



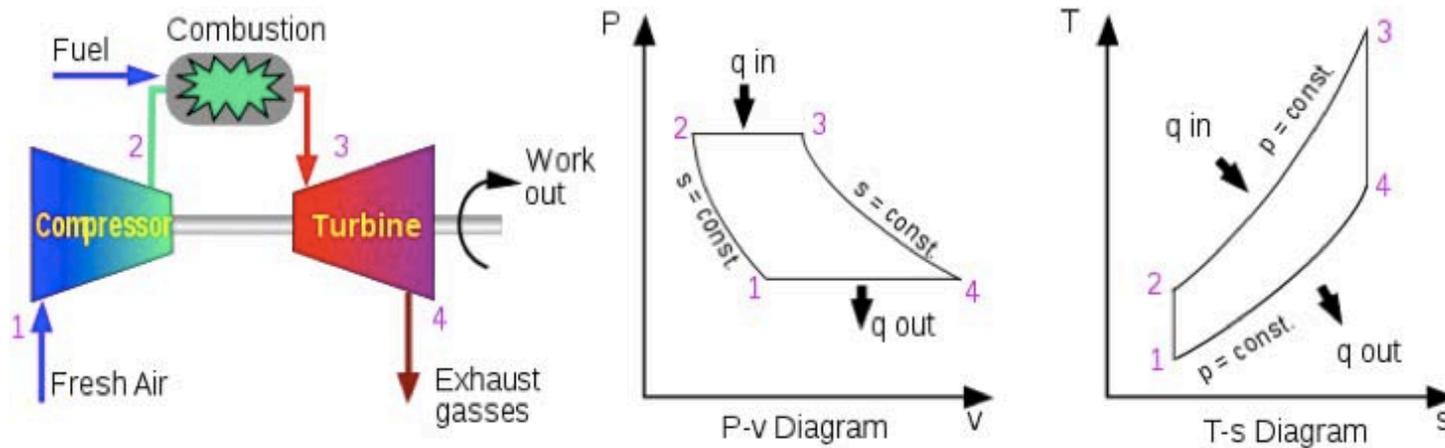
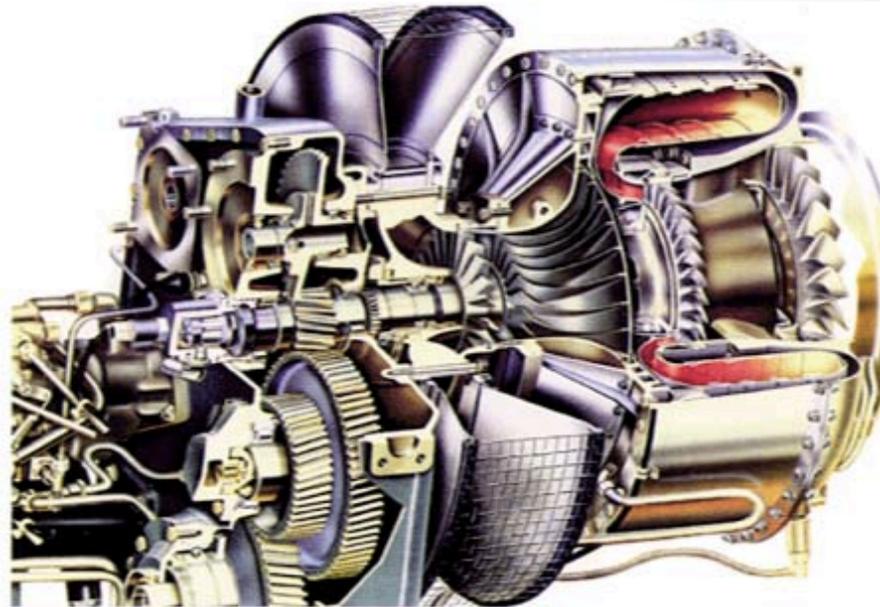
# Couplage combustion - thermique structure - rayonnement

Jorge AMAYA, Damien POITOU, Elena COLLADO, Florent  
DUCHAINE, Bénédicte CUENOT, Thierry POINSOT

# Propulsion hélicoptère

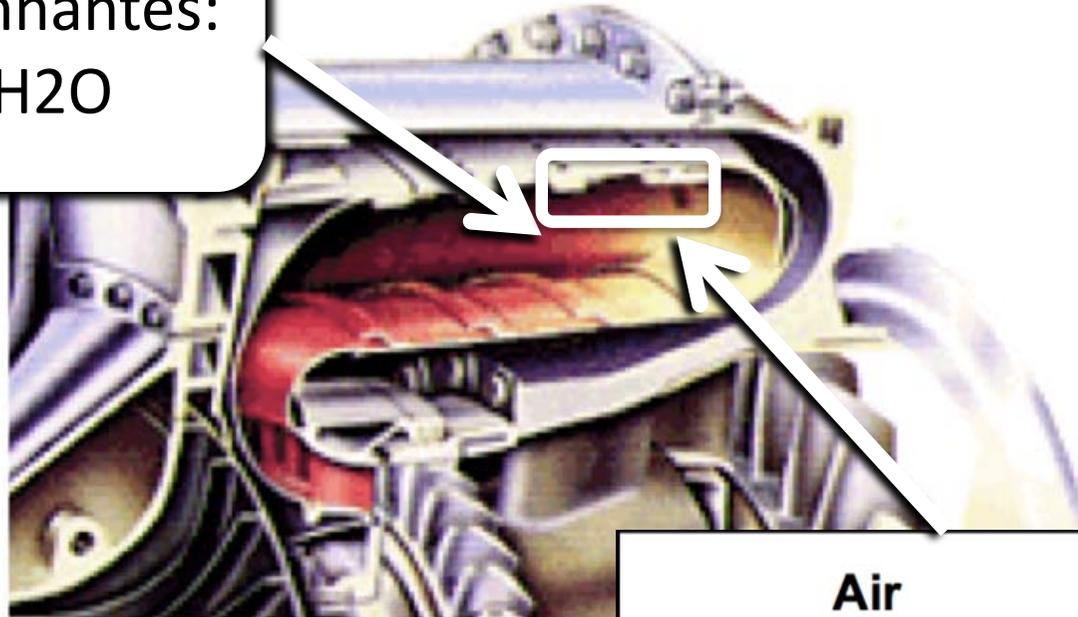


# Chambre de combustion

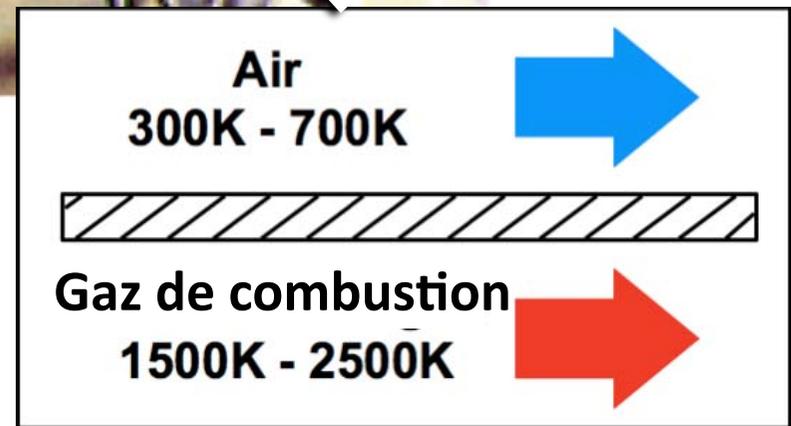


# Echanges thermiques dans une chambre

Espèces rayonnantes:  
CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O



Limite de fusion:  
1200K-1800K





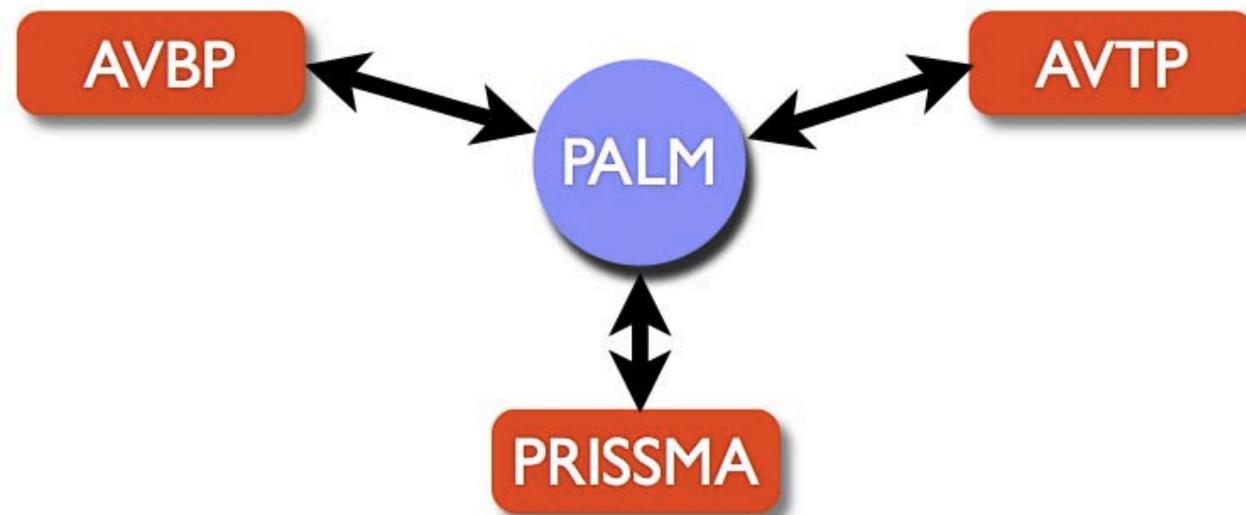
# Pour quoi couplage LES – thermique - rayonnement?

- En combustion trois modes de transfert existent: convection, conduction et rayonnement.
- A présent la plupart des simulations en combustion ne prennent en compte ni le rayonnement ni la conduction.
- On veut savoir à quel point le fait de négliger ces phénomènes peut changer les résultats d'une LES.

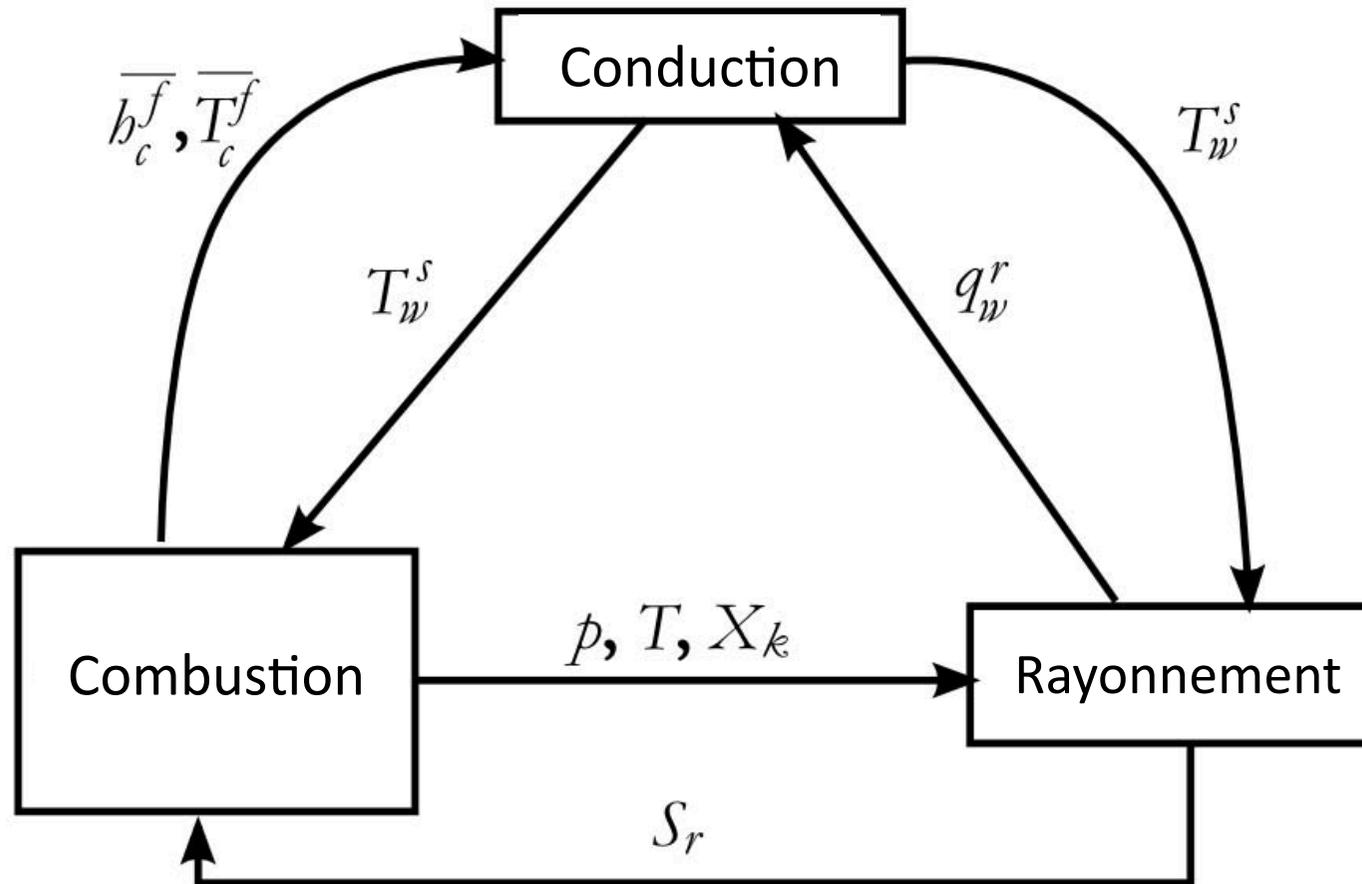
# Technique de couplage

Le problème thermique couplé est résolu à l'aide de **codes spécialisés** dans chaque mode de transfert.

Un **coupleur** est utilisé pour échanger les données entre les codes

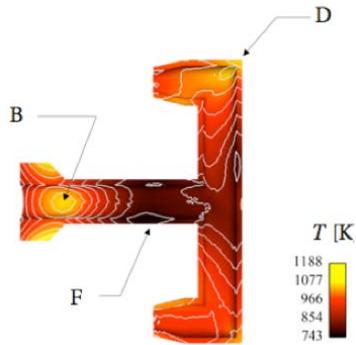
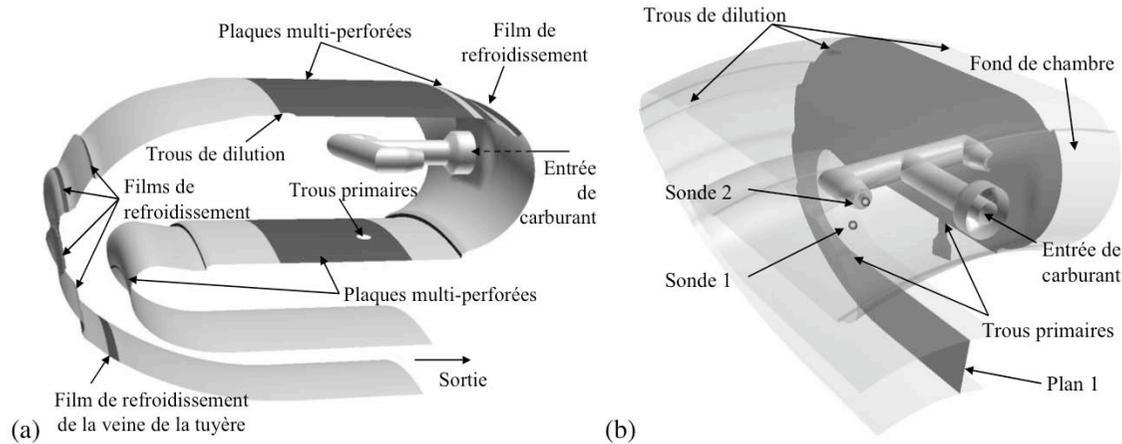


# Stratégie de couplage

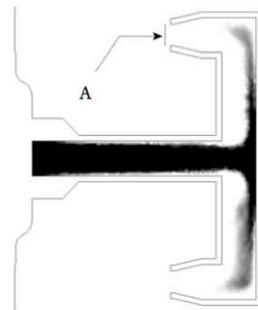


# Effets thermiques Arrius2

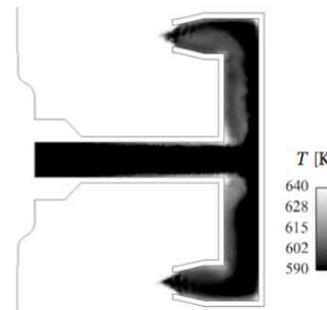
[1] Amaya, J., Thèse de doctorat, INPT, 2010



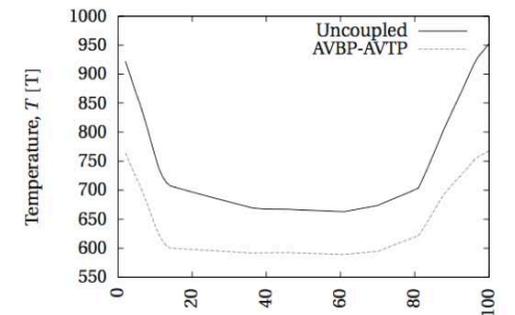
Température de la surface interne de l'injecteur



AVBP



AVBP  
+  
AVTP



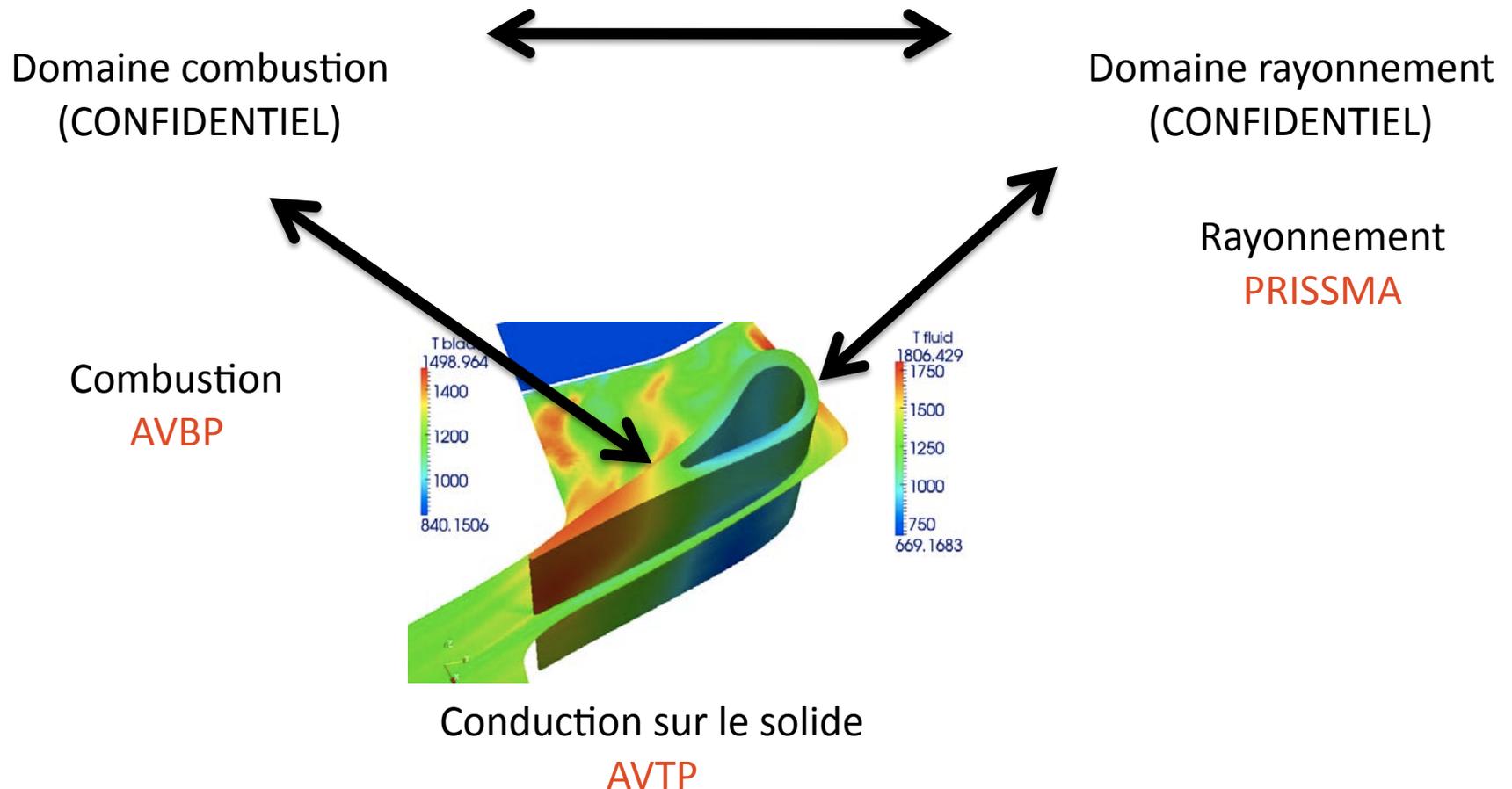
Position along the diameter at the injector tip,  $d$  [%]



# Multi-physique sur Ardiden3

## Projet STRASS

[2] Amaya et al., CTR Summer Program, Stanford, 2010

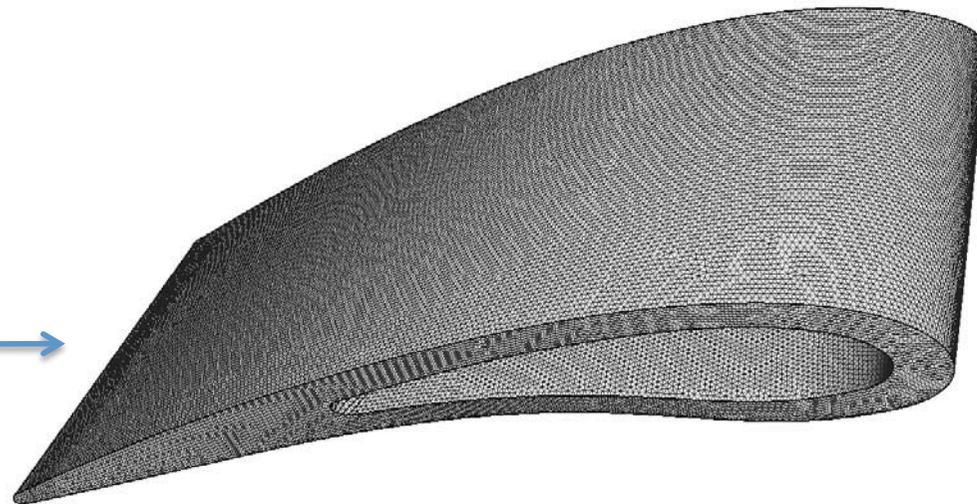


# Le solide calculé avec AVTP

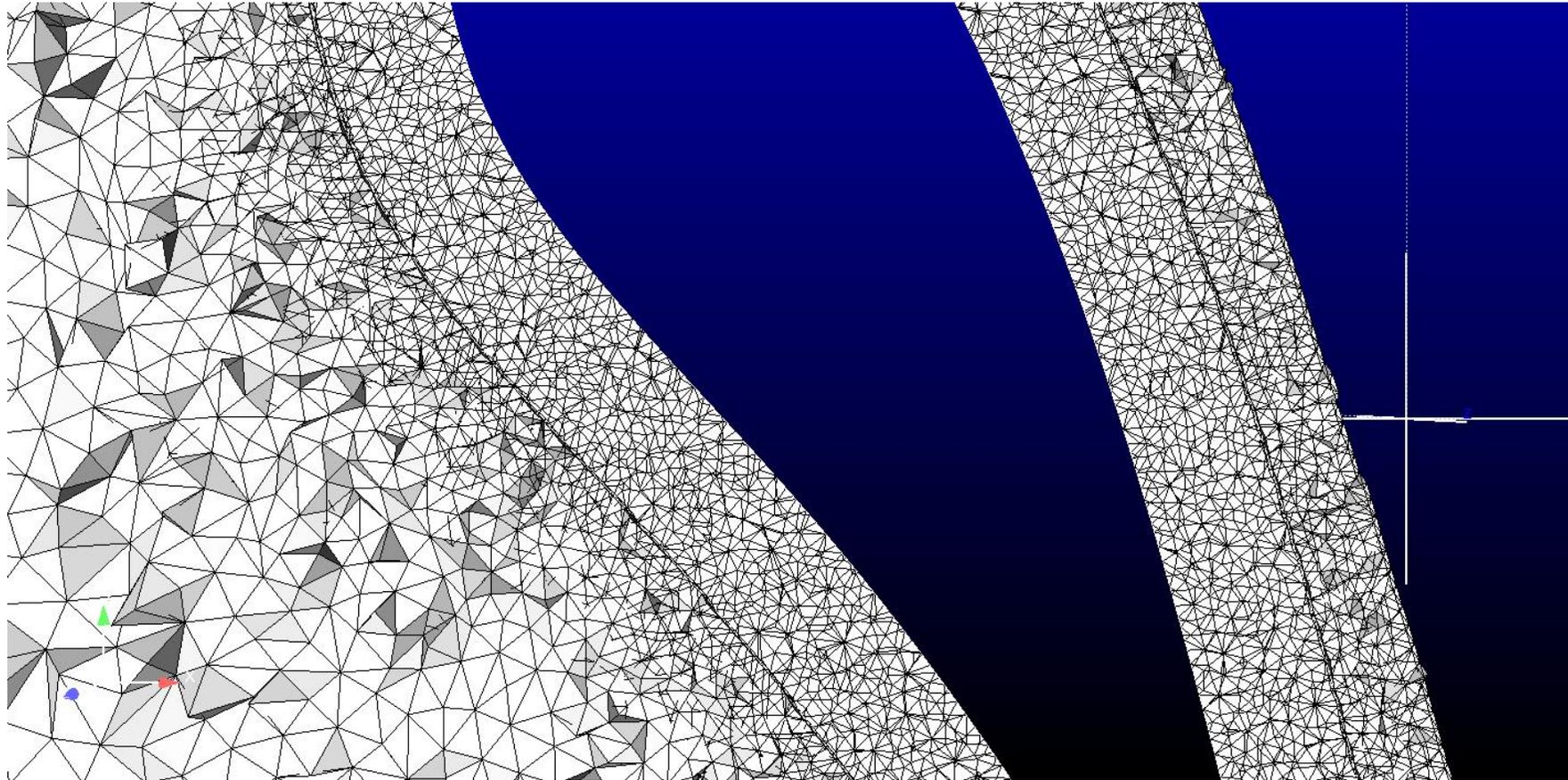
Géométrie réelle de la pale  
(CONFIDENTIEL)

← Géométrie proposée

Géométrie simplifiée →

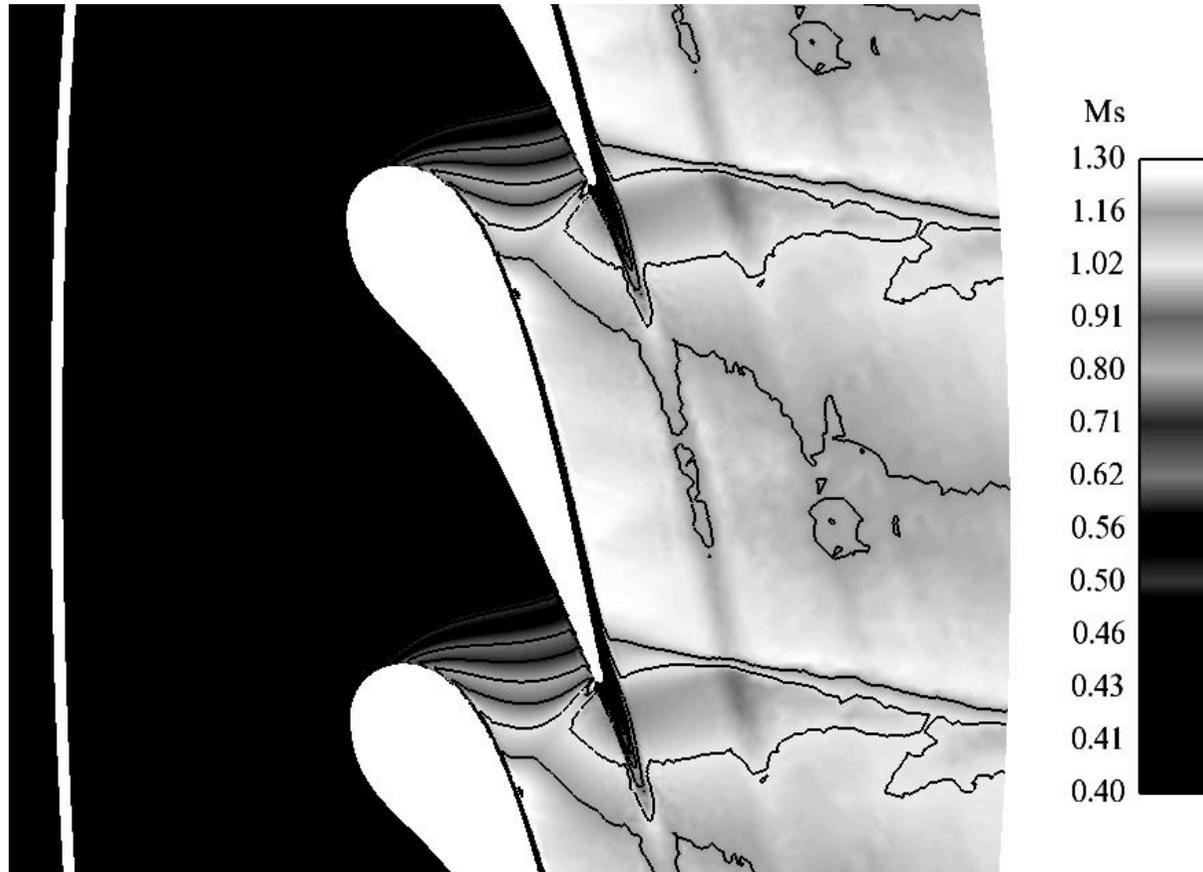


# Maillage Fluide/Solide



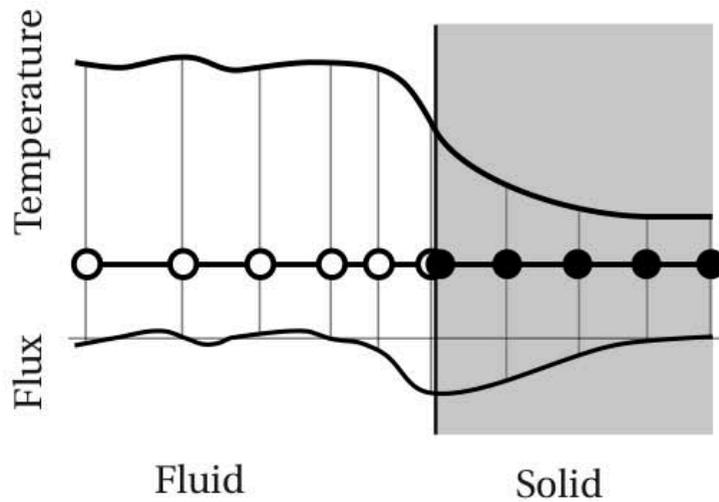
La taille des mailles sont semblables de chaque coté de l'interface

# Fluide dans le DHP

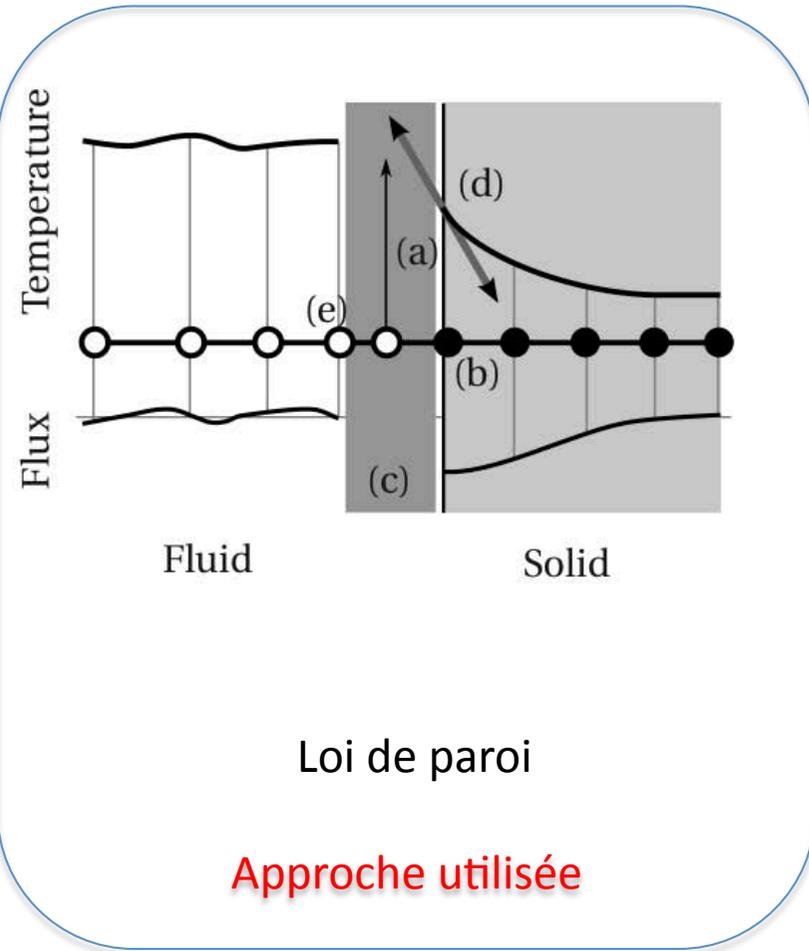


$$M^{isentropic} = \sqrt{\left( \left( \frac{p_0^{freestream}}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \cdot \frac{2}{\gamma-1}}$$

# Couplage AVBP-AVTP



Couche limite résolue



Loi de paroi

Approche utilisée

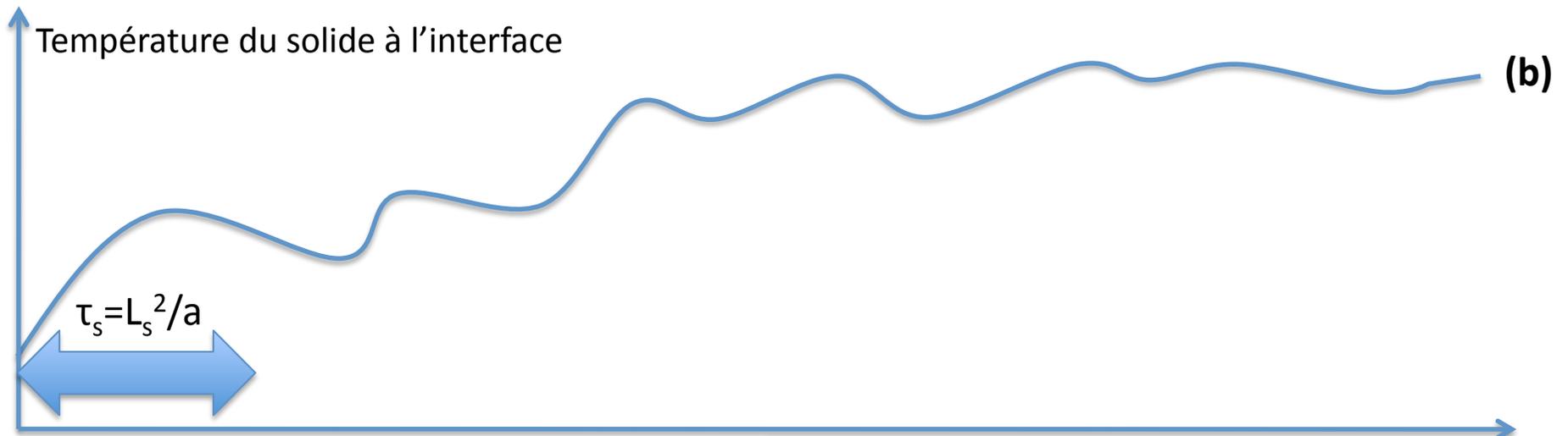
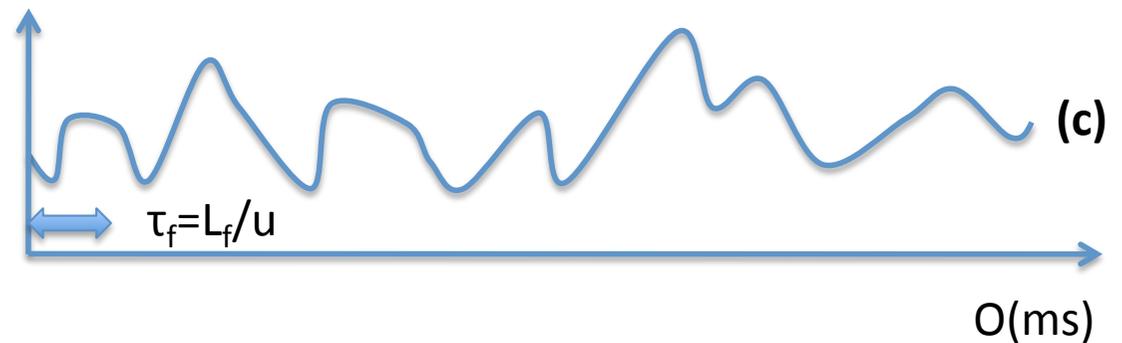
# Choix des points de couplage

Le solide est beaucoup plus inertielle et son temps caractéristique dépasse la seconde.

$$\tau_f = L_f / u = 9 \times 10^{-5} \text{ [s]}$$

$$\tau_s = L_s^2 / a = 4,11 \text{ [s]}$$

Flux thermique à l'interface dans le fluide

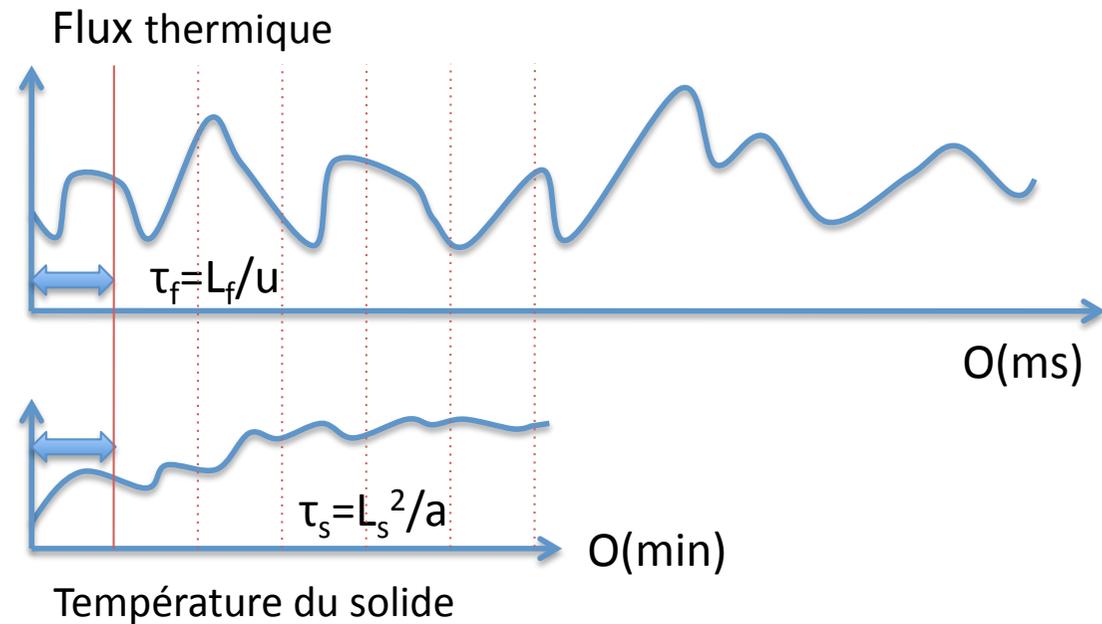


# Choix des points de couplage

On utilise une technique de couplage asynchrone en gardant une relation entre les temps caractéristiques:

Couplage **AVBP** tous les  $\alpha_f \tau_f$

Couplage **AVTP** tous les  $\alpha_s \tau_s$



On montré que le meilleur choix est d'utiliser  $\alpha \ll 1$

# Conditions limites sur la pale

**Refroidissement interne:** coefficient de transfert convectif ( $h$ ) et température ( $T_{cooling}$ ) imposés :

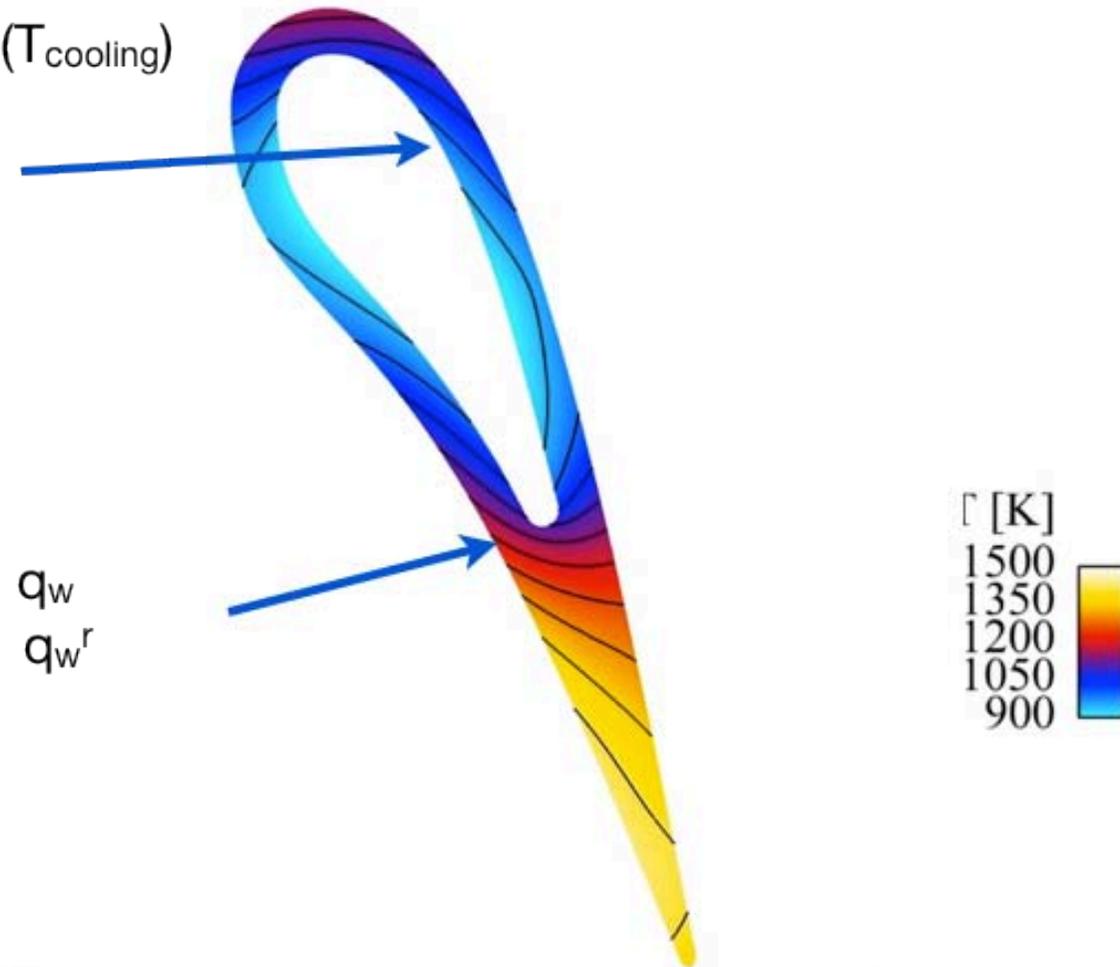
$$\phi = h(T_{wall} - T_{cooling})$$

**Paroi externe:** transfert couplé

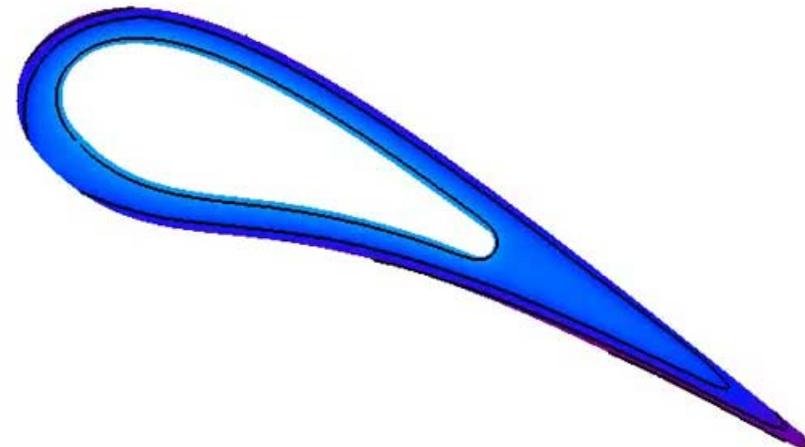
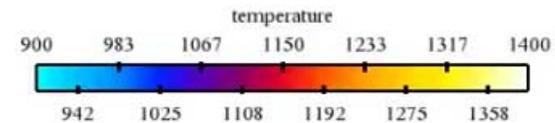
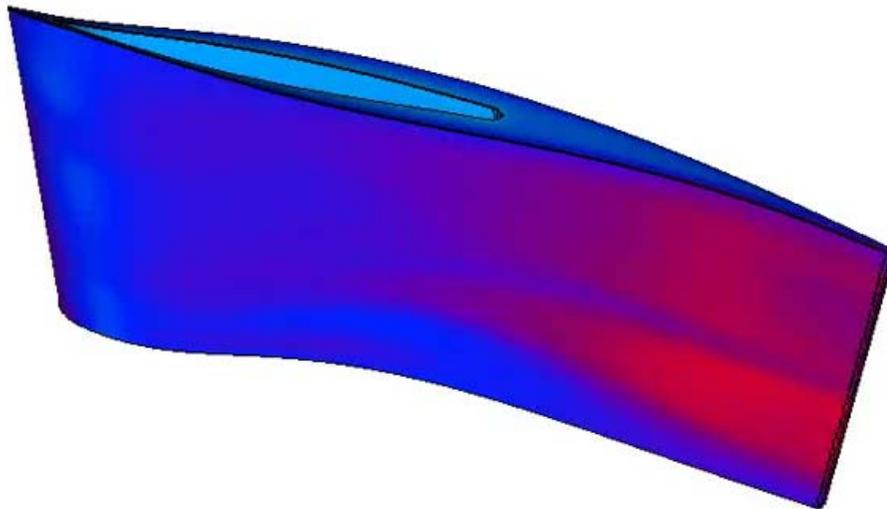
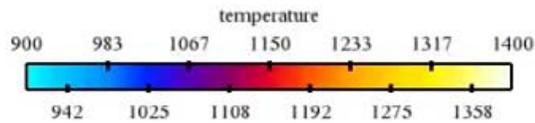
Loi de paroi (*Schmitt et al, JFM 2007*)  $\longrightarrow q_w$

Rayonnement (la paroi émet!)  $\longrightarrow q_w^r$

$$\phi = q_w + q_w^r$$



# Convergence de la température de pale



Le solide converge vers une température moyenne autour de 1130[K]  
Il existe encore des fluctuations à la surface.

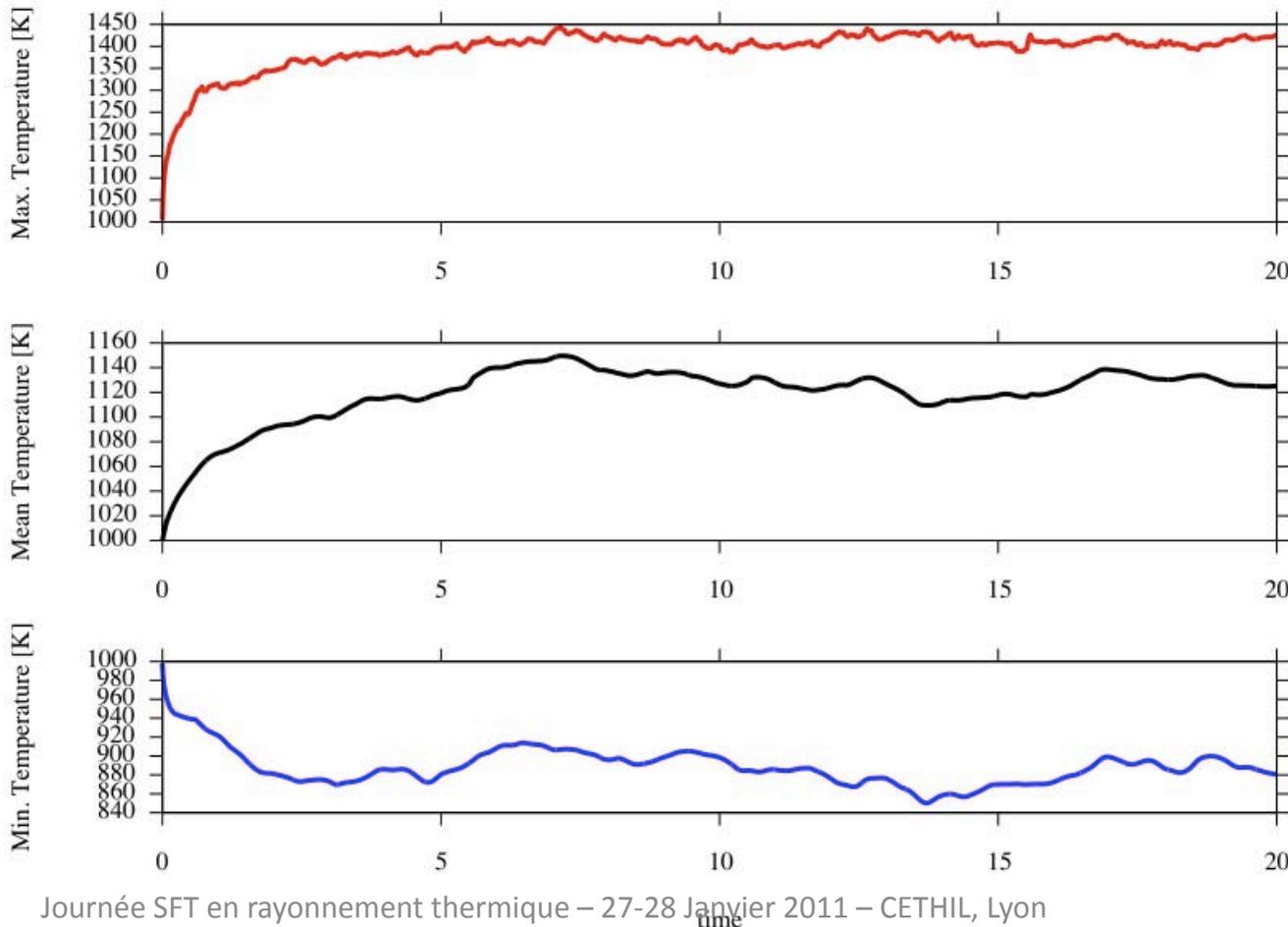


# Evolution temporelle de la température de pale

$$\alpha_f = 0,6, \alpha_s = 0,01$$

It AVBP = 2370

It AVTP = 286



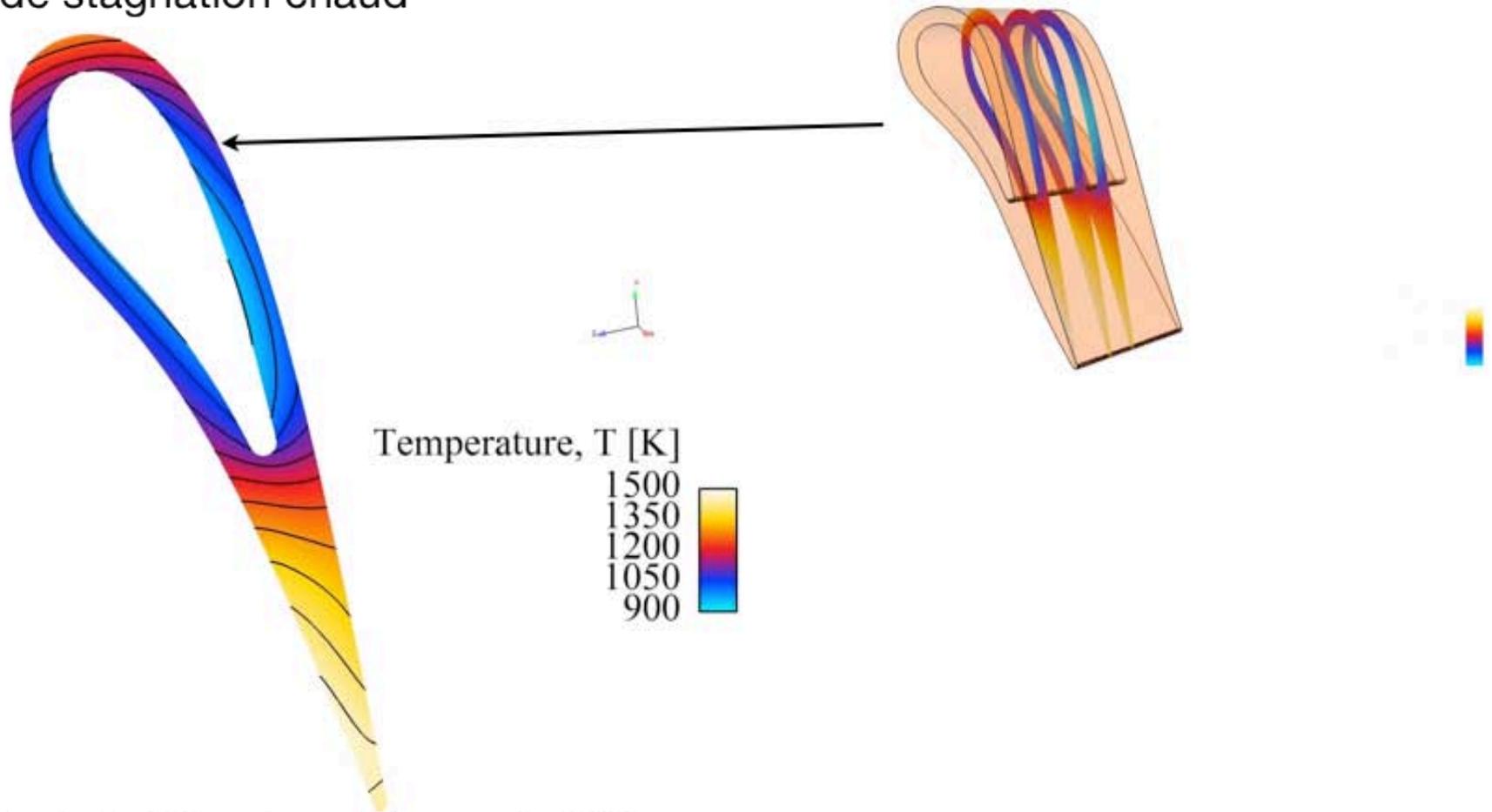
MAXIMALE

MOYENNE

MINIMALE

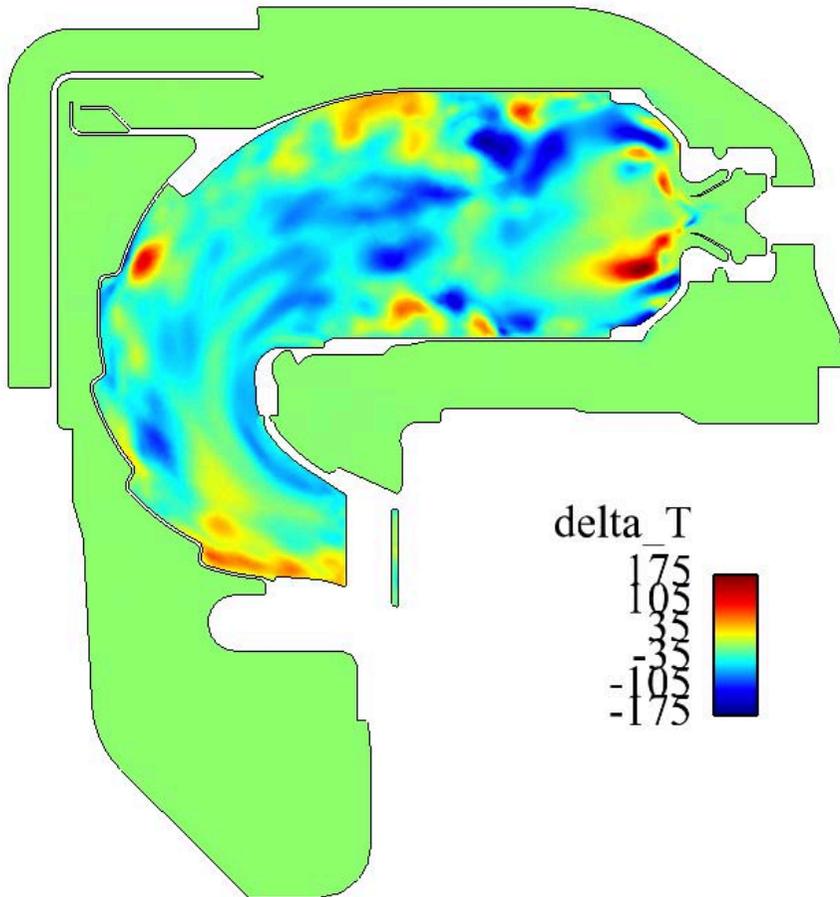
# Thermique à l'intérieur de la pale

Point de stagnation chaud



Bord de fuite chaud (pas refroidi)

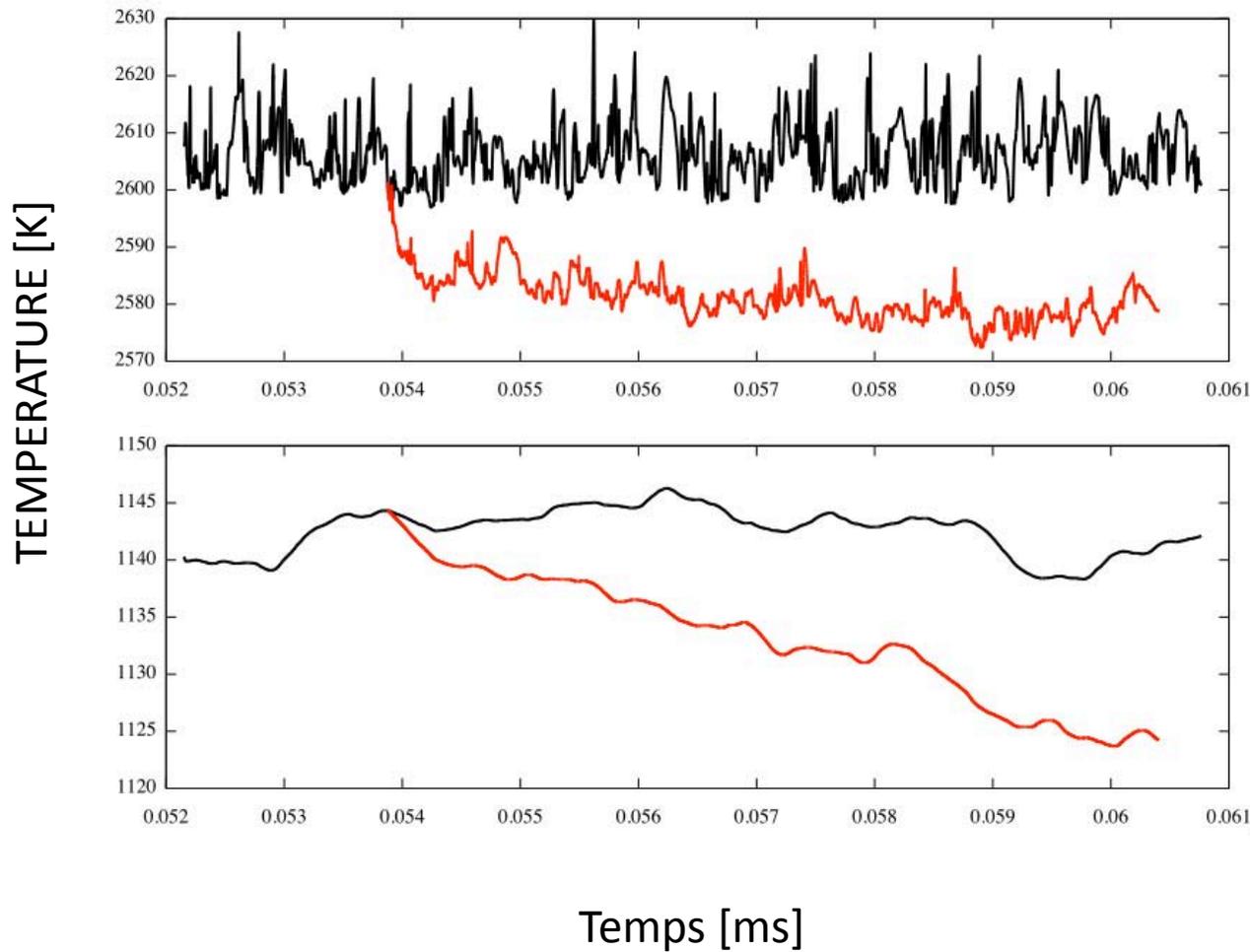
# Inclusion du rayonnement



Gain de température dans les zones froides, autour des multiperf et des jets de dilution, et près des films de refroidissement.

Perte de température dans les gaz chauds au centre du domaine

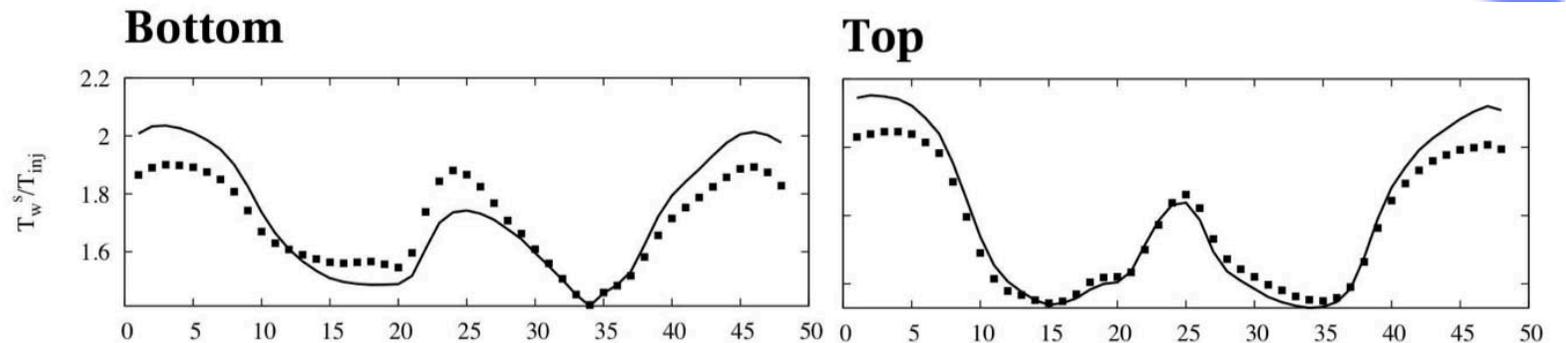
# Effets du rayonnement sur la LES



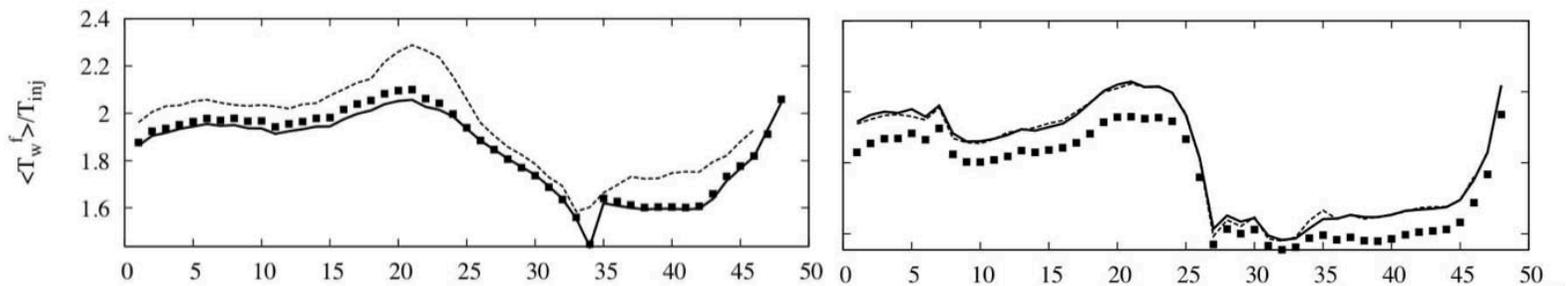
**Noir:** sans rayonnement  
**Rouge:** avec rayonnement

# Effets du rayonnement sur la pale

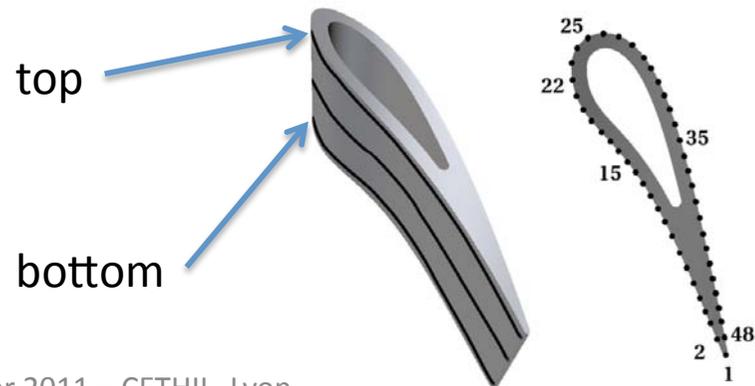
Température de surface du solide



Température du fluide à l'interface



- AVBP seul
- AVBP - AVTP
- AVBP - AVTP - PRISSMA



Ordre des points

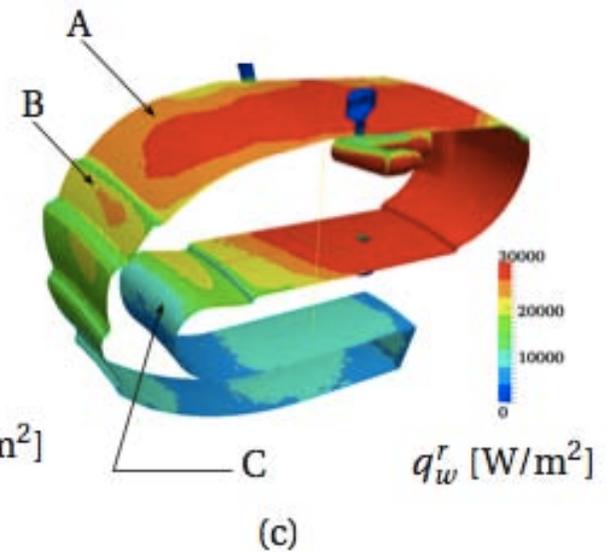
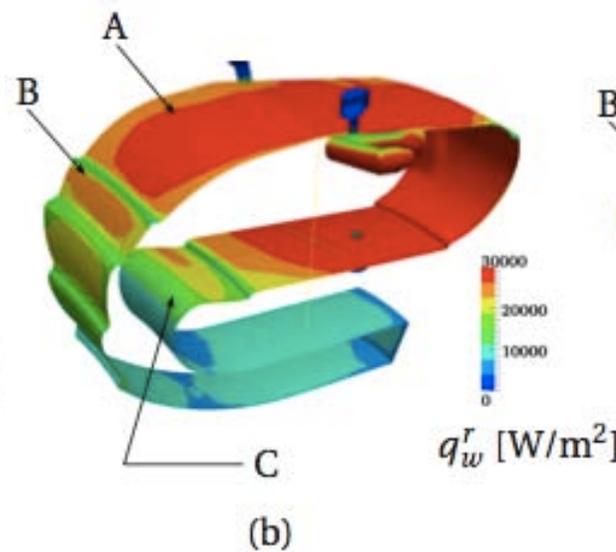
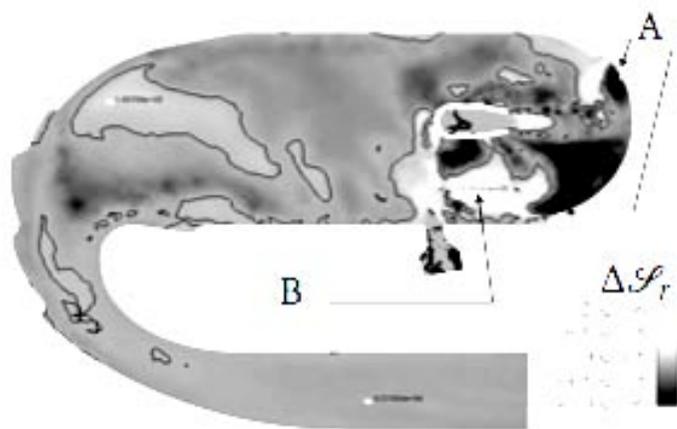


# Influence de la turbulence sur le rayonnement

- On a accès à terme source radiatif moyen:  $\langle S_r \rangle$
- On peut aussi calculer le rayonnement à partir des champs moyens:  $S_r (\langle T \rangle, \langle X_k \rangle)$
- On peut comparer ces deux champs pour évaluer l'influence du rayonnement.
- On peut aussi voir les effets sur les flux radiatifs vers la paroi

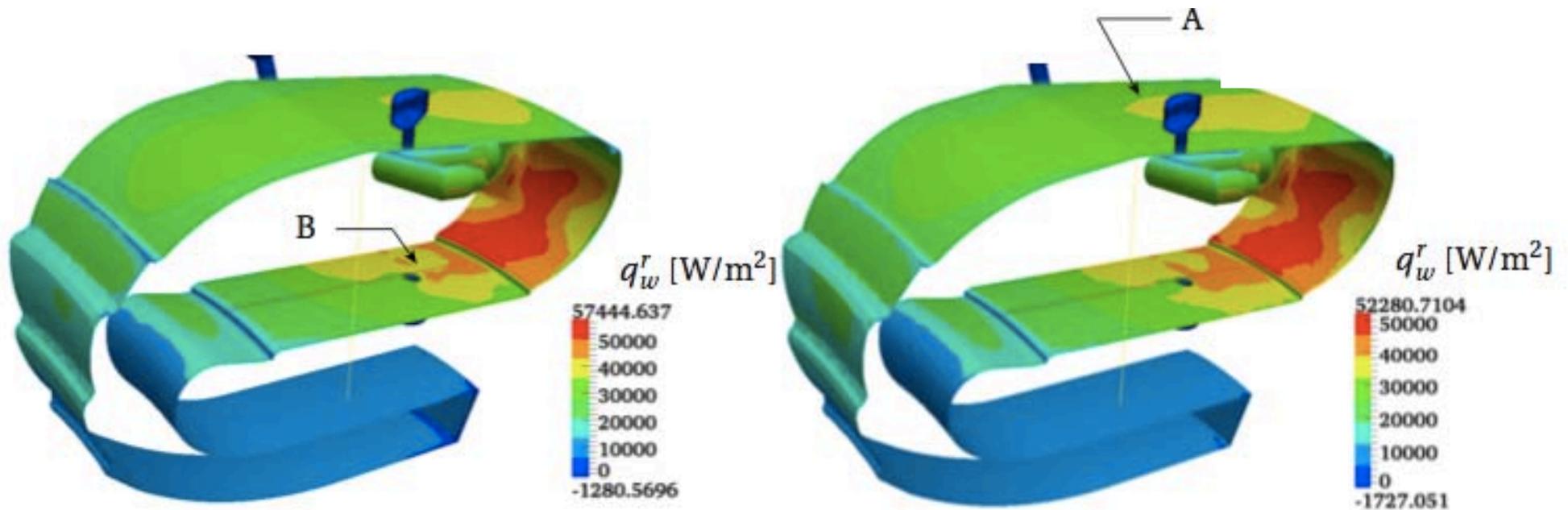
# Différences entre les termes sources radiatifs

$$\Delta \mathcal{S}_r = \overline{\mathcal{S}_r(T, X_k)} - \mathcal{S}_r(\overline{T}, \overline{X_k})$$



# Différence des champs radiatifs

$$\Delta \mathcal{S}_r = \overline{\mathcal{S}_r(T, X_k)} - \mathcal{S}_r(\overline{T}, \overline{X_k})$$





# Perspectives

- Rajouter une modèle thermique pour les multi-perforations (G. Cottin - ONERA)
- Inclure un modèle de production/transport de suies pour AVBP et pour PRISSMA (G.Lecoq, D. Poitou)
- Faire des calculs multi-physiques de la chambre avec contournement et DHP en incluant: LES + rayonnement + suies

# Conclusions

- On a **développé** un système de **calcul couplé** entre la combustion, le rayonnement et la conduction.
- On a monté la faisabilité des **calculs couplés à deux et trois codes**.
- Les **effets thermiques** sur la structure **doivent être maîtrisés** pour la bonne résolution de la LES.
- Le **rayonnement** n'a pas joué un effet prépondérant jusqu'à présent, mais **peut être important** avec le **calcul thermique du tube à flamme**.
- Le **couplage LES/rayonnement permet d'étudier des modèles de TRI** nécessaires pour le bon calcul des flux radiatifs pariétaux.

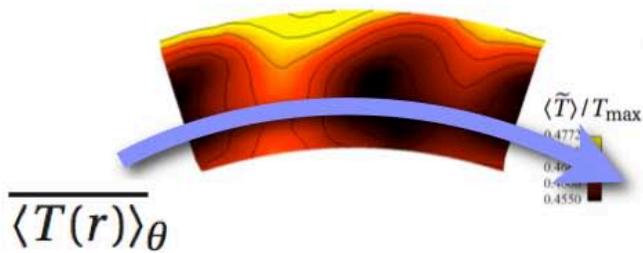
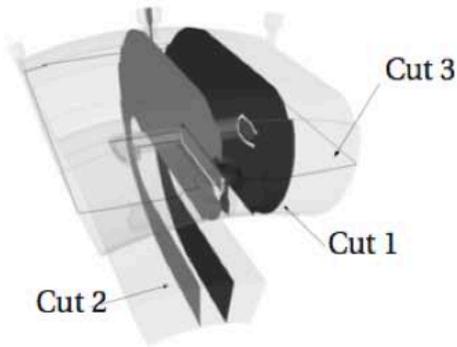




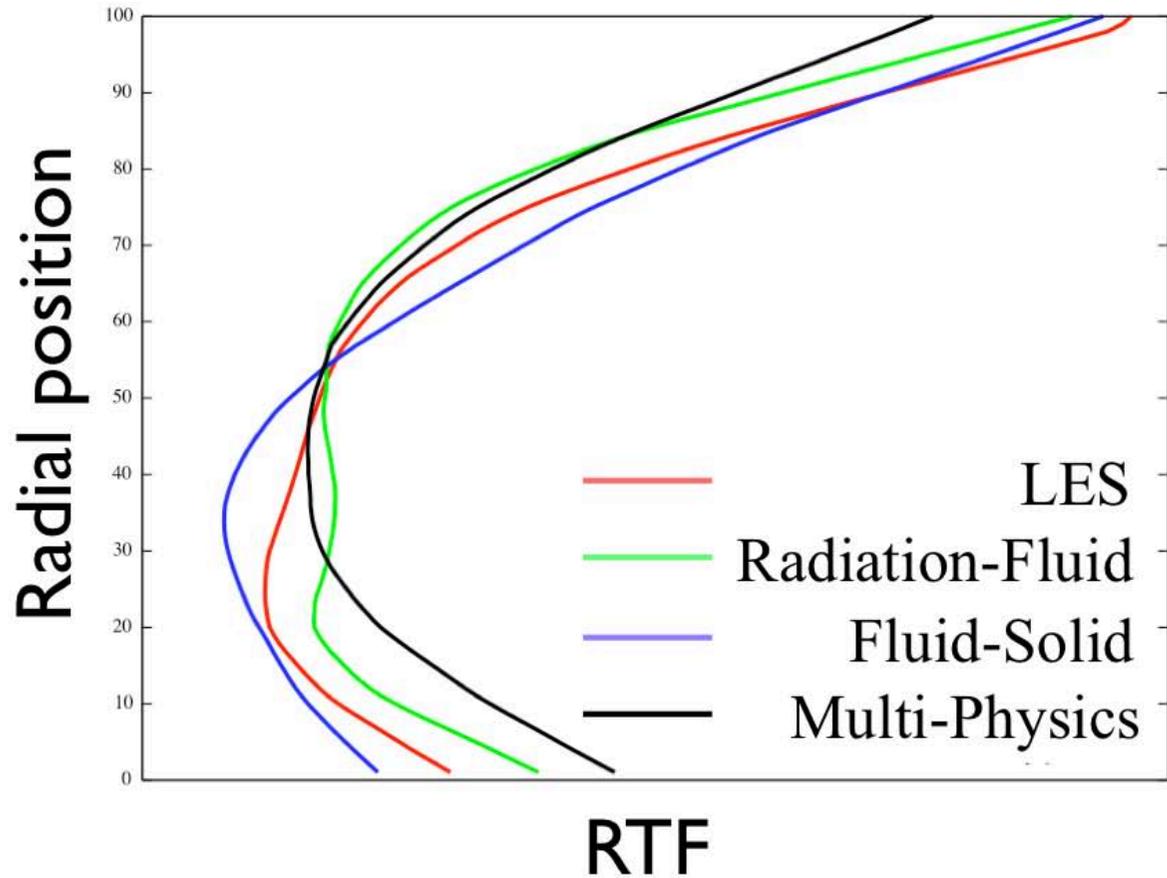
# BACKUP



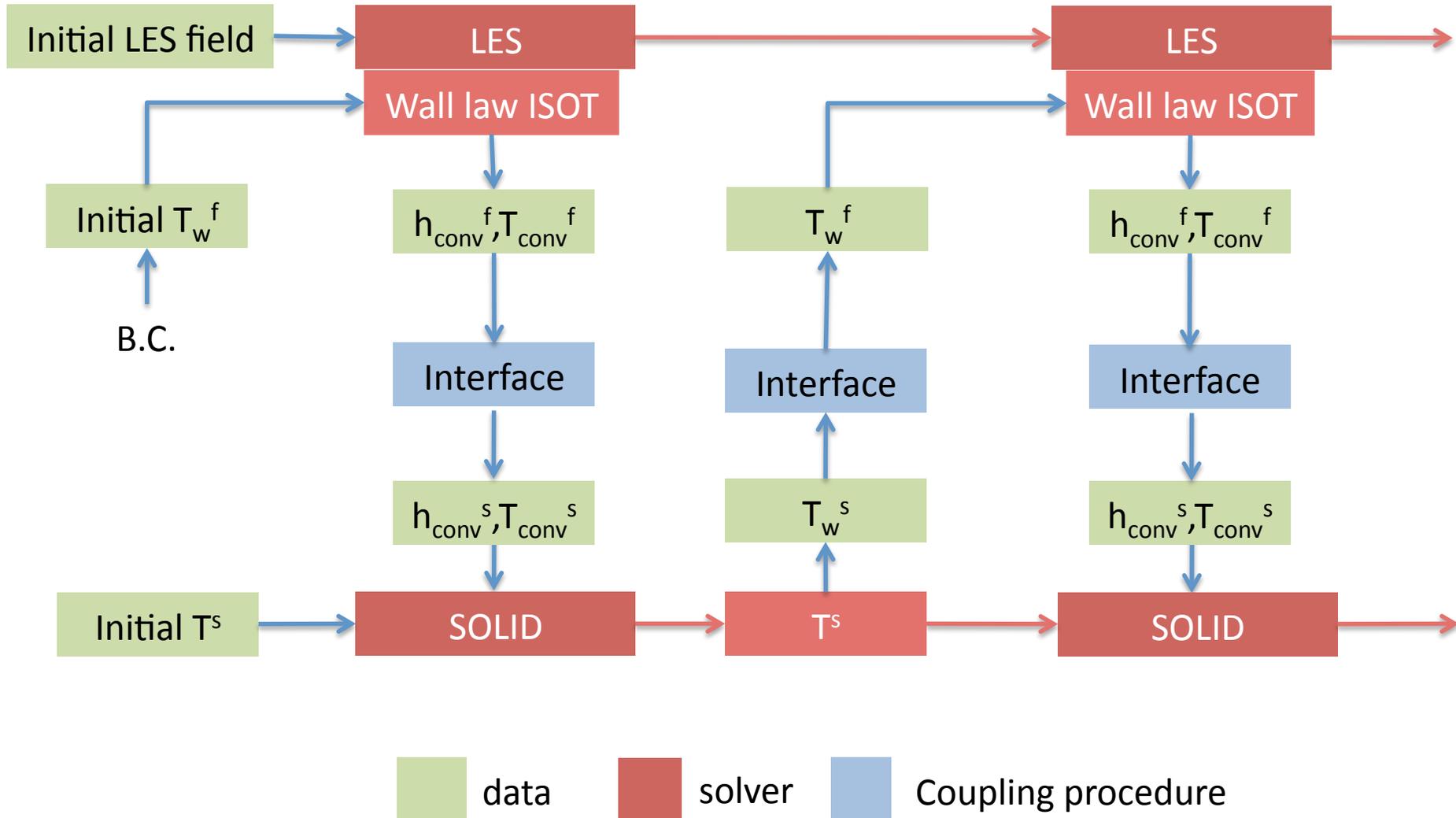
# FRT chambre



$$RTF(r) = \frac{\overline{\langle T(r) \rangle}_\theta - \overline{\langle T \rangle}_{\text{exit}}}{\overline{\langle T \rangle}_{\text{exit}} - \overline{\langle T \rangle}_{\text{inj}}}$$

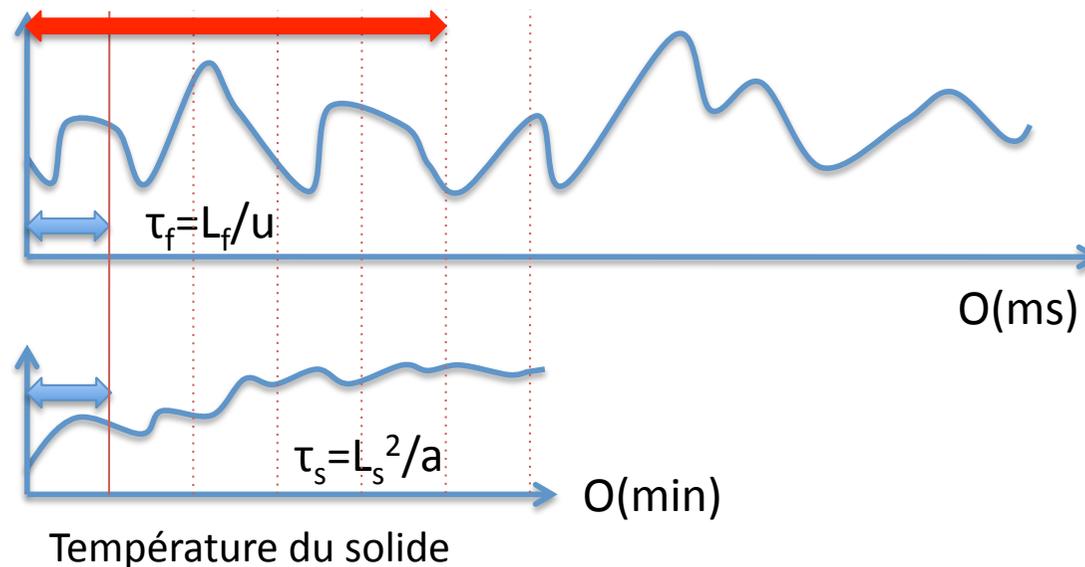


# Schema de couplage



# On étudie des méthodes alternatives

Au lieu d'échanger des moyennes du flux thermique sur les intervalles, on échange la moyenne **cumulée**



**Pour:** le moyennage évite les grandes fluctuations des flux fluide → solide  
**Contre:** cette méthode peut être aussi lente que le chaînage

# Relaxation

Pour obtenir le flux à l'itération n+1 on utilise la valeur du flux à l'itération précédente et le flux pariétal calculé en utilisant la température de paroi à l'itération n:

$$q_w^{s,n+1} = (1 - \omega)q_w^{s,n} + \omega F(T_w^{f,n})$$

Avec  $\omega$  le coefficient de relaxation du couplage  
et F la loi de paroi pour obtenir le flux pariétal

$$q_w^{f,WM} = F(T_w^{f,n})$$

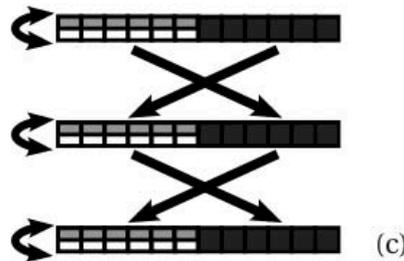
Ce système permettrait d'avoir un contrôle sur la convergence et sur la vitesse à laquelle le couplage y arrive

# Equilibrage de charge

[1] Amaya, J., Thèse de doctorat, INPT, 2010



$$N_{it} = \frac{\Delta t_{rad}}{\Delta t_{CFL}} \propto \frac{1}{M}$$



$$t_{s-f} = N_{it} t_{rad}$$

- Processeur occupé par code 1
- Processeur occupé par code 2
- Processeur occupé par code 3

$$\frac{P_{s-f}}{P_{rad}} = N_{it} \frac{(t_{LES}^1 + t_{sol}^1)}{t_{rad}^1}$$

# Coût de calcul

	AVBP	AVTP	PRISSMA	Temps CPU pour 0.5 ms
Couplage AVBP+AVTP	230	24	-	1 heure
Couplage 3 codes	105	12	48	3 heures

Pour simuler 0.5 ms de temps physique cette simulation a besoin de beaucoup de ressources. Les pertes par encapsulation des codes sous PALM sont négligeables.

# Interaction Rayonnement Turbulence (RTI)

$$\overline{\mathcal{S}_r(T, X_k)} = 4\pi\sigma\kappa_P(\overline{T}, \overline{X_k})\overline{T}^4 R_{\kappa_P}(R_T + R_{I_b}) - \int_0^\infty (\overline{\kappa_\nu G_\nu} + \overline{\kappa'_\nu G'_\nu}) d\nu$$

$$R_{\kappa_P} = \frac{\overline{\kappa_P(T, X_k)}}{\kappa_P(\overline{T}, \overline{X_k})}$$

$$R_T = 1 + 6\frac{\overline{T'^2}}{\overline{T}^2} + 4\frac{\overline{T'^3}}{\overline{T}^3} + \frac{\overline{T'^4}}{\overline{T}^4} \approx 1 + 6\frac{\overline{T'^2}}{\overline{T}^2}$$

$$R_{I_b} = 4\frac{\overline{\kappa'_P T'}}{\overline{\kappa_P \overline{T}}} + 6\frac{\overline{\kappa'_P T'^2}}{\overline{\kappa_P \overline{T}^2}} + 4\frac{\overline{\kappa'_P T'^3}}{\overline{\kappa_P \overline{T}^3}} + \frac{\overline{\kappa'_P T'^4}}{\overline{\kappa_P \overline{T}^4}} \approx 4\frac{\overline{\kappa'_P T'}}{\overline{\kappa_P \overline{T}}} \approx 4\frac{\overline{T'^2}}{\overline{\kappa_P \overline{T}}} \left( \frac{\partial^2 \kappa_P}{\partial T^2} \right)_{\overline{T}}$$

$$\overline{\kappa_\nu G_\nu} = \overline{\kappa_\nu G_\nu} + \overline{\kappa'_\nu G'_\nu} \approx \overline{\kappa_\nu G_\nu}$$