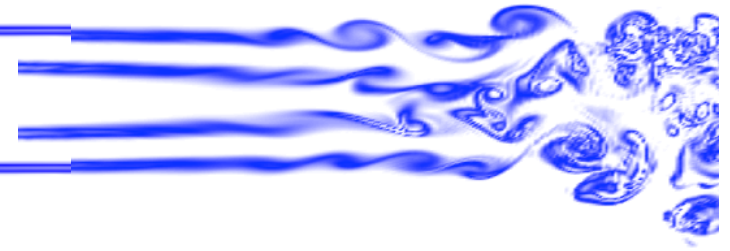


Étude numérique de jets liquides cisailés par un  
courant rapide :  
interaction avec les structures tourbillonnaires

N. Odier, C. Corre et G. Balarac (LEGI)  
V. Moureau (CORIA)



# Contexte : atomisation et combustion

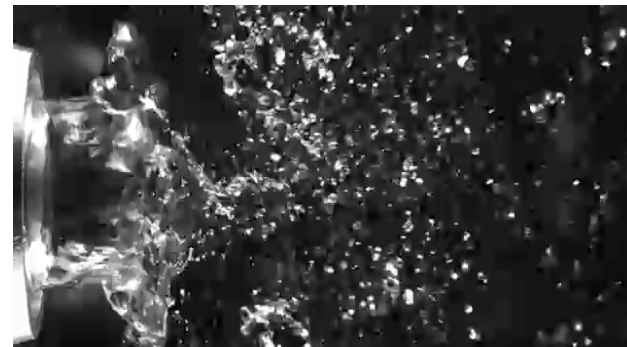


Injection **coaxiale**  
(moteur fusée)



*A. Delon, (LEGI)*

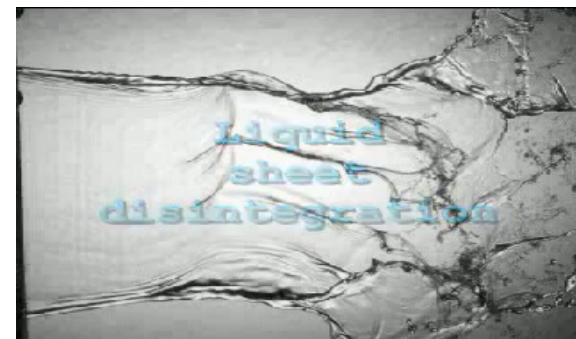
Nappe **annulaire**  
(turboréacteur)



*Wahono et al.*

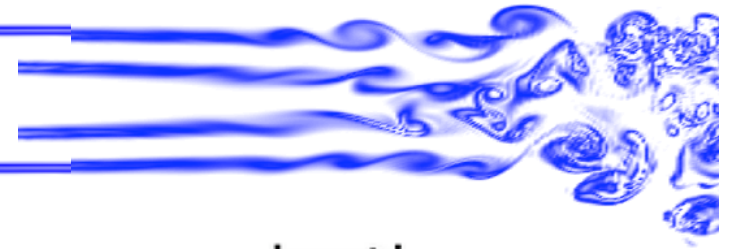
**Simplification** académique  
classique : le jet plan

Enjeux : - prédiction des **polluants**  
- **Instabilités acoustiques** dans les chambres  
de combustion



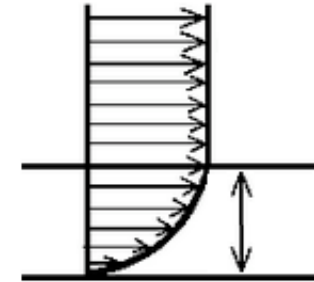
*Lavergne et al.*

# Pourquoi la simulation ?

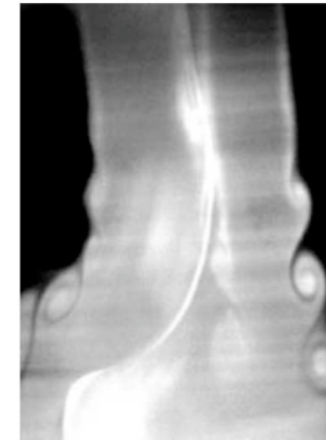


## Difficultés expérimentales :

- **Mesure** et **contrôle** de la couche limite gazeuse :  
Ordre de grandeur :  $\approx 100 \mu\text{m}$



- Étude de l'interaction entre structures tourbillonnaires et interface

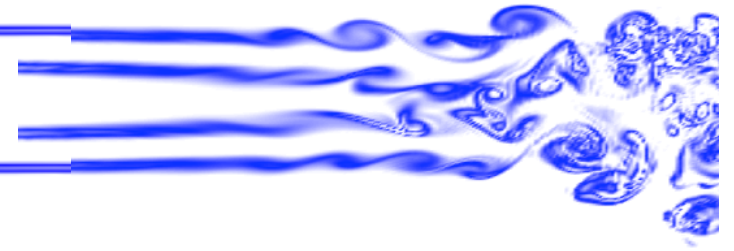


## Conditions réelles :

Vulcain :  $P = 110 \text{ bar}$   
 $T = 3300^\circ\text{C}$



# Outils numérique



Code **YALES2** (V. Moureau, CORIA)

*Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) du CNRS « SUCCESS »*

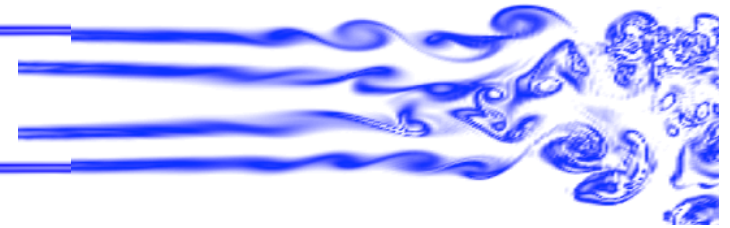
- Navier-Stokes bas Mach
- VF non-structuré
- Massivement parallèle

**SUCCESS**

**YALES2**



# Yales2 et Froggy



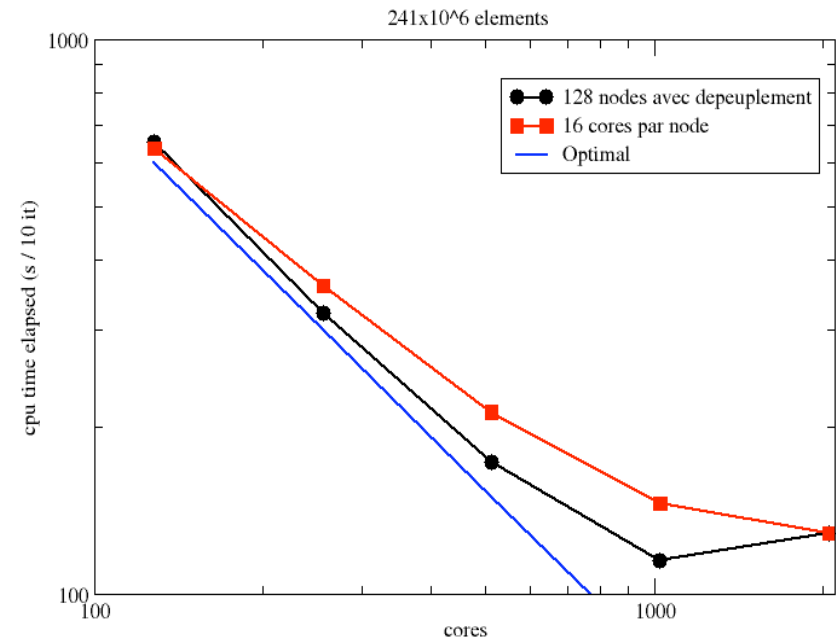
Besoin d'un compilateur très récent :  
=> Compilation d'un Gfortran 4.8.2

Installation de bibliothèques spécifiques

Installation/validation d'OpenMPI 1.7.3  
interfacé avec OAR

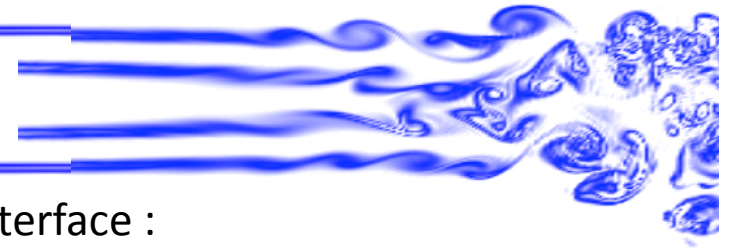
Installation d'un fichier "module" pour  
configurer l'environnement :  
=> Module load Yales2

Yales2: strong scalability on Froggy



(réalisé pendant le "freeride")

# CFD diphasique



Particularités liées à la présence d'une interface :

Navier-Stokes dans chaque phase :

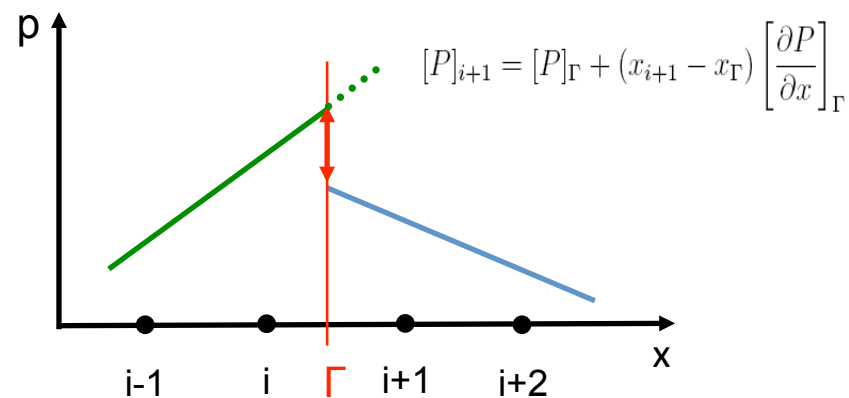
$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} + \frac{\nabla p}{\rho(\phi)} = \frac{\nabla(2\mu(\phi)\mathbf{D})}{\rho(\phi)}, \quad \mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T)$$
$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

Suivi d'interface : « Level Set » :

$\Phi$  : Fonction distance à l'interface

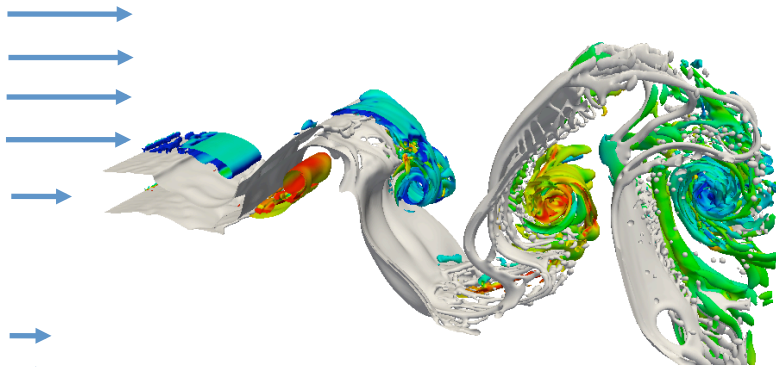
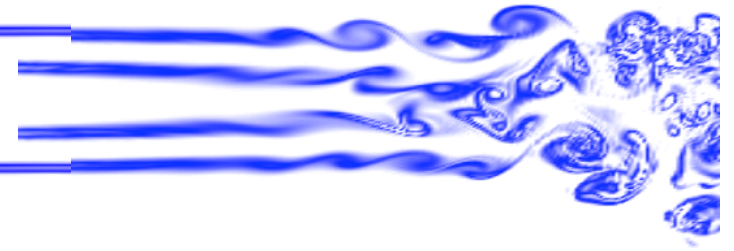
$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \Phi = 0$$

Discontinuité de la pression : méthode « ghost-fluid »

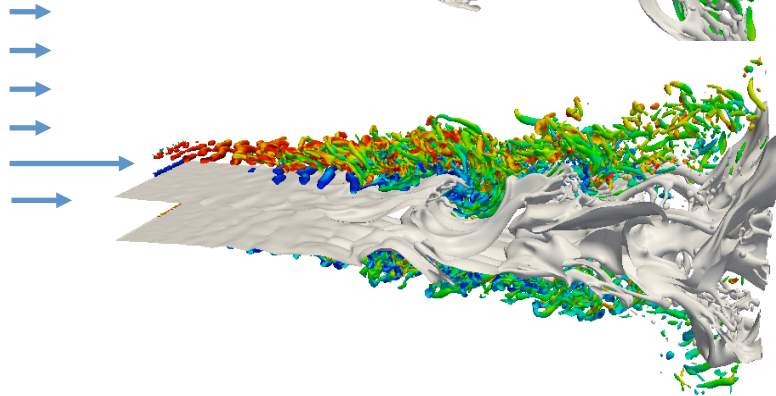


=> Limiter les gradients !

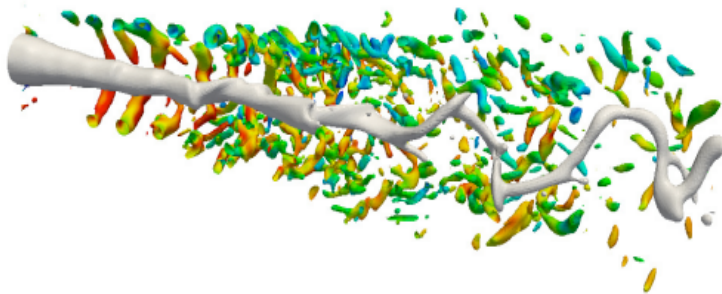
## Configurations étudiées



Jet plan liquide cisailé par un courant gazeux rapide « **infini** »

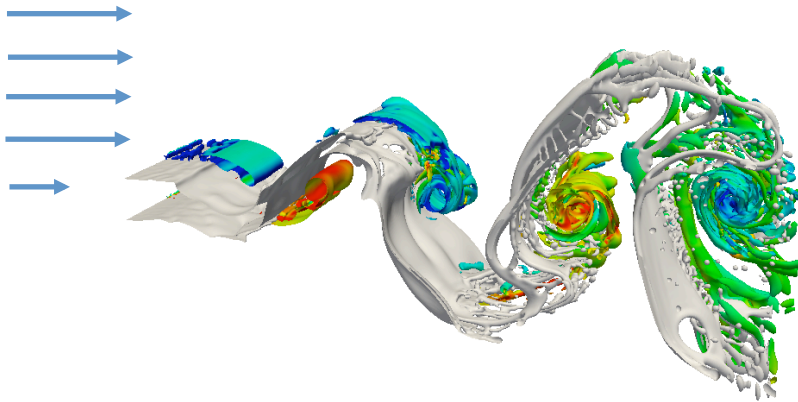


Jet plan liquide cisailé par un courant gazeux rapide **fini** (et un faible « coflow »)



Jet liquide **coaxial** cisailé par un **jet annulaire** gazeux rapide

# Nappes planes : courant « infini »



Nappe liquide entourée par un courant gazeux rapide « infini »

Caractéristiques de la configuration :

- domaine  $15H \times 10H \times 4H$  discrétisé par 57.507.840 mailles

- Nombres sans dimension :

$$Re = \rho_g U_g H / \mu_g = 4000$$

$$We = \rho_g U_g^2 H / \sigma = 500$$

$$R_\rho = \rho_l / \rho_g = 10$$

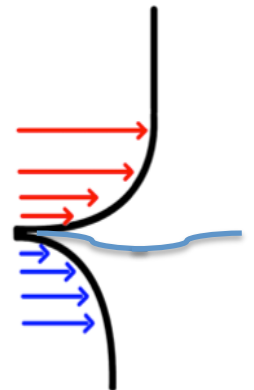
$$R_U = U_g / U_l = 6$$

$$R_\mu = \mu_l / \mu_g = 2$$

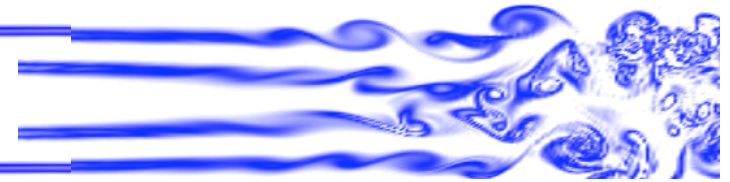
- Profil analytique en entrée :

$$\frac{u(y)}{U_\infty} = 2\eta - 2\eta^3 + \eta^4, \text{ avec } \eta = \frac{y}{\delta}$$

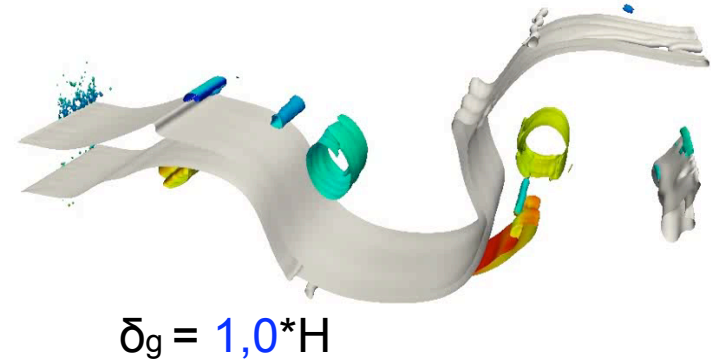
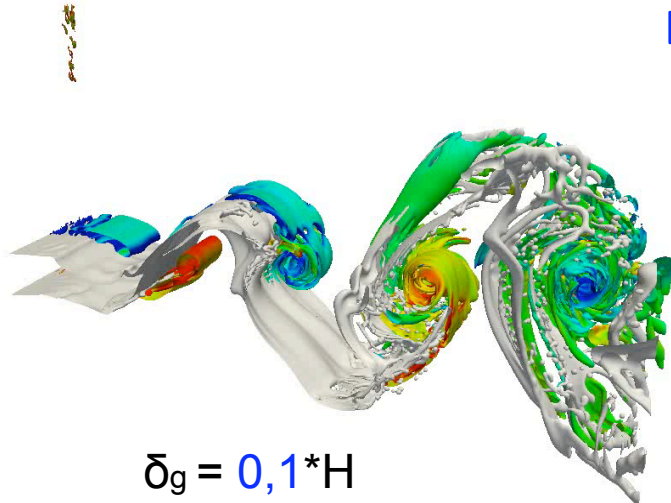
(similaire à Couderc, 2007)



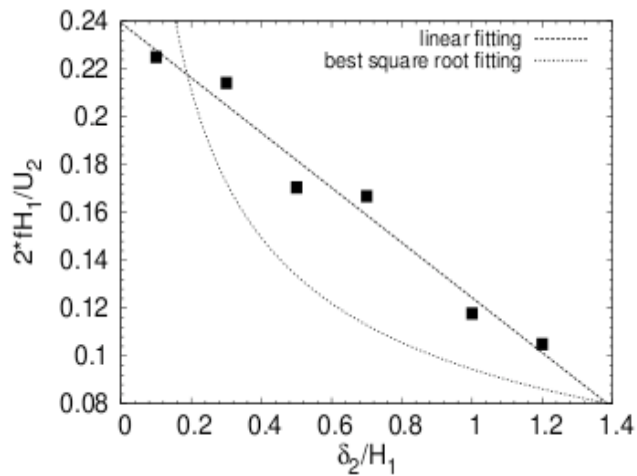
# Influence de la couche limite gazeuse



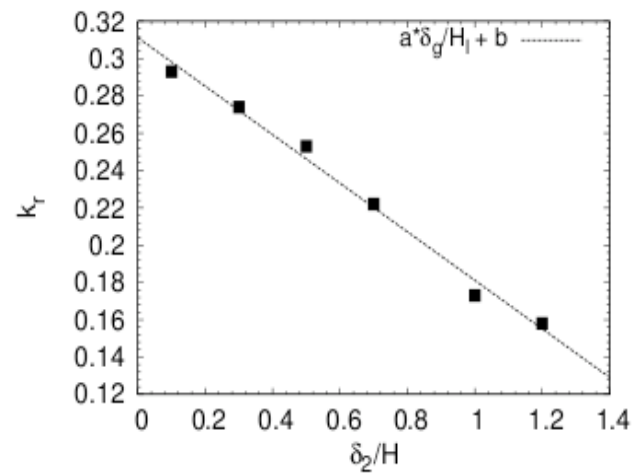
## Etude de sensibilité



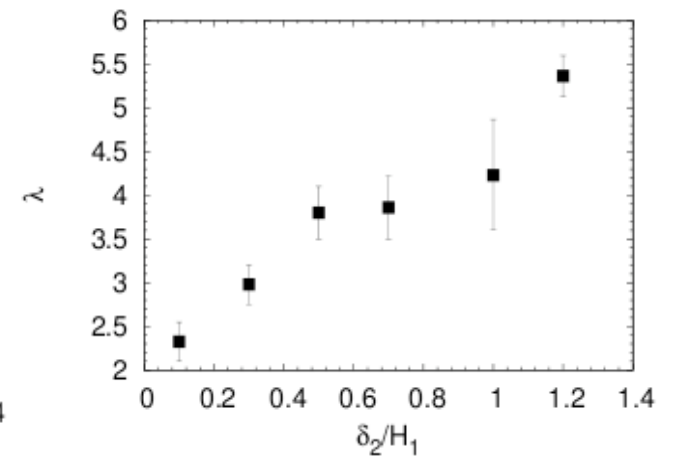
Fréquence



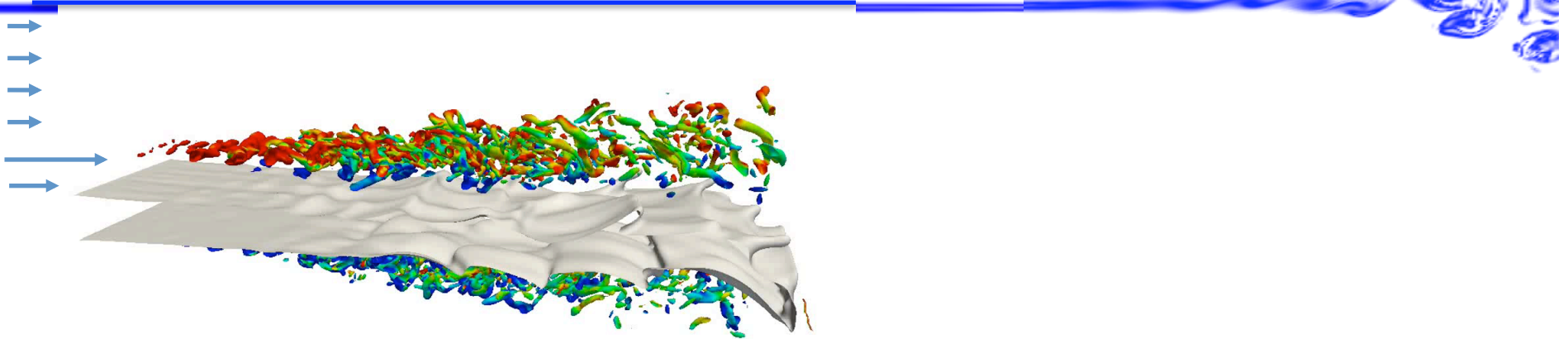
Taux d'amplification



Longueur d'onde



## Nappes planes : courant « fini »



### Caractéristiques de la configuration :

- Similaire au cas précédent
- Courant gazeux : épaisseur finie de  $0.5H$

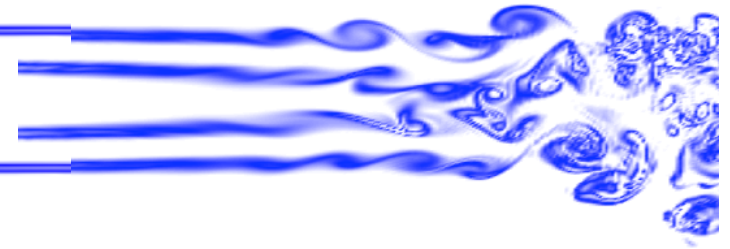
### Description globale de l'écoulement

- Tourbillons de Kelvin-Helmholtz dans les couches de mélange externes
- Pas de battement à grande échelle

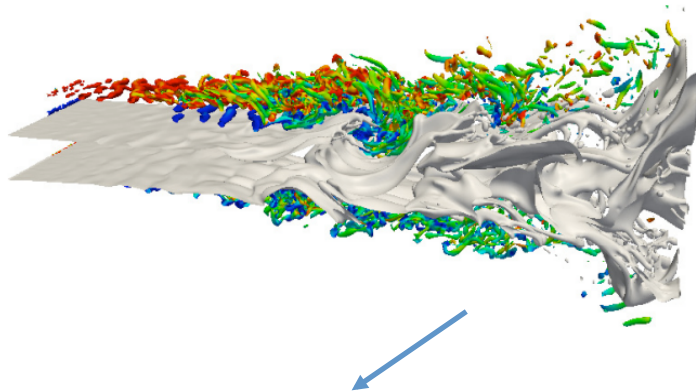
=> Passage d'une dynamique à une autre ?



# Influence des paramètres amonts



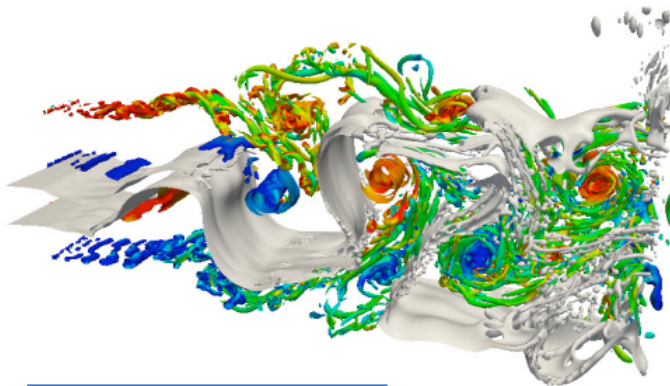
Recherche de paramètres **contrôlant** le battement :



Référence non oscillante :

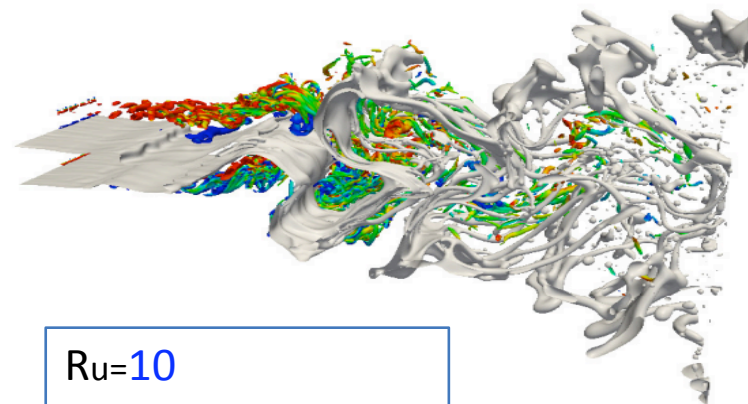
$$R_u=6$$
$$H_{\text{gaz}} = 0,5 * H_{\text{liq}}$$

Modification de  $H_{\text{gaz}}$  :



$$R_u=6$$
$$H_{\text{gaz}} = 1,5 * H_{\text{liq}}$$

Modification de  $R_u$  :



$$R_u=10$$
$$H_{\text{gaz}} = 0,5 * H_{\text{liq}}$$



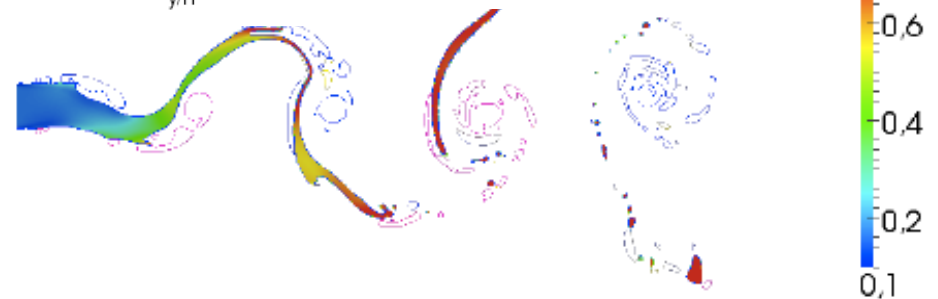
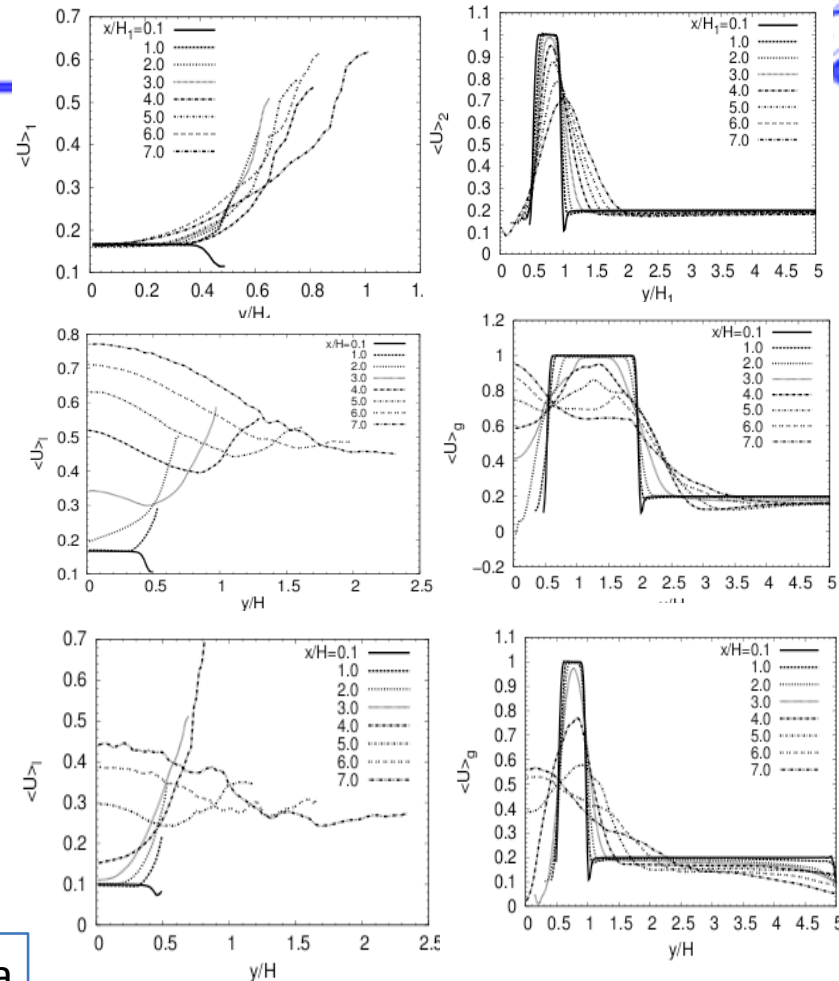
# Mécanisme en jeu ?

Référence «non oscillante»

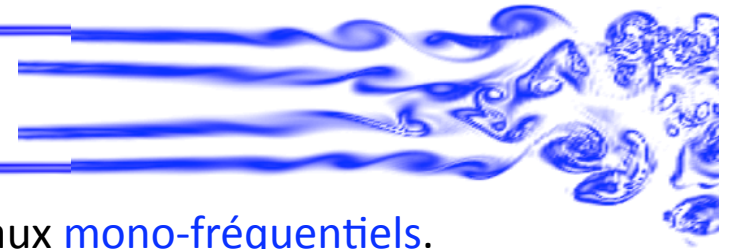
Augmentation de  $H_{gaz}$

Augmentation de  $Ru$

- Accélération du liquide => affinement de la nappe (conservation débit)
- Déstabilisation par les structures externes favorisée



# Dynamic Mode Decomposition



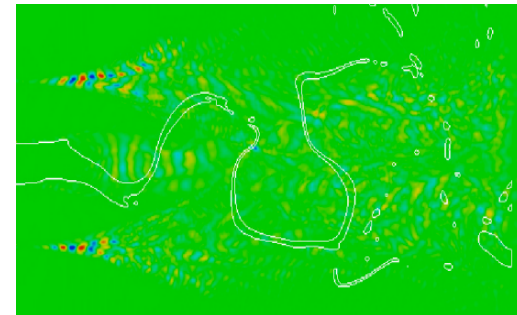
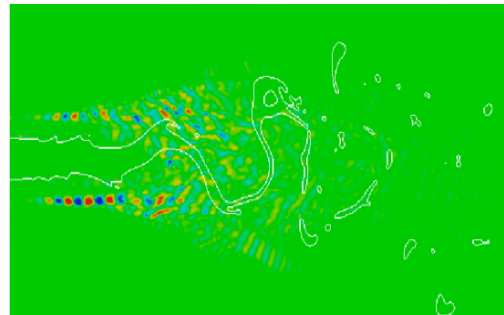
Décomposition d'une série de snapshots en modes spatiaux mono-fréquentiels.  
(Schmid 2010)

Mise en évidence de 2 phénomènes distincts :

- Kelvin-Helmholtz
- Flapping

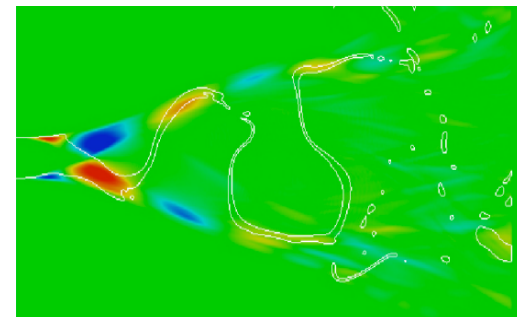
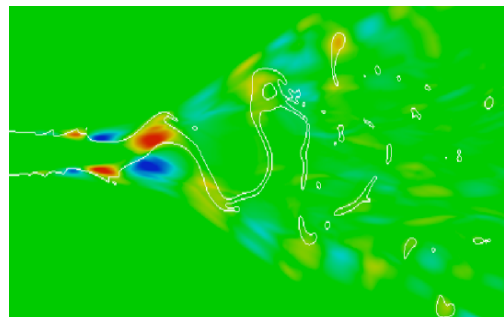
Critère Q :

$$f^*H_1/U_1 \sim 1,0$$



Level-Set :

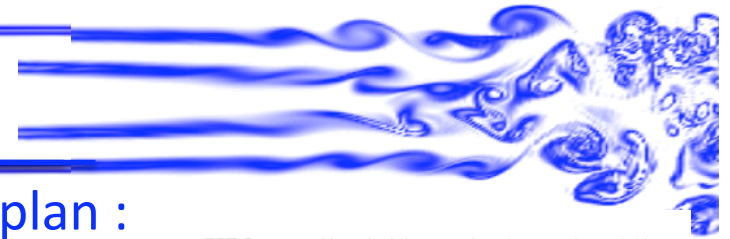
$$f^*H_1/U_1 \sim 0.1$$



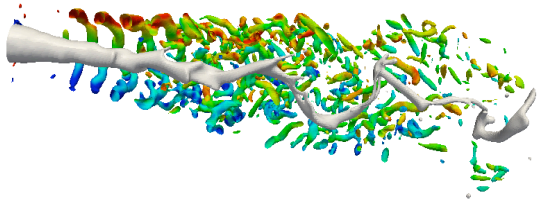
$Ru=10$   
 $H_{\text{gaz}} = 0,5 * H_{\text{liq}}$

$Ru=6$   
 $H_{\text{gaz}} = 1,5 * H_{\text{liq}}$

# Jets coaxiaux

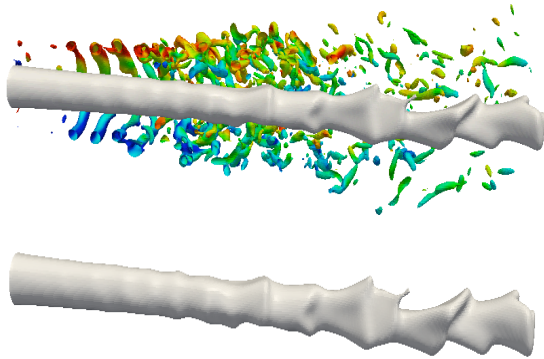


## Similarités avec le cas plan :



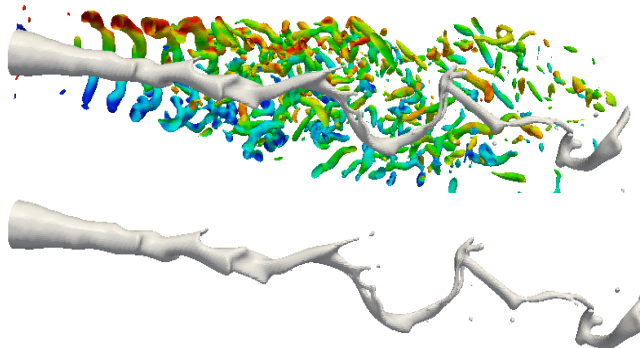
- Fréquence des vagues interfaciales :

- Effet de  $Ru$  :



$Ru=6$

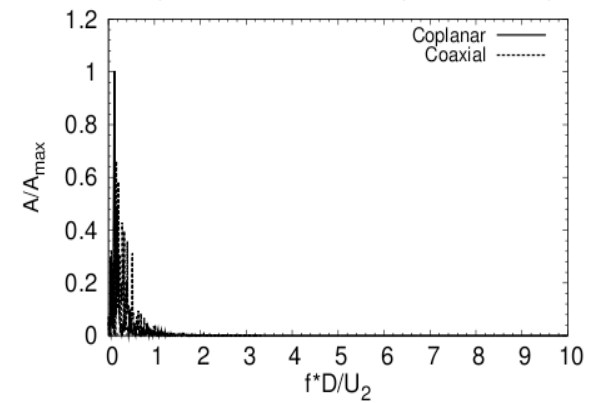
$H_{gaz} = 0,5 * D_{liq}$



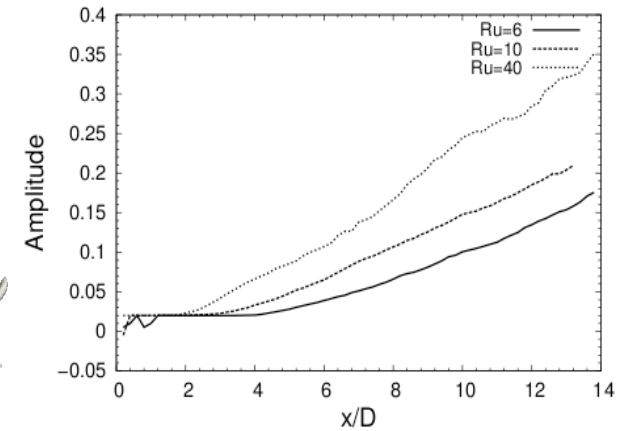
$Ru=40$

$H_{gaz} = 0,5 * H_{liq}$

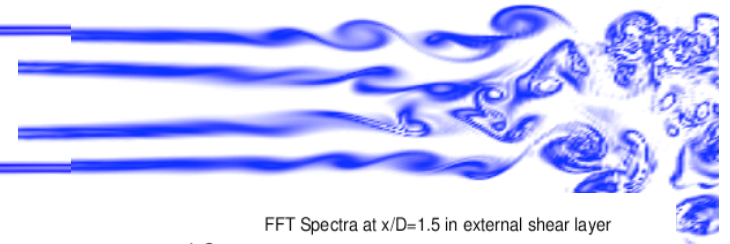
FFT Spectra of interfacial waves for plane and coaxial jet



Average displacement of the jet center from the axe

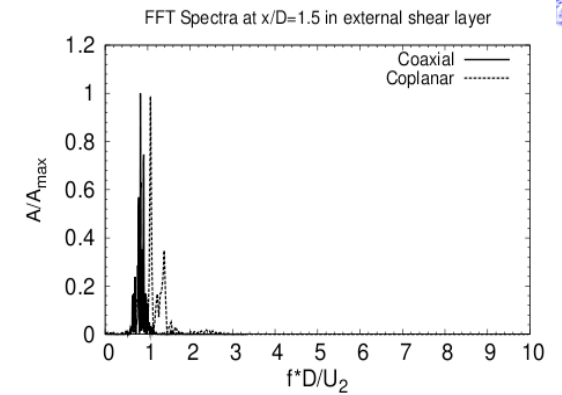


# Jets coaxiaux

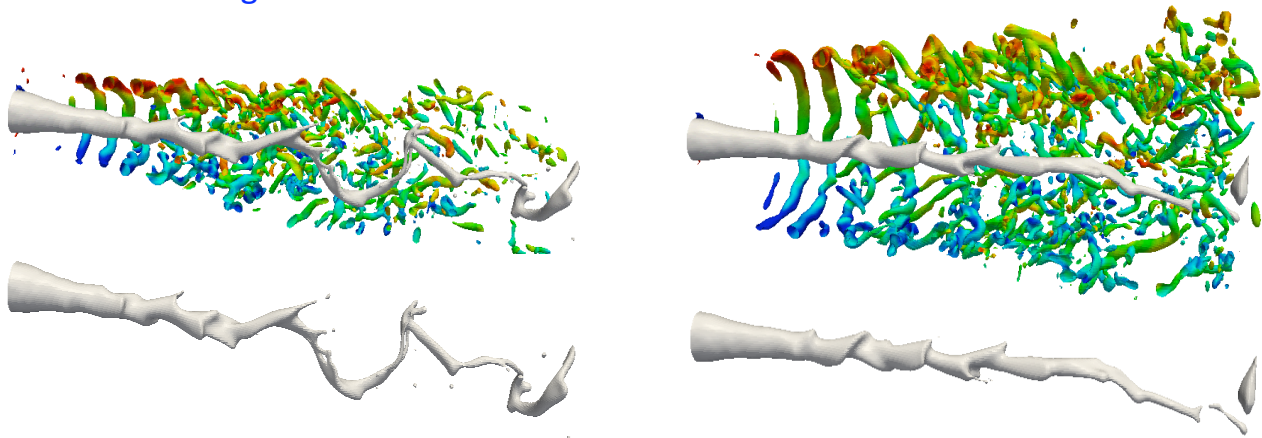


## Différences avec le cas plan :

- Fréquence des structures externes :

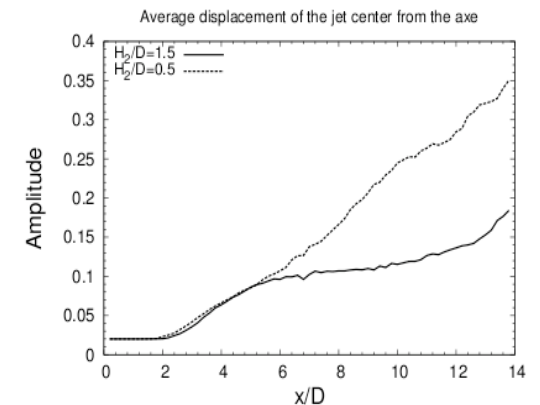


- Effet de  $H_{gaz}$  : Confinement



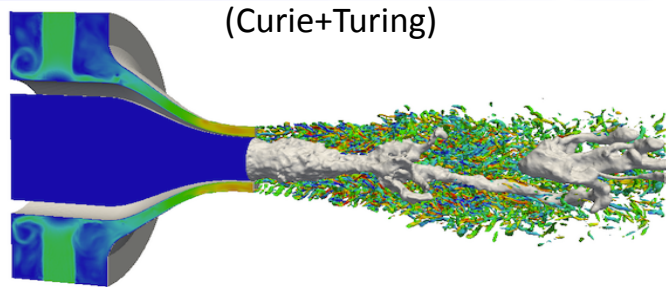
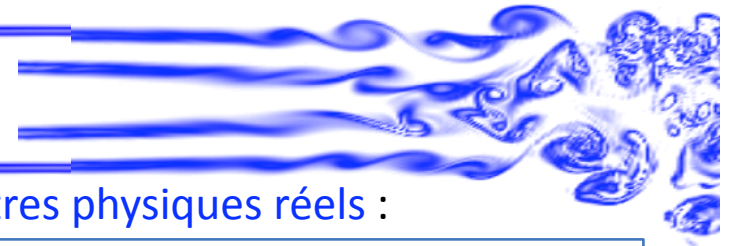
$Ru=40$   
 $H_{gaz} = 0,5 \cdot H_{liq}$

$Ru=40$   
 $H_{gaz} = 1,5 \cdot H_{liq}$



Conclusion des jets plans pas forcément transposables aux jets coaxiaux !

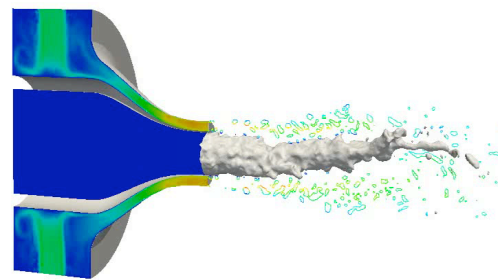
# Vers une simulation réaliste



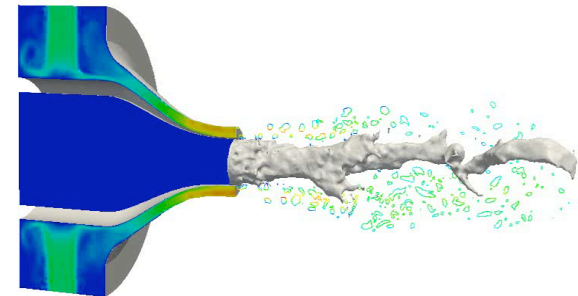
Paramètres physiques réels :

-  $R_p=832$ ,  $R_\mu=55$ ,  $R_u=83,7$

- 240 millions de tétras,  $dt \sim 10^{-6}$  s

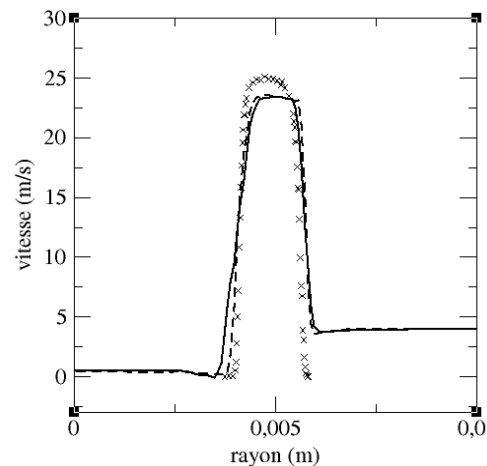


Sans forçage (0,03 s)



Forçage liquide (0,06 s)

Comparaison profils de vitesse :



# Conclusions



## Jets plans :

- Réalisation d'une étude de sensibilité : étude la dynamique en fonction de la taille de couche limite gazeuse
- Etude paramétrique : Mise en évidence de paramètres de contrôle du « flapping »

## Jets coaxiaux :

- Résultats des jets plans pas forcément transposables

## Froggy :

- Machine parfaitement adaptée aux configurations étudiées
- Intermédiaire entre les machines « locales » (labo) et machines nationales



Merci !