

Interprétation des images infrarouges appliquée à la surveillance des composants face au plasma du tokamak Tore Supra

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

¹CEA Cadarache, F-13108 St-Paul-Lez-Durance, France

²Ecole 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 - La surveillance infrarouge des composants face au plasma du tokamak Tore Supra est un outil de sécurité essentiel. L'intégrité de la machine n'est en effet assurée si la température et le flux de chaleur déposé sur ces composants ne dépassent pas des valeurs seuils définies au préalable. La présence de dépôts carbonés plus ou moins adhérents complique cependant l'estimation du flux de chaleur dans certaines zones à l'intérieur de la machine. On présente ici une méthode de reconnaissance de forme appliquée au principal composant face au plasma de Tore Supra, le Limiteur Pompé Toroïdal. Cette méthode vise à différencier les pixels des images infrarouges associés aux zones propres de ceux représentant les zones recouvertes de dépôts. Cette différenciation permettra ensuite d'appliquer un calcul de flux incident adapté à chaque cas, en utilisant la méthode des quadripôles thermiques.

Nomenclature

e : épaisseur de matériau

p : variable de Laplace

Symboles grecs

Φ_{in} : flux entrant (modèle quadripôles)

Φ_{out} : flux sortant (modèle quadripôles)

θ_{in} : température d'entrée (modèle quadripôles)

θ_{out} : température de sortie (modèle quadripôles)

λ : conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$

Abréviations

CFP : Composants Face au Plasma

LPT : Limiteur Pompé Toroïdal

HR : Haute Résolution

1. Introduction : la surveillance infrarouge de Tore Supra

1.1. Présentation du diagnostic infrarouge

Les températures au centre d'un plasma de fusion sont généralement de l'ordre de plusieurs keV (soit plusieurs dizaines de millions de degrés). Les températures au bord du plasma sont beaucoup plus basses (quelques dizaines d'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 performants de longues durées. Les composants face au plasma (CFP) sont activement refroidis par une boucle à eau pressurisée, afin d'évacuer la chaleur et ainsi stabiliser leur température. Pour assurer la sécurité des CFP, Tore Supra est équipé d'endoscopes infrarouges mesurant l'échauffement à la surface de ces éléments.

Nous avons choisi d'étudier ici les dépôts de chaleur sur le principal CFP de Tore Supra : le Limiteur Pompé Toroïdal (LPT, fig. 1). Ce dernier est composé de 576 aiguilles (fig.2) 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, les aiguilles forment un disque annulaire de 7,5 m²,

constituant le plancher de la machine. La structure du LPT est divisée en 12 secteurs de 30° chacun (soit 12 sous-ensembles de 48 aiguilles).

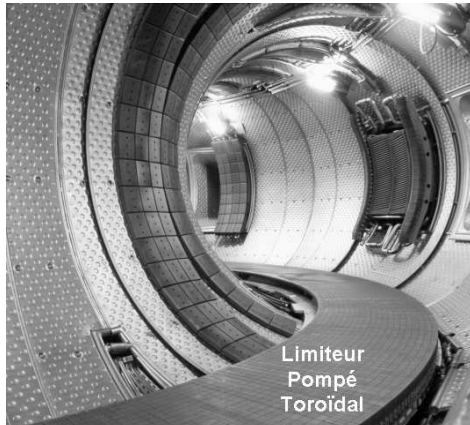


Figure 1 : Intérieur de Tore Supra, le Limiteur Pompé Toroïdal

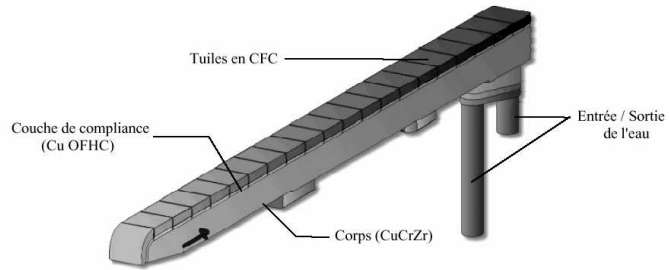


Figure 2 : Aiguille composant le LPT ($L=495$ mm, $l=25,7$ mm, $h=28$ mm)

Le LPT est l'élément majeur d'interaction avec le plasma, il permet d'évacuer environ 50 à 60% de la puissance totale injectée suivant le scénario expérimental étudié. Pendant les décharges, le plasma est en appui sur le LPT. L'étude des images infrarouges permet de visualiser l'empreinte du plasma à sa surface et peut en conséquence fournir des informations pertinentes sur les phénomènes de transport de chaleur dans le plasma de bord.

Deux endoscopes de 2,5 mètres de long dotés de caméras infrarouges (fig. 3) permettent de viser une surface totale représentant environ 23 % du LPT (soit un recouvrement d'une surface de 1,7 m² du composant). La première visée permet de regarder deux secteurs juxtaposés de 30°, avec une résolution spatiale d'environ 9 mm (estimée pour une erreur sur la température < à 5%). Un second endoscope avec une caméra haute résolution (4 mm) se focalise sur un autre secteur d'environ 20° (soit 31 aiguilles). Les filtres de ces deux caméras sont centrés sur 4,5 μm (pour une bande spectrale possible de [3 – 5 μm]). La fréquence d'acquisition du système est de 50 Hertz et le temps d'intégration de la caméra est variable (11, 65 et 340 μs) pour obtenir une bonne dynamique dans la gamme de température 120 – 1800°C

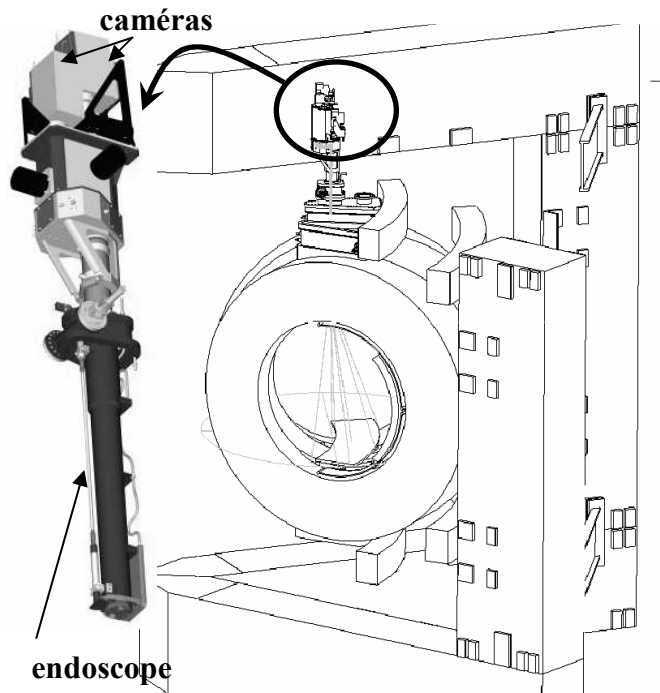


Figure 3 : Schéma de l'instrumentation IR de Tore Supra [1] [2]

Les CFP ont été dimensionnés pour différentes valeurs seuils en températures et flux imposés. Dans le cas du Limiteur, les tuiles de CFC exposées au plasma ont une température limite de 1200°C (pour éviter la sublimation) et un flux de chaleur limite de 10 MW/m² (contraintes thermohydrauliques). Le développement souhaité ici serait d'obtenir en complément des mesures de températures de surface, des cartographies en valeur de flux déposés.

1.2. La problématique des dépôts carbonés

La difficulté rencontrée pour évaluer le flux déposé sur le LPT est liée à la problématique des dépôts carbonés plus ou moins adhérents au substrat, et d'épaisseurs variables. Au cours de tirs plasmas et en fonction de la topologie magnétique utilisée, des atomes de carbone sont arrachés à certains endroits de la paroi et peuvent se redéposer ailleurs sur les composants. Les zones de dépôts carbonés sont visibles sur les images IR du Limiteur (fig.4). On peut les différencier en deux types de signatures. La première est appelée « effet gaufrier » : les ions et atomes de carbone circulant dans le plasma peuvent se loger entre les tuiles de CFC de préférence sur le bord des tuiles. Dans ces zones « propres », les flux de chaleur et les mécanismes d'érosion sont importants du fait de la configuration des lignes de champ magnétique confinant le plasma. La deuxième signature est présente sur la surface plate des tuiles de CFC dans les zones du Limiteur dites « à l'ombre du plasma » (seulement exposées au rayonnement et non en contact direct avec le plasma). Ces dernières sont plutôt favorables à la re-déposition des particules qui s'accumulent en couches plus ou moins épaisses et adhérentes (fig. 4 et 5) [3].

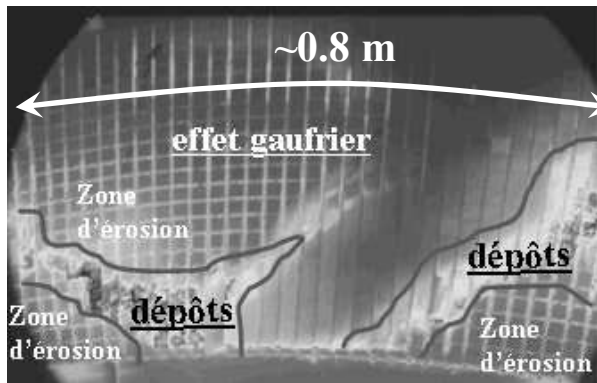


Figure 4 : Repérage des dépôts carbonés sur une vue IR du LPT de Tore Supra (voie HR)

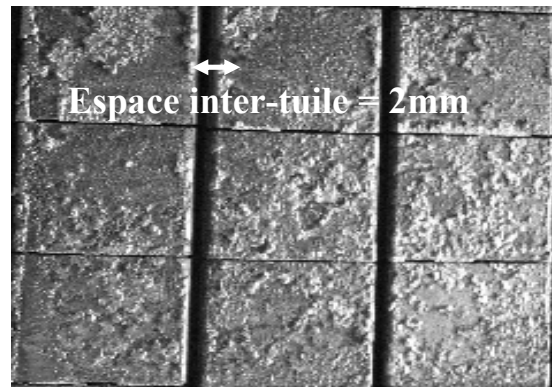


Figure 5 : Dépôt carboné sur les tuiles du Limiteur

Ce phénomène induit que les températures mesurées par le diagnostic infrarouge ne reflètent pas la température réelle des tuiles de CFC. Les dépôts carbonés, même si le flux de chaleur reçu est faible, peuvent chauffer extrêmement rapidement et plus intensément que le substrat activement refroidi. On remarque la présence de ces dépôts carbonés sur des zones largement étendues. Cela complique l'interprétation des images IR car ils empêchent d'assimiler directement le dépôt de flux aux niveaux de températures obtenus. Pour évaluer le flux incident en surface du composant, il est nécessaire de mener un calcul tenant compte de ces différences d'état de surface (cf. §3). Il faut également pouvoir repérer, sélectionner et trier les pixels associés à chaque zone (dépôts ou « propre »). Un outil de reconnaissance de forme sur les images du LPT est proposé pour remplir cette tâche (cf. §2).

2. Création d'un outil de reconnaissance de formes pour appliquer le calcul de flux

La méthode de reconnaissance de formes mise en place sera illustrée dans ce papier au travers d'exemples concernant la visée HR. Cette dernière a pour but d'automatiser un repérage des pixels des images IR sur lesquels seront estimés les flux.

Un procédé de déformation d'image (*warping* [4]) est utilisé ici. En effet, les images infrarouges sont déformées par rapport à une vue « réelle » (ou visible) du composant et ceci essentiellement à cause des effets de grandissement (distance d'un point de l'objet visé par

rapport à la pupille du système optique). Les distorsions introduites par l'instrumentation optique sont quant à elles très faibles car le système utilisé est centré. La technique de *warping* permet de diviser l'image infrarouge brute en considérant le plus petit élément composant la surface du LPT, les tuiles de CFC (22.8-25.7 mm en moyenne). Cette discrétisation est obtenue en déformant géométriquement un plan du secteur concerné (image visible, fig.6) pour le faire correspondre à une image IR « déformée » (fig.7).

Les effets du grandissement, variable suivant la zone regardée, entraînent que le secteur du LPT visé est « déformé » de manière non homothétique, il est donc nécessaire d'appliquer une transformation adaptée à chaque point de l'image. Ceci est réalisé en faisant correspondre des « points de contrôle » sur chacune des images (départ, fig. 6 et arrivée, fig. 7). L'algorithme calcule ensuite les vecteurs déplacement pour chaque point afin de pouvoir « calquer » par *warping* le motif des tuiles de la figure 6 sur l'image infrarouge. La transformation calculée par le biais de ces points de contrôle est modulable. En effet, le but de cet outil de reconnaissance de formes est de pouvoir s'adapter à un changement de position du système infrarouge ou des composants. La discrétisation de l'image IR peut être modifiée en replaçant les points de contrôle à chaque changement notable.

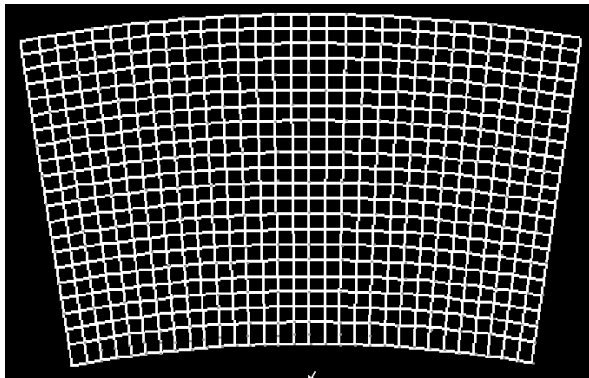


Figure 6 : Plan du secteur du LPT vue par la voie IR haute résolution

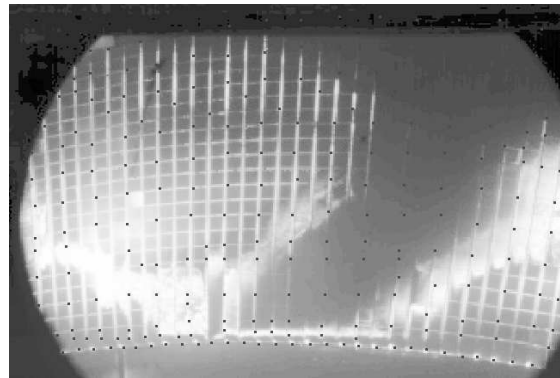
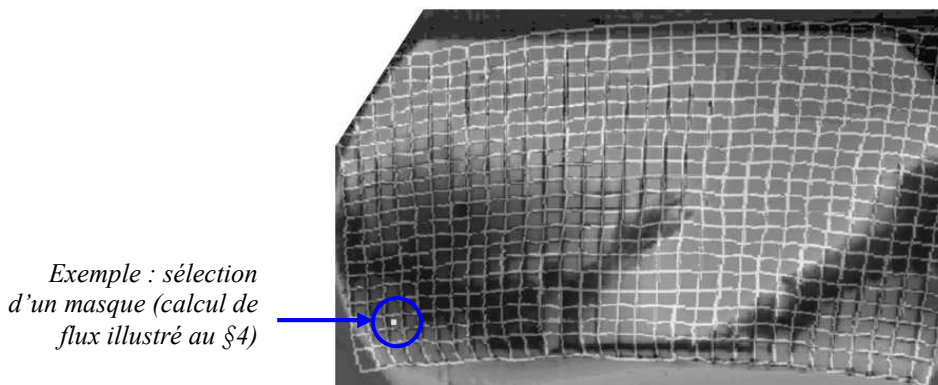


Figure 7 : Image IR et points de contrôles correspondants



Exemple : sélection d'un masque (calcul de flux illustré au §4)

Figure 8 : Image IR discrétisée et sélection d'un masque de calcul

Une fois cette discrétisation dans le domaine infrarouge effectuée, il est possible avec cet outil de sélectionner et créer des masques de calcul (cf. exemple, fig.8). Ces derniers définissent, pour toutes les images IR, les pixels où seront estimés les flux. Afin de s'affranchir de l'effet gaufré sur les tuiles dites « propres », l'outil graphique ne sélectionne que 4 à 5 pixels au centre de chaque tuile. Les pixels de bord « pollués » par les dépôts et dont la température ne reflète pas le réel flux incident seront ainsi ignorés. Ces masques peuvent ensuite être référencés suivant qu'ils appartiennent ou non à une tuile entièrement recouverte de carbone (zone de dépôts, fig. 4).

3. Principe du calcul de flux

La théorie des systèmes linéaires permet d'exprimer les flux déposés sur le Limiteur par le biais d'une déconvolution linéaire 1D des températures de surface infrarouges, avec la réponse impulsionnelle du système. La réponse en surface d'une tuile du LPT est calculée par la méthode des quadripôles thermiques [5]. Ce formalisme permet de modéliser le comportement thermique du LPT constitué de trois couches de matériau avec des propriétés thermiques distinctes. Cette même méthode permet de modéliser à l'identique les tuiles recouvertes de carbone en ajoutant au modèle une couche supplémentaire représentant le dépôt.

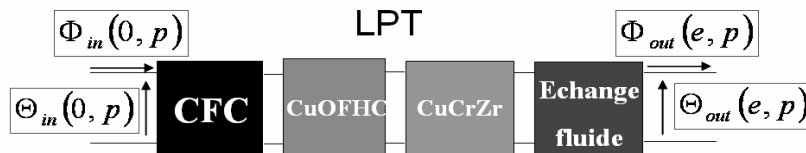


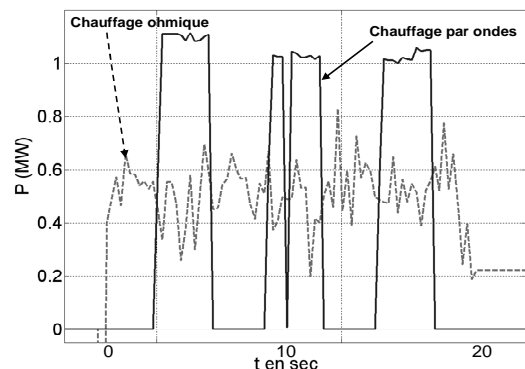
Figure 9 : Modélisation quadripôles en espace de Laplace d'une tuile propre du Limiteur

D'autres méthodes de calcul de flux ont été écartées pour cette application : calcul non-linéaire par différences finies, approche 2D linéaire [6]. Une approche bidimensionnelle a été jugée inutile ici. Le CFC composant la surface des aiguilles est un matériau très conducteur et faiblement orthotrope ($\lambda_{//} \sim 185 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $\lambda_{\perp} \sim 220 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Le coefficient d'échange convectif mis en jeu est important (de l'ordre de $40\,000 \text{ W/m}^2.\text{K}$, pour un débit d'eau constant dans une aiguille de 0.4 kg/sec). Les transferts latéraux sont donc très faibles à l'échelle d'une tuile mais sont également nuls entre tuiles voisines. Il en résulte que le champ de température est quasiment uniforme sur la zone considérée pour chaque calcul de flux (quelques pixels au centre des tuiles). Le choix s'est donc porté sur la déconvolution 1D linéaire en raison de sa robustesse pour reconstruire des phénomènes transitoires extrêmement rapides et pour sa flexibilité (prise en compte simple d'une couche supplémentaire de dépôts par le biais des quadripôles). La rapidité de cette méthode, comparée à un calcul non-linéaire est également appréciable et l'erreur induite par l'hypothèse linéaire est jugée acceptable (cf. §4). En effet, dans le but d'obtenir une cartographie de flux en temps différé, il est nécessaire d'appliquer ce calcul sur chacune des tuiles du secteur (ce qui représente 672 masques sur la voie HR par exemple) et pour une moyenne de 1000 à 1500 images pour un choc (une image infrarouge est capturée toutes les 20 ms pour des chocs durant en moyenne 20 à 30 sec).

4. Résultats : calcul de flux incident sur tuiles sans dépôts

La figure 12 illustre le résultat d'un calcul de flux sur une tuile du Limiteur, pour la durée du choc 37421 (scénario de chauffage, fig. 10).

Figure 10 : Puissances de chauffage injectées pour le choc 37421 (Tore Supra – 2006)



La barre d'erreur asymptotique (en régime stationnaire) pour cette méthode de déconvolution 1D linéaire, comparée à un calcul non-linéaire, a pu être estimée pour les tuiles non recouvertes de dépôts. Elle augmente avec le niveau de température de surface atteinte et donc de flux reçus. L'approximation faite avec des propriétés thermiques considérées

constantes entraînera une surestimation du flux calculé pour des températures élevées (barre d'erreur significative de 25 % au-delà de 700°C atteint en surface).

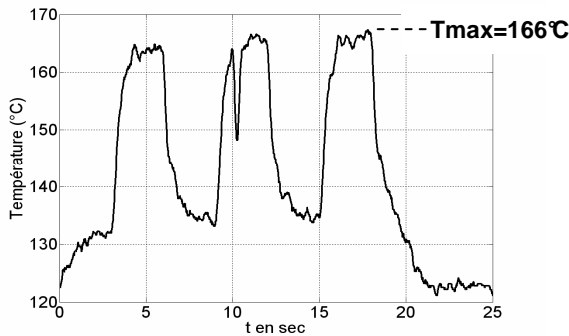


Figure 11 : Evolution temporelle $T_{surface}$ obtenue sur la tuile repérée fig.8

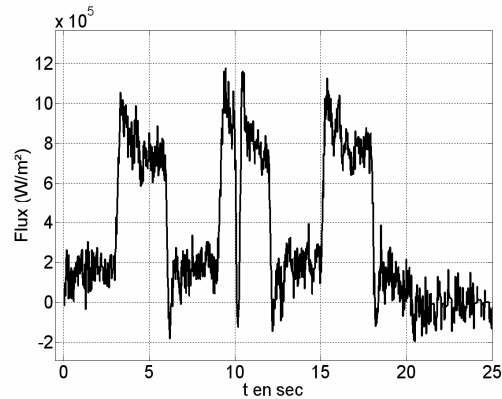


Figure 12 : Flux incident calculé

Le calcul précédent concerne une tuile sans dépôts. Pour effectuer un calcul de flux sur les zones recouvertes de particules de carbone, il est nécessaire de connaître les propriétés thermiques de ces dépôts, et notamment leur diffusivité thermique. Cette dernière est en cours d'identification par une méthode flash consistant à soumettre la surface des dépôts à un pulse laser. Le démontage d'un secteur entier du LPT prévu en 2007 permettra de tester chaque tuile recouverte de dépôts avec ce type de montage et d'obtenir cette information.

5. Conclusion

Cette étude a permis de mettre en place un outil de traitement des images infrarouges du Limiteur Pompé Toroïdal de Tore Supra. Ce dernier a pour fonction le repérage des zones observées (pixels au centre des tuiles) et la différenciation des zones avec ou sans dépôts carbonés. Il permet d'appliquer un calcul de flux incident adapté à chaque état de surface. Ce calcul consiste en une déconvolution linéaire 1D des températures de surface infrarouges mesurées. Suivant la présence ou non de dépôts, seule changera la réponse du système, calculée avec la méthode des quadripôles thermiques. A l'avenir les flux incidents calculés (à chaque pas de temps, et pour chaque tuile visée par l'infrarouge) pourront être cartographiés de la même manière que les images IR obtenues actuellement en température de surface. Le développement de cette interface graphique est prévu courant 2007. Elle permettra de visualiser en temps différé, d'un point de vue qualitatif et quantitatif, le motif de dépôt de chaleur sur l'ensemble des surfaces du Limiteur visées par l'infrarouge.

Références

- [1] D. Guilhem, G. Martin, R. Reichle, H. Roche, M. Jouve, L. Ducobu, P. Messina, Infrared surface temperature measurement for long pulse ; real time feed- back control in an actively cooled machine, *Review of Scientific Instruments*, vol.70, n°1 p.427-430 (1999)
- [2] D. Guilhem, J.L. Bondil, B. Bertrand, C. Desgranges, M. Lipa, P. Messina, M. Missirlian, C. Portafaix, R. Reichle, H. Roche, A. Saille, Tore-Supra infrared thermography system, a real steady-state diagnostic, *Fusion Engineering and Design*, vol. 74, p. 879-883 (2005)
- [3] R. Mitteau et al., Heat flux pattern on the toroidal pumped limiter of Tore Supra : first observations and preliminary analysis, *Journal of Nuclear Materials*, 313-316 (2003) 1229-1233
- [4] H.Maître, Le traitement des images, *Hermès* (2003)
- [5] D. Maillat, S. André, J-C Batsale, A. Degiovanni, C. Moyne, Thermal quadrupoles, *Wiley & Sons, New-York* (2000)
- [6] J-L. Gardarein et al., Reconstruction de la forme du flux incident sur les composants face au plasma du tokamak JET : approche 2D linéaire, *SFT 2006*