

# Simulation aux grandes échelles du blocage d'un moteur à détonation tournante.

Romain Bizzari

Encadrant : A. Dauptain A. Misdariis O. Vermorel T. Poinsot  
Groupe : CFD cerfacs

7 Septembre 2015



# ACARE (Advisory Council for Aeronautics Research in Europe)/Flightpath



Objectifs horizon 2020 :

Consommation et  $CO_2$  -50%  
 $NOx$  -80% et bruit -10dB

Les moteurs actuels atteignent une limite d'optimisation et nécessitent une rupture technologique. La détonation est une des voies envisagée.

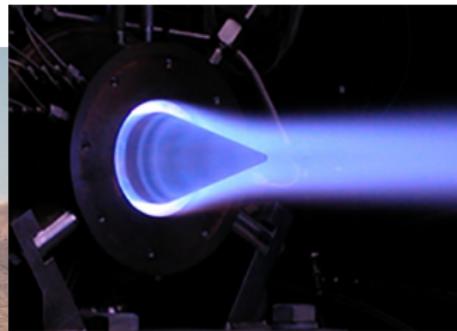
## Exemple de prototypes propulsés par détonation



X-43, Scramjet, 2004.



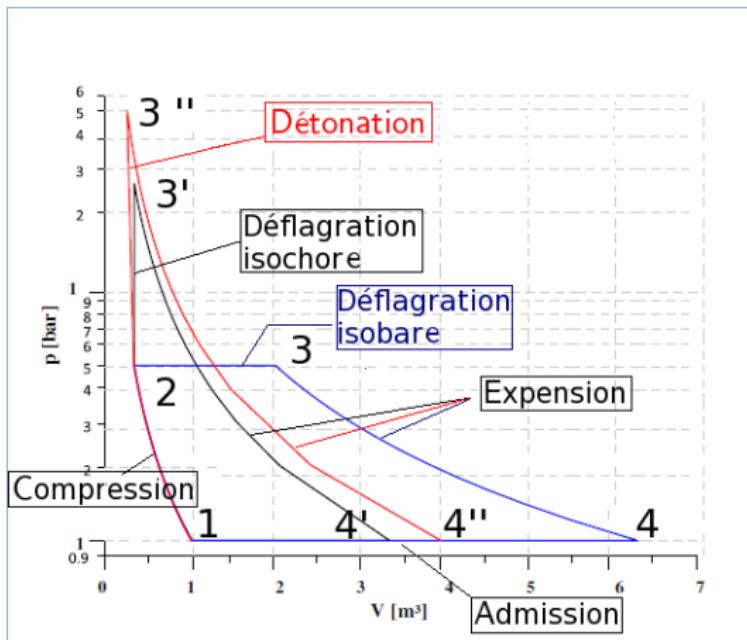
Premier PDE, 2008.



RDE, Aerojet Rocketdyne.

# Rendement

Diagramme de Clapeyron.



# Rendement

Fuel	Déflagration Isobare (%)	Déflagration Isochore (%)	Détonation (%)
Hydrogène $H_2$	36.9	54.3	59.3
Methane $CH_4$	31.4	50.5	53.2
Acetylène $C_2H_2$	36.9	54.1	61.4

Rendement thermodynamique pour une pression initiale de 5 bars<sup>1</sup>.

---

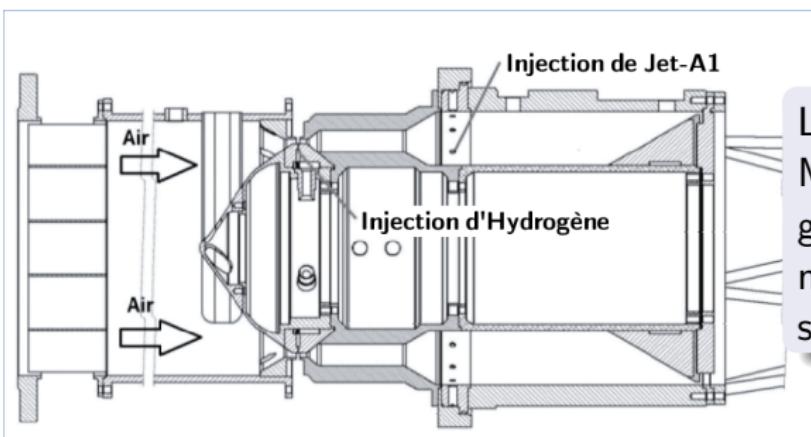
1. Wolański, P. (2013). Detonative propulsion. proceedings of the Combustion Institute, 34(1), 125-158.

## Etat de l'art

La majorité des études utilisent des schémas d'ordre élevé sur un maillage structuré : WENO/ENO<sup>2</sup>, FCT<sup>3</sup>... avec parfois une méthode de maillage adaptatif (AMR<sup>4</sup>).

- 
2. Liu, X. D., Osher, S., & Chan, T. (1994). Weighted essentially non-oscillatory schemes. *Journal of computational physics*, 115(1), 200-212.
  3. Oran, E. S., & Boris, J. P. (2005). *Numerical simulation of reactive flow*. Cambridge University Press.
  4. Eude, Y., Davidenko, D. M., & Gokalp, I. (2011). Use of the adaptive mesh refinement for 3D simulations of a CDWRE (continuous detonation wave rocket engine). AIAA paper, 2236, 2011.

## Cas réel



Les problématiques de MBDA et Safran sont des géométries multi-injecteurs nécessitant du non structurés.

RDE (Piotr Wolanski)

# Non-structuré

## Première approche

AVBP contient des schémas d'ordre 2 ou 3 avec des senseurs de viscosité<sup>5</sup> et une hyperviscosité cook et cabot pour capturer les chocs.

## Ordre plus élevé

Les études futures pourront utiliser le code Jaguar<sup>6</sup> utilisant les différences spectrales et permettant un raffinement adaptatif.

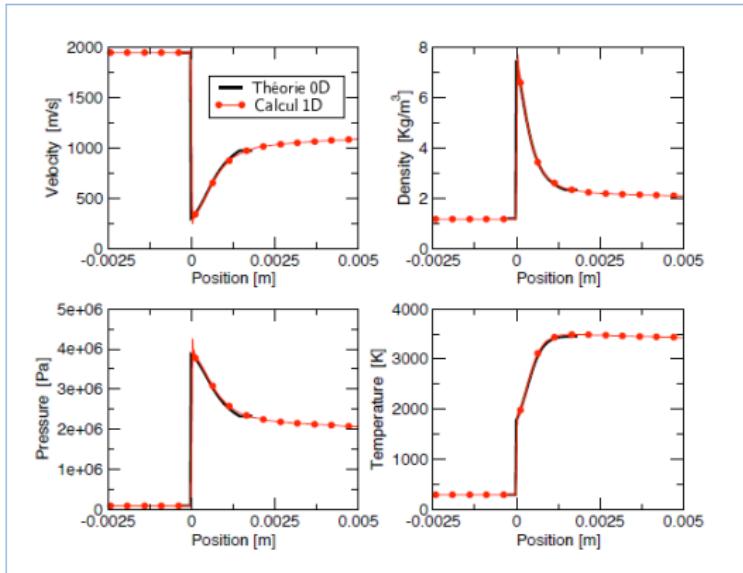
---

5. Jameson, A., Schmidt, W., & Turkel, E. (1981). Numerical solutions of the Euler equations by finite volume methods using Runge-Kutta time-stepping schemes. AIAA paper, 1259, 1981.

6. M. Lemesle, Analysis of several extensions for the spectral difference method to handle discontinuity, MSc in Applied Mathematics, Université de Nantes, Technical report WN/CFD/14/62, CERFACS, 2014

# Détonation dans AVBP avant ce stage

Initialement seule une comparaison d'une détonation mono-espèce sur maillage non structuré avec un calcul analytique ZND avait été réalisée.



Théorie ZND et simulation AVBP  
(A. Dauptain).

# Sommaire

## 1 Validation de détonation 1D

- Résolue
- Sous résolue

## 2 Validation sur une plaque à suie

- Théorie 2D
- Simulation 2D
- Comparaison

## 3 Calcul d'un RDE

- Principe de fonctionnement du RDE
- Etude de référence
- Configurations 3D étudiées

## 4 Exploitation des résultats

- Comparaison
- Etude supplémentaire

# Part : 1 - Validation de détonation 1D

## 1 Validation de détonation 1D

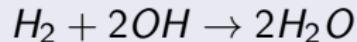
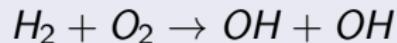
- Résolue
- Sous résolue

## 2 Validation sur une plaque à suie

## 3 Calcul d'un RDE

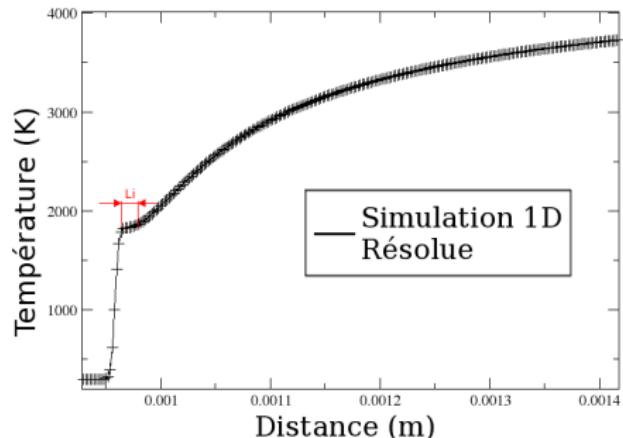
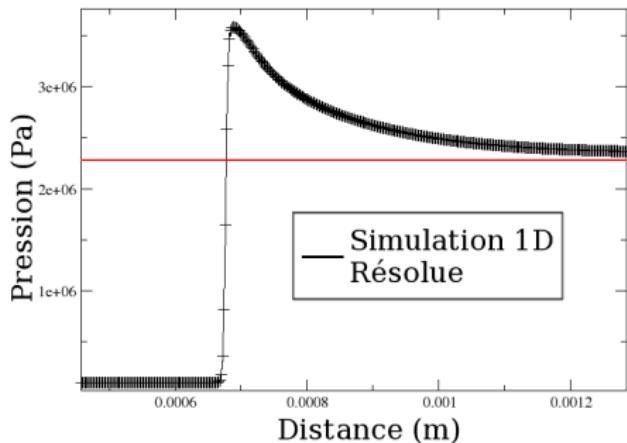
## 4 Exploitation des résultats

# Détonation 1D résolue



La longueur d'induction et la vitesse sont bien captées.

( $V_{th} = 2830$  m/s et  $V_{num} = 2950$  m/s soit 4.1% d'écart)



# Part : 1 - Validation de détonation 1D

## 1 Validation de détonation 1D

- Résolue
- Sous résolue

## 2 Validation sur une plaque à suie

## 3 Calcul d'un RDE

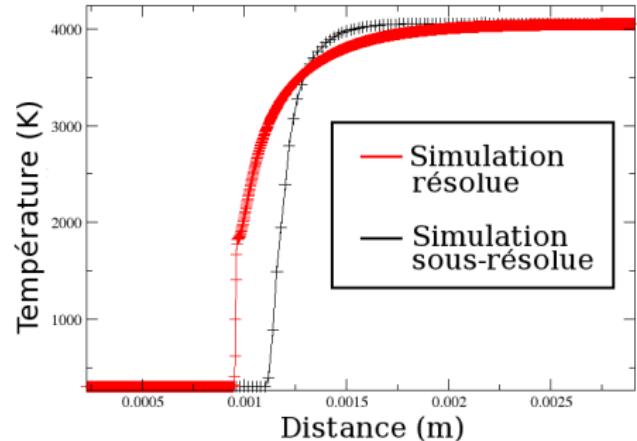
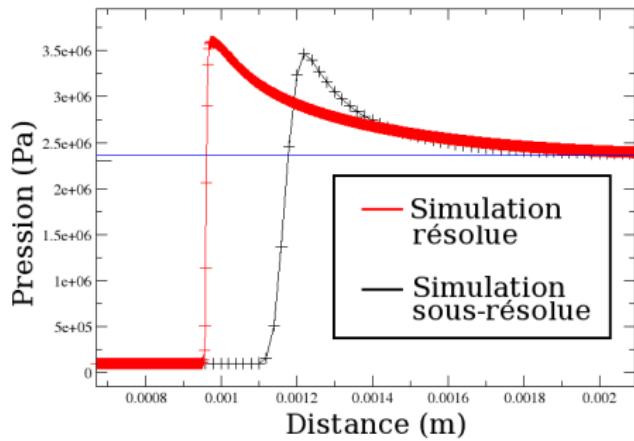
## 4 Exploitation des résultats

# Détonation 1D sous résolu

Résolue :  $\Delta x = 2\mu m$

Sous résolue :  $\Delta x = 20\mu m$

La structure interne n'est pas résolue mais l'état final est identique. ( $V_{résolu} = V_{Sous résolu}$ )



## Part : 2 - Validation sur une plaque à suie

### 1 Validation de détonation 1D

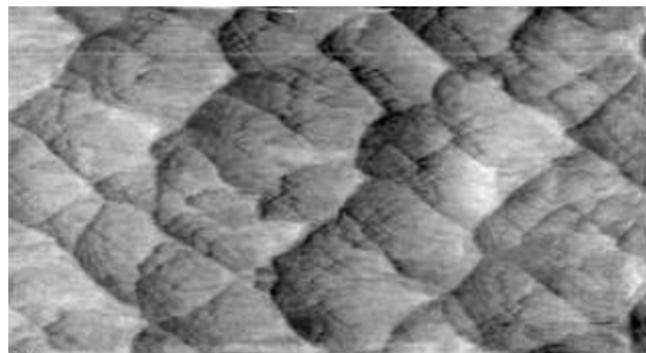
### 2 Validation sur une plaque à suie

- Théorie 2D
- Simulation 2D
- Comparaison

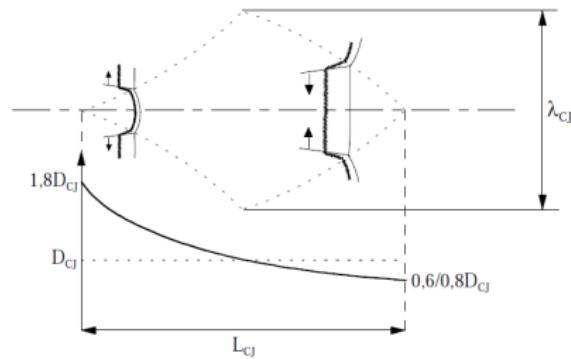
### 3 Calcul d'un RDE

### 4 Exploitation des résultats

# Cellules de détonation



Plaque à suie expérimentale  
(Shepherd)



Formation de la cellule de détonation

## Part : 2 - Validation sur une plaque à suie

### 1 Validation de détonation 1D

### 2 Validation sur une plaque à suie

- Théorie 2D
- Simulation 2D
- Comparaison

### 3 Calcul d'un RDE

### 4 Exploitation des résultats

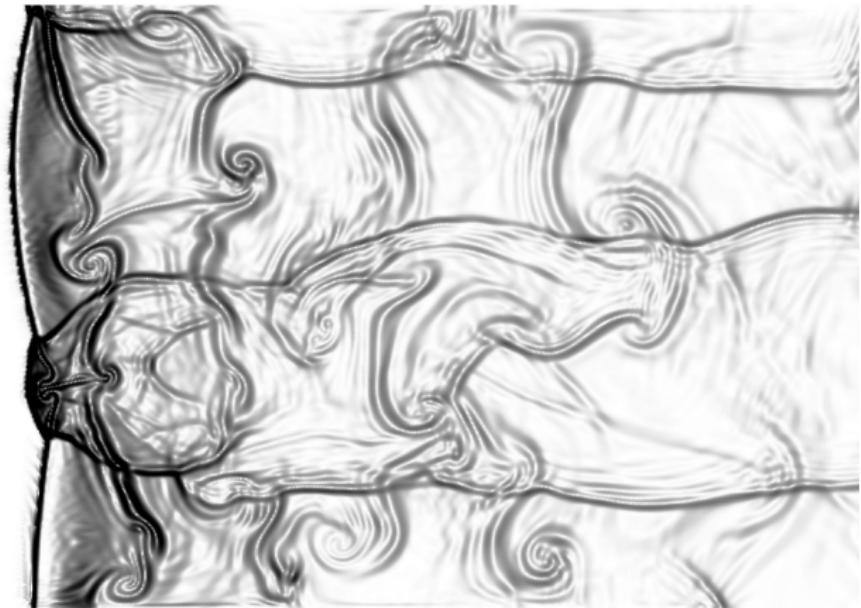
# Configuration 2D

Simulation réalisée sur 750 000 triangles avec un schéma TTG4A et une hyperviscosité de Cook et Cabot<sup>7</sup>.



7. Cook, A. W., & Cabot, W. H. (2005). Hyperviscosity for shock-turbulence interactions. *Journal of Computational Physics*, 203(2), 379-385.

# Gradient de température



Gradients (T)



## Part : 2 - Validation sur une plaque à suie

### 1 Validation de détonation 1D

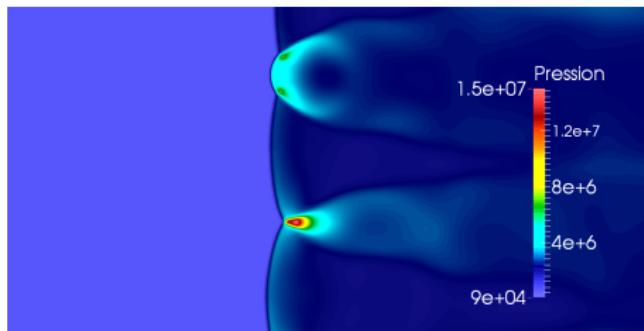
### 2 Validation sur une plaque à suie

- Théorie 2D
- Simulation 2D
- Comparaison

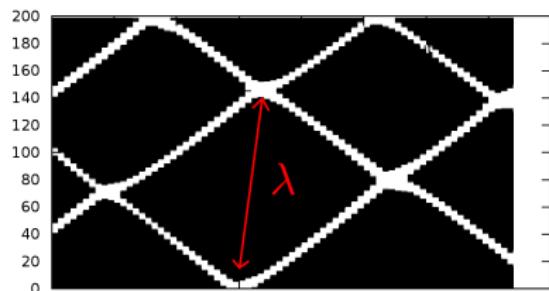
### 3 Calcul d'un RDE

### 4 Exploitation des résultats

## Validation 2D



Champ de pression instantané.

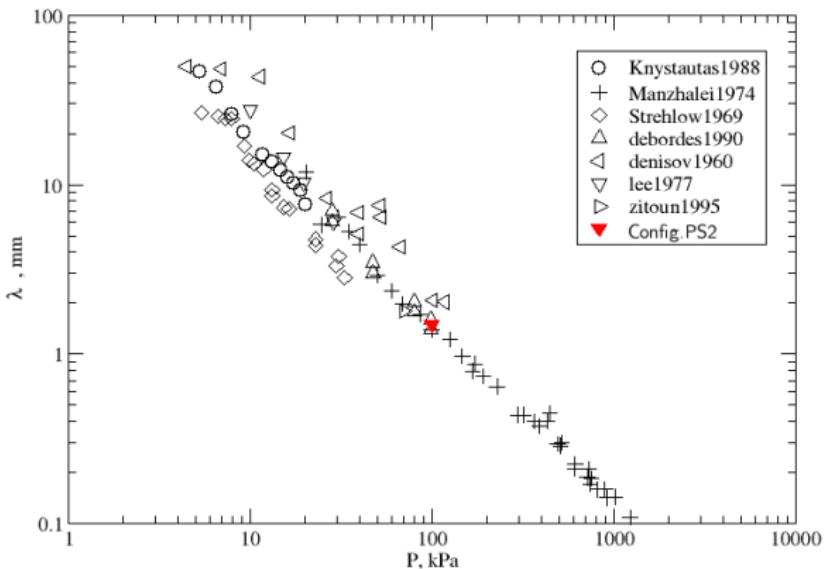


Plaque à suie numérique.

$$\lambda = 1.5\text{mm}$$

# Validation 2D

La taille des cellules de détonation obtenue numériquement concorde avec celles obtenues lors de précédentes expériences validant ainsi la chimie utilisée.

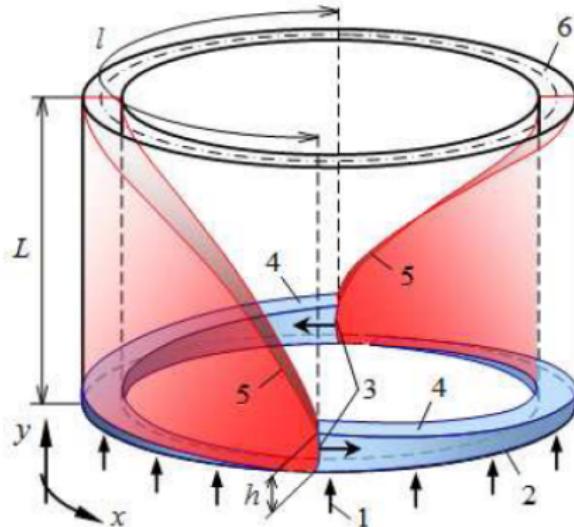


# Part : 3 - Calcul d'un RDE

- 1 Validation de détonation 1D
- 2 Validation sur une plaque à suie
- 3 Calcul d'un RDE
  - Principe de fonctionnement du RDE
  - Etude de référence
  - Configurations 3D étudiées
- 4 Exploitation des résultats

# RDE : Rotative Detonation Engine

Au fur et à mesure que le front (rouge) avance la couche de gaz frais (bleu) se renouvelle



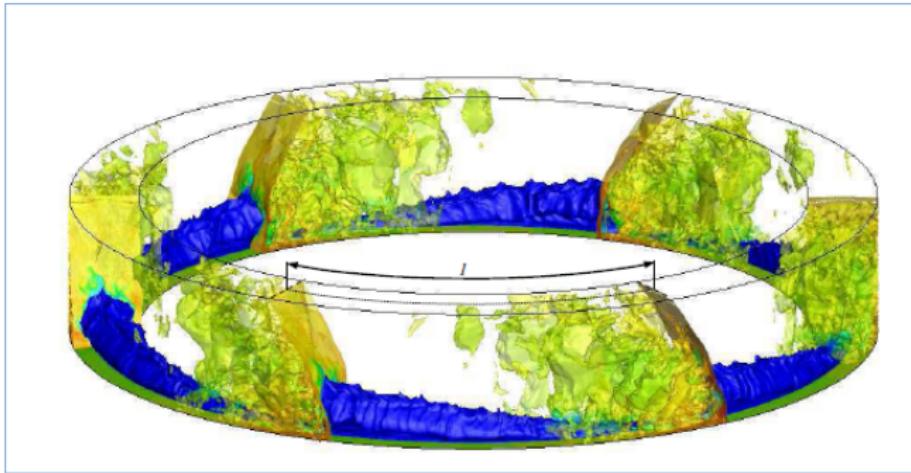
RDE (Davidenko)

# Part : 3 - Calcul d'un RDE

- 1 Validation de détonation 1D
- 2 Validation sur une plaque à suie
- 3 Calcul d'un RDE
  - Principe de fonctionnement du RDE
  - **Etude de référence**
  - Configurations 3D étudiées
- 4 Exploitation des résultats

# Etude existante, Y. Eude<sup>8</sup>

Weno d'ordre 5 avec AMR sur 450 000 cellules.



8. Eude, Y. (2011). Développement d'un outil de simulation numérique des écoulements réactifs sur maillage auto-adaptatif et son application à un moteur à détonation continue (Doctoral dissertation, Université d'Orléans).

# Part : 3 - Calcul d'un RDE

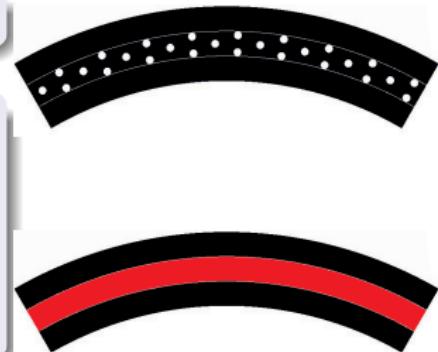
- 1 Validation de détonation 1D
- 2 Validation sur une plaque à suie
- 3 Calcul d'un RDE
  - Principe de fonctionnement du RDE
  - Etude de référence
  - Configurations 3D étudiées
- 4 Exploitation des résultats

## Configuration de référence



Cas réel :

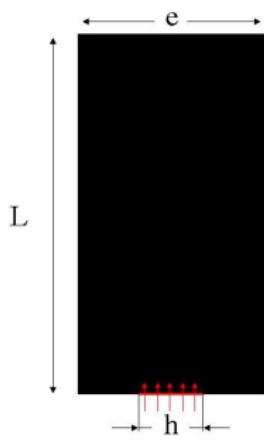
Y. Eude introduit une porosité pour modéliser une infinité de tuyères de laval :



$$D=105\text{mm}/L=20\text{mm}$$
$$e=10\text{mm}/h=3.3\text{mm}$$

# Validation 3D

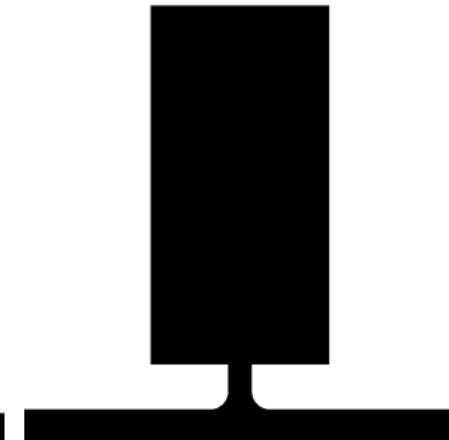
Simuler la même configuration sans utiliser de la porosité engendre deux cas : Surface égale (C1), Débit égal (C2)



Référence



C1

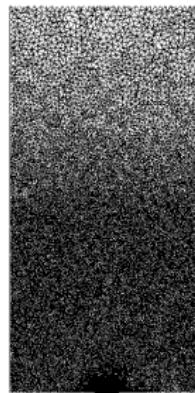


C2

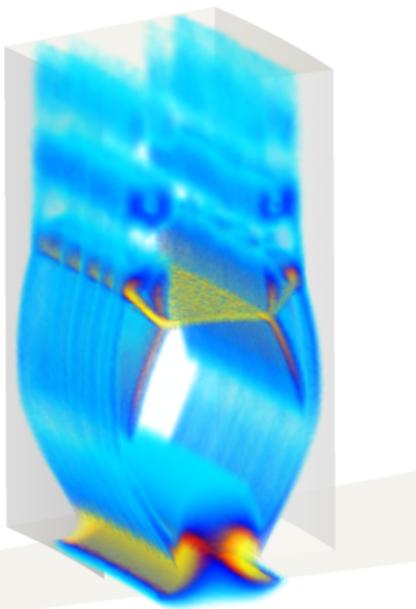
# Configuration

Maillages de 55 millions de tétraèdres pour 50 000h CPU par configuration pour  $\frac{1}{6}$  de moteur .

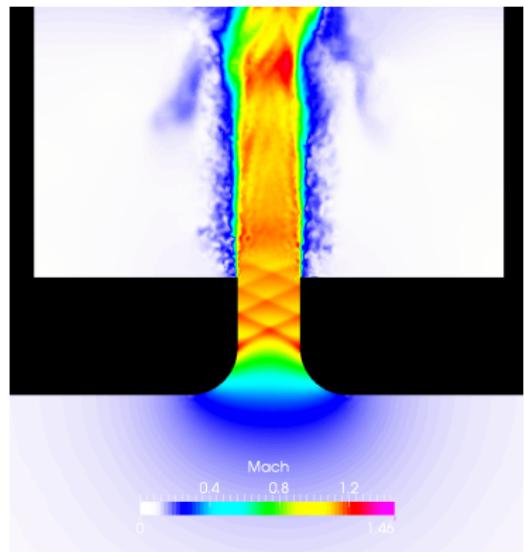
- $P=10\text{bars}$
- $T=300\text{k}$
- $H_2/O_2$  stochiométrique
- $h_{C1}=3.3\text{mm}/h_{C2}=1.3\text{mm}$
- Plenum et injection résolues



## Calcul à froid

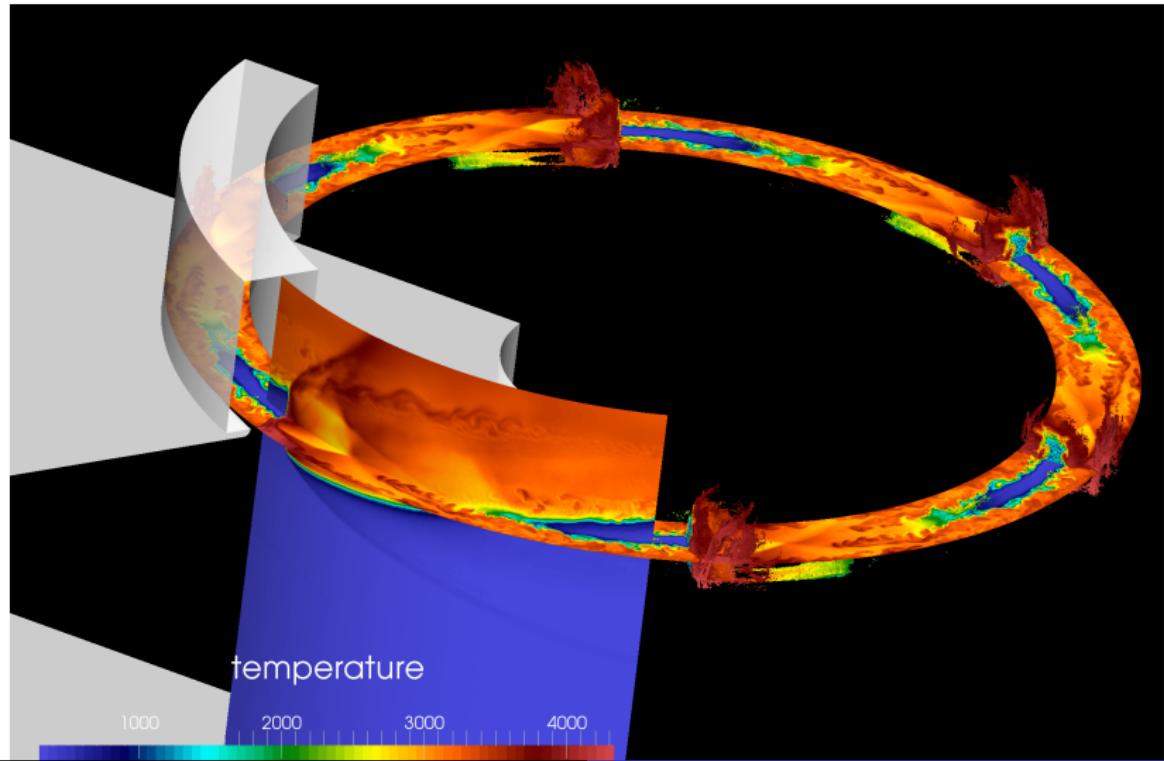


Jet sous détendu, C1



Réseau de chocs, C2

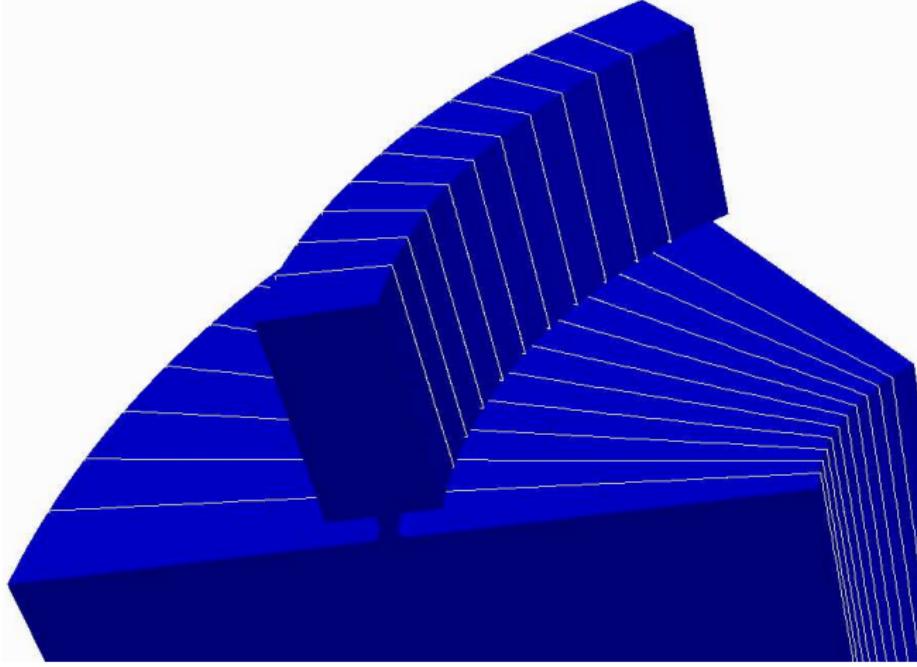
## Coupe dans le plan médiant du RDE



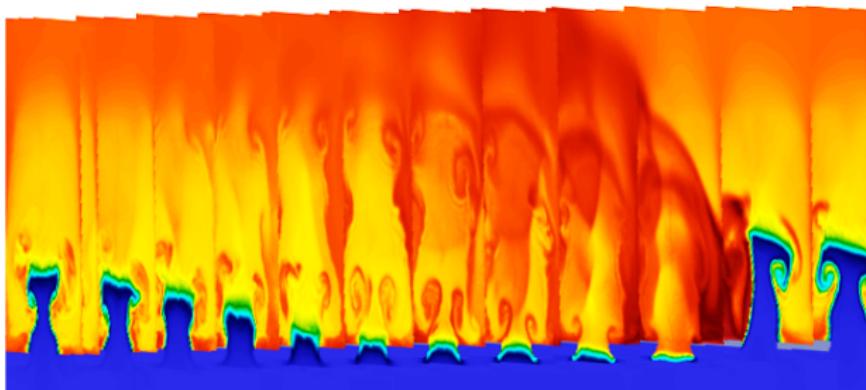
# Gradient de $\rho$ vue du dessus dans le référentiel tournant de la détonation



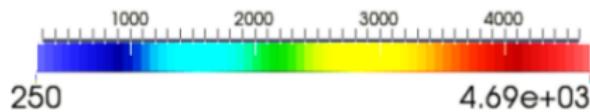
# Couplage injection-détonation



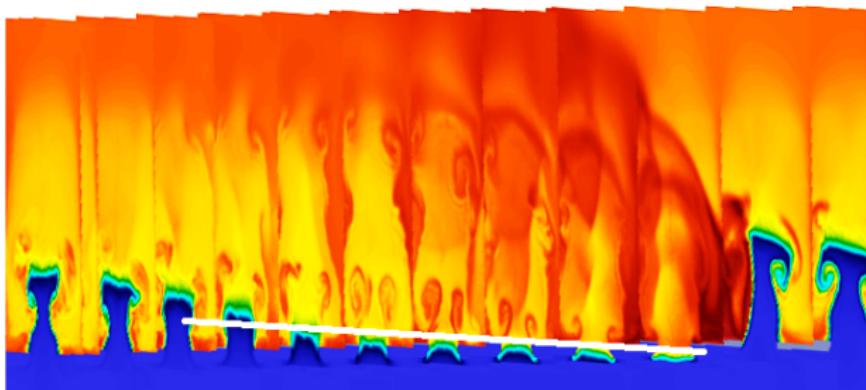
# Blocage



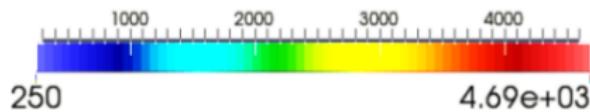
temperature



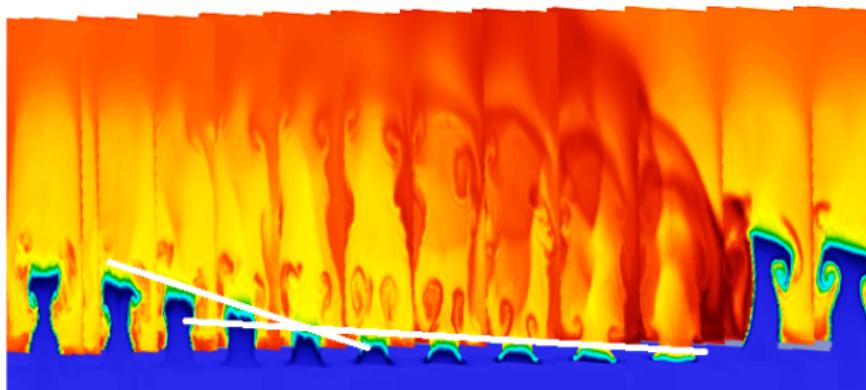
# Blogeage



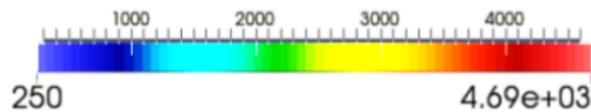
temperature



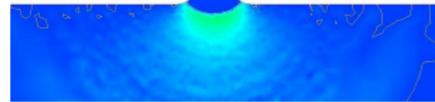
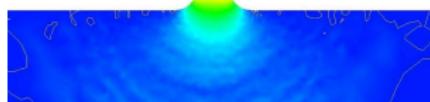
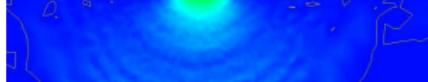
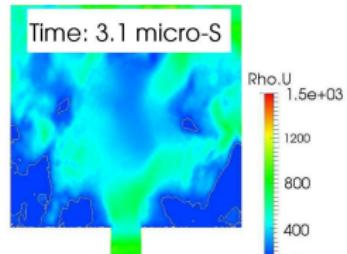
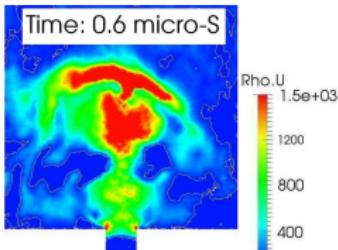
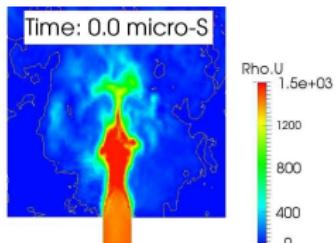
# Blocage



temperature



# Débit

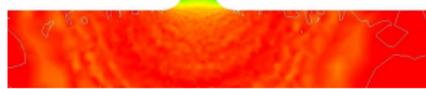
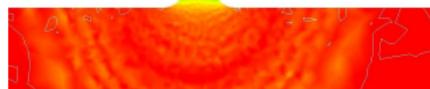
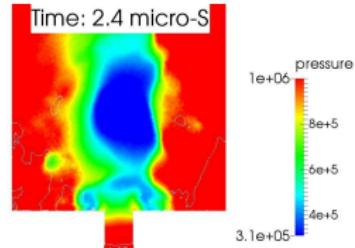
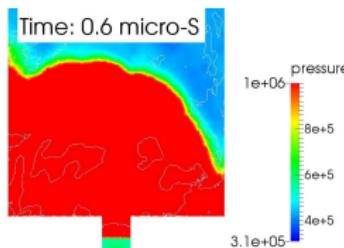
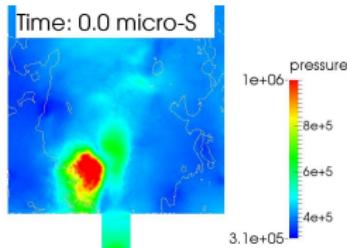


Avant la détonation.

Pendant la détonation.

Après la détonation.

# Pression



Avant la détonation.

Pendant la détonation.

Après la détonation.

## Fraction de blocage

	Débit théorique sans déto.	Débit en fonctionnement	Effet du Blocage
C1	274 g/s	125.6 g/s	-54%
C2	109.5 g/s	71.1 g/s	-35%

Y. Eude<sup>9</sup> modélise le blocage en posant une hypothèse. Si  $P_{moteur} < P_{plenum}$  il y a injection et si  $P_{moteur} > P_{plenum}$  l'injecteur se comporte comme un mur. Ne tenant pas compte de l'inversion le blocage est nécessairement plus petit (-11%).

9. Eude, Y., Davidenko, D. M., & Gokalp, I. (2011). Use of the adaptive mesh refinement for 3D simulations of a CDWRE (continuous detonation wave rocket engine). AIAA paper, 2236, 2011.

# Vitesse de déplacement de la détonation

Configuration	Vitesse au centre	Ecart
Y. Eude	2748 (m/s)	Référence
C1	2750 (m/s)	0.07%
C2	2655 (m/s)	3.5%

La vitesse de la détonation au centre est proche de celle obtenue dans le cas de référence.

- 
9. Eude, Y., Davidenko, D. M., & Gokalp, I. (2011). Use of the adaptive mesh refinement for 3D simulations of a CDWRE (continuous detonation wave rocket engine). AIAA paper, 2236, 2011.

## Part : 4 - Exploitation des résultats

### 1 Validation de détonation 1D

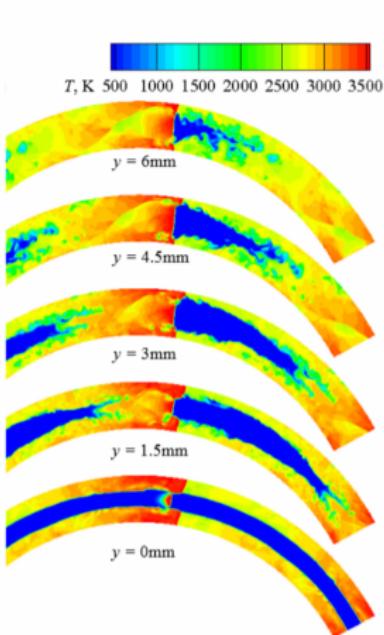
### 2 Validation sur une plaque à suie

### 3 Calcul d'un RDE

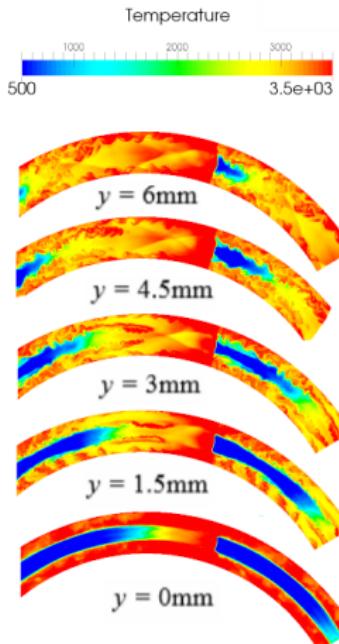
### 4 Exploitation des résultats

- Comparaison
- Etude supplémentaire

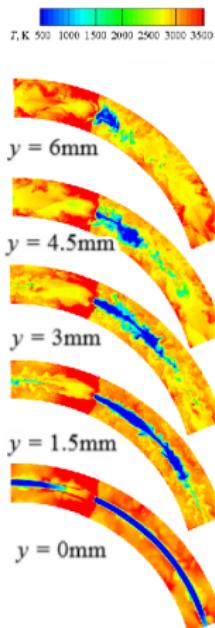
# Comparaison champs de température



Référence

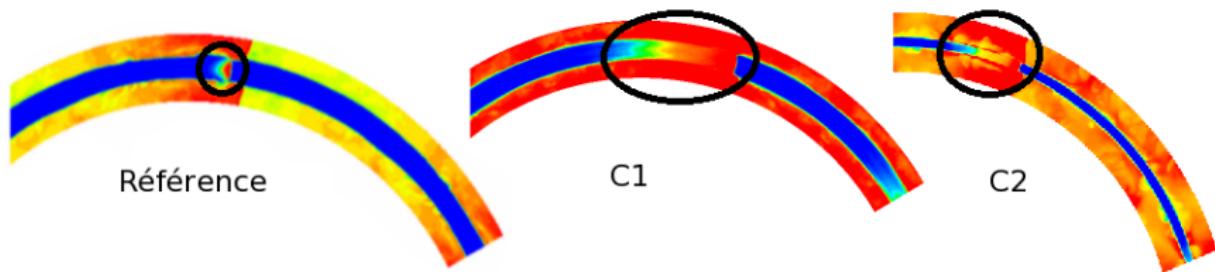


C1



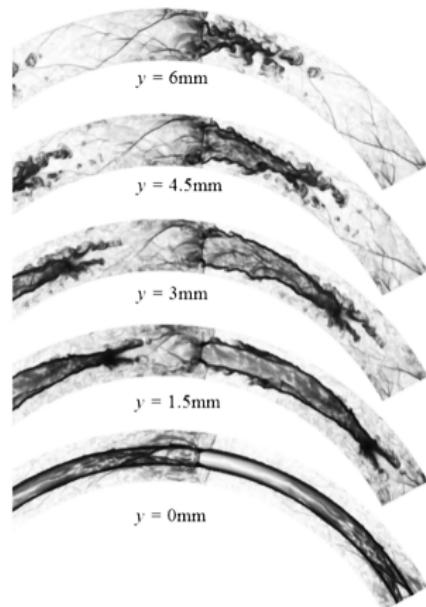
C2

## Mise en évidence du blocage

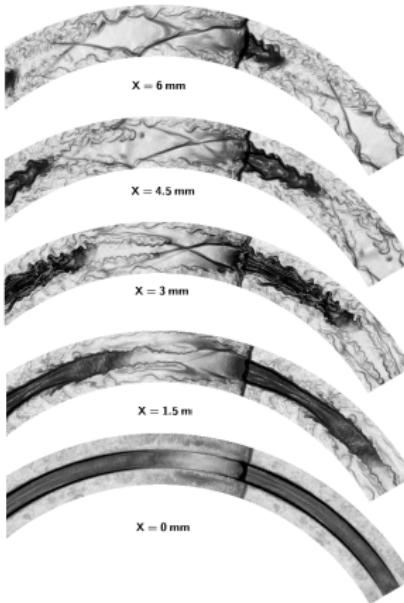


La zone de blocage est plus longue en C1 et C2 que dans le cas de référence.

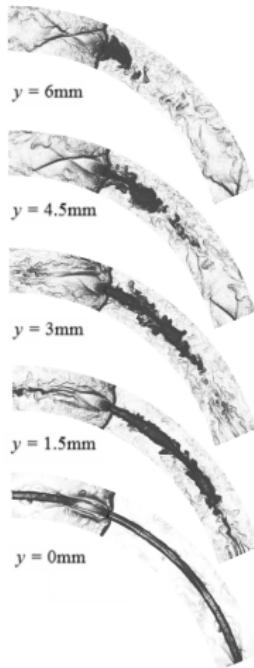
# Comparaison gradient de $\rho$



Référence

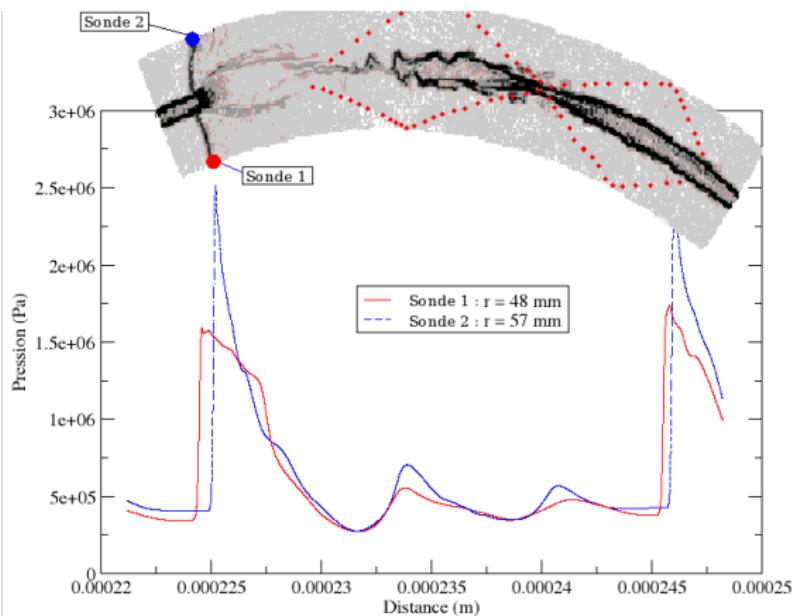


C1



C2

## Configuration C2



L'onde de choc rebondissant sur les parois est caractérisée par une surpression sur celles ci et forme un pincement au niveau de l'injection.

## Part : 4 - Exploitation des résultats

### 1 Validation de détonation 1D

### 2 Validation sur une plaque à suie

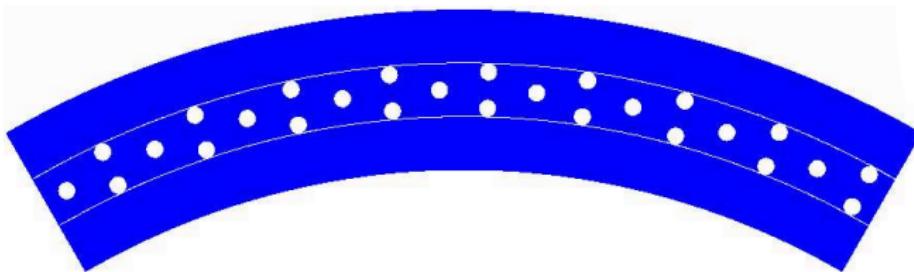
### 3 Calcul d'un RDE

### 4 Exploitation des résultats

- Comparaison
- Etude supplémentaire

## Autre simulation : Porosité résolue (C3)

Il y a 27 tuyères de Laval de 1mm de diamètre.



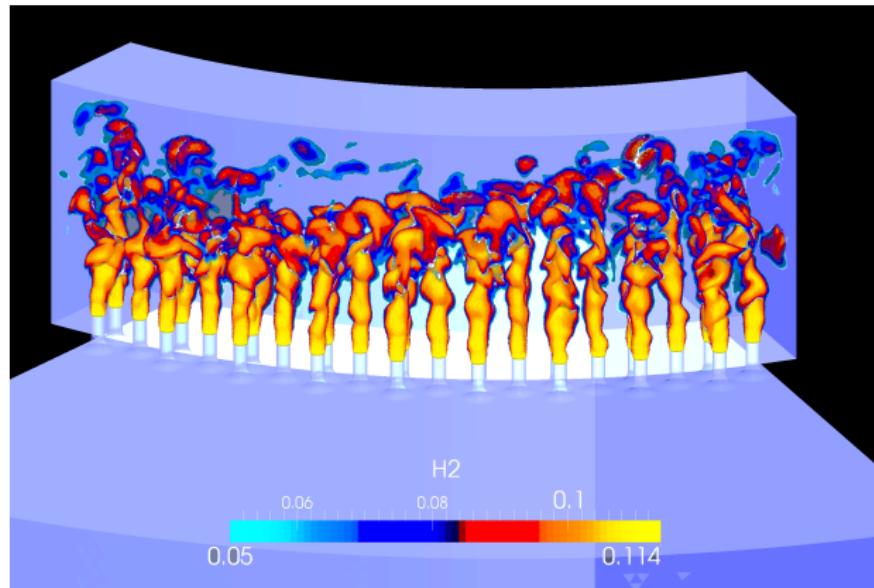
# Autre simulation : Porosité résolue (C3)

A froid

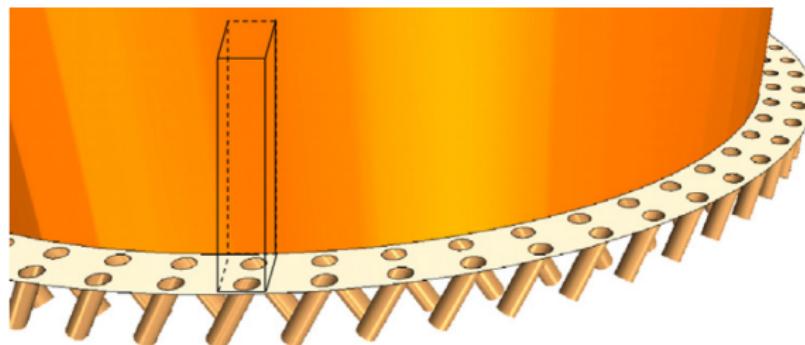
Débit égal au  
débit de référence.

A chaud

Simulation résolue  
d'une détonation  
dans un mélange  
hétérogène. La  
détonation se  
propage mais  
s'éteint au bout  
de 3 passages.



# Alternative<sup>10</sup> : alimentation non prémélangé



Publication trouvée après Etude non réactive sur l'injection non prémélangée limitée à deux injecteurs (2015).

- 
10. Gaillard, T., Davidenko, D., & Dupoirieux, F. (2015). Numerical Optimisation in Non Reacting Conditions of the Injector Geometry for a Continuous Detonation Wave Rocket Engine. *Acta Astronautica*, 111, 334–344.

# Conclusion

## Récapitulatif :

- Simulation 1D : Validation des grandeurs de Navier-Stokes.
- Simulation 2D : Vérification taille des cellules de détonation.
- Simulation 3D : Calcul d'un RDE en géométrie complexe.

## Pour aller plus loin :

- Reprendre la configuration de Davidenko.
- Simuler une détonation de kerosène.
- Comparer avec une méthode spectrale.

## Pour de plus amples informations :

Romain Bizzari

[bizzari@cerfacs.fr](mailto:bizzari@cerfacs.fr)