

# Méthode de Monte-Carlo Symbolique pour la caractérisation des propriétés thermiques : application à la méthode flash

Morgan SANS<sup>1</sup>, Stéphane BLANCO<sup>2</sup>, Cyril CALIOT<sup>3</sup>, Christophe COUSTET<sup>4</sup>,  
Mouna EL HAFI<sup>1</sup>, Olivier FARGES<sup>4</sup>, Richard FOURNIER<sup>2</sup>, Léa PENAZZI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre RAPSODEE, Albi.

<sup>2</sup> Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie, Toulouse.

<sup>3</sup> Laboratoire de Mathématique et de leurs Applications, Anglet.

<sup>4</sup> Méso-Star, Longages.

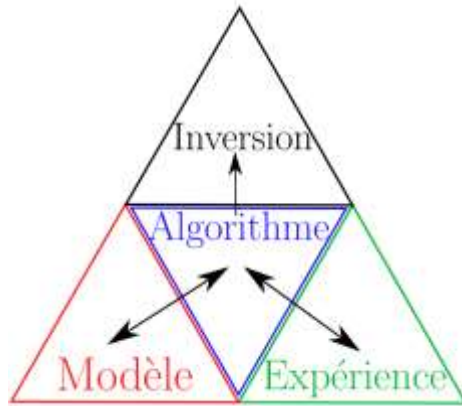
<sup>5</sup> Laboratoire Énergie Mécanique Théorie et Appliquée, Nancy.



# Introduction & Contexte

## ● Domaine de l'inversion

Tryptique Modèle / expérience / méthode inverse

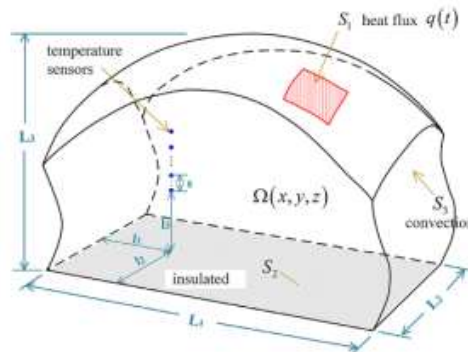


- Besoin de recourir un grand nombre de fois au modèle direct
- Temps de calculs de la procédure dépendante de la rapidité du modèle direct
- Obtenir une solution **rapide** avec le modèle direct

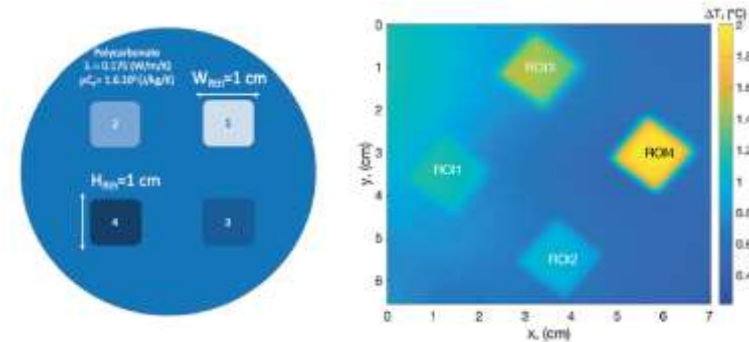
## ● Haute température : modèle couplé [1]



## ● Géométrie 3D complexe [2]



## ● Champ de température [3]



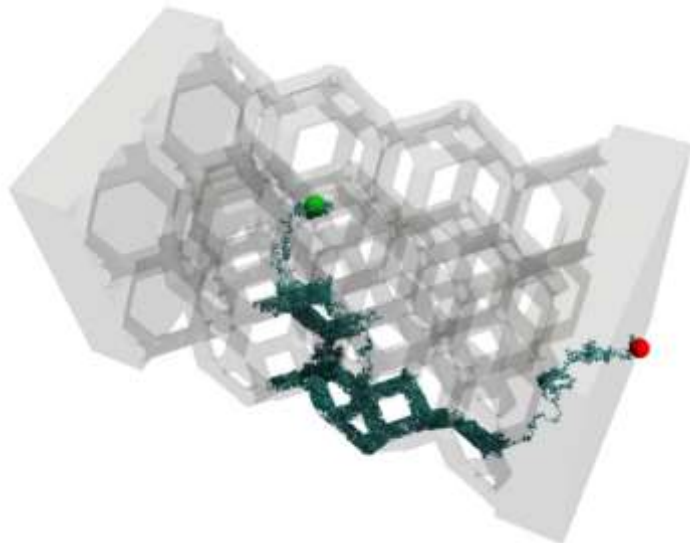
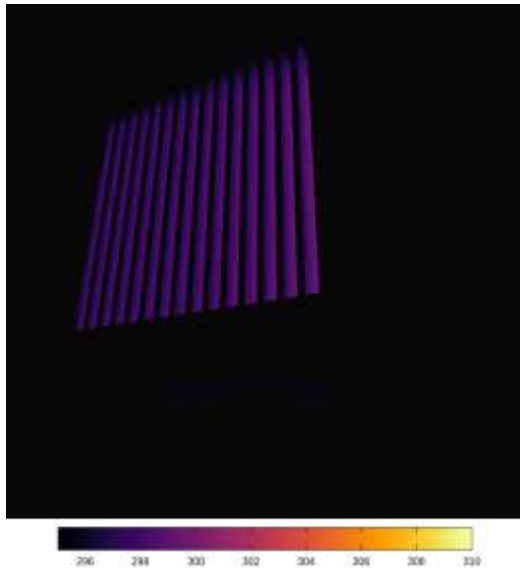
➔ Voies d'améliorations possibles : développement d'outils numériques basés sur la méthode de Monte-Carlo

[1] C. Pradere et al. Thermal resistance field estimations from IR thermography using multiscale Bayesian inference (2020)

[2] M. Sans et al. Experimental characterization of the coupled conductive and radiative heat transfer in ceramic foams with a flash method at high temperature (2020)

[3] Huang et al. On-line heat flux estimation of a non-linear heat conduction system with complex geometry using a sequential inverse method and artificial neural network (2019)

## Introduction & Contexte



- Méthodes Monte-Carlo pour la résolution **des transferts couplés** en **géométrie 3D complexe** [4,5,6]
  - Formulation en espace de chemins (**couplage**)
  - Outils de la communauté synthèse d'image (**géométrie 3D**)
  - Calcul sonde / thermique linéaire
- **Actuellement** : permet la résolution du modèle direct
- **Contrainte possible** : temps de calculs

➔ **Utilisation du Symbolique**

[4] Fournier et al. Radiative, conductive and convective heat-transfers in a single Monte Carlo algorithm (2016)

[5] Caliot et al. Combined conductive-radiative heat transfer analysis in complex geometry using the Monte-Carlo Method (2017)

[6] Ibarrat et al. Combined conductive-convective-radiative heat transfer in complex geometry using the Monte Carlo Method : Application to solar receivers(2018)

# Principe

- Méthodes de Monte-Carlo « Classique »

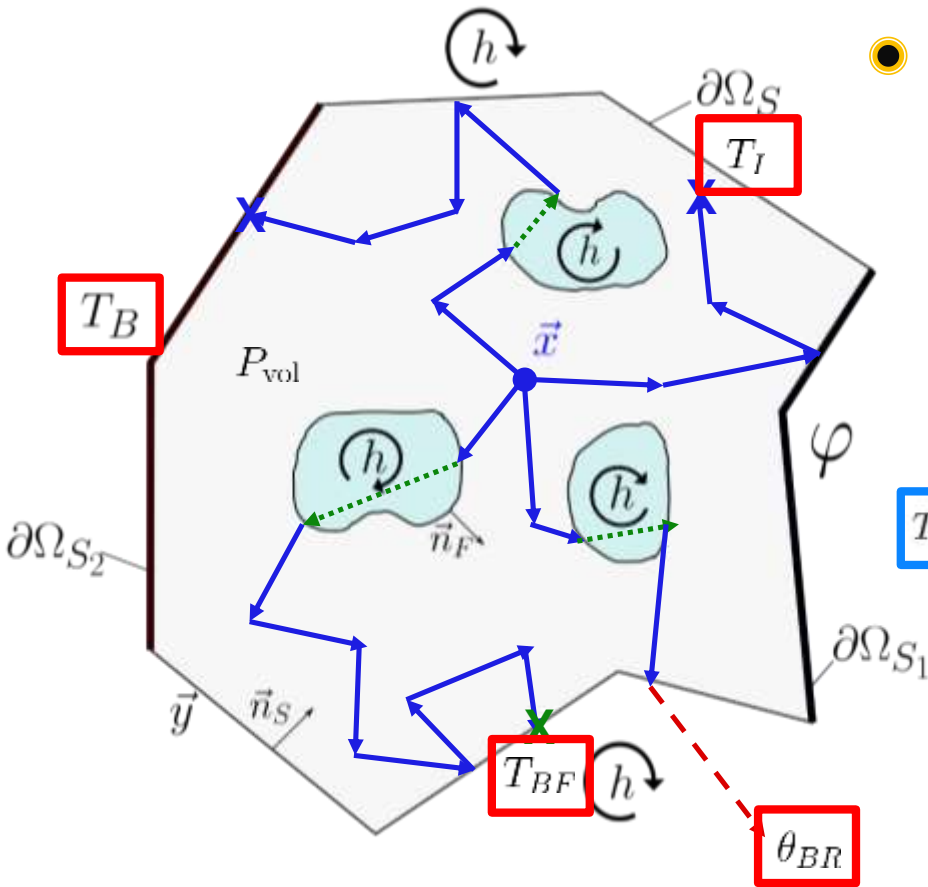
$$\bar{T}(x_{obs}, t) = \frac{1}{N_{mc}} \sum_{i=1}^{N_{mc}} w_i$$

- Méthodes de Monte-Carlo Symbolique

$$T(\vec{x}_{obs}, t) = F_I(\beta) T_I + F_f(\beta) T_f + F_s(\beta) T_s + F_\Phi(\beta) \Phi + F_{P_v}(\beta) P_v$$

- Stockage différent de l'information

- Reconstruction rapide de la solution



# Etat de l'art : Monte-Carlo Symbolique

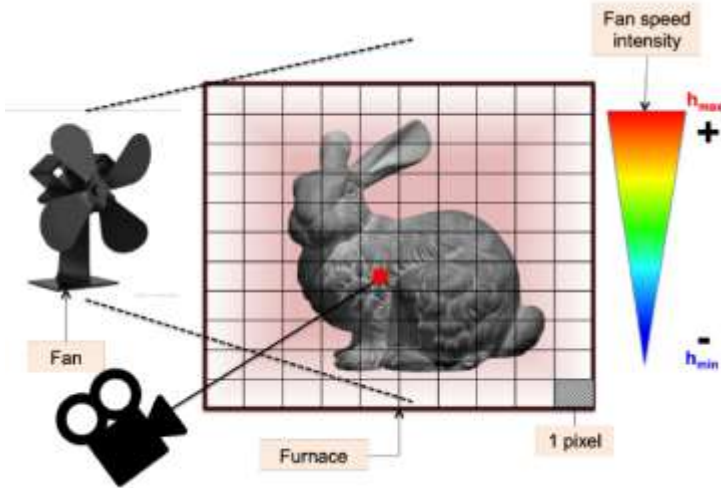
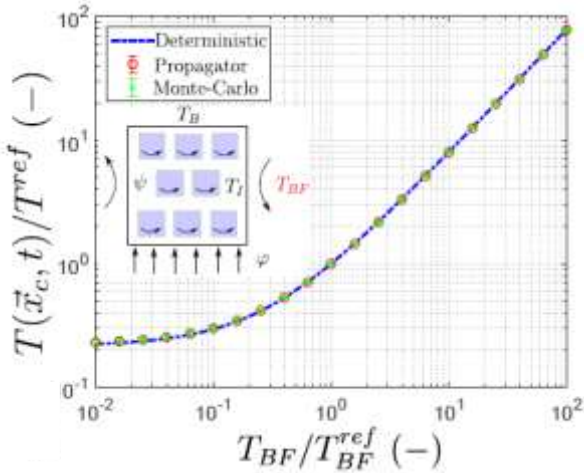
**● Transferts radiatifs**

- [6] Dunn, 1981
- [7] Galtier et al. 2017
- [8] Roger et al. 2017
- [9] Maanane et al. 2020

**● Transferts thermiques couplés**

[10] Thèse de L. Penazzi (2020)

- Propagateur : fonction sans dépendance
- Dépendance au coefficient de convection
- Dépendance à la diffusivité thermique



**● Plus exploratoire**

- Validation théorique
- CL Dirichlet
- Pas encore en 3D multi-physiques

$$T(\vec{x}_{obs}, t) = F_I T_I + F_f T_f + F_s T_s + F_\Phi \Phi + F_{P_v} P_v$$

$$T(\vec{x}_{obs}, t) = F_I(h) T_I + F_f(h) T_f + F_s(h) T_s + F_\Phi(h) \Phi + F_{P_v}(h) P_v$$

**Dépendance à 1 unique paramètre**

Vers l'applicatif : caractérisation

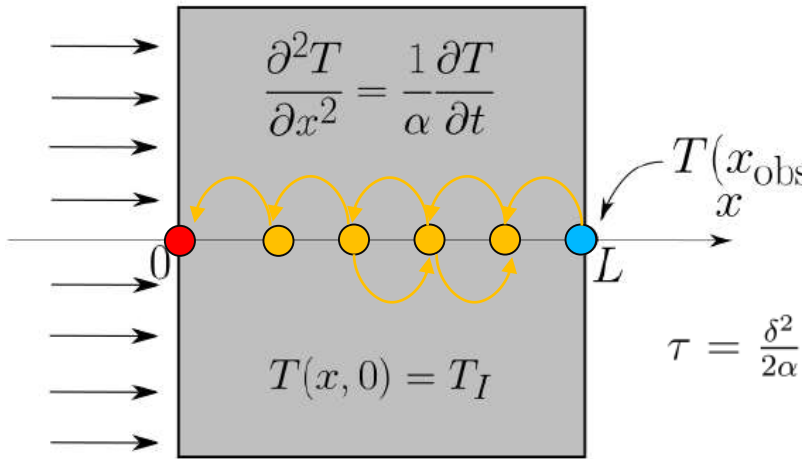


# Méthodologie

**Objectif :** Développement de la méthodologie associée à Monte Carlo symbolique pour la diffusivité

## Méthode Flash 1D

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \Phi(t) \qquad -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0$$



## ● Etape 1 : Méthode de Monte Carlo « Classique »

### Construction de la marche

$$T(x_{obs}, t) = \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{H}(t \leq 0) \times T_I \\ + \\ \mathcal{H}(t > 0) \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{H}(x = 0) \times (T(x + \delta, t) + \Phi(t)\delta/\lambda) \\ + \\ \mathcal{H}(x = L) \times T(x - \delta, t) \\ + \\ \mathcal{H}(x \in \mathcal{D}) \times \left[ \frac{1}{2}T(x - \delta, t - \tau) + \frac{1}{2}T(x + \delta, t - \tau) \right] \end{array} \right\} \end{array} \right.$$

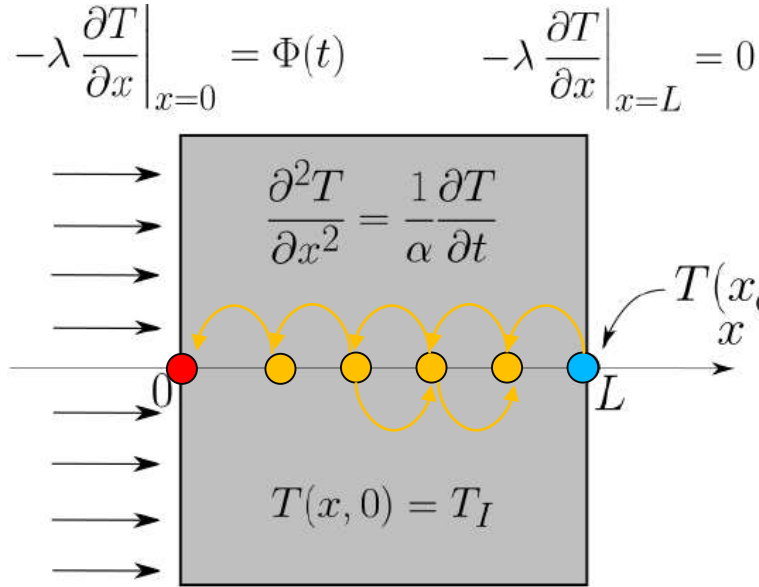
## ● Estimation

$$\bar{T}(x_{obs}, t) = \frac{1}{N_{mc}} \sum_{i=1}^{N_{mc}} w_i \qquad w_i = T_I + \sum_{j=1}^{J_i} \mathcal{H}(t - \tau_\gamma^{(j)} > 0) \frac{\Phi(t - \tau_\gamma^{(j)})\delta}{\lambda}$$

# Méthodologie

**Objectif :** Développement de la méthodologie associée à Monte Carlo symbolique pour la diffusivité

## Méthode Flash 1D



● Etape 2 : Méthode de Monte Carlo « Symbolique »

● S'affranchir de la diffusivité

➔  $\tau = \frac{\delta^2}{2\alpha} \quad \tau(n) = n\tau = n\delta^2/2\alpha$

● Formulation en espace des chemins

$$T(x_{\text{obs}}, t) = T_I - \sum_{n=1}^{+\infty} \sum_{j=1}^{+\infty} p_N^{(j)}(n) \mathcal{H}(t - \tau_\gamma^{(j)} > 0) (\Phi(t - \tau_\gamma^{(j)})\delta/\lambda)$$

$$= T_I - \sum_{n=1}^{+\infty} f_N(n) \mathcal{H}(t - \tau(n) > 0) (\Phi(t - \tau(n))\delta/\lambda)$$

● Estimation de la fonction

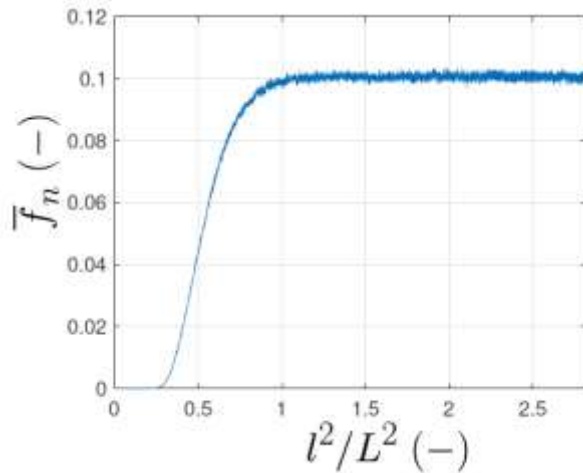
$$f_N(n) \approx \bar{f}_n = \frac{1}{N_{\text{mc}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{mc}}} \sum_{j=1}^{J_i} w_{i,n}^{(j)} = \frac{1}{N_{\text{mc}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{mc}}} w_{i,n}$$



# Méthodologie

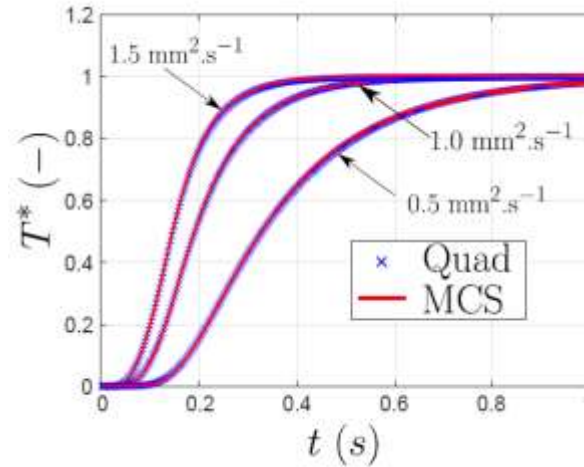
## ● Estimation de la fonction

$$f_N(n) \approx \bar{f}_n = \frac{1}{N_{mc}} \sum_{i=1}^{N_{mc}} \sum_{j=1}^{J_i} w_{i,n}^{(j)} = \frac{1}{N_{mc}} \sum_{i=1}^{N_{mc}} w_{i,n}$$

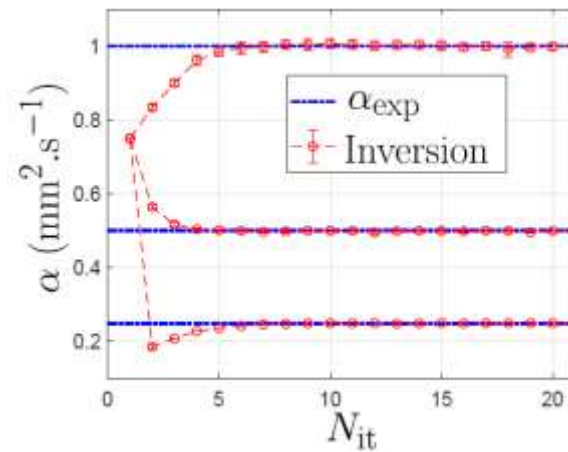
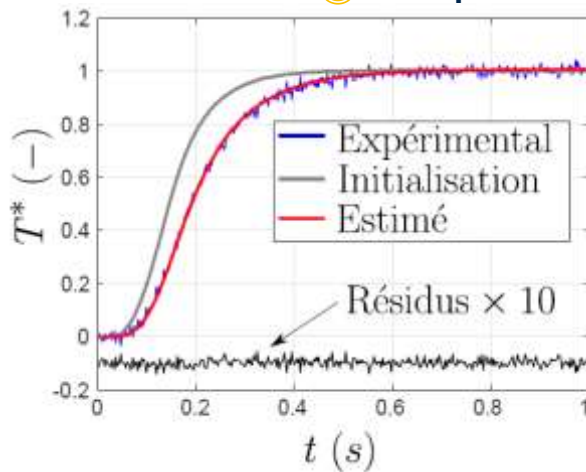


## ● Estimation de l'observable

$$\bar{T}(x_{obs}, t) = T_I + \sum_{n=1}^{N_{max}} \bar{f}_n \mathcal{H}(t - \tau(n) > 0) (\Phi(t - \tau(n))\delta/\lambda)$$



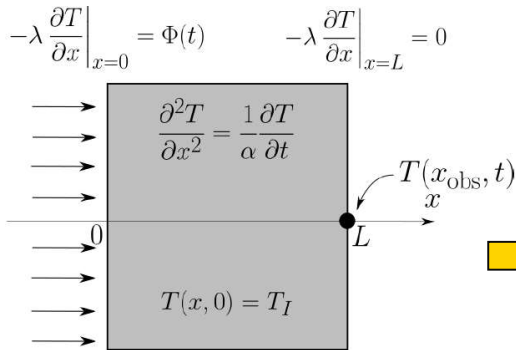
## ● Avec procédure d'estimation : 1 seul MC



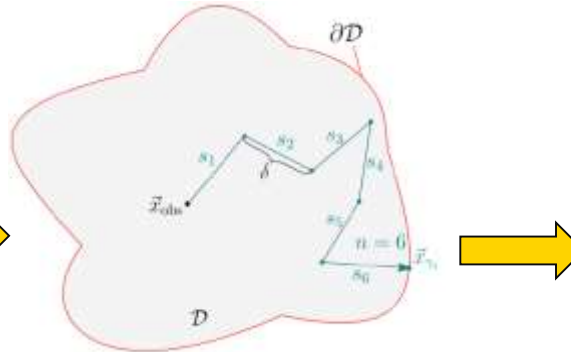


# Intérêts et perspectives

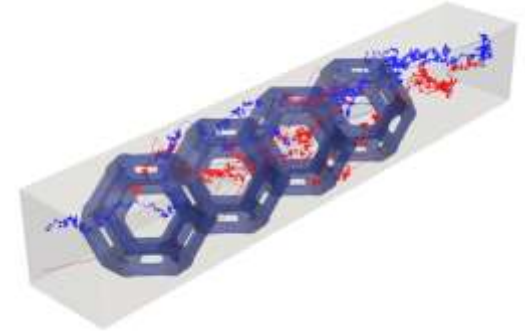
● Configuration 1D



● Marche 3D et couplage

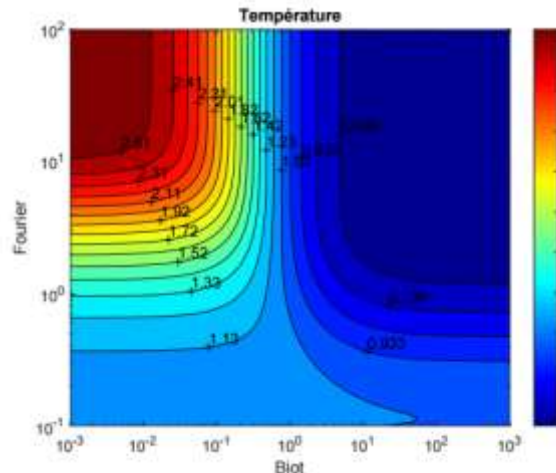
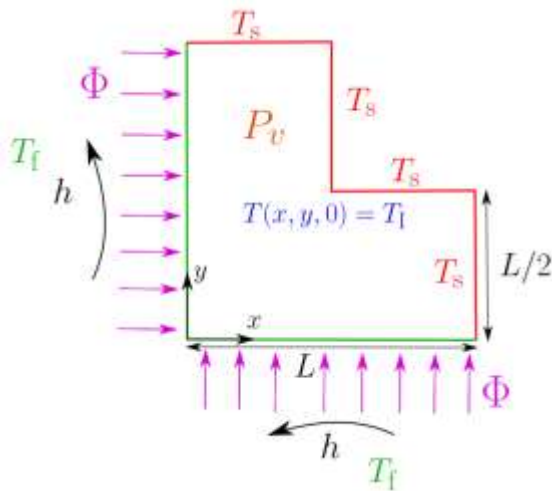


● Configuration 3D Multi-physique



● Vers l'applicatif : Dépendance à deux paramètres (diffusivité + coefficient de convection)

$$T(\vec{x}_{obs}, t) = F_I(a, h)T_I + F_f(a, h)T_f + F_s(a, h)T_s + F_\Phi(a, h)\Phi + F_{P_v}(a, h)P_v$$



● Configuration académique



● Marche 3D et couplage



● Mise en œuvre sur un cas d'étude



Dépendance à N paramètres du problème

# Merci pour votre attention !

