

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Couches de mélange turbulentes issues de l'instabilité de Rayleigh-Taylor

Nicolas Schneider
Directeur de thèse : Serge Gauthier

**CEA, DAM, DIF,
F-91297 Arpajon
France**

www.cea.fr

GDR TURBULENCE – JUIN 2015 - GRENOBLE

- Introduction
 - Rayleigh-Taylor : contexte
 - Définition de l'état initial

- Modèles physiques pour l'instabilité de Rayleigh-Taylor
 - Développements asymptotiques
 - Domaines de validité

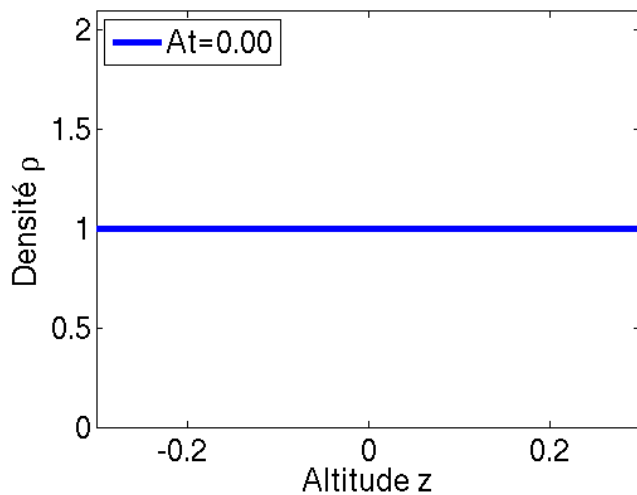
- Caractéristiques du code de simulation numérique

- Simulation Boussinesq
 - Turbulence, anisotropie

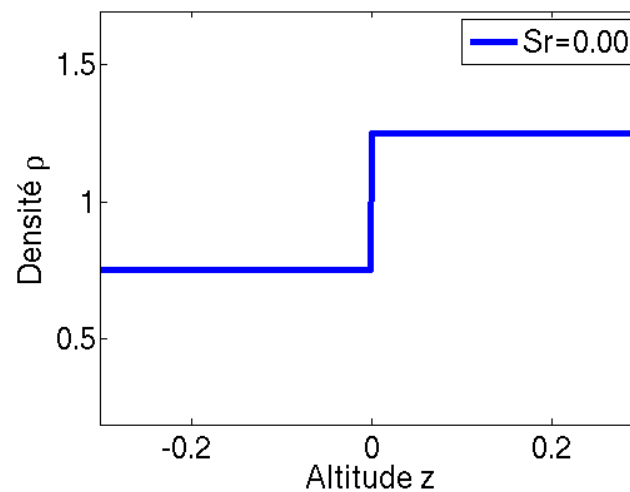
- Simulation anélastique : comparaison rapide avec le Boussinesq

- Conclusion

- Etude concentrée sur un système idéal. Accélération considérée constante et géométrie cartésienne. Périodicité (x,y), gravité selon z.
- Deux paramètres principaux définissent l'état initial de l'instabilité.
 - Sr, mesure la stratification. $0 \leq Sr < \infty$
 - At, nombre d'Atwood. $0 < At < 1$



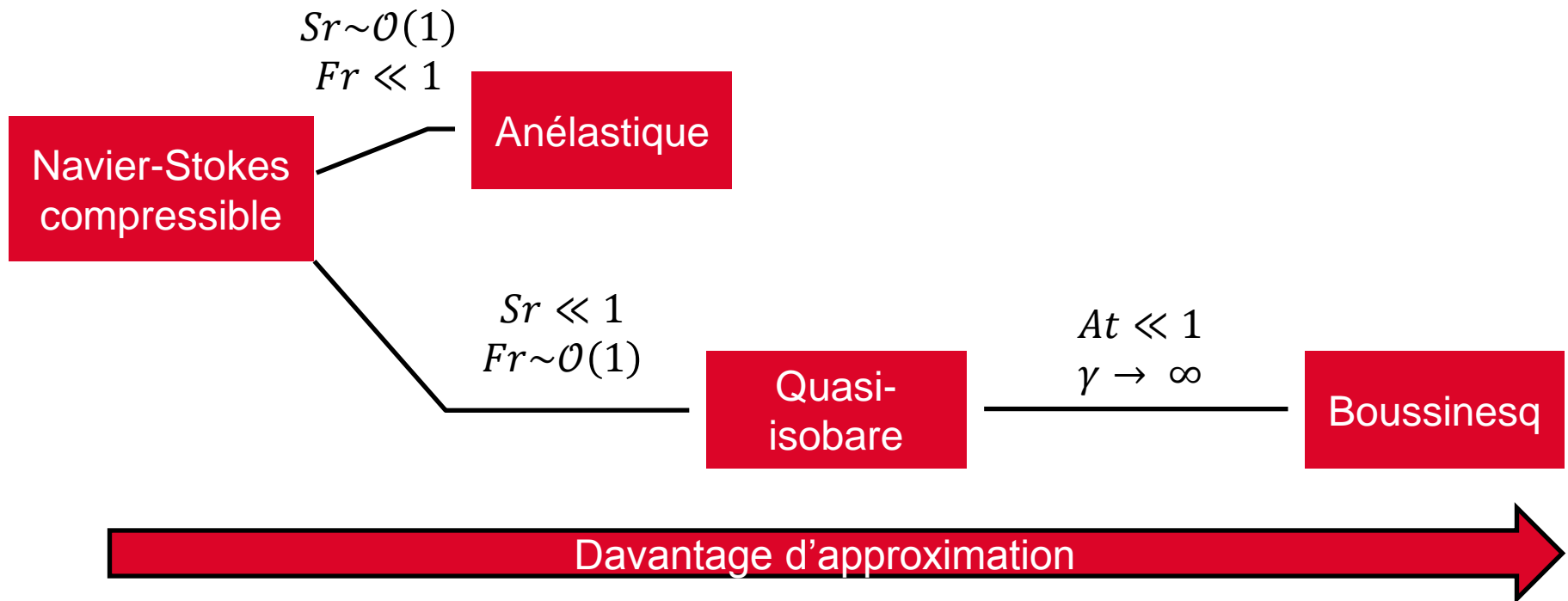
Sr = 0 fixé



At = 0.25 fixé

- Décomposition des grandeurs :
 - $\rho = \rho^{(0)}(z) + \gamma M^2 \rho^{(1)}(x, y, z, t)$
(de même pour T, c, u, p)
 - $\gamma M^2 \ll 1$.

NS and Gauthier, 2015



- Phénomènes de compressibilité peuvent être séparés en deux catégories :
 - Statique. Stratification des fluides sous l'effet de la gravité. Mesuré par Sr
 - Dynamique. Compression des fluides sous l'effet du mouvement. Acoustique, équations d'état et d'énergie.

- Equations de NS compressibles contiennent les 3 modes de Kovásnay :
 - Vorticité,
 - Entropie,
 - Acoustique.

Modèles	Compressibilité		Modes de Kovásnay		
	Statique	Dynamique	Vorticité	Entropie	Acoustique
Compressible	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Anélastique	Oui	Partiel	Oui	Oui	Non
Quasi-isobare	Non	Partiel	Oui	Partiel	Non
Boussinesq	Non	Non	Oui	Non	Non

- Hypothèses : $\gamma M^2 \ll 1$; stratification $Sr \sim \mathcal{O}(1)$

- Continuité $\partial_i (\rho^{(0)} u_i^{(0)}) = 0$

- Moment $\rho^{(0)} (\partial_t u_i^{(0)} + u_j^{(0)} \partial_j u_i^{(0)}) = -Sr^{-1} \partial_i p^{(1)} + Re^{-1} \partial_j \sigma_{ij}^{(0)} - \rho^{(1)} \delta_{i3}$

- Concentration $\rho^{(0)} (\partial_t c + u_j^{(0)} \partial_j c) = \frac{1}{Sc Re} \partial_i (\rho^{(0)} \mathcal{D}^* \partial_i c)$

- Energie
$$\begin{aligned} \partial_t \rho^{(0)} e^{(1)} + \partial_i \rho^{(0)} u_i^{(0)} e^{(1)} &= -(\gamma_r - 1) p^{(1)} \partial_i u_i^{(0)} \\ &+ \frac{\gamma_r}{Pr Re} \partial_i (\kappa^* \partial_i T^{(1)}) + (\gamma_r - 1) \frac{Sr}{Re} \sigma_{ij}^{(0)} D_{ij}^{(0)} \\ &+ \frac{\Delta_{H,L}}{Sc Re} \partial_i [T^{(0)} (\rho^{(0)} \mathcal{D}^*) \partial_i c^{(1)}] \end{aligned}$$

- Equation d'état $\frac{p^{(1)}}{p^{(0)}} = \frac{\rho^{(1)}}{\rho^{(0)}} + \frac{T^{(1)}}{T^{(0)}} - \frac{2 At c^{(1)}}{1 + At - 2 At c^{(0)}}$

- + conditions aux limites et conditions initiales.

- Un degré de liberté dans le modèle : état (0). Etat final retenu.

Code de simulation Amenophis

Adaptive Multidomain psEudo-spectral Numerical methOd for the Parallelization of Hydrodynamic Instabilities Simulation

- DNS
- Trois modèles physiques implantés : compressible, anélastique, Boussinesq

- Méthode pseudo-spectrale de type collocation, Chebyshev-Fourier-Fourier.
- La grille verticale est séparée en sous-domaines
 - Tailles et positions ajustées automatiquement en cours de calcul.
 - Nombre de points ajustable manuellement pendant la simulation.

- Schéma temporel : Runge-Kutta
- Résolution itérative
- Découplage vitesse-pression par la méthode d'Uzawa.

- Parallélisation hybride MPI-OpenMP

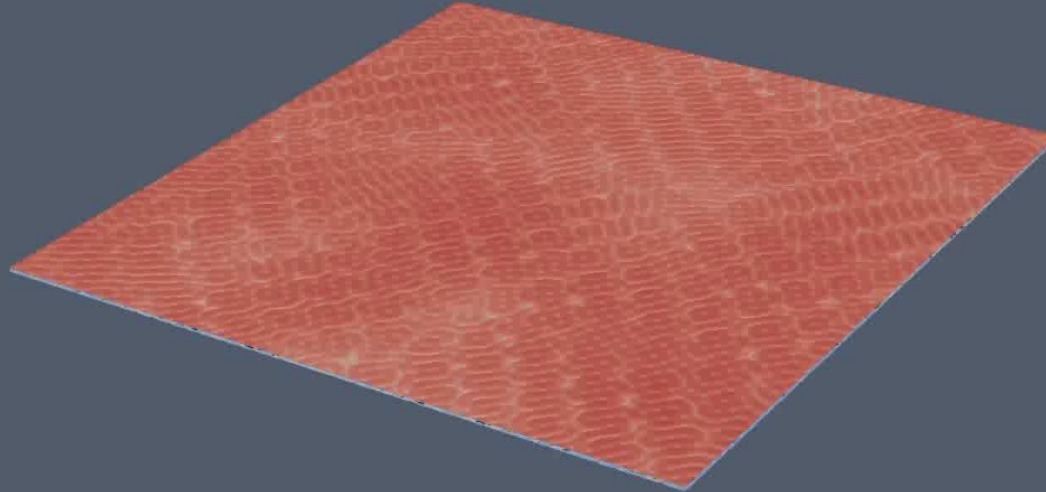
NS. et al, *A spectral anelastic Navier-Stokes solver for a stratified two-miscible-layer system in infinite horizontal channel*, submitted

Modèle	At	Sr	γ	Initialisation	Sc	Pr	Grille	Etude
Boussinesq	0.1	0	∞	$k \in [151; 182]$	0.7	N/A	848 M	Terminée
Anélastique	0.1	0.4	5/3	Idem	Idem	0.7	958 M	En cours
Anélastique	0.5	2	5/3	Idem	Idem	Idem	242 M	A faire
Anélastique	0.5	0.4	5/3	idem	idem	idem	320 M	A faire

- BOTF et ANBO : aussi proches que possible.
 - Mais modèles différents (compressibilité, effets de température)
 - Liquides vs Gaz.

Boussinesq simulation $At=0.1$ Vorticity isosurface colored by concentration

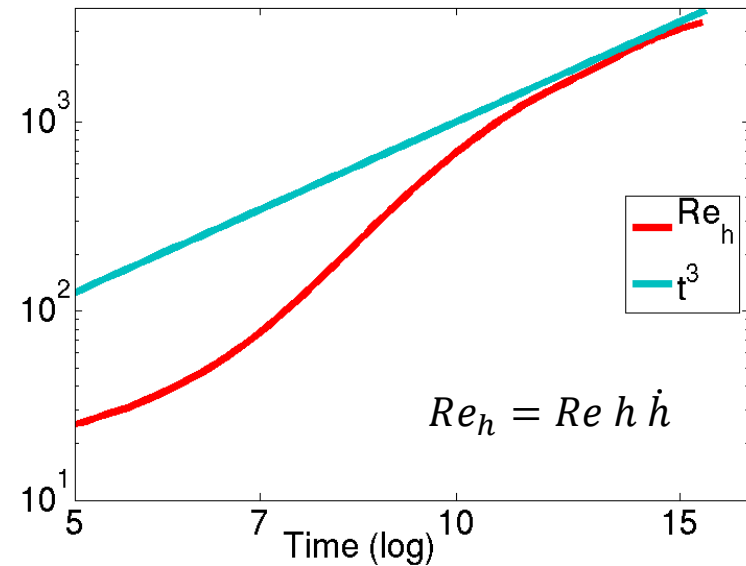
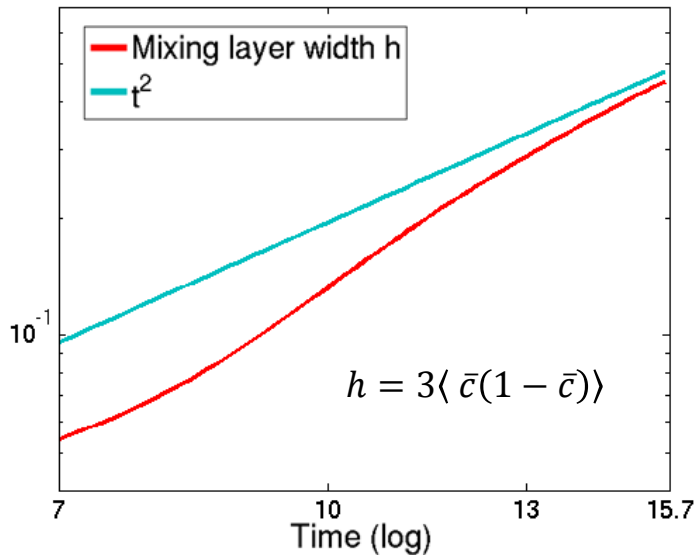
CyberLink PowerDirector Version d'éval



NS and
Gauthier,
*Visualization of
Rayleigh-Taylor
flows from
Boussinesq
approximation to
fully
compressible
Navier-Stokes
model,*
submitted

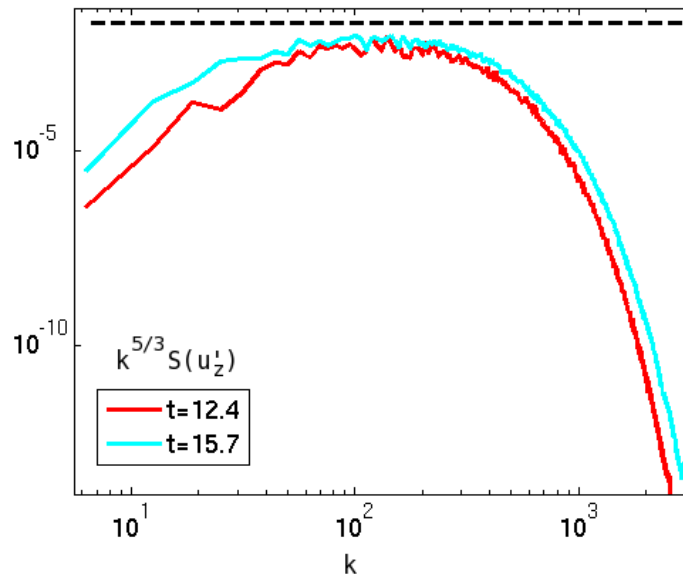
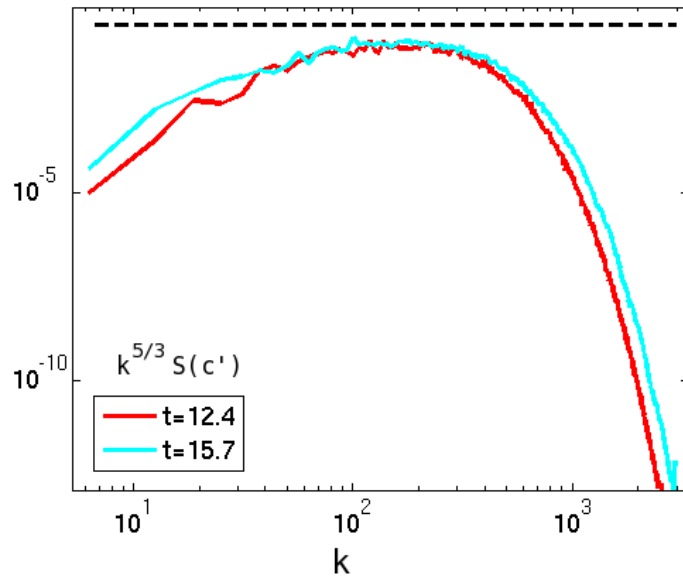
Boussinesq $At=0.1$
Vorticity isosurface colored
by concentration

Schneider & Gauthier

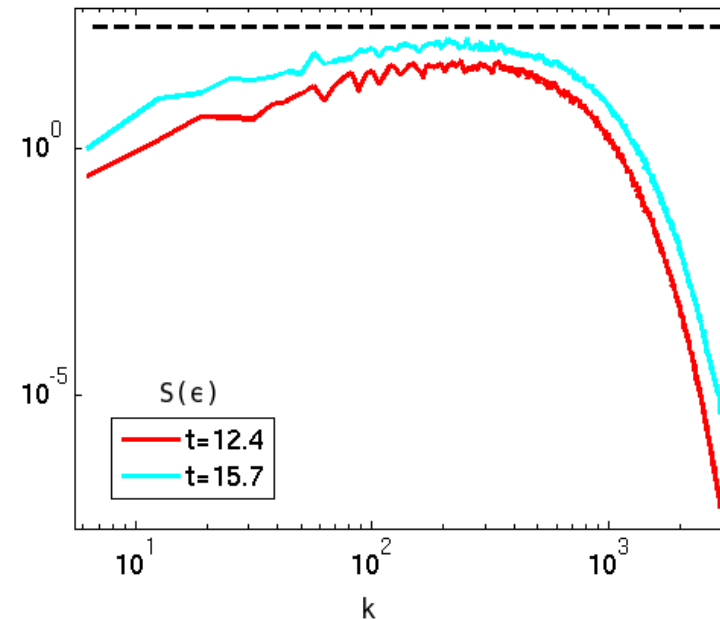


- Loi de croissance auto-similaire $h = \alpha_b A_t g t^2$, on mesure $\alpha = 0.021$.
 - Borne inférieure des valeurs de la littérature (Glimm et al, 2013, Youngs 2013)
- $\bar{c}, \overline{c'^2}^{1/2}, \bar{\epsilon}, \bar{k}$, etc. vérifient une croissance auto-similaire
- Quantités dérivées sont à la limite de la convergence.

Nombre de Reynolds et spectre



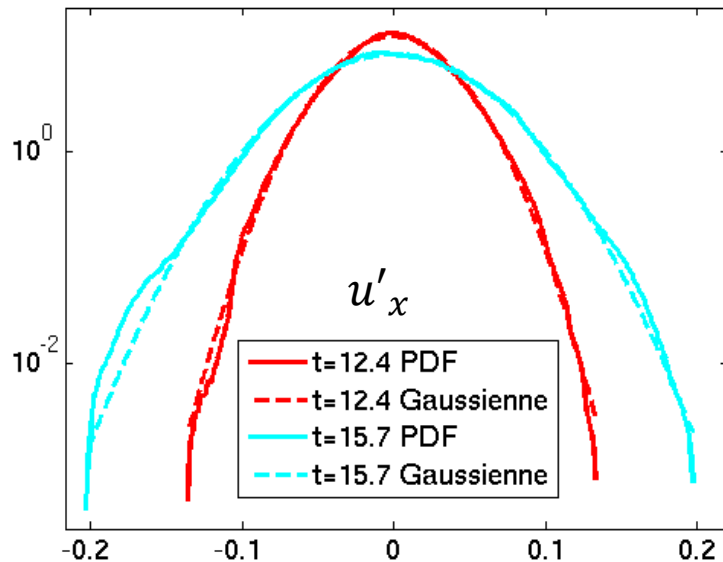
- $Re_{\lambda z} = 142$
- Spectres de c' et u'_z , compensés par $k^{5/3}$.
- Spectre de la dissipation $\epsilon = \nu \overline{\partial_j u'_i \partial_j u'_i}$
- Petite zone inertielle.



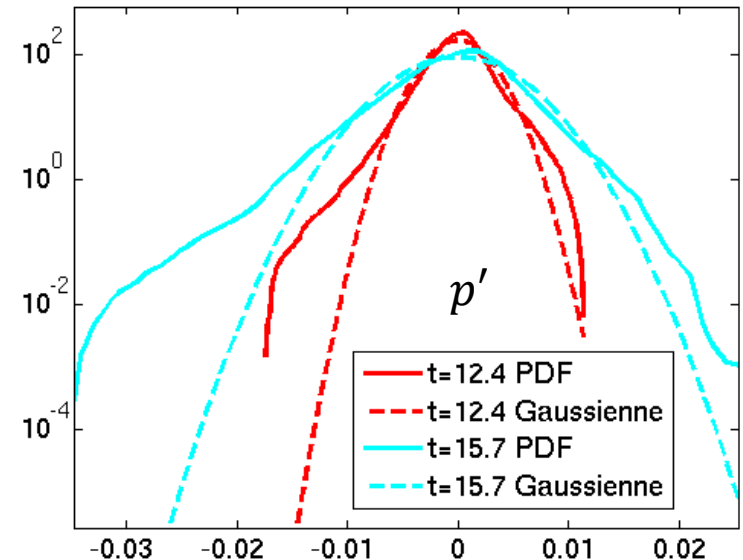
- PDFs : calculées sur $[z_1, z_2]$ tels que $\bar{c}(z_1) = 0.4$ et $\bar{c}(z_2) = 0.6$

Pumir, 1994, POF

- PDFs de u'_x, u'_y et u'_z :
 - Gaussiennes.
 - Absence d'organisation aux grandes échelles.



- PDFs de p' :
 - Gaussienne pour $p' > 0$
 - Exponentielle pour $p' < 0$.
- Comportement observé en THI. Sur-représentation des valeurs négatives révèle une organisation (vortex)

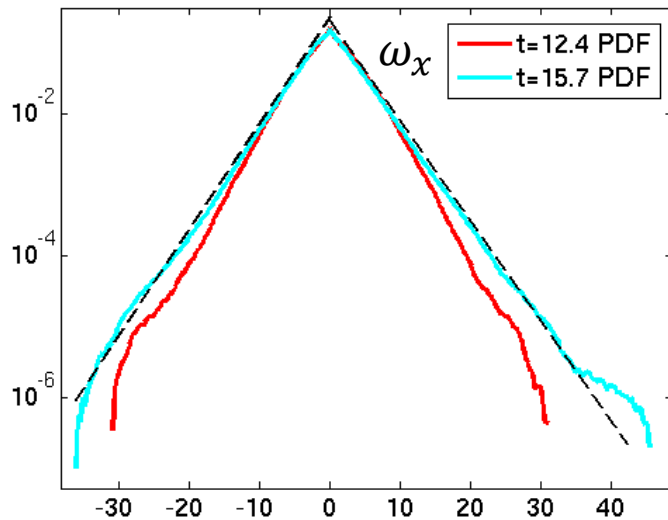


Turbulence : PDFs de vorticité

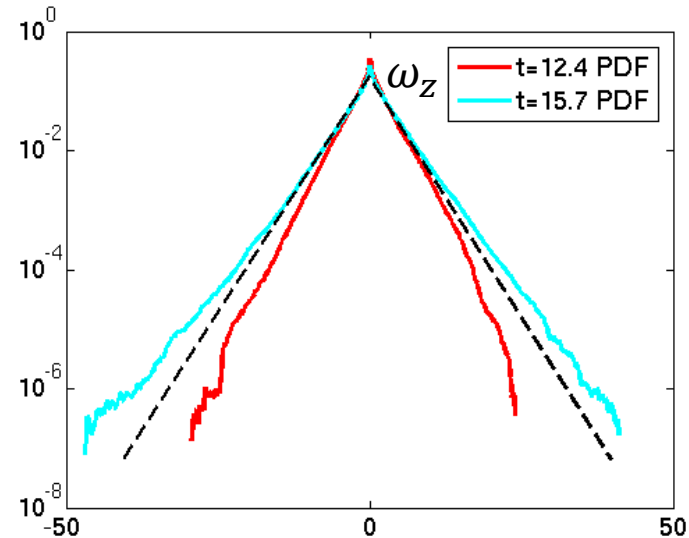
- PDFs : calculées sur $[z_1, z_2]$ tels que $\bar{c}(z_1) = 0.4$ et $\bar{c}(z_2) = 0.6$

Cao et al, 1999, POF

- PDF de ω_x :
 - Exponentielle.



- PDF de ω_z :
 - « Plus » qu'exponentielle.



Vincent and Meneguzzi, 1990, JFM

- PDF exponentielle : sur-représentation des valeurs extrêmes.
 - Signe d'organisation aux échelles intermédiaires et aux petites échelles.
- ω_z : davantage de fortes valeurs que ω_x : lié au forçage et à l'anisotropie.

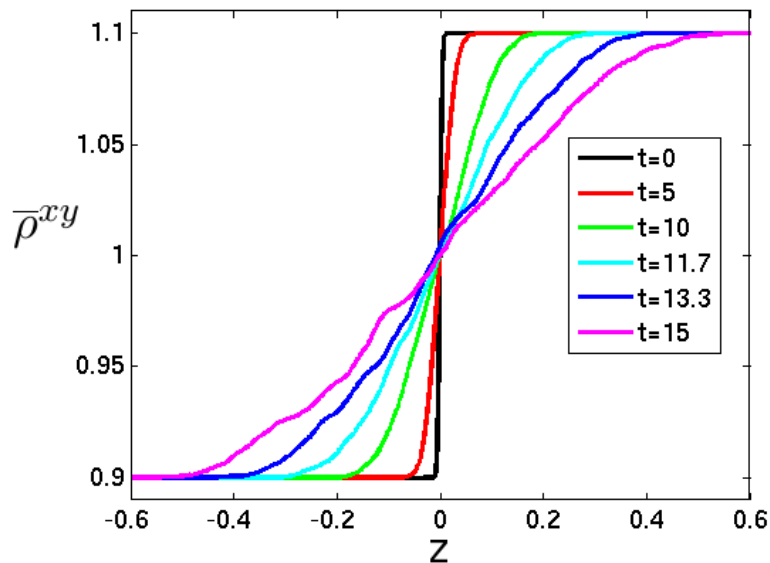
Rayleigh-Taylor à $Sr \neq 0$

Paramètres
des deux
simulations

	At	Sr	γ	Initialisation	Sc	Pr	Grille
Boussinesq	0.1	0	∞	$k \in [151; 182]$	0.7	N/A	848 M
Anélastique	0.1	0.4	5/3	Idem	Idem	0.7	958 M

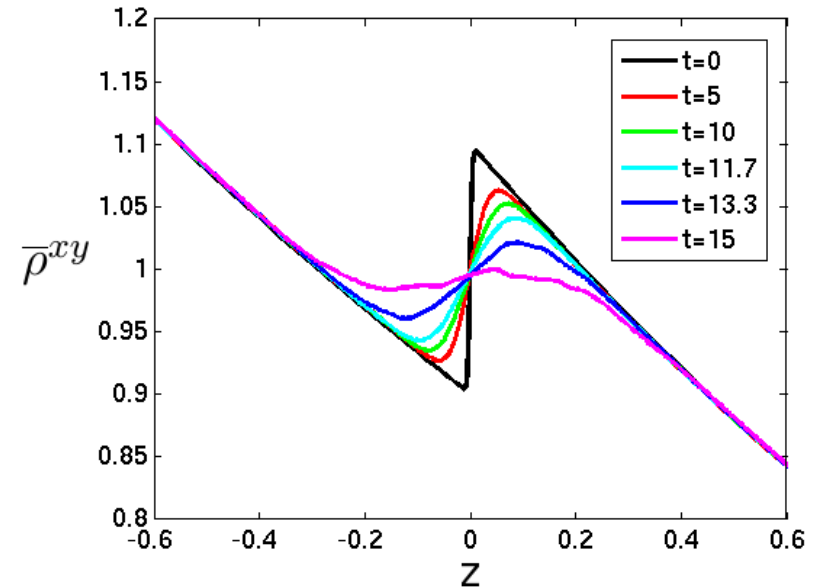
Boussinesq

- Croissance infinie en temps et en espace.



Anélastique

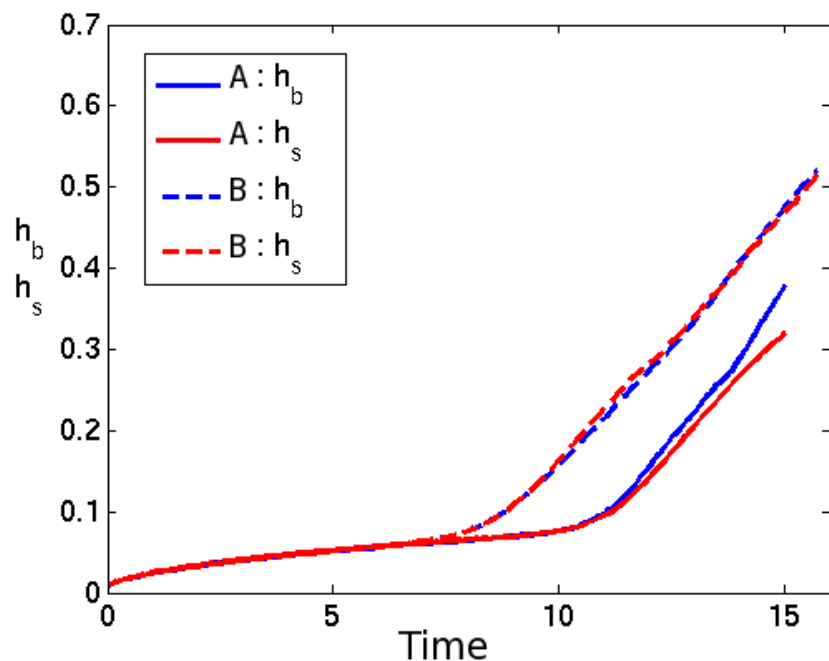
- Chaque fluide est stratifié sous l'effet de la gravité.
- Croissance RT bornée en temps et en espace.



Rayleigh-Taylor à $Sr \neq 0$

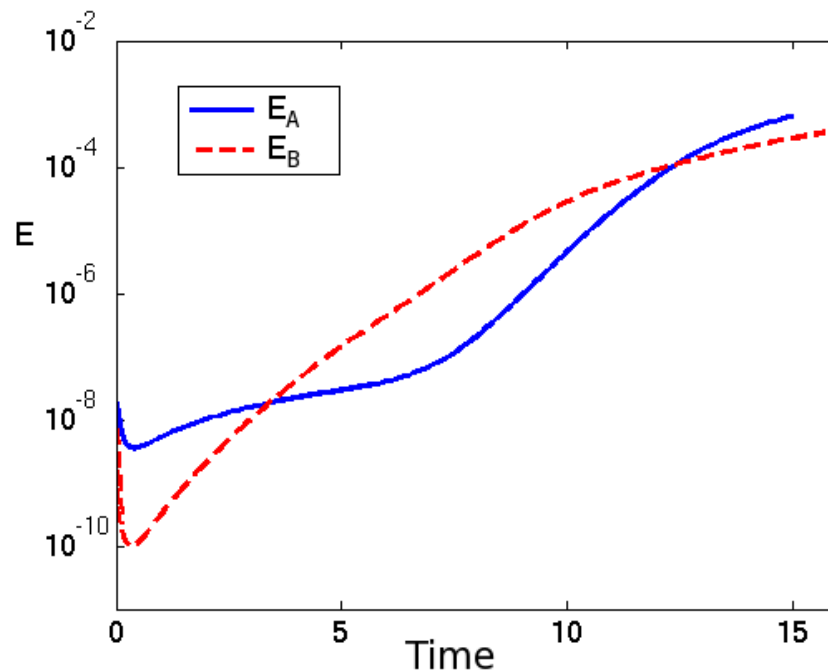
■ h_b : demi-épaisseur supérieure

■ h_s : demi-épaisseur inférieure



■ Energie cinétique Boussinesq : $\frac{1}{2} \overline{u_i u_i}^{xyz}$

■ Energie cinétique anélastique : $\frac{1}{2} \overline{\rho u_i u_i}^{xyz}$



- Décalage temporel sur la croissance
- Dissymétrie bulles-aiguilles (effet de compressibilité) n'apparaît qu'en anélastique

- Rattrapage de l'énergie cinétique anélastique sur le cas Boussinesq.

- Etude de Rayleigh-Taylor : dérivation d'un ensemble de modèles physiques
 - Chacun est adapté à un régime de paramètres Rayleigh-Taylor

- Simulation directe spectrale Boussinesq à 900 millions de points
 - Régime auto-similaire atteint pour plusieurs grandeurs
 - Reynolds Taylor z : 142.

- Quelques points communs de la turbulence Boussinesq RT avec la THI
 - PDF de vorticités, queues exponentielles, ou sur-exponentielles
 - PDF de fluctuations de pression, gaussienne coté positif et exponentielle coté négatif

- Spécificités RT
 - Anisotropie présente aux grandes échelles et aux petites échelles
 - Explication possible : cascade dominante aux échelles intermédiaires -> écoulement isotrope

- Comparaison anélastique-Boussinesq
 - Transition à la turbulence tardive en anélastique
 - Compressibilité mesurable