

PREMIERS SPECTRES D'EMISSIVITE DU TUNGSTENE APRES EXPOSITION DANS LE TOKAMAK WEST

FIRST SPECTRUM OF TUNGSTEN EMISSIVITY AFTER EXPOSITION IN THE WEST TOKAMAK

Estelle ROMULUS^{1*}, Jonathan GASPARD¹, Nathalie EHRET¹, Céline MARTIN², Mathilde DIEZ³, Jean-Laurent GARDAREIN¹

^{1,*}Aix Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13453, Marseille France

²Aix Marseille Université, CNRS, PIIM, UMR 7345, 13013, Marseille, France

³CEA, IRFM, 13108, St-Paul-Lez-Durance, France

*(auteur correspondant : estelle.romulus@univ-amu.fr)

Résumé - Cet article présente un banc de mesure d'émissivité spectrale développé afin de mesurer l'émissivité spectrale entre 2,5 et 8 μm jusqu'à 400°C à l'aide d'un spectrophotomètre FTIR. L'étude porte sur trois échantillons (graphite recouvert de tungstène) caractéristiques des zones observées dans le tokamak WEST : zone de forts dépôts, zone de forte érosion et un composant non exposé au plasma. Les émissivités varient autour de 0,2 pour l'échantillon érodé et atteignent jusqu'à 0,98 pour l'échantillon à forts dépôts. En parallèle, des mesures d'état de surface montrent une rugosité de 5,6 μm dans la zone de fort dépôt contenant essentiellement du bore, contre 1.6 μm dans la zone de forte érosion.

Abstract - This article presents a spectral emissivity measurement bench developed to measure emissivity between 2.5 and 8 μm up to 400 °C using an FTIR spectrophotometer. The study focuses on three samples (tungsten-coated graphite) representative of zones observed in the tokamak: a clean component, a high-deposition zone, and a high-erosion zone. Emissivity values are around 0.2 for the eroded sample and reach up to 0.98 for the high-deposition sample. In parallel, surface state measurements show a roughness of 5.6 μm in the high-deposition zone, mainly containing boron, compared with 1.6 μm in the high-erosion zone.

Nomenclature

Symbole

ϵ_n	émissivité
λ	longueur d'onde, m
L_0	luminance des optiques, W/m ² .sr
L_n^0	luminance, W/m ² .sr
R	coefficient de linéarité du capteur, m ² .sr/W
ρ_n	réflectivité
S_n	signal émis
T_n	température, °C

Indice n

e	échantillon
CN	corps noir
SI	obturateur dans l'enceinte
SE	obturateur extérieur
amb	ambiance
enc	enceinte

1. Introduction

Dans le domaine de la fusion nucléaire, les environnements extrêmes des tokamaks, tel que WEST [1], soumettent les composants face au plasma à de forts flux de chaleur de l'ordre de

10 MW/m² et de particules. Ces flux de chaleur induisent d'importants échauffements des composants face au plasma. Par conséquent, un contrôle en temps réel de la température des composants est nécessaire pour éviter leur endommagement. Dans ce contexte, la thermographie infrarouge (IR) est couramment utilisée dans les tokamaks pour assurer le contrôle de la température de ces composants [2]. Elle repose sur l'utilisation de caméras IR équipées de filtres étroits centrés sur une longueur d'onde du domaine IR. Cependant, l'utilisation de composants en tungstène (W) dans WEST rend difficile le suivi de la température en raison de la faible émissivité du W ($\epsilon = 0,1$). De plus, celle-ci peut varier à la surface d'un même composant en raison des phénomènes de déposition et d'érosion induits par l'interaction plasma-paroi [3]. Cela induit des changements d'état de surface qui nécessitent une compréhension approfondie de l'évolution de l'émissivité des composants dans la machine.

Des études antérieures ont mis en évidence des zones de forte érosion caractérisées par une diminution de l'émissivité de 0,12 à 0,05. A l'inverse, des zones de forts dépôts ont montré une augmentation de l'émissivité jusqu'à 0,85. Ces études ne ciblent cependant que les longueurs d'onde imposées par les caméras du tokamak WEST (centrée 3,9 +/- 0,25 μm) [3]. L'objectif de cette étude est de mesurer l'émissivité spectrale de ces composants entre 2,5 et 8 μm . Pour cela, un banc de mesure équipé d'un spectrophotomètre à transformée de Fourier (FTIR) et d'une enceinte à vide, a été développé pour réaliser des mesures jusqu'à 400°C. Dans un premier temps, le banc expérimental et le principe de mesure seront présentés. Ensuite, le type d'échantillon choisi, leurs caractéristiques ainsi que l'étude de leur état de surface seront détaillées. Enfin, les premiers spectres d'émissivité obtenus seront présentés et discutés, ainsi qu'une première corrélation entre l'émissivité et l'état de surface.

2. Présentation du système

2.1. Banc expérimental

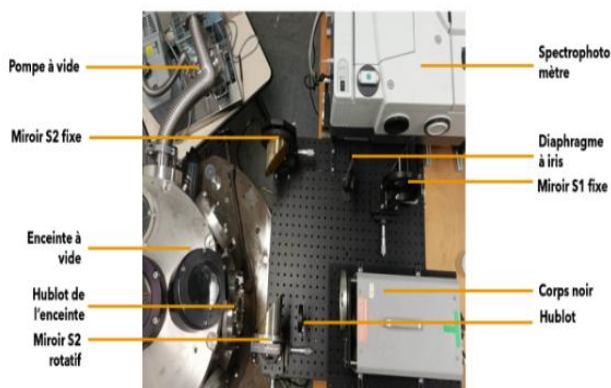


Figure 1 : Photo du banc expérimental

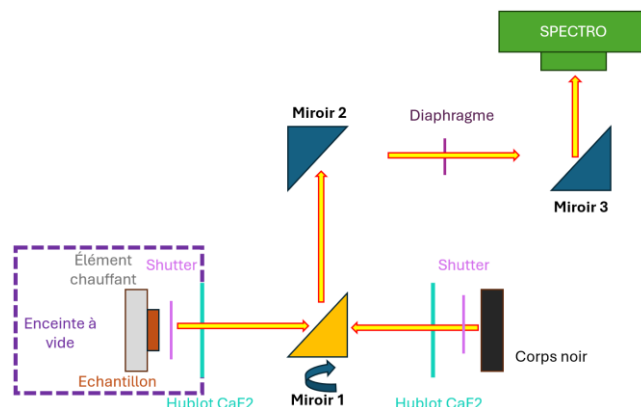


Figure 2 : Schéma de principe du fonctionnement du banc

Le banc présenté en Figure 1 permet la mesure directe de l'émissivité spectrale, c'est-à-dire une collecte directe de la luminance émise par l'échantillon et le corps noir. Un porte-échantillon réglable est positionné au contact d'un élément chauffant, permettant la montée en température de l'échantillon jusqu'à 400°C. L'enceinte à vide, dont les parois sont peintes en noires (Nextel 811-21 Velvet) pour limiter les réflexions multiples, est mise sous vide (10^{-2} à 10^{-3} mbar) afin d'éviter l'oxydation des échantillons en tungstène (W). Un hublot en CaF₂ est positionné devant l'échantillon et le corps noir cavité (SR-2-32-SA) permettant la collecte des luminances entre 2,5 – 8 μm . Les miroirs paraboliques 1 (rotatif) et 2 (fixe) permettent l'obtention de l'image de la surface de l'échantillon à la position du diaphragme. Le miroir

parabolique 3 permet de diriger les flux collimatés vers le spectrophotomètre (FT-IR Is50). A l'intérieur de celui-ci, un diaphragme motorisé permet de définir la surface de collecte sur l'échantillon avec un diamètre ajustable entre 3,5 et 9 mm. Lors des mesures, les contributions des chemins optiques peuvent différer en raison de l'échauffement des hublots, plus important côté enceinte car celle-ci n'est pas refroidie. Afin de s'affranchir de ces réflexions, des obturateurs sont placés respectivement devant l'échantillon et le corps noir. A noter que cette étude se limite entre 2,5 et 8 μm et sera étendue ultérieurement jusqu'à 15 μm avec l'utilisation d'un hublot en ZnSe afin de mettre en évidence des potentiels comportements ou caractéristiques simplifiant l'étude du divertor bas.

2.2. Calcul de l'émissivité

Le calcul de l'émissivité repose sur la propriété linéaire du capteur. Le signal de l'échantillon (S_e) à une température (T_e) donnée, s'exprime par son flux émis ($\epsilon_e L_e^0(\lambda, T_e)$), la part réfléchiée par l'enceinte de ce flux ($\rho_e L_{enc}^0(\lambda, T_{enc})$), ainsi que les contributions provenant du chemin optique ($L_0(\lambda)$). L'expression du signal des obturateurs ainsi que du corps noir prennent en compte les mêmes éléments, exceptée la part de réflexion pour le signal corps noir. Travailler dans gamme de linéarité du capteur permet d'éviter une phase de calibration du spectrophotomètre mais cela nécessite l'acquisition des quatre spectres pour chaque mesure d'émissivité. Les signaux s'expriment comme suit :

$$S_e(\lambda, T_e) = R(\lambda)[\epsilon_e L_e^0(\lambda, T_e) + \rho_e L_{enc}^0(\lambda, T_{enc}) + L_0(\lambda)] \quad (2)$$

$$S_{CN}(\lambda, T_{CN}) = R(\lambda)[L_{CN}^0(\lambda, T_{CN}) + L_0(\lambda)] \quad (3)$$

$$S_{SI}(\lambda, T_{SI}) = R(\lambda)[\epsilon_{SI} L_{SI}^0(\lambda, T_{SI}) + \rho_{SI} L_{enc}^0(\lambda, T_{enc}) + L_0(\lambda)] \quad (4)$$

$$S_{SE}(\lambda, T_{SE}) = R(\lambda)[\epsilon_{SE} L_{SE}^0(\lambda, T_{SE}) + \rho_{SE} L_{amb}^0(\lambda, T_{amb}) + L_0(\lambda)] \quad (5)$$

En utilisant l'expression de ces quatre signaux, la contribution des différentes optiques des signaux est retirée grâce aux obturateurs, et ce indépendamment pour l'échantillon et le corps noir. Enfin, en reprenant la définition de l'émissivité, l'expression finale de l'émissivité de l'échantillon s'écrit :

$$\epsilon_e = \frac{S_e - S_{SI}}{S_{CN} - S_{SE}} * \frac{L_{CN}^0 - \epsilon_{SE}(L_{SE}^0 - L_{amb}^0) - L_{amb}^0}{L_e^0 - L_{enc}^0} + \frac{\epsilon_{SI}(L_{SI}^0 - L_{enc}^0)}{L_e^0 - L_{enc}^0} \quad (6)$$

On pose ici l'hypothèse que ϵ_{amb} et ϵ_{enc} sont proches de 1 [4]. D'autre part, les émissivités ϵ_{SE} et ϵ_{SI} sont supposées égales à 0.97, correspondant à l'émissivité de la peinture noire Nextel utilisée pour l'enceinte et les obturateurs, mesurée par un autre banc avec sphère intégrante.

2.3. Echantillons

Les échantillons étudiés sont issus des composants provenant du tokamak WEST et en particulier de la zone subissant le flux de chaleur le plus important appelé divertor. Le divertor de la machine se compose de deux parties : une partie avec des composants dits 'internes' et l'autre avec des composants dits 'externes' que l'on peut observer sur la Figure 3. A noter que ces composants sont spécifiques à la première phase expérimentale de WEST, sont en graphite et recouverts d'une fine couche de W (12 – 15 μm d'épaisseur). L'interaction entre le plasma et ces composants induit des modifications de surface, avec des zones spécifiques de fortes dépôts et érosions (voir Figure 4 présentant un composant avant et après exposition au plasma).

L'étude de cet article a été réalisée sur un composant interne, exposé durant cinq campagnes expérimentales, soit environ 7h30 d'exposition au plasma. Ce composant a été découpé afin

d'isoler la zone de forte érosion (Figure 4, B 2) ayant subi des flux jusqu'à 2 MW/m^2 avec des températures de surface allant jusqu'à 400°C . La seconde partie découpée correspond à la zone présentant des dépôts épais (Figure 4, B 3) qui, à l'inverse, a été soumise à un flux beaucoup moins important (200 kW/m^2) favorisant la déposition des impuretés. Le plasma de deutérium transporte les éléments chimiques présents dans le tokamak (tungstène, carbone, oxygène etc) sur cette zone. Les dimensions des échantillons découpés sont variables. De plus, leur épaisseur est variable au sein d'un même échantillon (entre 53 - 55 mm en longueur, 28 - 31 mm en largeur et 0.8 - 4 mm en épaisseur). Enfin, leur suivi en température se fait grâce à un thermocouple type K de diamètre 0,5 mm positionné en surface, maintenu mécaniquement par la vis du porte-échantillon.

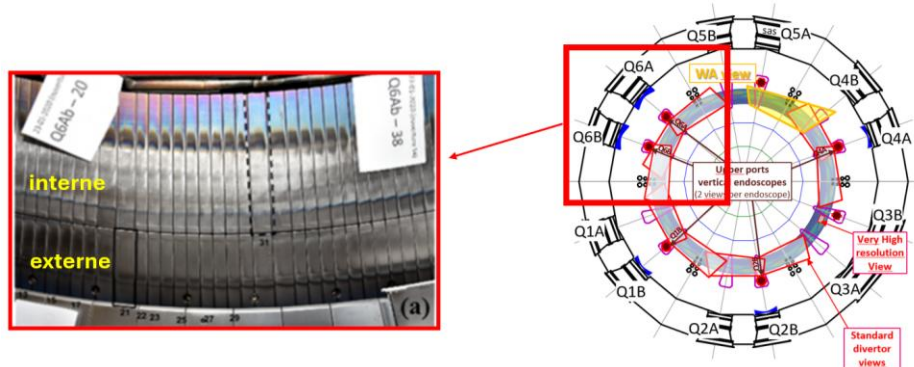


Figure 3 : Vue détaillée du secteur Q6A du divertor bas montrant les composants internes et externes (gauche) -- schéma représentant l'ensemble des secteurs du divertor bas de WEST vue de dessus (droite),



Figure 4 : Photo de composant interne avant (A) et après (B) exposition au plasma

La Figure 5 présente les échantillons étudiés dans cette étude : un échantillon de référence n'ayant jamais vu le plasma (Figure 5, 1), un échantillon issu de la zone forte érosion (Figure 5, 2) et un échantillon issu de la zone forts dépôts (Figure 5, 3). Dans la suite les notations 1, 2 et 3 feront références aux différents échantillons. Il est important de noter que seul l'échantillon 1 a pu être percé sur la tranche pour mettre un thermocouple de type K avec un diamètre de 1 mm à l'intérieur. Ce thermocouple a été placé de sorte qu'il soit le plus proche possible du centre de l'échantillon.

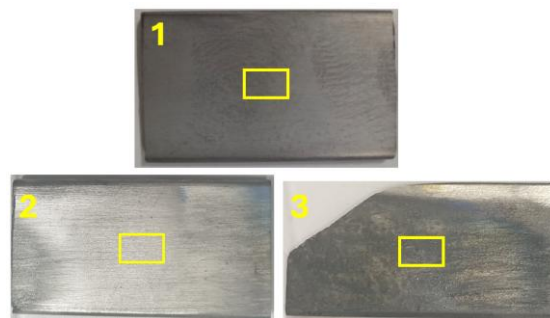


Figure 5 : Echantillons provenant de la machine : 1) référence - 2) zone érodée - 3) zone de dépôts

2.4. Mesure de l'état de surface

Les précédentes études ont montré l'influence de l'état de surface des composants sur leurs émissivités mesurées à la longueur d'onde des systèmes IR du tokamak WEST ($3,9\text{ }\mu\text{m}$) [3]. Ainsi, il est important de comprendre la corrélation entre l'état de surface et l'émissivité en fonction de la longueur d'onde. Dans cet objectif, nous avons réalisé différentes mesures se concentrant sur la rugosité des échantillons ainsi que leur composition chimique. Les mesures de rugosité ont été effectuées au moyen d'un microscope laser confocal sur une zone centrale de $4 \times 3\text{ mm}^2$, afin d'assurer la comparaison avec les résultats précédents obtenus dans le cadre de ce projet [5]. Les mesures de composition chimique ont été réalisées par EDX sur la même zone que l'analyse confocale avec un agrandissement $\times 1000$ sur une zone de $118 \times 79\text{ }\mu\text{m}^2$ à 20 et 5 kV, permettant respectivement de sonder les dépôts entre $1\text{ }\mu\text{m}$ et 100 nm environ de profondeur. A noter que l'étude à 5 kV permet d'améliorer la sensibilité pour les atomes plus légers tels que le bore (B) qui présentent des transitions à basse énergie par élimination des multidiffusions dues aux transitions à hautes énergies du W. Les mesures étant à différentes échelles (de l'ordre du mm pour la confocale et du μm pour l'EDX), nous avons posé l'hypothèse que les zones étudiées pour l'état de surface étaient représentatives de l'ensemble de la zone collectée par le capteur lors de notre mesure d'émissivité. A noter que cette hypothèse repose sur les précédentes études analysant le centre des échantillons [5].

3. Résultats et discussion

3.1. Mesure d'émissivité par un banc avec caméra IR

Dans un premier temps, l'émissivité moyenne des échantillons a été mesurée sous atmosphère non contrôlée afin d'avoir des valeurs de références pour l'étude spectrale. Comme montré Figure 6, le banc expérimental se compose d'une caméra IR SC6000 dont la bande spectrale de mesure est comprise entre $3,5$ et $5\text{ }\mu\text{m}$. L'échantillon est chauffé grâce à un four Linkam et est protégé des perturbations thermiques par une cage en plexiglass. Les luminances sont mesurées à deux températures (27 et 47°C) et traitées grâce à la méthode des deux températures [4] permettant l'obtention des cartes d'émissivité des échantillons. Ainsi, les émissivités mesurées sont respectivement autour de $0,11$ pour l'échantillon n°1 (Figure 7), $0,2$ pour l'échantillon n°2 et $0,86$ pour l'échantillon n°3.

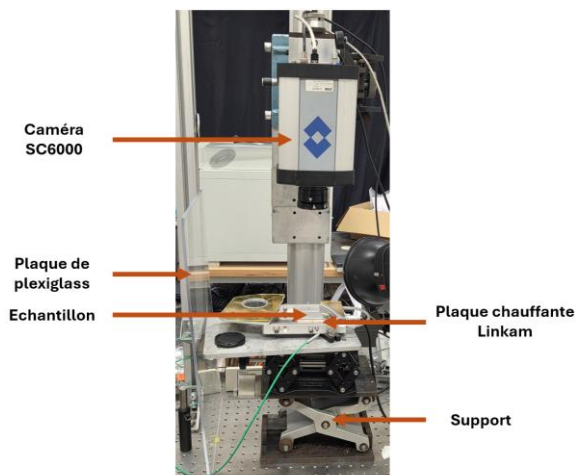


Figure 6 : Photo du banc expérimental avec caméra IR

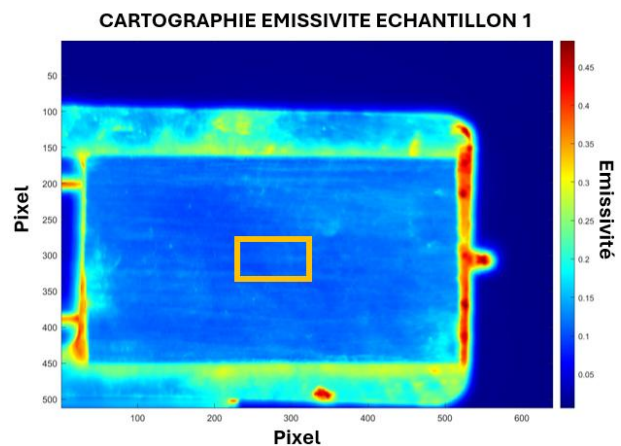


Figure 7 : Cartographie de l'émissivité de l'échantillon 1 (référence)

3.2. Mesure d'émissivité spectrale avec le nouveau banc expérimental

Pour chaque échantillon, une mesure d'émissivité à une température de 326°C a été réalisée entre 2,5 et 8 μm . Ainsi, pour chaque échantillon, quatre mesures ont été réalisées (Figure 8) et, après traitement (équation 6), ont permis d'obtenir les spectres d'émissivités (Figure 9). Lors des mesures sur l'échantillon 1, un écart de 13°C entre la température interne et la température de surface a été observé. Cet écart a été appliqué pour une première exploitation des mesures des échantillons 2 et 3.

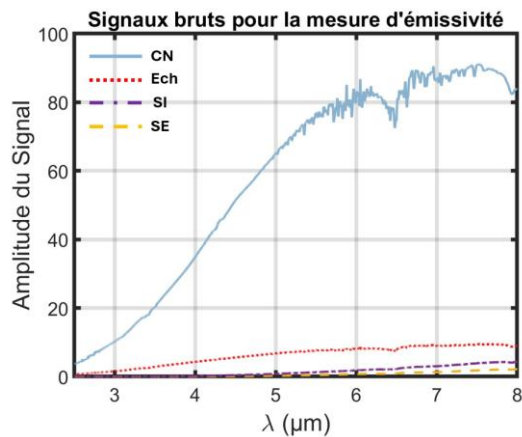


Figure 8 : Signaux bruts de l'échantillon de 1 (référence)

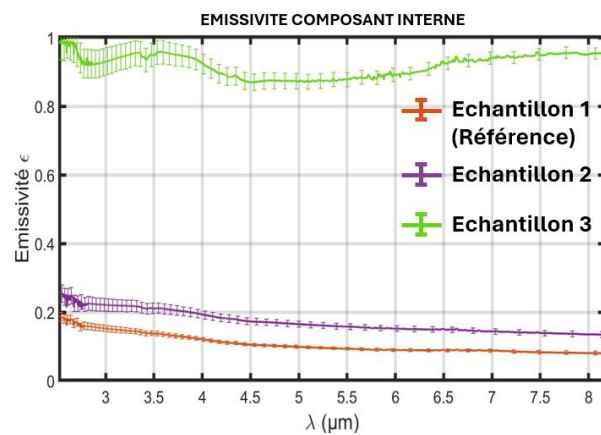


Figure 9 : Spectres d'émissivité pour échantillon 1 (orange), 2 (violet) et 3 (vert).

La Figure 8 présente les courbes brutes pour l'échantillon 1, et la Figure 9 les spectres d'émissivité obtenus après traitement pour les trois échantillons. Les spectres des échantillon 1 et 2 suivent le comportement typique du W, avec une émissivité décroissante en fonction de la longueur d'onde [6]. L'échantillon 3 présente quant à lui une allure de spectre beaucoup plus stable en longueur d'onde, semblable au spectre du graphite. L'émissivité spectrale de l'échantillon 3, correspondant à la zone de forts dépôts, est beaucoup plus élevée, admettant des valeurs comprises entre 0,87 et 0,98 contre des valeurs entre 0,08 et 0,18 pour l'échantillon 1 (référence). L'échantillon 2 (zone érodée) est beaucoup moins émissif que l'échantillon 3, comme attendu, avec des valeurs comprises entre 0,13 et 0,25. Il est à noter que les valeurs d'émissivité intégrées entre 3 et 5 μm mesurées à basse température sur le banc caméra IR sont en bon accord avec les mesures spectrales obtenues, en considérant l'augmentation de l'émissivité avec la température, ainsi qu'avec les valeurs obtenues dans les études précédentes [3,7]. A noter que l'écart-type a été estimé avec une méthode de Monte Carlo prenant en compte l'erreur de mesure sur l'ensemble des températures : thermocouples à l'intérieur de l'enceinte ($\pm 2^\circ\text{C}$), température corps noir ($\pm 2.5^\circ\text{C}$) et température de l'ambiance ($\pm 0.6^\circ\text{C}$). Le nombre d'itération suffisant pour assurer la convergence de l'écart-type a été fixé à 1000 après observation de sa stabilisation à partir de cette valeur.

3.3. Relation de l'état de surface sur l'émissivité

L'état de surface influence fortement l'émissivité d'un matériau. Ainsi nous avons essayé de relier les mesures de rugosité, la composition chimique ainsi que l'émissivité des échantillons étudiés. Le tableau suivant résume les résultats obtenus :

Echantillons	$\epsilon_{spectrale}$ (2,5 – 8 μm) $T = 326^{\circ}C$	$\epsilon_{intégrée}$ (3 – 5 μm) $T = 27 \text{ et } 47^{\circ}C$	Sa μm	Sq μm	Sz μm
Echantillon 1 Référence	0,08 – 0,18	0,109	1,50	1,93	22,3
Echantillon 2 Zone forte érosion	0,13 – 0,25	0,203	1,6	2	48,1
Echantillon 3 Zone fort dépôt	0,87 – 0,98	0,869	5,6	6,2	103,3

Tableau 1 : *Corrélation des mesures de rugosité et mesure d'émissivité moyenne pour chaque échantillon*

Le Tableau 1 présente les mesures d'émissivités obtenues avec le nouveau banc expérimental (émissivité spectrale entre 2,5 et 8 μm) ainsi que celles avec le banc IR (émissivité intégrée entre 3 et 5 μm). Dans ce tableau, sont également répertoriées les mesures de rugosité Sa présentant la rugosité moyenne de la surface, Sq donnant la dispersion des hauteurs sur la surface étudiée, ainsi que Sz indiquant le maximum de dénivelé entre le point le plus haut et le point le plus profond sur la surface de l'échantillon. L'échantillon 3 (zone forts dépôts) possède une émissivité aussi bien spectrale qu'intégrée beaucoup plus importante que l'échantillon 1 (référence) ainsi que l'échantillon 2 (zone forte érosion). Sa rugosité de manière globale (Sa , Sq et Sz) est également plus importante comparée aux 1,5 μm pour l'échantillon 1 et 1,6 μm pour l'échantillon 2 pour les Sa , bien que numériquement proche. On remarquera que l'échantillon 1 possède une rugosité inférieure à celle de l'échantillon 2. En complément de ces mesures, il a été observé que l'échantillon 3 tend à avoir un mélange de plusieurs éléments chimiques à sa surface avec une prédominance forte de carbone (C) et de bore (B). En revanche, l'échantillon 2 est composé majoritairement de W.

En faisant un bilan sur les mesures, les valeurs obtenues indiquent qu'une rugosité importante induirait une augmentation importante de l'émissivité. A l'inverse, une rugosité relativement faible impliquerait une forte baisse de l'émissivité. En parallèle, des mesures EDX ont souligné une forte présence de B et de C, matériaux très émissifs, notamment dans la zone de forts dépôts. En revanche, l'échantillon 2 admet une présence majoritaire de W en surface. Ces compositions chimiques pourraient expliquer l'allure des spectres d'émissivité obtenus. Cependant l'ensemble de ces analyses nécessite encore des investigations topographiques approfondies par rapport à l'émissivité avec par exemple des méthodes de Monte Carlo [9] afin de relier quantitativement les rugosités aux émissivités mesurées. De plus, les précédentes études sur les composants du tokamak WEST ont déjà montré cette corrélation avec des valeurs d'émissivité et de rugosité plus importantes dans les zones de forte déposition autour de 0,86. A l'inverse l'émissivité est beaucoup plus basse sur les zones érodées à faible rugosité et ayant un aspect réfléchissant [3,7].

4. Conclusion

Les premières mesures d'émissivité spectrales de composants provenant du Tokamak WEST ont été réalisées grâce au développement d'un nouveau banc de mesure basé sur l'utilisation d'un spectrophotomètre FTIR. Nous avons pu montrer que les spectres obtenus sont en adéquation avec les valeurs mesurées dans les précédentes études de ces composants dans les

bandes spectrales anciennement étudiées (entre 3 et 5 μm). Trois échantillons ont été étudiés à $T = 326^\circ\text{C}$. Tout d'abord, un échantillon de référence n'ayant pas été exposé au plasma, présente un spectre classique du W avec une valeur d'émissivité de l'ordre de 0,2 à 2,5 μm et de 0,08 à 8 μm . Puis, deux échantillons ayant été exposés à environ 7h30 de plasma ont été étudiés. Un échantillon provenant d'une zone dominée par l'érosion présente une émissivité légèrement plus importante que celle de l'échantillon de référence allant de 0,25 à 2,5 μm à 0,13 à 8 μm . En revanche, l'échantillon provenant d'une zone de forte re-déposition montre une émissivité bien plus importante (de l'ordre de 0,9) avec une plus faible dépendance spectrale. Enfin, nous avons réalisé une première caractérisation de l'état de surface des échantillons. Nous avons pu montrer que l'échantillon provenant d'une zone de forte déposition présente une rugosité importante de l'ordre de 5,6 μm contrairement aux zones d'érosion (échantillon 2) ayant une rugosité plus faible de l'ordre de 1,6 μm .

Plusieurs améliorations sont déjà en cours, notamment une meilleure estimation des températures de surface des échantillons non percés provenant de la machine. Ensuite, l'objectif est d'étendre notre gamme spectrale jusqu'à 15 μm grâce à la mise en place d'un hublot en ZnSe qui sera prochainement installé. Enfin, l'étude portera sur plus d'échantillons types, nous permettant d'établir une corrélation plus solide entre l'émissivité et l'état de surface. Cette étude sera accompagnée d'une étude sur la composition chimique de surface plus approfondie.

Références

- [1] Y. Corre et al., *Testing of ITER-grade plasma facing units in the WEST tokamak: Progress in understanding heat loading and damage mechanism*, Nuclear Materials and Energy, 37, pp.: 101546 (2023).
- [2] X. Courtois et al., *Design and status of the new WEST IR thermography system*, Fusion Engineering and Design, 136, pp.: 1499-1504 (2018).
- [3] J. Gaspar et al., *In-situ assessment of the emissivity of tungsten plasma facing components of the WEST tokamak*, Nuclear Materials and Energy, 25, pp.:100851 (2020).
- [4] L. Del Campo et al., *New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment*, Review of Scientific Instruments, 77, pp.: 113111, (2006).
- [5] C. Martin et al., *First pots-mortem analysis of deposit collected on ITER-like components in WEST after the C3 and C4 campaigns*, Physica Scripta, IOP Publishing, 96, pp.: 124035 (2021).
- [6] J. Gaspar et al., *Emissivity measurement of tungsten plasma facing components of the WEST tokamak*, Fusion Engineering and Design, 149, pp.: 111328, (2019).
- [7] J. Gaspar et al., *Overview of the emissivity measurements performed in WEST: in situ and post-mortem observations*, Nuclear Fusion, 62, pp.: 096023, (2022).
- [8] R. Mateus et al., *Elemental analysis of divertor marker tiles exposed during the 2018 (C3), 2019 (C4) and 2020 (C5) WEST campaigns*, Nuclear Materials and Energy, 46, pp.: 102050, (2026).
- [9] F. Retailleau et al., *BRDF determination based on topography measurement and Monte Carlo ray tracing*, Optik-International Journal for Light and Electron Optics 338, pp.: 172476 (2025).

Remerciements

Le projet ayant donné lieu à cette publication a bénéficié d'un financement de l'Initiative d'excellence d'Aix-Marseille Université - A*Midex, programme des Investissements d'Avenir AMX-19-IET-013.