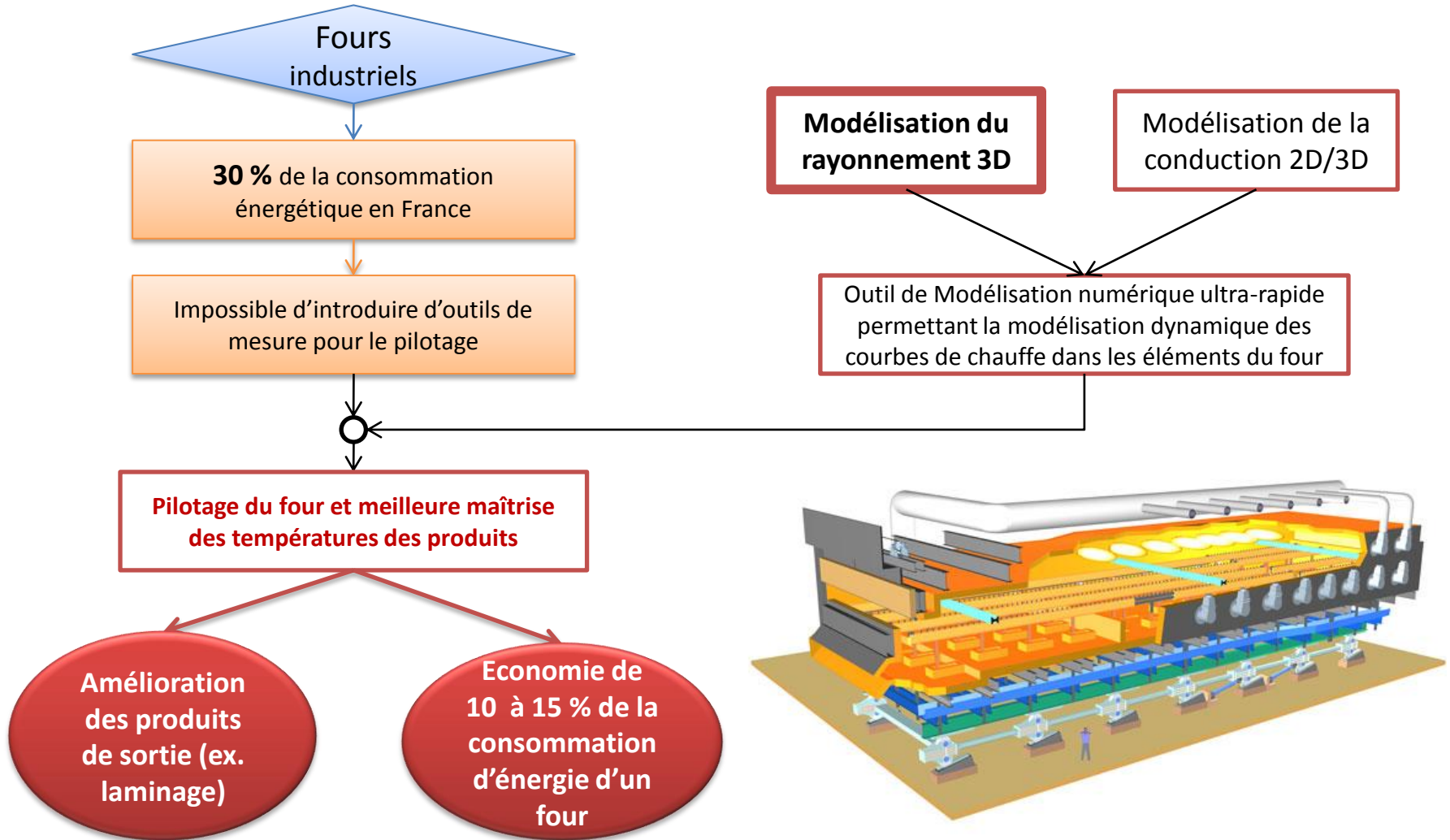


# Modélisation dynamique des transferts radiatifs

Maroun NEMER  
Boutros GHANNAM

MINES ParisTech – CEP  
SFT, Lyon – 28 janvier 2011

# Contexte et objectifs



# Plan

- ❑ Introduction
- ❑ Facteurs d'échanges génériques (GEF)
- ❑ Méthode zonale à coefficients d'absorption multiples (MACZM)
  - Voxélisation
  - Facteurs d'échanges génériques partiels
  - Réseaux de neurones
  - Algorithme de droite discrète
- ❑ Application : Four d'essais de réchauffage sidérurgique
  - Comparaison avec la méthode des flux plan (précision et temps de calcul)
- ❑ Accélération sur GPU
- ❑ Conclusions et perspectives

# Introduction

## □ La méthode zonale à coefficients d'absorption multiples (MACZM)

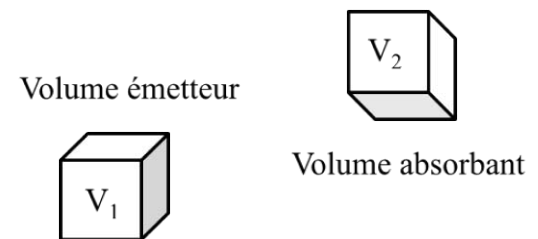
- Modélisation des facteurs de transferts radiatifs directs en 3D
- Méthode basée sur la géométrie discrète (volume discrétisé en voxels)
- Simple et basée sur le principe de superposition de facteurs d'échanges génériques (GEF) partiels
- Précise et rapide dans les milieux non-isothermes ou discontinus
- Rapidité et précision améliorées par l'intégration de réseaux de neurones artificiels
- Accélérée à l'aide des algorithmes de géométrie discrète
- Calculs indépendants et parallélisables

# Facteurs d'échanges génériques (GEF)

☐ Trois facteurs d'échanges génériques (GEF) sont définis:

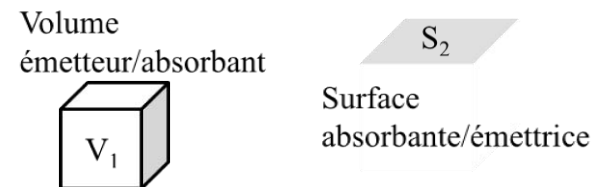
- GEF égal à la quantité de rayonnement échangée entre deux éléments de volume (voxels)

## GEF Volume-Volume (gg)



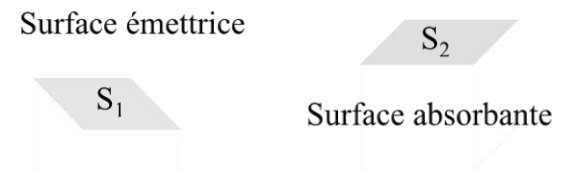
- GEF égal à la quantité de rayonnement échangée entre un élément de volume et un élément de surface

## GEF Volume-Surface (gs)



- GEF égal à la quantité de rayonnement échangée entre deux éléments de surface

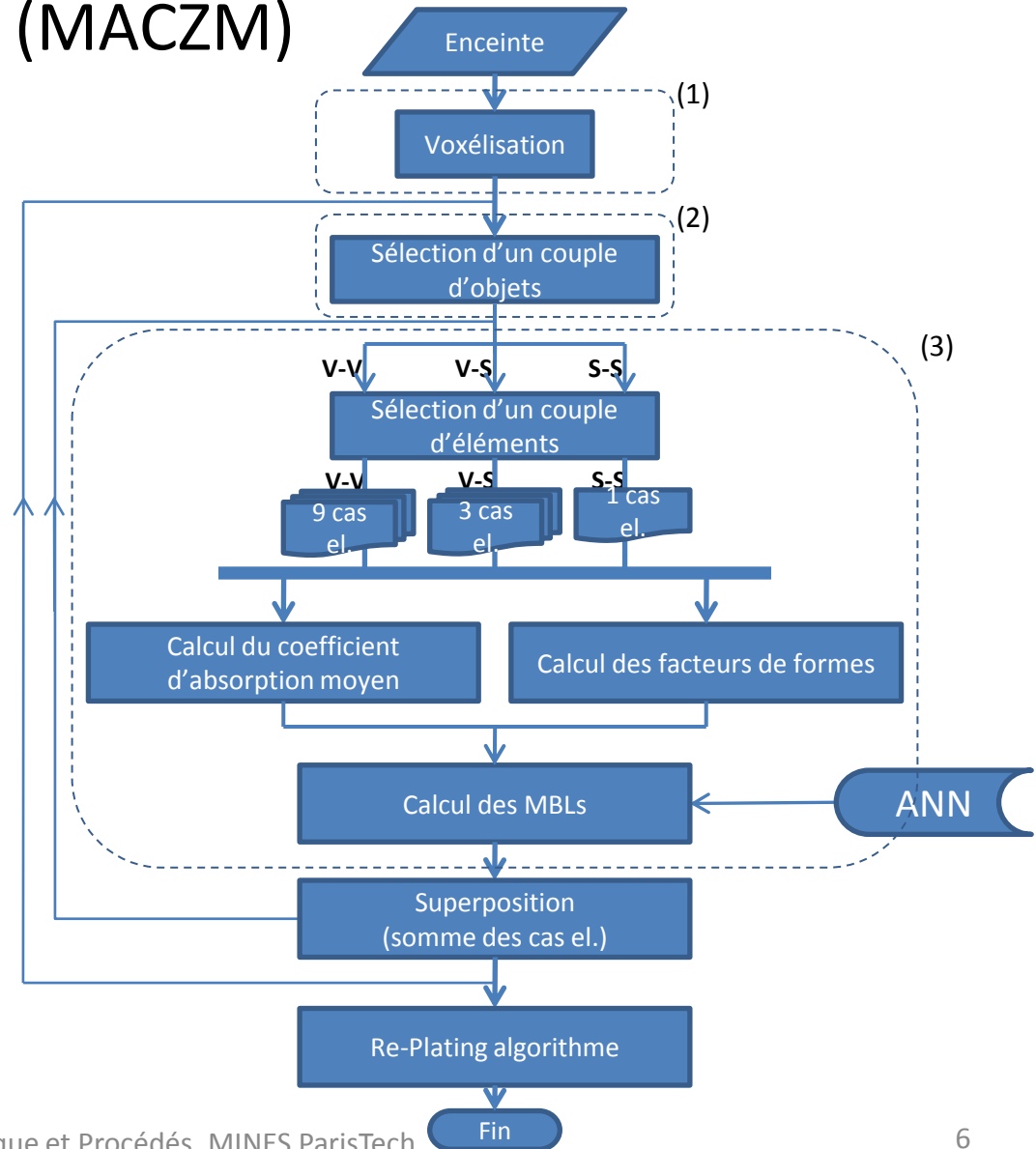
## GEF Surface-Surface (ss)



# Méthode zonale à coefficients d'absorption multiples (MACZM)

## ☐ Trois Parties principales

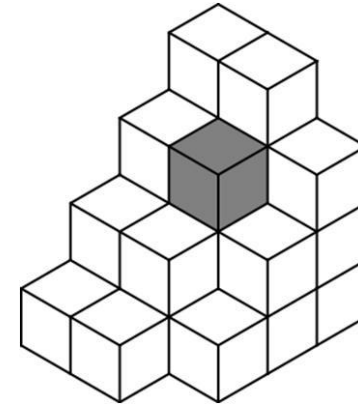
- Voxélisation et allocation des propriétés radiatives
- Application des réseaux de neurones et tracé de droites discrètes
- Superposition des facteurs d'échanges génériques (GEF)



# Voxélisation

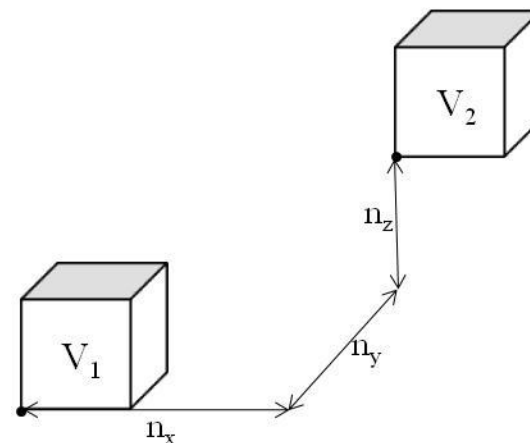
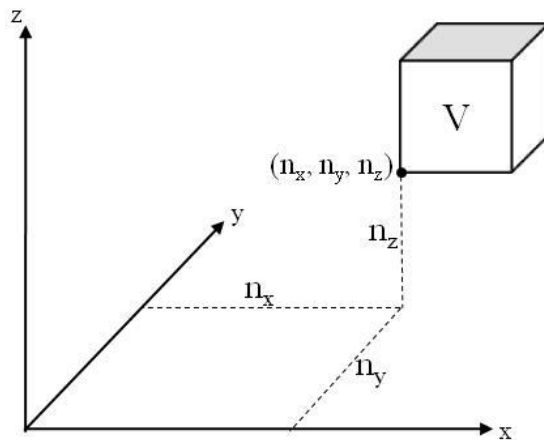
## ❑ Voxélisation

- Maillage cubique uniforme
- Tout le volume de l'enceinte



## ❑ Repère

- Cartésien orthogonal dans  $\mathbb{Z}^3$  (adimensionnel)
- Un voxel est repéré par son sommet inférieur gauche
- Distances adimensionnelles entre deux voxels ( $n_x, n_y, n_z$ )



# Facteurs d'échanges génériques partiels

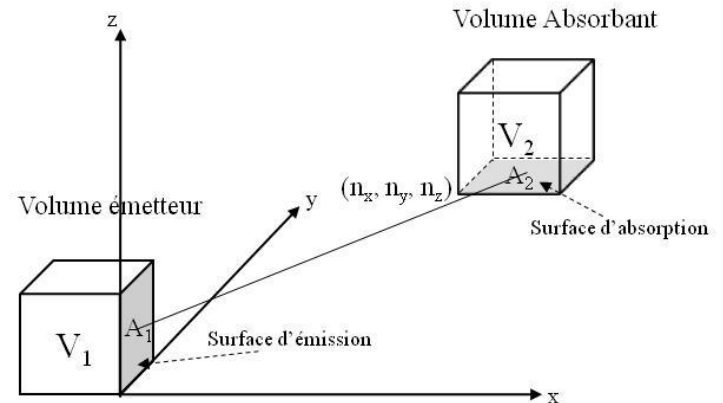
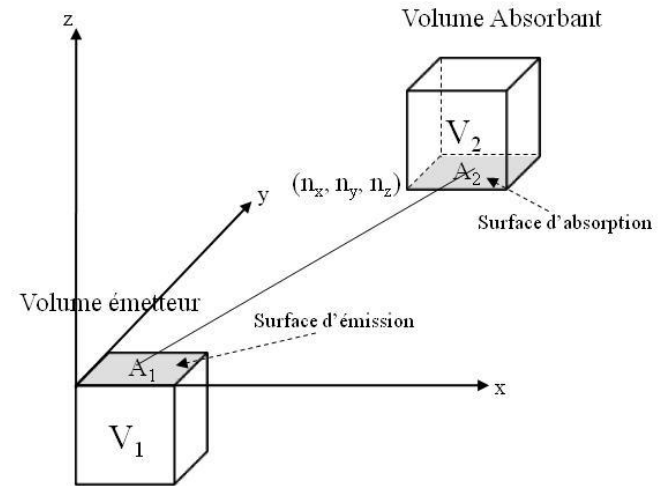
## ☐ GEF Volume - Volume partiels

- **GEF parallèle** – échange à travers la surface supérieure du volume  $V_1$  et la surface inférieure du volume  $V_2$

$$\frac{(g_1 g_2)_{pp}}{D^2} = F_{ggpp} (a_1 D, a_2 D, a_{m,zz} D, n_x, n_y, n_z)$$

- **GEF perpendiculaire** – échange à travers une surface latérale du volume  $V_1$  et la surface inférieure du volume  $V_2$

$$\frac{(g_1 g_2)_{pd}}{D^2} = F_{ggpd} (a_1 D, a_2 D, a_{m,xz} D, n_x, n_y, n_z)$$

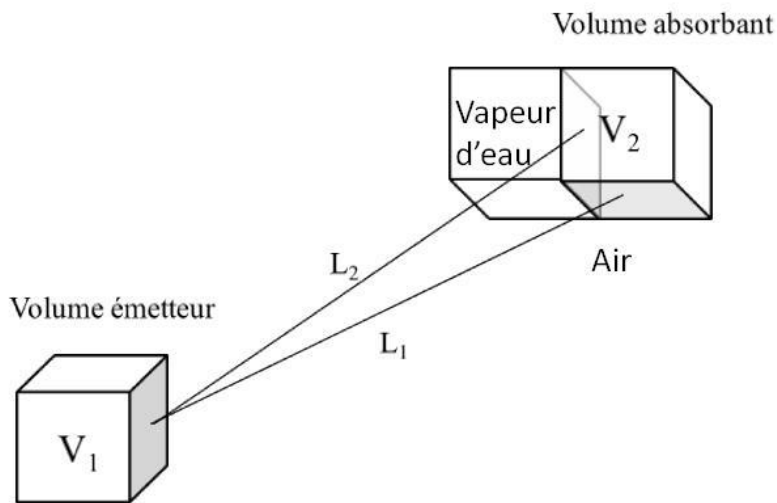


➤ Il en existe **sept** autres, déduits de ceux-ci par des **transformations géométriques**



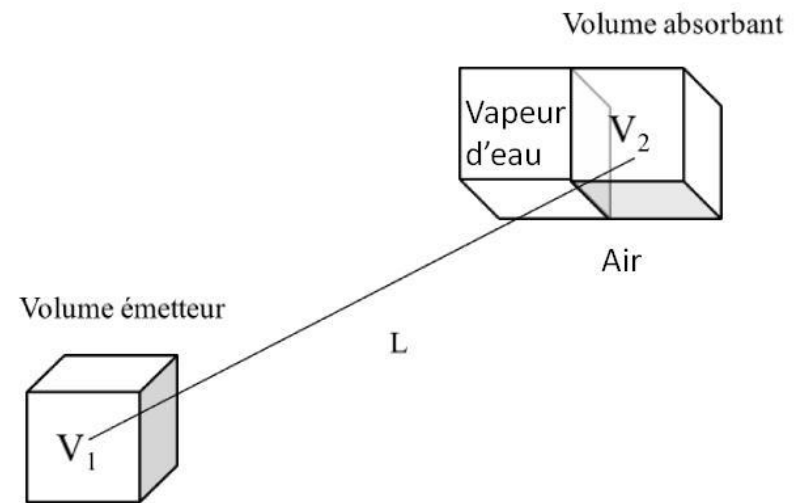
# GEF partiels et précision

## Avec GEF partiels



- ✓ Met en jeu plusieurs trajets entre les deux volumes
- ✓ Permet de prendre en considération la présence de discontinuités (ex. mélange air - vapeur d'eau)
- ✓ Plus précis dans le cas général

## Sans GEF partiels



- ✓ Déduit par l'intermédiaire d'un seul trajet entre les deux volumes
- ✓ Non fiable en présence de discontinuités
- ✓ Moins précis dans le cas général

# Longueurs Moyennes de Faisceau MBL

□ Les MBL sont liés aux GEF par des fonctions 1D (MBL = longueur de trajet)

- Longueur de trajet permettant de transmettre la même quantité de rayonnement entre deux surfaces dans le milieu considéré

## **MBL de transmission ( $L_t$ )**

$$SS = F_{12,pp}(n_x, n_y, n_z)e^{-a_m L_{t,pp}}$$

- MBL permettant d'avoir la même émissivité que le volume émetteur (voxel)

## **MBL d'émission ( $L_{em}$ )**

$$gs = F_{12,pp}(n_x, n_y, n_z)(1 - e^{-a_1 L_{em,pp}})e^{-a_m L_{t,pp}}$$

- MBL permettant d'avoir la même absorptivité que le volume absorbant (voxel)

## **MBL d'absorption ( $L_a$ )**

$$gg = F_{12,pp}(n_x, n_y, n_z)(1 - e^{-a_2 L_{a,pp}})(1 - e^{-a_1 L_{em,pp}})e^{-a_m L_{t,pp}}$$

# Réseaux de Neurones Artificiels

- ❑ Les réseaux de neurones sont générés pour déterminer les **MBL**
  - Par apprentissage à partir de valeurs numériques exactes (Yuen & Takara)
  - En gardant une erreur < 5 %. Des réseaux de neurones à deux couches sont utilisés
- ❑ Les réseaux de neurones permettent de calculer les **valeurs normalisées** des **MBL**
  - A partir des mêmes variables d'entrées normalisées
  - En prenant en compte des matrices 2D et une fonction **log** ou **sigmoïde**

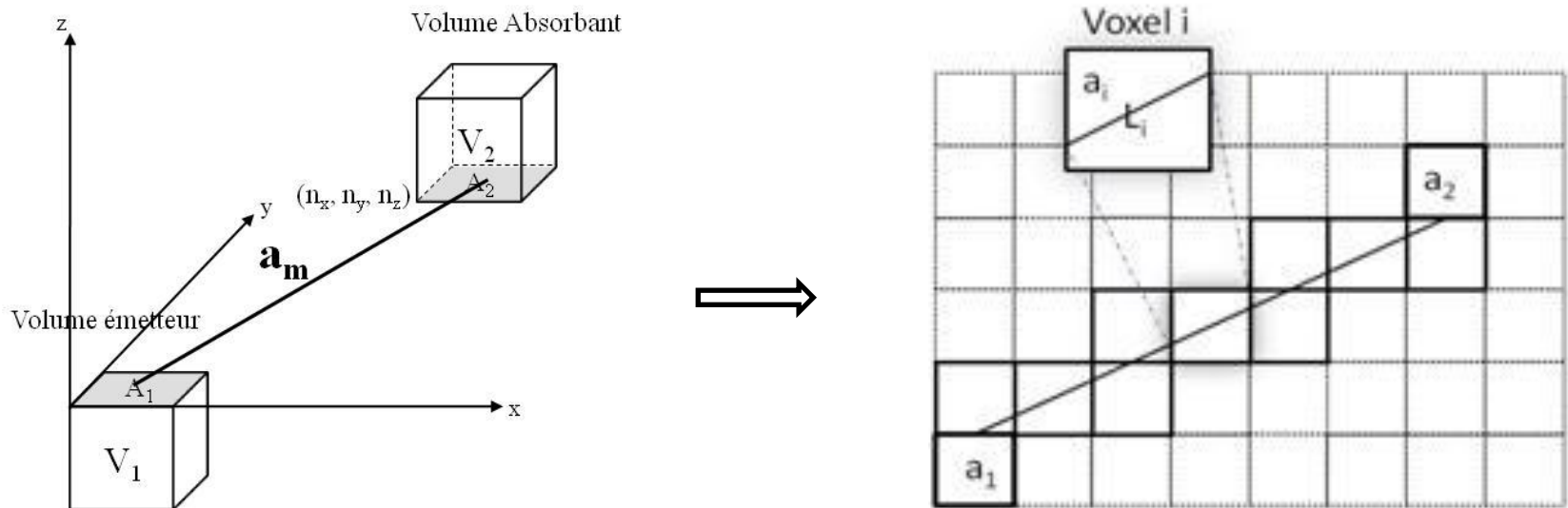
$$y = \sum_{i=1}^{N_l} \left\{ f \left[ \left( \sum_{j=1}^{N_c} w_{1,ij} x_j \right) + b_{1,i} \right] \right\} + b_2 ,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_j = (a_1 D, a_2 D, a_m D, n_x, n_y, n_z) \\ f = \text{fonction log ou sigmoïde} \\ y = \text{MBL de sortie normalisée} \\ w_{1,ij} = \text{matrice 2D} \\ b_{1,i} = \text{vecteur 1D} \\ b_2 = \text{constante} \end{array} \right.$$

# Calcul du coefficient $a_m$

- A chaque GEF partiel correspond un  $a_m$ 
  - Correspondant à l'absorptivité moyenne le long de la ligne de centre à centre entre les deux surfaces
  - $a_m$  est proportionnel à l'inverse de la transmissivité moyenne

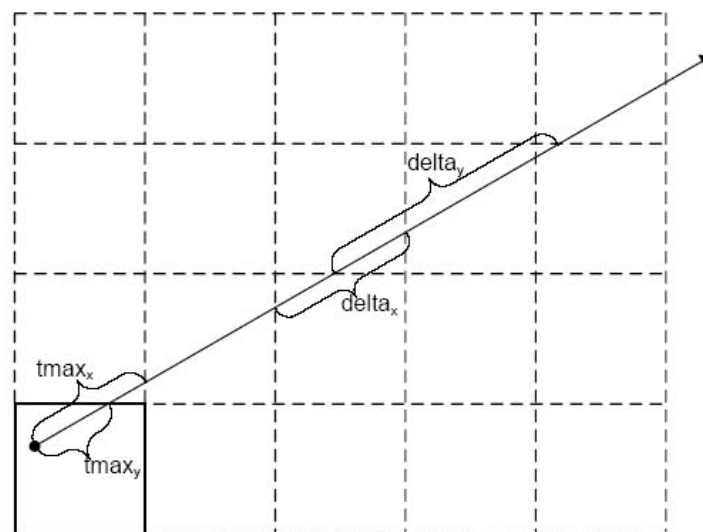
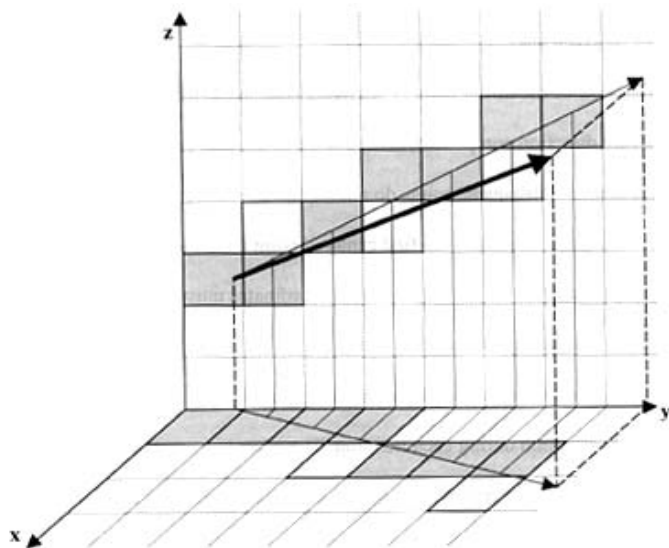
$$a_m = \sum_i a_i L_i, \quad \begin{cases} a_i = \text{coefficient d'absorption dans le voxel } i \\ L_i = \text{longueur de traversée de rayon dans le voxel } i \end{cases}$$



# Algorithme de droite discrète

## □ Algorithme d'Amanatides en 3D

- Permet d'identifier les voxels percés par une ligne de centre à centre
- Permet le calcul facile de la longueur de traversée dans chaque voxel
- Rapide et précis (droite 6-connexe)
- Symétrique dans la programmation



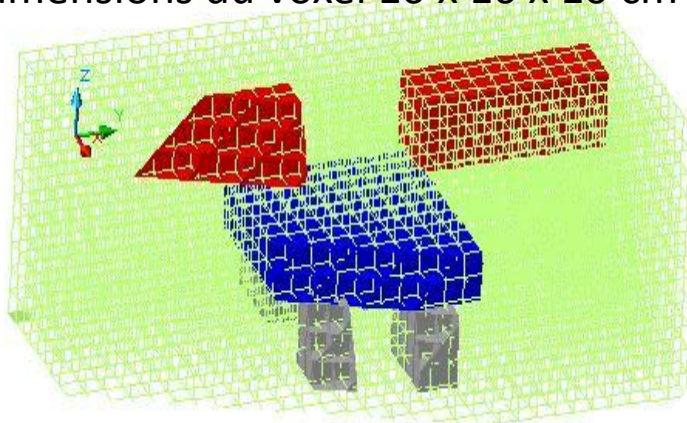
# Application

## ❑ Four d'essais de réchauffage sidérurgique

- Enceinte (300 x 160 x 110 cm<sup>3</sup>)
- Deux brûleurs sans flamme (100 x 28 x 28 cm<sup>3</sup>)
- Une brame (100 x 100 x 22 cm<sup>3</sup>)
- Quatre supports de brame

## ❑ Maillage pour MACZM

- 300 x 160 x 110 voxels
- Dimensions du voxel 10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup>



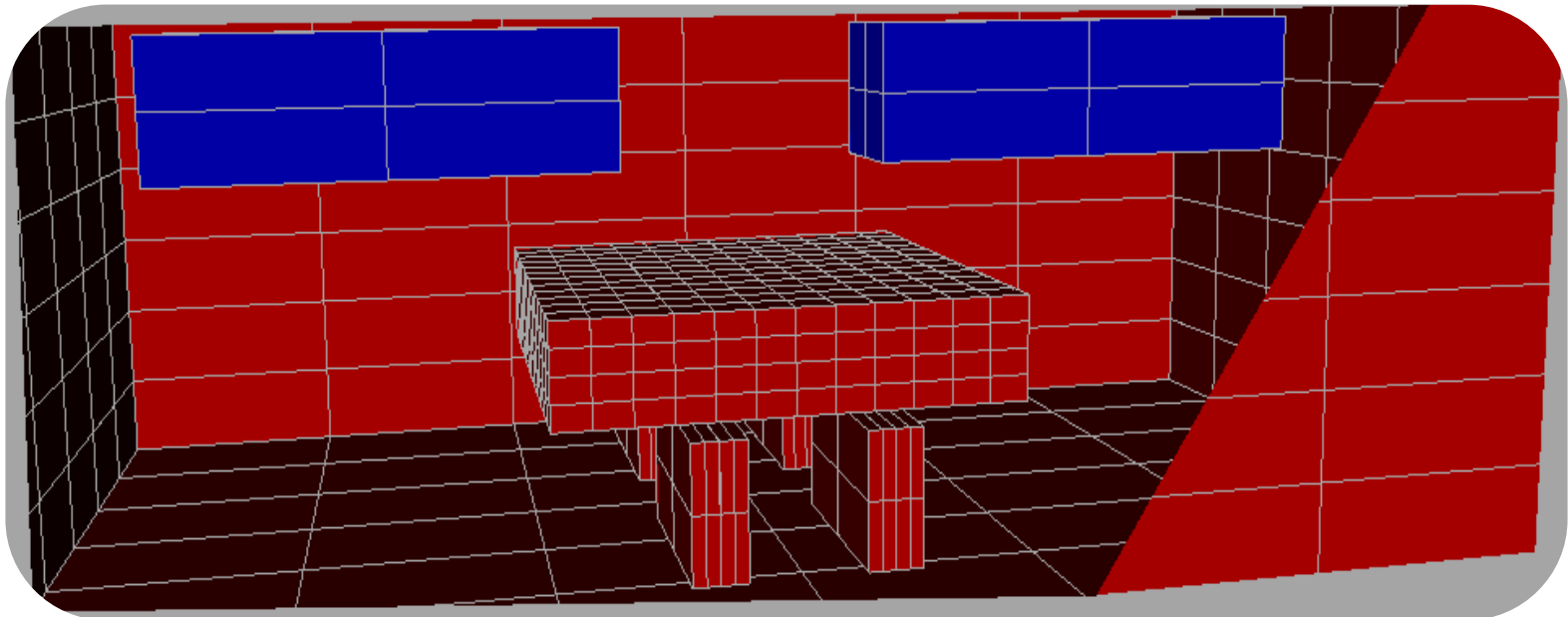
Vue externe du four



Vue interne du four

# Modélisation du four par MODRAY

- MODRAY – Approximation des Flux Plans en coordonnées cylindriques
  - Maillage surfacique
  - Trois cas de maillage sont considérés :
    - a. Brame 12x12x4, Enceinte 6x6x6, Brûleurs 2x2x2
    - b. Brame 6x6x2, Enceinte 4x4x4, Brûleurs 2x2x2
    - c. Brame 6x6x2, Enceinte 2x2x2, Brûleurs 2x2x2



# Comparaison des résultats

## ☐ MACZM

- Plus de cent fois plus rapide
- Même précision et validité

*Comparaison MACZM – MODRAY*

Facteurs d'échanges directs	MACZM	MODRAY (a)	MODRAY (b)	MODRAY (c)
[Temps de calcul]	[2 sec]	[25 min]	[6 - 7 min]	[2 min]
<b>Volume de combustion (1)-Volume de combustion (2)</b>	1.13560 <sup>E-04</sup>	9.98015 <sup>E-05</sup>	1.18587 <sup>E-04</sup>	1.27992 <sup>E-02</sup>
<b>Volume de combustion (1) - Brame</b>	1.03177 <sup>E-02</sup>	1.00157 <sup>E-02</sup>	9.76513 <sup>E-03</sup>	8.68062 <sup>E-02</sup>
<b>Volume de combustion(2) - Brame</b>	1.04588 <sup>E-02</sup>	1.01281 <sup>E-02</sup>	9.95802 <sup>E-03</sup>	8.56366 <sup>E-02</sup>
<b>Support (1) – support (2)</b>	3.28529 <sup>E-02</sup>	3.09024 <sup>E-02</sup>	3.08996 <sup>E-02</sup>	3.09022 <sup>E-02</sup>



# Accélération davantage de MACZM

## □ Parallélisation

- Majorité du temps de calcul : calcul de  $a_m$  et application des réseaux de neurones
- Ce calcul est indépendant pour chaque couple de voxels de tous les autres

## □ Programmation sur GPU (Graphics Processing Unit)

- Architecture massivement parallèle « multi-core »
- Environnement de développement simple disponible (CUDA) ; extension du C
- Architecture mémoire compatible avec l'application
- Utilisation de l'algorithme d'Amanatides « symétrique »
- Accélération estimée à plus de 100 fois supérieure

# Conclusions et perspectives

- ❑ La méthode zonale à coefficients d'absorption multiples est implémentée
- ❑ La méthode est efficace et rapide en milieux semi-transparentes
- ❑ La validité et la rapidité de la méthode sont démontrées dans la modélisation d'un four de réchauffage sidérurgique
- ❑ La méthode est parallélisable. Un algorithme 100 fois plus rapide est exécutable sur GPU
- ❑ La méthode peut être appliquée à des problèmes compliqués comme un mélange air / vapeur à haut température
- ❑ La rapidité de la méthode la rend particulièrement utile pour la modélisation dynamique des systèmes impliquant des milieux semi-transparentes.