

Estimation des propriétés thermiques des dépôts carbonés recouvrant le LPT de Tore Supra à partir de températures de surface mesurées lors de décharges plasmas

Sophie CARPENTIER^{1*}, Yann CORRE¹, Gwenaël DUNAND¹, Jean-Laurent GARDAREIN¹, Christophe LE NILIOT², Victor MONCADA¹, Roger REICHLE¹, Fabrice RIGOLLET², Jean-Marcel TRAVERE¹

¹ Association Euratom-CEA, DSM/DRFC, Centre de Cadarache, 13108 St-Paul-Lez-Durance, France

² Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille, I.U.S.T.I, UMR CNRS N°6595, Technopôle de Château Gombert, 5 Rue Enrico Fermi, 13453 Marseille Cedex 13, France

* (auteur correspondant : sophie.carpentier@cea.fr)

Résumé - Le tokamak Tore Supra est dédié à l'étude de décharges plasma de longues durées. La surveillance infrarouge des composants face au plasma constituant l'intérieur de la machine est un outil de sécurité essentiel. La présence de dépôts carbonés plus ou moins adhérents sur certaines zones des composants complique l'estimation du flux de chaleur incident provenant du plasma. On propose d'exploiter ici des relevés de températures infrarouges acquis in situ pour estimer les propriétés thermiques des dépôts recouvrant le plancher de la machine, puis d'appliquer un calcul de flux adapté dans ces zones en utilisant la méthode des quadripôles thermiques [1], [2].

Nomenclature

| | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------|
| $e_{\text{dépôt}}$ | épaisseur du dépôt carboné, m | HR | Haute Résolution |
| h | coefficient d'échange convectif, $W/m^2.K$ | IR | Infrarouge |
| $c_{\text{dépôt}}$ | capacité thermique du dépôt carboné, $J/m^2.K$ | LPT | Limiteur Pompé Toroïdal |
| C_p | chaleur massique du dépôt carboné, $J/kg.K$ | TS | Tore Supra |
| $T_{\text{init}}, T_{\text{fluide}}$ | température initiale du LPT et de l'eau ($120^\circ C$) | <i>Symboles grecs</i> | |
| Q | flux de chaleur surfacique, MW/m^2 | $\rho_{\text{dépôt}}$ | masse volumique, kg/m^3 |
| <i>Sigles et Abréviations</i> | | ΔT | échauffement surfacique du LPT mesuré par IR, $^\circ C$ |
| Rc | résistance de contact, $K.m^2/W$ | | |

1. Introduction : la surveillance infrarouge du LPT de Tore Supra

Les plasmas chauds étudiés sur Tore Supra (TS) sont obtenus par chauffage d'un mélange gazeux de deutérium, confiné magnétiquement dans une enceinte torique de $25 m^3$ (fig.1a). Les températures au centre d'un plasma de fusion sont généralement de l'ordre de plusieurs keV (plusieurs dizaines de millions de degrés). Les températures au bord du plasma sont beaucoup plus basses (~ 10 à $100 eV$) mais suffisamment importantes pour causer des dommages aux matériaux qui le confinent. Le tokamak Tore Supra est principalement dédié à l'étude de la physique et des technologies permettant de réaliser des plasmas chauds de longue durée. Les composants face au plasma (CFP) constituant la paroi interne de la machine sont à ce titre activement refroidis par une boucle à eau pressurisée, afin d'évacuer la chaleur et ainsi stabiliser leur température.

Pour assurer la sécurité du tokamak, Tore Supra est équipé d'endoscopes infrarouges mesurant l'échauffement en surface des CFP. L'étude présentée ci-après concerne plus particulièrement l'analyse des flux de chaleur déposés en surface du principal CFP de la machine : le Limiteur Pompé Toroïdal (ou LPT). Ce dernier est composé de 576 aiguilles (fig.1b) en cuivre dur (CuCrZr) recouvert de tuiles réfractaires en composites de fibre carbone (CFC) avec une couche intermédiaire en cuivre doux (OFHC). Dans chacune des aiguilles sont usinés deux canaux dans lesquels circule de l'eau pressurisée, permettant d'évacuer la

chaleur déposée lors des plasmas. Juxtaposées, ces aiguilles forment un disque annulaire de $7,5 \text{ m}^2$, constituant le plancher de la machine. Pendant les décharges le plasma est en appui sur le LPT qui permet ainsi d'évacuer environ 50 à 60% de la puissance totale injectée suivant le scénario expérimental étudié. L'étude des images infrarouges permet alors de visualiser l'empreinte du plasma à sa surface et peut en conséquence fournir des informations pertinentes sur les phénomènes de transport et de dépôt de chaleur dans la machine.

Les CFP sont dimensionnés pour différentes valeurs seuils en températures et flux imposés, afin d'éviter la fonte ou la sublimation des matériaux ainsi que l'ébullition dans les canaux de refroidissement. Les températures et flux de chaleur limites pour le LPT sont respectivement de 1200°C et 10 MW/m^2 . Un endoscope équipé d'une caméra IR haute résolution (HR) permet de viser un secteur d'environ 20° du Limiteur (soit 32 aiguilles). La résolution spatiale de cette visée HR est estimée à 4 mm (pour une erreur sur la température mesurée $< 5\%$), les filtres sont centrés sur une longueur d'onde de $4,5 \mu\text{m}$, la fréquence d'acquisition est de 50 Hz et le temps d'intégration de la caméra varie entre 11, 65 et $340 \mu\text{s}$ afin d'obtenir une bonne dynamique dans une gamme comprise entre 120 et 1800°C [3].

2. La problématique des dépôts carbonés

La difficulté rencontrée pour quantifier les flux incidents sur le LPT de Tore Supra est liée à la présence de dépôts carbonés formés au cours de l'exploitation de la machine. Durant une décharge, des ions et atomes de carbone sont arrachés à la paroi puis se redéposent sur les composants après circulation dans le plasma. Les zones où le nombre d'atomes déposés est supérieur au nombre d'atomes arrachés sont clairement visibles sur les images IR du Limiteur (fig.2a). Ces zones (notées A) ne sont généralement pas en contact direct avec le plasma mais exposées principalement au rayonnement. Elles sont dominées par le phénomène de redéposition des particules de carbone qui s'accumulent en couches plus ou moins épaisses et adhérentes à la surface des tuiles de CFC. A contrario, du fait de la configuration magnétique du Tore, les zones B voisines sont directement exposées au plasma. Les flux de chaleur et les mécanismes d'érosion sont importants sur ces zones où le carbone ne s'agglomère alors qu'entre les tuiles de CFC (effet appelé « gaufrier »). La dernière zone (notée C) est une aire ombrée magnétiquement, les tuiles y sont soumises à de très faibles flux surfaciques et mécanismes d'érosion-redéposition, leur état de surface évolue peu.

La présence de dépôts de carbone dans les zones A empêche la mesure des températures de surface des tuiles de CFC. Les dépôts, même si le flux de chaleur reçu est faible, peuvent chauffer extrêmement rapidement et plus intensément que le substrat activement refroidi. La présence de ces couches sur des zones largement étendues complique l'interprétation des images car elles empêchent d'assimiler directement la cartographie des températures mesurées à celle des dépôts de flux.

3. Traitement des images infrarouges

3.1. Recalage de la géométrie par warping et extraction de l'information en température

Pour évaluer le flux incident en surface du composant, il est nécessaire de mener un calcul prenant en compte les différences d'état de surface observées. La création d'un nouvel outil de reconnaissance de forme sur les images du LPT offre la possibilité de repérer, sélectionner et trier les pixels associés à chaque zone (tuile « propre » ou dépôt carboné) [4]. Le procédé de déformation d'image utilisé (*warping*) permet dans un premier temps de recalibrer l'ensemble des images d'un film IR dans la géométrie 2D réelle du composant (les effets de grandissement optique, variables suivant la zone observée, entraînent en effet une déformation

non homothétique du secteur du LPT visé par la caméra). Les images IR sont ensuite discrétisées de manière automatique, le plus petit élément de discrétisation à la surface du LPT est alors une tuile de CFC (fig.2b). Cette discrétisation des images permet dans un second temps d'extraire automatiquement un relevé temporel de la température IR de chaque tuile au cours du choc et de trier les éléments par état de surface (tuile « propre » -situées dans les zones dominées par l'érosion- ou tuile entièrement recouverte de dépôt). Seule la température moyenne atteinte par 3 à 4 pixels sélectionnés au centre de chaque élément est considérée, afin de s'affranchir de l'effet gaufré dans les zones « propres » (les pixels entre deux tuiles perturbés par la présence de dépôts seront ainsi ignorés dans ces régions).

Dans la suite de cette étude, l'appellation « tuile » désigne le système multicouches « CFC-OHFC-CuCrZr-Eau » de dimension $l=22,5 \text{ mm} * L=25,7 \text{ mm} * h=28 \text{ mm}$ (voir coupe du LPT présentée à la fig.1). La visée IR haute résolution permet la surveillance d'environ 600 éléments « tuiles ». Le calcul de cartographies complètes 2D de flux incident en surface du LPT nécessite alors, pour chaque choc, le traitement d'autant de relevés de température, et ce pour chaque pas de temps d'acquisition (un film IR compte de 1000 à 18000 images). Le choix de la méthode de calcul de flux s'est porté sur une technique à la fois flexible (pouvant s'adapter à chaque état de surface) et rapide (afin de limiter les temps de calculs).

3.2. Calcul de flux surfacique par déconvolution des températures IR

Chaque élément « tuile » peut être modélisé comme un système linéaire soumis à un flux déposé entrant (Q) ayant pour effet l'échauffement de la surface observé par IR ($\Delta T(t)=T(t)-T_{\text{init}}$, où $T_{\text{init}}=T_{\text{fluide}}=120^\circ\text{C}$, la température du composant étant uniforme et fixée par la température de l'eau dans le système de refroidissement au temps $t=0$). La théorie des systèmes linéaires permet d'estimer les flux surfaciques par déconvolution de la mesure $\Delta T(t)$ avec la réponse impulsionnelle du système (la tuile multicouches), calculée ici à l'aide du formalisme des quadripôles thermiques [1], [2]. La figure 3 illustre le calcul des flux de chaleur surfaciques sur les zones du LPT non recouvertes de dépôts carbonés, pour une décharge plasma où la puissance injectée dans la machine était de 2 MW en régime stationnaire. Cette cartographie est obtenue par interpolation 2D des flux calculés au cœur de chaque tuile « propre » (gaufré exclu du calcul, cf. §3.1). Cette cartographie permet de retrouver une distribution de flux incident conforme à la topologie magnétique de Tore Supra. Les flux maximum atteints dans les zones B repérées en pointillées, voisines des dépôts carbonés, sont compris entre $0,6$ et $1,7 \text{ MW/m}^2$ pour le scénario expérimental étudié.

4. Etude des dépôts de carbone depuis un jeu de données expérimentales

4.1. Principe de la méthode

Dans le cas d'une tuile recouverte de dépôt carboné, la déconvolution d'un relevé de températures IR, sans prise en compte de cet état de surface particulier, conduit à des niveaux de flux aberrants et à un comportement dynamique lors des phases transitoires n'ayant aucune justification physique (figure 4). L'estimation du flux reçu par une tuile recouverte de dépôt implique donc d'adapter la modélisation par quadripôles successifs utilisée pour calculer la réponse impulsionnelle du système. Deux quadripôles face avant sont alors ajoutés au schéma initial (cf. modèle quadripôles, figure 5). De récentes études ont montré que les dépôts les plus épais observés en partie basse de la machine ont une épaisseur maximale de $800 \mu\text{m}$ [5], pour une conductivité de l'ordre de 50 W/m.K [2]. Il a donc été choisi de modéliser le comportement thermique de la couche par une « capacité » telle que $c_{\text{dépôts}}=(\rho.C_p.e)_{\text{dépôts}}$ (la fréquence d'acquisition des données IR empêche l'étude du comportement du dépôt aux temps très courts où cette hypothèse de couche fine et très conductrice n'est plus vérifiée). Le

second quadripôle ajouté, de type « résistance pure », caractérise la résistance thermique de contact (notée R_c) entre le dépôt et le substrat en CFC.

Le calcul des flux surfaciques en zone de dépôts nécessite l'identification des paramètres thermophysiques $c_{\text{dépôts}}$ et R_c intervenant dans le calcul de la réponse impulsionnelle du système « tuile+dépôts ». Les niveaux de flux de chaleur atteints sur ces zones en conditions expérimentales étant inconnus, seule l'étude de la dynamique des signaux IR peut apporter une indication sur les propriétés du dépôt. Afin d'identifier les paramètres caractérisant ces couches, il est proposé d'étudier la phase transitoire de montée en puissance lors d'une décharge plasma. L'évolution temporelle du dépôt de puissance étant supposée identique sur l'ensemble de la surface du Limiteur, le principe de la méthode proposée s'appuie sur la minimisation par l'algorithme de Gauss-Newton des écarts entre la dynamique de flux calculé sur une tuile propre et ceux calculés sur les tuiles recouvertes de dépôts. La fonction à minimiser revient à :

$$f(c_{\text{dépôts}}, R_c) = \|Q_{\text{norm tuile « propre »}(t) - Q_{\text{norm tuile dépôts}}(t, c_{\text{dépôts}}, R_c)\|^2 \quad (1)$$

Le modèle ($Q_{\text{norm tuile « propre »}$) est lui-même une donnée traitée provenant de la déconvolution de la température de surface d'une tuile propre de référence. L'ensemble des flux (flux « modèle » et flux en zones de dépôts) sont estimés pour un même coefficient d'échange convectif fixé à une valeur standard de $30\,000\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Afin de s'affranchir du niveau (inconnu) de flux déposé et ne considérer que la dynamique, les flux comparés sont normalisés tels que : $Q_{\text{norm}}(t) = \frac{Q(t)}{Q_{\text{stat}}}$ où Q_{stat} est le flux maximum atteint en stationnaire.

4.2. Estimation des paramètres $c_{\text{dépôts}}$ et R_c

La figure 6 illustre le tracé en valeur absolue des coefficients de sensibilité du modèle proposé aux paramètres $c_{\text{dépôt}}$ et R_c . Cette figure montre que les deux paramètres sont décorrélés (pour les valeurs imposées ici, par anticipation des résultats obtenus sur les données expérimentales). L'algorithme d'optimisation proposé précédemment a tout d'abord été appliqué à des températures simulées (avec ajout d'un bruit gaussien centré d'écart-type $0,4^\circ\text{C}$, écart-type du bruit observé sur les températures expérimentales). Ces premiers calculs ont mis en évidence qu'une identification simultanée de $c_{\text{dépôt}}$ et R_c est possible depuis des données bruitées, si les flux résultants sont préalablement filtrés avant application de l'algorithme. Une moyenne glissante sur cinq points permet de converger vers les valeurs initiales de propriétés utilisées pour les simulations avec une précision de $\pm 6\%$ (les données simulées sont obtenues par application d'un flux imposé en entrée du modèle quadripôles). La méthode d'estimation, appliquée à des données expérimentales, fournit les résultats suivants :

| | $c_{\text{dépôts}}=(\rho\cdot C_p\cdot e)_{\text{dépôts}}$ estimée ($\text{J/m}^2\cdot\text{K}$) | R_c estimée ($\text{m}^2\cdot\text{K/W}$) | $e_{\text{dépôts}}$ supposée (μm) | $C_{p_{\text{dépôts}}}$ supposée ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$) | $\rho_{\text{dépôts}}$ déduite hyp. (kg/m^3) |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Tuile T1 | 923 | $3,5\cdot 10^{-5}$ | 200 | 1130 | 4084 |
| Tuile T2 | 156 | $6,9\cdot 10^{-4}$ | 300 | 1130 | 460 |

Tableau 1 : Propriétés des dépôts déduites de l'optimisation sur la dynamique de flux attendue

La tuile T3 (fig.2) est la tuile propre considérée pour calculer le modèle. Les tuiles T1 et T2 sont recouvertes de dépôts. Les valeurs expérimentales des propriétés thermiques obtenues sont cohérentes avec l'état de surface observé sur les deux tuiles. La tuile T1 présente un dépôt fin et plus adhérent que le dépôt de type « flake » (décollé) de la tuile T2, ceci est confirmé par les résistances obtenues. Les masses volumiques de chaque dépôt ont été déduites en supposant la capacité calorifique des deux couches égale à celle du substrat en

CFC (1130 J/kg.K). A partir des hypothèses faites sur les épaisseurs de chaque couche, nous obtenons une masse volumique du dépôt fin (T1) plus de deux fois supérieure à celle du CFC (1720 kg/m^3). Cette valeur est élevée mais peut toutefois correspondre à l'hypothèse d'un dépôt très cohésif, et donc plus dense que le composé de fibres de carbone (la masse volumique estimée est fortement dépendante de l'épaisseur supposée, il est à noter que cette dernière peut également être sous estimée). La masse volumique supposée du dépôt T2 est quant à elle bien plus faible, ce qui reste en accord avec la logique puisque le dépôt observé sur cette tuile est épais, désagrégé et donc plus poreux que le CFC. Les flux surfaciques déduits après estimation de ces propriétés thermiques atteignent à l'état stationnaire un niveau de $1,2 \text{ MW/m}^2$ (tuile T1) et $0,7 \text{ MW/m}^2$ (T2) (contre $0,76 \text{ MW/m}^2$ reçus par la tuile T3 située en zone « propre »). Ces niveaux de flux sont plus importants que ceux attendus initialement dans une région où la redépôt du carbone prédomine. Ils indiquent que les dépôts proches des zones de forts flux incidents (régions B) sont soumis à la fois au rayonnement et au flux de chaleur convecté par le plasma.

5. Conclusion et perspectives

La méthode d'estimation proposée fournit de premières valeurs de résistance de contact et de capacité thermique des dépôts recouvrant le Limiteur de Tore Supra. Il est possible, grâce à ces premières estimations, d'en déduire les flux de chaleur surfaciques résultants dans ces zones. La perspective de ce travail est de compléter l'étude comparative des propriétés obtenues afin d'étudier l'hétérogénéité des dépôts carbonés observés en surface du Limiteur (couches fines, épaisses, adhérentes, décollées), et d'étudier l'évolution de ces propriétés après plusieurs heures de plasma. Ces valeurs, obtenues empiriquement par exploitation des données IR in situ, seront également comparées aux propriétés déduites d'expériences flash effectuées en laboratoire sur des échantillons de tuiles du LPT recouvertes de dépôts.

Références

- [1] D.Maillet, S.André, J-C.Batsale, A.Degiovanni, C.Moyne, Thermal quadrupoles, *Wiley & Sons, New-York* (2000)
- [2] J-L.Gardarein, Analyse par thermographie infrarouge de la puissance déposée sur des surfaces recouvertes de carbone dans les tokamaks, *Mémoire de thèse, Univ. Aix-Marseille I* (nov. 2007)
- [3] D.Guilhem et al., Tore-Supra infrared thermography system, a real steady-state diagnostic, *Fusion Engineering and Design*, vol. 74, p. 879-883 (2005)
- [4] S.Carpentier et al., Interprétation des images infrarouges appliquée à la surveillance des composants face au plasma du tokamak Tore Supra, *SFT 2007*
- [5] E.Delchambre, Origine de la déformation spectrale de la luminance proche infrarouge des composants en carbone de Tore Supra, *Mémoire de thèse, Univ. Aix-Marseille I* (nov. 2003)

Figures

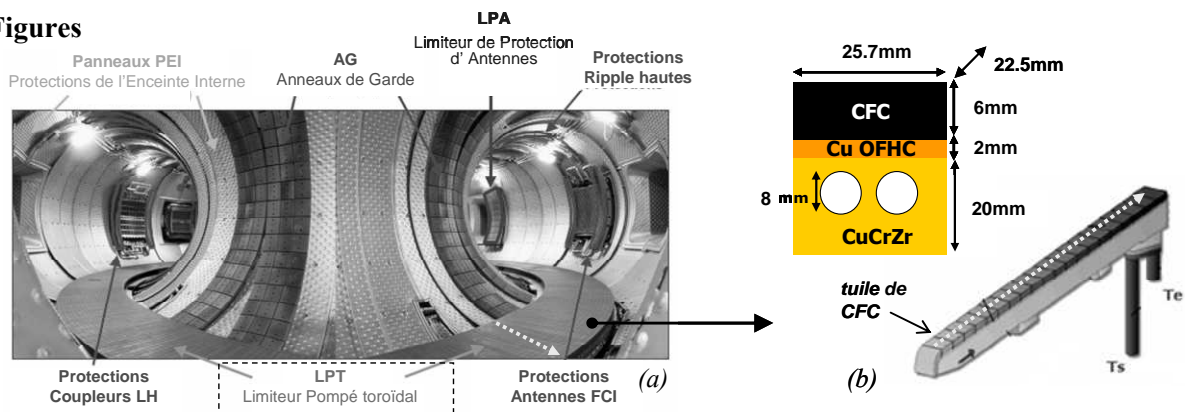


Figure 1 : (a) CFP constituant la paroi interne de Tore Supra - (b) Profil et coupe d'une aiguille du LPT ($L_{tot}=495 \text{ mm}$, $L=25.7 \text{ mm}$, $h=28 \text{ mm}$)

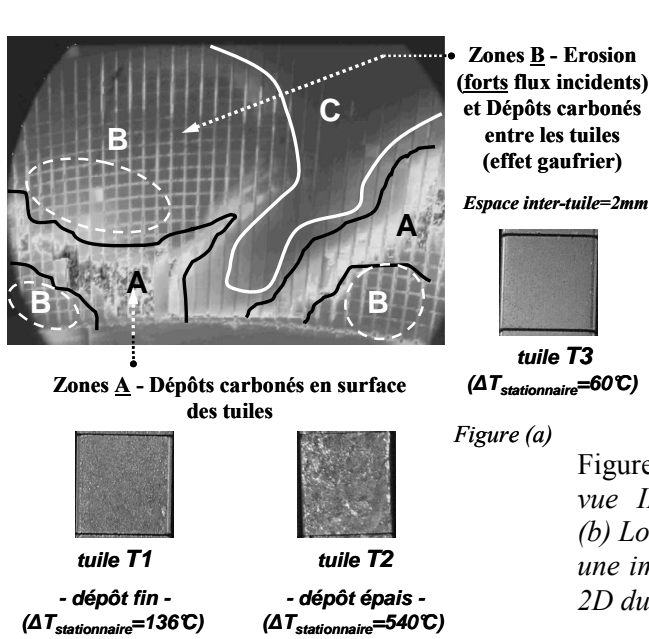


Figure (a)

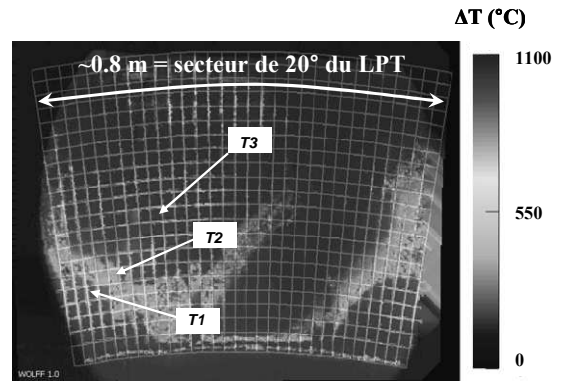


Figure (b)

Figure 2 : (a) Repérage des dépôts carbonés sur une vue IR du LPT (choc 39862, 2 MW injectés) - (b) Localisation des tuiles étudiées (T1,T2,T3) sur une image IR recalée par warping dans la géométrie 2D du LPT, puis discrétisée

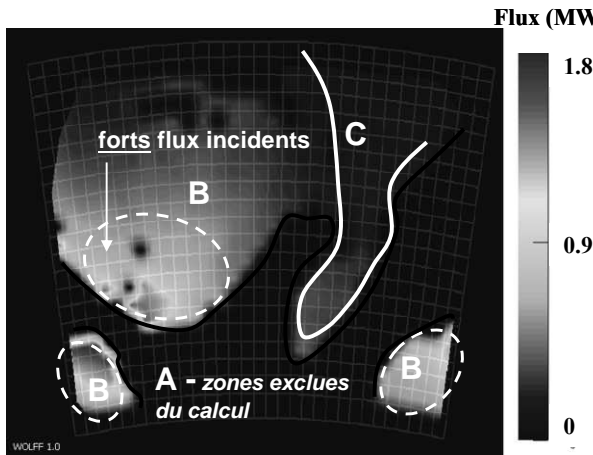


Figure 3 : Cartographie de flux surfacique (visée IR HR) - LPT de Tore supra - hors zones de dépôts carbonés (choc 39862, t=20s)

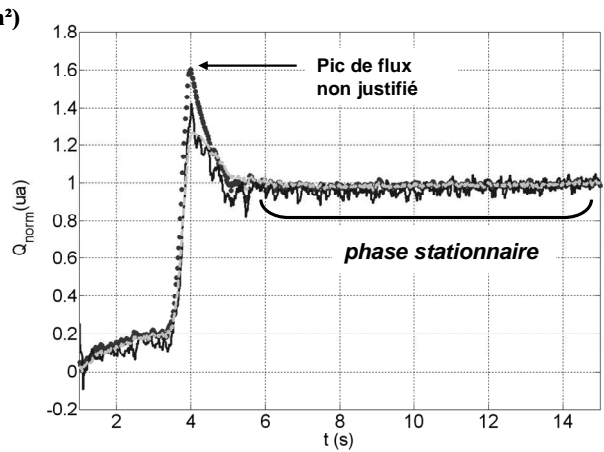


Figure 4 : Q_{norm} obtenus à la montée en puissance (choc 39862) pour la tuile T3 « propre » (—), pour T1 sans prise en compte du dépôt (---), pour T1 avec $R_c=3,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ et $c_{dépôts}=923 \text{ J}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ (—)

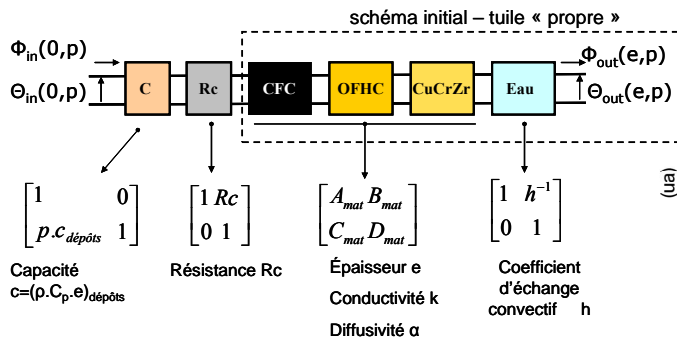


Figure 5 : Schéma quadripôles d'une tuile du LPT, recouverte de dépôt

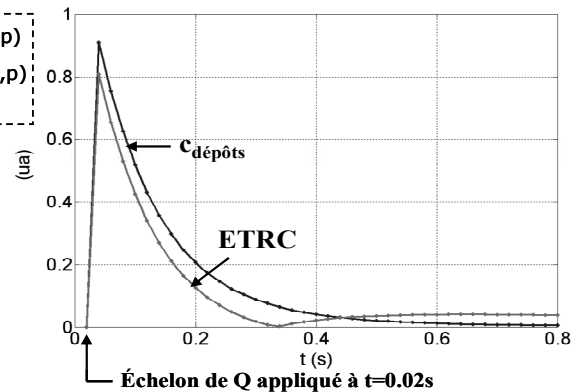


Figure 6 : Coefficients de sensibilité réduits ($Q=1 \text{ MW}/\text{m}^2$, tuile avec dépôt, propriétés : $c_{dépôt}=150 \text{ J}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$, $R_c=7 \cdot 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$)