

# Calcul du profil de flux 2D incident sur les composants face au plasma du Tokamak JET.

Jean-Laurent GARDAREIN<sup>1\*</sup>, Fabrice RIGOLLET<sup>2</sup>, Yann CORRE<sup>1</sup>, Roger REICHLE<sup>1</sup>, Christophe LE NILIOT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEA Cadarache, F-13108 St Paul lez Durance, France

<sup>2</sup>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 : [jean-laurent.gardarein@cea.fr](mailto:jean-laurent.gardarein@cea.fr))

**Résumé** - On présente différentes méthodes de calcul de flux 2D à partir de températures de surface (caméra IR) et en profondeur (thermocouples) provenant de composants internes du tokamak JET. Les données infrarouges sont appliquées comme conditions de Dirichlet dans un calcul direct utilisant les quadripôles thermiques, la forme spatiale du flux obtenue est utilisée pour déconvoluer les températures des thermocouples. Pour stabiliser la solution, on utilise une régularisation de Thikonov. Les calculs sont appliqués sur des données numériques et expérimentales.

## Nomenclature

$Q$  : flux (W/m<sup>2</sup>)

$T$  : température (C)

$h$  : réponse impulsionnelle (C.m<sup>2</sup>/J)

$L$  : largeur de la tuile (m)

$e_i$  : épaisseur de matériau (m)

$a_{x,y}$  : diffusivités thermiques (m<sup>2</sup>/s)

$p$  : variable de Laplace (1/s)

$f(x)$  : forme spatiale du flux

$u$  : réponse indicielle (C.m<sup>2</sup>/W)

*Symboles grecs*

$\Delta T$  : échauffement (C)

$\lambda_{x,y}$  : conductivités thermiques (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

$\alpha$  : variable de Fourier (1/m)

$\tau(x, z, p)$  : transf. de Laplace de l'échauffement (C.s)

$\bar{\tau}(\alpha, z, p)$  : transf. de Fourier-Laplace de l'échauffement (C.s.m)

$\phi(x, z, p)$  : transf. de Laplace du flux (J/m<sup>2</sup>)

$\bar{\phi}(\alpha, z, p)$  : transf. de Fourier-Laplace du flux (J/m)

## 1. Introduction

Les composants face au plasma des machines de fusion contrôlée sont soumis à des flux de chaleur atteignant plusieurs MW/m<sup>2</sup> pendant plusieurs secondes. Le contrôle de ces flux est essentiel pour la survie des matériaux et l'intégrité de la machine. Dans la partie du divertor du tokamak JET (*fig.1a*), les composants face au plasma sont constitués de tuiles en composite carbone, les températures sont mesurées en surface par une caméra infrarouge (IR) et dans le composant par des thermocouples (TC) situés à 1cm de la surface [1]. Le carbone est orthotrope et le dépôt de flux dépend de la position sur la tuile.

Le but de ce travail est de calculer le flux de chaleur déposé par le plasma à la surface d'une tuile au cours du temps. Dans le cas du calcul avec les données IR, la résolution spatiale de la caméra est suffisante pour pouvoir réaliser un calcul direct en imposant les températures de surface mesurées comme conditions de Dirichlet. Cependant, certaines tuiles sont recouvertes de dépôts carbonés dont les propriétés thermiques sont inconnues [2]. Ces dépôts mal attachés au substrat compliquent le calcul du flux de chaleur et nous conduisent à utiliser les thermocouples situés à 1cm de la surface, ces derniers étant peu influencés par l'état de surface de la tuile. Dans le cas du TC, la résolution spatiale de la mesure est insuffisante, une méthode de déconvolution est alors utilisée dans laquelle on introduit une forme spatiale de flux « à priori » [3]. Cette forme est déduite du calcul du flux de chaleur avec les données infrarouges. L'amplitude du flux est calculée à partir du thermogramme fourni par le

thermocouple. La mesure du thermocouple étant réalisée en profondeur, le calcul de flux est un problème inverse et une régularisation par pénalisation est associée à la déconvolution. La méthode (dont le principe est exposé au §2), a été testée dans un premier temps sur des données numériques provenant d'un calcul direct par éléments finis (non présenté dans ce papier). Elle est ensuite appliquée à des mesures de températures expérimentales provenant de tuiles avec et sans dépôts (§3).

## 2. Modélisation thermique et identification des flux

Les tuiles que nous avons étudiées dans ce papier sont présentées sur la figure 1. Le matériau constitutif des tuiles est un composite carbone-carbone orthotrope traversé par des filaments (*dumbbell*) en inconel, qui relie les tuiles au reste de la machine. A 150°C, les propriétés thermiques de ces tuiles sont  $\rho = 1820 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p = 1050 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et  $\lambda = 190 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  [1]. Les dimensions approximatives des tuiles sont :  $L = 18 \text{ cm}$ ,  $e = 4 \text{ cm}$ , et longueur = 30 cm. Ces tuiles sont équipées de deux thermocouples (situés à une profondeur de 1cm) et surveillées à l'aide d'une caméra infrarouge, située dans le plan médian de la machine. Le champ de vision observé avec la caméra infrarouge est séparé, avec l'aide d'un miroir, en deux parties de façon à observer les côtés intérieur (fort champ magnétique) et extérieur (faible champ magnétique) du divertor. Pour le choc étudié (le numéro #58850), 5 paliers de puissance ont été injectés [4]. Les tuiles intérieures et extérieures ont été étudiées. Les tuiles extérieures sont situées dans une zone de fort dépôt de flux de chaleur. Le processus dominant dans cette zone est l'érosion, il n'y a pas de dépôt carboné sur la tuile. En revanche, les tuiles situées du côté intérieur sont dans une zone de faible flux de chaleur. Le processus dominant dans cette zone est la redéposition, la tuile est recouverte d'un dépôt carboné peu adhérent. Le flux est déposé en surface ( $z = 0$ ) et dépend de la position  $x$  sur la tuile. Par ailleurs, il présente une symétrie dans la direction toroïdale (direction  $y$  sur la *fig.1*), qu'il sera donc inutile de prendre en compte dans le calcul. Dans toute la suite, la géométrie exacte de la tuile présentée sur la *fig.1b* est approchée par une géométrie rectangulaire (*fig.1c*) dont les dimensions sont les dimensions moyennes de la géométrie exacte. Le matériau est orthotrope avec des propriétés thermiques identiques dans les directions du calcul  $x$  et  $z$ . En  $x=0$ ,  $x=L$  et  $z=4\text{cm}$ , les surfaces sont supposées adiabatiques, ce qui est une condition aux limites (C.L.) réaliste compte tenu des conditions expérimentales : parois métalliques, vide tertiaire.

### 2.1 Calcul de flux à partir des données infrarouges

Avec les données IR, la résolution spatiale de la mesure est suffisante pour réaliser un calcul direct imposant les températures IR de surface comme conditions de Dirichlet. Pour cela, nous utilisons le formalisme des quadripôles thermiques permettant d'exprimer dans l'espace de Laplace les températures et flux en face avant de la tuile en fonction des températures et flux en face arrière [5]. Dans notre cas, le dépôt de flux surfacique inhomogène conduit à considérer la direction  $x$  et à exprimer ces grandeurs dans l'espace de Fourier-Laplace après avoir effectué une transformée en cosinus sur la variable  $x$ . On obtient ainsi l'expression des échauffements de surface en fonction des flux que l'on souhaite calculer dans l'espace de Fourier-Laplace :

$$\overline{\tau}_{in}(\alpha, 0, p) = \frac{A}{C} \overline{\phi}_{in}(\alpha, 0, p) \quad (1) \quad \text{avec} \quad A = \cosh(\sigma e) \quad C = \lambda_z \sigma \sinh(\sigma e) \quad \sigma = \sqrt{\frac{\lambda_x}{\lambda_z} \alpha^2 + \frac{p}{a_z}}$$

Pour obtenir les flux, on multiplie la matrice représentant le matériau  $C/A$  par la double transformée (Fourier et Laplace) des échauffements expérimentaux de surface. Le retour dans l'espace des positions se fait grâce à la transformée de Fourier en cosinus inverse suivante :

$$\tau(x, z, p) = \frac{1}{L} \bar{\tau}(0, z, p) + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \bar{\tau}(\alpha = n\pi/L, z, p) \cos(n\pi x/L) \quad (2)$$

Le retour dans l'espace temporel se fait avec l'algorithme de Gaver-Stehfest [5]. Cette méthode présente l'avantage d'être rapide. En effet, elle permet d'obtenir en quelques dizaines de seconde une cartographie spatiale et temporelle du flux déposé sur la surface de la tuile à partir des mesures de températures infrarouges.

## 2.2 Calcul de flux à partir des données des thermocouples

Cependant, certaines tuiles du divertor de JET sont recouvertes d'une fine couche de carbone déposée au cours des chocs. Ces couches dont les propriétés thermiques sont inconnues sont souvent très mal attachées au substrat et compliquent ainsi le calcul du flux de chaleur (température élevée pour un flux faible) [2]. L'absence de conditions aux limites à la surface de la tuile nous conduit à utiliser les données complémentaires des TC situés à 1cm de la surface. Deux difficultés majeures se posent alors. D'une part, la résolution spatiale de la mesure par thermocouple (seulement 2 thermocouples pour une largeur de tuile de 18 cm) est insuffisante pour obtenir à la fois l'amplitude et la forme spatiale du flux à chaque instant. D'autre part, la position des TC situés à 1 cm de la surface de la tuile fait que le problème d'estimation du flux incident est un problème inverse. Ces deux difficultés nous conduisent à utiliser pour le calcul de flux à partir des thermocouples, une procédure de déconvolution associée à une régularisation par pénalisation par la méthode de Thikonov [6].

La théorie des systèmes linéaires permet d'exprimer la température  $T(x, z=1cm, t)$  au niveau du thermocouple par la convolution du flux  $Q(x, z=0, t)$  déposé en surface avec la réponse impulsionnelle  $h(x, z=1cm, t)$  du système au niveau du thermocouple, c'est à dire la réponse en température de la tuile au niveau du thermocouple après un Dirac de puissance appliqué en surface. La réponse impulsionnelle  $h(x, z, t)$  du système étant la dérivée temporelle de sa réponse indicielle  $u(x, z, t)$ , une approximation par différences finies permet d'exprimer l'échauffement  $\Delta T(x, z, F)$  à chaque pas de temps  $F$  sous forme matricielle :  $\Delta T = X \cdot Q$  où la matrice  $X$  est une matrice carrée (d'ordre  $F$ ) triangulaire inférieure composée des  $\Delta u(x, z, F) = u(x, z, F) - u(x, z, F-1)$  [7].

La déconvolution consiste alors à exprimer le flux en surface  $Q$  à partir des échauffements mesurés  $\Delta T$ , c'est-à-dire  $Q = X^{-1} \cdot \Delta T$ . Dans le cas de la déconvolution de l'échauffement mesuré par le thermocouple ( $x$  fixé,  $z=e_1$ ), le problème est inverse et la première conséquence est que la matrice  $X$  est mal conditionnée. La méthode de régularisation par pénalisation de Thikonov [6] permet alors d'obtenir une solution stable. Une quasi solution du problème est obtenue à l'aide de la résolution du système linéaire :

$$\hat{Q}_{reg} = (X^t X + \gamma \cdot R^t R)^{-1} \Delta T \quad (3)$$

$R$  est l'opérateur de régularisation et  $\gamma$  un paramètre de régularisation, sa valeur optimale peut être déterminée avec une courbe en  $L$  [8].

Pour construire la matrice  $X$ , il faut calculer la réponse indicielle  $u(x, z=1cm, t)$  de la tuile au niveau du thermocouple, celle-ci est calculée à l'aide de la méthode des quadripôles thermiques. On utilise l'approximation géométrique de la Fig.1c pour obtenir l'expression de l'échauffement au niveau des thermocouples en  $z=e_1$ . La tuile d'épaisseur  $e$  est modélisée par un bi-couche carbone-carbone d'épaisseurs respectives  $e_1$  et  $e_2$ . On obtient alors l'expression dans l'espace de Fourier-Laplace de la température au niveau du thermocouple en fonction du flux déposé en surface et des propriétés du matériau :

$$\overline{\tau_{out1}}(\alpha, e_1, p) = \frac{A_2}{C_1 A_2 + A_1 C_2} \overline{\phi_{in1}}(\alpha, 0, p) \quad \text{avec} \quad \begin{aligned} A_i &= D_i = \cosh(\sigma e_i) \\ C_i &= \lambda_z \sigma \sinh(\sigma e_i) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\lambda_x}{\lambda_z} \alpha^2 + \frac{p}{a_z}}$$

Dans le cas du calcul de la réponse indicielle, le flux déposé en surface  $\overline{\phi_{in1}}(\alpha, 0, p)$ , est la transformée de Fourier-Laplace d'un échelon temporel et d'une forme spatiale dépendant de la coordonnée  $x$ . La faible résolution spatiale de la mesure par thermocouple ne permet pas de déterminer à la fois la forme spatiale et la valeur du flux. La forme spatiale est déduite des images IR, en faisant les hypothèses que la forme spatiale du flux est constante au cours d'un choc et que le dépôt de carbone est homogène sur toute la surface de la tuile

$$Q_{in1}(x, 0, t) = f(x) \xrightarrow{\text{TL}} \overline{\phi_{in1}}(x, 0, p) = \frac{f(x)}{p} \xrightarrow{\text{TF}} \overline{\phi_{in1}}(\alpha, 0, p) = \frac{1}{p} \int_0^L f(x) \cos(\alpha x) dx \quad (5)$$

La transformée inverse de Fourier et de Laplace de la réponse indicielle  $\overline{\tau_{out1}}(\alpha, e_1, p)$  au niveau du thermocouple permet alors de construire la matrice  $X$ .

### 3. Application de la méthode à des données expérimentales

Avant d'appliquer la méthode à des données expérimentales, celle-ci a été testée et validée avec des données numériques produites à partir d'un calcul par éléments finis. La géométrie exacte de la tuile de carbone a été modélisée et un flux semblable à un flux expérimental a été imposé à sa surface. Les températures de surface et en profondeur ont été récupérées et traitées avec la méthode décrite ci-dessus. Le but est de calculer le flux déposé en surface et de le comparer au flux qui avait été imposé dans le calcul par éléments finis. Cette comparaison a permis de valider la méthode.

La méthode ainsi validée a ensuite été appliquée à des données expérimentales provenant des diagnostics infrarouges et thermocouples des tuiles du divertor de JET. Le diagnostic IR (sensible dans la bande spectrale 3-5  $\mu\text{m}$ ) a une résolution temporelle de 15,9 ms et une résolution spatiale de 8mm/pixel. Les thermocouples situés à 1 cm de la surface sont de type K et ont une résolution temporelle de 50 ms. Dans un premier temps, les températures de surface provenant d'une tuile sans dépôts (côté extérieur) sont imposées comme conditions de Dirichlet, on obtient alors une cartographie de flux dépendant de la position  $x$  et du temps  $t$  (Fig.2a). On retrouve les paliers de puissance imposés en temporel (Fig.3b) et une forme spatiale de flux très piquée (Fig.2b) ce qui confirme la nécessité de modéliser la direction  $x$  dans le calcul. L'analyse de la forme spatiale normalisée et moyennée sur tous les pas de temps montre que celle-ci peut-être considérée comme constante au cours du temps. Cette forme spatiale moyennée et normalisée obtenue est ensuite injectée dans le calcul de la réponse indicielle aux coordonnées du thermocouple. Malgré le manque de résolution spatiale, un calcul de flux 2D est alors possible à partir des données expérimentales du thermocouple. L'information sur la forme étant déduite du flux calculé à partir des données infrarouges. On peut alors comparer les allures temporelles du flux obtenu à partir des données infrarouges et celui obtenu avec le thermocouple (Fig.3b). On observe que sur une tuile sans dépôt carboné, les flux obtenus sont très voisins, ce qui permet de nous rassurer sur la qualité des mesures mais aussi sur la méthode de calcul.

La méthode est ensuite appliquée aux données obtenues pour une tuile située dans une

zone ou l'on s'attend à avoir un dépôt de flux nettement moins important que dans le cas précédent. Cependant, c'est dans cette zone que l'on observe l'apparition de couches de carbone très mal attachées au substrat (côté intérieur). Sur la *Fig.4a* sont présentées les mesures de température. On observe sur la *Fig.4b*, les flux calculés avec la même méthode que précédemment mais avec les données provenant de la tuile supposée être recouverte d'un dépôt de carbone mal attaché. Cette fois-ci les flux obtenus avec les données infrarouges et le thermocouple sont très différents. En effet, la température mesurée en surface est perturbée par la présence du dépôt. La non prise en compte de ce dépôt et de la résistance thermique de contact avec le substrat entraîne une surestimation du flux pendant la phase de chauffage qui est ensuite compensée par un flux négatif après la coupure du chauffage.

#### 4. Conclusions et perspectives :

Cette étude a permis de mettre en place une méthode de calcul bidimensionnelle du flux déposé sur les tuiles du divertor de JET présentant l'avantage d'utiliser à la fois les mesures infrarouges et les mesures provenant des thermocouples. On a inversé des thermogrammes relevés par des thermocouples situés à 1 cm de profondeur avec la réponse indiciale d'un bicouche calculée à cette profondeur, en imposant une forme de flux spatiale calculée à partir des données infrarouges. La méthode préalablement testée sur des données numériques, a ensuite été appliquée à des températures expérimentales mesurées par infrarouge et thermocouple. Dans un premier temps, nous avons calculé les flux à partir de l'infrarouge et du thermocouple sur une tuile propre (dépourvue de dépôt). Dans ce cas, les flux trouvés sont très semblables ce qui n'est pas le cas lorsque l'on calcule ces flux sur une tuile avec dépôt. Dans ce cas de figure, on observe une surestimation du flux calculé avec l'IR par rapport au TC. Dans le cas de tuiles avec dépôt de carbone, le calcul du flux de chaleur réalisé avec les données thermocouples est plus fiable.

Les perspectives sont de modéliser un dépôt et une résistance thermique de contact avec le substrat dans le calcul à partir de l'IR. Une procédure de minimisation sera mise en place pour trouver un jeu de paramètres associé au dépôt et à la RTC permettant d'égaliser le flux TC et le flux IR. Les premiers essais réalisés montrent que ces paramètres sont fortement corrélés et permettent de déduire seulement une information. Ceci montre la nécessité de caractériser par ailleurs ces dépôts.

#### Références

- [1] V. Ricardo, W. Fundamenski and G-F Matthews, Reconstruction of power deposition profiles using JET MkIIIGB thermocouple data for ELMy H-mode plasmas, Plasma Phys. Control. Fusion 43 881-906
- [2] P. Andrew et al. 15th PSI conference, Gifu, Japan 27-31 May 2002
- [3] J-L Gardarein et al., Reconstruction de la forme du flux incident sur les composants face au plasma du tokamak JET : approche 2D linéaire, Congrès SFT 2006
- [4] Y. Corre et al., Proc. 30th EPS Conf. St. Petersburg, 27A (2003) 164
- [5] D. Maillet, S. André, J-C Batsale, A. Degiovanni, C. Moyne, Thermal quadrupoles, Wiley & Sons, New-York (2000)
- [6] A. Thikonov, V. Arsenine, Méthode de résolution des problèmes mal posés, Editions de Moscou, 1976.
- [7] N. Ozisik, Heat conduction, John Wiley & Sons, New-York, 1980.
- [8] P. Hansen, D. O'Leary, The use of the L-curve in regularization if discretization of discrete ill-posed problems, SIAM, J. Sci. Comput, 14, pp 1487-1503, 1993.

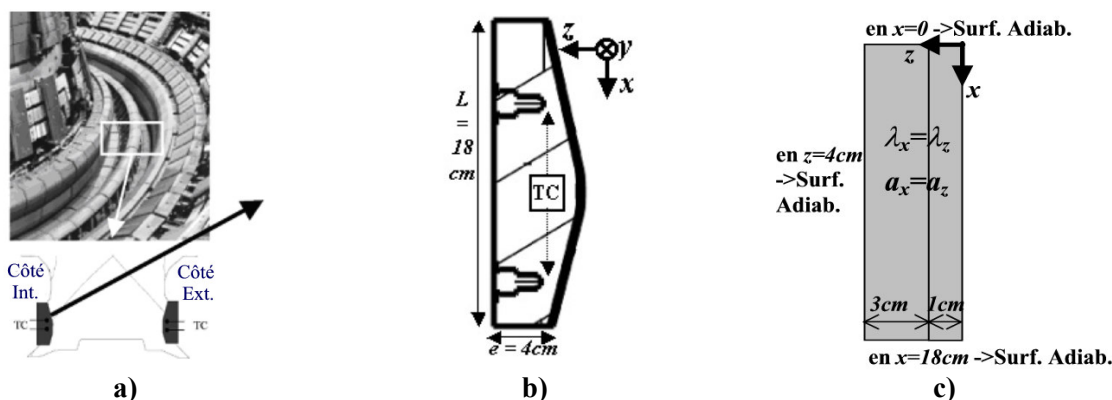


Figure 1 : Tuiles en carbone 'inner' et 'outer' du divertor de JET  
 a. Image visible du divertor b. Géométrie exacte de la tuile intérieure  
 c. Modélisation de la tuile intérieure

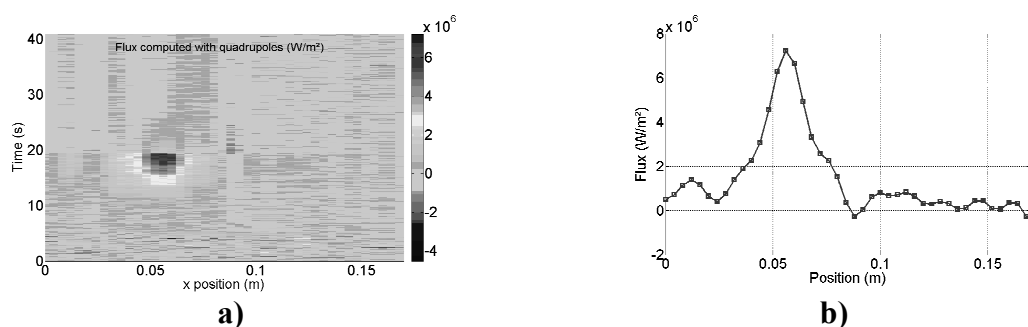


Figure 2 : Flux calculés à partir des données infrarouges expérimentales  
 a. Cartographie du flux en fonction du temps et de la position x  
 b. Flux en fonction de la coordonnée x à l'instant t ou il est maximum

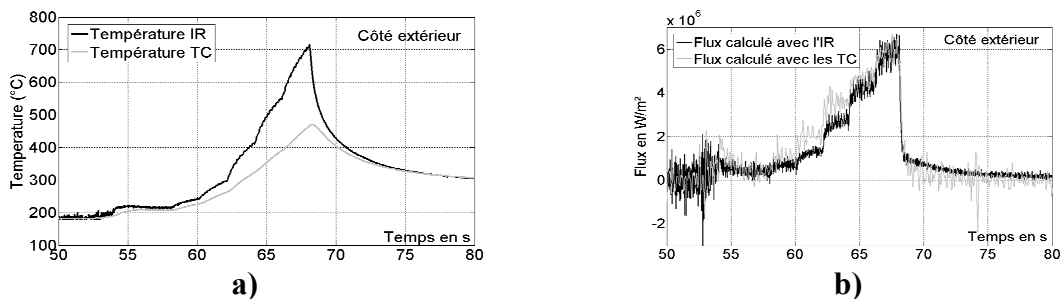


Figure 3 : Comparaison des flux IR et TC sur une tuile sans dépôt  
 a. Températures thermocouple et infrarouge sur la position maximale  
 b. Flux calculés avec les données infrarouges et thermocouples

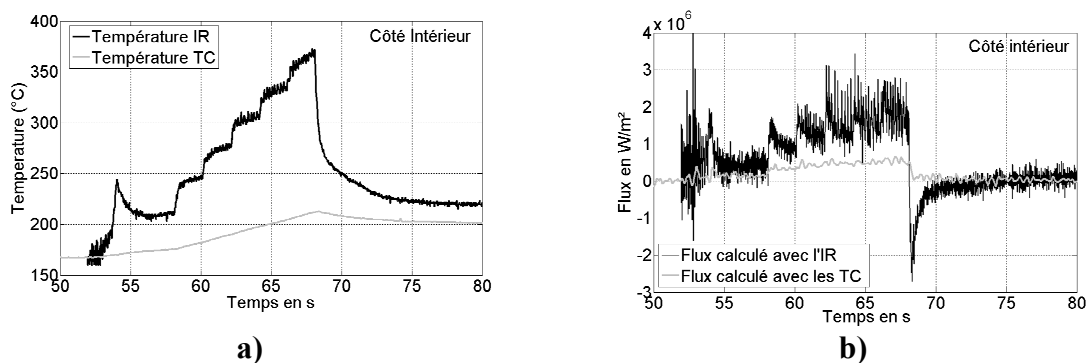


Figure 4 : Comparaison des flux IR et TC sur une tuile avec dépôt  
 a. Températures thermocouple et infrarouge sur la position maximale  
 b. Flux calculés avec les données infrarouges et thermocouple