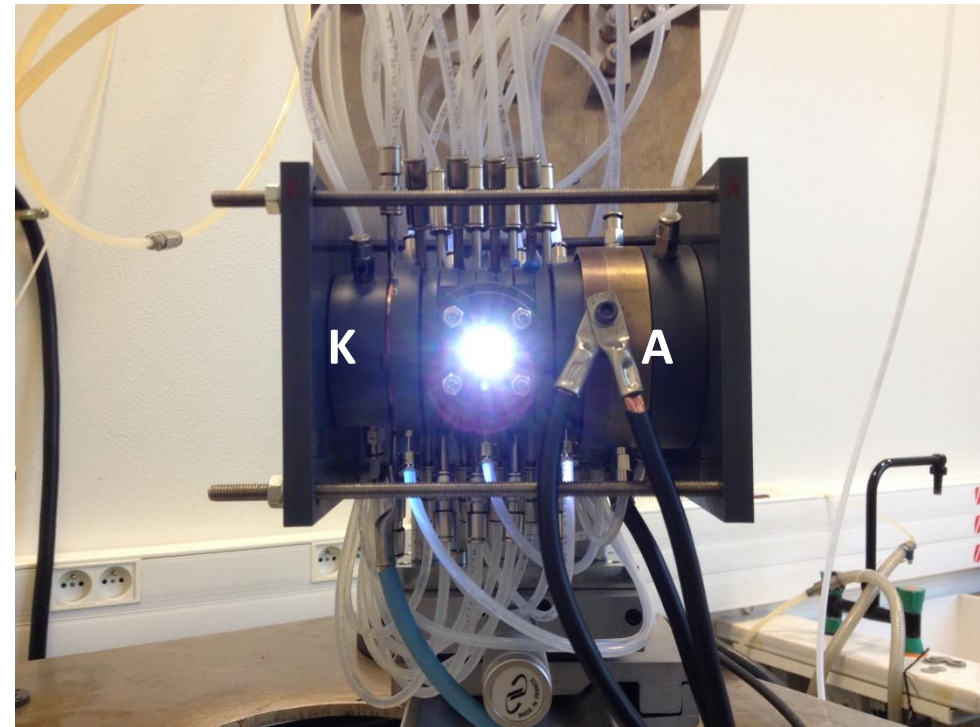
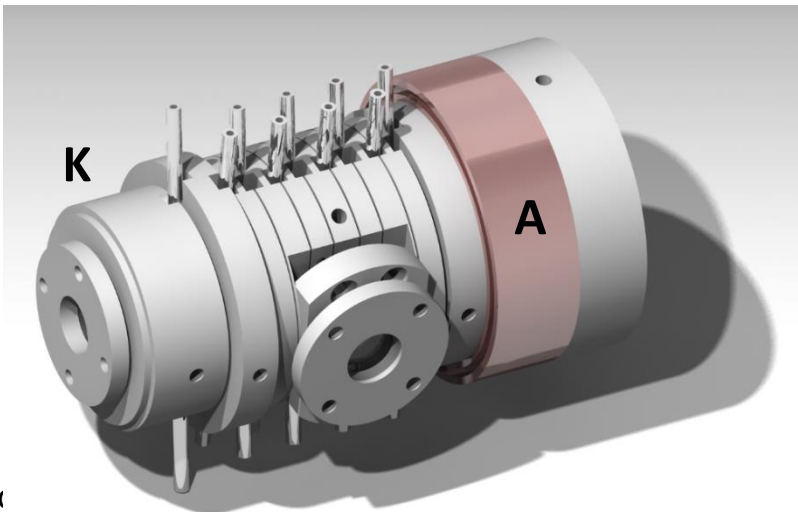
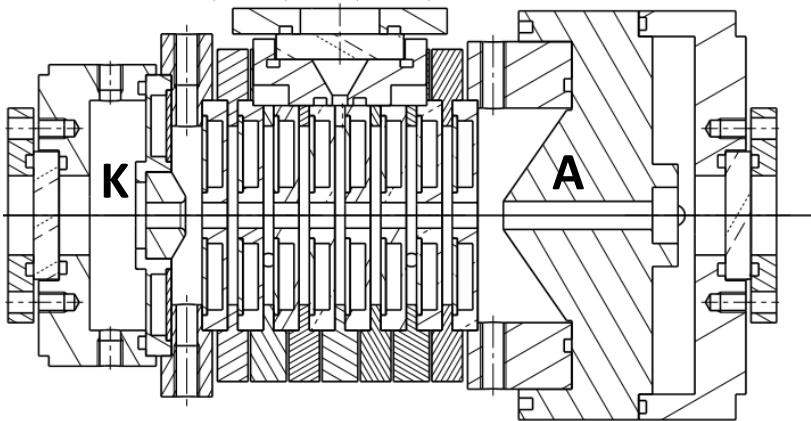
Sommaire

1. Contexte – Problématique
2. Expérience ASTRAW
- 3. Etat d'avancement**
4. Perspectives

Arc STabilisé pour la mesure du RAYonnement de W - ASTRAW

3 étapes

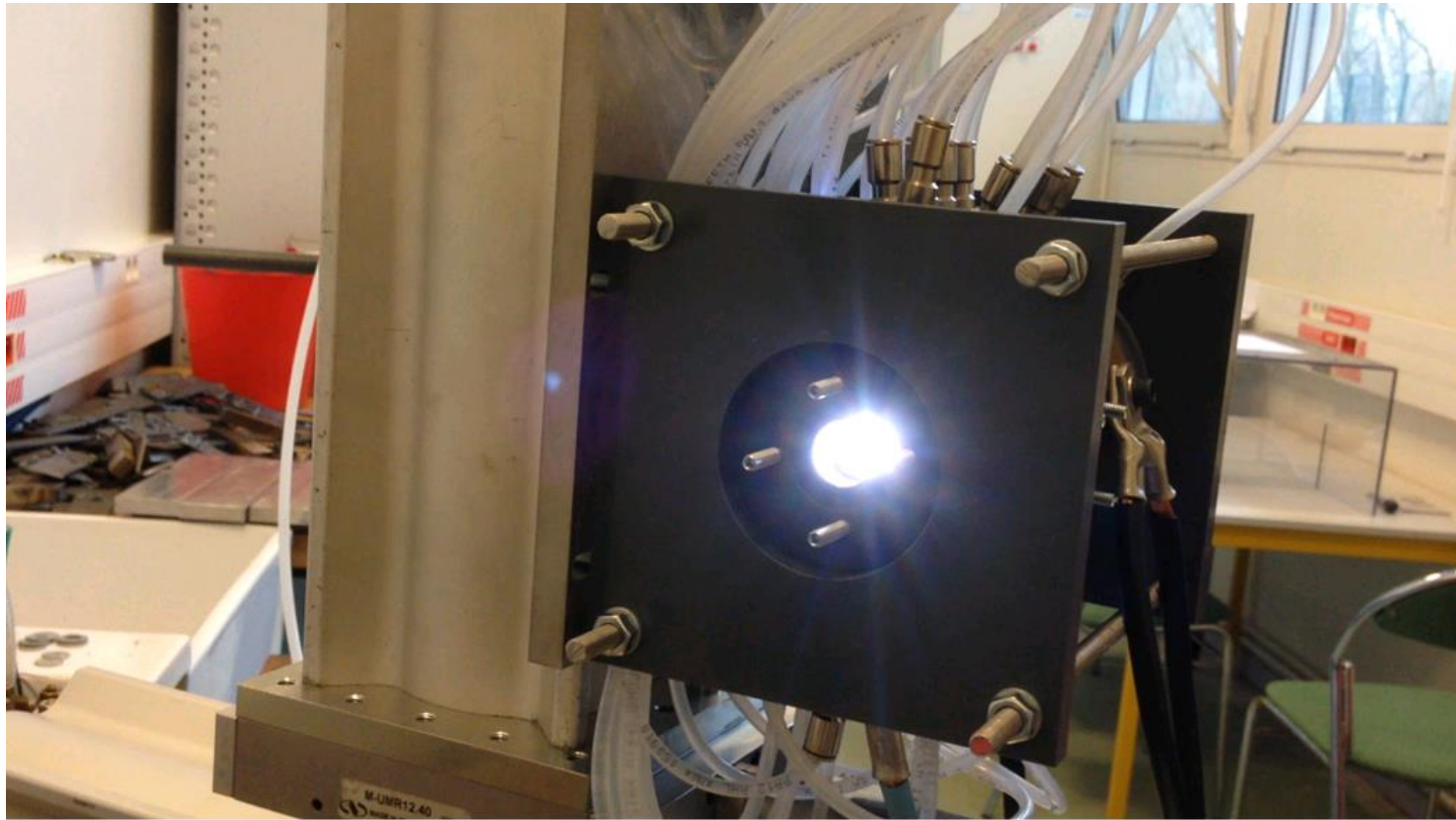
1. Calculs de composition à l'équilibre
2. Analyse de l'équilibre thermodynamique de l'arc stabilisé **sans** $W(CO)_6$ injecté...



Arc **ST**abilisé pour la mesure du **RA**yonnement de **W** - **ASTRAW**

3 étapes

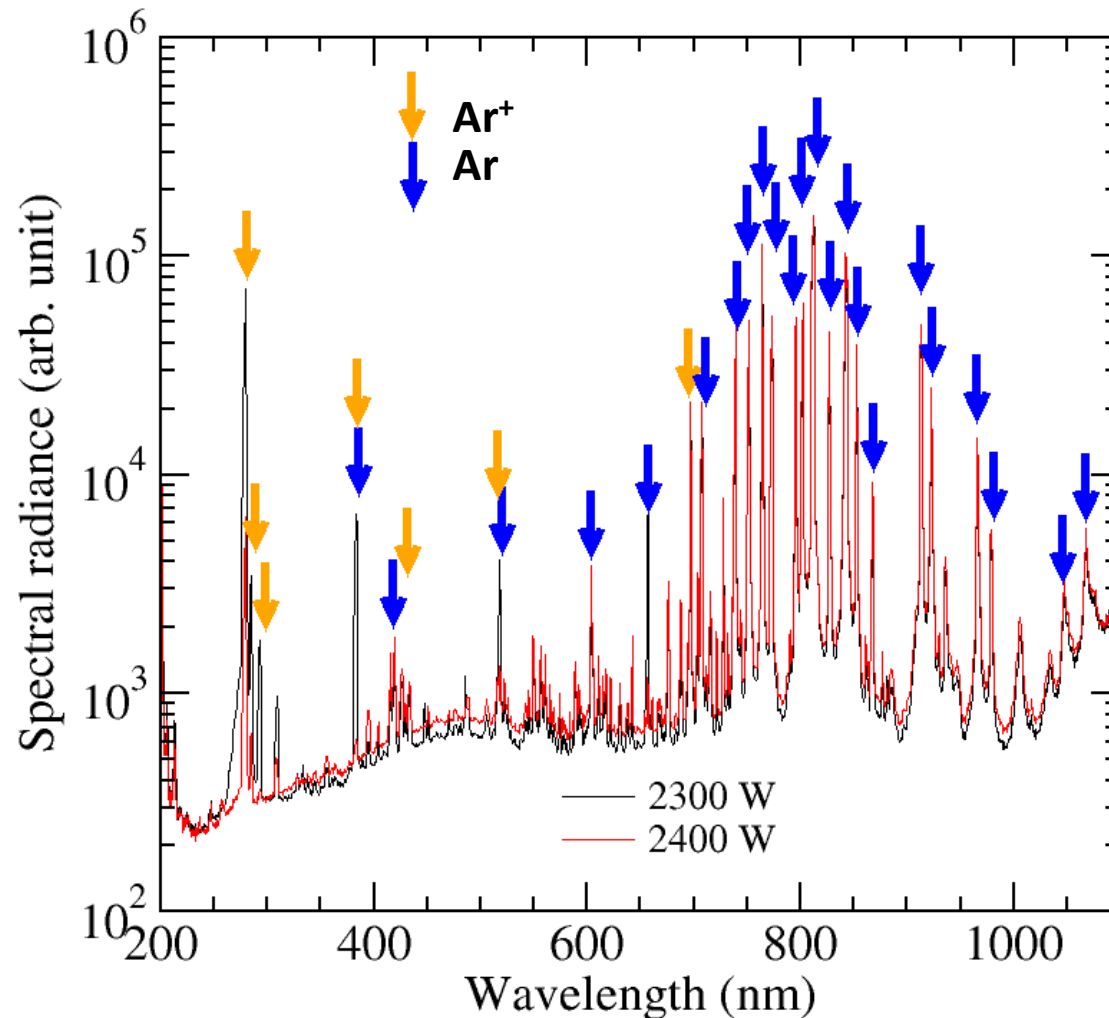
1. Calculs de composition à l'équilibre
2. Analyse de l'équilibre thermodynamique de l'arc stabilisé **sans** $W(CO)_6$ injecté...



Arc STabilisé pour la mesure du RAYonnement de W - ASTRAW

3 étapes

1. Calculs de composition à l'équilibre
2. Analyse de l'équilibre thermodynamique de l'arc stabilisé **sans** $W(CO)_6$ injecté...

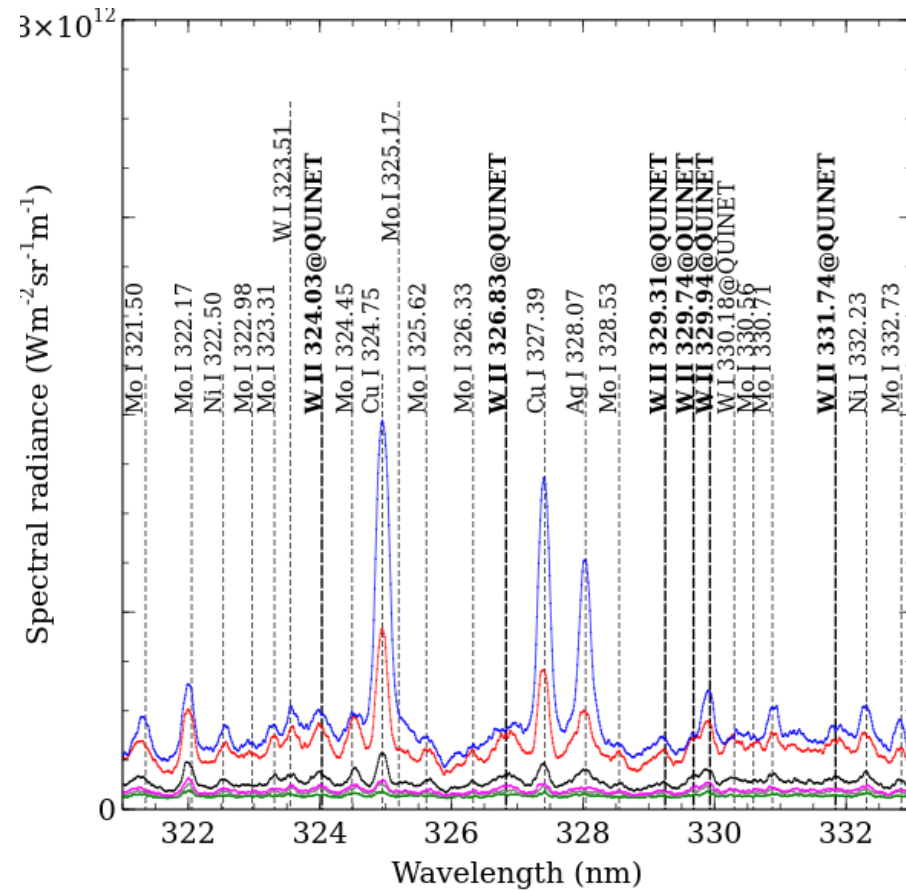
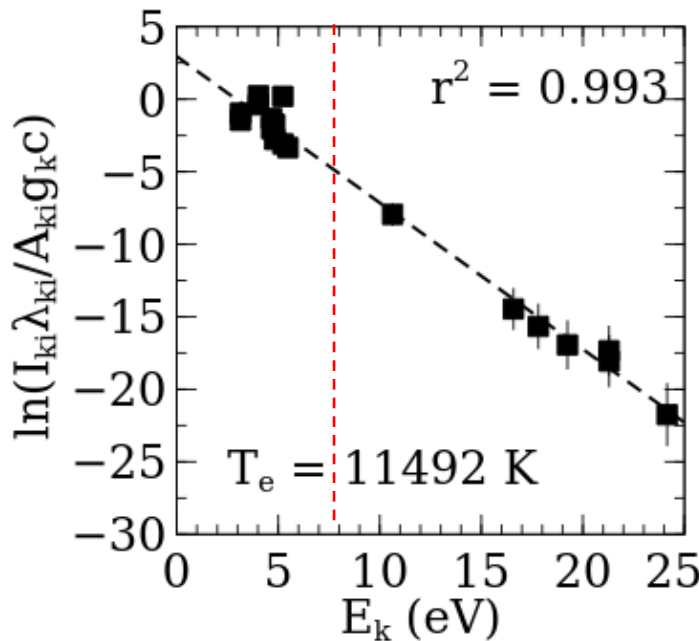


Arc STabilisé pour la mesure du RAYonnement de W - ASTRAW

3 étapes

1. Calculs de composition à l'équilibre
2. Analyse de l'équilibre thermodynamique de l'arc stabilisé sans $W(CO)_6$ injecté
3. Analyse spectroscopique de l'émission de W **avec** $W(CO)_6$ injecté...

- Instabilités plus prononcées
- Compensation en puissance
- Dépôt W sur les parties froides
- Raies de W et W^+ observables
- Equilibre thermodynamique W/Ar



Arc STabilisé pour la mesure du RAYonnement de W - ASTRAW

BILAN - PERSPECTIVES

1. Calculs de composition à l'équilibre opérationnels
2. Arc stabilisé opérationnel
3. Système d'injection opérationnel
4. Analyse de l'équilibre thermodynamique de l'arc stabilisé **sans** $W(CO)_6$ terminée
5. Analyse spectroscopique de l'émission de W **avec** $W(CO)_6$ quasiment terminée
6. Détermination de coefficients d'Einstein d'émission spontanée
7. Détermination des paramètres d'élargissement Stark

REMERCIEMENTS



Réalisation de la mesure des A_{ki} pour WI et WII

- Etape 1.** Réalisation de la chambre de sublimation et de sa jonction avec la source plasma
Travail conjoint bureau d'études CORIA – atelier de fabrication
- Etape 2.** Fin des calculs de composition à l'équilibre
Travail théorique à partir des bases de données CORIA
- Etape 3.** Etude des spectres émis par la source plasma
Détermination des coefficients d'Einstein de WI et WII

Moyens humains

| | |
|--------------------------|---|
| Arnaud BULTEL | MdC HdR Université de Rouen (chef de projet) |
| Aurélien FAVRE | Doctorant Région Normandie |
| Benjamin QUEVREUX | Ingénieur d'études CNRS (bureau d'études) |
| Philippe TOUTAIN | Assistant Ingénieur CNRS (réalisation chambre de sublimation et raccordement source plasma) |
| Gilles GODARD | Ingénieur de recherche (spectroscopie, caméras ICCD) |

| Etape | Durée |
|---|----------------------------|
| 1. Réalisation de la chambre de sublimation | Septembre 2016 → Mars 2017 |
| 2. Calculs de composition à l'équilibre | Septembre 2016 → Mars 2017 |
| 3. Détermination des coefficients d'Einstein de WI et WII | Avril 2017 → Mars 2018 |

Réalisation de la mesure des A_{ki} pour WI et WII

| Poste budgétaire | Coût |
|--|---------------|
| Rubans chauffants | 400 € |
| Boîtier thermorégulation chambre sublimation | 300 € |
| Plaques et tubes aluminium, raccords et joints haute température | 1500 € |
| Poreux en bronze | 200 € |
| Flacon de 250 g de $W(CO)_6$ chez Fisher Scientific | 650 € |
| Total | 3050 € |

Merci de votre attention... et de votre soutien !