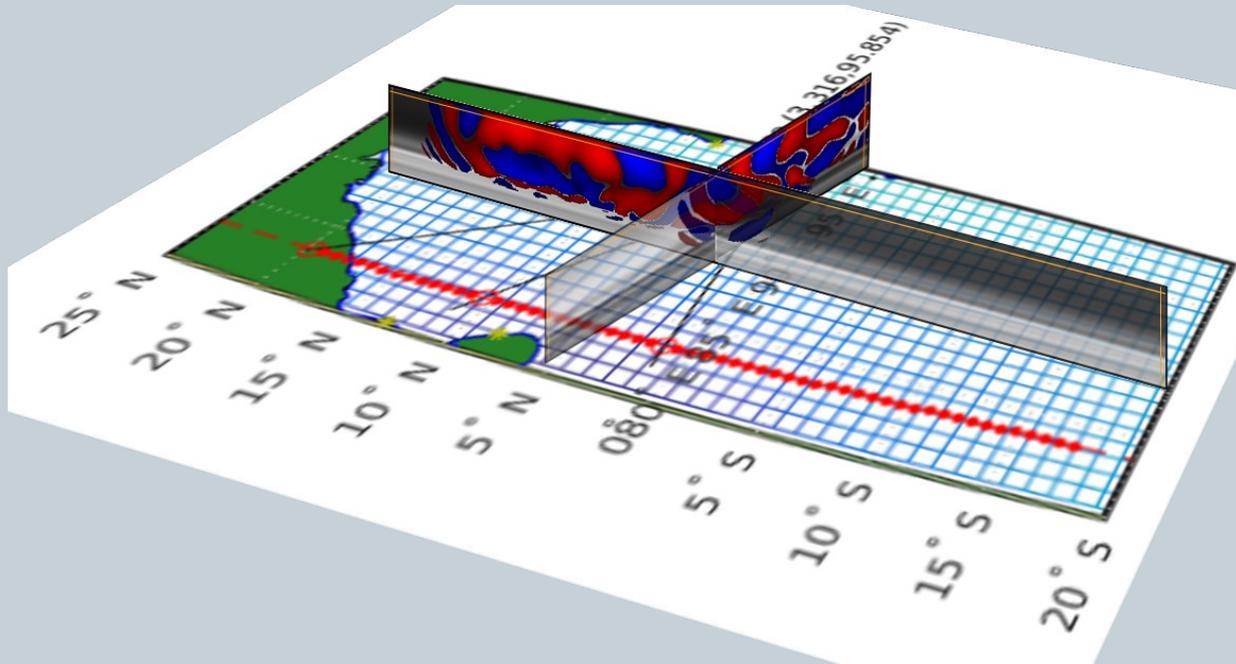


# Modélisation numérique des ondes atmosphériques issues des couplages solide/océan/atmosphère et applications



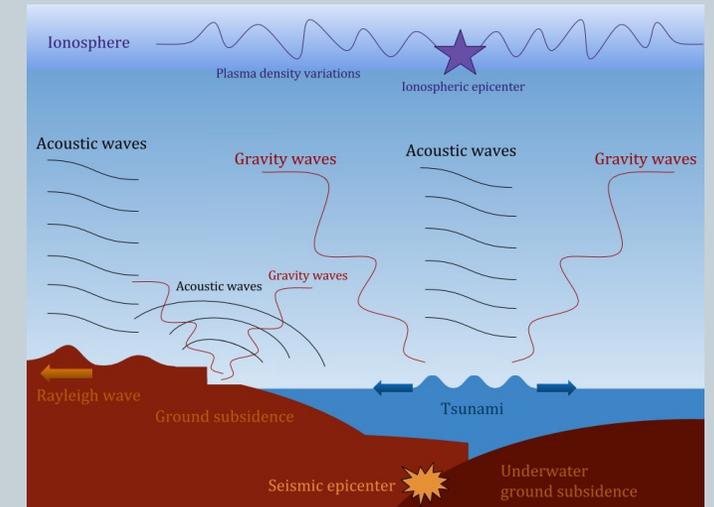
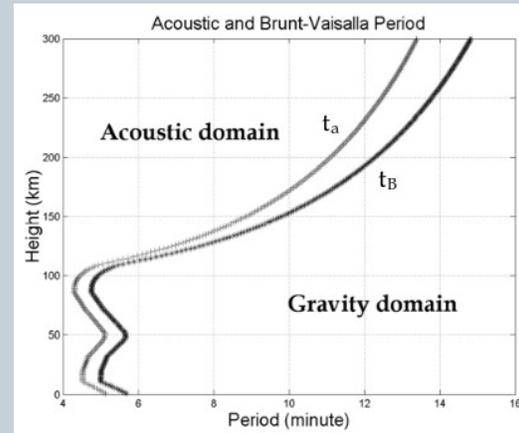
**QUENTIN BRISSAUD**  
*ECOLE DOCTORALE SDU2E - ISAE*  
**RAPHAEL GARCIA - ISAE**  
**ROLAND MARTIN - GET**  
**FINANCEMENT COMUE**  
*(PROJET MISACA)*

# Objectifs scientifiques

2

➤ Tous les évènements **sismiques** se **couplent mécaniquement** avec **l'atmosphère**

➤ Émission d'ondes **acoustiques** et de **gravité**



➤ Propriétés de l'atmosphère :

➤ **Conserv. Énergie** cinétique : ↗ de l'amplitude

➤ Viscosité et relaxation = **filtre passe-bas**

➤ Propagation sur de **longues distances** des ondes **basses fréq.**

**Objectif** : Création d'un **outil de modélisation** des ondes atmosphériques issues de phénomènes tectoniques pour l'**étude** et l'**inversion** des sources et de la dynamique atmosphérique

# Avancement

3

- Création d'un outil en **différences finies** pour la propagation d'**ondes gravito-acoustiques linéaires** (*Brissaud et al., GJI, 2016*)
- Etude de l'**impact d'un météore** à la surface de **Mars** (*Garcia, Brissaud et al., SSR, 2016*)
- Etude de la **propagation d'ondes gravito-acoustiques** liées au **tsunami de Sumatra** en 2004 (*Brissaud et al., en préparation, 2017*)
- Création d'un outil en **éléments spectraux** pour la propagation d'**ondes non-linéaires** gravito-acoustiques et **couplage** avec la Terre et sa **topographie** (*Brissaud et al., GJI, 2017*)

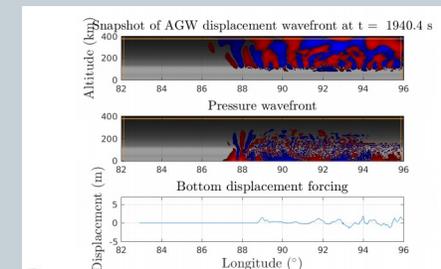
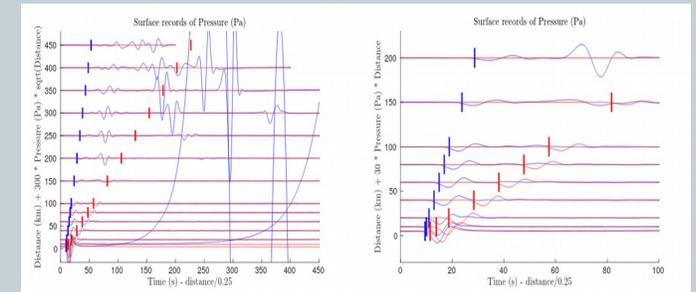
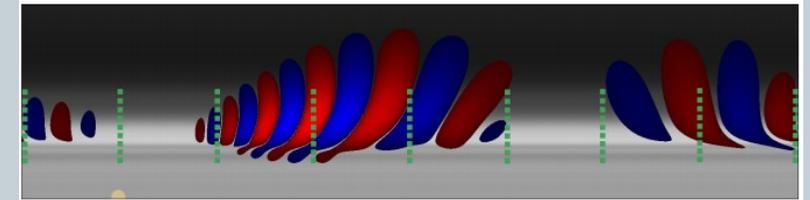
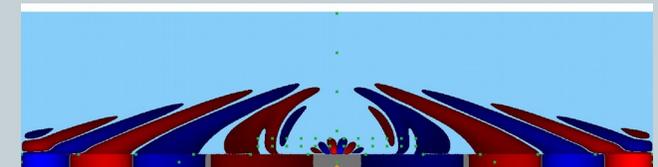


Figure: Displacement (m) and pressure (Pa) wavefronts (top) and ground displacement forcing (bottom) against longitude. Red indicates positive amplitude, blue negative amplitude.



# Avancement

4

- Création d'un outil en **différences finies** pour la propagation d'**ondes gravito-acoustiques linéaires** (*Brissaud et al., GJI, 2016*)
- Etude de l'**impact d'un météore** à la surface de **Mars** (*Garcia, Brissaud et al., SSR, 2016*)
- Etude de la **propagation d'ondes gravito-acoustiques** liées au **tsunami de Sumatra** en 2004 (*Brissaud et al., en préparation, 2017*)
- Création d'un outil en **éléments spectraux** pour la propagation d'**ondes non-linéaires** gravito-acoustiques et **couplage** avec la Terre et sa **topographie** (*Brissaud et al., GJI, 2017*)

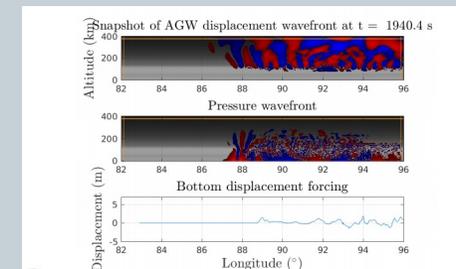
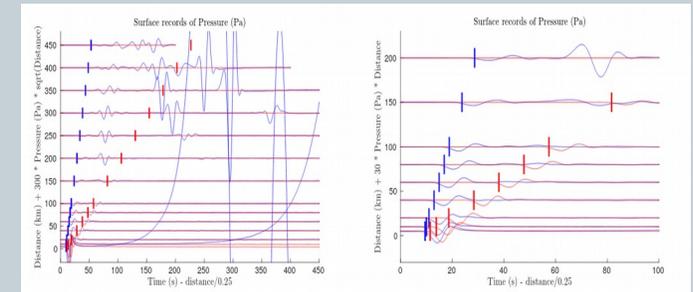
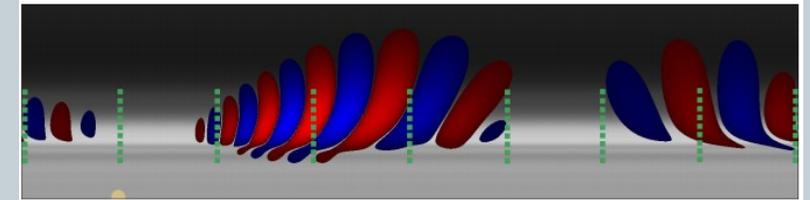
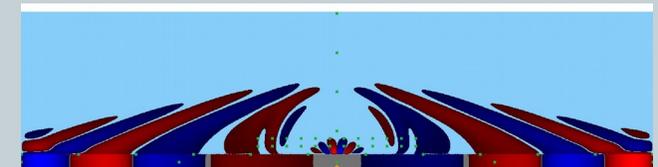


Figure: Displacement (m) and pressure (Pa) wavefronts (top) and ground displacement forcing (bottom) against longitude. Red indicates positive amplitude, blue negative amplitude.



# Interdisciplinarité et difficultés

5

*Roland Martin*

*Raphaël Garcia*

**Mécanique des fluides numérique**

Développement &  
amélioration des  
algorithmes

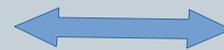
Analyse des  
observations &  
amélioration des  
modèles numériques

DCCE (*méthodes  
numériques, analyse &  
algèbre*)



**Informatique**

*Roland Martin*



**Physique de l'atmosphère**

*Raphaël Garcia*

Étude de phénomènes  
de grande ampleur &  
optimisation des codes

## ➤ **Difficultés**

- **Compréhension** globale des problèmes **physiques** (ex. couplages, non-linéarités)
- **Debugging** & correction des **instabilités numériques** complexes (ex. conditions de bord, vorticité)

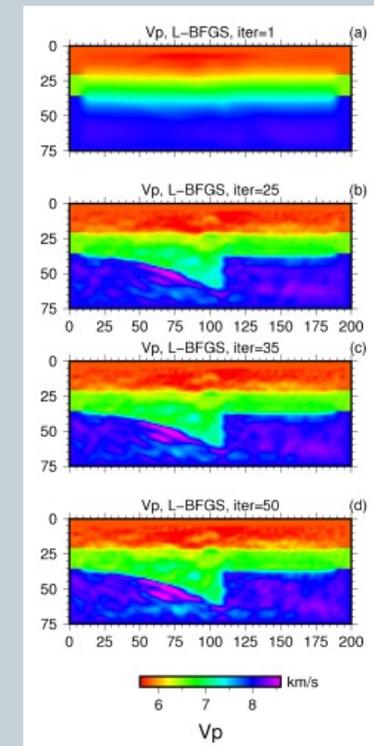
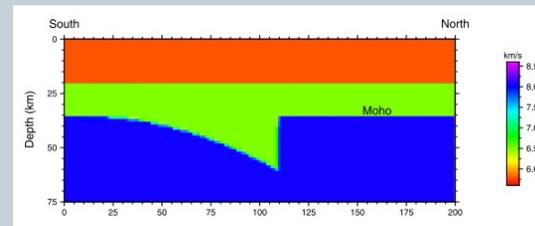
# Perspectives

6

- **Doctorant** : Post-doc à Caltech (USA)
  - Étude des **risques** associés aux phénomènes de **sub-surface** (hétérogénéités locales)
  - l'étude de la **dynamique des ondes atmos.** sur d'autres **planètes** (calibration instruments & traitement des données)
  - **Inversions** de la dynamique atmosphérique pour les ondes basses fréq.
  - ➔ Long-terme: **concours CNRS**
    - Section 18 : Terre et planètes telluriques : structure, histoire, modèles
    - Section 19 : Système Terre : enveloppes superficielles

- **Projet** :
  - **Nouveau doctorant** à l'automne 2017 (Bourse DGA)
  - Passage en **3-D** de l'outil de simulation
  - Gestion des **conditions de bord "réalistes"**
  - Application aux **explosions** dans les atmos. planétaires, couplages océan-atmos.
  - **Inversion** des formes d'ondes gravito-acoustiques

*Modèle à déterminer*



*Modèle initial*

*Itérations méthode adjointe*

Figures extraites de Vadim Monteiller et al., GJI, 2015

# Retour d'expérience des deux encadrants

7

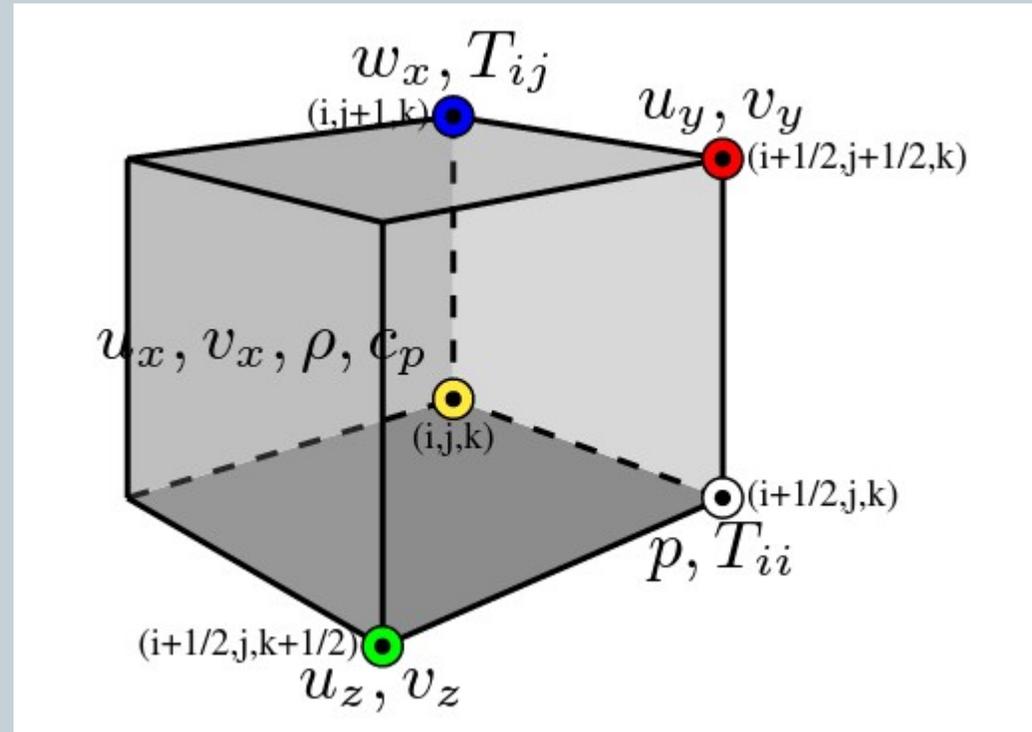
- **Très bonne formation scientifique** et à la recherche du doctorant par le master **GMM - numérique / INSA Toulouse** (directeur: Jérôme Monnier)
- Doctorant de très bon niveau, motivé, très autonome.
- **Complémentarité des encadrants** très bénéfique et pleinement exploitée :
  - R. Martin - GET/OMP - Numérique
  - R.F. Garcia - ISAE-SUPEARO - Physique/ Applications spatiales
- Thèse ouvrant de **nombreuses applications et développements numériques**
- Continuation du projet par une **thèse financée par la DGA**, mais les développements réalisés s'appliqueront également à de futurs projet spatiaux pouvant être la source de financement d'autres thèses:
  - Mission **INSIGHT** vers Mars (lancement 2018, JPL/NASA)
  - Projets de missions vers **Vénus** (Orbiteurs et ballons, collaboration JPL/NASA)
  - Autres projets d'**observation optiques des atmosphères planétaires**

# Backup slides

# Schémas de différences finies

9

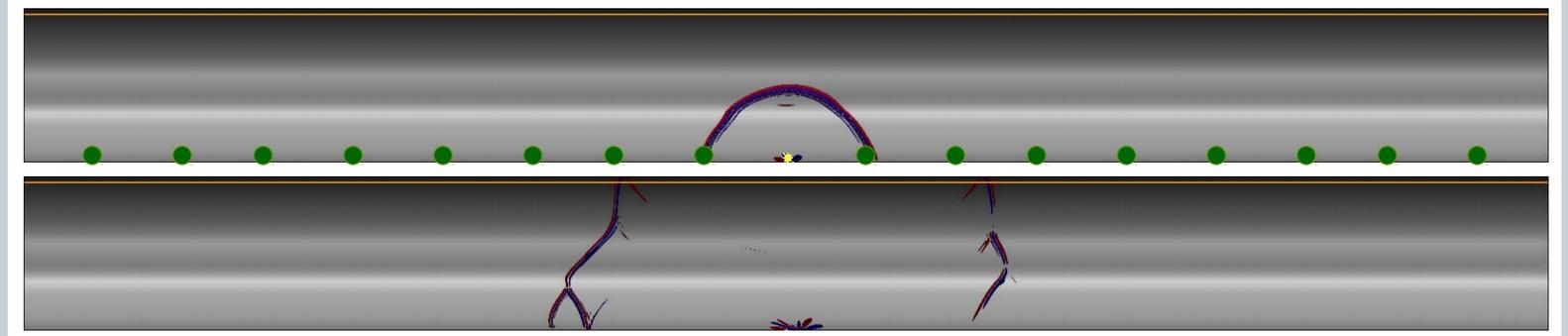
- Schéma en **quinconce** d'ordre 4 pour les **termes de volume**
- Schéma **colloqué** “upwind” d'ordre 4 pour les **termes advectifs**



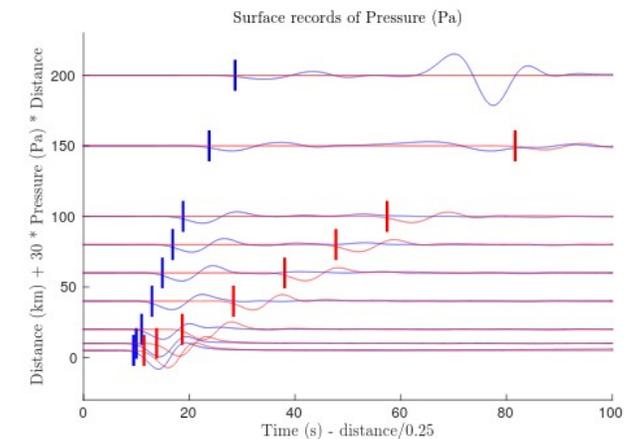
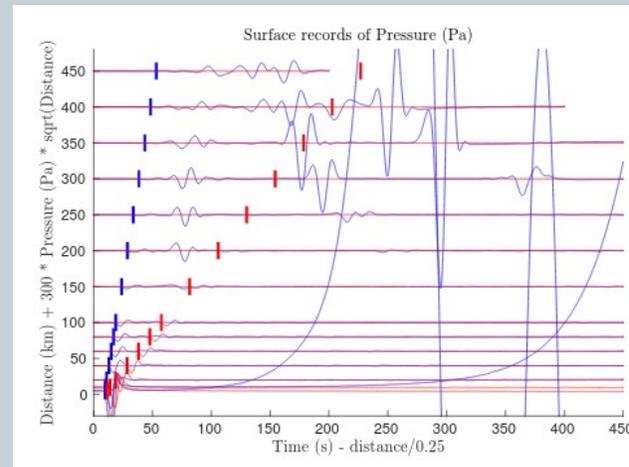
# Simulations d'impact à la surface de Mars

10

- Perturbations de vitesse verticale liées à une **explosion à la surface de Mars** à  $t = 800$  s



- Perturbations de **pression normalisées par la distance en fonction du temps réduit** pour 14 stations



# Propagation d'ondes atmos. issues de Sumatra, 2004

11

- A droite, **perturbations de pression** au niveau des côtes du Sri-lanka et **comparaison en perturb. de densité** avec mesures du satellite **CHAMP**.
- En bas, résultat de **simulation 3-D** après 1 h de simulation

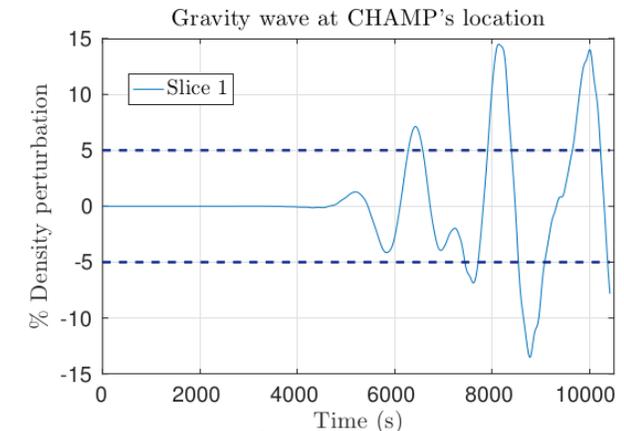
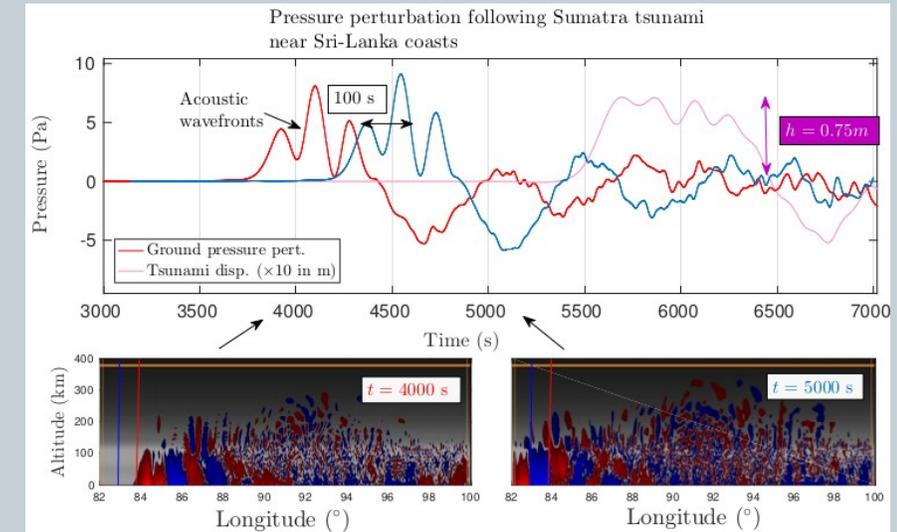
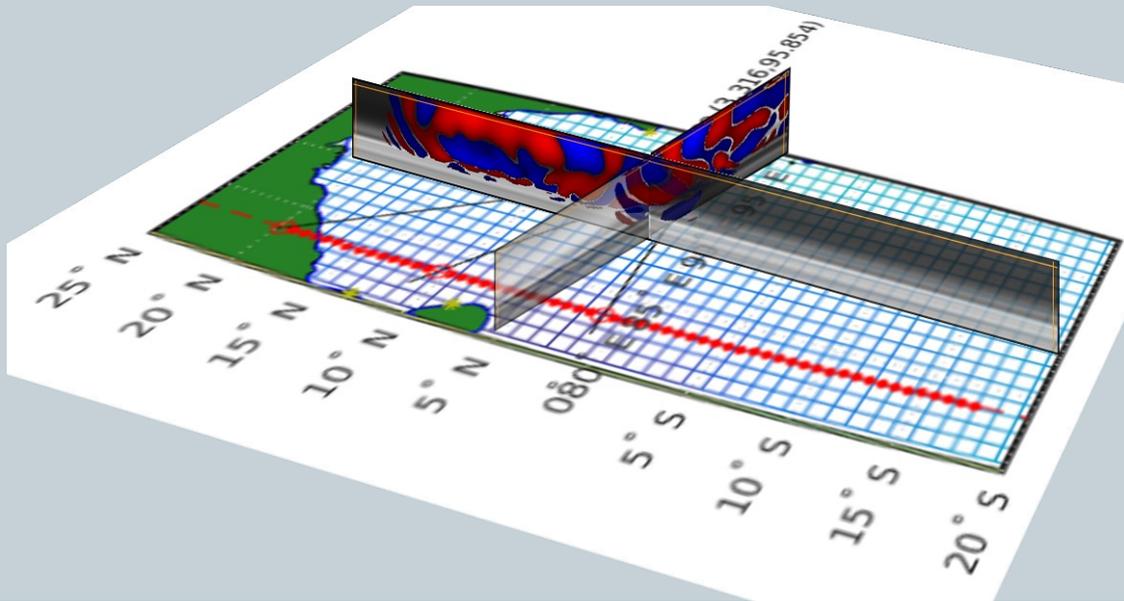


Figure: Percentage of density variation through time.

# EQUATIONS FOR THE HYBRID GALERKIN METHOD

**Navier-Stokes equations** that govern non-linear gravito-acoustic wave propagation in a the atmosphere.

Several **assumptions** are made:

- ▶ The initial atmosphere model is stratified and considered as an ideal gas
- ▶ We neglect the Coriolis force and assume cowling approximation

The system then reads,

$$\begin{aligned} \partial_t \rho &= -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_F) + f_\rho, \\ \partial_t \rho \mathbf{v} &= -\nabla \cdot \Sigma_i + \nabla \cdot \Sigma_v + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_v, \\ \partial_t \rho e &= -\nabla \cdot (\{\rho e + p\} \mathbf{v}_F) + \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{v}_F + \nabla \cdot \sigma_e + f_e \end{aligned}$$

where

$$\Sigma_i = \begin{pmatrix} \rho v_{F,x}^2 + p & \rho v_{F,x} v_{F,z} \\ \rho v_{F,x} v_{F,z} & \rho v_{F,z}^2 + p \end{pmatrix},$$

$$\Sigma_v = \mu(\nabla \mathbf{v}_F + \nabla \mathbf{v}_F^T) + (\eta_V - 2/3\mu) \nabla \cdot \mathbf{v}_F \mathbf{I}_d$$

**Elasto-dynamics equations** that govern linear visco-elastic wave propagation in a the solid.

Several **assumptions** are made:

- ▶ We consider a linear isotropic visco-elastic heterogeneous solid
- ▶ Unknowns are split between mean and fluctuating part

$$\rho_S \partial_t^2 \mathbf{u}_{T,S} = \nabla \cdot S_T + \mathbf{f}_S,$$

with

$$\begin{aligned} S_T = \mathbf{C} : \epsilon_T &= \lambda_S \text{tr}(\epsilon_T) \mathbf{I} + 2\mu_S \epsilon_T \\ \epsilon_T &= \frac{1}{2} \left\{ \nabla \mathbf{u}_{T,S} + (\nabla \mathbf{u}_{T,S})^T \right\}, \end{aligned}$$

**Interface and boundary conditions for fluid and solid media.**

Fluid outer boundary conditions  $\Gamma_{F,ext}$  : slip conditions.

Solid medium outer boundary  $\Gamma_{S,ext}$  : wall boundary conditions such that all perturbation will be zero at the boundary. At the fluid-solid interface, continuity of the traction and normal velocity across the surface

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_F \cdot \mathbf{n} &= \mathbf{v}_S \cdot \mathbf{n} \\ \Sigma_i \cdot \mathbf{n} &= S_T \cdot \mathbf{n}, \end{aligned}$$

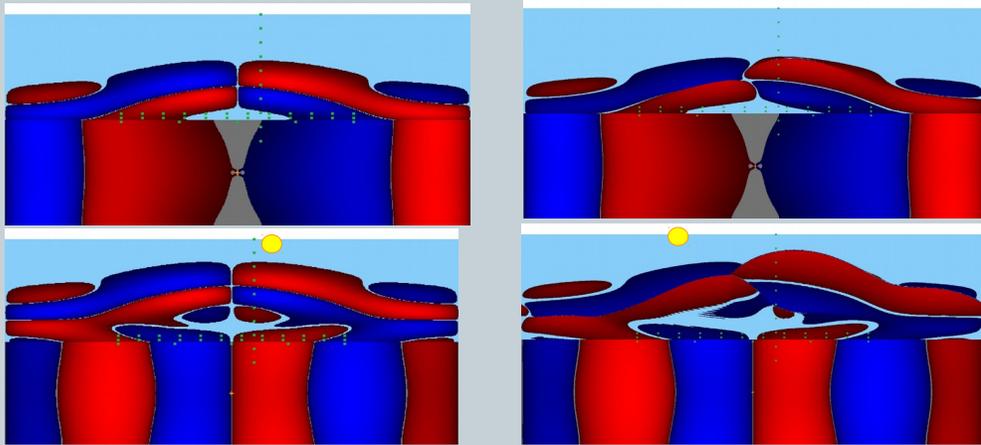
Also, at the **fluid-solid interface** we also impose **no heat flux** and that the **initial fluid velocity field is tangential to the topography**, i.e at initial time  $\mathbf{v}_F(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{t} = 0$  where  $\mathbf{t}$  is the unit tangent vector to the topography.

## Aspects numériques

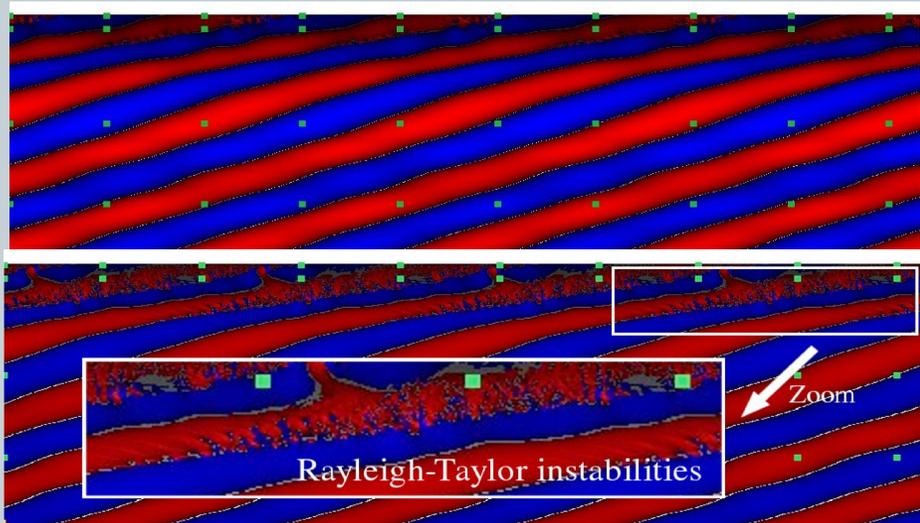
- Elements spectraux
- Points Gauss-Lobatto
- Flux Lax-Friedrich
- Limiteur MUSCL

# Phénomènes non-linéaires dans l'atmosphère

13



**Figures** : Infrasons générés par une source sismique d'amplitude "faible" (gauche) et "forte" = "faible" x 1000 (droite). L'effondrement de l'onde est visible à droite. Vitesse verticale. Rouge/Bleu = Amplitude forte/Amplitude faible



**Figures** : Effondrement des ondes de gravité lié à l'instabilité de Kelvin-Helmoltz. Simulations pour un foçage faible =  $10^{-3}$  m/s (haut) et fort  $A = 1$  m/s (bas) à  $t = 2.2$  h. Domaine :  $600 \times 200$  km. Moment vertical.