Habilitation à Diriger des Recherches

Application de la méthode de Boltzmann sur Réseau aux simulations instationnaires en mécanique des fluides.

Simon Marié

Laboratoire DynFluid, Conservatoire National des Arts et Métiers.

17 Novembre 2021

le cnam

1 Parcours Scientifique

2 Etudes locales Navier-Stokes
- Pression d'Arrières-Corps
- Mélange et Jets propulsifs

3 La LBM : relaxation locale et hybridation
- La LBM en bef
- Analyse de stabilité
- Relaxations locales
- Comparaison et couplage

4 Interfaces et Mélanges complexes
- Interface à gradient de densité
- LBM Multi-espèces

5 Perspectives

1 Parcours Scientifique

2 Etudes locales Navier-Stokes
- Pression d'Arrières-Corps
- Mélange et Jets propulsifs

3 La LBM : relaxation locale et hybridation
- La LBM en bef
- Analyse de stabilité
- Relaxations locales
- Comparaison et couplage

4 Interfaces et Mélanges complexes
- Interface à gradient de densité
- LBM Multi-espèces

5 Perspectives

Parcours Scientifique

2004 : DEA Aéroacoustique à Poitiers (ENSIP)

Parcours Scientifique

2004 : DEA Aéroacoustique à Poitiers (ENSIP)

2005-2008 : Thèse à l'institut Jean le Rond d'Alembert
avec Pierre SAGAUT et Denis RICOT (Renault)

Parcours Scientifique

2004 : DEA Aéroacoustique à Poitiers (ENSIP)

2005-2008 : Thèse à l'institut Jean le Rond d'Alembert
avec Pierre SAGAUT et Denis RICOT (Renault)

2008 : Post-Doc ONERA avec Sébastien DECK

Parcours Scientifique

2004 : DEA Aéroacoustique à Poitiers (ENSIP)

2005-2008 : Thèse à l'institut Jean le Rond d'Alembert
avec Pierre SAGAUT et Denis RICOT (Renault)

2008 : Post-Doc ONERA avec Sébastien DECK

2009-2011 : Post-Doc CNES avec Hadrien LAMBARÉ

Parcours Scientifique

2004 : DEA Aéroacoustique à Poitiers (ENSIP)

2005-2008 : Thèse à l'institut Jean le Rond d'Alembert
avec Pierre SAGAUT et Denis RICOT (Renault)

2008 : Post-Doc ONERA avec Sébastien DECK

2009-2011 : Post-Doc CNES avec Hadrien LAMBARÉ

2011 : Poste McF au CNAM.

Parcours Scientifique

2004 : DEA Aéroacoustique à Poitiers (ENSIP)

2005-2008 : Thèse à l'institut Jean le Rond d'Alembert
avec Pierre SAGAUT et Denis RICOT (Renault)

2008 : Post-Doc ONERA avec Sébastien DECK

2009-2011 : Post-Doc CNES avec Hadrien LAMBARÉ

2011 : Poste McF au CNAM.

2011-2015 : Dynamique de Mélange multi-espèces supersonique

Parcours Scientifique

2004 : DEA Aéroacoustique à Poitiers (ENSIP)

2005-2008 : Thèse à l'institut Jean le Rond d'Alembert
avec Pierre SAGAUT et Denis RICOT (Renault)

2008 : Post-Doc ONERA avec Sébastien DECK

2009-2011 : Post-Doc CNES avec Hadrien LAMBARÉ

2011 : Poste McF au CNAM.

2011-2015 : Dynamique de Mélange multi-espèces supersonique

2015-Present : LBM et Mélange multi-espèces bas Reynolds

Enseignements

- ✓ Début à Mécavenir avec *V.BELONCLE*
- ✓ Passage à Paris 6 avec *J.HOEPFFNER*
- ✓ Enseignements au CNAM en Cours du Soir
- ✓ Diplôme d'Ingénieur Aéronautique et Espace en alternance.
- ✓ Formations « Spatial et Aéronautique »en Cours du soir.
- ✓ Groupe de Travail JupyterHUB très actif au CNAM !

le cnam

-- Cours/Projet - AERO-I3 --

Mécanique Spatiale

- La rentrée Atmosphérique -

Trajectoires et paramètres importants

simon.marie@lecnam.net

Entrée [2]:
```
import numpy as np
import scipy

import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt

#Option pour afficher les figures dans le notebook et eviter le plt.show():
%matplotlib inline
plt.rc('xtick',labelsize=14)
plt.rc('ytick',labelsize=14)
```

Entrée [3]:
```
# Constante célestes:
G=6.67408e-11 # Constante de gravitation -
Rt=6380000 # Rayon terrestre - m
Ms=1.9884e30 # Masse du soleil - kg
Mt=5.9722e24 # Masse de la terre - kg
```

Présentation

L'objectif de cette séance est d'étudier la trajectoire de rentrée atmosphérique d'un corps issue d'une orbite initiale connue.

La rentrée atmosphérique peut être annalysée suivant trois phases distinctes:

1. La manoeuvre de désorbitation visant à quitter l'orbite initiale.
2. La partie de la trajectoire visant à rejoindre les premières couches de l'atmosphère ($z \sim$ 120km). (Arc orbitale)
3. La partie purement atmosphérique souvent dimensionnante pour la mission (Arc atmosphérique). Nous distinguerons l'entrée sans portance dite balistique de l'entrée avec portance dite pilotée.

Lors de cette séance, nous ferons de nombreuses hypothèses simplificatrices pour faciliter les calculs:

- Orbites coplanaires (2D)
- Vitesse de rotation des corps célestes non prise en compte.
- Coefficients de trainée et de portance indépendant du Mach (Valide en hypersonique mais faux en supersonique).

Ces hypothèses sont celles faites dans la théorie de la rentrée atmosphérique des travaux de Allen et Eggers et permettent néanmoins de conserver les phénomènes importants intervenant dans les trajectoires de rentrée.

Enfin, il ne sera pas question dans cette séance d'étudier en détail les écoulements hypersoniques mis en jeux lors d'une rentrée atmosphérique et faisant intervenir des effets importants de dissociation moléculaire et de ionisation dues aux très fortes températures atteintes. Nous considérerons ici le flux thermique de façon simplifié comme présenté dans la théorie de Allen et Eggers:

$$\varphi = C_q \sqrt{\rho} u^3$$

1 Parcours Scientifique

2 Etudes locales Navier-Stokes
- Pression d'Arrières-Corps
- Mélange et Jets propulsifs

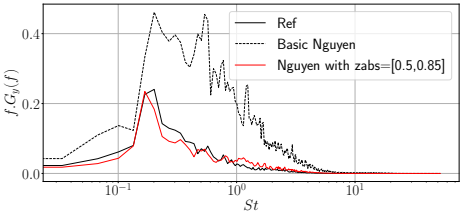
3 La LBM : relaxation locale et hybridation
- La LBM en bef
- Analyse de stabilité
- Relaxations locales
- Comparaison et couplage

4 Interfaces et Mélanges complexes
- Interface à gradient de densité
- LBM Multi-espèces

5 Perspectives

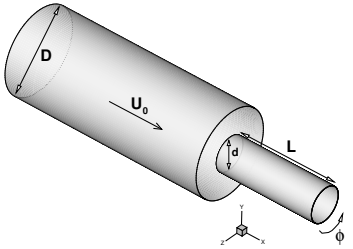
$$F(t) = \int_0^{2\pi} \int_0^{L} p(x,\phi,t) r(x) n dx \; d\phi$$

$$\overline{p}(\phi,t) = \sum_{k=1}^{\infty} [a_k(t) cos(k\phi) + b_k(t) sin(k\phi)]$$



Géométrie simplifiée :

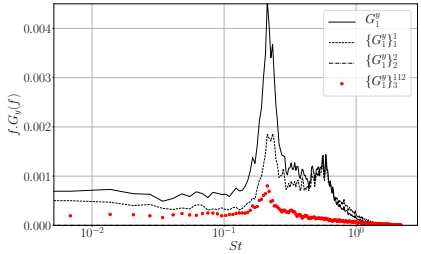
1. Calculs ZDES (Thèse P-E. Weiss)
2. Mise en évidence d'une zone cohérente.
3. Reconstruction optimale des efforts basée sur Fourier. [1]
4. Validation expérimentale (DEPRÈS-2005 et MÉLIGA-2009)



1. S. Marié, S. Deck et P-E. Weiss (2010). « From pressure fluctuations to dynamic loads on axisymmetric step flows with minimal number of kulites ». In : *Computers and Fluids* 39-5, p. 747-755

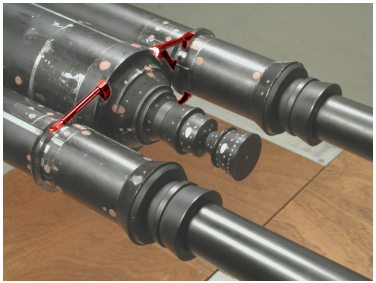
$$F(t) = \sum_{i=1}^{N_c} p_i(t) dS_i$$

$$p(\mathbf{X}, t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k(t) \phi_k(\mathbf{X}),$$



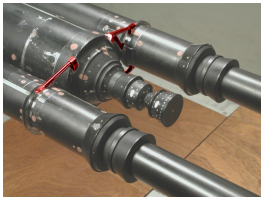
Géométrie réelle :

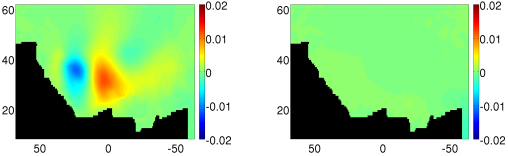
- ✓ Campagne Expérimentale au NLR
- ✓ Décomposition POD du champ de pression.
- ✓ Les deux premiers modes sont des modes azimutaux [2]



2. S. Marié et al. (2013). « Experimental analysis of the pressure-velocity correlations of external unsteady flow over rocket launchers ». In : *Aerospace Science and Technology* 30-1, p. 83-93

Mesure PIV du champ de vitesse
(*F.Scarano TU-Delft*)

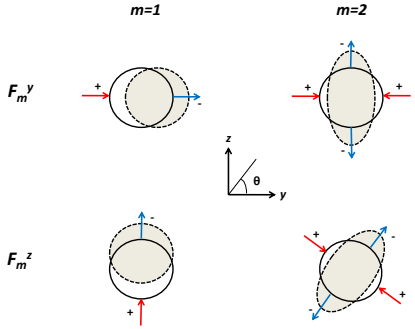




Corrélations $F_2^z U_z$

Effet des Attaches Arrières

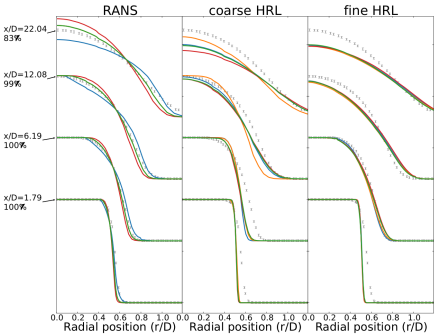
- ✓ Création de mode $m = 2$
- ✓ Confirmation numérique puis expérimentale.
- ✓ Revisité par les approches ZIBC [3]



3. Pierre-Élie Weiss et Sébastien Deck (nov. 2018). « On the coupling of a zonal body-fitted/immersed boundary method with ZDES : Application to the interactions on a realistic space launcher afterbody flow ». In : 176, p. 338-352

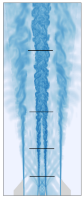
Effets des jets propulsifs sur les écoulements d'arrières-corps.

Thèse de Lorris Charrier : Hybridation des modèles RANS multi-espèces.



Fraction massique de l'hélium à différentes positions du jet.

Les symboles représentent les données expérimentales.



Blue : $Sc_T = 0.5$
Yellow : $Sc_T = 1.0$
Red : $Sc_T = 1.5$
Green : variable Sc_T

Implémentation dans FLUSEPA

- ✓ Contexte Ariane 6 avec Arrière-corps caréné
- ✓ Transport des variances de concentration.
- ✓ Implémentation du Schmidt turbulent variable
- ✓ Hybridation du modèle de Xiao [4]
- ✓ Validation sur le cas du jet de Cutler
- ✓ Peu d'impacts de l'hybridation sur ce cas.

4. Lorris Charrier et al. (août 2021). « Simulations of reactive supersonic/subsonic flow interactions for space launcher applications ». In : *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow* 31.10

1 Parcours Scientifique

2 Etudes locales Navier-Stokes
- Pression d'Arrières-Corps
- Mélange et Jets propulsifs

3 La LBM : relaxation locale et hybridation
- La LBM en bef
- Analyse de stabilité
- Relaxations locales
- Comparaison et couplage

4 Interfaces et Mélanges complexes
- Interface à gradient de densité
- LBM Multi-espèces

5 Perspectives

Equation de Boltzmann (1872)

$$\frac{\partial f}{\partial t} + c_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \frac{F_i}{m}\frac{\partial f}{\partial c_i} = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{coll}$$

$f(\mathrm{x}, \mathrm{c}, t)$ Densité de probabilité qu'une particule de vitesse c soit en (x_1, x_2, x_3) au temps t.

Les quantités macroscopiques ρ,ρU, ρe sont obtenues par les moments :

$$\int (.) d\mathrm{c}, \quad \int c(.) d\mathrm{c}, \quad \int c^2(.) d\mathrm{c}$$

En 1954, P.,L. Bhatnagar, E.P. Gross et M. Krook formalisent une version à relaxation :

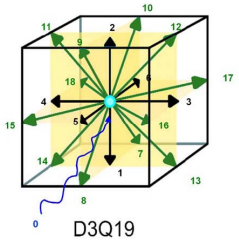
$$\frac{\partial f}{\partial t} + c_i \frac{\partial f}{\partial x_i} = -\frac{1}{\tau}[f - f^{eq}] \quad \Longleftrightarrow \quad \mathcal{NS} + \mathcal{O}(\varepsilon^2)$$

Pour résoudre numériquement une physique donnée, il faut choisir un équilibre statistique (en hydrodynamique Maxwell-Boltzmann) :

$$f^{eq}(\mathrm{x},\mathrm{c},t) = \rho\left(\frac{m}{2\pi k_B T}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{m}{2k_B T}(\mathrm{c}-\mathrm{u})^2\right] \tag{1}$$

Et un réseau discret de vitesses qui conserve les moments :

$$\int f dc = \sum_\alpha f_\alpha, \quad \int \mathrm{c} f dc = \sum_\alpha \mathrm{c}_\alpha f_\alpha$$



D3Q19

La discrétisation des vitesses se fait en assurant l'égalité des moments continus et discrets :

- ✓ Le nombre de vitesses détermine le nombre de moments conservés.
- ✓ Les premiers réseaux compacts conservent les 2 premiers moments. (ρ et ρu). Le moment d'ordre 3 (ρe) possède un terme d'erreur en $\mathcal{O}(Ma^3)$.
- ✓ Les réseaux compacts sont donc isothermes et faiblement compressibles.
- ✓ Un dévelopement asymptotique (type Chapmann-Enskog) permet d'établir :

$$\sum_{\alpha} c_{\alpha,i} c_{\alpha,j} g_{\alpha}^{heq} = -2\rho\nu S_{ij}$$

Lattice Boltzmann Method

Lattice Boltzmann algorithm :

$$g_\alpha^{coll}(x,t) = g_\alpha^{eq}(x,t) + \left(1 - \frac{1}{\tau_g}\right) g_\alpha^{heq}(x,t)$$

MPI communication

$$g_\alpha(x,t) = g_\alpha^{coll}(x - c_\alpha \Delta t, t - \Delta t)$$

Conditions aux limites

$\rho = \sum_\alpha g_\alpha$ et $\rho u = \sum_\alpha c_\alpha g_\alpha$

$g_\alpha^{eq}(x,t)$ et $g_\alpha^{heq}(x,t)$ mis à jour

Décomposition polynomiale de l'équilibre :

$$g_\alpha^{eq}(x,t) = \omega(c_\alpha) \sum_{k=0}^{N} \frac{1}{k!} \mathcal{H}_\alpha^{(k)}(c_\alpha) : a^{eq,(k)}$$

$$g_\alpha^{heq}(x,t) = \omega(c_\alpha) \sum_{k=0}^{N} \frac{1}{k!} \mathcal{H}_\alpha^{(k)}(c_\alpha) : a^{heq,(k)}$$

Vitesses Discrètes

- ✓ 1964 Premiers réseaux de vitesses par J. Broadwell puis R. Gatignol. (75)

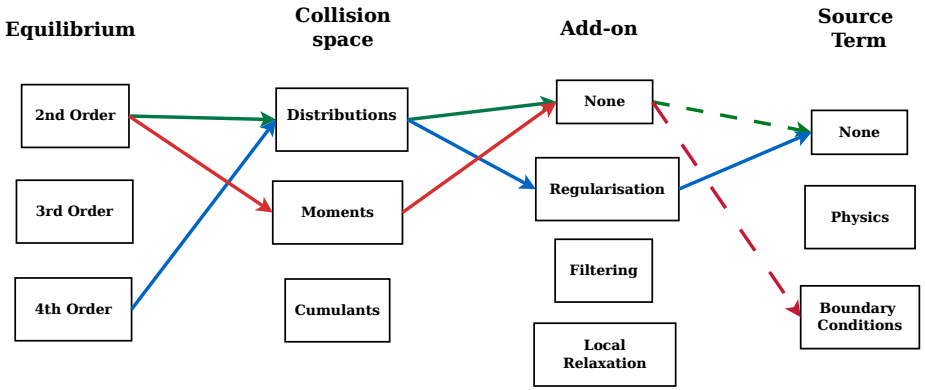
Gaz sur Réseaux

- ✓ 1973 Réseau HPP (Hardy, Pomeau, Pazzis) gaz sur réseau (automates cellulaires)
- ✓ 1986 Synthèse des automates cellulaires par S.Wolfram.
- ✓ 1988 Premiers réseaux à distributions réelles par McNamara & Zanetti.

Boltzmann sur Réseau

- ✓ 1992 D'Humière et Qian proposent le modèle D2Q9.
- ✓ 2002 MRT 3D (d'Humière et al.)
- ✓ 2003 Modèle Entropique (Ansumali & Karlin)
- ✓ 2006 Modèle Régularisé (Latt & Chopard)
- ✓ 2013 Modèle à vitesses relatives (Février,Graille, Dubois)
- ✓ 2015 Approche régularisée récursive (Malaspinas), Cumulant Model (Geier)
- ✓ 2018 HRR (Jacob)

LBM Scheme Architecture

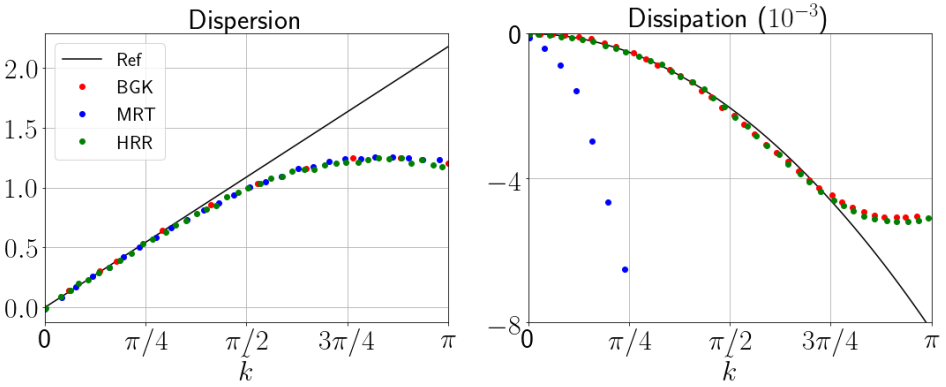


Analyse de stabilité du schéma

Linéarisation de la fonction d'équilibre : $f^{eq}(f_\alpha^{(0)} + f'_\alpha) = f_\alpha^{eq,(0)} + \frac{\partial f_\alpha^{eq}}{\partial f_\beta}\Big|_{f_\beta = f_\beta^{(0)}} f'_\alpha + o(f'^2_\alpha)$

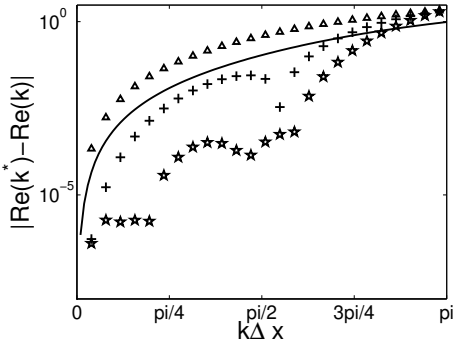
Problème aux valeurs propres :

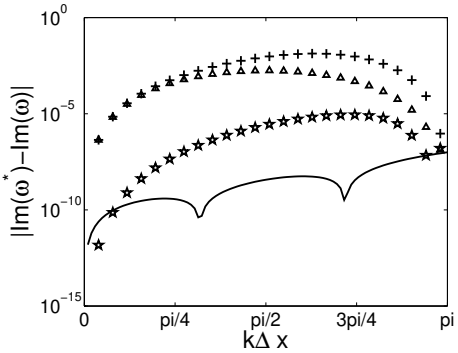
$$\omega \mathbf{f}' = \mathbf{M}^{\mathrm{LBM}} \mathbf{f}'$$



Comparaison aux schémas Navier-Stokes [5] :

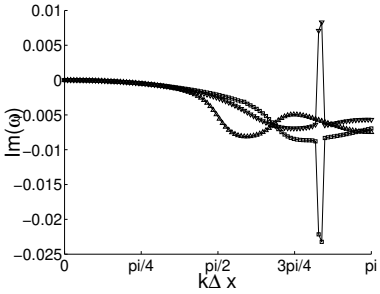
Espace	Temps	Mach	Mode Acoustique
Ordre 2	3-pas	0.2	△
DRP	3-pas	0.2	+
Ordre 6 optimisé	6-pas opt.	0.2	⋆





5. S. Marié, D. Ricot et P. Sagaut (2009). « Comparison between lattice Boltzmann method and Navier-Stokes high order schemes for computational aeroacoustic ». In : *Journal of Computational Physics* 228-4, p. 1056-1070

- ✓ Faible dissipation intrinsèque de LBM-BGK.
- ✓ Nature compressible du schéma : chaque perturbation se propage de façon isotrope sans être dissipée.
- ✓ Couplage des modes physique et des modes parasites à l'origine des instabilités. [6] (Wissocq JCP 2019).
- ✓ Beaucoup de solutions existent pour stabiliser mais au détriment des ondes acoustiques.
- ✓ Application d'un filtrage explicite due à la nature haute fréquence des instabilités.
- ✓ Besoin d'ordre élevé pour rester « passe bas »



6. D. Ricot, S. Marié et P. Sagaut (2009). « Lattice Boltzmann Method with selective viscosity filter ». In : *Journal of Computational Physics* 228-12, p. 4478-4490

Filtrage Adaptatif[7] :

Le rôle du filtre passe-bas est double :

1. Supprimer les oscillations hautes fréquences.
2. Apporter la dissipation numérique nécessaire à la stabilisation.
3. Filtrage local là ou le cisaillement est important.

Dépendance de l'amplitude du filtre σ au cisaillement local : $\sigma_a(x) = \sigma_0 \xi(|S|)$

$$\xi(|S|) = \left(1 - e^{-(|S(x)|/S_0)^2}\right)^2$$

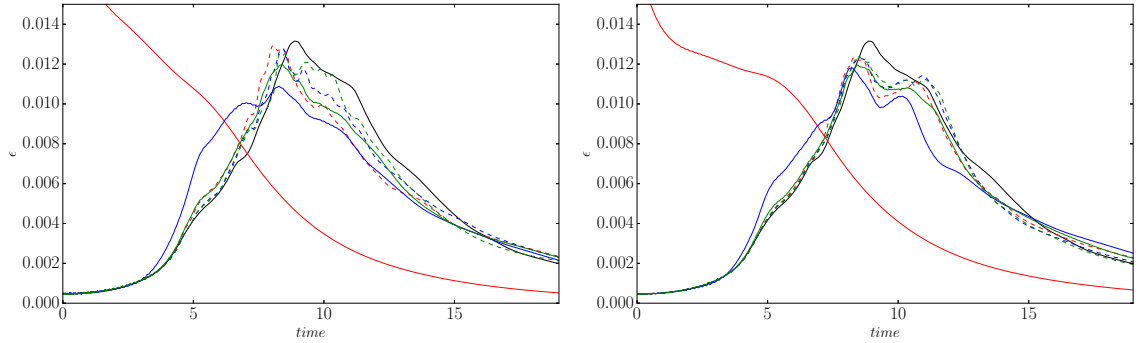
S_0 : seuil à déterminer.

7. S. Marié et X. Gloerfelt (2017). « Adaptive filtering for the lattice Boltzmann method. ». In : *Journal of Computational Physics* 333C, p. 212-226

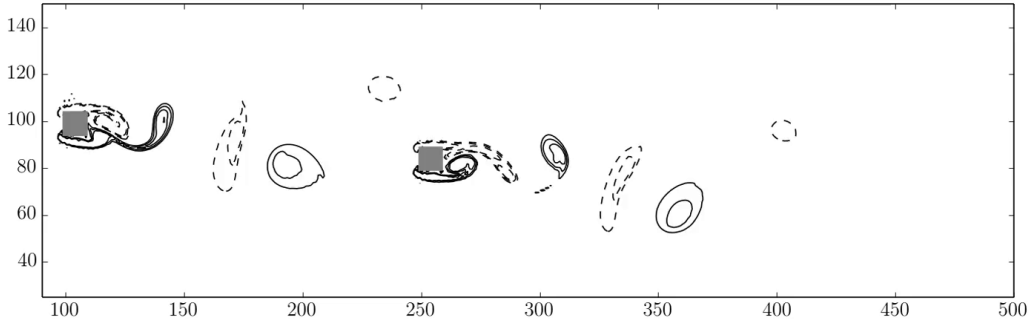
Seuil S0 :

En imposant $g_\alpha > 0$ et $\sum_\alpha c_{\alpha,i} c_{\alpha,j} g_\alpha^{eq} = \rho u_i u_j$ on peut estimer $S_{max} \sim \frac{U_0}{\delta} Re_\delta$

Validation sur Taylor-Green Vortex

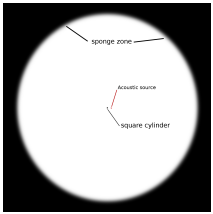


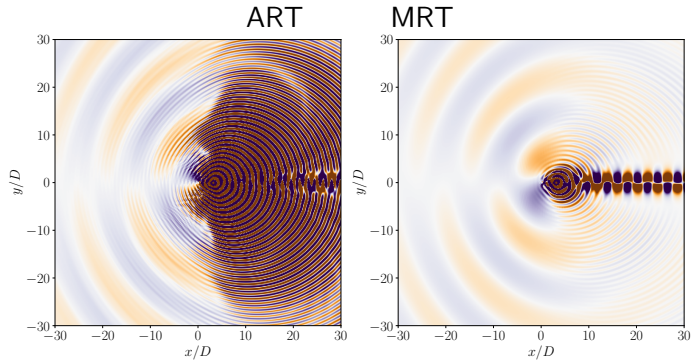
Détection du cisaillement :



Temps de relaxations adaptatifs

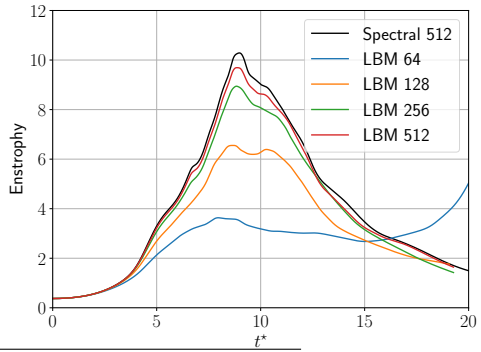
- ✓ MRT avec les capacités acoustiques du BGK si $|\mathcal{S}| \to 0$
- ✓ $S' = diag\left(0, s'_e, s'_\epsilon, 0, s'_q, 0, s'_q, s_\nu, s_\nu\right)$
- ✓ $s' = s + (1-\xi)(s_\nu - s)$



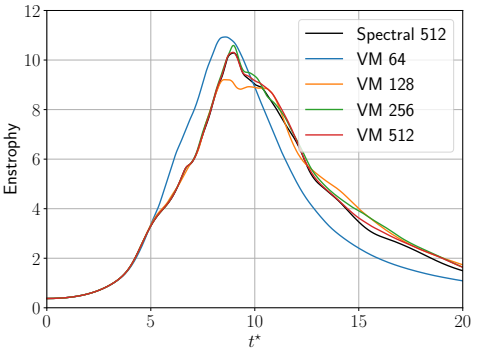


Comparaison avec les méthodes semi-lagrangiennes [8]

- ✓ LBM-MRT
- ✓ Plus rapide pour la même dissipation



- ✓ Méthodes Vortex a noyau de remaillage
- ✓ Plus stable pour les faibles résolutions



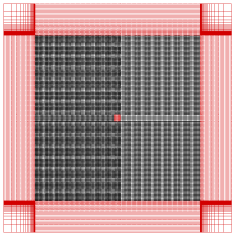
8. Chloé Mimeau, Simon Marié et Iraj Mortazavi (2021). « A comparison of semi-Lagrangian Vortex method and Lattice Boltzmann method for incompressible flows ». In : *Computers & Fluids* 224, p. 104946.

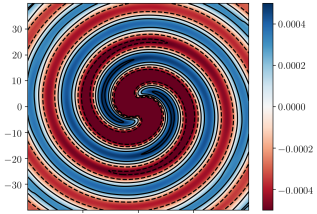
Couplage avec un solveur Navier-Stokes

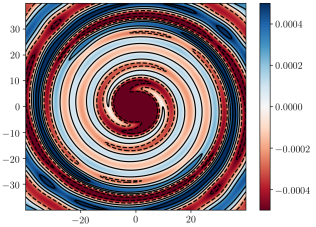
- ✓ Thèse ONERA d'Alexandre SUSS 2020-2023
- ✓ Utiliser les solveurs NS en proche paroi

- ✓ HRR corrigé aux interfaces NS/LBM
- ✓ Interpolations temporelles
- ✓ Thermo corrigée pour passage NS->LBM

Test sur des tourbillons corotatifs :







1 Parcours Scientifique

2 Etudes locales Navier-Stokes
- Pression d'Arrières-Corps
- Mélange et Jets propulsifs

3 La LBM : relaxation locale et hybridation
- La LBM en bef
- Analyse de stabilité
- Relaxations locales
- Comparaison et couplage

4 Interfaces et Mélanges complexes
- Interface à gradient de densité
- LBM Multi-espèces

5 Perspectives

He-Chen-Zhang model

Introduction d'une loi d'état en découplant pression thermo et pression hydro.

Moments :

$$\begin{aligned} \phi &= \sum_\alpha f_\alpha \\ p_h &= \sum_\alpha g_\alpha - \frac{1}{2}\mathrm{u}.\nabla\psi(\rho) \\ \rho RT\mathrm{u} &= \sum_\alpha \mathrm{c}_\alpha g_\alpha + \frac{RT}{2}(\mathrm{F_s}+\mathrm{G}) \end{aligned}$$

Thermodynamics :

$$\begin{aligned} \psi(\rho) &= p_h - \rho RT \\ \psi(\phi) &= p_{th} - \phi RT \end{aligned}$$

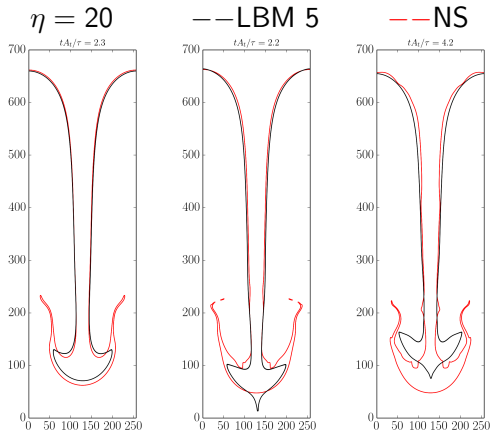
Equation d'état : Carnahan-Starling

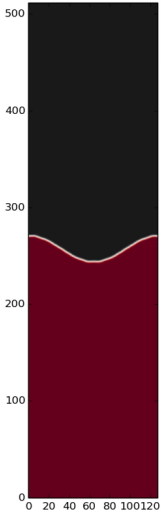
$$p_{th} = \phi RT \frac{1+\phi+\phi^2-\phi^3}{(1-\phi)^3} - a\phi^2$$

Défauts de stabilité dans les zones à fort gradient de densité => Utilisation du filtrage adaptatif basé sur $\nabla\psi(\rho)$.

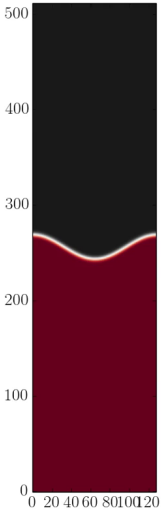
Rayleigh-Taylor Instability $A_t = 0.9$

Comparaison aux résultats Navier-Stokes 2nd ordre TVD + Limiteur SuperBee (V.Daru)

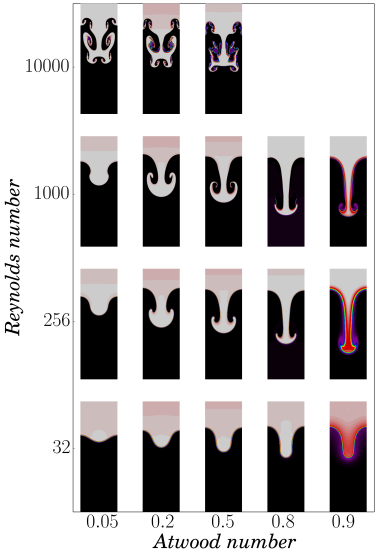



500
400
300
200
100
0
0 20 40 60 80 100120

$A_t = 0.5$


500
400
300
200
100
0
0 20 40 60 80100120

$A_t = 0.9$


10000
1000
256
32
Reynolds number
0.05
0.2
0.5
0.8
0.9
Atwood number

- ✓ Thèse de Lucien Vienne soutenue en 2019.
- ✓ Etude des mélanges dilués
- ✓ 1 distribution par espèce.
- ✓ Introduction d'un terme de forçage indépendant de l'opérateur de collision.

Multicomponent LBM :

$$f_\alpha^m(\mathrm{x}+\mathrm{e}_\alpha\delta_t, t+\delta_t) = f_\alpha^m(\mathrm{x},t) - \frac{1}{\tau_m}\left[f_\alpha^m(\mathrm{x},t) - f_\alpha^{m(eq)}(\mathrm{x},t)\right] + S_\alpha^m(\mathrm{x},t)$$

Forcing term :

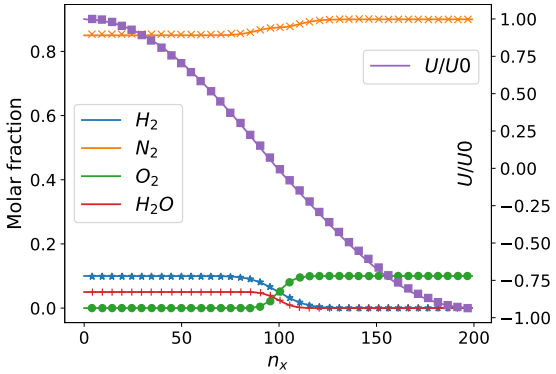
$$S_\alpha^m = (1-\tfrac{\delta_t}{2\tau_m})\omega_\alpha\left[\tfrac{\mathrm{e}_\alpha-\mathrm{u}_m}{c_s^2} + \tfrac{(\mathrm{e}_\alpha\cdot\mathrm{u}_m)\mathrm{e}_\alpha}{c_s^4}\right]\cdot\mathcal{F}_m$$

Diffusion term : Kerkhof & Geboers

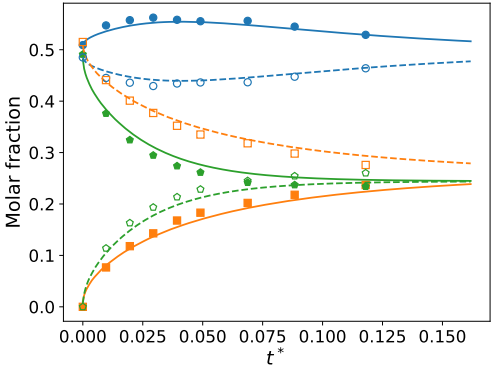
$$\mathcal{F}_m = -p\sum_{n=1}^{N}\frac{x_m x_n}{\mathcal{D}_{mn}}(\mathrm{u}_m - \mathrm{u}_n)$$

Validation numérique. [9]

Jets opposés



Tube de Loschmidt



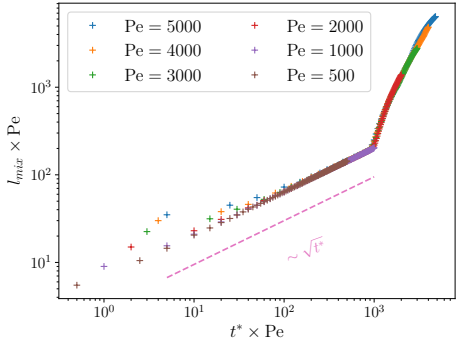
9. L. Vienne, S. Marié et F. Grasso (2019). « Lattice Boltzmann model for miscible gases : a forcing term approach ». In : *Physical Review E* 100 (2), p. 023309

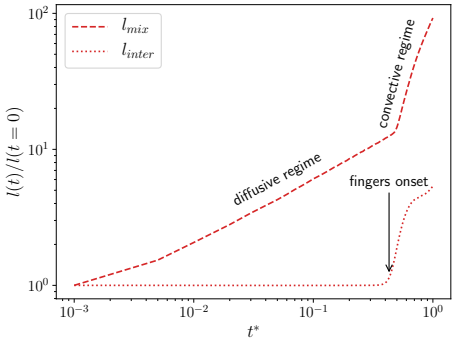
Application à l'instabilité de Saffman-Taylor

- ✓ Mélange moins visqueux se déplace dans un mélange plus visqueux
- ✓ Apparition de franges instables
- ✓ Croissance diffusive puis convective
- ✓ Instabilité à 2 et 3 espèces

Milieu poreux

$$\mathcal{F}_{porous,m} = -\frac{\mu_m}{K}\mathrm{u}_m$$



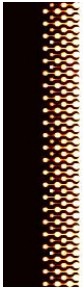


Application à l'instabilité de Saffman-Taylor

Milieu poreux implicite (Gray Lattice Boltzmann - *I.Ginzburg*).

Application à l'instabilité de Saffman-Taylor

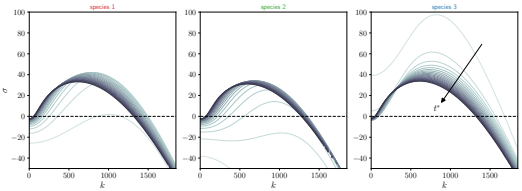
Perspective : Etude de l'instabilité à l'échelle du pore « Pore-Scale ».



Application à l'instabilité de Saffman-Taylor

Instabilité à 3 espèces [10]

Molar fractions	Fluid 1	Fluid 2
x_1 (R)	0.1	0.45
x_2 (G)	0.45	0.1
x_3 (B)	0.45	0.45
RGB color		



Mise en évidence de 3 principales étapes :

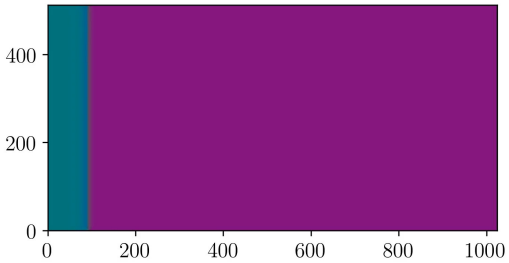
1. Rétro-diffusion => transfert de fluide moins visqueux dans le premier mélange,
2. Régime diffusif lié à la nouvelle viscosité du premier mélange,
3. Régime convectif => forte croissance des franges instables.

10. L. Vienne et S. Marié (2021). « A Lattice Boltzmann study of miscible viscous fingering for binary and ternary mixtures ». In : *Physical Review F* 6 (5), p. 053904

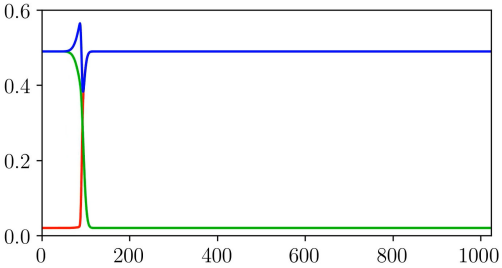
Application à l'instabilité de Saffman-Taylor

Instabilité à 3 espèces

Domaine



Fractions massiques



1 Parcours Scientifique

2 Etudes locales Navier-Stokes
- Pression d'Arrières-Corps
- Mélange et Jets propulsifs

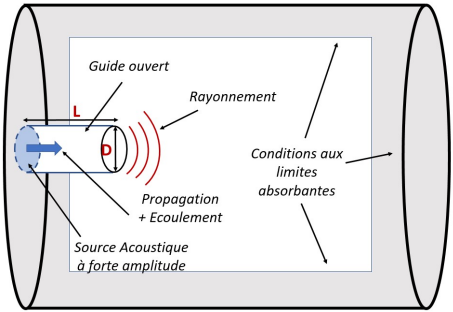
3 La LBM : relaxation locale et hybridation
- La LBM en bef
- Analyse de stabilité
- Relaxations locales
- Comparaison et couplage

4 Interfaces et Mélanges complexes
- Interface à gradient de densité
- LBM Multi-espèces

5 Perspectives

Acoustique non linéaire

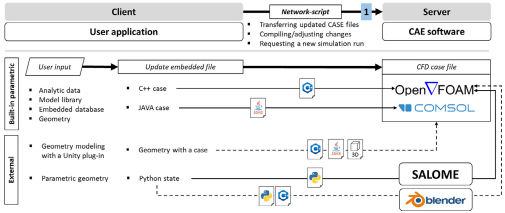
- ✓ Effet des fluctuations acoustiques de forte amplitude
- ✓ Stabilité du schéma et effets thermodynamiques
- ✓ Couplage thermique ou hybridation dissipative
- ✓ Effets géométriques locaux sur le rayonnement acoustique.
- ✓ Application au rayonnement des guides d'ondes (instruments à vent.)
- ✓ Collaboration en cours avec JB DOC du LMSSC.

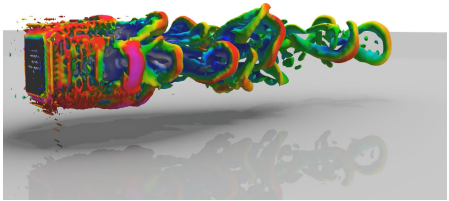


Domaine de Calcul 3D

Application au rendu temps réel

- ✓ Tirer profit de la LBM pour du rendu rapide
- ✓ Utiliser un noyau LBM simple pour du calcul CFD
- ✓ Couplage avec des moteurs de rendu graphiques
- ✓ Utilisation dans un cadre pédagogique immersif [11]

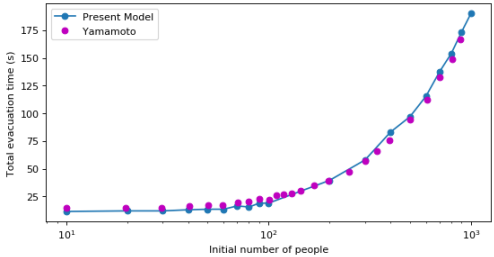




11. Serkan Solmaz et Tom Van Gerven (jan. 2022). « Interactive CFD simulations with virtual reality to support learning in mixing ». In : 156, p. 107570

Etude de la dynamique de foule

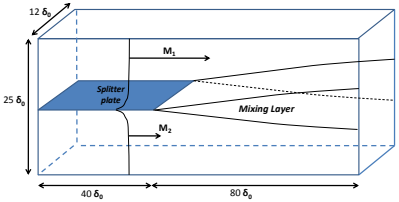
- ✓ Stage Master de C.Pruvot 2020
- ✓ Etudier les mouvements de foules à partir d'automates cellulaires.
- ✓ Reproduction des résultats de Yamamoto [12]
- ✓ Identifier et intégrer des quantités mésoscopiques.
- ✓ Identifier un opérateur de collision approprié par identification des systèmes dynamiques.
- ✓ Etendre les simulations aux foules multi-agents.

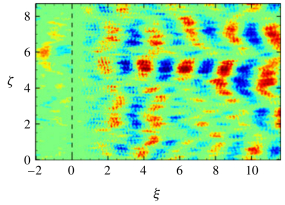
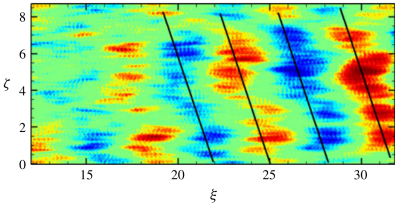
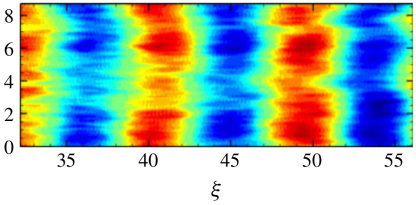


12. Kazuhiro Yamamoto, Satoshi Kokubo et Katsuhiro Nishinari (2007). « Simulation for pedestrian dynamics by real-coded cellular automata (RCA) ». In : *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications* 379.2, p. 654 -660

Merci de votre attent*ion*

DNS d'une couche de mélange supersonique



$s = \rho_2/\rho_1$	M_1, M_2	T_1^{inf}, T_2^{inf} (K)	$Re_{\tau 1}, Re_{\tau 2}$
1.56	1.91,1.37	337,216	557,877

Transition d'une dynamique de couche limite à une dynamique de couche de mélange. DNS de l'expé de Goebel & Dutton (1991). Collaboration avec la Sapienza (S.Pirozzoli, M.Bernardini).