

« Problèmes inverses de champs,  
Apports et limitations de la thermographie infrarouge »

*< Estimation de flux >*



Sophie CARPENTIER<sup>1,2</sup>

« *Etude des dépôts de chaleur dans le tokamak Tore Supra* »

Doctorante CEA / Département de Recherche sur la Fusion Contrôlée / SIPP / GID

J-L. Gardarein<sup>1,2</sup>, G. Dunand<sup>1</sup>, Y. Corre<sup>1</sup>, C. Le Niliot<sup>2</sup>, F. Rigollet<sup>2</sup>, R. Reichle<sup>1</sup>, J-M. Traveré<sup>1</sup>

1) CEA/DSM/DRFC, Centre de Cadarache, 13108 Saint Paul Lez Durance, France

2) IUSTI UMR CNRS 65 95. Université de Provence, MARSEILLE, France

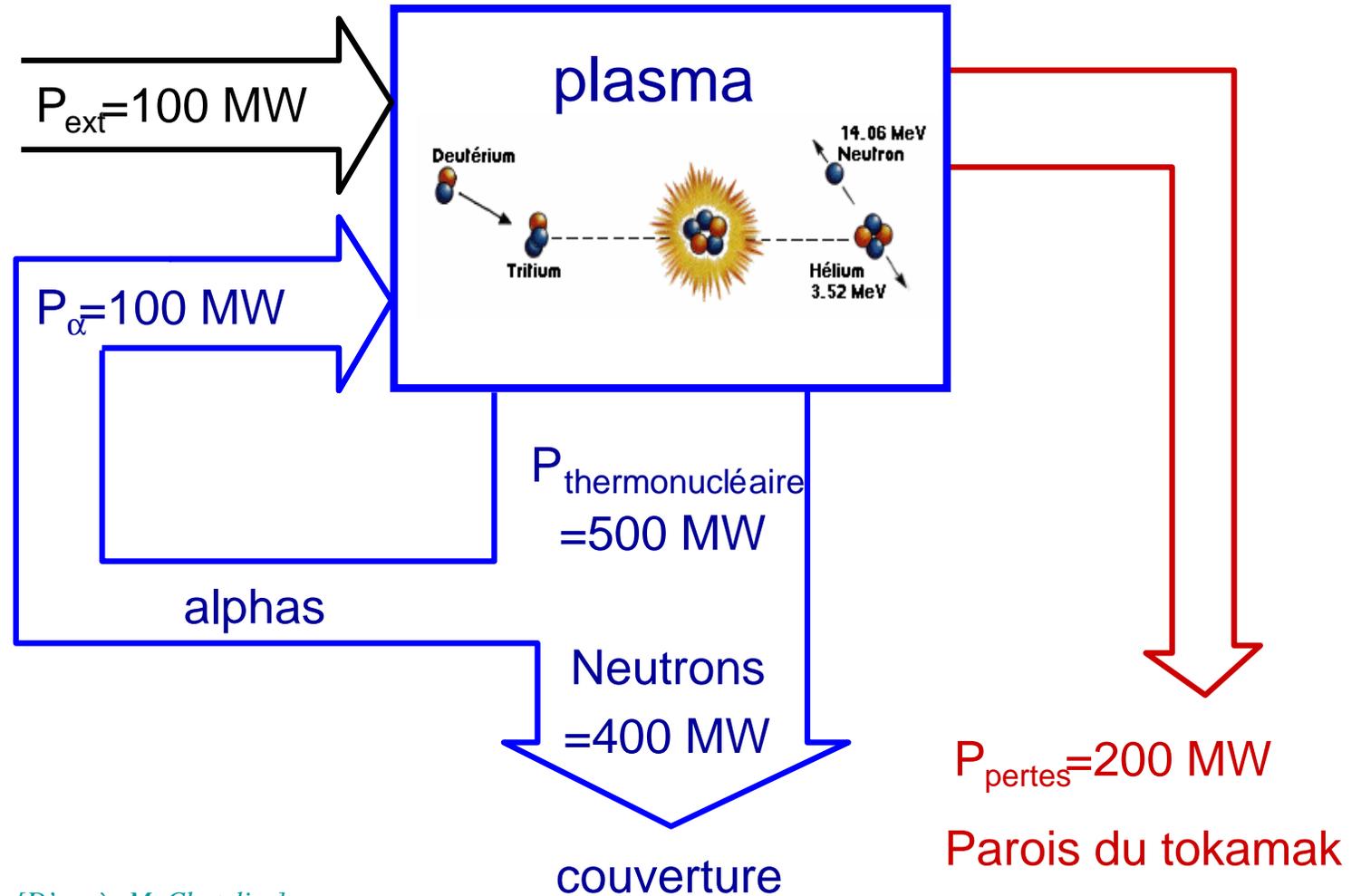
## *Interprétation des images infrarouges appliquée à la surveillance des composants face au plasma du tokamak Tore Supra*



- La surveillance IR de Tore Supra : enjeux et difficultés
- Déconvolution 1D linéaire & Quadripôles thermiques
- Traitement des images IR
- Calcul des  $\Phi_{\text{déposés}}$  : Premiers résultats
- Conclusions / Perspectives

## Le principe de la fusion

### → *Bilan de puissance d'un plasma d'ITER*



[D'après M. Chatelier]

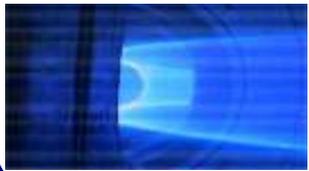
○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

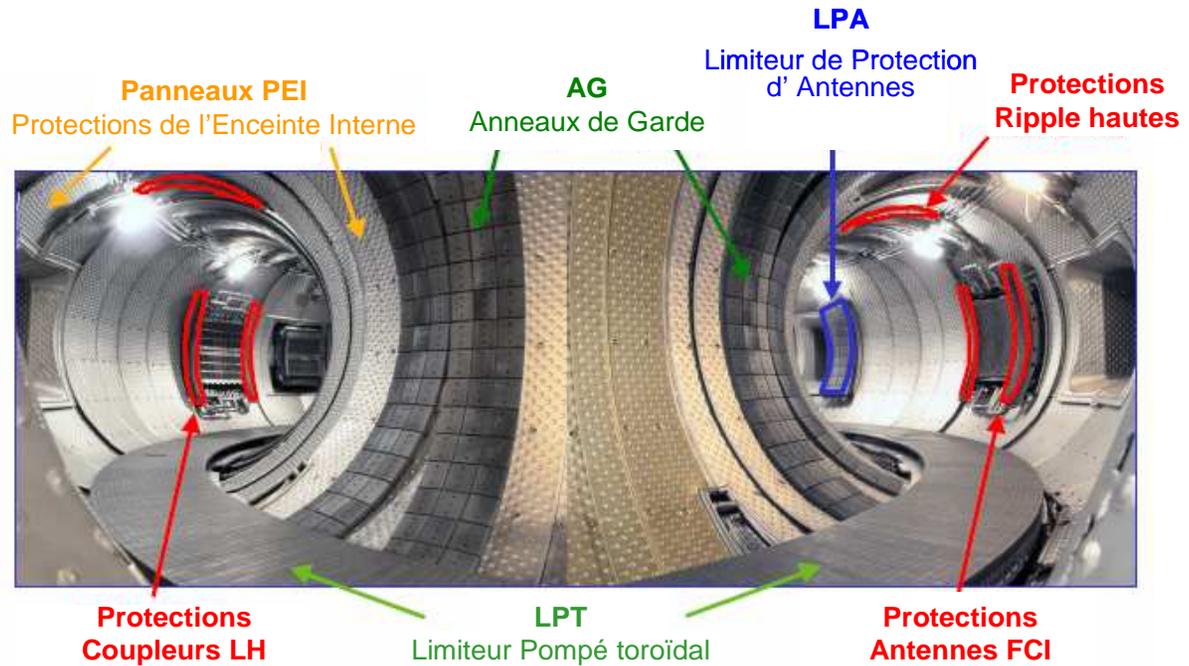
○ Calcul de  $\Phi$  :  
1° Résultats

○ Perspectives

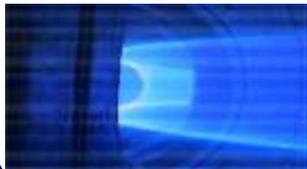


## Le tokamak Tore Supra (Cadarache, 13)

- Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs
- Déconvolution &  
Quadripôles
- Traitement des  
images IR
- Calcul de  $\Phi$  :  
1° Résultats
- Perspectives



***Machine activement refroidie, bobines supraconductrices  
→ Etude des plasmas de longue durée***



## Le tokamak Tore Supra (Cadarache, 13)

○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

○ Calcul de  $\Phi$  :  
1° Résultats

○ Perspectives

$$\Phi_{\text{déposé}} = \Phi_{\text{conduit}} (i^+, e^- \text{ supras} + i^+, e^- \text{ thermiques}) + \Phi_{\text{rayonné}} + \Phi_{\text{neutres}}$$



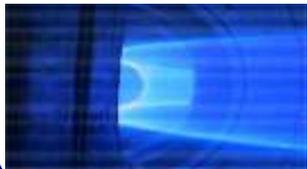
**Conditions extrêmes**  
*Flux  $\rightarrow$  plusieurs MW/m<sup>2</sup>,  
Environnement magnétique*



**Géométrie complexe  
des CFP**  
*Phénomènes d'érosion  
& redéposition*

## Surveillance des composants par thermographie infrarouge

Objectif opérationnel : sécurité des CFP  
(seuils en T en  $\Phi_{\text{déposé}}$ )



## Estimation d'une inconnue : le flux de chaleur ( $MW/m^2$ ) déposé en surface des composants face au plasma

→ Mesure : Températures de surface IR

→ Technique : Déconvolution des  $T^{\circ}_{surface} IR \rightarrow \Phi_{déposé}$

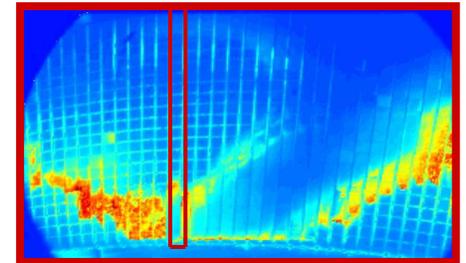
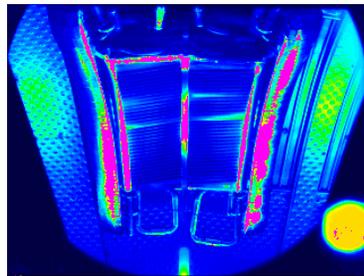
○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

○ Calcul de  $\Phi$  :  
1° Résultats

○ Perspectives



## Estimation d'une inconnue : le flux de chaleur ( $\text{MW/m}^2$ ) déposé en surface des composants face au plasma

→ Mesure : Températures de surface IR

→ Technique : Déconvolution des  $T^{\circ}_{\text{surface IR}} \rightarrow \Phi_{\text{déposé}}$

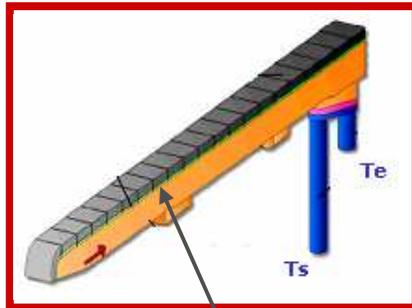
○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

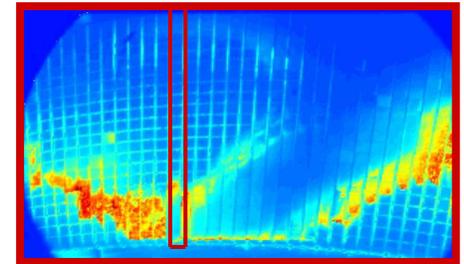
○ Traitement des  
images IR

○ Calcul de  $\Phi$  :  
1° Résultats

○ Perspectives



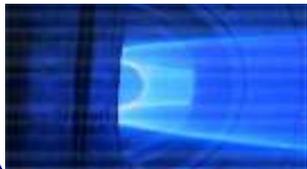
- Surface = tuiles de CFC
  - Corps = CuCrZr
  - Couche interm. OHFC
- ACTIVEMENT REFFROIDIE



- $T_{\text{seuil}}$  pour le CFC =  $1200^{\circ}\text{C}$
- $\Phi_{\text{seuil}} = 10 \text{ MW/m}^2$

Démonstration sur le Limiteur

- extrait en moyenne 50-60% de  $P_{\text{injectée}}$
- « empreinte » du plasma



## L'instrumentation IR sur Tore Supra [1][2]

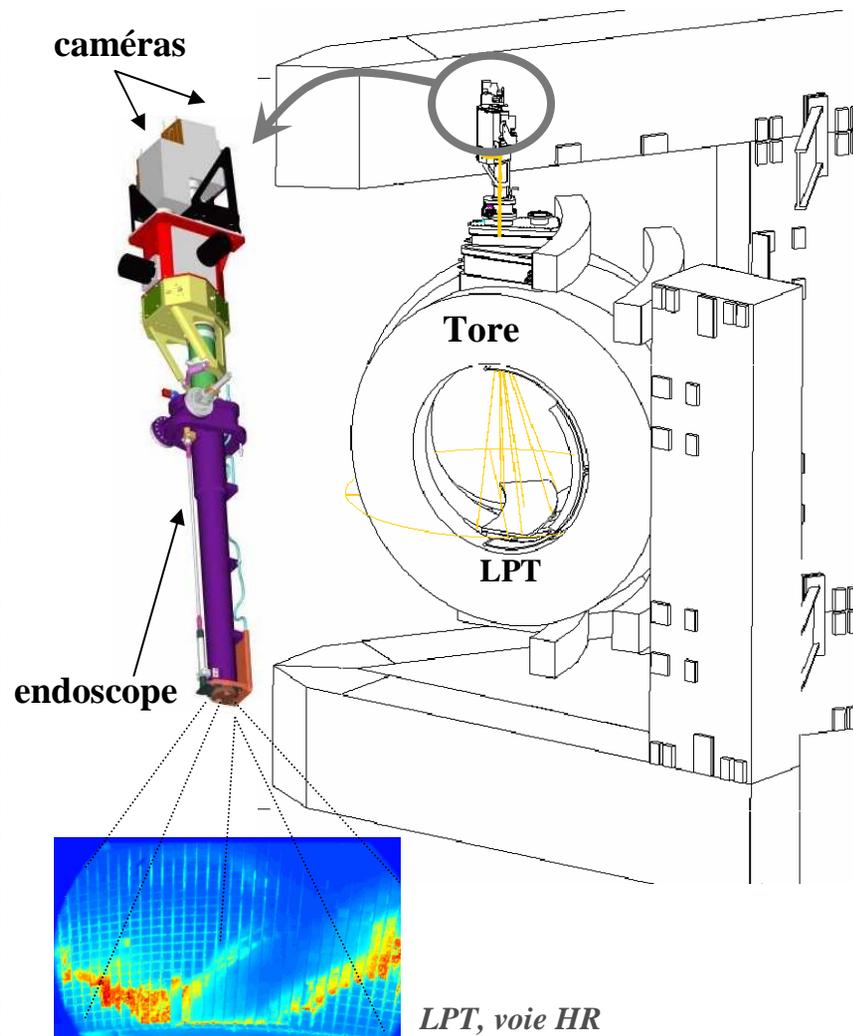
○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

○ Calcul de  $\Phi$  :  
1° Résultats

○ Perspectives



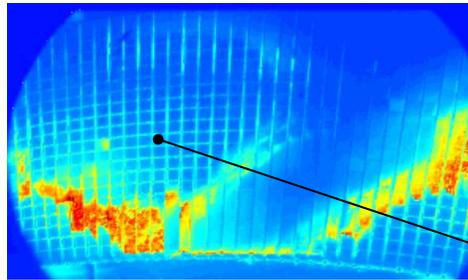
- Endoscope = 2.5m de long
- 2 caméras / endoscope
- ✓ une visée antenne
- ✓ une visée LPT
- Caméra CEDIP - *Agathe*
- LPT, 2 voies IR :
  - ✓  $\text{rés}_{0.95} \sim 9\text{mm} \Leftrightarrow 2 \times 30^\circ$  du LPT
  - ✓  $\text{rés}_{0.95} \sim 4\text{mm} \Leftrightarrow 20^\circ$  du LPT

### *Voie HR*

- Bande spectrale possible :  
[3-5  $\mu\text{m}$ ] => filtre fixe à 4.5  $\mu\text{m}$
- $F_{\text{acquisition}} = 50 \text{ Hz}$
- Temps d'intégration : 11, 65 ou 140  $\mu\text{s}$
- Gamme de  $T = [120-1800^\circ\text{C}]$

## 1° Contrainte / Difficulté : Le volume d'informations à traiter

→ **Choix de la méthode** : Déconvolution linéaire 1D des  $T_{IR}$



LPT, voie HR

✓  $dt$  acquisition = 20 ms

✓ <Durée> tirs plasmas : entre 20-30s à 6 min

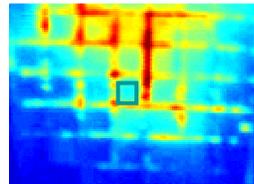
→ 1000-1500 à 18 000 images à traiter

✓ Voie HR (6%  $S_{LPT}$ ) : ~ 670 tuiles de CFC

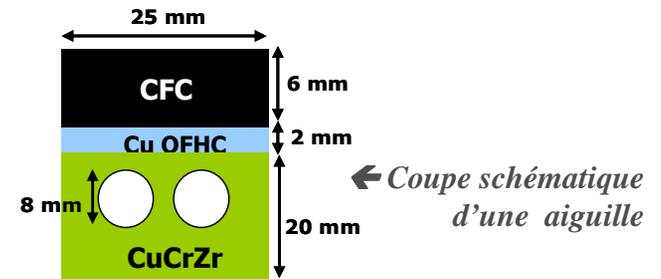
▪ Calcul linéaire → Entraîne une barre d'erreur faible = surestimation du flux

*Erreur asymptotique estimée* → croissante avec la  $T_{IR\ max}$  atteinte au cours du palier de  $P_{injectée}$

▪ Calcul 1D → Champ de température quasi uniforme à l'échelle d'une tuile (22.8\*25.7mm)



LPT, zoom sur voie HR



\* Méthode extrapolable à des mesures TC (déconvolution + régularisation)

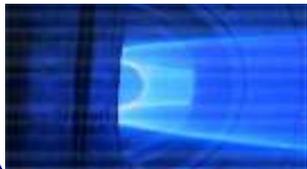
○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

○ Calcul de  $\Phi$  :  
1° Résultats

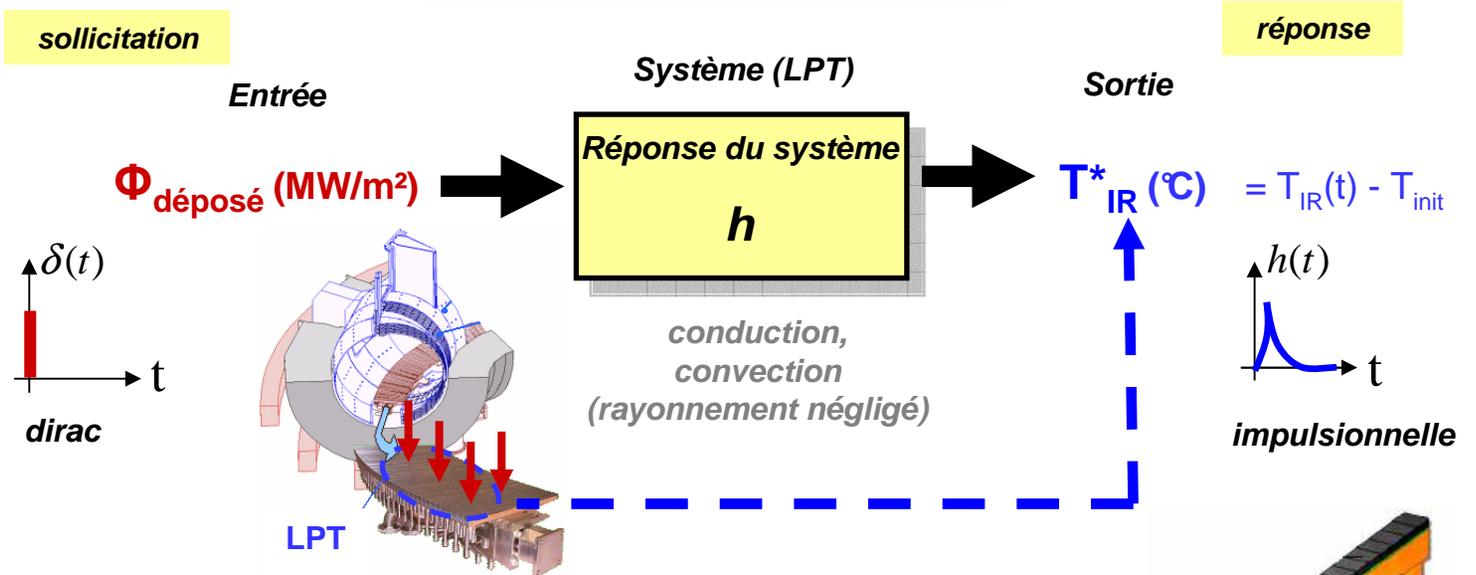
○ Perspectives



## Calcul de $\Phi_{\text{déposé}}$ par déconvolution linéaire

→ Analogie avec la théorie des systèmes linéaires

Modélisation « boîte noire » du problème



Produit de convolution

$$T_{IR}(t) = \int_0^t h(t - \tau) \otimes \Phi_{\text{déposé}}(\tau) . d\tau$$

*mesure*
*inconnue*

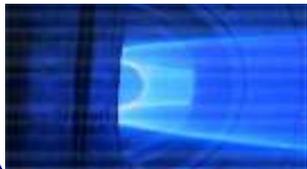
○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

○ Calcul de  $\Phi$  :  
1° Résultats

○ Perspectives



## Calcul de $\Phi$ déposé par déconvolution linéaire

→ Calcul de la réponse du LPT : méthode des quadripôles [5] [6]

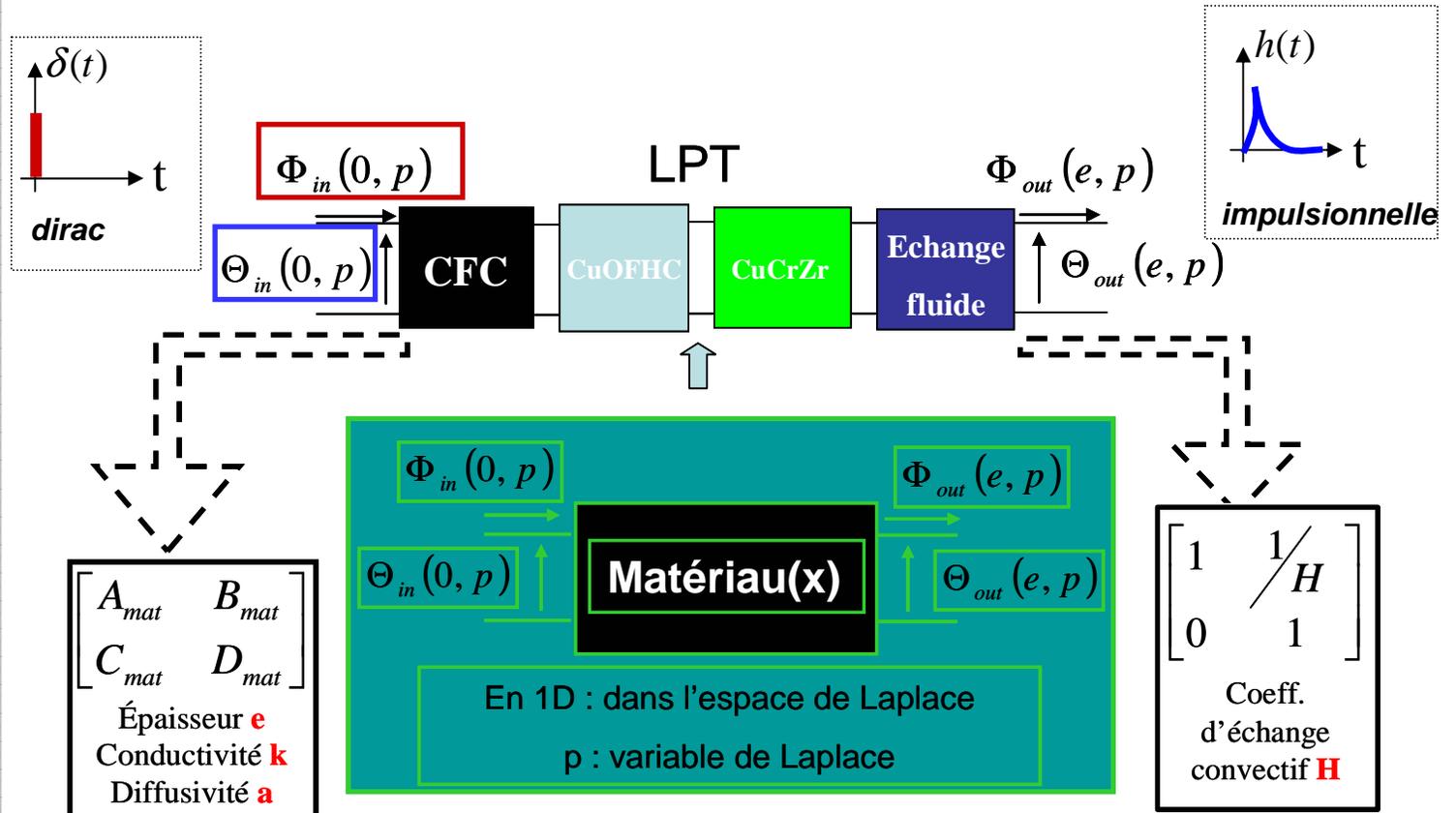
○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

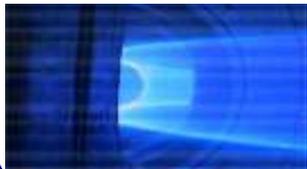
○ Calcul de  $\Phi$  :  
1° Résultats

○ Perspectives



• Linéarité

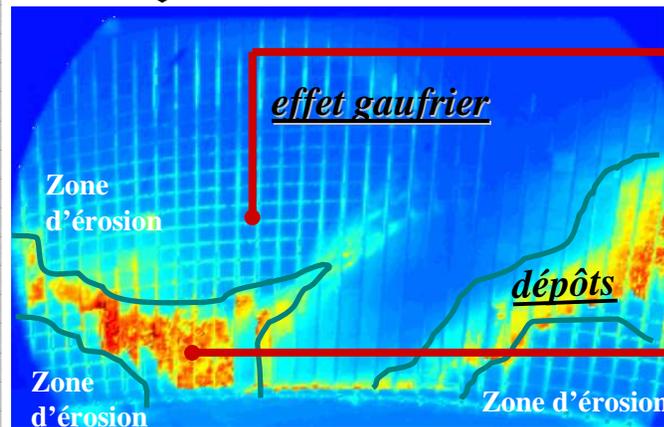
- Rapidité
- Flexibilité
- Multicouche



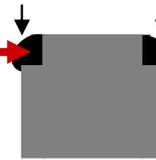
## 2° Difficulté : Phénomènes d'érosion / redéposition

**MISE EN ECHEC DU DIAGNOSTIC**

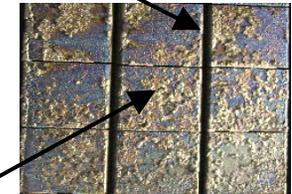
→ Les T° lues par IR ne reflètent pas l'image du  $\Phi_{\text{déposé}}$  réel



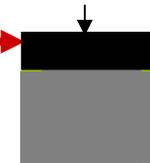
**dépôts entre les tuiles**



Espace inter-tuiles ~2mm



**dépôts en surface des tuiles**



Voie HR LPT

→ **Nécessité de mener un calcul de flux incident adapté à chaque état de surface (avec ou sans dépôts)**

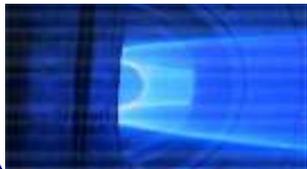
○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

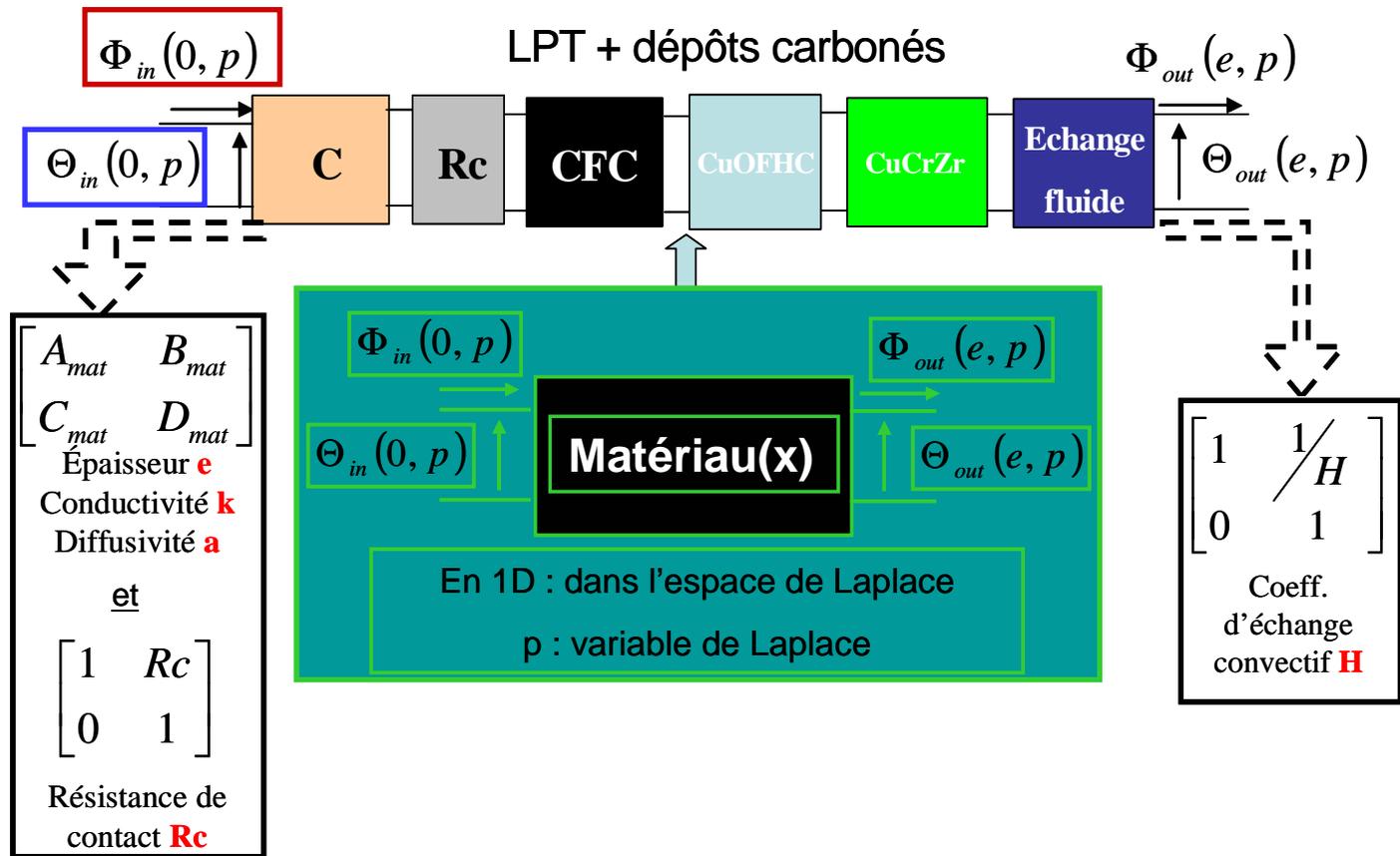
○ Calcul de  $\Phi$  :  
1° Résultats

○ Perspectives



## Calcul de $\Phi_{\text{déposé}}$ par déconvolution linéaire

→ Ajout d'une couche de dépôts au modèle quadripôles



Quadripôles thermiques → on connaît  $h_{LPT}$  et  $h_{LPT+dépôts}$



- Surveillance IR : Enjeux – Pbs
- Déconvolution & Quadripôles
- Traitement des images IR
- Calcul de  $\Phi$  : 1° Résultats
- Perspectives



### 3° Difficulté : Déformation non homothétique des images IR

→ **Effet du grandissement**

○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

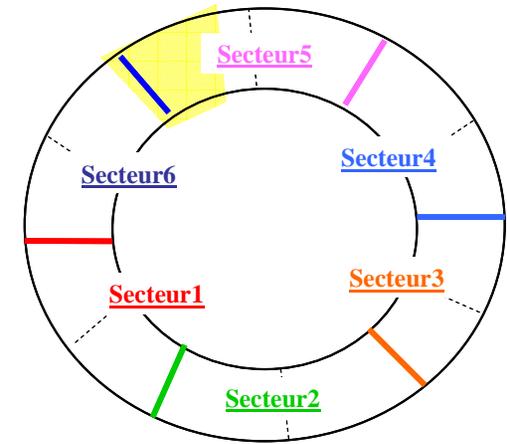
○ Traitement des  
images IR

○ Calcul de  $\Phi$  :  
1° Résultats

○ Perspectives



*Vue du secteur mécanique n°5B  
du LPT (30°)*

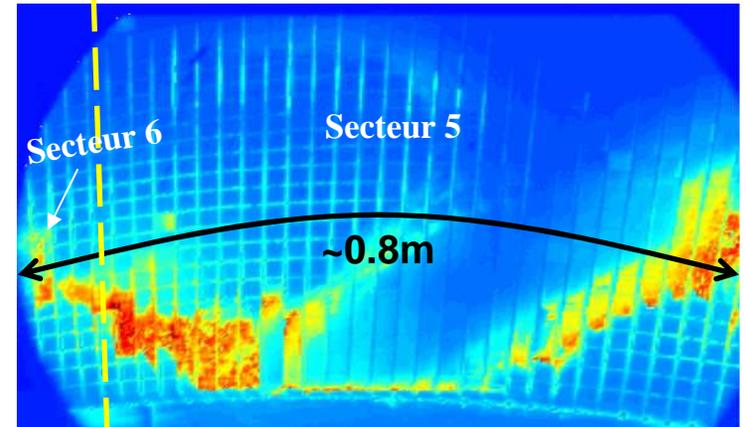


$$g = \frac{p'}{p}$$

← distance focale

↗ p

distance entre le point visé et le centre optique de la 1° lentille



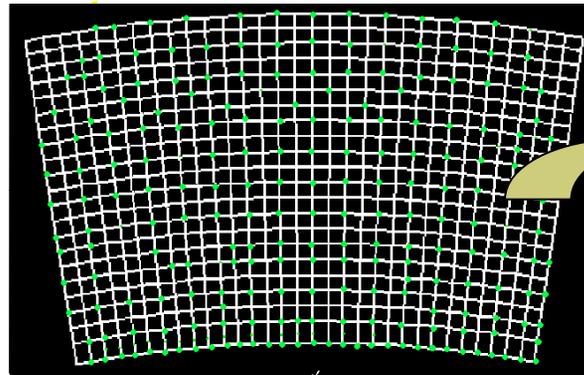
*Vue IR Secteur 5, voie HR*



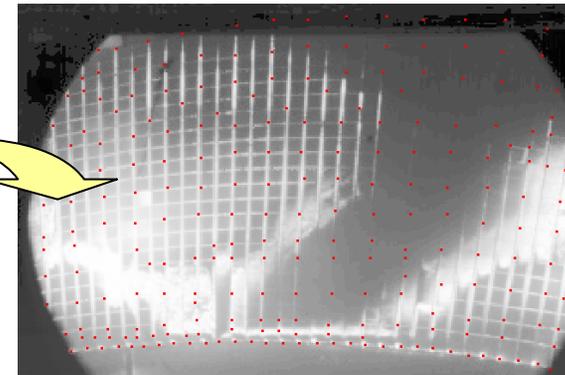
## 1<sup>o</sup>étape : Reconnaissance de la forme des tuiles

→ **Warping de la trame du LPT sur les images IR déformées** [4]

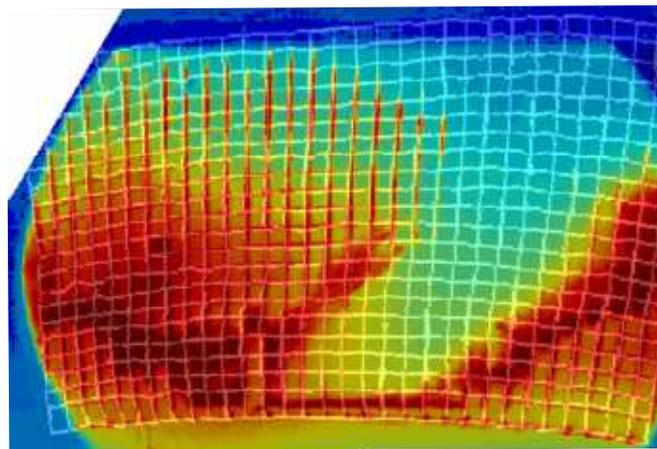
Placements de points de contrôle



*Trame du LPT correspondant à la voie HR*



*Vue IR Secteur 5, voie HR*



↓  
*Déformation de l'objet sur  
lui-même = Warping*

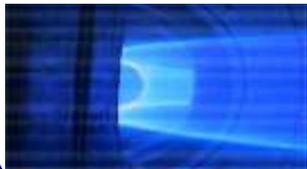
○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

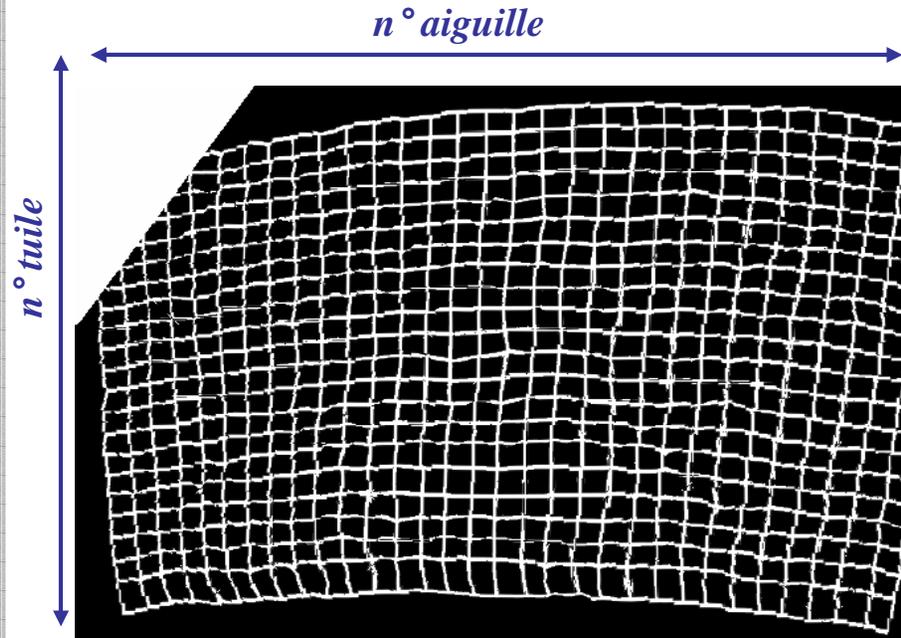
○ Calcul de  $\Phi$  :  
1<sup>o</sup> Résultats

○ Perspectives



## 2<sup>o</sup>étape : *Discrétisation et labellisation des tuiles...*

→ ... A partir de la trame du LPT déformée par warping



Discrétisation ⇔ repérage  
des ensembles connexes

Labellisation ⇔ une  
référence donnée pour  
chaque ensemble connexe

Trame du LPT « warpée » => labellisation

**Un ensemble connexe = une tuile**

→ Chaque tuile de la visée IR est repérée et référencée  
(n°aiguille – n°tuile)

○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

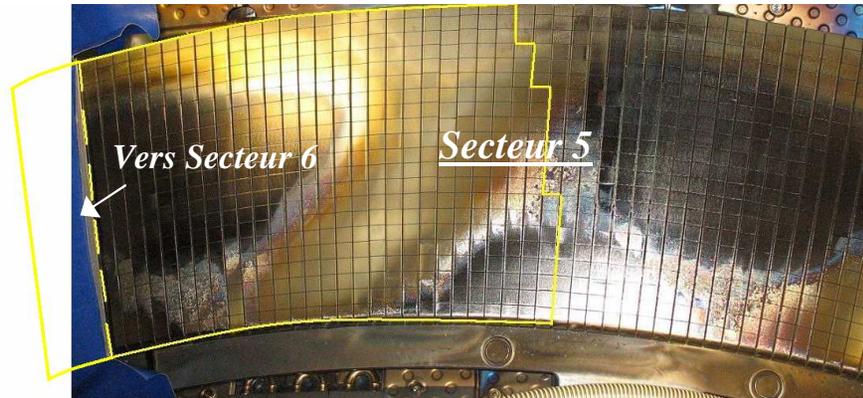
○ Calcul de  $\Phi$  :  
1<sup>o</sup> Résultats

○ Perspectives



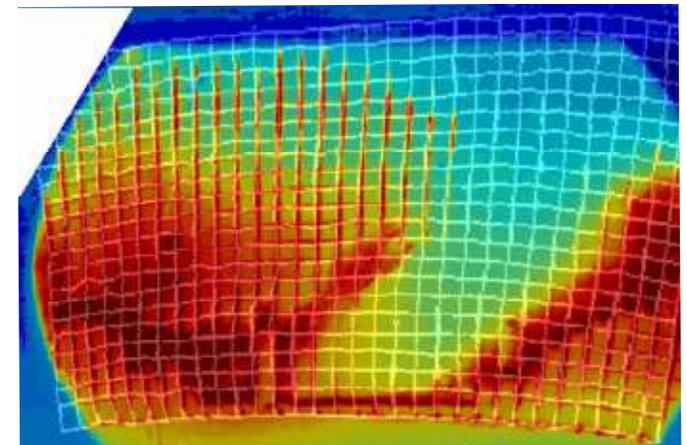
### 3<sup>o</sup>étape : Création de masques de calcul

→ Sélection des tuiles pour créer un masque de calcul  
& Tri des tuiles suivant leur état de surface



*LPT – Secteur 5*

*Maillage obtenu par warping*



○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

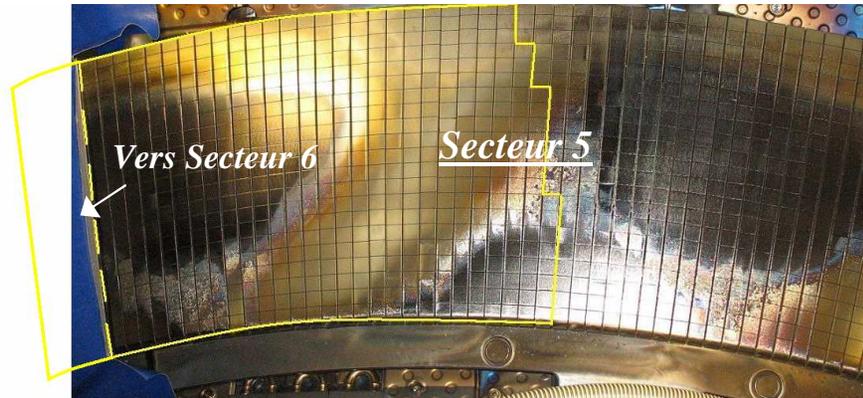
○ Calcul de  $\Phi$  :  
1<sup>o</sup> Résultats

○ Perspectives



### 3<sup>o</sup>étape : Création de masques de calcul

→ **Sélection des tuiles pour créer un masque de calcul**  
& **Tri des tuiles suivant leur état de surface**

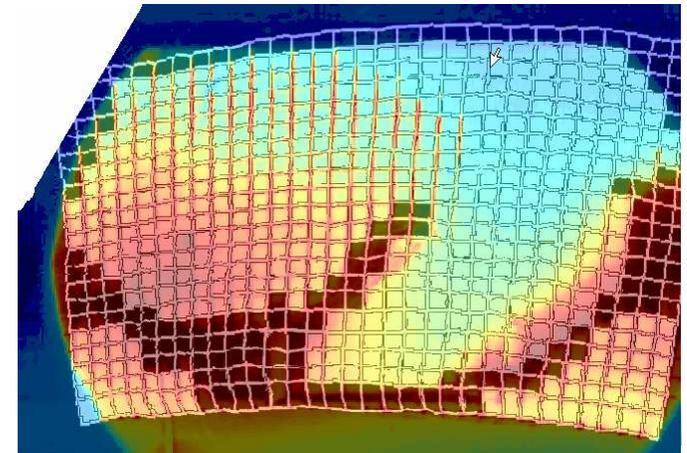


*LPT – Secteur 5*

*Maillage obtenu par warping*



*Sélection des tuiles « propres »*



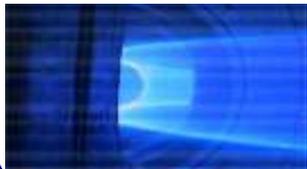
○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

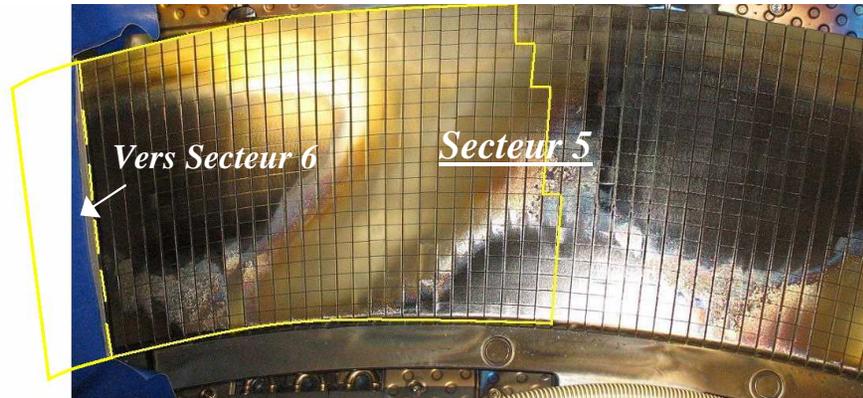
○ Calcul de  $\Phi$  :  
1<sup>o</sup> Résultats

○ Perspectives



### 3<sup>e</sup>étape : Création de masques de calcul

→ Sélection des tuiles pour créer un masque de calcul  
& Tri des tuiles suivant leur état de surface



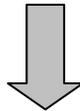
Chaque tuile est réduite  
→ sélection de quelques pixels au centre des tuiles

LPT – Secteur 5

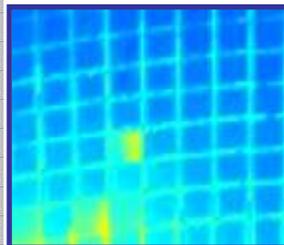
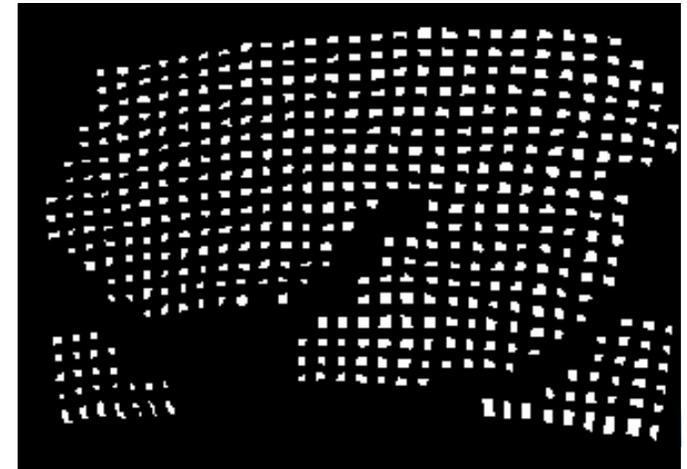
Maillage obtenu par warping



Sélection des tuiles « propres »



Masque zone propre →  
Matrice (0...1)



→ Plus de gêne occasionnée par l'effet gaufrier

○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

○ Calcul de  $\Phi$  :  
1<sup>o</sup> Résultats

○ Perspectives



## 4<sup>o</sup>étape : Calcul de $\Phi$ déposé surfacique (zones propres)

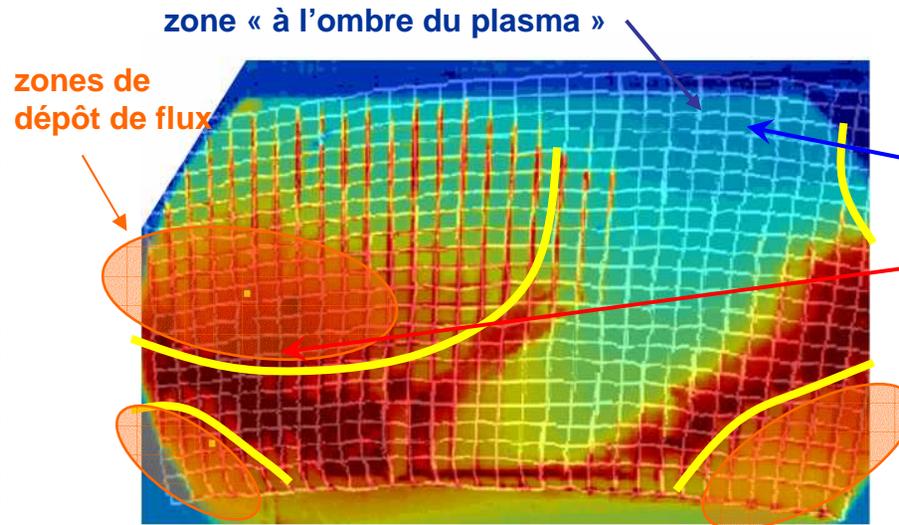
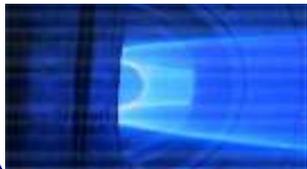
○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

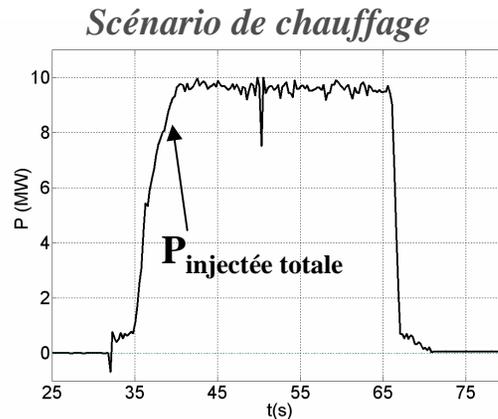
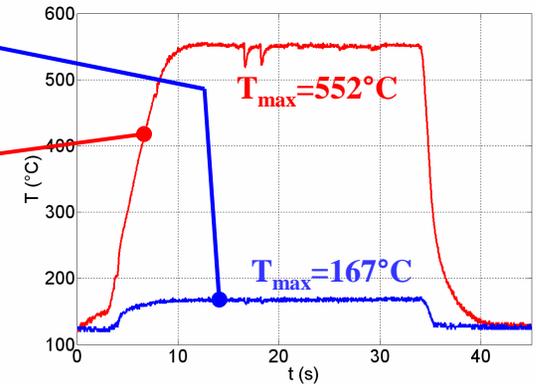
○ Calcul de  $\Phi$  :  
1<sup>o</sup> Résultats

○ Perspectives

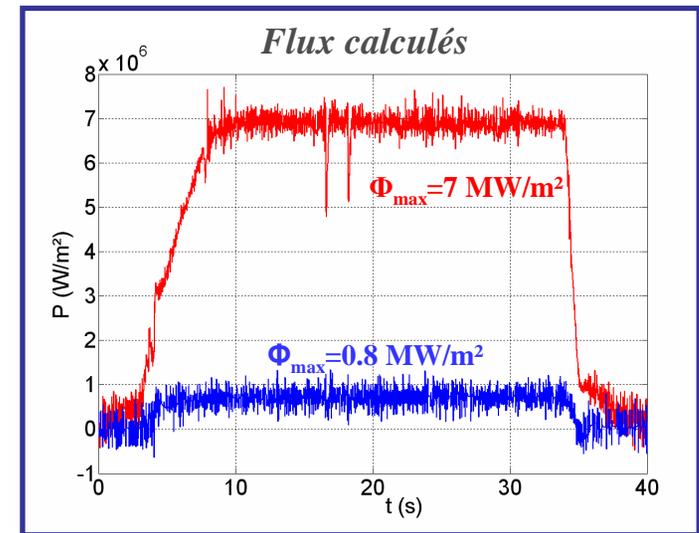


Forme supposée du dépôt de flux

Evolution temporelle des  
températures ( $T_{init}=120^{\circ}\text{C}$ )



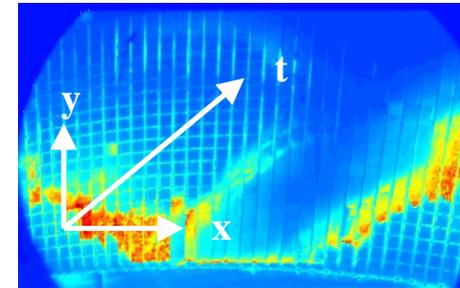
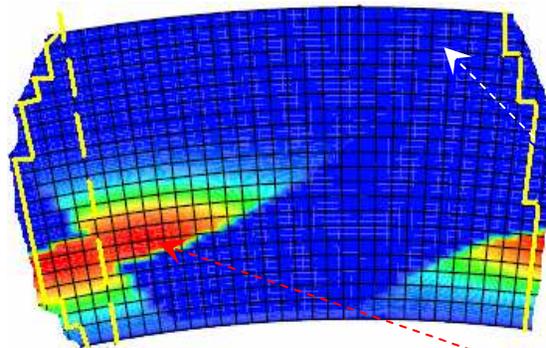
Choc forte puissance 2006 :  
9.6 MW injectés, 26 sec (# 37696)



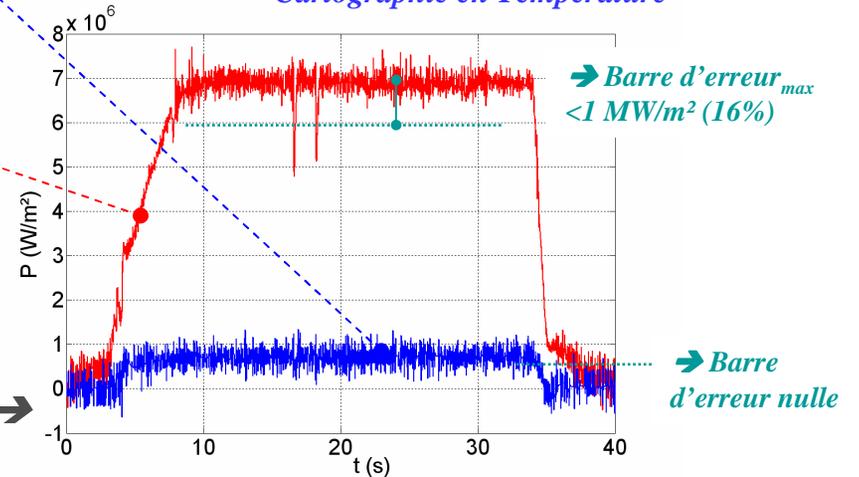
## Perspectives (5<sup>o</sup>étape) : cartographie des flux calculés

Les valeurs de  $T_{IR}(t)$  et donc de  $\Phi_{déposé}(t)$  sont labellisées  
 → Matrice 3D (x,y,t)

### Cartographie en Niveaux de Flux



Cartographie en Température



→ A chaque pas de temps !

Exemple de flux calculés →

→ But : Obtenir une cartographie temps différé de  $\Phi_{déposé}$  (dt=20ms) en s'affranchissant des pbs liés aux dépôts

○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

○ Calcul de  $\Phi$  :  
1<sup>o</sup> Résultats

○ Perspectives



## Perspectives / Conclusions

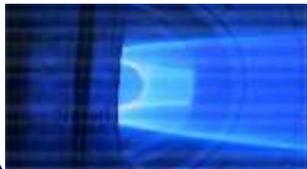
○ Surveillance IR :  
Enjeux – Pbs

○ Déconvolution &  
Quadripôles

○ Traitement des  
images IR

○ Calcul de  $\Phi$  :  
1° Résultats

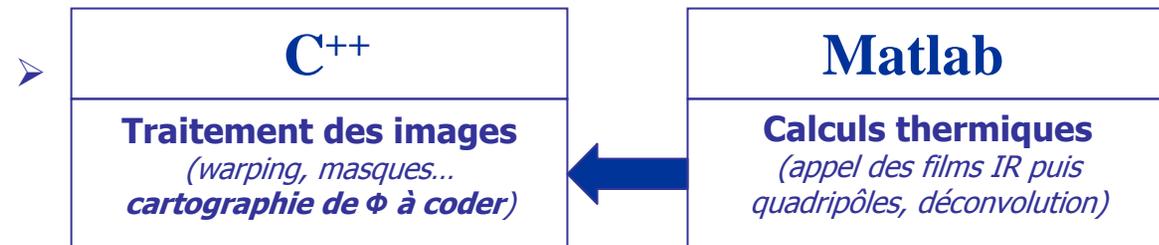
○ Perspectives



### ■ Outil de calcul de Flux EN COURS DE DEVELOPPEMENT sur TS

➤ Permet de calculer l'évolution temporelle des  $\Phi_{\text{déposés}}$  au centre de chaque tuile (secteur 20° du LPT – voie HR)

➤ Calculs réalisés pour les zones propres → zones de dépôts  
(sous réserve de caractériser leurs propriétés et épaisseur – méthode flash)



**Outil intégré**

**Gain en tps de calcul !**

■ Temps différé (entre chocs) => But ultime = Sécurité temps réel

➔ Outil extrapolable aux autres machines : JET, ITER, ...

■ Travail de thèse : « *Etude des dépôts de chaleur* »

✓ *Bilans de puissance*

✓ *Cohérence avec autres diagnostics (calorimétrie, bolométrie, sondes de Langmuir... instrumentation TC sur le LPT ?)*

**Merci de votre attention**

## Quelques références ...

### • Diagnostic IR Tore Supra

[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)

### • Modèle de dépôt de chaleur (Tokaflex)

[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

### • Traitement des images

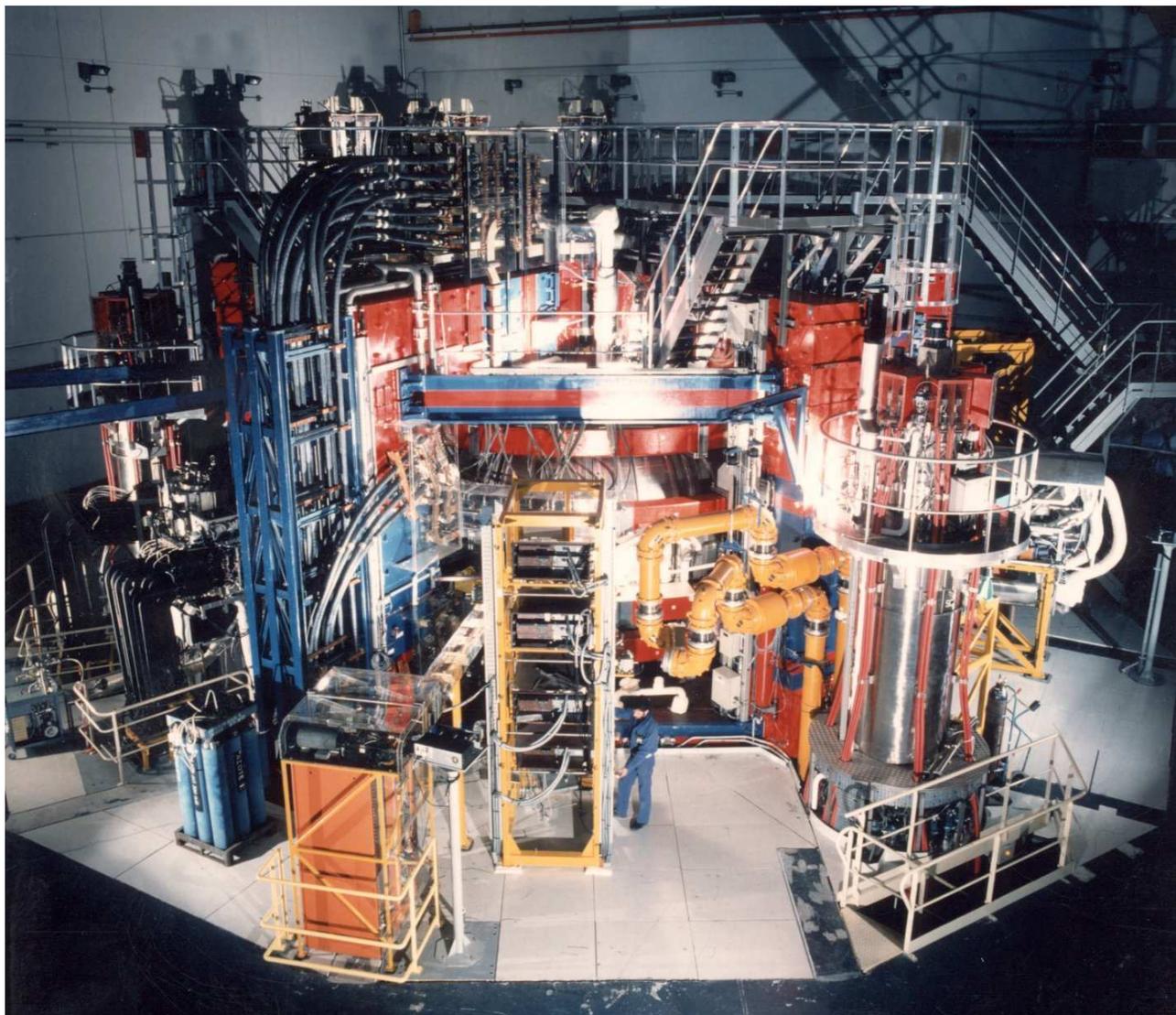
[4] H.Maître, Le traitement des images, *Hermes* (2003)

### • Méthodes de calcul de flux et quadripôles

[5] D. Maillet, 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*

*Hall de Tore Supra (vue extérieure de la machine)*



## Labellisation d'une trame du LPT

(secteur de  $30^\circ \Leftrightarrow$  LPT voir Q6A ou B)

...dans la domaine visible ...

R.Stage G.Dunand

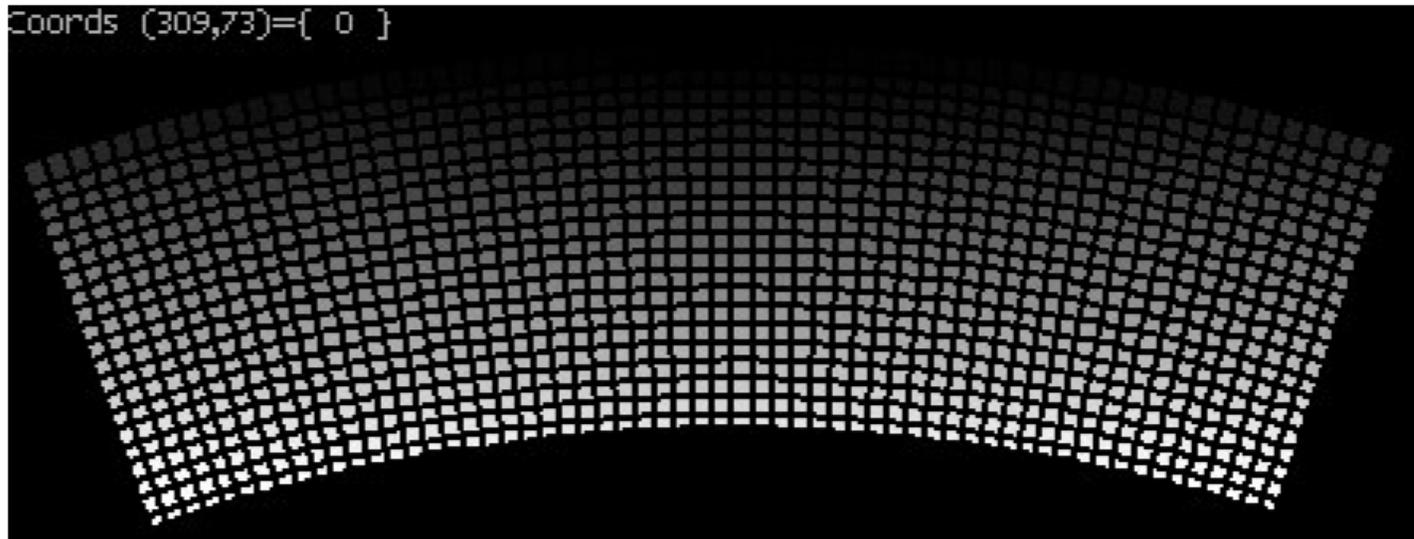


Figure n° 19 : Labellisation automatique des éléments du LPT

*Vues IR et Visibles : Antenne et Coupleur (C3)*

