



HAL
open science

Présentation du Risque Hydrogène. Exemple de modélisation : écoulements Bas Mach

Stephane Gounand, Alberto Beccantini, F. Dabbene, Sergey Kudriakov,
Jean-Paul Magnaud, Henri Paillere, Etienne Studer

► To cite this version:

Stephane Gounand, Alberto Beccantini, F. Dabbene, Sergey Kudriakov, Jean-Paul Magnaud, et al..
Présentation du Risque Hydrogène. Exemple de modélisation : écoulements Bas Mach. Doctorat.
France. 2008, pp.22. hal-04116968

HAL Id: hal-04116968

<https://hal.science/hal-04116968>

Submitted on 5 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Présentation du Risque Hydrogène. Exemple de modélisation : écoulements Bas Mach.

A. Beccantini, F. Dabbène, S. Kudriakov, J.-P. Magnaud, H. Paillère, E. Studer et
S. Gounand DEN/DM2S/SFME/LTMF CEA/Saclay



Plan

1. Le risque Hydrogène

- Réacteur à Eau Pressurisée : généralités
- Accident Grave

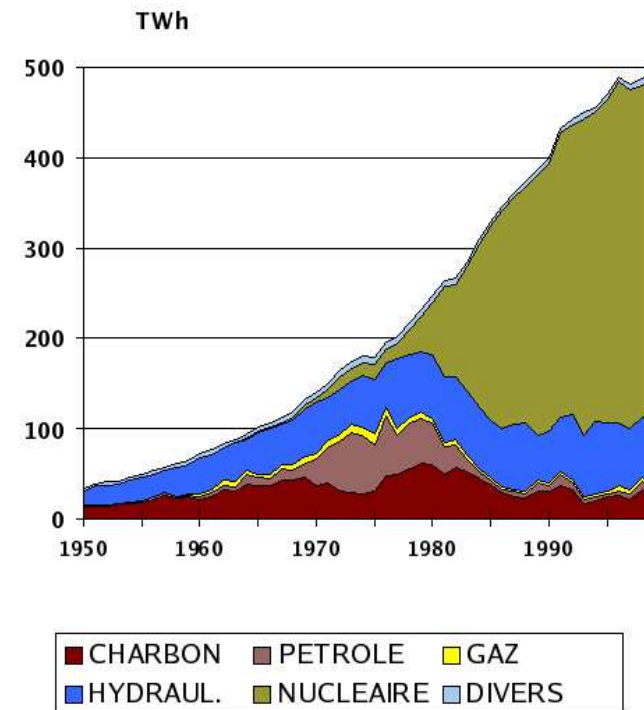
2. Modélisation des accidents graves : Distribution et Combustion

- Méthodologie et difficultés
- Modélisation des écoulements à bas nombre de Mach
- Équations de Navier-Stokes et modèle asymptotique bas Mach
- Test du modèle : influence de paramètres numériques

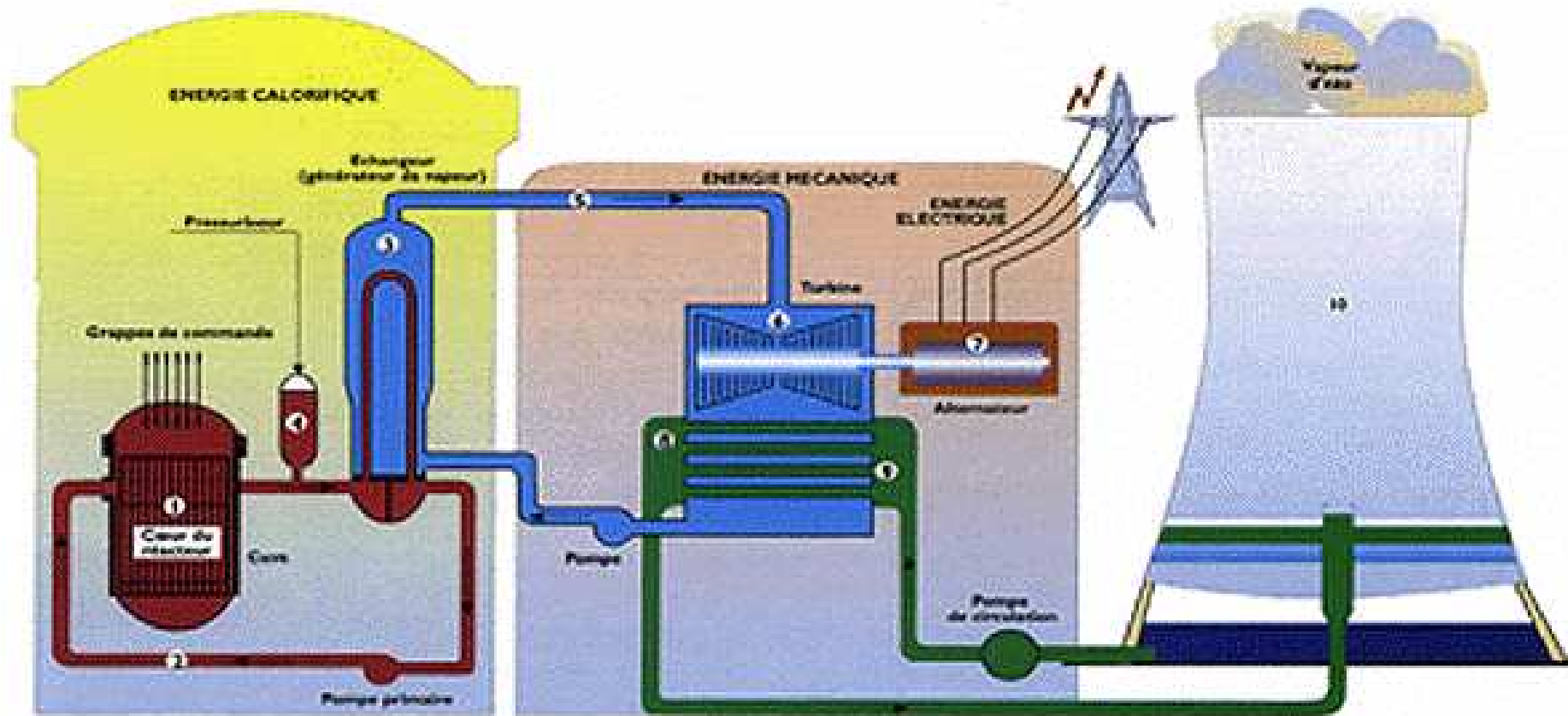


Risque Hydrogène : REP Généralités

- 58 réacteurs à eau pressurisée en France :
 1. 34 REP 900 MWe ;
 2. 20 REP 1300 MWe ;
 3. 4 REP 1450 MWe.
- 80 % de la production d'électricité, soit 61.7 GWe (01/01/99).



Risque Hydrogène : REP Principe de fonctionnement



3 barrières entre la radioactivité et l'environnement : Gaine, Circuit Primaire, Enceinte de Confinement.

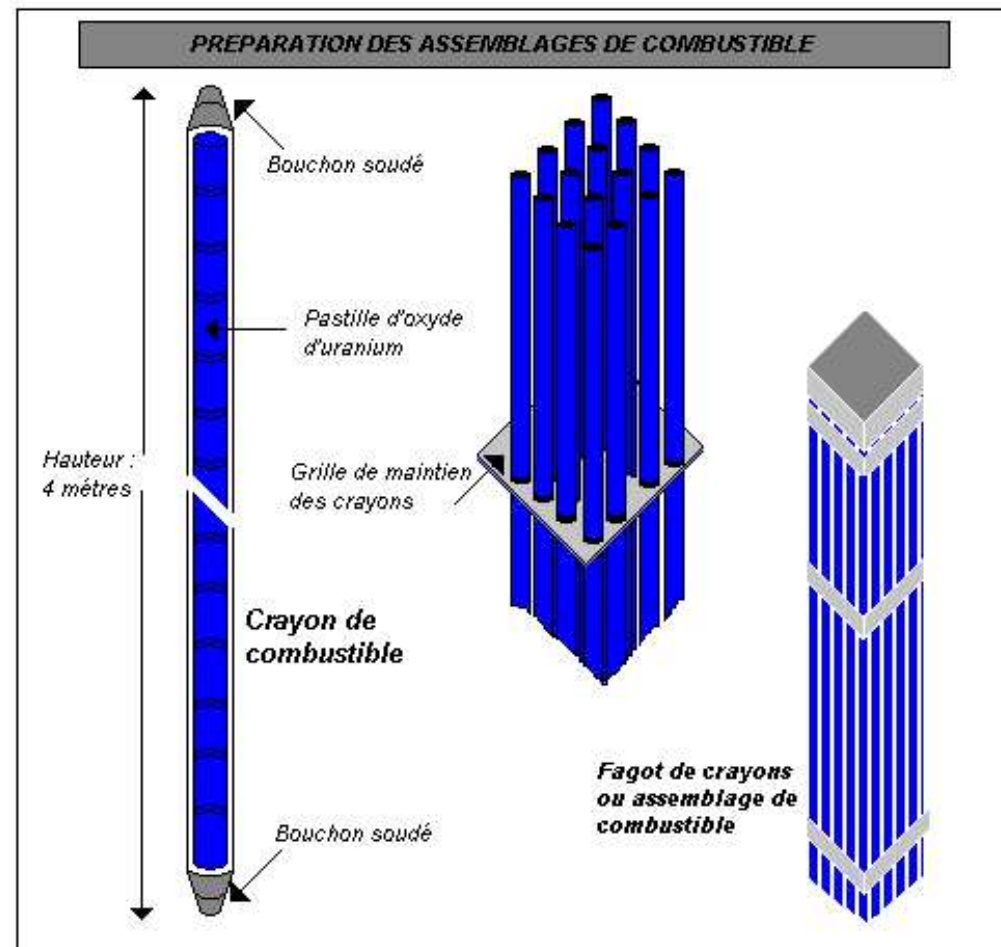
Risque Hydrogène : Barrière 1, la Gaine

Crayon combustible :

- Pastilles d' UO_2 ;
- Gaine étanche Zircaloy ;
- Pressurisation 80 bars.

Assemblage :

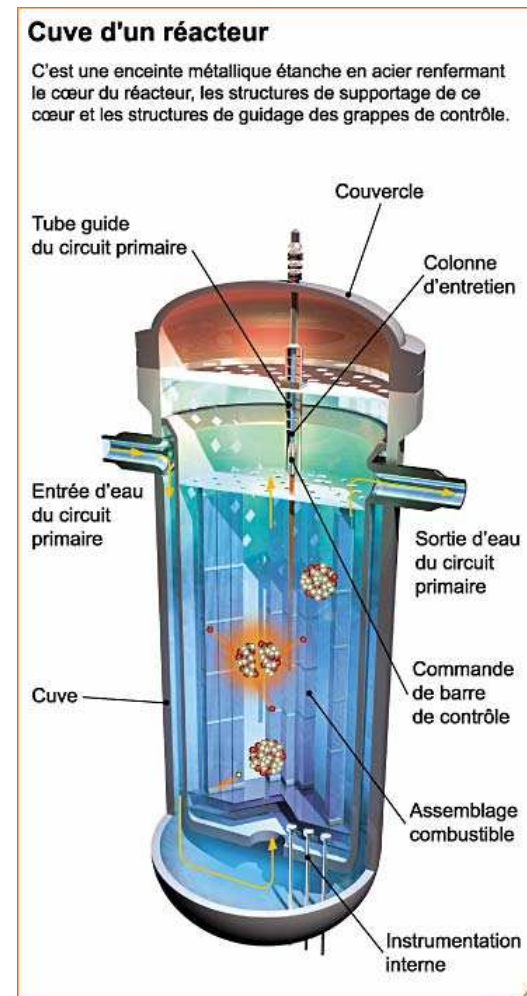
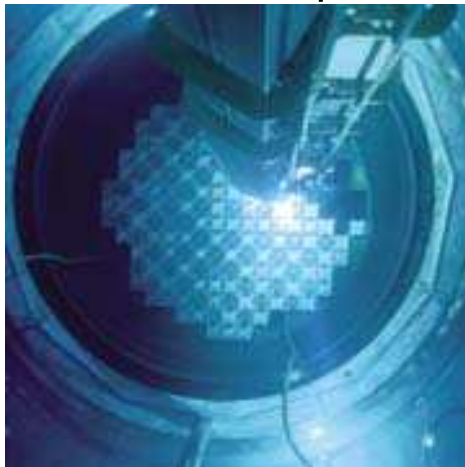
- 17x17 crayons.



Risque Hydrogène : Barrière 2, le circuit primaire

Cuve du réacteur :

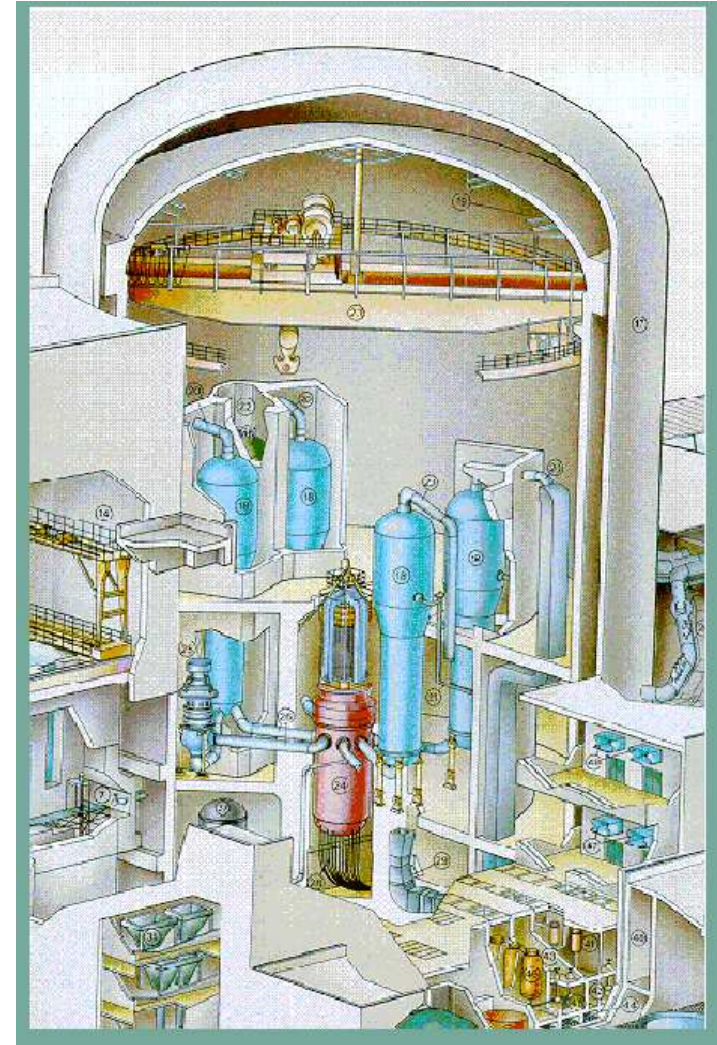
- 157 assemblages ;
- Eau (165 bar) : modérateur et caloporteur ;
- Connexion au circuit primaire.



Risque Hydrogène : Barrière 3, l'enceinte de confinement

Enceinte :

- double béton-béton ou ;
- simple béton+peau (acier, composite) ;
- volume : $\approx 50000 \text{ m}^3$;
- pression de dimensionnement : 5 bars ;
- singularités : traversées, sas.

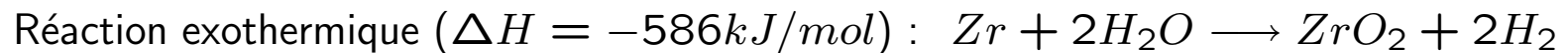


Risque Hydrogène : Accident grave

L'accident grave de type LOCA (Loss of Coolant Accident) se caractérise par la perte des deux premières barrières (gaine et circuit primaire). L'étanchéité de la troisième barrière (enceinte de confinement) doit être assurée pour ne pas relâcher de produits de fission radioactifs.

Principales phases :

- Vidange du circuit primaire : 200 m^3 d'eau.
- Dénoyage et dégradation du cœur du réacteur : oxydation des gaines en Zircaloy par la vapeur d'eau :



- **Distribution** vers l'enceinte (Air à 40° et 1 bar) de combustibles (H_2), de diluants (H_2O), d'énergie (gaz chauds, produits de fission) ;
- **Combustion** du mélange gazeux ?
- Tenue de l'enceinte ?



Risque Hydrogène : Three Mile Island



Accident grave de Three Mile Island :

- REP 900 MWe quasi-identique aux REP français ;
- Accident le 28 mars 1979 ;
- Fonctionnement défectueux d'équipements et réactions inappropriées des opérateurs.

Chronologie :

- $T = 0 \text{ s}$: perte de la source froide au secondaire, arrêt d'urgence ;
- $T = 3 \text{ s}$: ouverture vanne de décharge du pressuriseur, brèche sur le circuit primaire ;
- $T = 1 \text{ h}$: début de fonte du cœur ;
- $T = 10 \text{ h}$: pic de pression (1.9 bars relatifs) sans conséquences sur l'enceinte de confinement.



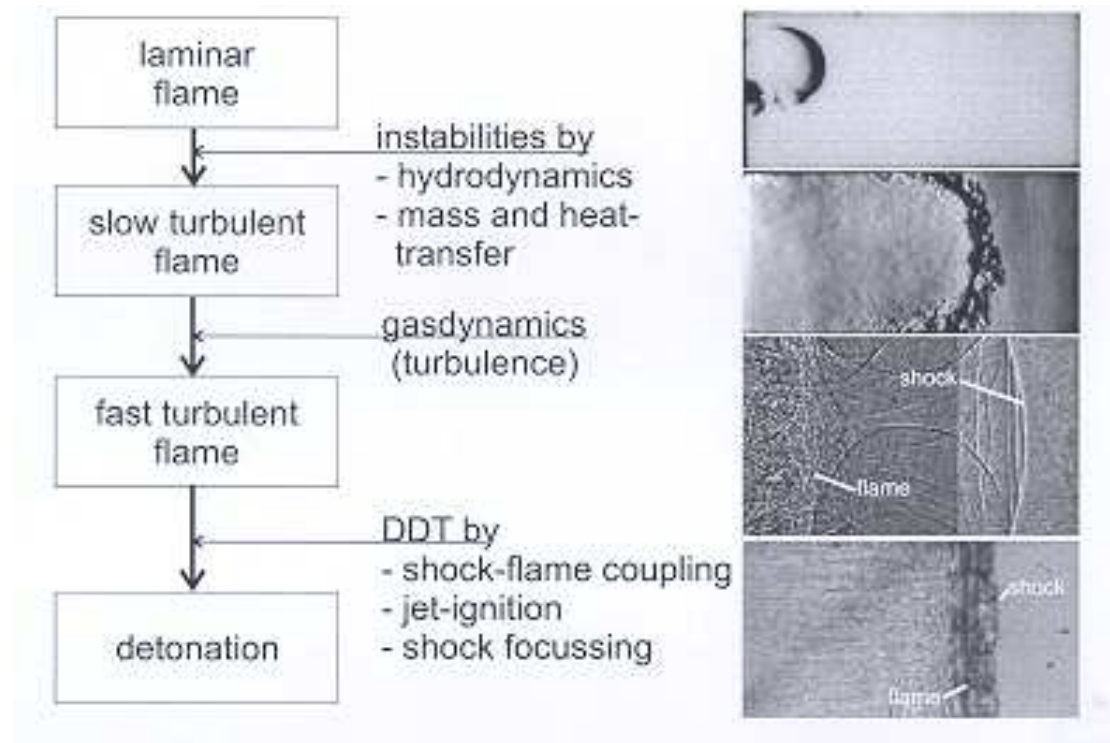
Modélisation : méthodologie

- Développement d'outils numériques au CEA pour simuler :
 - **Distribution**/dispersion d' H_2 dans les milieux considérés (enceinte de réacteur, bâtiments, milieux semi-confinés) ;
 - Prise en compte de différents moyens de mitigation (réduction) des risques : recombineurs hydrogène, inertage, ventilation, etc. . .
 - Différents modes de **combustion** (déflagration \longrightarrow détonation).
- Challenge numérique : différents régimes d'écoulements (quasi-incompressible à compressible), multi-espèces, réactif ou non et large gammes d'échelles de temps ($ms \rightarrow h$) et d'espace ($mm \rightarrow m$).
- Outils expérimentaux pour la validation.



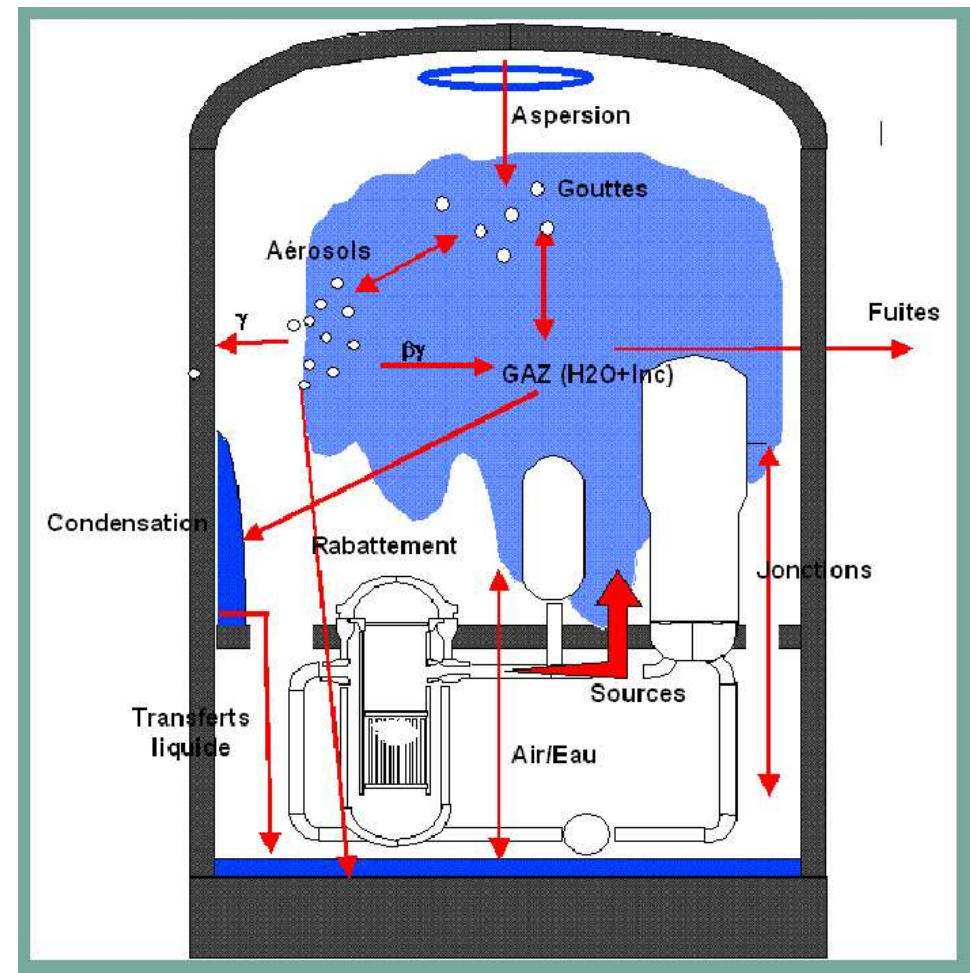
Modélisation : combustion

- Chimie de l'hydrogène ;
- Type de combustion : déflagration (subsonique) ou détonation (supersonique), transition déflagration-détonation ;
- Influence du confinement.



Modélisation : distribution

- Différents milieux : gaz, liquide et aérosols en suspension, murs, puisards ;
- Différentes échelles de longueur : injection, géométrie turbulence ;
- Différentes échelles de temps : injection, convection, diffusion ;
- Transferts de masse et d'énergie entre ces milieux ;
- Convection naturelle, mixe ou forcée ;
- Condensation, évaporation.

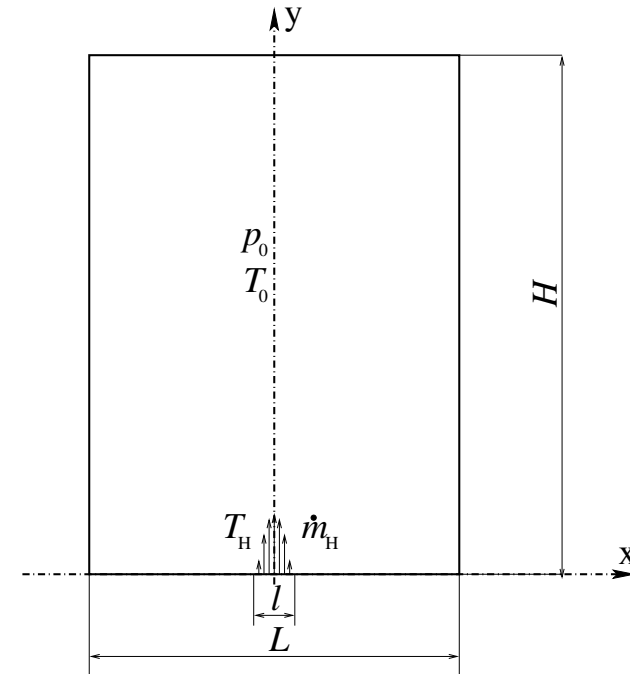


Modélisation : cas-test

[BSG⁺07] A. Beccantini, E. Studer, S. Gounand, J.-P. Magnaud, T. Kloczko, C. Corre, and S. Kudriakov. Numerical simulations of an transient injection flow at low Mach number regime. *Accepted for publication in International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2007

Motivations :

- cas-test de validation pour les écoulements bas-mach instationnaires laminaires ;
- comparaison de différentes approches : compressible, modèle asymptotique ;
- comparaison de différents solveurs : Volumes Finis, Éléments Finis ;
- influence de certains paramètres numériques : pas de temps, prise en compte de la non-linéarité.



l, L, H	0.2, 3, 7	m
p_0, T_0	1, 300	bar, K
\dot{m}_H, T_H	1, 600	kg/m ² /s, K
Re, Pr	40, 0.71	
g	9.81	m/s ²



Modélisation : équations de Navier-Stokes compressible

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{Masse :} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \\
 \text{QDM :} \quad \frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u} + p \underline{I}) = \rho \vec{g} + (\vec{\nabla} \cdot \underline{\tau}) \\
 \text{Énergie :} \quad \frac{\partial \rho e_t}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} h_t) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + \rho \vec{g} \cdot \vec{u} + \vec{\nabla} \cdot (\underline{\tau} \cdot \vec{u}) \\
 \text{Équation d'état :} \quad p = \rho R T = (\gamma - 1) \rho \left(e_t - \frac{1}{2} \vec{u} \cdot \vec{u} \right)
 \end{array} \right.$$

$$\text{Loi de comportement : } \underline{\tau} = \mu \left(\vec{\nabla} \otimes \vec{u} + (\vec{\nabla} \otimes \vec{u})^T - \frac{2}{3} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) \underline{I} \right),$$



Modélisation : équations de Navier-Stokes adimensionnées

Échelles de références : ρ_{ref} , u_{ref} , l_{ref} et p_{ref} , d'où : $t_{\text{ref}} = \frac{l_{\text{ref}}}{u_{\text{ref}}}$, $e_{\text{ref}} = \frac{P_{\text{ref}}}{\rho_{\text{ref}}}$ et $T_{\text{ref}} = \frac{e_{\text{ref}}}{c_v}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + \vec{\nabla}^* \cdot (\rho^* \vec{u}^*) = 0 \\ \frac{\partial \rho^* \vec{u}^*}{\partial t^*} + \vec{\nabla}^* \cdot \left(\rho^* \vec{u}^* \otimes \vec{u}^* + \frac{1}{\gamma M^2} p^* \underline{I} \right) = \frac{\vec{g}}{g} \frac{1}{\text{Fr}} \rho^* + \frac{1}{\text{Re}} \left(\vec{\nabla}^* \cdot \underline{\tau}^* \right) \\ \frac{\partial \rho^* e_t^*}{\partial t^*} + \vec{\nabla}^* \cdot ((\rho^* e_t^* + p^*) \vec{u}^*) = \frac{\gamma}{\text{RePr}} \vec{\nabla}^* \cdot (\vec{\nabla}^* T^*) + \frac{\gamma M^2 \vec{g}}{\text{Fr} g} \cdot \rho^* \vec{u}^* + \frac{\gamma M^2}{\text{Re}} \vec{\nabla}^* \cdot (\underline{\tau}^* \cdot \vec{u}^*) \\ p^* = (\gamma - 1) \rho^* T^* = (\gamma - 1) \rho^* \left(e_t^* - \frac{\gamma M^2}{2} \vec{u}^* \cdot \vec{u}^* \right) = (\gamma - 1) \rho^* e^* \end{array} \right.$$

Mach



$$M^2 = \frac{u_{\text{ref}}^2 \rho_{\text{ref}}}{\gamma P_{\text{ref}}} = \frac{1}{\gamma \text{Eu}}$$

Reynolds



$$\text{Re} = \frac{u_{\text{ref}} \rho_{\text{ref}} l_{\text{ref}}}{\mu}$$

Prandtl



$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda}$$

Froude



$$\text{Fr} = \frac{u_{\text{ref}}^2}{g l_{\text{ref}}}$$



Modélisation : développement asymptotique

- Développement asymptotique (M) des variables :

$$a^* = a_0^* + Ma_1^* + M^2a_2^* + O(M^3)$$

- Hypothèses :

$$\frac{\gamma M^2}{Fr} \ll 1 \text{ et } \frac{\gamma M^2}{Re} \ll 1,$$

- La conservation de la Quantité de Mouvement donne :

$$-\frac{1}{\gamma M^2} \vec{\nabla}^* p_0^* = 0 \text{ et } -\frac{1}{\gamma M} \vec{\nabla}^* p_1^* = 0,$$

soit :

$$p^*(\vec{r}^*, t^*) = (p_0^*(t^*) + Mp_1^*(t^*)) + M^2p_2^*(\vec{r}^*, t^*) + O(M^3)$$

- D'où la décomposition en pression thermodynamique P^* et pression dynamique p''^* :

$$p^*(\vec{r}^*, t^*) = P^*(t^*) + p''^*(\vec{r}^*, t^*) \text{ avec } p''^*(\vec{r}^*, t^*) = O(M^2)$$



Modélisation : équations Bas Mach

- Inconnues : $\vec{u}(\vec{r}, t)$, $T(\vec{r}, t)$, $p''(\vec{r}, t)$, $\rho(\vec{r}, t)$ et $P(t)$.
- Équations aux dérivées partielles (bleu : termes non présents en incompressible)

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \rho \right) \\ \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} = -\vec{\nabla} p'' + \vec{\nabla} \cdot \underline{\tau} + (\rho - \rho_0) \vec{g} \\ \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + \frac{dP}{dt} \end{array} \right.$$

- Équation d'état :

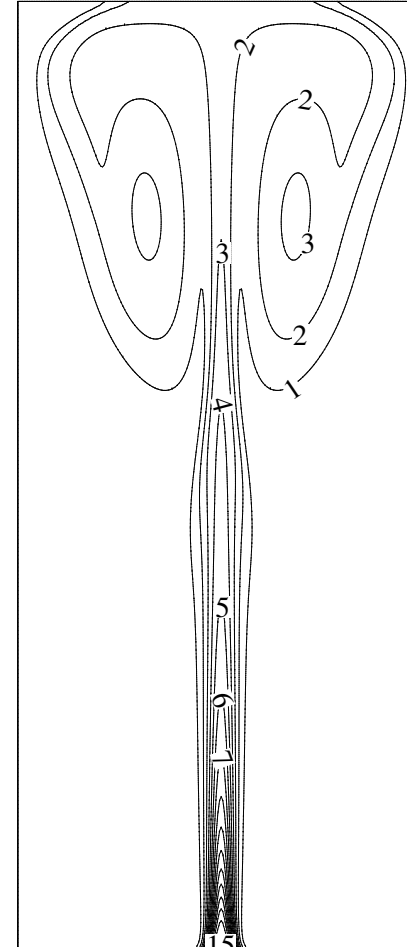
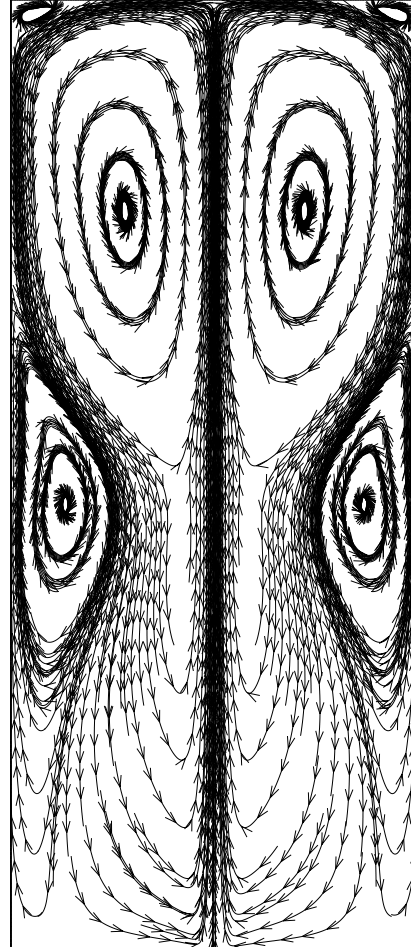
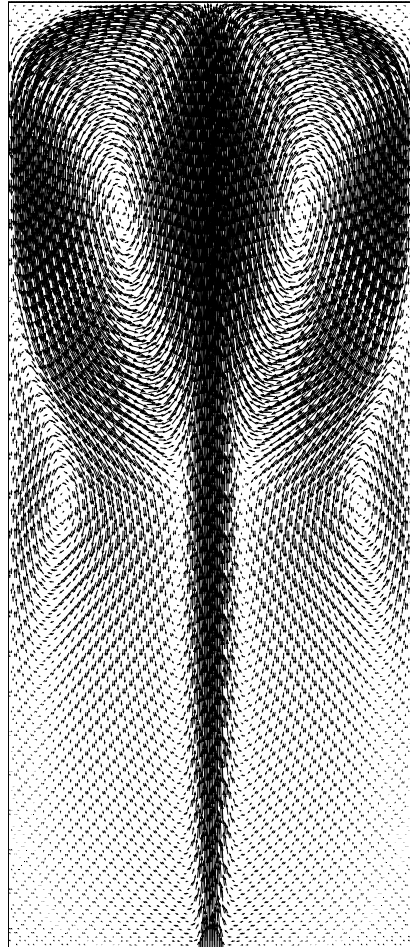
$$\rho(\vec{r}, t) = \frac{P(t)}{RT(\vec{r}, t)}. \quad (1)$$

- Équation intégrale (bilan de masse + équation d'état) :

$$\frac{P}{R} \int_{\Omega} \frac{1}{T} dV = \rho_0 LH + \dot{m}_H t.$$



Modélisation : résultats



15	582
14	564
13	546
12	528
11	510
10	492
9	474
8	456
7	438
6	420
5	402
4	383
3	365
2	347
1	329

Vitesses, tangentes aux vitesses et température à $t = 6$ s.

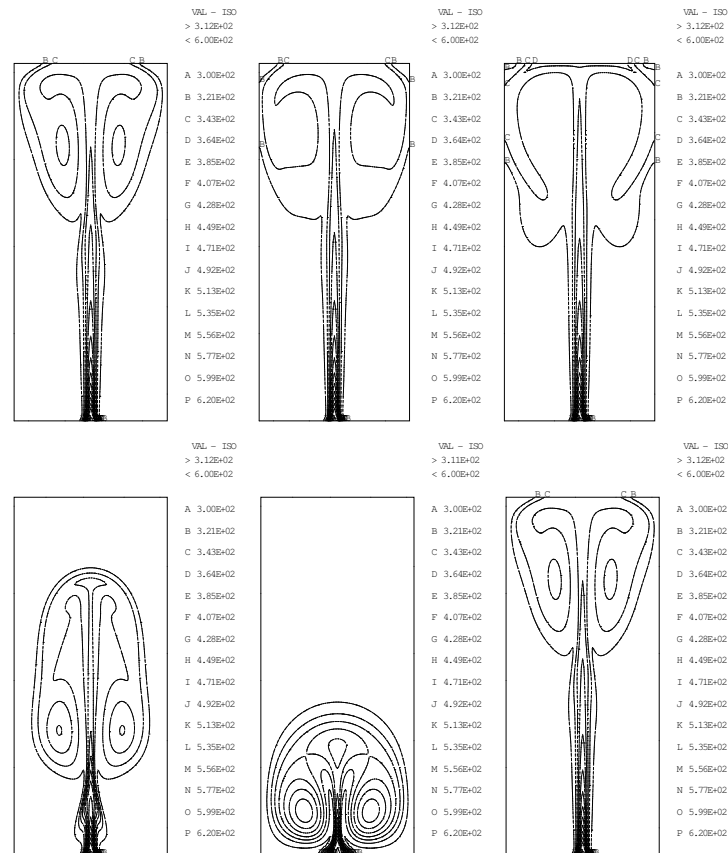


Modélisation : résultats (II)

- Comparaison de solveurs compressibles (VF) et asymptotiques (EF) : résultats comparables mais temps CPU élevés (30h pour 6s de temps physique en 2D)
- Stratégies pour diminuer le CPU à moindre coût :
 1. augmenter le pas de temps ;
 2. ne pas converger sur la non-linéarité \approx explicitation de la non-linéarité.



Modélisation : étude paramétrique



Températures : 1) référence, 2) ordre 1 en temps, 3) CFL=20, 4) CFL=2, pas d'itération non-linéaires, 5) CFL=20, pas d'itération non-linéaires, 6) Matrices masses diagonalisées



Modélisation : conclusion

- Proposition d'un cas de référence pour les écoulements Bas Mach instationnaires ;
- Comparaison de solveurs compressibles (VF) et asymptotiques (EF) : résultats comparables mais temps CPU élevés ;
- Stratégies simples pour diminuer le temps CPU \Rightarrow dégradation des résultats ;
- Pistes d'amélioration : travail sur les solveurs compressibles (matrix-free) et asymptotiques (méthodes de projection, meilleurs solveurs linéaires).



Conclusion

Merci de votre attention.

