

Expérience de fusion du tungstène dans le tokamak JET

Jonathan GASPAR^{1*}, Yann CORRE², Mehdi FIRDAOUSS², Jan COENEN³, Daniel IGLESIAS⁴, Patrick BUNTING⁴, Guy MATTHEWS⁴, Karl KRIEGER⁵, Richard PITTS⁶, Scott SILBURN⁴

¹ Aix Marseille Univ, CNRS, IUSTI, Marseille, France

² CEA Cadarache, F-13108 St Paul lez Durance, France

³ Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung – Plasmaphysik, Partner of the Trilateral Euregio Cluster (TEC), D-52425 Jülich

⁴ CCFE, Culham Science Centre, Abingdon, OX14 3DB, UK

⁵ Max-Planck-Institut f. Plasmaphysik, Boltzmannstr. 2, D-85748 Garching

⁶ ITER Organisation, Route de Vinon-sur-Verdon, CS 90 046, F-13067 St Paul-lez-Durance cedex, France

* (auteur correspondant : jonathan.gaspar@univ-amu.fr)

Résumé - Un des enjeux soulevé par la fusion contrôlée par confinement magnétique est l'exploitation des composants face au plasma. Le tungstène (W), un métal hautement réfractaire, a été choisi comme matériau de surface dans le tokamak ITER actuellement en cours de construction sur le site de Cadarache. Un risque majeur pour l'exploitation du futur tokamak ITER est la fusion du tungstène pendant les ELM (Edge Localized Modes), des événements transitoires intenses caractérisés par une expulsion d'une fraction de l'énergie du plasma sur des temps très courts (milliseconde) [1-2]. Des expériences ont été menées dans le tokamak Européen JET (où plusieurs MW sont couplés au plasma pendant plusieurs secondes) pour étudier le comportement du tungstène dans sa phase liquide [3-5]. Un composant spécial avec une protubérance millimétrique a été introduit dans le plasma pour atteindre le point de fusion plus facilement sans prendre de risque accru pour les autres composants. L'objectif du papier est d'évaluer le flux de chaleur déposé sur les deux géométries, avec et sans protubérance respectivement, afin de prédire le flux de chaleur sur les composants dans ITER.

Nomenclature

$q_{//}$ flux de chaleur parallèle, MW/m^2

q_{\perp} flux de chaleur perpendiculaire, MW/m^2

q_n flux de chaleur absorbé, MW/m^2

I_p courant plasma, MA

B_{ϕ} champ magnétique, T

P^{TOT} puissance totale injectée dans le plasma, MW

x' direction poloïdale, m

y' direction toroïdale, m

Sigles et Abréviations

IR Infrarouge

ELM Edge Localized Mode

JET Joint European Torus

FTM Fonction de Transfert de Modulation

Symboles grecs

σ écart-type de la FTM, m

α angle d'incidence entre les lignes de champ magnétique et la surface des lamelles, $^{\circ}$

1. Introduction : description de l'expérience

Le JET (Joint European Torus) est un tokamak (grand et petit rayons du tore: $R=3,4$ m et $r=0,8$ m respectivement) qui a la particularité comme ITER d'avoir une forme allongée et un divertor axisymétrique situé en bas de la machine. La fonction du divertor est d'isoler le plasma de coeur de la paroi interne en dirigeant les flux vers une région conçue pour recevoir

les particules et extraire la puissance. Dans sa configuration ILW (ITER like wall), les matériaux utilisés dans le JET sont les mêmes que ceux prévus dans ITER, du béryllium dans l'enceinte et du tungstène dans le divertor. Le divertor de JET est constitué d'un ensemble de tuiles en graphite recouvertes d'un fin dépôt de tungstène (partie verticale) et d'un ensemble de lamelles en tungstène massif (partie horizontale). Les composants étudiés dans ce papier sont des lamelles en tungstène massif, longues de 58 mm dans la direction radiale, larges de 5,5 mm dans la direction toroïdale et haute de 40 mm dans la direction verticale, assemblées côte à côte avec un espace inter composant d'un millimètre [6]. Les lamelles standards sont toutes profilées pour protéger le bord d'attaque du flux de chaleur incident. La surface est légèrement arrondie avec une forme parabolique, du côté exposé au flux de chaleur incident [6].

L'objectif de l'expérience du JET est de créer expérimentalement et de façon contrôlée la fusion du tungstène afin de, premièrement, valider les codes de calculs utilisés pour ITER et deuxièmement, étudier les conséquences pour la survie du plasma ainsi que l'évolution du composant endommagé. Pour cela JET possède un atout unique, l'intensité des ELM (environ 300 kJ par ELM) qui est proche de la taille des ELM mitigés (ELM dont l'intensité a été diminuée en modifiant le plasma de bord) attendus dans ITER. Pour augmenter le chargement thermique et atteindre la température de fusion du tungstène (3422°C), une lamelle "spéciale" avec une partie protubérante pénétrant de plus d'un millimètre dans le plasma et avec une inclinaison en surface plus marquée (+15°) par rapport aux autres lamelles a été installée dans le divertor en 2015. Les deux géométries, « standard » et « spéciale », sont présentées figure 1.

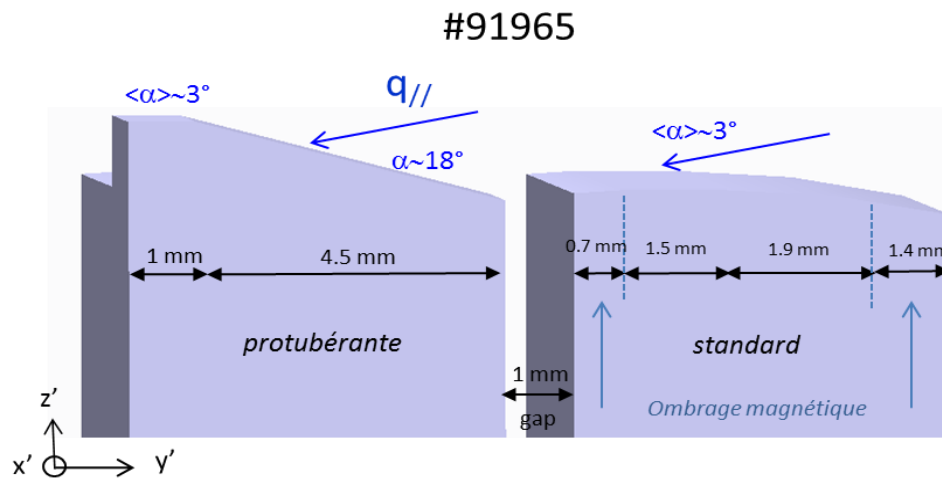


Figure 1 : A gauche, lamelle spéciale avec protubérance et inclinaison (pente de 15° par rapport au plan horizontal). A droite, lamelle standard avec une partie plate de 1.5mm puis une partie arrondie avec angle variable et ombrage magnétique sur les bords.

Les lamelles sont observées par deux caméras IR haute résolution (KL9A et KL9B) sensibles dans la gamme 3-5 μm , 240x320 pixels, pixel pitch = 30 μm , située en haut de la machine en visée directe avec un objectif pour l'agrandissement. La résolution spatiale dans le plan objet est $r = 0.83 \text{ mm/pixel}$ et la fréquence d'acquisition est de 2,7 kHz pour la caméra qui observe la lamelle « spéciale » (KL9A). La stratégie expérimentale est tout d'abord d'amener et de stabiliser la température du composant dans la période inter-ELM autour de 2500°C et puis d'ajuster l'intensité des ELM pour avoir une excursion de température supplémentaire de l'ordre de 1000°C (excursion très brève, de l'ordre de la milliseconde). L'opération s'est déroulée avec succès puisque plusieurs dizaines de cycles au-dessus du point de fusion ont été comptabilisés, sans conséquence visible pour la stabilité du plasma. Les paramètres de l'expérience (#91965) sont : $I_p=2,5 \text{ MA}$ (courant plasma), $B_\phi=3,25 \text{ T}$ (champ

magnétique toroïdal), $P^{\text{TOT}}=27$ MW (puissance totale). La figure 2 montre la température évaluée avec le système de thermographie IR sur les deux lamelles, « spéciale » et « standard », respectivement. Pour synchroniser les ELM avec les instants des mesures IR, ces derniers sont aussi détectés avec un signal de spectroscopie visible avec un filtre sur une raie du béryllium ($f=10$ kHz).

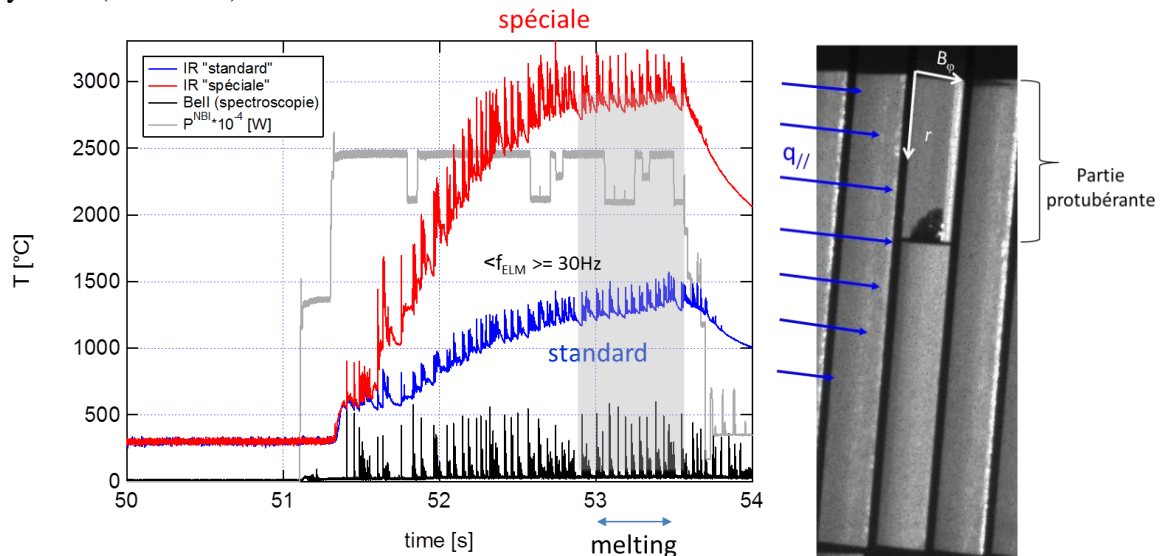


Figure 2: Températures de surface mesurées sur les lamelles « spéciale » et « standard », puissance couplée au plasma par injection de neutres (P^{NBI}) et mesures de spectroscopie visible sur une raie du Beryllium, lors de l'expérience de fusion du tungstène (à gauche respectivement en rouge, bleu, gris et noir). Photographie caméra ASTROCAM vue de dessus après l'expérience (à droite).

La durée totale de l'expérience est 2,5 s. On estime qu'on atteint le point de fusion du tungstène après environ 1,5 s. En surface la température passe de 200°C mesuré avant l'expérience à 2500°C environ après 1.5s de chauffe. La preuve de la fusion du tungstène durant l'expérience est apportée par un système d'imagerie après l'expérience (figure 2). Seule une petite fraction de la partie protubérante a fusionné, environ 15 %.

2. Echauffements induits par les ELM

Lors du changement de phase, nous savons que les propriétés optiques du tungstène sont modifiées. L'émissivité baisse de façon significative et la mesure par thermographie infrarouge est délicate. Pour évaluer la taille des ELM, nous avons sélectionné un ELM qui précède l'instant où débute la fusion du tungstène, plus précisément à $t=52,048$ s tandis que la fusion du tungstène a été observé pour $t>53,1$ s. La perte d'énergie associée aux ELM est évaluée avec un système de mesure magnétique permettant de suivre l'évolution de l'énergie stockée dans le plasma. En moyenne nous trouvons $\langle \Delta W \rangle \sim 250$ kJ pour les ELM de cette expérience. La durée des ELM est évaluée précisément à partir des mesures de spectroscopie visible qui possède la plus haute résolution temporelle (figure 3), on trouve environ 1 ms ce qui est aussi cohérent avec la mesure thermique de la caméra KL9B qui observe une autre région du divertor (avec des lamelles « standards ») avec une fréquence d'acquisition plus élevée (9 kHz).

La figure 4 montre les échauffements maximum mesurés sur 4 lamelles (3 standards et une spéciale) pendant l'ELM sélectionné. Ces échauffements ont été mesurés à la position poloïdale $x' = 13,4$ mm (où $x' = 0$ mm correspond au bord côté intérieur, c'est-à-dire fort champ magnétique, de la lamelle). Les mesures réalisées sur les 3 lamelles standard avec les 2 vues IR différentes nous donnent un échauffement moyen d'environ 375°C. Tandis qu'un

échauffement d'environ 690°C est mesuré sur la partie protubérante (pente à 15°). Le but de cette étude est de déterminer le flux de chaleur maximum déposé pendant un ELM ainsi que son mode de dépôt à la surface d'une lamelle.

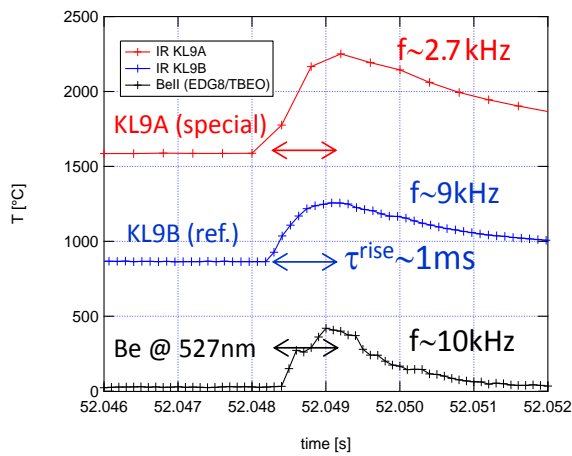


Figure 3 : Durée d'un ELM. Echauffements d'un ELM (caméras KL9A et KL9B) et mesure de spectroscopie visible (EDG8) à 527 nm (raie du Béryllium une fois ionisé).

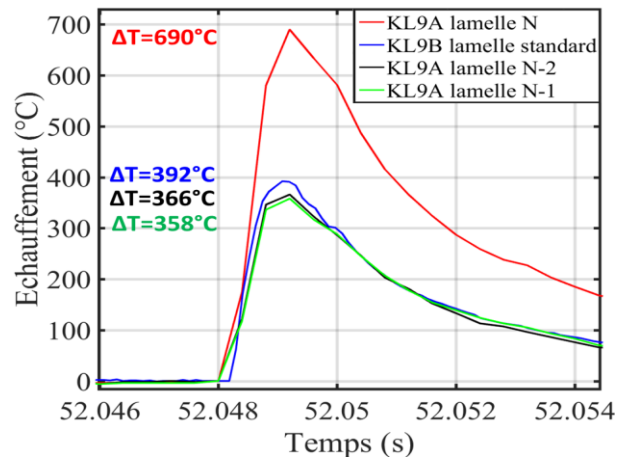


Figure 4 : Echauffements mesurés par KL9A et KL9B sur 4 lamelles (1 spéciale et 3 standards)

3. Description du calcul du flux de chaleur sur les deux géométries

3.1. Modélisation du dépôt de chaleur

L'approximation de la trajectoire centre-guide suppose que les particules suivent parfaitement les lignes de champ magnétique, c'est-à-dire qu'on néglige le mouvement cyclotronique (appelée également approximation « optique » par analogie avec l'optique géométrique). Le flux de chaleur déposé sur un objet peut alors s'exprimer comme la projection du flux parallèle aux lignes de champ magnétique ($q_{//}$) à laquelle on ajoute un flux perpendiculaire (q_{\perp}) rassemblant les contributions additionnelles qui dérogent de la projection « optique » (rayonnement du plasma, particules neutres issues de l'échange de charges, effet du rayon de Larmor des ions). Le flux absorbé (q_n) par le composant peut être calculé avec l'expression suivante :

$$q_n = q_{//} \cdot \sin \alpha + q_{\perp} \quad (1)$$

où α désigne l'angle d'incidence entre la ligne de champ magnétique et la surface de l'objet.

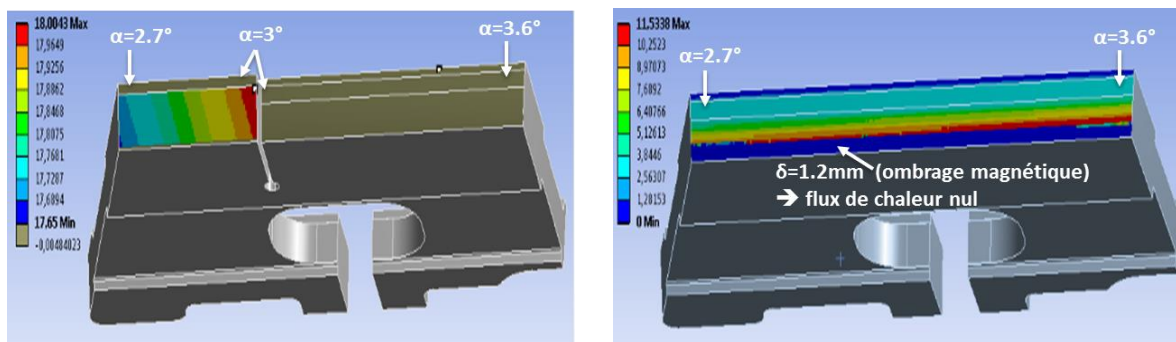


Figure 5 : Angles d'incidence entre les lignes de champ magnétique et les surfaces des lamelles

(échelle de couleur en °). Angles calculés par le logiciel PFCFlux [7] (modélisation de l'équilibre magnétique dans un environnement matériel défini par CAO).

La figure 5 montre les angles d'incidence ainsi que les zones ombrées (n'interceptant aucune ligne de champ magnétique) calculés avec le logiciel PFCFlux [7] pour la lamelle spéciale (à gauche) et une lamelle standard (à droite). Sur les parties plates des deux lamelles les angles d'incidence varient de $2,7^\circ$ du côté interne à $3,6^\circ$ du côté externe. Sur la partie inclinée de la lamelle spéciale, les angles sont entre $17,6^\circ$ du côté interne et 18° proche de la rainure avec une très faible variation dans la direction toroïdale (inférieure à $0,05^\circ$). Tandis que sur les parties arrondies, c'est-à-dire dans la région parabolique, les angles d'incidence varient de $2,7$ à $11,5^\circ$ au plus fort de l'arrondi. L'ombrage magnétique sur la lamelle standard, induit par la lamelle précédente, est d'environ $\delta=1,2$ mm sur la partie arrondie (en supposant un alignement parfait avec la lamelle précédente).

3.2. Modélisations thermiques et données synthétiques IR

La modélisation thermique est réalisée par la méthode des éléments finis à partir de la géométrie réelle 3D des différentes lamelles en utilisant le logiciel ANSYS V17.2. Le flux de chaleur est calculé en utilisant la projection optique telle que décrite dans l'équation (1). Les températures de surface calculées par ANSYS sont ensuite convoluées avec la Fonction de Transfert de Modulation (FTM) de l'instrument (caméra IR + optique) afin de prendre en compte la dégradation de la mesure induite par les multiples effets associés au système optique, à la résolution spatiale finie ou à l'électronique de la caméra IR. La FTM totale du système IR peut être modélisée par une Gaussienne avec un écart type σ [8]. Pour le système IR KL9A du JET utilisé lors de cet expérience, on évalue la valeur de σ à environ la taille du pixel projeté dans le plan objet, soit $\sigma=0,83$ mm. Une étape nécessaire pour déterminer le flux de chaleur déposé pendant l'ELM sélectionné (figure 4) est d'initialiser le calcul du flux de chaleur avec des températures initiales cohérentes en niveau et distribution pour les différentes lamelles. Pour cela, l'échauffement est modélisé du début de l'expérience ($T_0=250^\circ\text{C}$ à $t=51,3$ s) jusqu'au début de l'ELM avec un flux surfacique équivalent regroupant le flux inter-ELM et le flux durant les ELM. On obtient la répartition de température tracée en figure 6, pour les trois lamelles successives (la « spéciale » N et deux « standards » N-1 et N-2), à l'instant précédent l'ELM ($t=52,048$ s).

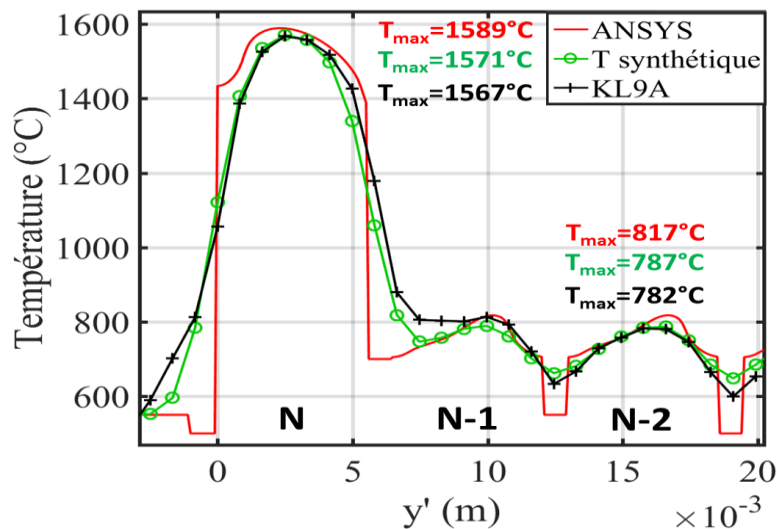


Figure 6 : Répartition de la température suivant la direction toroïdale à $t=52,048$ s, précédent l'ELM étudié.

Les données synthétiques IR, en vert, sont la convolution du calcul ANSYS, en rouge, avec la FTM du système KL9A décrit précédemment. On observe un bon accord entre les données synthétiques et les mesures, notamment pour la lamelle spéciale (N) ainsi que pour la lamelle standard (N-2). Cette distribution des températures sera utilisée par la suite comme condition initiale pour déterminer le flux de chaleur déposé durant un ELM.

4. Résultats expérimentaux : estimation du flux de chaleur dans un ELM

4.1. Hypothèse de la projection « optique » pure ($q_{\perp}=0$)

En première approximation, nous supposons que le flux de chaleur suit parfaitement la projection « optique » (soit $q_{\perp}=0$ MW/m²). Après itérations distinctes sur les deux géométries, c'est-à-dire minimisation des écarts entre la mesure et la modélisation, nous trouvons un flux de chaleur parallèle $q_{\parallel}=1200$ MW/m² pour la lamelle spéciale (N) et $q_{\parallel}=2000$ MW/m² pour la lamelle standard (N-2). Les températures calculées avec ces deux flux sont illustrées sur la figure 7. Pour la lamelle « spéciale » on observe un écart d'environ 40°C entre le calcul ANSYS (rouge) et les températures synthétiques (magenta), donc une faible influence de la résolution spatiale sur la mesure IR au milieu de la lamelle (notons que ces effets sont plus prononcés sur le bord). Par ailleurs, l'angle d'incidence varie très peu dans la direction toroïdale (moins de 0,05°), en conséquence le flux déposé sur la pente est quasiment homogène sur la surface. Il résulte que l'estimation du flux absorbé sur la partie protubérante est relativement précise (effet instrumental négligeable et flux homogène). Sur la lamelle « spéciale », on obtient un flux absorbé $q_n \approx 370$ MW/m² pendant la durée de l'ELM, soit une milliseconde.

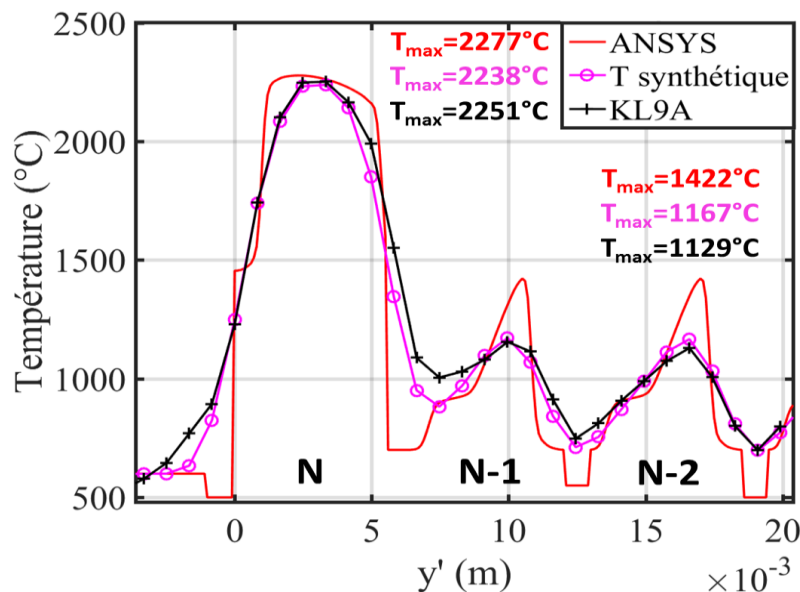


Figure 7 : Température fonction de la direction toroïdale à la fin de l'ELM à $t=52,049$ s, calculs réalisés avec l'approximation optique avec $q_{\parallel}=1200$ MW/m² pour la lamelle spéciale (N) et 2000 MW/m² pour les lamelles standard (N-1 et N-2).

Pour la lamelle « standard » N-2 (située en amont par rapport à la lamelle « spéciale »), l'effet instrumental est plus important. Cet effet est illustré par les différences entre les courbes rouge (calcul ANSYS) et violette (synthétique) sur la figure 7. Le profil de température obtenu avec ANSYS indique un fort gradient de température ($\sim 100^{\circ}\text{C}/\text{mm}$) et un maximum à 1422°C . Cette distribution de température, très inhomogène cette fois, est induite

par l'importante variation de l'angle d'incidence dans la direction toroïdale, passant de $2,7^\circ$ à $11,5^\circ$, ainsi que la présence d'une zone ombrée magnétiquement d'environ 1,2 mm sur la droite de la lamelle où le flux absorbé est considéré nul (en suivant l'hypothèse de la projection « optique »). On obtient ainsi un flux absorbé q_n variant de 94 MW/m^2 sur la partie plate à 380 MW/m^2 au plus fort de l'arrondi. Après convolution avec la FTM du système IR, on obtient finalement un maximum à 1167°C , soit une atténuation proche de 17 %, une valeur en accord avec la mesure à 1129°C . La simulation est obtenue avec $q_{//} = 2000 \text{ MW/m}^2$, soit environ 67 % de plus que celui précédemment estimé sur la lamelle « spéciale ». Ces résultats indiquent que le dépôt de chaleur durant un ELM ne suit pas l'approximation de la projection « optique » pure. Par conséquent, l'étape suivante consiste à introduire un flux de chaleur qui déroge à l'approximation de la projection « optique » (q_{\perp}).

4.2. Projection « optique » avec un flux de chaleur perpendiculaire ($q_{\perp} \neq 0$)

La mesure IR étant peu influencée par les problèmes de résolution spatiale sur la lamelle « spéciale » (large pente de 4,5mm avec un angle d'incidence quasiment constant, donc un flux de chaleur quasiment homogène), la détermination du flux absorbé sur cette lamelle est relativement robuste. Le flux absorbé $q_n \approx 370 \text{ MW/m}^2$ déterminé précédemment est valide, dans cette section on relâche simplement la balance entre les composantes parallèle ($q_{//}$) et perpendiculaire (q_{\perp}) afin d'obtenir un bon accord sur les deux géométries.

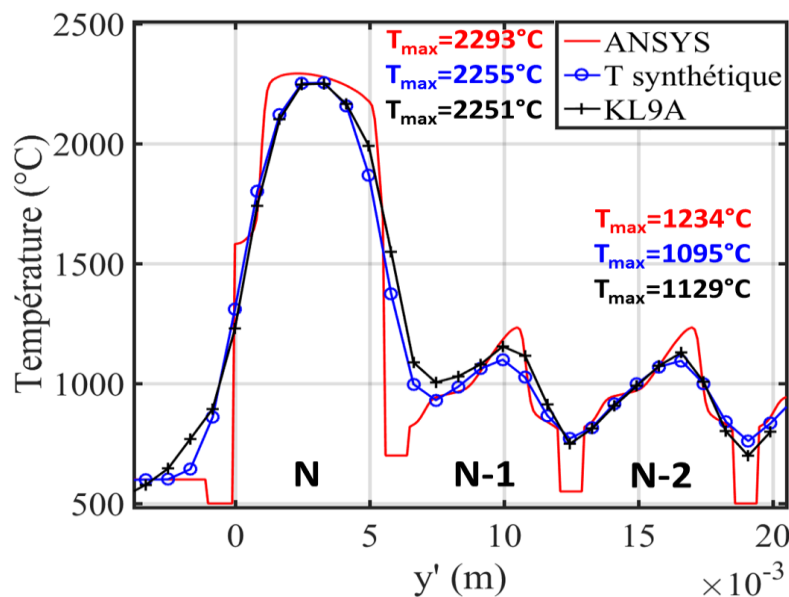


Figure 8 : Température fonction de la direction toroïdale à la fin de l'ELM à $t=52,049 \text{ s}$, calculs réalisés avec $q_{//} = 1000 \text{ MW/m}^2$ et $q_{\perp} = 70 \text{ MW/m}^2$ pour les deux lamelles.

Après itérations, nous obtenons un bon accord pour les deux lamelles avec $q_{//} = 1000 \text{ MW/m}^2$ et $q_{\perp} = 70 \text{ MW/m}^2$ comme illustré sur la figure 8. Sur la lamelle « spéciale », cela signifie que 300 MW/m^2 sont projetés magnétiquement et 70 MW/m^2 ne suivent pas les lignes de champ magnétiques (soit 19 % du flux total absorbé sur la lamelle protubérante avec la forte inclinaison). Pour ce qui est de la lamelle « standard », le flux projeté varie de 50 MW/m^2 sur la partie plate jusqu'à 200 MW/m^2 sur la partie arrondie, auquel il faut ajouter 70 MW/m^2 de flux transverse sur la totalité de la surface (zone ombrée magnétiquement comprise). Ceci nous amène donc à un flux absorbé total variant de 120 MW/m^2 sur la partie

plate jusqu'à 270 MW/m² au plus fort de la partie arrondie (avec respectivement 58 % et 35 % du flux total absorbé qui déroge à l'approximation de la projection « optique »).

5. Conclusion

Nous avons évalué le flux de chaleur déposé par un même ELM sur les deux géométries de lamelles présentes dans le divertor de JET. Sur la partie protubérante de la lamelle « spéciale », compte tenu de la faible variation des angles d'incidence dans la direction toroïdale et de la précision de la mesure IR (effet associé à la résolution spatiale négligeable), nous obtenons un flux absorbé homogène en surface d'amplitude 370 MW/m² pendant la durée de l'ELM, c'est-à-dire 1 ms. Les deux hypothèses de projection, avec et sans flux perpendiculaire ont été étudiées grâce à la présence des deux géométries (protubérance avec forte inclinaison et surface arrondie). Cette étude a pu mettre en évidence que le flux de chaleur durant un ELM ne suit pas l'approximation optique pure. L'introduction d'une composante perpendiculaire est nécessaire pour reproduire les mesures pour les deux géométries. Ce flux perpendiculaire peut provenir de différents phénomènes non modélisés ici (rayonnement du plasma, particules issues de l'échange de charges, effet du rayon de Larmor des ions ou phénomène de gaine électrostatique à proximité de la paroi). Dans les conditions de l'expérience, le flux perpendiculaire représente environ 20 % du flux total absorbé sur la lamelle « spéciale » et entre 35 % (partie plate) et 58 % (au plus fort de l'arrondi) sur les lamelles « standards ».

A la vue de ces résultats, deux principales perspectives apparaissent. La première est d'étendre cette analyse à plusieurs ELM afin de confirmer le résultat obtenu lors de l'analyse de l'ELM considéré ici. La seconde est de déterminer la nature du flux perpendiculaire observé dans cette étude. Pour cela une première étape sera de réaliser des calculs de dépôts de flux avec la prise en compte des rayons de Larmor des ions.

Références

- [1] A. Loarte et al. Progress in the ITER Physics Basis, *Nucl. Fusion* 47 (2007) S203
- [2] G. Federici et al. Assessment of erosion of the ITER divertor targets during type I ELMS, *Plasma Phys. Control. Fusion* 45 (2003) 1523
- [3] R.A. Pitts et al. A full tungsten divertor for ITER: Physics issued and design status, *J. Nucl. Mater.* 438 (2013) S48
- [4] J.W. Coenen et al. ELM-induced transient tungsten melting in the JET divertor, *Nucl. Fusion* 55 (2015), 023010
- [5] G. Arnoux et al. Thermal analysis of an exposed tungsten edge in the JET divertor, *J. Nucl. Mater.* 463 (2015) 415
- [6] Ph. Mertens et al. A bulk tungsten divertor row for the outer strike point in JET, *Fusion Engineering and Design* 84 (2009), 1289-1293
- [7] M. Firdaouss et al. Modeling of power deposition on the JET ITER like wall using the code PFCFlux, *J. Nucl. Mater.* 438 (2013) S536-S539
- [8] Y. Corre et al. Methodology for heat flux investigation on leading edges using infrared thermography, *Nucl. Fusion* 57 (2017) 016009

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide du gouvernement français, gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du projet Investissements d'Avenir A*MIDEX portant la référence n° ANR-11-IDEX-0001-02.