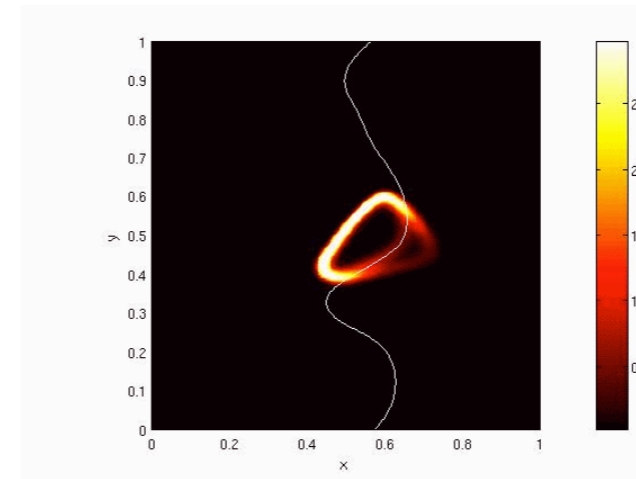
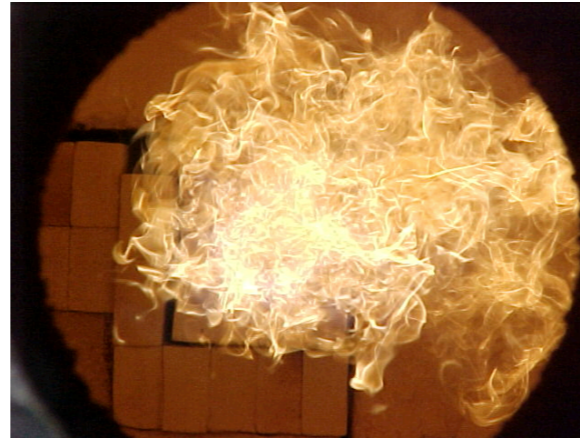
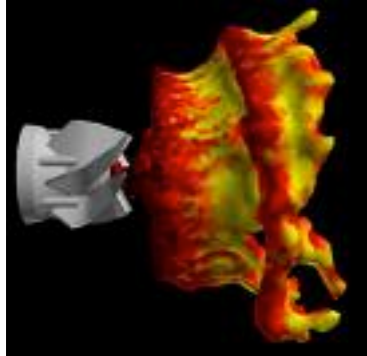


# Couplage Rayonnement Combustion



*Mouna EL Hafi, RAPSODEE, UMR CNRS 5302*

*Collaborations CERFACS, LAPLACE*



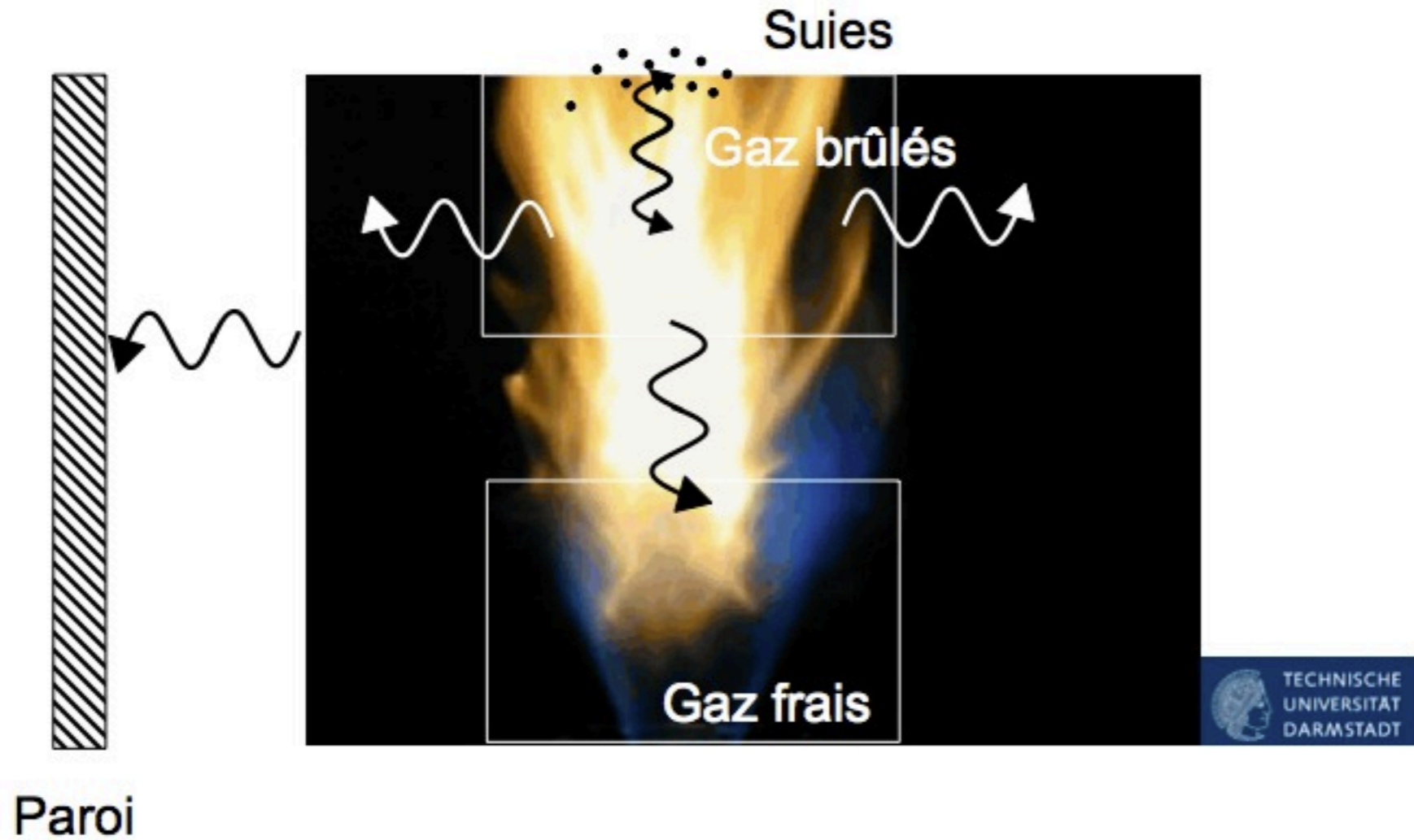
*Journées SFT du 21 octobre 2014*

# Plan

1. Importance du rayonnement en combustion
2. Etat de l'art rayonnement combustion en SGE
3. Comment traite -t-on le couplage?
4. Formulation intégrale et Monte Carlo
5. Questions

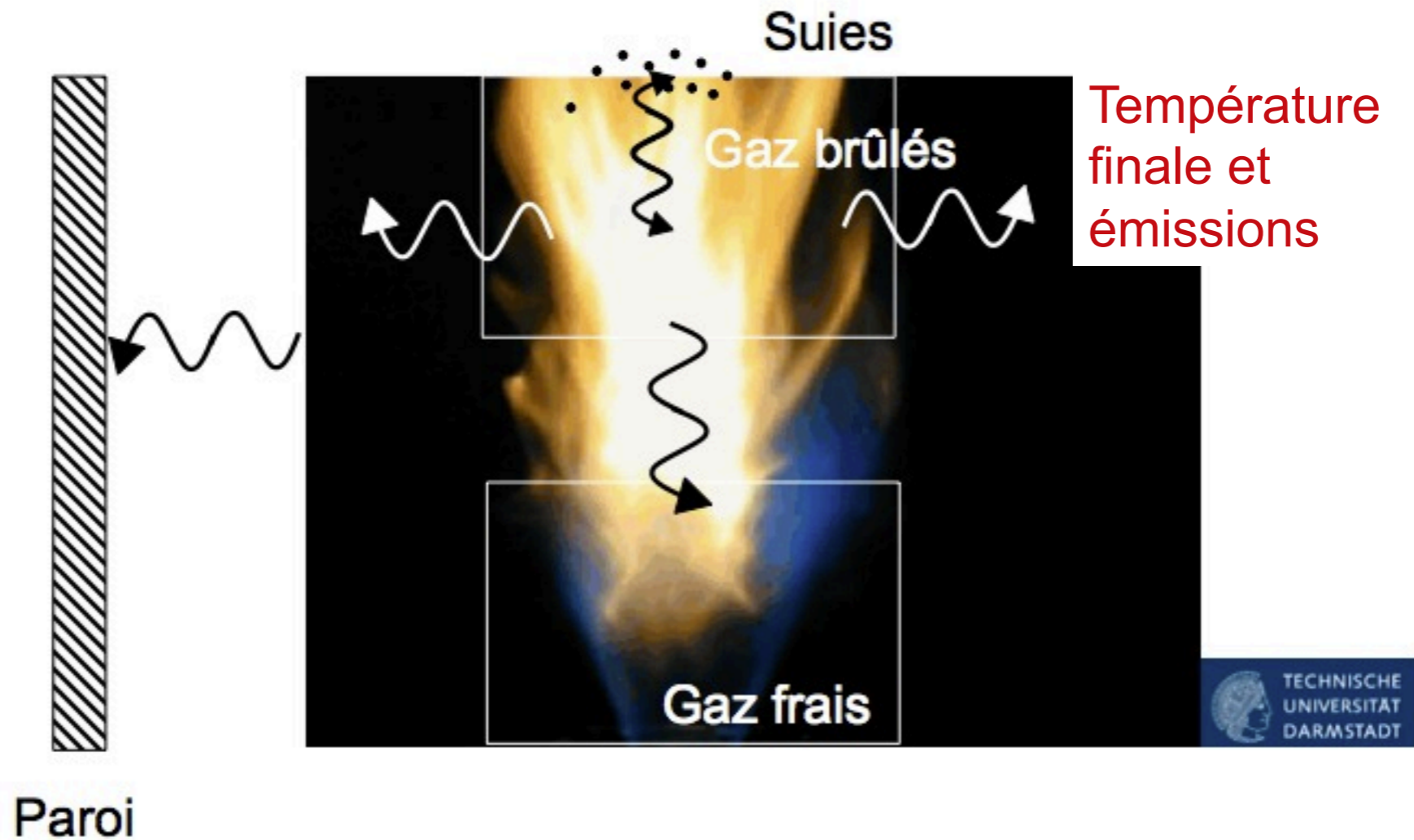
- 1. Problématique
- 2. Etat de l'art
- 3. Démarche
- 4. Monte Carlo et Formulation intégrale
- 5. Questions

# Impact rayonnement combustion



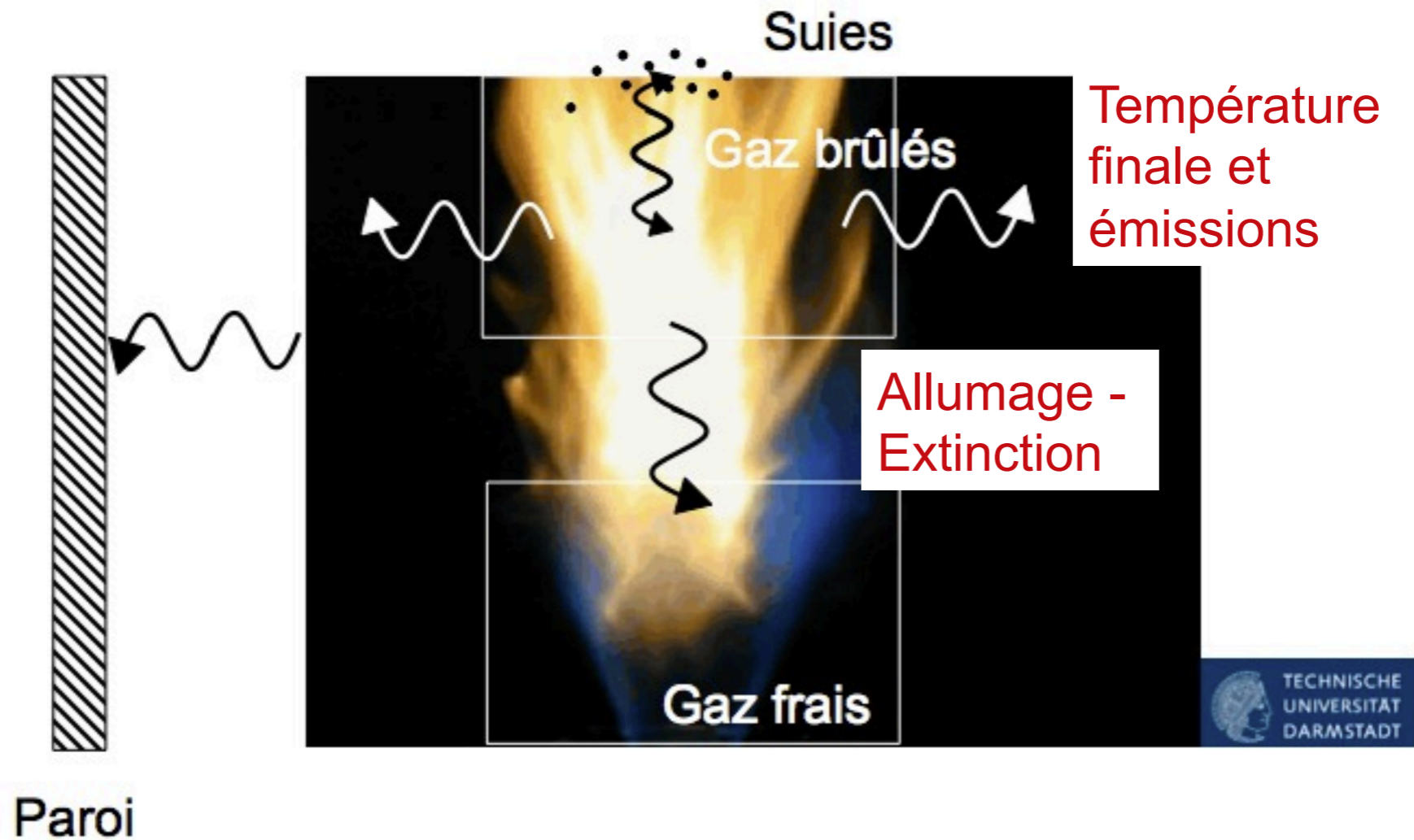
- 1. Problématique
- 2. Etat de l'art
- 3. Démarche
- 4. Monte Carlo et Formulation intégrale
- 5. Questions

# Impact rayonnement combustion



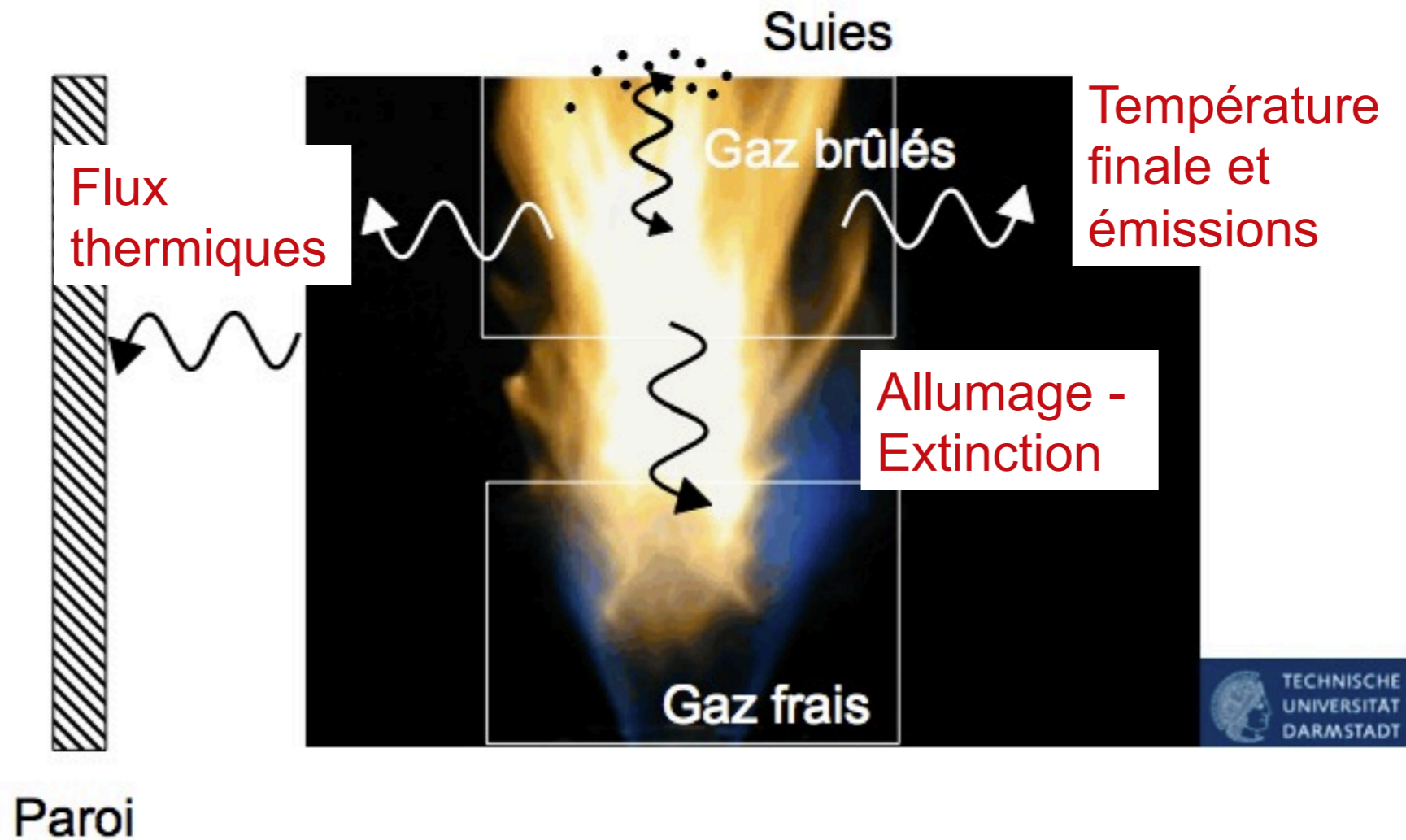
- 1. Problématique
- 2. Etat de l'art
- 3. Démarche
- 4. Monte Carlo et Formulation intégrale
- 5. Questions

# Impact rayonnement combustion



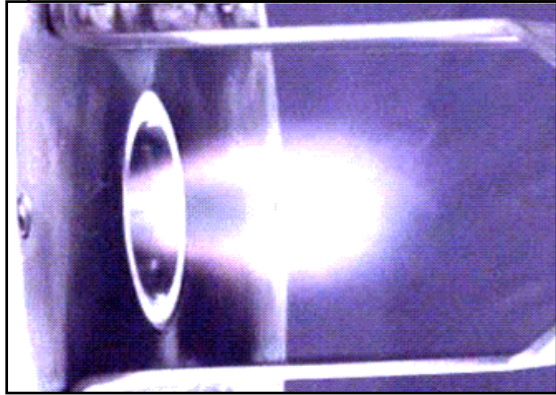
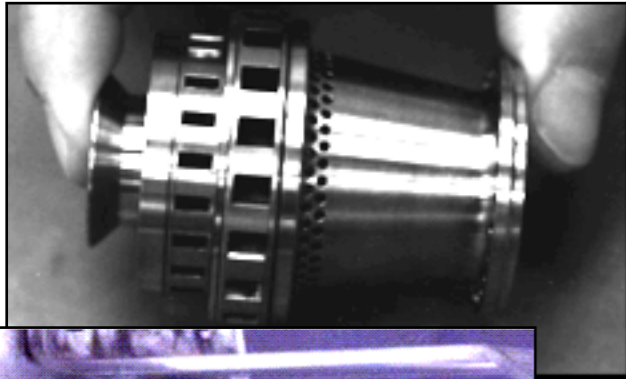
- 1. Problématique
- 2. Etat de l'art
- 3. Démarche
- 4. Monte Carlo et Formulation intégrale
- 5. Questions

# Impact rayonnement combustion



1. Problématique
2. Etat de l'art
3. Démarche
4. Monte Carlo et Formulation intégrale
5. Questions

# Rayonnement aux différentes échelles de flammes



Incendies:  
propagation  
par  
rayonnement

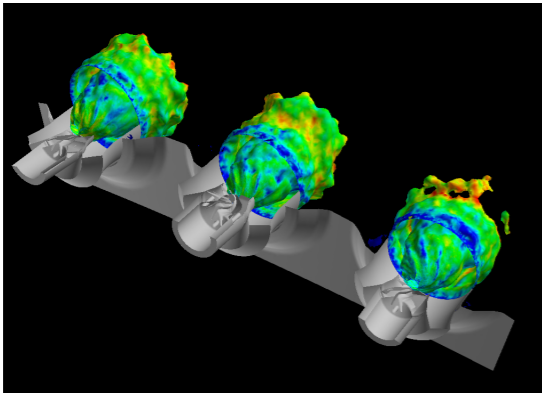


Propulsion : flammes de petite  
taille  
-optiquement minces sauf suies  
-effet sur les Nox et les flux  
thermiques pariétaux

Fours, flammes torches:  
flammes de grande taille  
-non optiquement minces  
-effets radiatifs importants  
sur la structure  
de flamme



# Etat de l'art

Foyers industriels	Etat de l'art «couplage avec la LES »	Questions
	<p>MOD , PRISSMA</p> <p>-SGE avec rayonnement détaillé (<a href="#">Dos Santos, 2008</a>, <a href="#">Poitou 2009</a>)</p> <p>-SGE avec rayonnement -conduction (<a href="#">Amaya 2010</a>)</p> <p>-SGE avec rayonnement-conduction (<a href="#">Duchaine 2013</a>)</p> <p>MCM, ASTRE, RAINIER</p> <p>-SGE avec rayonnement détaillé <a href="#">Tessé</a></p> <p>- SGE avec rayonnement détaillé <a href="#">Refahi, 2013</a>,</p>	<p>Echanges thermiques aux parois</p> <p>Conditions aux limites</p> <p>Grandes échelles</p> <p>Efficacité de calcul</p>



## Calcul sonde

### Méthode de Monte Carlo

P. Perez, 2003  
M. Roger, 2006  
J. Dauchet, 2012  
O. Farges, 2013  
M. Galtier, 2014  
V. Eymet

- Formulation intégrale
- Environnement **EDSTAR**



Solution de référence

## Méthodes approchées

### Méthode aux ordonnées discrètes (SN)

D. Joseph, 2004  
Dos Santos, 2008  
D. Poitou, 2009  
J. Amaya, 2010  
T. Pedot, 2012  
F. Duchaine, 2013

A. De Lafaille, 2001

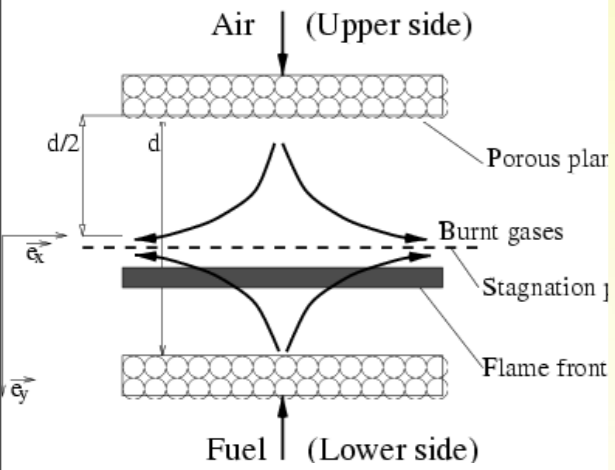


Solutions approchées

1. Problématique
2. Etat de l'art
3. Démarche
4. Monte Carlo et Formulation intégrale
5. Questions

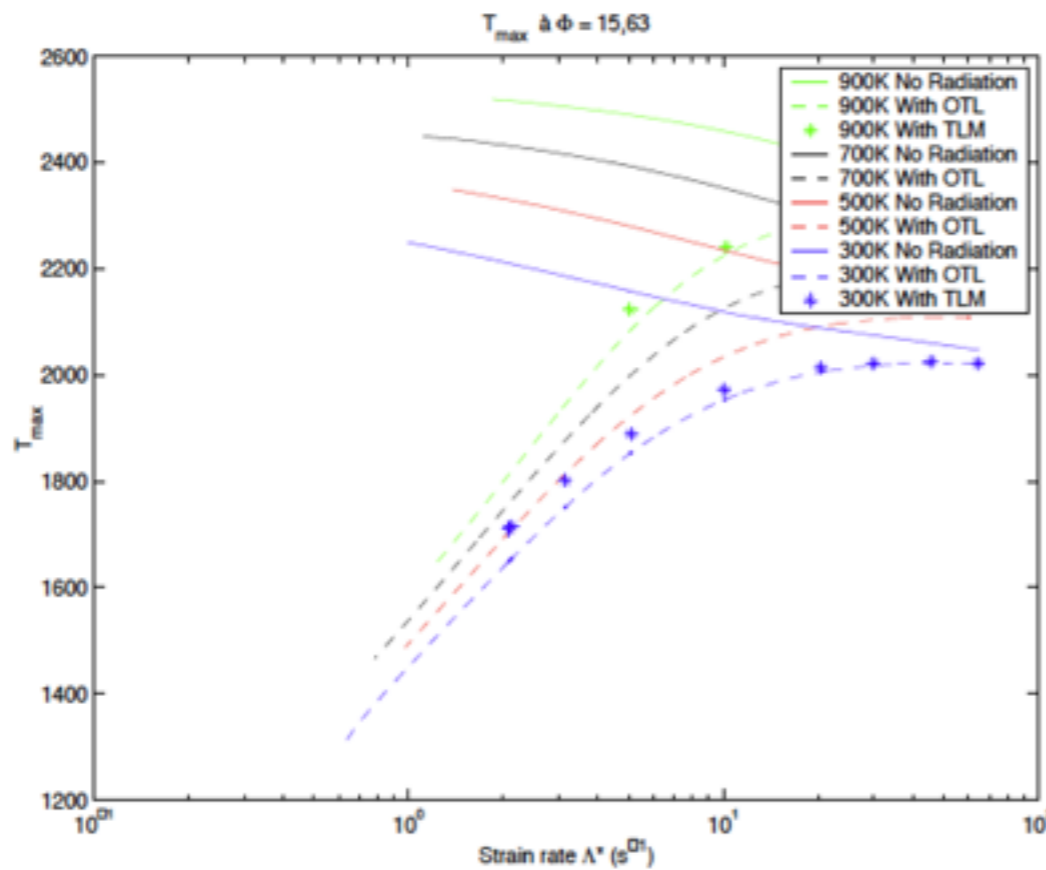
# Exemple de couplage

## calcul de sensibilités



$$\psi(t) = \psi(t_0) + \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial \psi}{\partial T_i} \right) \Delta T_i + \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial \psi}{\partial C_i} \right) \Delta C_i + \dots$$

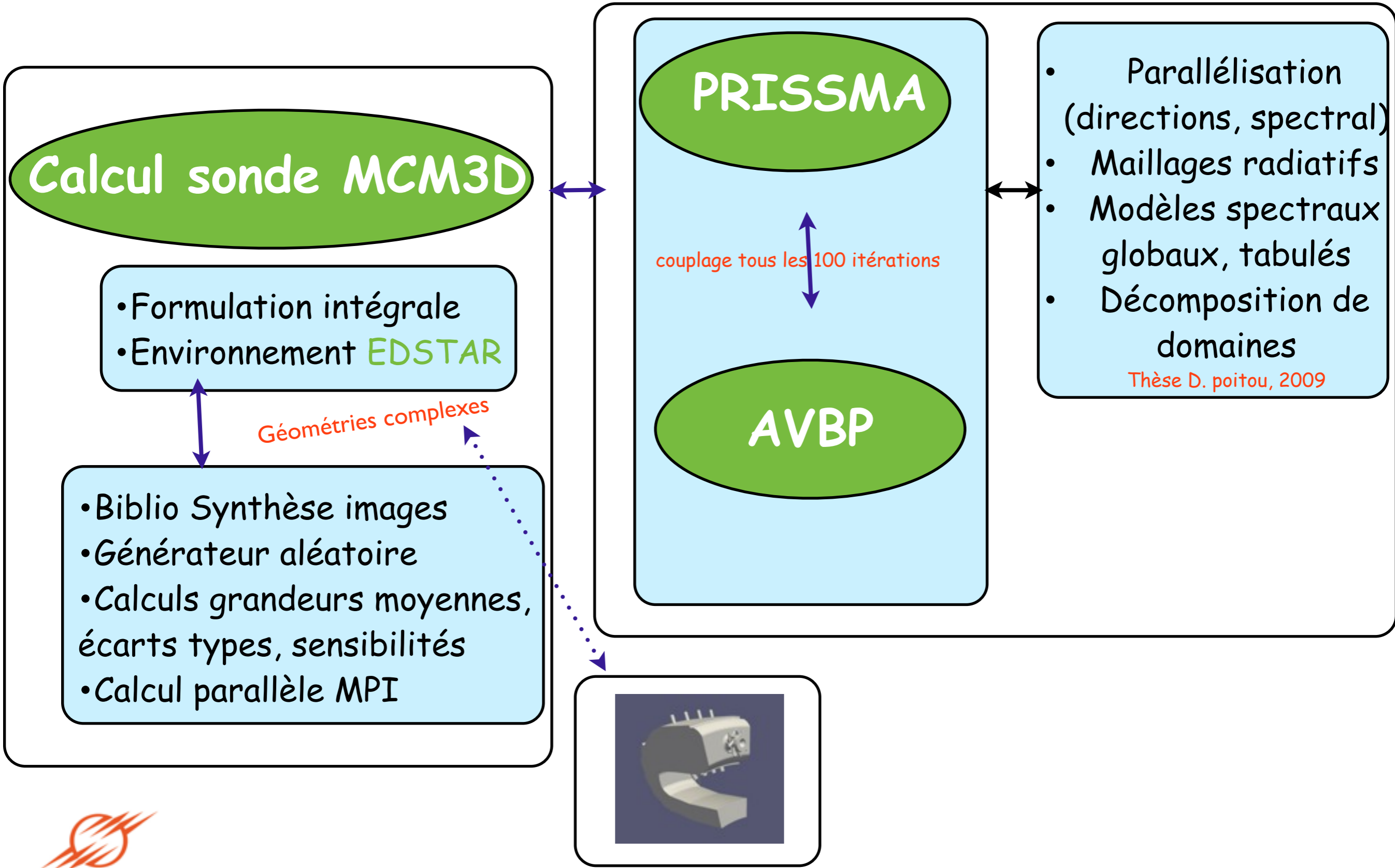
↑ **Jacobian matrix**      ↑ **CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, soot**



thèse A. De Lataillade , 2001

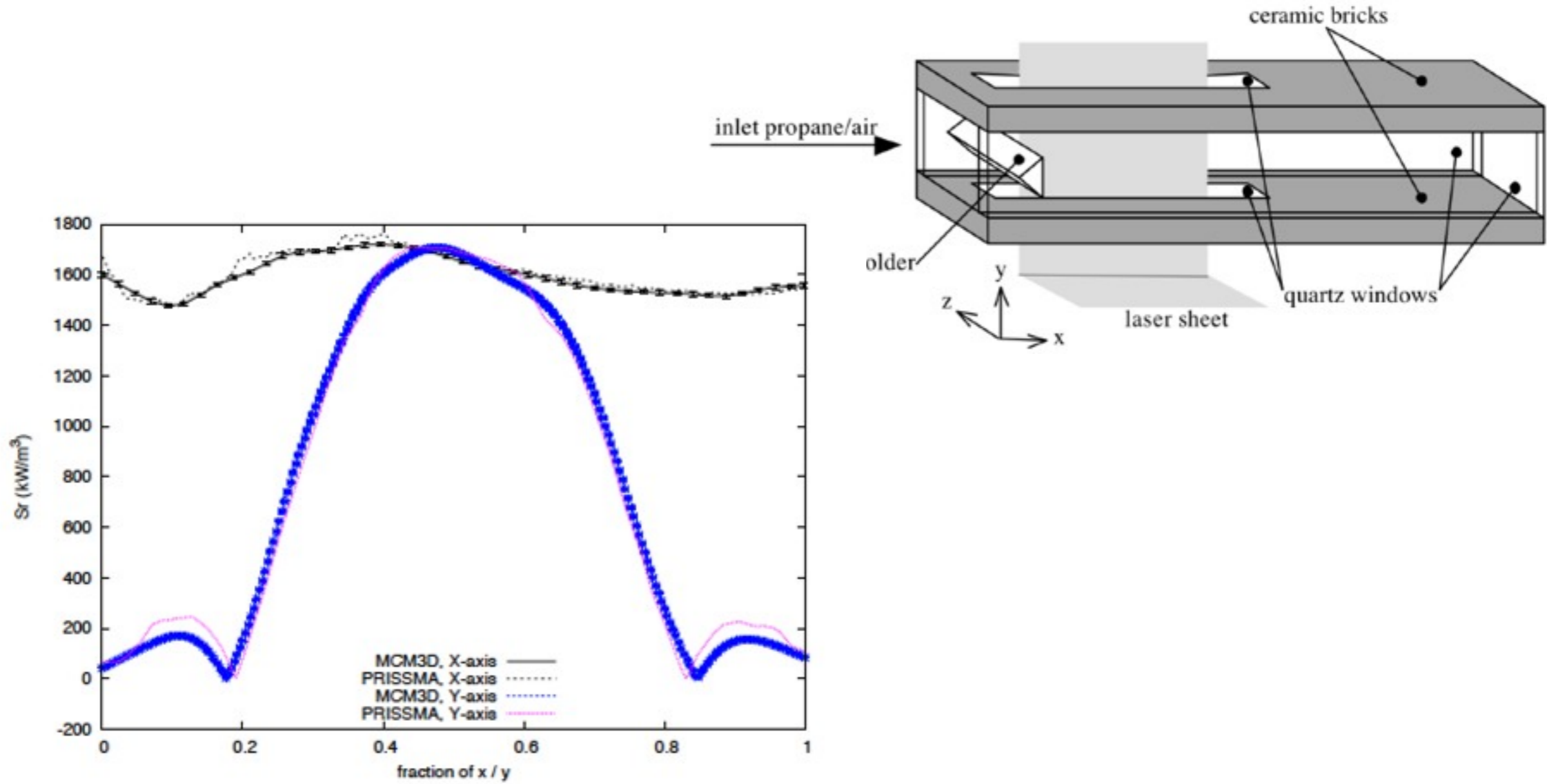
- 1. Problématique
- 2. Etat de l'art
- 3. Démarche
- 4. Monte Carlo et Formulation intégrale
- 5. Questions

# Calcul couplé - Démarche-



1. Problématique
2. Etat de l'art
3. Démarche
4. Monte Carlo et Formulation intégrale
5. Questions

# Exemple calcul sonde



**FIGURE 1.17** – Bilans radiatifs calculés par le code PRISSMA et l'algorithme à collisions nulles (fournis avec les intervalles de confiance correspondant - voir courbes notées MCM3D) en différents points de la chambre de combustion, le long des axes  $x$  ( $y=0, z=0, x \in [0;0.3]$  m) et  $y$  ( $x=0.08, y \in [-0.025;0.025]$  m),  $z=0$ ). Résultats obtenus par D. Poitou (pour PRISSMA) et par V. Eymet (pour l'algorithme à collisions nulles).

## Algorithme de Monte Carlo

## Carlo

Simulation statistique du transport corpusculaire



## Formulation

## intégrale

Evaluation des flux, irradiances ...

$A$  :  $\tilde{a}_N$

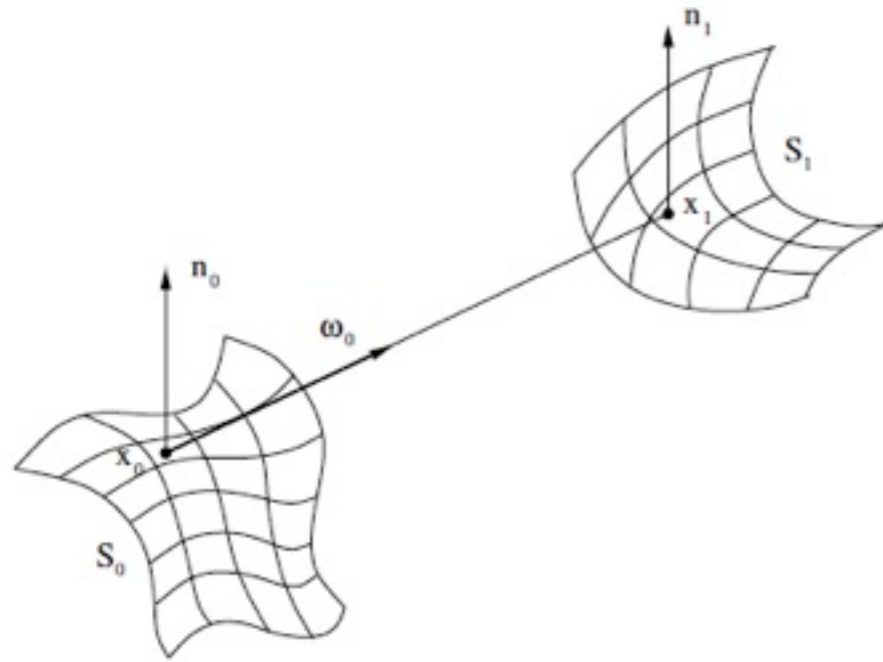
$N$  sampled events  $w_1, w_2 \dots w_N$   
are  $N$  independant events of a random  $v$   $W$

$$\tilde{a}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i$$

$$\tilde{\sigma}_N = \frac{1}{\sqrt{N-1}} \sqrt{\left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i^2 \right) - \tilde{a}_N^2}$$

# Formulation intégrale - exemple-

$F_{01}$  = Fraction du rayonnement émis par  $S_0$  et impactant  $S_1$



```

 $\bar{a}_N = 0;$ 
foreach event  $i$  do
  Uniform sampling of  $\mathbf{x}_0$ ;
  Lambert sampling of  $\omega_0$  at  $\mathbf{x}_0$ ;
  if  $\mathbf{y}_1 \in S_1$  then
     $w_i = 1;$ 
  else
     $w_i = 0;$ 
  end
   $\bar{a}_N = \bar{a}_N + w_i;$ 
end
 $\bar{a}_N = \frac{1}{N} \bar{a}_N;$ 

```

$$F_{01} = \int_{S_0} p_{\mathbf{x}_0}(\mathbf{x}_0) d\mathbf{x}_0 \int_{h_0(\mathbf{x}_0)} p_{\Omega_0}(\omega_0 | \mathbf{x}_0) d\omega_0 \hat{w}(\mathbf{x}_0, \omega_0)$$

with

$$p_{\mathbf{x}_0}(\mathbf{x}_0) = \frac{1}{S_0}$$

$$p_{\Omega_0}(\omega_0 | \mathbf{x}_0) = \frac{\omega_0 \cdot \mathbf{n}_0(\mathbf{x}_0)}{\pi}$$

$$\hat{w}(\mathbf{x}_0, \omega_0) = H(\mathbf{y}_1 \in S_1)$$

- **Réduction de la variance**: Re-formulation intégrale, échantillonnage préférentiel, Zéro-variance(\*)
  
- **Sensibilités**
  
- **Algorithmes à collision nulle** : pas de discrétisation spatiale, échantillonnage des transitions de raies «caractère de **référence**»

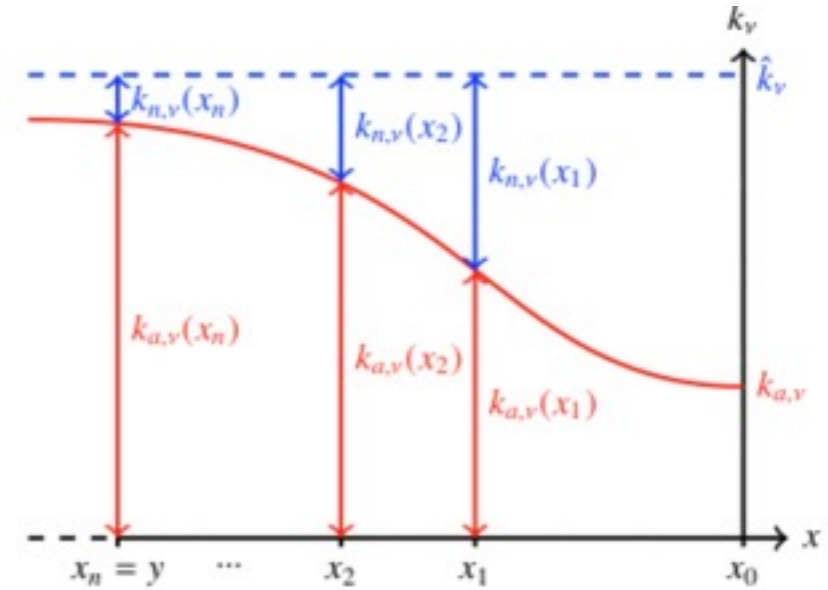
- 1. Problématique
- 2. Etat de l'art
- 3. Démarche
- 4. Monte Carlo et Formulation intégrale
- 5. Questions

# Algorithmes à Collisions nulles

$$L_\eta(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \int_0^\infty p_{\mathcal{L}}(l) L_\eta^{eq}(\mathbf{x}) dl$$

$$p_{\mathcal{L}}(l) = k_{a,\eta}(\mathbf{x}) \exp\left(-\int_0^l k_{a,\eta}(\mathbf{x}_0 - l' \mathbf{u}_0) dl'\right)$$

$$\hat{k}_\eta = k_{a,\eta} + k_{d,\eta} + k_{n,\eta}$$



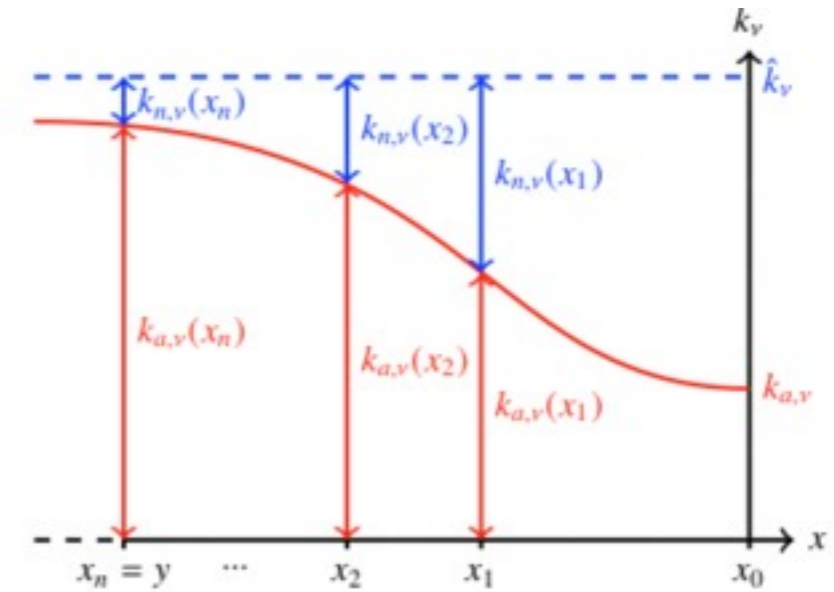


# Algorithmes à Collisions nulles

$$L_\eta(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \int_0^\infty p_{\mathcal{L}}(l) L_\eta^{eq}(\mathbf{x}) dl$$

$$p_{\mathcal{L}}(l) = k_{a,\eta}(\mathbf{x}) \exp\left(-\int_0^l k_{a,\eta}(\mathbf{x}_0 - l' \mathbf{u}_0) dl'\right)$$

$$\hat{k}_\eta = k_{a,\eta} + k_{d,\eta} + k_{n,\eta}$$



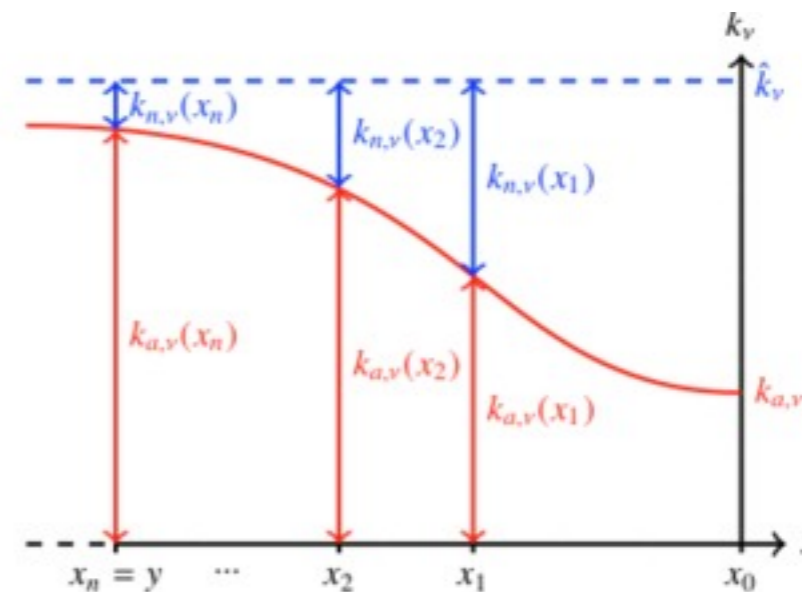
$$\begin{aligned} \mathbf{u} \cdot \nabla L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = & - \left[ k_{a,\eta}(\mathbf{x}) + k_{d,\eta}(\mathbf{x}) + k_{n,\eta}(\mathbf{x}) \right] L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + k_{a,\eta}(\mathbf{x}) L_\eta^{eq}(\mathbf{x}) \\ & + k_{d,\eta}(\mathbf{x}) \int_{4\pi} p(\mathbf{u}|\mathbf{u}') L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}') d\mathbf{u}' + k_{n,\eta}(\mathbf{x}) \int_{4\pi} \delta(\mathbf{u} - \mathbf{u}') L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}') d\mathbf{u}' \end{aligned}$$

# Algorithmes à Collisions nulles

$$L_\eta(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \int_0^\infty p_{\mathcal{L}}(l) L_\eta^{eq}(\mathbf{x}) dl$$

$$p_{\mathcal{L}}(l) = k_{a,\eta}(\mathbf{x}) \exp\left(-\int_0^l k_{a,\eta}(\mathbf{x}_0 - l' \mathbf{u}_0) dl'\right)$$

$$\hat{k}_\eta = k_{a,\eta} + k_{d,\eta} + k_{n,\eta}$$



$$\begin{aligned} \mathbf{u} \cdot \nabla L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = & - \left[ k_{a,\eta}(\mathbf{x}) + k_{d,\eta}(\mathbf{x}) + k_{n,\eta}(\mathbf{x}) \right] L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + k_{a,\eta}(\mathbf{x}) L_\eta^{eq}(\mathbf{x}) \\ & + k_{d,\eta}(\mathbf{x}) \int_{4\pi} p(\mathbf{u}|\mathbf{u}') L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}') d\mathbf{u}' + k_{n,\eta}(\mathbf{x}) \int_{4\pi} \delta(\mathbf{u} - \mathbf{u}') L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}') d\mathbf{u}' \end{aligned}$$

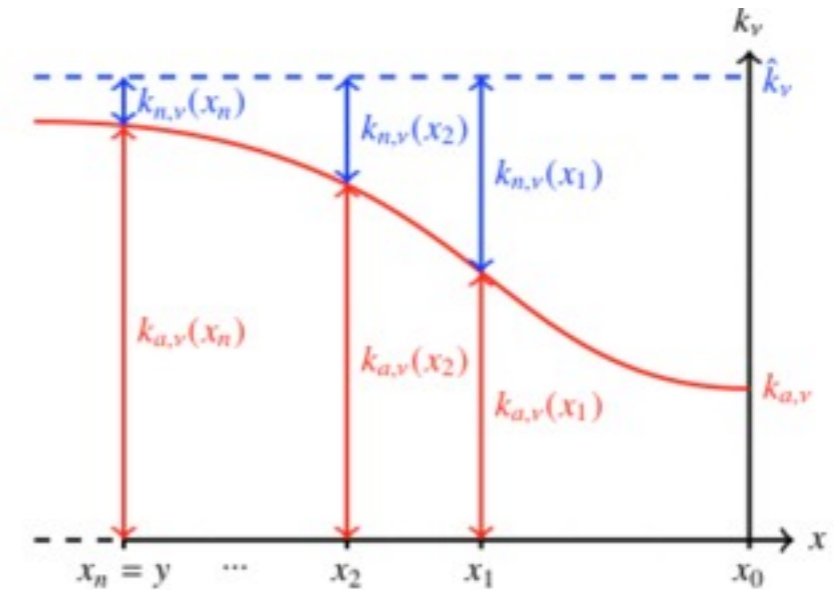
[Galtjer et al., 2013] GALTIER, M., BLANCO, S., CALIOT, C., COUSTET, C., DAUCHET, J., EL HAFI, M., EYMET, V., FOURNIER, R., GAUTRAIS, J., KHUONG, A., PIAUD, B. et TERRÉE, G. (2013). Integral formulation of null-collision Monte Carlo algorithms. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 125:57-68.

# Algorithmes à Collisions nulles

$$L_\eta(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \int_0^\infty p_{\mathcal{L}}(l) L_\eta^{eq}(\mathbf{x}) dl$$

$$p_{\mathcal{L}}(l) = k_{a,\eta}(\mathbf{x}) \exp\left(-\int_0^l k_{a,\eta}(\mathbf{x}_0 - l' \mathbf{u}_0) dl'\right)$$

$$\hat{k}_\eta = k_{a,\eta} + k_{d,\eta} + k_{n,\eta}$$



$$\begin{aligned} \mathbf{u} \cdot \nabla L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = & - \left[ k_{a,\eta}(\mathbf{x}) + k_{d,\eta}(\mathbf{x}) + k_{n,\eta}(\mathbf{x}) \right] L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + k_{a,\eta}(\mathbf{x}) L_\eta^{eq}(\mathbf{x}) \\ & + k_{d,\eta}(\mathbf{x}) \int_{4\pi} p(\mathbf{u}|\mathbf{u}') L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}') d\mathbf{u}' + k_{n,\eta}(\mathbf{x}) \int_{4\pi} \delta(\mathbf{u} - \mathbf{u}') L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}') d\mathbf{u}' \end{aligned}$$

[Galtier et al., 2013] GALTIER, M., BLANCO, S., CALIOT, C., COUSTET, C., DAUCHET, J., EL HAFI, M., EYMET, V., FOURNIER, R., GAUTRAIS, J., KHUONG, A., PIAUD, B. et TERRÉE, G. (2013). Integral formulation of null-collision Monte Carlo algorithms. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 125:57-68.

[Eymet et al., 2013] EYMET, V., POITOU, D., GALTIER, M., EL HAFI, M., TERRÉE, G. et FOURNIER, R. (2013). Null-collision meshless Monte-Carlo—Application to the validation of fast radiative transfer solvers embedded in combustion simulators. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 129:145-157.

# Intérêt de la formulation intégrale

- **Réduction de la variance**: Re-formulation intégrale, échantillonnage préférentiel, Zéro-variance(\*)
  
- **Sensibilités**
  
- **Algorithmes à collision nulle** : pas de discrétisation spatiale, échantillonnage des transitions de raies «caractère de **référence**»

- **Réduction de la variance**: Re-formulation intégrale, échantillonnage préférentiel, Zéro-variance(\*)
- **Sensibilités**
- **Algorithmes à collision nulle** : pas de discrétisation spatiale, échantillonnage des transitions de raies «caractère de **référence**»

Plus récemment

- **Rayonnement conduction et convection** réunies en une seule formulation intégrale: approche stat pour la thermique

# Questions en cours

◆ Echanges thermiques aux parois

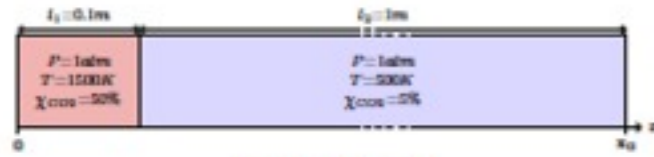
◆ Conditions aux limites

◆ Grandes échelles

◆ MCM et thermique

1. Problématique
2. Etat de l'art
3. Démarche
4. Monte Carlo et Formulation intégrale
5. Questions
6. Annexes

# échantillonnage de transitions



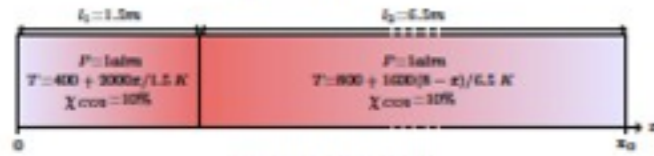
(A) Cas d'étude C1



(B) Cas d'étude C2



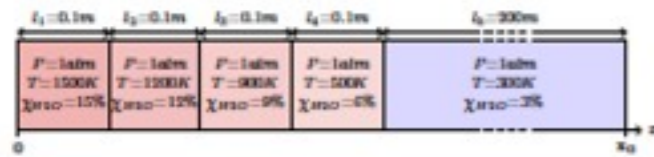
(C) Cas d'étude C3



(D) Cas d'étude C4



(E) Cas d'étude C5



(F) Cas d'étude C6

Cas d'étude	Bases de données spectroscopiques	Monte Carlo ( $10^6$ realisations)			Haute résol.	[André et Vaillon, 2010]
		$L(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$ )	$\sigma$ ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$ )	$t_{1\%}$ (s)	$L_{hr}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$ )	$L_{a,v}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$ )
C1	CSD-1000	3125.61	4.42	0.97	3126.06	3105
	CSD-4000	3146.25	4.53	1.10	3150.32	
C2	HITEMP	3315.11	8.15	1.38	3311.88	4161
	HITEMP 2010	4545.05	9.83	1.11	4558.68	
C3	CSD-1000 & HITEMP	39223.87	51.56	1.75	39202.5	39331
C4	CSD-1000	12325.99	16.16	1.26	12320.1	11956
C5	HITEMP	38240.31	49.58	1.27	38215.0	39144
C6	HITEMP	885.93	3.93	9.86	886.55	-
	HITEMP 2010	1066.92	4.30	7.39	1069.81	-

**TABLE 1.1** – Luminances intégrées de  $10\text{cm}^{-1}$  à  $15000\text{cm}^{-1}$  pour les six cas d'étude présentés à la Sec. 1.3.1 et pour différentes bases de données spectroscopiques (CSD-1000 et CSD-4000 pour le  $\text{CO}_2$ ; Hitemp et Hitemp 2010 pour l' $\text{H}_2\text{O}$ ). Ces luminances  $L(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  ont été estimées à partir de l'algorithme introduit à la Fig. 1.4 et sont fournies avec leur écart-type  $\sigma$  et le temps de calcul nécessaire à l'obtention d'une erreur relative de 1%. Les luminances  $L(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$  peuvent être comparées à celles obtenues à partir d'un calcul déterministe, basé sur une production de spectres de haute-résolution (notées  $L_{hr}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ) et aux résultats obtenus par une approche raie-par-raie par F. André et R. Vaillon dans l'article [André et Vaillon, 2010] (notées  $L_{a,v}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ ). Les temps de calcul excluent les étapes de preprocessing et de chargement des données spectroscopiques en mémoire.

- 1. Problématique
- 2. Etat de l'art
- 3. Démarche
- 4. Monte Carlo et Formulation intégrale
- 5. Questions
- 6. Annexes

