

# Modélisation d'écoulement de gaz en régime raréfié

**Florent Pruvost**

**Professeur Luc Mieussens**

Equipe Calcul scientifique et Modélisation  
Institut de Mathématiques de Bordeaux  
Université de Bordeaux



Physique et  
Modèle

Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS  
Schéma  
Numérique  
Complexité

Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI  
Résultats

- 1 Physique et Modèle
- 2 Méthode numérique - CORBIS
- 3 Evolutions et exploitation du MCIA

## 1 Physique et Modèle

- Introduction
- Théorie cinétique des gaz
- Modèle BGK

## 2 Méthode numérique - CORBIS

## 3 Evolutions et exploitation du MCIA

### Physique et Modèle

Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS  
Schéma  
Numérique  
Complexité

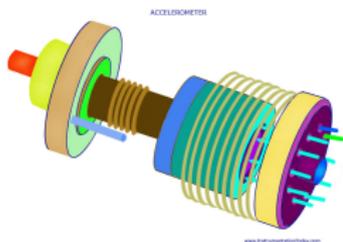
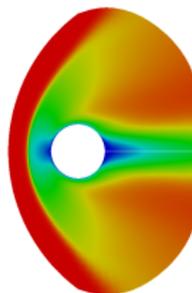
Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI  
Résultats

Régime raréfié : densité de gaz faible



Réentrée Atmosphérique



Pompe à vide, Microelectromechanical systems (MEMS), etc

Physique et  
Modèle

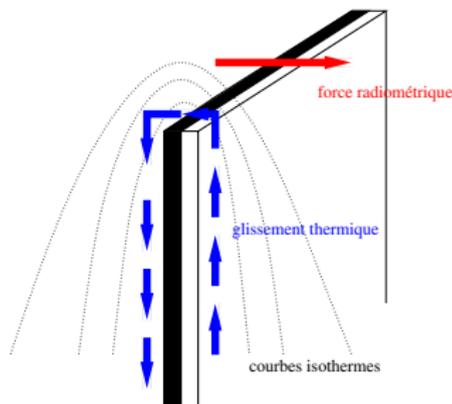
**Introduction**  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS  
Schéma  
Numérique  
Complexité

Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI  
Résultats

- dimensionnement d'un système : géométrie d'une pompe, d'un corps de rentrée, etc.
- mise au point de nouveaux systèmes (micro-pompes) ou étude de nouveaux effets (écoulement thermique de bord)
- compréhension d'un phénomène (radiomètre de Crookes)



Physique et  
Modèle

Introduction

Théorie cinétique  
des gaz

Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS

Schéma  
Numérique  
Complexité

Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

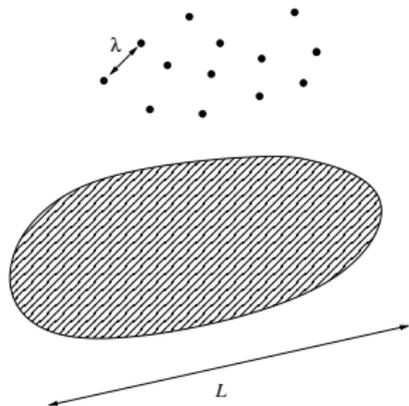
2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine

Implémentation  
MPI

Résultats

- nombre de Knudsen :

$$Kn = \frac{\text{libre parcours moyen}}{\text{longueur macroscopique}} = \frac{\lambda}{L}$$



- régimes :

- ▶  $Kn \gg 1$  : régime moléculaire libre (très peu ou pas de collision)
- ▶  $Kn \approx 0.1 - 1$  : régime transitionnel ou raréfié (peu de collisions)
- ▶  $Kn \ll 1$  : régime continu (très grand nombre de collisions)

- dynamique moléculaire : position et vitesses de toutes les molécules, dynamique de Newton

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = v_i(t), \quad \frac{dv_i(t)}{dt} = F_i(t, x_1(t), \dots, x_N(t))$$

- théorie cinétique :  $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v})$  et équation de Boltzmann
- dynamique des gaz (mécanique des milieux continus, modèle macroscopique) : masse volumique, vitesse moyenne, température, pression, équations de Navier-Stokes

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0$$

$$\partial_t \rho \mathbf{u} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u}^T + \nabla p = -\nabla \cdot \sigma$$

$$\partial_t E + \nabla \cdot (E + p) \mathbf{u} = -\nabla \cdot \mathbf{q}$$

- gaz monoatomique : fonction de distribution des vitesses des molécules  $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v})$
- définie tel que  $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d\mathbf{x} d\mathbf{v} =$  masse des molécules au temps  $t$  de position  $\mathbf{x} \pm d\mathbf{x}$  et de vitesse  $\mathbf{v} \pm d\mathbf{v}$
- quantités macroscopiques : moments de  $f$  selon  $\mathbf{v}$

$$\begin{pmatrix} \rho \\ \rho \mathbf{u} \\ E \end{pmatrix} = \int_{\mathbb{R}^3} \begin{pmatrix} 1 \\ \mathbf{v} \\ \frac{1}{2} |\mathbf{v}|^2 \end{pmatrix} f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d\mathbf{v}$$

- évolution de  $f$  décrite par l'équation de Boltzmann

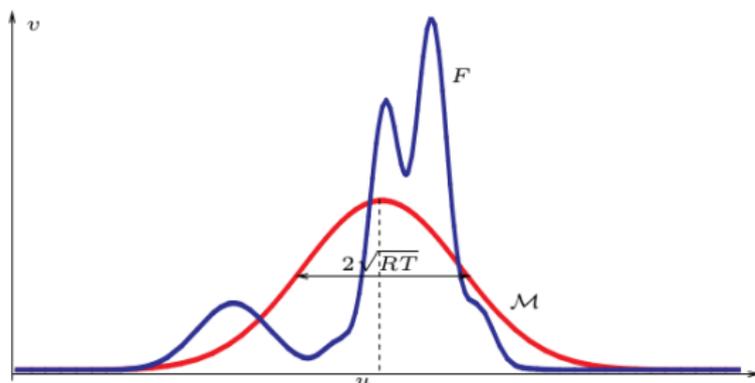
$$\underbrace{\partial_t f + \mathbf{v} \cdot \nabla_x f}_{\text{transport}} = \underbrace{Q(f)}_{\text{collisions}}$$

- Opérateur de collision approché par :

$$Q(f) = \frac{1}{\tau}(\mathcal{M}[\rho, \mathbf{u}, T] - f)$$

- Effet des collisions = relaxation de  $f$  vers l'équilibre Maxwellien

$$\mathcal{M}[\rho, \mathbf{u}, T](\mathbf{v}) = \frac{\rho}{(2\pi RT)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{|\mathbf{v} - \mathbf{u}|^2}{2RT}\right)$$



- 1 Physique et Modèle
- 2 Méthode numérique - CORBIS
  - Schéma Numérique
  - Complexité
- 3 Evolutions et exploitation du MCIA

Physique et  
Modèle

Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

**Méthode  
numérique -  
CORBIS**

Schéma  
Numérique  
Complexité

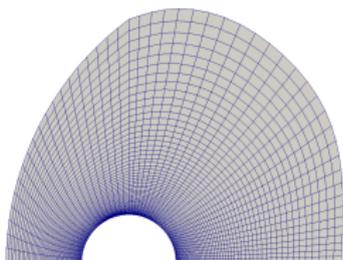
Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI  
Résultats

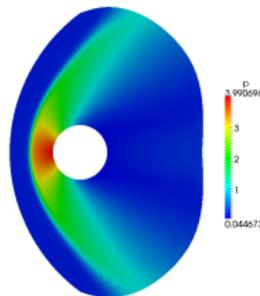
- simulations stochastiques : Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)
  - ▶ méthode reine en aérodynamique
  - ▶ inconvénients (1) :  $\Delta t \approx \tau$  et  $\Delta x \approx \lambda$ , coûteux à faible Kn (altitude 60-80 km)
  - ▶ inconvénients (2) : bruit stochastique important pour les écoulements lents (micro-écoulements), et convergence très lente vers l'état stationnaire
- simulations déterministes : discrétisation de l'équation de Boltzmann
  - ▶ coût élevé :  $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{v})$ , problème 6D !!
  - ▶ avantages : pas de bruit stochastique, convergence rapide vers l'état stationnaire, pas de contrainte à faible Kn (schéma implicite), précision potentiellement élevée

- écoulement plan : modèle BGK 2D (2 dimensions en espace, 2 dimensions en vitesse)
- discrétisation de  $f$  sur les vitesses : respecte les propriétés de conservation et de minimisation d'entropie
- discrétisation en espace : volume finis grilles structurées curvilignes
- solution stationnaire : schéma implicite linéarisé
- implémentation parallèle OpenMP

maillage



pression autour d'un cylindre



Écoulement supersonique - Mach=4, Kn=0.036

Physique et  
Modèle  
Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS

Schéma  
Numérique  
Complexité

Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI  
Résultats

Equation d'évolution pour  $f$  discrétisé en vitesse :

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_k &:= (v_x^k = a + k\Delta v_x, v_y^k = b + l\Delta v_y) \\ \partial_t f_k + \mathbf{v}_k \cdot \nabla_x f_k &= \frac{1}{\tau} (\mathcal{M}_k[\rho, \mathbf{u}, T] - f_k) \end{aligned} \quad (1)$$

Grille en espace cartésienne 2D :

$$(x_i, y_j) = (i\Delta_x, j\Delta_y), \text{ cellules } \mathcal{C}_i = ]x_{i-\frac{1}{2}}, x_{i+\frac{1}{2}}[ \times ]y_{j-\frac{1}{2}}, y_{j+\frac{1}{2}}[$$

Volume finis :  $f_{k,i}$  valeur moyenne de  $f_k(t, \mathbf{x})$  sur la cellule  $\mathcal{C}_i$

$$f_{k,i} = \frac{1}{|\mathcal{C}_i|} \int_{\mathcal{C}_i} f_k dx$$

Forme intégrale de (1) sur chaque cellule :

$$\partial_t \int_{\mathcal{C}_i} f_k dx + \int_{\mathcal{C}_i} \mathbf{v}_k \cdot \nabla_x f_k dx = \int_{\mathcal{C}_i} \frac{1}{\tau} (\mathcal{M}_k[\rho, \mathbf{u}, T] - f_k) dx$$

Physique et  
Modèle

Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS

Schéma  
Numérique  
Complexité

Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI  
Résultats

Schéma explicite :

$$f_{k,i}^{n+1} = f_{k,i}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( \mathcal{F}_{i+\frac{1}{2},j}(f_k^n) - \mathcal{F}_{i-\frac{1}{2},j}(f_k^n) \right) - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left( \mathcal{F}_{i,j+\frac{1}{2}}(f_k^n) - \mathcal{F}_{i,j-\frac{1}{2}}(f_k^n) \right) + \frac{\Delta t}{\tau_i^n} (\mathcal{M}_{k,i}^n - f_{k,i}^n)$$

Flux numérique, d'ordre 1 ou 2 selon l'expression de  $\Phi$  :

$$\mathcal{F}_{i+\frac{1}{2},j}(f_k) = \frac{1}{2} \left( v_x^k (f_{k,i+1,j} + f_{k,i,j}) - |v_x^k| (\Delta f_{k,i+\frac{1}{2},j} - \Phi_{k,i+\frac{1}{2},j}) \right)$$

Schéma implicite :

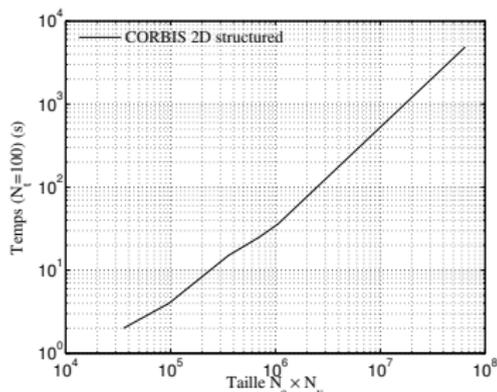
$$f_{k,i}^{n+1} = f_{k,i}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left( \mathcal{F}_{i+\frac{1}{2},j}(f_k^{n+1}) - \mathcal{F}_{i-\frac{1}{2},j}(f_k^{n+1}) \right) - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left( \mathcal{F}_{i,j+\frac{1}{2}}(f_k^{n+1}) - \mathcal{F}_{i,j-\frac{1}{2}}(f_k^{n+1}) \right) + \frac{\Delta t}{\tau_i^n} (\mathcal{M}_{k,i}^{n+1} - f_{k,i}^{n+1})$$

Physique et  
ModèleIntroduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGKMéthode  
numérique -  
CORBISSchéma  
Numérique  
ComplexitéEvolutions et  
exploitation du  
MCIA2D non-structuré  
Décomposition de  
domaineImplémentation  
MPI

Résultats

- Type de simulation :
  - ▶ Instationnaire  $\Rightarrow$  explicite :  $N_t \gg 100$  (CFL)
  - ▶ Stationnaire  $\Rightarrow$  implicite :  $N_t \approx [100, 1000]$  (convergence)
- Taille du système (nombre de ddl) :
  - ▶ Nombre de cellules spatiales :  $N_c \approx [100, 100000]$
  - ▶ Nombre de vitesses moléculaires :  $N_v \approx [100, 1000]$

$N_t = 100$						
$N_c$	440	800	2940	4900	2400	38400
$N_v$	81	121	121	143	441	1681
$N_c \times N_v$	35 640	96 800	355 740	700 700	1 058 400	64 550 400
Temps (s)	2	4	15	25	36	4875


 Physique et  
Modèle

 Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

 Méthode  
numérique -  
CORBIS

 Schéma  
Numérique  
Complexité

 Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

 2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI  
Résultats

- 1 Physique et Modèle
- 2 Méthode numérique - CORBIS
- 3 Evolutions et exploitation du MCIA
  - 2D non-structuré
  - Décomposition de domaine
  - Implémentation MPI
  - Résultats

Physique et  
Modèle

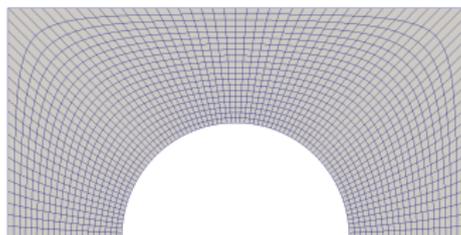
Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS  
Schéma  
Numérique  
Complexité

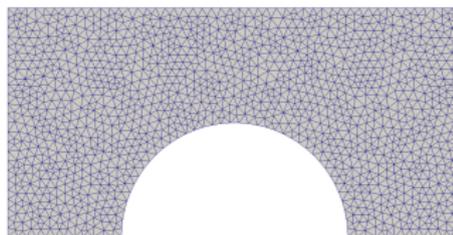
Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI  
Résultats

## 1 passage du 2D structuré au 2D non-structuré



structuré curviligne



non-structuré triangulaire

- adaptation des schémas : ordre 1/2, explicite/implicite

## 2 parallélisation MPI

- efficacité d'OpenMP très limitée :  $Sp \approx [1, 6]$
- architecture distribuée : grand nombre de processeurs
- parallélisme plus "grossier" : moins de synchronisations

Physique et  
Modèle

Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS  
Schéma  
Numérique  
Complexité

Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI  
Résultats

Schéma explicite :

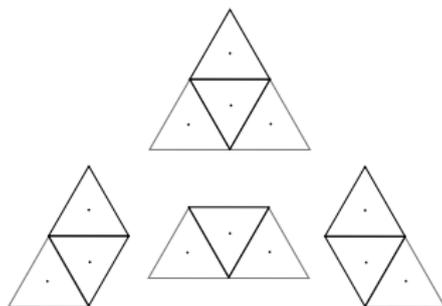
$$f_{k,i}^{n+1} = f_{k,i}^n - \frac{\Delta t}{|C_i|} \sum_{j \in \mathcal{J}_i} \mathcal{F}_{k,i,j}^n + \frac{\Delta t}{\tau_i^n} (\mathcal{M}_{k,i}^n - f_{k,i}^n)$$

Flux numérique décentré (upwind) sur une arête  $\Gamma_{ij}$  :

$$\mathcal{F}_{k,i,j} = \tilde{f}_{k,i,j} |\Gamma_{ij}| (\mathbf{v}_k \cdot \bar{\mathbf{n}}_{ij})^+ + \tilde{f}_{k,j,i} |\Gamma_{ij}| (\mathbf{v}_k \cdot \bar{\mathbf{n}}_{ij})^-$$

$\tilde{f}_{k,i,j}$  = valeur de  $f_k(\mathbf{x})$  au centre de l'arête  $m_{i,j}$  :

- ordre 1 :  $\tilde{f}_{k,i,j} = f_{k,i}$ ,  $\tilde{f}_{k,j,i} = f_{k,j}$
- ordre 2 :  $\tilde{f}_{k,i,j} = f_{k,i} + \nabla_x f_{k,i} (m_{i,j} - g_i)_x + \nabla_y f_{k,i} (m_{i,j} - g_i)_y$


 Physique et  
Modèle

 Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

 Méthode  
numérique -  
CORBIS

 Schéma  
Numérique  
Complexité

 Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

 2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI  
Résultats

Schéma implicite :

$$\frac{f_{k,i}^{n+1} - f_{k,i}^n}{\Delta t} + \underbrace{\frac{1}{|C_i|} \sum_{j \in \mathcal{J}_i} \mathcal{F}_{k,i,j}^{n+1}}_{\mathbf{T}} - \underbrace{\frac{1}{\tau_i^n} (\mathcal{M}_{k,i}^{n+1} - f_{k,i}^{n+1})}_{\mathbf{Q}} = 0$$

$$\left( \frac{\mathbf{I}}{\Delta t} + \mathbf{T}^1 - \partial_f \mathbf{Q}(f^n) \right) \delta f = \mathbf{Q}(f^n) - \mathbf{T}(f^n), \quad f^{n+1} = f^n + \delta f$$

Jacobi par bloc sur les vitesses  $\Rightarrow$  omp parallèle sur  $\mathbf{k}$  :

$$\mathbf{A}_k \delta f_k^{l+1} = b_k^l, \quad b_k^l = \mathbf{Q}_k^n - \mathbf{T}_k^n + \mathbf{E}_k^n \delta f_k^l$$

$$\mathbf{A}_k = \left( \frac{\mathbf{I}_k}{\Delta t} + \mathbf{T}_k + \mathbf{D}_k^n \right), \quad \partial_f \mathbf{Q}(f^n) = \mathbf{E}^n - \mathbf{D}^n$$

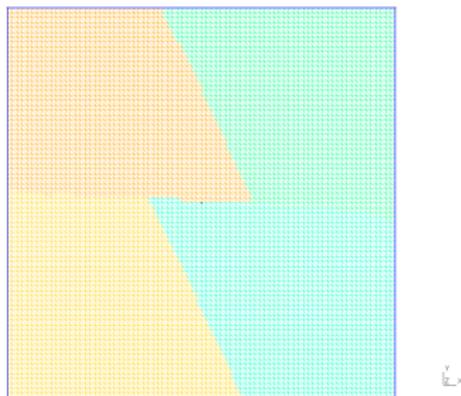
Factorisation LU approchée des  $\mathbf{A}_k$  :

$$\mathbf{A}x = b \Leftrightarrow \tilde{\mathbf{A}}x = \tilde{b}, \quad \tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{LU} + O(\Delta t^2)$$

Physique et  
ModèleIntroduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGKMéthode  
numérique -  
CORBISSchéma  
Numérique  
ComplexitéEvolutions et  
exploitation du  
MCIA2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI  
Résultats

Partition du domaine global en sous-domaines disjoints :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_i \subset \Omega \quad \forall i \in \{1, \dots, N_d\}, \\ \bigcup_{i=1}^{N_d} \Omega_i = \Omega, \\ \Omega_i \cap \Omega_j = \Gamma_{ij} \quad \forall i \neq j \in \{1, \dots, N_d\}. \end{array} \right.$$



- taille semblable  $\Rightarrow$  équilibre de la charge de calcul
- rapport nombre de ddl interface/domaine faible  $\Rightarrow$  faible coût des communications (points à points)

Physique et  
ModèleIntroduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGKMéthode  
numérique -  
CORBISSchéma  
Numérique  
ComplexitéEvolutions et  
exploitation du  
MCIA2D non-structuré  
Décomposition de  
domaineImplémentation  
MPI  
Résultats

Résolution sur les sous-domaines en parallèle :

$$\partial_t f + \mathbf{v} \cdot \nabla_x f = Q(f), \mathbf{x} \in \Omega_i$$

Couplage spatial de  $f$  au niveau du flux :

$$\mathcal{F}_{k,i,j} = \tilde{f}_{k,i,j} |\Gamma_{ij}| (\mathbf{v}_k \cdot \vec{n}_{ij})^+ + \tilde{f}_{k,j,i} |\Gamma_{ij}| (\mathbf{v}_k \cdot \vec{n}_{ij})^-$$

**Echange des valeurs de  $\tilde{f}_{k,i,j}$  entre deux pas de temps :**

- exact pour le schéma explicite
- approximation pour le schéma implicite
  - ▶ normalement entre deux itérations de Jacobi
  - ▶ convergence asymptotique peu sensible à ce “découplage” spatial sur un pas
  - ▶ faible dégradation de la convergence vers l'état stationnaire

Physique et  
ModèleIntroduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGKMéthode  
numérique -  
CORBISSchéma  
Numérique  
ComplexitéEvolutions et  
exploitation du  
MCIA2D non-structuré  
Décomposition de  
domaineImplémentation  
MPI

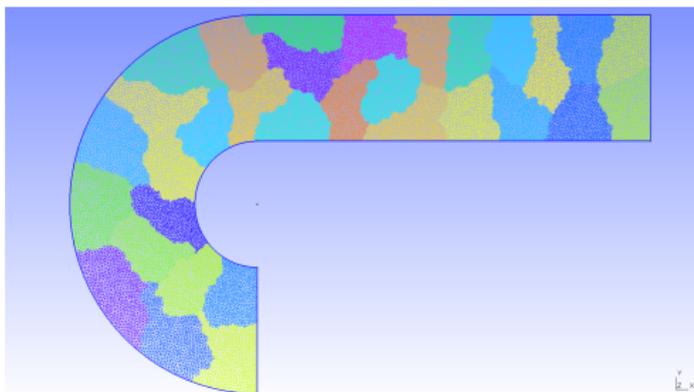
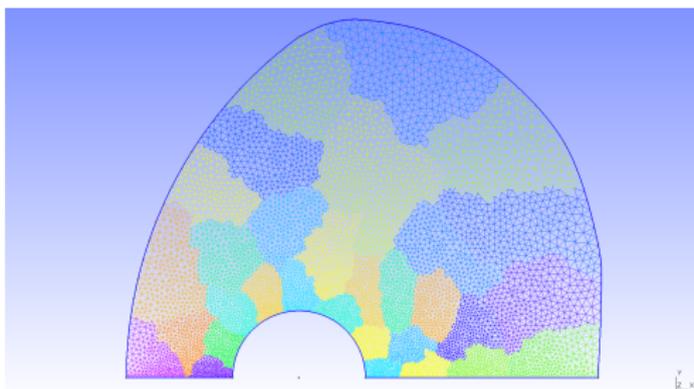
Résultats

- implémentation hybride MPI/OpenMP : OMP sur les boucles coûteuses
- placement des processus suivant le graphe de la partition avec `MPI_GRAPH_CREATE()`
- communications points-à-points `isend/irecv` non-bloquantes de  $f$  aux interfaces
- communications `allreduce` bloquantes :
  - ▶ calcul du pas de temps global
  - ▶ calcul du résidu global
  - ▶ calcul de la masse globale lors de la correction de masse
- sorties de fichiers vtk en parallèle

# Illustration découpe en sous-domaines

Journée MCIA

Florent Pruvost



Physique et  
Modèle

Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS

Schéma  
Numérique  
Complexité

Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

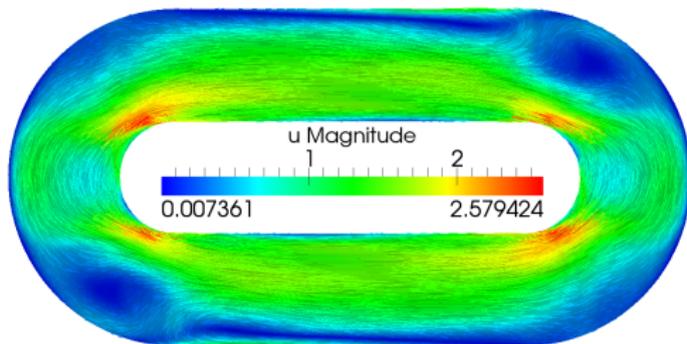
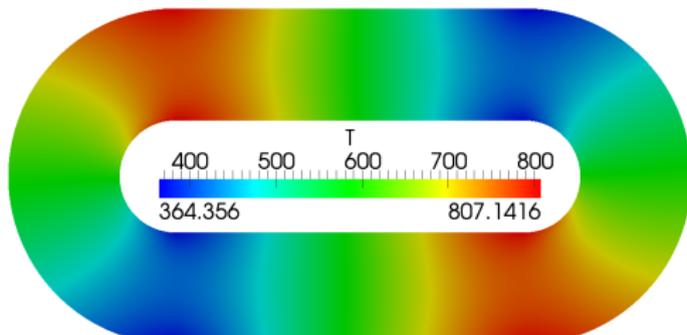
2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine

Implémentation  
MPI

Résultats

# Ecoulement circulaire dans un tube à bas Mach

Parois chauffées avec un gradient de température  $T \in [300, 900]^{\circ}\text{K}$



## Dimensions :

- 157098 triangles
- 441 vitesses moléculaires
- Taille système  $\approx 69.3$ M ddl

## Machine de calcul Avakas (MCIA), noeuds **c6100** :

- 2 Hexa-core Nehalem Intel<sup>®</sup>Xeon<sup>®</sup> série 5600
- Fréquence : 3,06 GHz
- 12 Mo de Cache L3
- 48Go de RAM (DDR3)

Physique et  
Modèle

Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS  
Schéma  
Numérique  
Complexité

Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

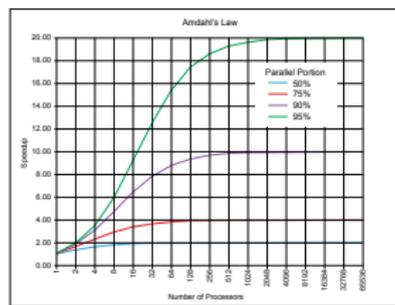
2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI

Résultats

Mode de calcul	Seq.	OMP 12T
Itérations	1366	1366
Temps CPU (s)	205799	36530
Speedup	1.0	5.6
Efficacité	1.00	0.46

## Speedup faible :

- loi d'Amdahl :  $S_p \leq \frac{1}{(1-P) + \frac{P}{N_p}}$ ,  $P \approx 0.9$   $N_p = 12 \Rightarrow S_p \leq 5.7$
- parallélisme fin : boucles = petites tâches relativement peu coûteuses + beaucoup de points de synchronisations


 Physique et  
Modèle

 Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

 Méthode  
numérique -  
CORBIS

 Schéma  
Numérique  
Complexité

 Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

 2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI

**Résultats**

Mode de calcul	Seq.	96P	192P	384P	768P
Itérations	1366	1517	1538	1574	1618
Temps CPU (s)	205799	2280	1187	770	426
% Comm.	-	[9,11]	[10,13]	[25,35]	[40,50]
Speedup	1.0	90.26	173.37	267.27	483.09
Efficacité	1.00	0.94	0.90	0.70	0.63

## Speedups intéressants :

- faible croissance du nombre d'itérations malgré le découplage spatial (Jacobi)
- faible coût des communications points-à-points
- à grand nombre de processeurs : coûts des communications bloquantes élevées

 Physique et  
Modèle

 Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

 Méthode  
numérique -  
CORBIS

 Schéma  
Numérique  
Complexité

 Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

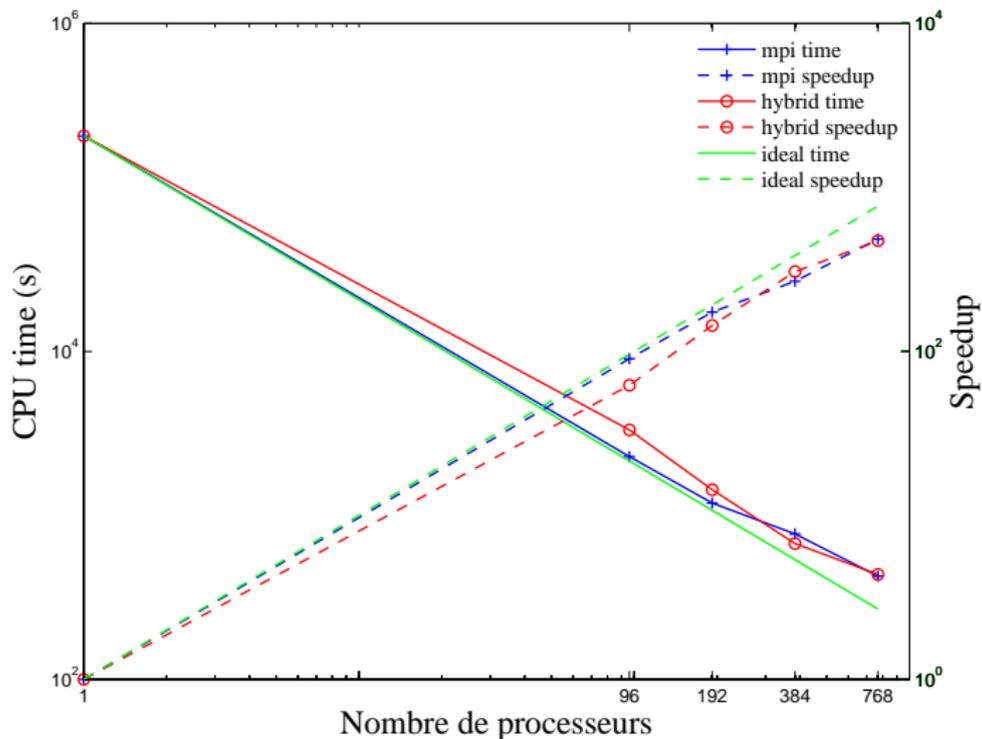
 2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI

**Résultats**

Mode de calcul	Seq.	16P/6T	32P/6T	64P/6T	128P/6T
Itérations	1366	1441	1441	1461	1488
Temps CPU (s)	205799	3315	1432	672	436
Speedup	1.0	62.08	143.71	306.24	472.01
Efficacité	1.00	0.64	0.75	0.80	0.61

### Pas d'améliorations notable du speedup :

- résultats pas mauvais ...
- mais pas clairement meilleurs que MPI seul
- à voir selon les cas tests (peu de cellules et beaucoup de vitesses)

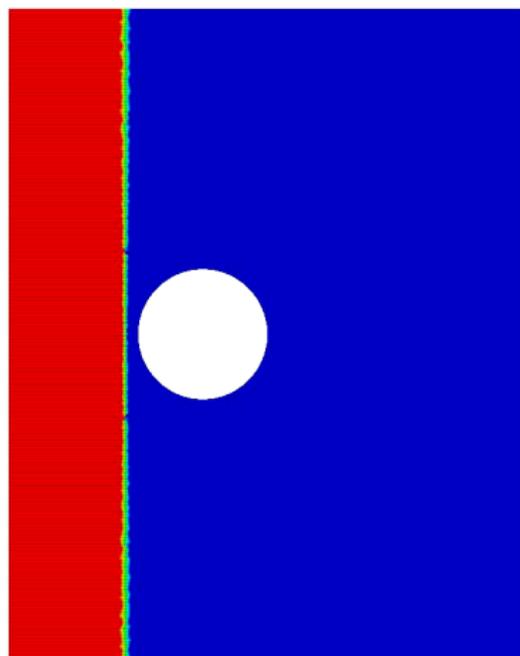


Physique et  
Modèle  
Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS  
Schéma  
Numérique  
Complexité

Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI  
**Résultats**



u Magnitude

1059.458

1000

750

500

250

0

Physique et  
Modèle

Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS

Schéma  
Numérique  
Complexité

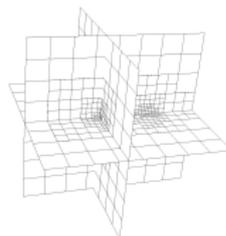
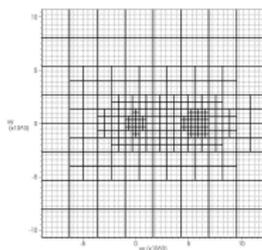
Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine

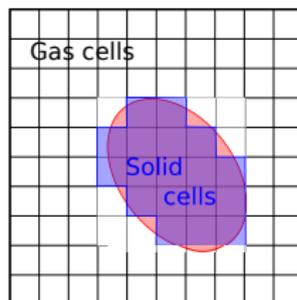
Implémentation  
MPI

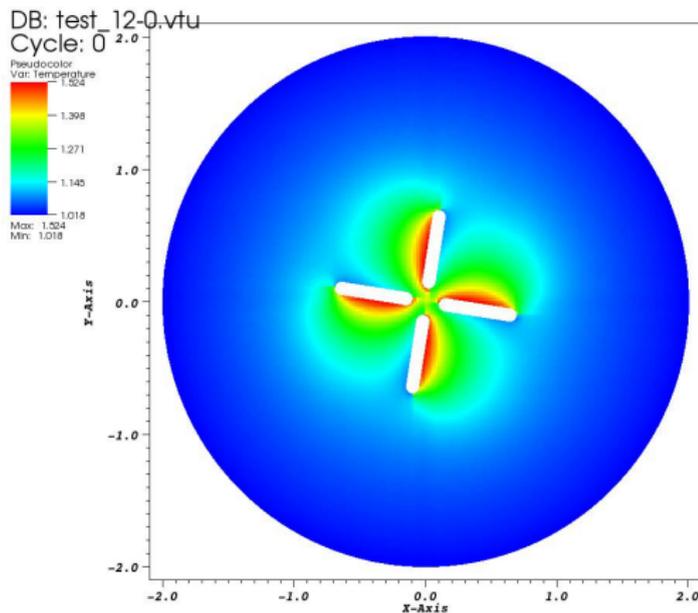
Résultats

- Passage au 3D espace/vitesse
- Grille de vitesses locales, grilles AMR :
  - ▶ en cours → PostDoc L. Forestier-Coste



- Immersed Boundary method pour parois mobiles :
  - ▶ en cours → PhD G. Dechrise





user: gdechris  
Wed Dec 5 18:56:52 2012

Physique et  
Modèle

Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS  
Schéma  
Numérique  
Complexité

Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI

Résultats

Physique et  
Modèle

Introduction  
Théorie cinétique  
des gaz  
Modèle BGK

Méthode  
numérique -  
CORBIS

Schéma  
Numérique  
Complexité

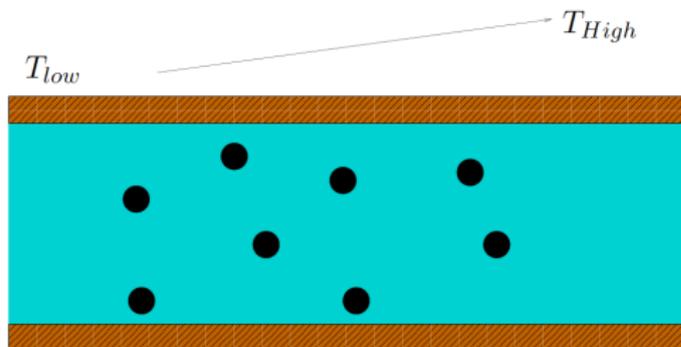
Evolutions et  
exploitation du  
MCIA

2D non-structuré  
Décomposition de  
domaine  
Implémentation  
MPI

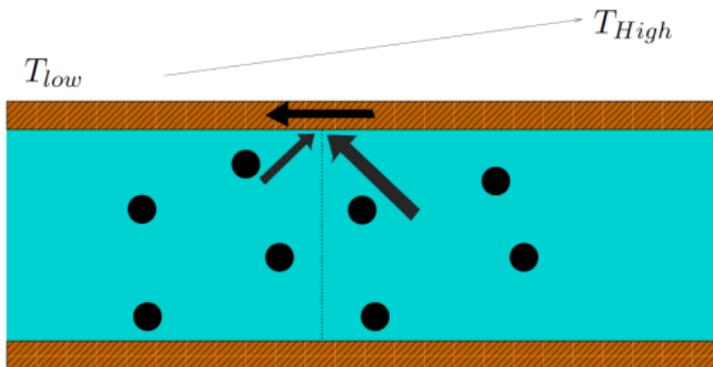
**Résultats**

MERCI!

- on applique un gradient de température à la paroi

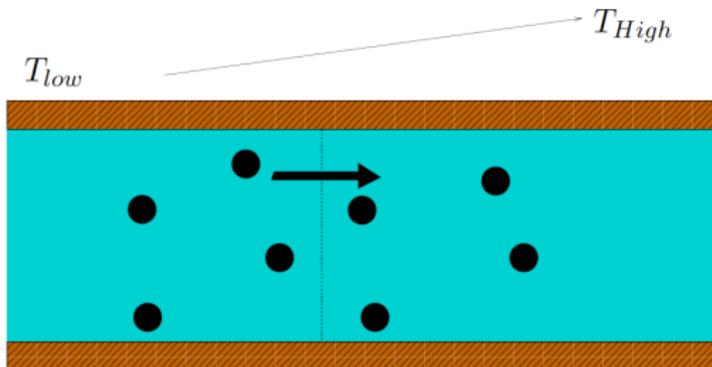


- à la paroi : les particules venant de la droite ont plus d'énergie que celles venant de la gauche



- le gas donne une impulsion à la paroi de la droite vers la gauche

- la paroi est fixe : par réaction, le gas se déplace de la gauche vers la droite



- c'est le glissement thermique