

Tests à haut flux d'un composant type ITER équipé de fibres à réseaux de Bragg enfouies.

Y. Anquetin^{1*}, J. Gaspar¹, Y. Corre², C. Pocheau², P. Malard², JL. Gardarein¹, N. Vignal², H. Roche²

¹Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI, 5 rue Enrico Fermi, 13453 Marseille, France

²CEA, Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique, 13108 St-Paul-Lez-Durance, France

*(auteur correspondant : yann.anquetin@univ-amu.fr)

Résumé - Cet article présente des tests à haut flux réalisés sur un composant en tungstène activement refroidi de type ITER équipé de capteurs thermiques de type fibre à réseaux de Bragg. Les tests à hauts flux ont été réalisés au CEA-IRFM dans la station HADES disposant d'un canon à électrons capable de déposer L'objectif des tests est d'évaluer les performances du diagnostic embarqué avec des flux de chaleur représentatifs (jusqu'à 20 MW/m²) avant son exploitation dans le tokamak WEST. Le but de cette étude est de tester l'impact des colles utilisées dans WEST sur la qualité des mesures de température. Le temps de réponse induit par ces colles est évalué et les mesures de température sont comparées aux résultats du modèle thermique du composant afin de valider ses performances.

1. Nomenclature

CFP : Composants Face au Plasma
FBG : Fibres à réseau de Bragg
HADES : High heAt loaD tEst facility
ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor
TC : ThermoCouples
WEST : Tungsten (W) Environnement in Steady state Tokamak

2. Introduction

WEST, pour tungsten (W) Environment in Steady state Tokamak [1], est un tokamak basé à Cadarache dans le sud de la France et ayant pour but de tester et qualifier les technologies prévues pour le projet ITER et particulièrement les Composant Face au Plasma (CFP) [2]. Cette étude porte sur l'un de ces composants dont la fonction est d'extraire le flux de chaleur déposé par le plasma. Ces composants sont prévus pour supporter des flux incident de 10MW/m² en régime continu et 20 MW/m² lors de phases transitoires [2].]. A ces niveaux de flux de chaleur, les contraintes thermomécaniques sont très fortes et peuvent générer des endommagements sur les composants, en particulier la fissuration du tungstène [3]. Le contrôle de échauffement du composant et l'évaluation des flux de chaleur déposés par le plasma représente un double intérêt de sécurité et d'évaluation des performances du tokamak. Afin d'évaluer la tenue thermique de ces composants plusieurs Thermocouples (TC) et Fibres à Réseaux de Bragg (FBG) ont été enfouis dans une gorge 5mm sous la surface exposé au flux de chaleur [4]. Les fibres sont maintenues dans les composants par des colles résistantes aux hautes températures (colles graphite ou céramiques. Lors de la première phase d'exploitation de WEST, il a été observé que la colle graphite utilisée avait un impact conséquent sur le temps de réponse des capteurs

et donc sur la fiabilité des mesures réalisées après plusieurs campagnes expérimentales. Pour cette étude plusieurs colles ont été testées pour fixer la fibre à réseau de Bragg sur différents blocs de tungstène d'une afin d'évaluer l'impact de chacune sur le temps de réponse des mesures ainsi que leur vieillissement lorsqu'elles sont soumises à des flux de chaleur allant jusqu'à 15 MW/m^2 . Ce composant est installé dans la station de test à haut flux HADES (High heAt loaD tESt facility) du CEA-IRFM. L'objectif est de définir le temps de réponse des mesures en fonction de la colle utilisée et de valider le modèle thermique du composant.

Cet article est organisé comme suit : la première section présente la station de test à haut flux de chaleur HADES. Le matériel utilisé pour cette étude (composant, colles et tests réalisés) sont détaillés dans la seconde partie de cet article. La section 3 présente l'analyse du temps de réponse des mesures pour les différentes colles. La section 4 présente la validation du modèle thermique du composant. Finalement les principaux résultats de l'étude sont rappelés dans la conclusion.

3. Dispositif expérimental

3.1. Station HADES

Afin de tester les composants présents dans le tokamak WEST, le CEA-IRFM dispose d'une station de test à haut flux de chaleur nommée HADES. Il s'agit d'un canon à électron couplé à une chambre à vide de 8 m^3 permettant de tester les composants face aux plasmas et d'évaluer leur capacité à évacuer la chaleur ainsi que leur vieillissement lorsque soumis à de hauts flux de chaleur. Cette installation permet de réaliser des expériences avec des flux de chaleur de plusieurs dizaines de MW/m^2 en régime permanent ou jusqu'à 1 GW/m^2 pendant quelques millisecondes. Le système de balayage du faisceau du canon permet de déposer des flux uniformes sur une surface tout comme des flux très piqué. Le faisceau est d'une forme gaussienne et d'un diamètre de 12 mm pour une puissance de 150 kW en régime continu.

Cette station est équipée de différents sous système permettant la réalisation d'une large gamme d'expériences. Pour les expériences relatives à cette étude on soulignera la présence d'une caméra infrarouge pointée sur le composant et permettant de suivre son échauffement en temps réel lors des expérimentations. Ainsi qu'une boucle d'eau pressurisé à 10 bars et $50 \text{ }^\circ\text{C}$ pour le refroidissement du composant.

3.2. Composant type ITER et colles haute températures

Le composant étudié est un CFP Type ITER [5] (Figure 1) constitué d'un ensemble de 35 monoblocs de tungstène assemblés autour d'une canalisation en cuivre ou circule de l'eau pressurisé pour le refroidissement du composant.



Figure 1 : Composant Type ITER équipé d'une FBG enfouie

Pareillement au CFP instrumentés dans le tokamak WEST, une FBG femto-second [6] est enfouies dans une gorge sur le côté des monoblocs et 5 mm sous la surface du composant [7]. Afin de fixer la fibre dans le composant, celle-ci est installée dans un lit de colle résistante aux hautes température présent dans la gorge. On teste 4 colles différentes, 2 colles céramiques et 2 colles graphites également utilisées dans WEST.

Les FBG sont des fibres optiques présentant des gravures sur leur parois interne. Lorsque qu'un faisceau de lumière traverse la fibre, celui-ci est réfléchi à des longueurs d'ondes dépendantes de la température de la fibre aux différentes position des gravures. Lorsque la fibre chauffe, elle se dilate et déforme ainsi les gravures changeant la longueur d'onde réfléchie. En mesurant le décalage de longueurs d'onde on peut alors retrouver la température de la fibre à chaque position de réseau. L'étalonnage de ces fibres est réalisé par le CEA LIST (Saclay) dans un four. Les fibres sont placées à l'intérieur accompagnées de thermocouples à la position des réseaux afin de faire correspondre position du pic et température mesurée. Les mesures sont faites à différentes températures entre 100 et 500°C puis extrapolées suivant une courbe de tendance polynomiale de degré 2.

Ces capteurs présentent plusieurs intérêts en environnement tokamak, contrairement au TC les FBG sont insensibles aux champs magnétiques ce qui permet des mesures fiables lors des charges et décharges des bobines. Ce sont également des capteurs compacts permettant plusieurs mesures (jusqu'à 15 dans WEST) le long d'une seule fibre ce qui limite l'encombrement dans la machine. Finalement, les mesures enfouies (TC et FBG) présentent une bonne synergie avec les diagnostics de thermographie infrarouge. Les mesures locales des TC et FBG donnent une température « vraie » des composants qui peut être comparée avec les mesures de larges surfaces réalisées par thermographie, dépendantes de l'émissivité des composants ainsi que des réflexions présentent dans l'environnement métallique du tokamak [8].

Dans la station HADES, deux thermocouples (type K et type N) permettent de suivre l'échauffement du composant en complément de la fibre.

Pour l'acquisition des mesures de la fibre, un interrogateur spectrale 4 voies est utilisée avec une bande spectrale allant de 1500 nm à 1595 nm. On réalise l'acquisition des températures mesurées par 10 réseaux (r1 à r10) présents sur les monoblocs 15 à 6.

Le dispositif d'acquisition du canon à électron permet de suivre un grand nombre d'informations tels que l'alimentation électrique du canon, la température de l'eau à différents points du circuit de refroidissement (permettant déterminer par calorimétrie le flux de chaleur absorbé par le composant) les mesures des 2 TC, la température et pression dans la chambre... etc.

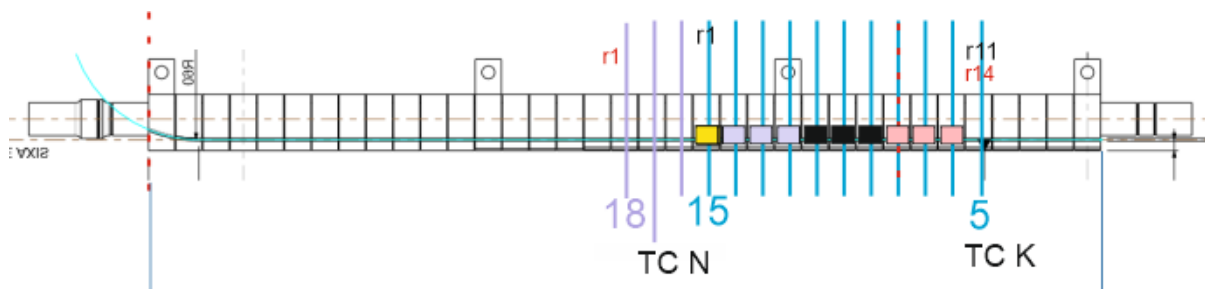


Figure 2 : Organisation des colles sur le CFP.

Colle céramique Céramique 1 (r 1). Pour l'acquisition réseau 1.
Colle céramique Céramique 2 (r 2, 3 et 4). Pour l'acquisition réseau 2, 3, et 4.
Colle graphite Graphite1 (r 5, 6 et 7). Pour l'acquisition réseau 5, 6 et 7.
Colle Céramique/métallique 3 (r 8, 9 et 10). Pour l'acquisition réseau 8, 9 et 10.

On dispose également d'un modèle thermique du CFP. Ce modèle est réalisé avec le logiciel de modélisation par éléments finis Cast3m [9] développé par le CEA. La Figure 2 présente un seul des monoblocs du CFP ensuite répété et assemblé pour construire le CFP complet. On a sur la Figure 2, en vert la partie tungstène massif, en jaune le cuivre « mou » Cu-OFHC et en rouge le cuivre « dur » CuCrZr. Le modèle est composé d'éléments tétraédriques pour la partie haute des monoblocs et prismatique à base triangle pour la partie basse. Ces choix sont motivés tout d'abord par la forme des monoblocs présentant une large partie courbe ainsi que le besoin de précisions plus importantes sur la partie haute. On trouve sur le haut du monobloc l'essentiel des flux de chaleur ainsi que la position du capteur (indiqué par un point rouge sur la Figure 2).

Grâce à la symétrie du CFP le monobloc est coupé en deux afin de gagner en temps de calculs. Les températures calculées avec un modèle monobloc complet ou semi-monobloc ont été comparés et présentent des écarts de températures calculées inférieurs à 2% ce qui constitue une erreur acceptable au vu des gains en temps de calcul.

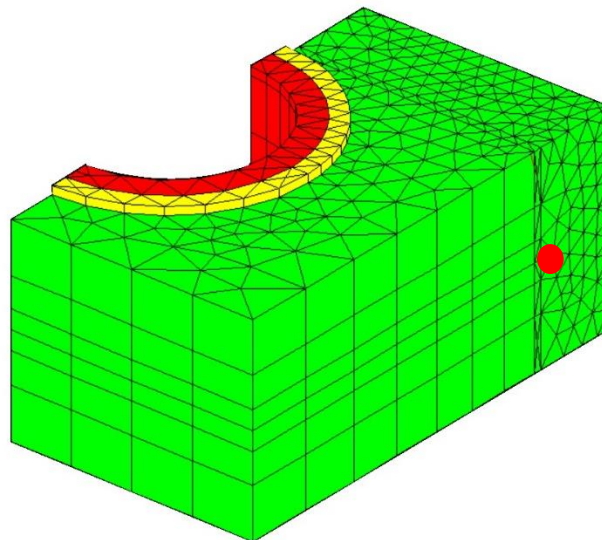


Figure 3 : Modèle d'un demi monobloc (CAST3M)

On réalise pour cette analyse une montée progressive de la puissance déposée de 1 MW/m² jusqu'à 15 MW/m² avec comme puissance intermédiaire 3,5 et 10 MW/m². Pour les tests de montée en puissance on tire pendant 20s sur une zone définie du composant avant de le laisser se refroidir pendant 20s. On réalise 3 séries (de 40s chacune) pour évaluer la répétabilité des mesures. On entrecoupe les tirs de montée en puissance par des tests de temps de réponse tous similaires avec 4.5s de tir à 1MW/m² et 20s de refroidissement répété 4 fois.

4. Estimation du temps de réponse.

Les tests de temps de réponse (4,5s de tir à 1 MW/m² puis 20 s de refroidissement) sont répétés régulièrement tout le long de la montée en puissance. Le premier est réalisé avant de commencer la montée en puissance afin de qualifier l'état initial du système. On obtient les mesures présentées sur la Figure 4.

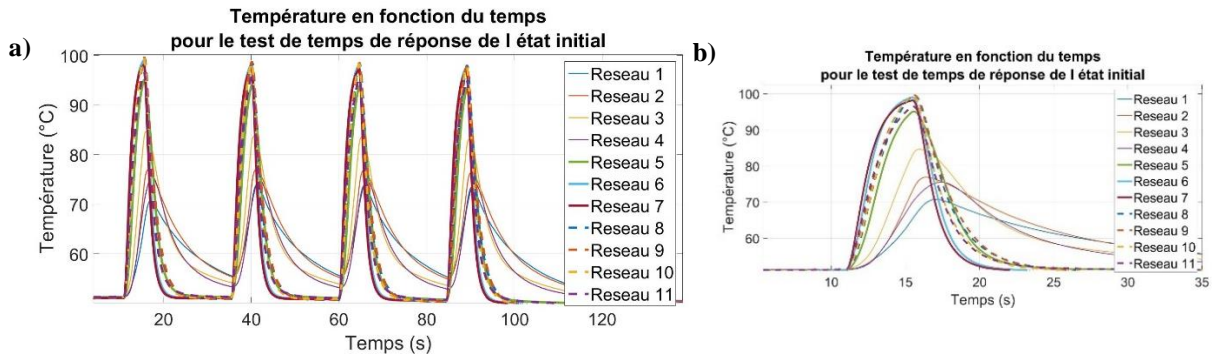


Figure 4 : Température mesurées par les 11 réseaux de la FBG lors du test de temps de réponse de l'état initial a) pour l'ensemble de la séquence, b) pour le premier tir

La Figure 4 montre que les signaux des réseaux 1 à 4 sont beaucoup plus lent et atténués que les autres. Il apparait que les colles céramiques ont beaucoup plus d'impact sur la qualité des mesures que les colles graphite (réseaux 5 à 7). Les réseaux 5 à 11 semblent beaucoup plus rapides et reproduisent bien mieux la dynamique d'échauffement attendue après un créneau de chauffe avec toutefois des performances légèrement meilleures pour les réseaux 5 à 7.

On débute ensuite les tests de montée en puissance (20 s de tir puis 20 s de refroidissement) avec 1,3 et 5 MW/m² réalisés à la suite avant un nouveau test de temps de réponse. On passe alors à 10MW/m² avant de refaire un test de temps de réponse puis de nouveaux 10 MW/m² et un dernier test de temps de réponse.

On présente sur la Figure 5 les résultats des tests de temps de réponse en traçant la température en fonction du temps. Par soucis de clarté on ne présente que les mesures d'un réseau par colle (au lieu de 3).

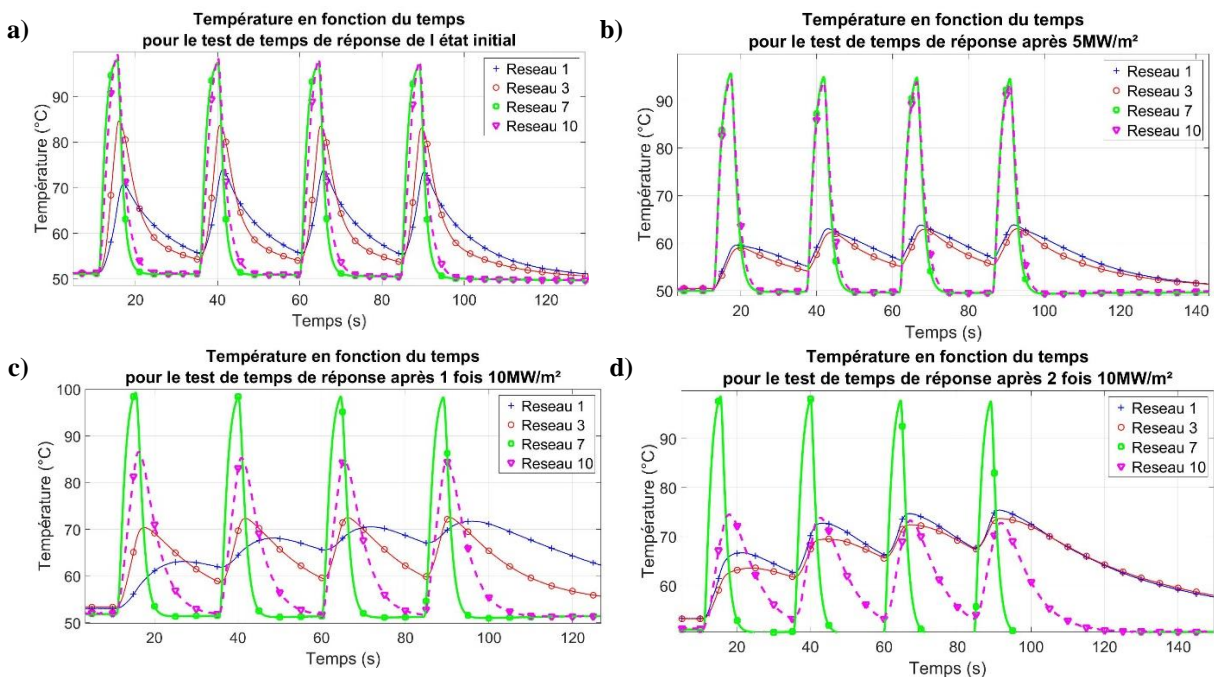


Figure 5 : Evolution des températures en fonction du temps lors des test de temps de réponse pour un réseau par colle, a) état initial, b) après 5MW/m², c) après un premier tir à 10 MW/m² et d) après le second tir à 10 MW/m²

Les résultats présentés sur la *Figure 5* montrent que dès 5 MW/m² les colles céramique présentent d'importantes dégradations causant une forte augmentation du temps de réponse. Les figures *Figure 5.c*) et d) montrent, elles, que la colle céramique/métallique 3 (pour les réseaux 8,9 et 10) semble se détériorer à partir de 10 MW/m² (baisse des températures max et amortissement du signal).

Afin d'évaluer le temps de réponse on compare les mesures réalisées aux températures calculées issues du modèle thermique du composant. On convolue ces températures calculées avec un modèle de réponse indicielle de la forme $u(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ et on cherche à minimiser les écarts entre mesures et modèle en ajustant le paramètre τ . Un exemple d'estimation de ce paramètre est illustré dans la *Figure 6*.

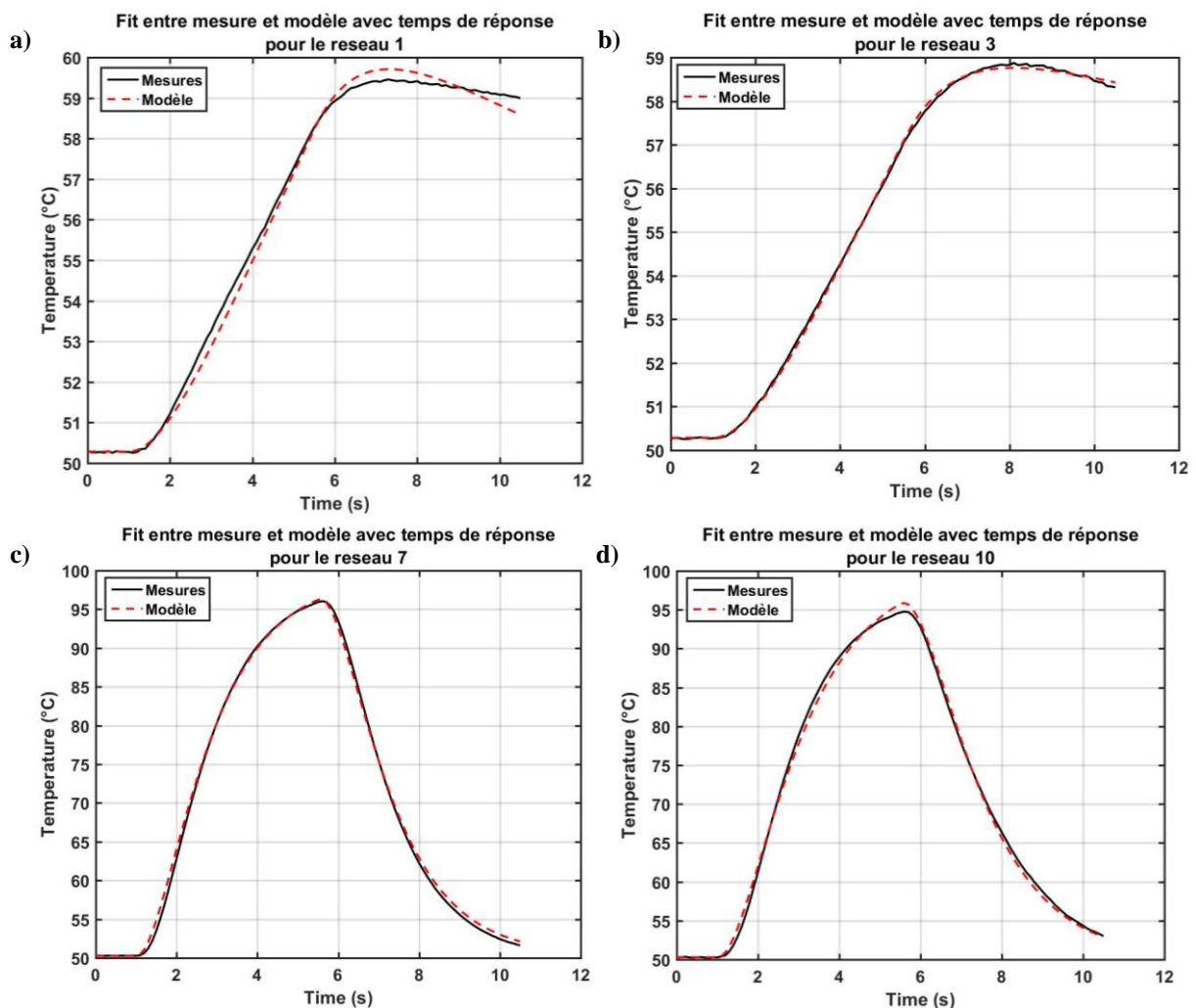


Figure 6 : Comparaison des mesures et le modèle convolué avec les temps de réponses estimés pour les quatre colles différentes après le tir à 5 MW/m², a) réseau 1 (colle céramique 1), b) réseau 3 (colle céramique 2), c) réseau 7 (colle graphite 1), d) réseau 10 (colle céramique/métallique 3)

En comparant la différence entre mesure et modèle convolué, on remarque que l'ajustement est plus ou moins précis selon le réseau et le tir observé. Les réseaux présentant un faible temps de réponse comme le réseau 7 ou 10 sont mieux estimés que les réseaux plus lents collés avec les colles céramiques 1 et 2. Le modèle utilisé ne semble pas être optimal pour les colles lentes. Cependant même si le temps de réponse de chaque réseau n'est pas exactement estimé, cette

méthode permet d'obtenir le bon ordre de grandeur avant d'affiner au besoin le modèle pour préciser les résultats. La Figure 7 reprend les temps de réponse estimés pour chaque réseau au fil des tirs. Par soucis de clarté les estimations sont séparées par colle. Les traits noirs verticaux représentent les différentes séquences (4 tirs par séquence) avec comme présenté sur la Figure 7.c) :

- 1. : Etat initial
- 2. : Post tir à 5 MW/m²
- 3. : Post 1^{ère} séquence à 10 MW/m²
- 4. : Post 2nd séquence à 10 MW/m²

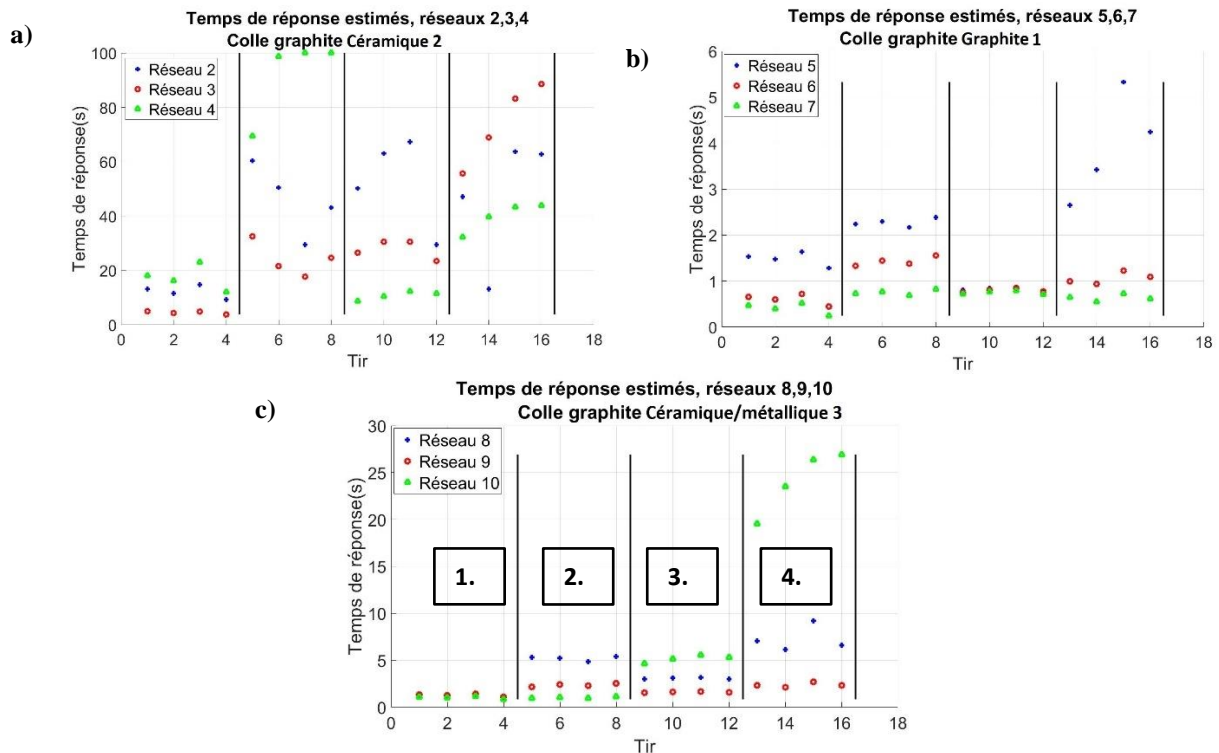


Figure 7 : Temps de réponse estimée pour les différents réseaux au fil des tirs, a) pour la colle Céramique 2, b) pour la colle Graphite 1, c) pour la colle Céramique/métallique 3

Les résultats de temps de réponse du réseau maintenu par la colle 1^{ère} colle céramique ne sont pas présentés dans la Figure 7 car trop important pour pouvoir exploiter les mesures.

La colle céramique Céramique 2, dont les résultats sont présentés sur la Figure 7.a), détériore grandement la qualité des mesures. On observe des temps de réponse compris entre 5 et 20 secondes dans son état initial. De plus ses performances se détériorent progressivement dès les 5 MW/m². On observe une forte augmentation du temps de réponse pouvant aller jusqu'à la centaine de seconde pour le réseau 4 et plus largement une tendance à la hausse pour les trois réseaux.

La colle graphite Graphite 1 (Figure 7.b)) présente les meilleurs résultats, particulièrement le réseau 7 dont le temps de réponse varie faiblement autour de 0,8 secondes. Les réseaux 6 et 7 présentent également une bonne stabilité au fil des séquences ce qui laisse à penser que la dégradation du temps de réponse du réseau 5 après le second tir à 10 MW/m² est dû au collage et non à la colle en elle-même.

Finalement la colle Céramique/métallique 3 (Figure 7.c)) présente dans son état initial des temps de réponse compris entre 1 et 1,5 secondes. Ces résultats semblent cependant se détériorer après le tir à 5 MW/m² et non 10 MW/m² comme supposé en regardant le réseau 10 avec une variation du temps de réponse entre les trois réseaux allant de 1 à 5 secondes. La relative stabilité du réseau 9 questionne cependant sur l'origine de cette dégradation entre la colle et le collage.

Il ressort de cette étude que la colle Graphite 1 présente les meilleures performances du fait de son faible impact sur les mesures et de sa bonne résistance à la fatigue thermique.

5. Validation du modèle thermique du composant Type ITER

Pour valider les performances du modèle numérique du composant on compare la température mesurée par chaque réseau à l'équilibre thermique lors des tests de 20s. Les mesures sont moyennées une fois l'équilibre atteint pour chaque tir de chaque séquence. Les données de calorimétrie de la station HADES permettent de connaître le flux absorbé par le composant. Cette valeur de flux est utilisée dans le modèle pour calculer les températures théoriques à l'équilibre. Le Tableau 1 reprend les résultats obtenus.

Réseau	T modèle (°C)	Moyenne T mesure (°C)	Ecart (%)	T modèle (°C)	Moyenne T mesure (°C)	Ecart (%)	T modèle (°C)	Moyenne T mesure (°C)	Ecart (%)
	P = 0,99 MW/m ²			P = 3,02 MW/m ²			P = 5,07 MW/m ²		
1	103,1	101,5	1,7	226,0	199,5	12	336,8	328,5	3,6
2	103,1	100,1	3,0	225,8	206,2	8,9	336,4	330,3	3,1
3	102,6	100,8	2,0	224,9	207,5	7,9	334,8	342,0	-1,5
4	102,3	98,0	4,5	224,3	198,5	12	333,7	329,7	2,1
5	101,9	99,4	2,7	223,3	207,2	7,2	331,8	353,9	-6,1
6	101,7	99,3	2,6	222,2	200,0	10	330,0	330,9	0,3
7	101,4	98,1	3,6	221,7	196,1	12	329,0	316,5	4,6
8	101,2	101,9	-0,3	220,7	205,3	7,1	327,2	339,4	-3,4
9	100,9	101,1	0,2	220,0	201,1	8,8	326,1	326,7	0,0
10	100,6	101,0	0,0	219,0	206,1	6,1	324,3	334,8	-2,7

Réseau	T modèle (°C)	Moyenne T mesure (°C)	Ecart (%)	T modèle (°C)	Moyenne T mesure (°C)	Ecart (%)
	P = 9,71 MW/m ²			P = 10,56 MW/m ²		
1	603,9	642,9	-6,5	655,3	666,9	-1,8
2	602,8	657,6	-9,1	654,0	685,9	-4,9
3	599,3	651,0	-8,6	650,1	684,5	-5,3
4	596,9	643,9	-7,9	647,5	673,5	-4,0
5	593,0	660,1	-11	643,2	691,7	-7,5
6	589,2	617,5	-4,8	638,9	648,2	-1,5
7	587,0	599,8	-2,2	636,5	620,8	2,5
8	583,2	609,0	-4,4	632,4	611,0	3,4
9	580,9	569,3	2,0	629,8	572,2	9,2
10	577,1	585,0	-1,4	625,6	575,9	7,9

Tableau 1 : Comparaison des température mesurées avec les résultats du modèle numérique

Les résultats du modèle montrent une bonne correspondance avec les mesures expérimentales. L'écart absolu moyen entre le modèle et l'expérience est faible et d'environ 5 % (entre 4 % et 7 % selon le réseau) et aléatoirement répartis entre positif et négatif permet de valider le modèle thermique du composant. Les résultats du tir à 3 MW/m² (3,02 MW/m²) présentent des erreurs particulièrement importantes avec des températures mesurées systématiquement inférieures aux températures issues du modèle thermique. Il est important de noter que les températures calculées sont issues du modèle utilisant un flux déposé parfaitement constant là où les données du canon montre que la puissance peut varier légèrement au cours d'un tir. On peut donc valider les performances de ce modèle pour l'estimation des flux de chaleur.

6. Conclusion

Un composant de type ITER instrumenté d'une FBG a été testé dans la station HADES du CEA-IRFM. Ce canon à électrons a permis de tester le composant dans des conditions représentatives de l'environnement tokamak avec des flux de chaleur importants, jusqu'à 15 MW/m². Ces tests ont permis d'évaluer l'impact des colles céramique et graphite utilisées pour fixer les FBG et TC sur la qualité de leurs mesures. Il ressort de ces tests que les colles céramiques sont peu adaptées pour les mesures de température enfouies dans les CFP. Ces colles engendrent un retard important dans les mesures dû à leur temps de réponse élevé, jusqu'à la centaine de secondes. De plus elles semblent se détériorer pour des flux de chaleur déposés relativement faibles vis-à-vis des besoins pour la fusion nucléaire et plus spécifiquement dans le cas de WEST dont l'objectif est d'obtenir 10 MW/m² de flux déposé pendant plusieurs dizaines de secondes. La colle graphite semble plus adaptée en présentant un temps de réponse acceptable vis-à-vis de la durée des expériences dans WEST (<5 secondes). La colle céramique/métallique 3 présente des résultats très satisfaisant sur les premiers tirs avec un temps de réponse de l'ordre de la seconde. Cependant, elle semble se dégrader de manière importante dès 5 MW/m² de flux déposé. La colle Graphite 1 présente donc les meilleurs résultats (temps de réponse inférieur à 5 secondes) et une bonne tenue en température. Il apparaît également de ces tests que la qualité du collage est également importante et difficilement maîtrisable, tous les réseaux ayant été collé suivant le même protocole.

En parallèle ces tests nous ont permis d'évaluer les performances de notre modèle en comparaison aux données expérimentales. Grâce aux données de calorimétrie, permettant de calculer le flux de chaleur absorbé par le composant, les différents tirs réalisés ont été reproduits en simulation. La comparaison des température mesurées par la fibre et calculées grâce au modèle montre une bonne correspondance avec une erreur moyenne d'environ 5 %. De plus la physique du composant semble bien modélisée comme le montre l'absence de biais entre mesure et modèle.

7. Références

- [1]. Bourdelle, C. *et al.* WEST Physics Basis. *Nucl. Fusion* **55**, 063017 (2015).
- [2]. Bucalossi, J. *et al.* The WEST project: Testing ITER divertor high heat flux component technology in a steady state tokamak environment. *Fusion Engineering and Design* **89**, 907–912 (2014).

- [3]. Diez, M. *et al.* Overview of plasma-tungsten surfaces interactions on the divertor test sector in WEST during the C3 and C4 campaigns. *Nuclear Materials and Energy* **34**, 101399 (2023).
- [4]. Anquetin, Y. Surface heat flux estimation with embedded thermocouples and Fiber Bragg Grating sensor in ITER-like plasma facing components. (2023).
- [5]. Missirlan, M. *et al.* The WEST project: Current status of the ITER-like tungsten divertor. *Fusion Engineering and Design* **89**, 1048–1053 (2014).
- [6]. Liao, C. R. & Wang, D. N. Review of femtosecond laser fabricated fiber Bragg gratings for high temperature sensing. *Photonic Sens* **3**, 97–101 (2013).
- [7]. Corre, Y. *et al.* Integration of fiber Bragg grating temperature sensors in plasma facing components of the WEST tokamak. *Review of Scientific Instruments* **89**, 063508 (2018).
- [8]. Talatizi, C., Aumeunier, M.-H., Rigollet, F., Gerardin, J. & Le Niliot, C. Prédiction de la mesure de température de surface par thermographie infrarouge dans un environnement tout métallique : application à la machine de fusion WEST. *Acte de congrès Société Française de Thermique* 120 (2018).
- [9]. Le Fichoux, E. Présentation et utilisation de CAST3M. (2011).