

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



- 1 Physique et Modèle
- 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

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

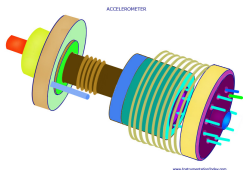
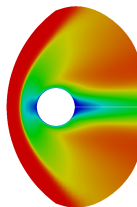
Evolutions et
exploitation du
MCIA

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

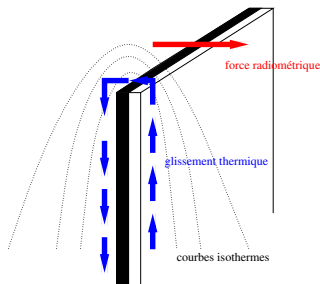
Introduction
Théorie cinétique
des gaz
Modèle BGK

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

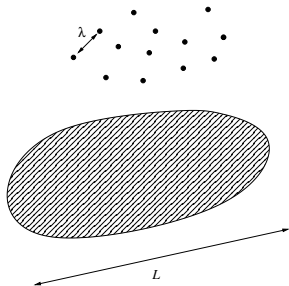
2D non-structuré
Décomposition de
domaine

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

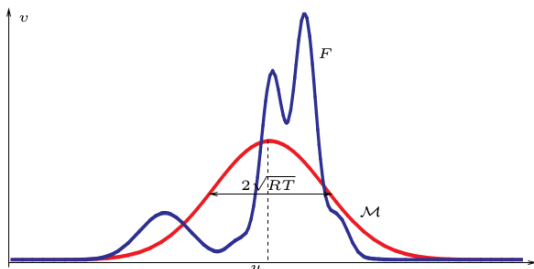
$$\underbrace{\partial_t f + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{x}} f}_{\text{transport}} = \underbrace{Q(f)}_{\text{collisions}}$$

- 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

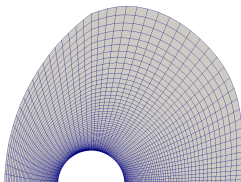
Evolutions et
exploitation du
MCIA

2D non-structuré
Décomposition de
domaine
Implémentation
MPI
Résultats

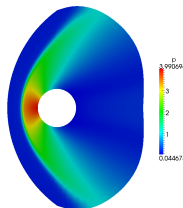
- simulations stochastiques : Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)
 - ▶ méthode reine en aérodynamique
 - ▶ inconvénients (1) : $\Delta t \approx \tau$ et $\Delta x \approx \lambda$, coûteux à faible Kn (altitude 60-80 km)
 - ▶ inconvénients (2) : bruit stochastique important pour les écoulements lents (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 Φ :

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

Schéma implicite :

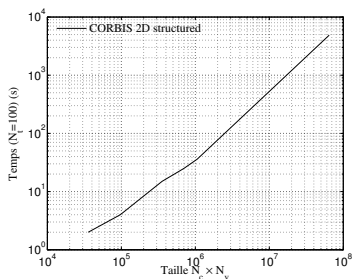
$$f_{k,i}^{n+1} = f_{k,i}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\mathcal{F}_{i+\frac{1}{2},j}(f_k^{n+1}) - \mathcal{F}_{i-\frac{1}{2},j}(f_k^{n+1}) \right) - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left(\mathcal{F}_{i,j+\frac{1}{2}}(f_k^{n+1}) - \mathcal{F}_{i,j-\frac{1}{2}}(f_k^{n+1}) \right) + \frac{\Delta t}{\tau_i^n}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

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

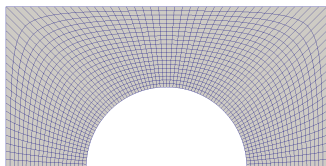
Introduction
Théorie cinétique
des gaz
Modèle BGK

Méthode
numérique -
CORBIS
Schéma
Numérique
Complexité

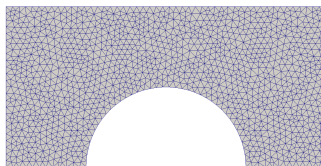
Evolutions et
exploitation du
MCIA

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 :

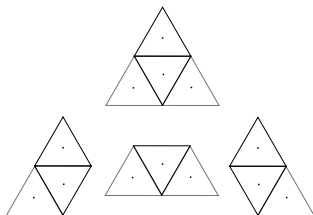
$$f_{k,i}^{n+1} = f_{k,i}^n - \frac{\Delta t}{|C_i|} \sum_{j \in \mathcal{J}_i} \mathcal{F}_{k,i,j}^n + \frac{\Delta t}{\tau_i^n} (\mathcal{M}_{k,i}^n - f_{k,i}^n)$$

Flux numérique décentré (upwind) sur une arête Γ_{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} :

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

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

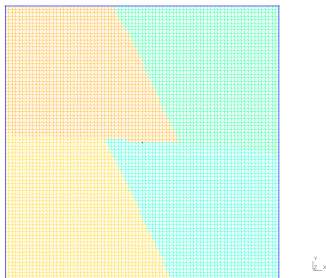
Factorisation LU approchée des \mathbf{A}_k :

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

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

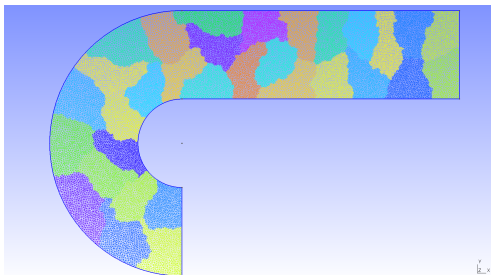
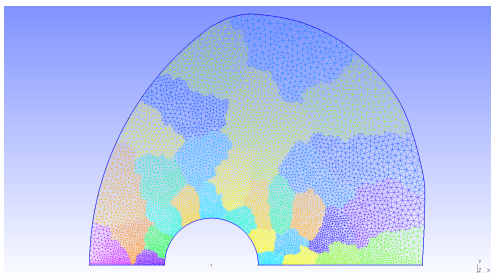
Résultats

- 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

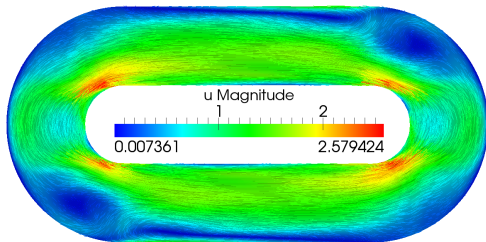
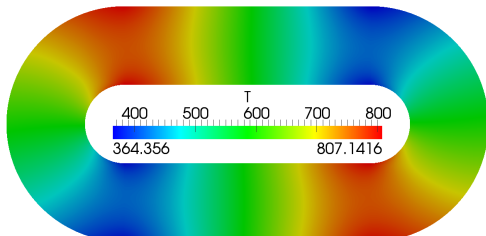
Evolutions et
exploitation du
MCIA

2D non-structuré
Décomposition de
domaine
Implémentation
MPI

Résultats

Écoulement 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 ≈ 69.3 M ddl

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

- 2 Hexa-core Nehalem Intel[®]Xeon[®] 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

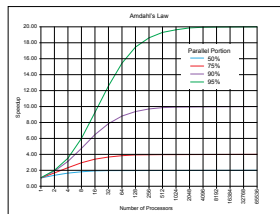
2D non-structuré
Décomposition de
domaine
Implémentation
MPI

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

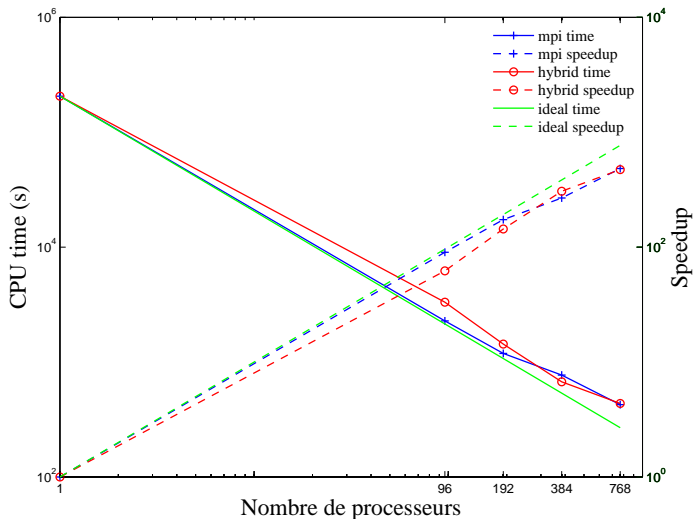
Physique et
ModèleIntroduction
Théorie cinétique
des gaz
Modèle BGKMéthode
numérique -
CORBISSchéma
Numérique
ComplexitéEvolutions et
exploitation du
MCIA2D non-structuré
Décomposition de
domaine
Implémentation
MPI

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)

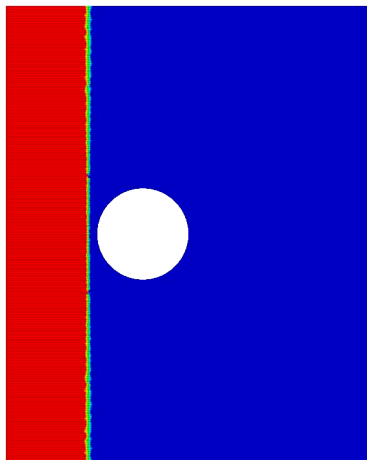


Physique et
Modèle
Introduction
Théorie cinétique
des gaz
Modèle BGK

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

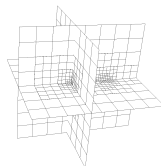
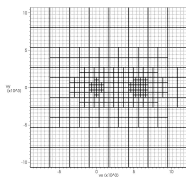
Evolutions et
exploitation du
MCIA

2D non-structuré
Décomposition de
domaine

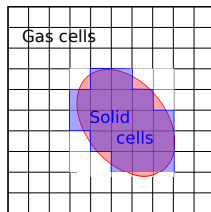
Implémentation
MPI

Résultats

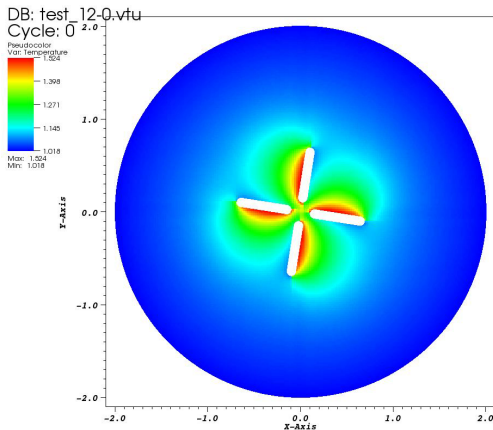
- Passage au 3D espace/vitesse
- Grille de vitesses locales, grilles AMR :
 - ▶ en cours → PostDoc L. Forestier-Coste



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

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



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

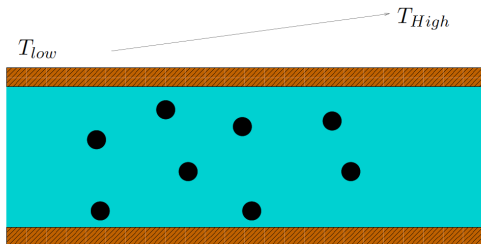
Evolutions et
exploitation du
MCIA

2D non-structuré
Décomposition de
domaine
Implémentation
MPI

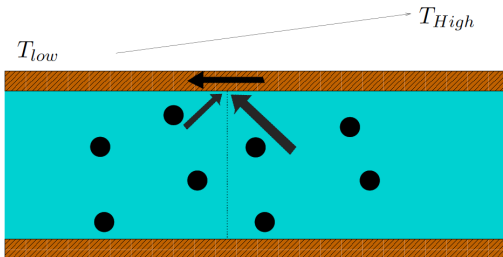
Résultats

MERCI!

- on applique un gradient de température à la paroi

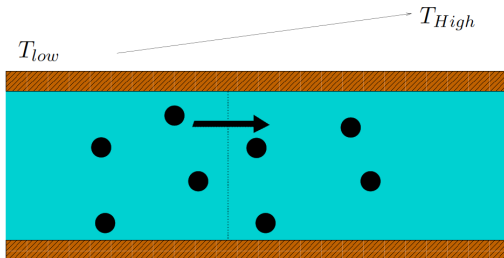


- à la paroi : les particules venant de la droite ont plus d'énergie que celles venant de la gauche



- 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