

Association EURATOM - CEA
Fusion contrôlée

Comité de Gestion n° 79

Compte Rendu d'Activité
COLLABORATIONS NATIONALES
(Universités et CNRS)

Novembre 2004 - Octobre 2005

PROJET M2 : « Ingénierie des matériaux: caractérisation, élaboration, composites à fibres de carbone »

MOTIVATION – La première collaboration dans ce projet concerne la surveillance infrarouge in situ des CFC. Malgré l'existence de plusieurs méthodes possibles de pyrométrie optique, la détermination de la température de surface réelle d'un objet soumis à un flux extérieur de chaleur demande encore la connaissance de l'émissivité. Malheureusement, ce facteur peut être fonction de la température, de la direction, de la longueur d'onde et de l'état physique de la surface. Dans les machines de fusion, l'altération des matériaux face au plasma due à l'interaction plasma-paroi peut conduire à une modification de l'état physique de la surface et donc de l'émissivité. Par conséquent, le contrôle de la température avec le but d'évaluer l'endommagement possible des composants face au plasma est fortement perturbé par le changement de l'émissivité pendant leur durée de vie. Une solution possible de ce problème pourrait être de mesurer in situ et en temps réel l'émissivité des matériaux à surveiller.

La deuxième collaboration s'adresse aux alliages à base de tungstène, qui sont sérieusement considérés comme matériaux des composants face au plasma, à cause de la large rétention du tritium dans les matériaux à base de carbone. Un des problèmes principaux dans l'utilisation du tungstène est la possibilité de le lier à un puits de chaleur à base de cuivre. Cette proposition a pour but de fabriquer des échantillons novateurs d'assemblage de la première paroi à base d'un matériel avec un "functional gradient". Ce processus est basé sur la métallurgie des poudres. Le matériel face au plasma est le tungstène et celui du puits de chaleur est un alliage W/Cu. La transition douce entre le W et le W/Cu permet d'éliminer la liaison hétérogène qui est le maillon faible en présence de fort flux de chaleur. Les propriétés thermomécaniques de l'alliage W/Cu sont similaires de celles du CuCrZr (le choix actuel pour le matériel des puits de chaleur) ce qui ouvre une voie de fabrication intégrée pour les éléments de première paroi et les cibles du divertor.

Thème M2.1 : Application d'un pyro-réfléctomètre à trois couleurs à la surveillance infrarouge in situ des composants face au plasma (R. Reichle ; D. Hernandez, Institut de science et de génie des Matériaux et Procédés, IMP, Font Romeu Odeillo, UPR-8521 CNRS)

Les objectifs principaux de ce travail sont :

- la validation d'une méthode pyro-refléctométrique pour le contrôle 'in situ' de la température de paroi de réacteur et le contrôle de son état de surface par la mesure de la réflectivité ;
- l'application des systèmes et méthodes dans des bancs d'essai FE200 et sur des réacteurs.

Au cours de l'année 2005, après une phase initiale de validation dans l'enceinte MEDIASE au four solaire conduite en 2004, les études ont conduit principalement à :

- la comparaison de sondes hémisphérique et plate en vue de la détermination directe de l'émissivité à $1.3 \mu\text{m}$ et $1.5 \mu\text{m}$;
- la poursuite de développements et réalisations technologiques pour la mise au point de systèmes : le pyro-réfléctomètre tricolore et une enceinte de test dédiée à la caractérisation des matériaux pour paroi de fusion ;
- la réalisation de mesures préliminaires en vue d'un contrôle à distance adapté à la géométrie des réacteurs plasma.

2.1.1. Définition d'une sonde adaptée à la mesure directe de l'émissivité

Les sondes de mesure utilisées sont des sondes à fibres optiques utilisées nues, sans optique de focalisation : une fibre joue le rôle d'illumination, la seconde de récupération du flux émis pour la mesure de la température et du flux réfléchi pour la mesure de la réflectivité.

Initialement le dispositif de caractérisation solaire MEDIASE utilisé est équipé d'une sonde de mesure dont la tête est munie d'un hémisphère réflecteur (figure 2.1.1). Du fait des multiples réflexions entre la tête et la surface de l'échantillon, les mesures de réflectivités et de températures sont affectées et ne peuvent être qualifiées que d'apparentes.

Une comparaison avec une sonde plate a été faite (figure 2.1.1).

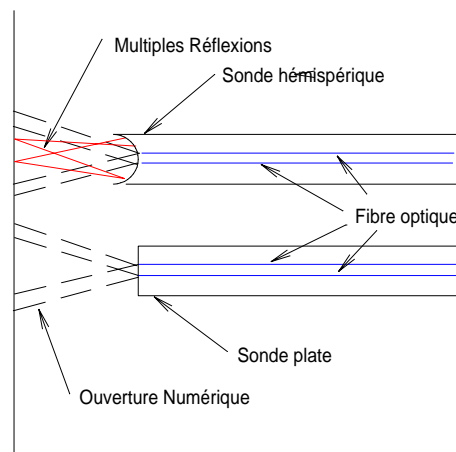


Figure 2.1.1 - Schéma des deux types de sonde

La figure 2.1.2 rend compte des résultats caractéristiques et comparatifs obtenus avec les deux sondes sur des échantillons de tungstène fournis par le CEA.

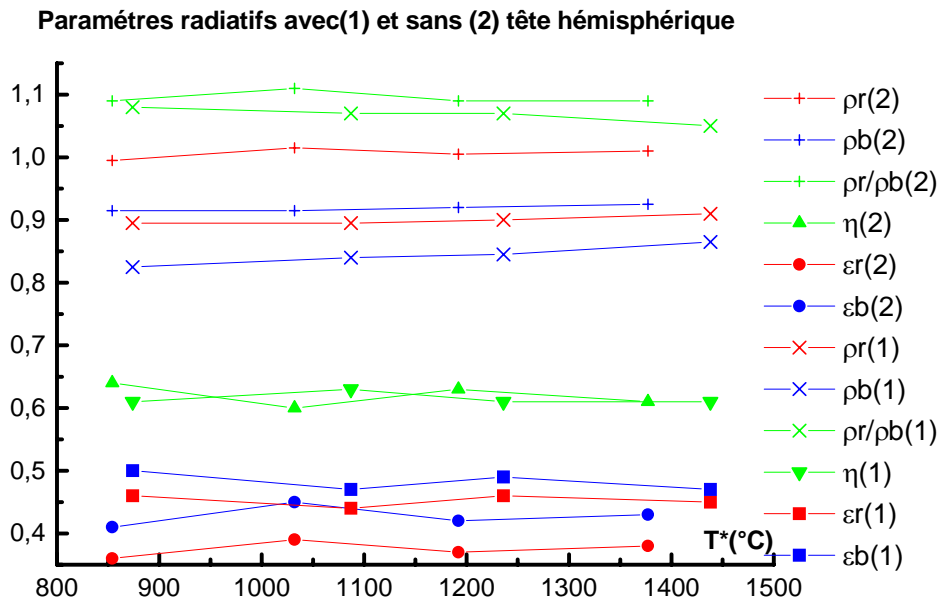


Figure 2.1.2 - Exemples de résultats obtenus avec et sans hémisphère sur un échantillon de W : ρ_r réflectivité normale, ϵ_r émissivité normale, η facteur de diffusivité ; r correspond aux mesures à 1.55 μm , b à 1.3 μm

On constate que l'utilisation de l'hémisphère augmente l'émissivité et diminue la réflectivité apparente. Ce résultat est logique compte tenu des réflexions multiples. Seule la sonde plate donne des bonnes valeurs d'émissivité et de réflectivité.

Le tableau suivant rassemble les résultats obtenus pour la température T avec la sonde plate lors d'un cycle thermique au four solaire et dans le dispositif MEDIASE (T^* : température réelle, T_r : température de luminance).

T^* °C	T_{rr} °C	T_{rb} °C	ρ_r	ρ_b	ϵ_r	ϵ_b	η	ρ_r/ρ_b
871	737	767	1.475	1.36	0.34	0.39	0.45	1.08
868	738	768	1.48	1.355	0.35	0.41	0.44	1.09
1050	883	921	1.48	1.355	0.37	0.42	0.43	1.09
1189	992	1036	1.495	1.37	0.37	0.43	0.42	1.09
1370	1120	1171	1.49	1.385	0.37	0.41	0.43	1.08
1625	1298	1357	1.565	1.48	0.36	0.4	0.41	1.06
1016	842	878	1.61	1.505	0.33	0.37	0.42	1.07

Du fait du caractère spéculaire du W les réflectivités directionnelles mesurées sont supérieures à un. Par ailleurs, les émissivités sont en accord avec la littérature.

2.1.2. État d'avancement des systèmes dédiés

2.1.2.1. Le pyro-réfectomètre tricolore

La spécificité des composants nécessaires à sa réalisation a rendu l'approvisionnement difficile. Toutefois, aujourd'hui l'appareil est dans sa phase d'assemblage finale. Il faut souligner que ce long délai n'a retardé en rien les études du fait de l'utilisation d'un système bicolore opérationnel.

2.1.2.2. Le dispositif solaire dédié : DISCO

Comme le montrent les photographies de la figure 2.1.3, la réalisation du dispositif DISCO a été conduite jusqu'à son terme. La photo de gauche présente la sonde plate réalisée pour le FE200 face à une cible en W et tout à côté d'une référence en réflectivité ; la photo de droite montre l'enceinte au foyer d'un four solaire.

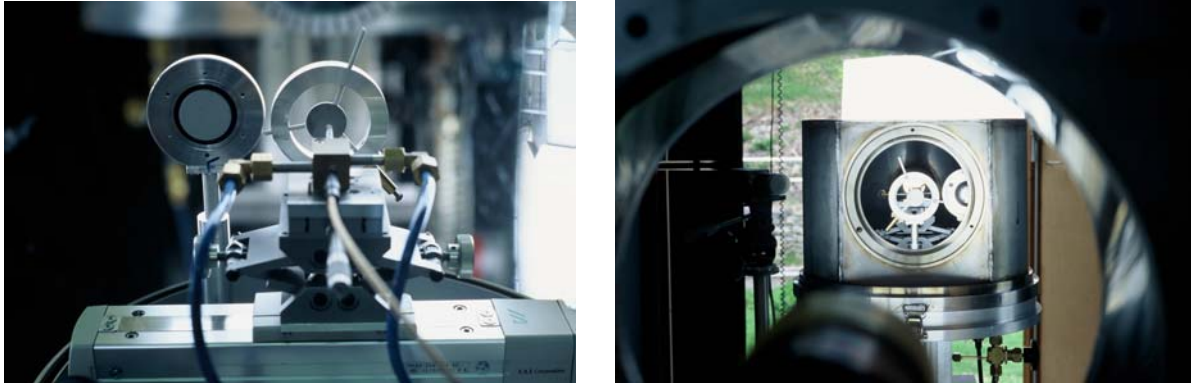


Figure 2.1.3 - Photos of the dedicated vessel DISCO

A ce jour DISCO a été utilisé pour deux types de caractérisation :

- La validation de la mesure pour un angle d'observation s'écartant de la normale. L'idée est de disposer la sonde de mesure hors du champ du faisceau d'électron de FE200 (figure 2.1.4).

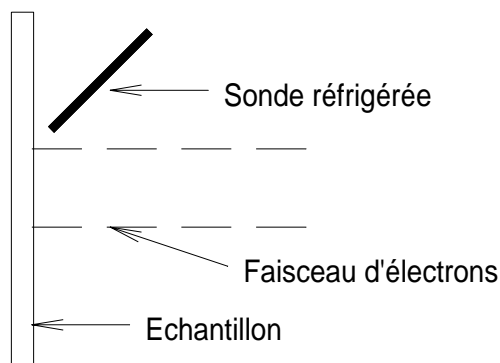


Figure 2.1.4 - Schéma de configuration éventuelle pour le FE200

Les résultats obtenus ont montré que la méthode de mesure était utilisable jusqu'à des angles de 30° du fait d'un rapport ρ_r/ρ_b constant. Au-delà, les signaux de mesures sont trop faibles.

- La mesure de la Fonction de Distribution Bidirectionnelle de la Réflectivité (BRDF). La BRDF a été réalisée à l'aide d'une sonde équipée de fibres optiques disposées aux angles suivants: 0, 10, 20, 30, 40, 50 et 60° par rapport à la normale. Les résultats obtenus (figure 2.1.5) confirment le caractère spéculaire des échantillons et montrent l'effet 'd'écrasement' sur la surface microbillée.

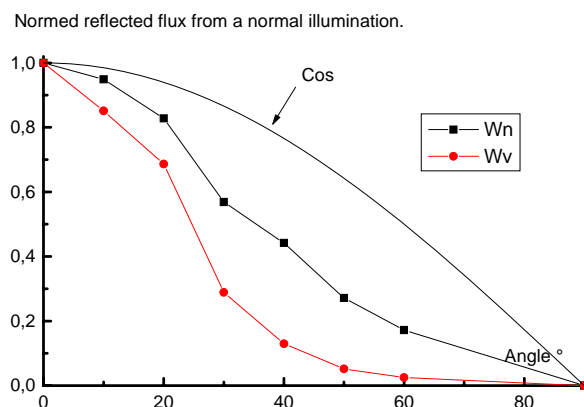


Figure 2.1.5 - BRDF pour W neuf (W_n) et W microbillé (W_v)

2.1.3. Tests préliminaires pour des mesures à distance

Les sondes développées à ce jour ne permettent que des mesures en proximité (de l'ordre du cm). Les risques générés par l'utilisation d'une sonde réfrigérée au banc d'essai FE200 ont orienté les travaux sur des mesures de faisabilité avec des appareils déportés capables d'observer les cibles à une distance d'un mètre. Dans ce sens, deux systèmes ont été évalués :

- un pyro-reflectomètre commercial Quantum Logic Model QL 3600C-1A. Ce pyro-réfectomètre permet de mesurer simultanément la température et l'émissivité de corps opaques à une distance de 0.6 m. Les résultats obtenus sont satisfaisants pour les cibles diffuses, mais erronés pour les surfaces spéculaires telles que W . Toutefois, les fonctionnalités de base sont suffisantes pour un développement adapté qui devrait inclure : l'adjonction d'au moins une longueur d'onde supplémentaire, la modification de l'optique, des sources d'éclairage et l'adaptation des logiciels de pyro-réfectométrie de PROMES-CNRS.
- la sonde nue actuelle (figure 2.1.1) équipée d'une diode laser de 1 W de puissance ($\lambda = 0.9 \mu\text{m}$). Les tests de distance maximum pour une sonde nue sans optique de focalisation ont montré que les mesures étaient possibles jusqu'à 1 m. La conception d'une optique appropriée rendrait donc les mesures réalisables avec le système actuel de PROMES-CNRS. Il s'agit de l'enjeu essentiel pour 2006 et pour les mesures sur FE200 et tokamaks.

Participants CNRS/Université : D. Hernandez

D. HERNANDEZ

A new concept to determine the true temperature of opaque materials using a tricolor pyroreflectometer

Rev. Sci. Instr. **76**, 024904 (2005)

Thème M2.2 : Elaboration de matériaux à gradient de fonction à base W/Cu pour la première paroi du réacteur ITER (R. Mitteau ; J.-M. Missiaen, Institut National Polytechnique de Grenoble, Laboratoire de Thermodynamique et Physico-Chimie Métallurgiques, LTPCM, UMR-5614 CNRS)

Dans ce projet, nous proposons une solution alternative pour le matériau face au plasma du réacteur de fusion ITER, basée sur l'élaboration par métallurgie des poudres d'un matériau à gradient de fonction. La structure réalisée devrait permettre une transition "douce" entre le tungstène pur face au plasma et un pseudo-alliage W-Cu riche en Cu, qui assurera la fonction de puits thermique (figure 2.2.1).

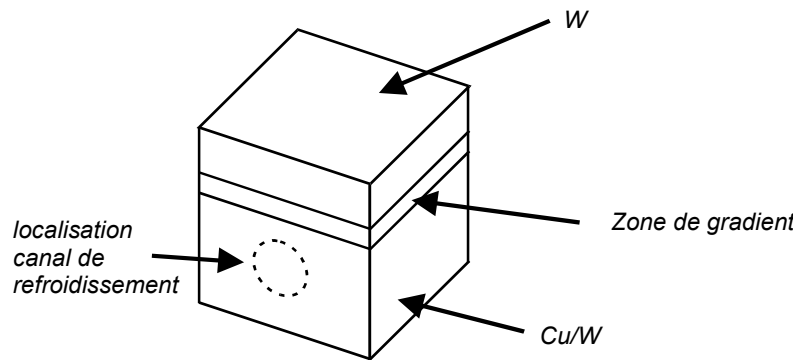


Figure 2.2.1 - Schéma de principe de la structure à gradient proposée

Un procédé d'élaboration par métallurgie des poudres de matériaux W-Cu à partir de mélanges de poudres W/CuO a été mis au point. Des matériaux à gradient de composition ont été élaborés en remplissant la matrice de compression avec des couches de compositions différentes. Le comportement en frittage et l'évolution de la microstructure (figure 2.2.2) ont été analysés

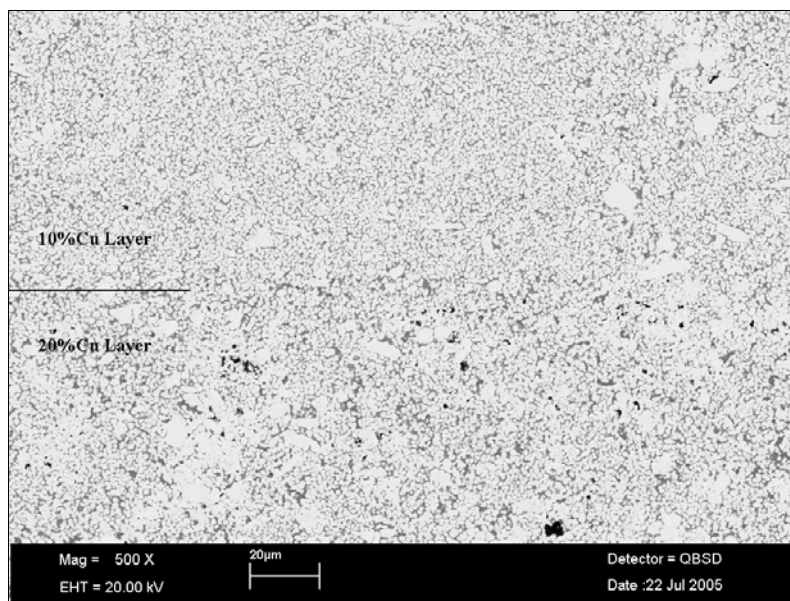


Figure 2.2.2 - Microstructure de la zone de gradient W-Cu 10/20 pds% Cu

Participants CNRS/Université : J.M. Missiaen