

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Simulations numériques des incendies avec le logiciel de calcul ISIS

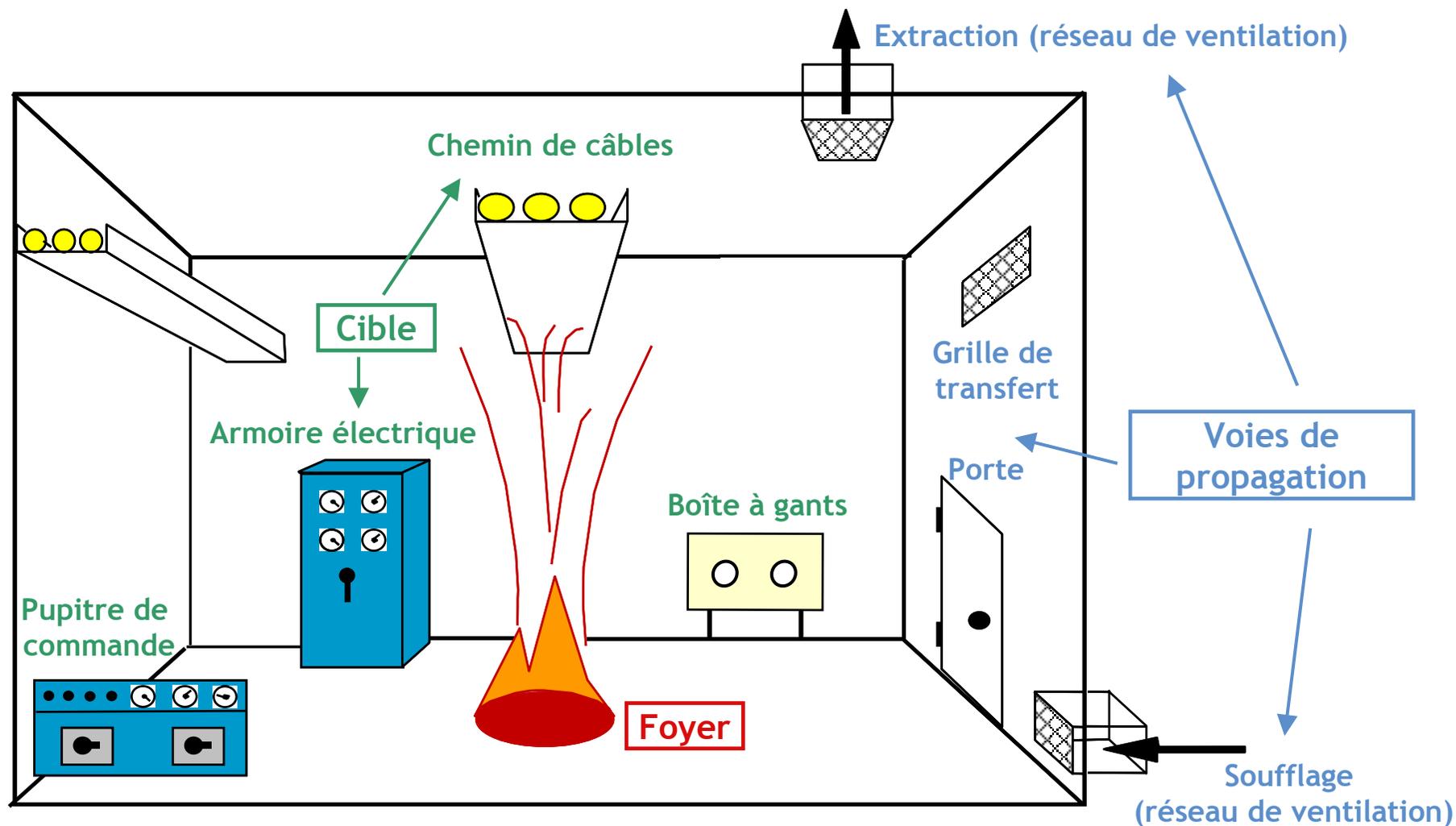
S. Suard

IRSN/DPAM/SEMIC

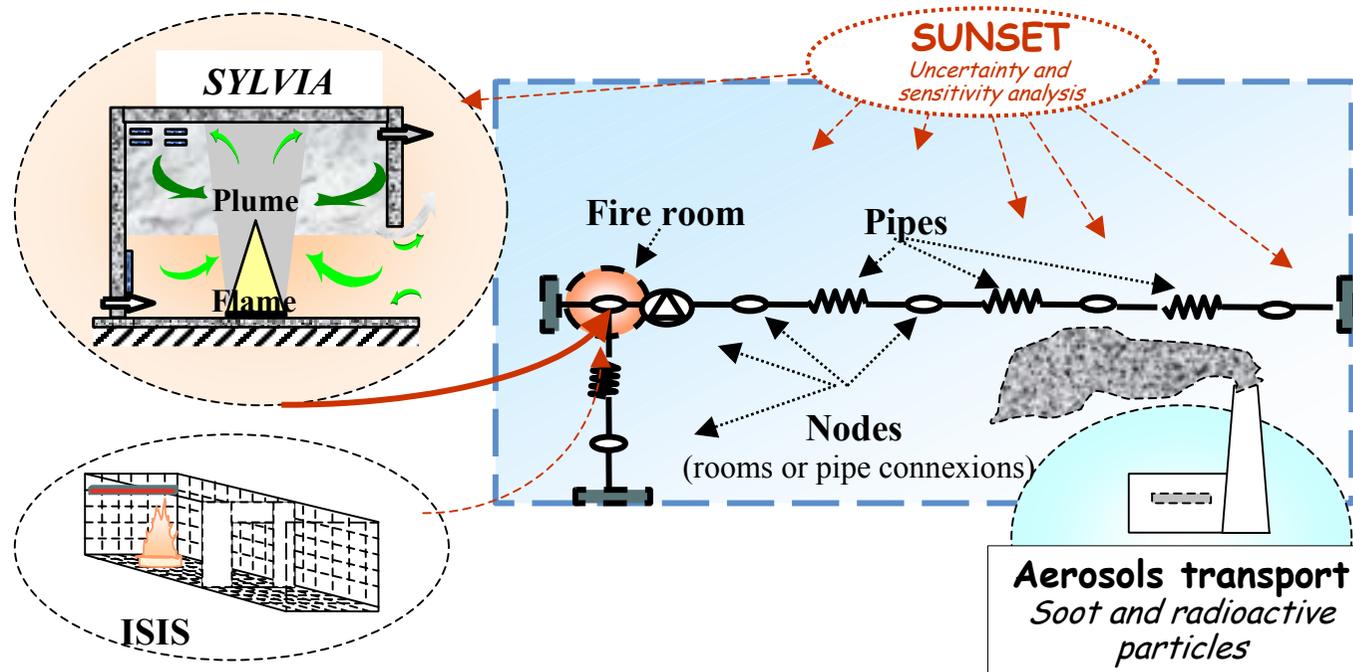
Laboratoire d'étude de l'Incendie et de développement de
Méthodes pour la Simulation et les Incertitudes

GDR Incendies, faculté des sciences de Corte, 6-7 juin 2007

La problématique : Les feux en milieu confiné et ventilé (naturelle et/ou mécanique)



Approche adoptée par l'IRSN



- Modélisation simplifiée (à zones) ou détaillée (3-D) des locaux
- Modélisation simplifiée (1-D) du réseau de ventilation avec lois de comportement des équipements du réseau et critères de dysfonctionnement des équipements de sectorisation

Le code à champs ISIS

(Incendie **S**Imulé pour la **S**ûreté)

- Écoulements incompressibles (Navier-Stokes)
- Écoulements incompressibles et dilatables (N-S + enthalpie + $\rho T = \text{cte}$)
- Écoulements à bas nombre de Mach (N-S + enthalpie + $P_{th} = \rho RT$)

- Modèle de turbulence à 2 équations de type RANS :
 - ✓ Énergie cinétique turbulente (k)
 - ✓ Taux de dissipation de l'énergie (ε)
 - ✓ Prise en compte des effets de gravité
 - ✓ Loi de paroi analytique

- Combustion turbulente pilotée par le mélange turbulent
 - ✓ modèle Eddy Break-up (Magnussen et Hjertager)
 - ✓ modèle PDF (Probability Density Function)

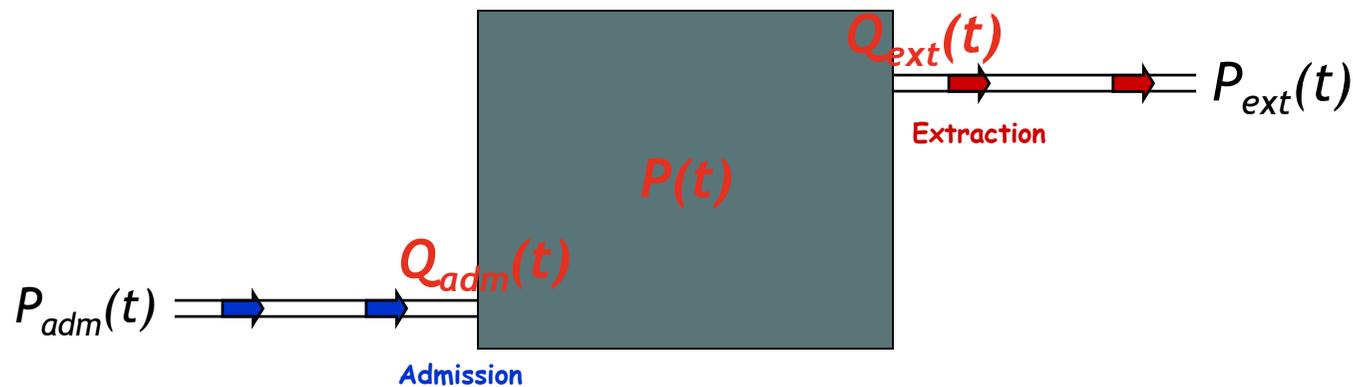
- Transferts radiatifs
 - ✓ modèle simplifié de Markstein
 - ✓ modèle aux Harmoniques Sphériques (approximation P_1)

- Conduction dans les parois
 - ✓ Équation de Fourier 1D

➤ Aéraulique des locaux

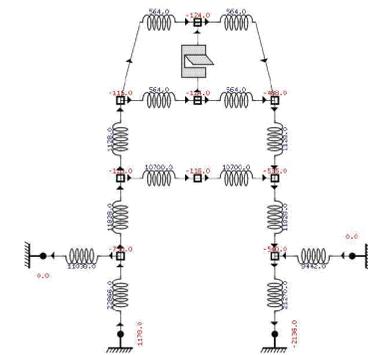
Détermination :

- ✓ des débits d'admission et d'extraction
- ✓ de la pression thermodynamique du local



➤ Les pressions d'admission et d'extraction sont soit :

- ✓ fixées par l'utilisateur
- ✓ déterminées par l'expérience
- ✓ déterminée par le code à zone SYLVIA



Méthodes Numériques

- Discrétisation des équations de Navier-Stokes par la méthode des éléments finis $(\tilde{Q}_1 - P_0)$
- Discrétisation des équations de transport de scalaire par la méthode des volumes finis
- Schémas d'approximations spatiales du 1^{er} et du 2nd ordre
- Schéma d'intégration en temps semi-implicite
- Bibliothèques parallèles, code testé sur 30 processeurs

□ ISIS : un applicatif de la plate-forme PELICANS

mailleurs :

- Em2c (INRIA)
- Mefisto (PARIS VI)
- GAMBIT (FLUENT)
- GMSH

Post-processing :

- TIC
- Meshtv (LLNL)
- OpenDX (FLUENT)
- GMV
- PARAVIEW

➤ programmation très concise

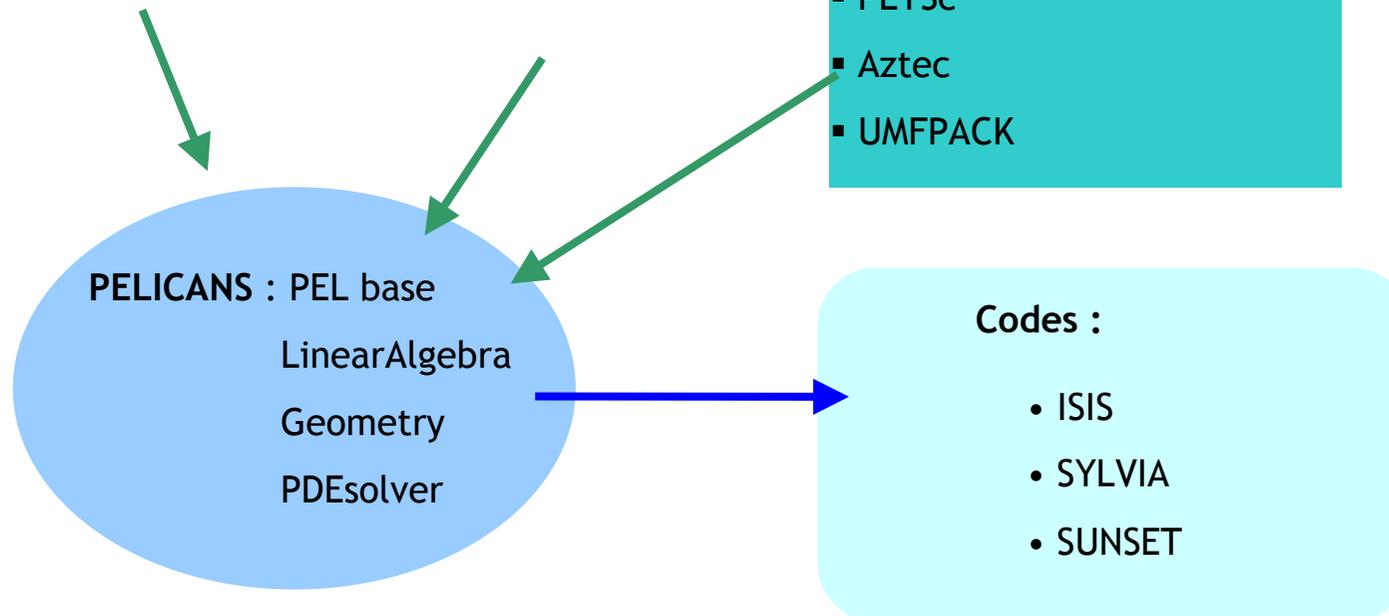
- (moins de 10 000 instruction),
- très structurée, forte évolutivité

➤ large gamme de pré et post-processing

➤ parallélisme basé sur l'utilisation de PETSC

Linear Algebra librairies :

- PETSc
- Aztec
- UMFPACK

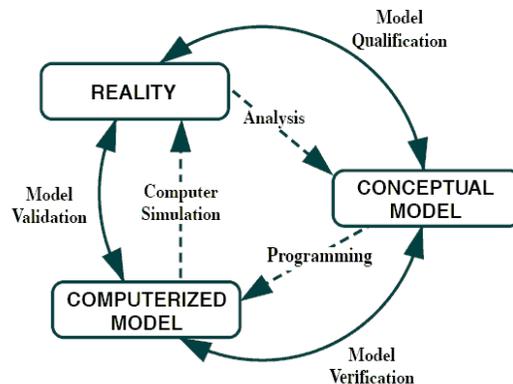


□ Bibliographie

- [1] F. Babik, T. Gallouët, J.-C. Latché, S. Suard, D. Vola, *On two fractional step finite volume and finite element schemes for reactive low Mach number flows*, FVCA4, Marrakech, 2005.
 - [2] S. Suard, L. Audouin, F. Babik, L. Rigollet, J.-C. Latché, *Verification and Validation of the ISIS CFD code for fire simulation*, ISO workshop on assessment of calculation methods for FSE, San-Antonio, 2006.
 - [3] T. Gallouët, R. Herbin, J.-C. Latché, *Analysis of a finite volume scheme for the P1 radiative transfer model*, soumis, 2007.
 - [4] T. Gallouët, L. Gastaldo, R. Herbin, J.-C. Latché, *An unconditionally stable pressure correction scheme for compressible barotropic Navier-Stokes equations*, soumis, 2007.
- A rédiger en 2007 :
- [5] T. Gallouët, J.-C. Latché, S. Suard, *On the finite volume discretization of some simple models for chemical species transport in reactive flows*.
 - [6] D. Vola, F. Babik, J.-C. Latché, *A L^2 -stable finite-volume-like discretization of the advection operator for non-conforming finite element flow solvers*.
 - [7] D. Vola, F. Babik, S. Suard, J.-C. Latché, *A well-balanced discretization of the forcing term for non-conforming finite element flow solvers*.

Vérification et Validation du code

- Les deux grands principes nécessaires pour évaluer la crédibilité d'une simulation numérique sont la vérification et la validation (V&V). Méthodologies développées par le DoD et l'AIAA
- La vérification décrit le processus déterminant la précision de la simulation relative à un modèle conceptuel
- La validation compare la précision de la solution d'une simulation par rapport à une réalité.



Phases of Modeling and Simulation

[Schlesinger, AIAA,...]

Processus de Vérification

➤ Vérification avec une solution analytique :

La solution du système d'équations à résoudre est connue analytiquement. L'écoulement est généralement laminaire et incompressible.

➤ Vérification avec une solution manufacturée :

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir vérifier chaque équation aux dérivées partielles implémentées dans le code.

➤ Vérification avec un benchmark numérique :

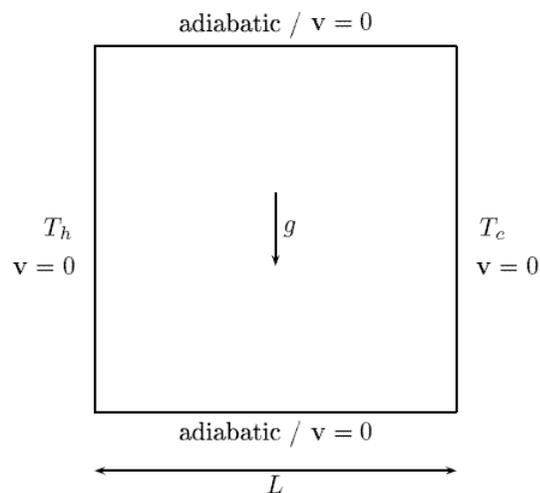
Les solutions du benchmark doivent être publiées dans la littérature. Le problème physique simple, généralement bi-dimensionnel et laminaire est résolu par plusieurs codes de calcul possédant chacun des méthodes numériques performantes et différentes.

Matrice de Vérification

- Convection d'un créneau
- Advection-diffusion
- Conduction dans les murs
- Écoulement de Poiseuille
- Cavité entraînée
- Vortex de Green-Taylor
- Navier-Stokes à masse volumique variable
- Convection naturelle
- Transport radiatif
- Transport turbulent
- Couplage à un réseau de ventilation
- ...

Exemple : Cavité chauffée différemment à haut nombre de Rayleigh

- Écoulement stationnaire, laminaire et faiblement compressible
- Domaine de calcul : cavité $[0,L] \times [0,L]$



- Système d'équations :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} &= 0 \\ \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) &= -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + (\rho - \rho_0) \mathbf{g} \\ \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} h &= \frac{dP_{th}}{dt} + \nabla \cdot \left(\frac{\mu}{Pr} \nabla h \right) \\ \rho &= \frac{P_{th}}{RT} \end{aligned}$$

- paramètres

$$Ra = Pr \frac{g \rho_0^2 (T_h - T_c) L^3}{T_0 \mu_0^2} = 10^6$$

$$\varepsilon = \frac{T_h - T_c}{T_h + T_c} = 0.6$$

Paramètres numériques :

➤ Maillage uniforme : 40×40 , 80×80 , ..., 560×560

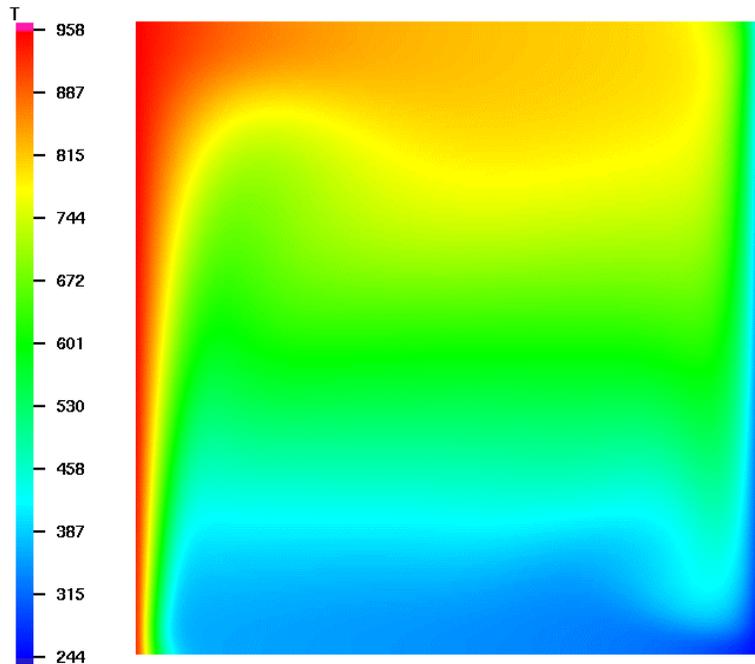
Intégration en temps	$\Delta t = 0.05 \text{ s}$
Temps final	50 s (critère de convergence $< 10^{-5} \Delta t$)
Algorithme	semi-implicite
Discrétisation temporelle	Premier ordre, Euler
Discrétisation spatiale	NS : formulation éléments-finis
	Énergie : approximation hybride

Résultats: nombre de Nusselt moyen, pression thermodynamique

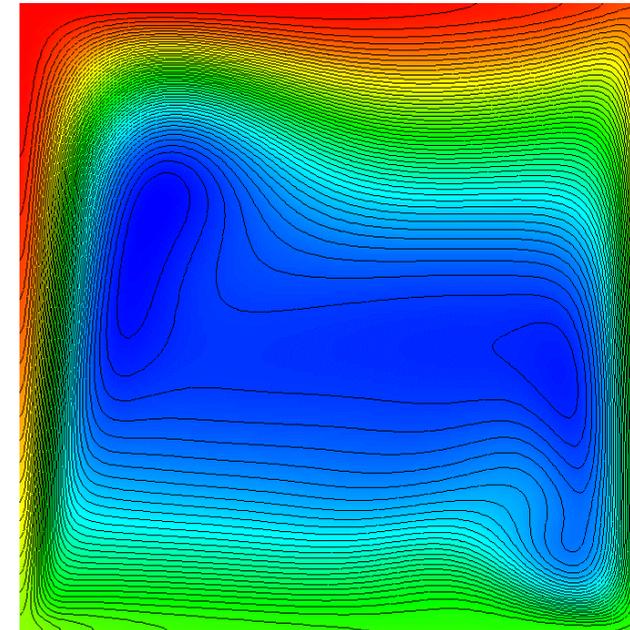
$$Nu(y) = \frac{L}{k_0(T_h - T_c)} k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_w$$

et

$$\langle Nu \rangle_h + \langle Nu \rangle_c = 0$$



Température



Fonction de courant

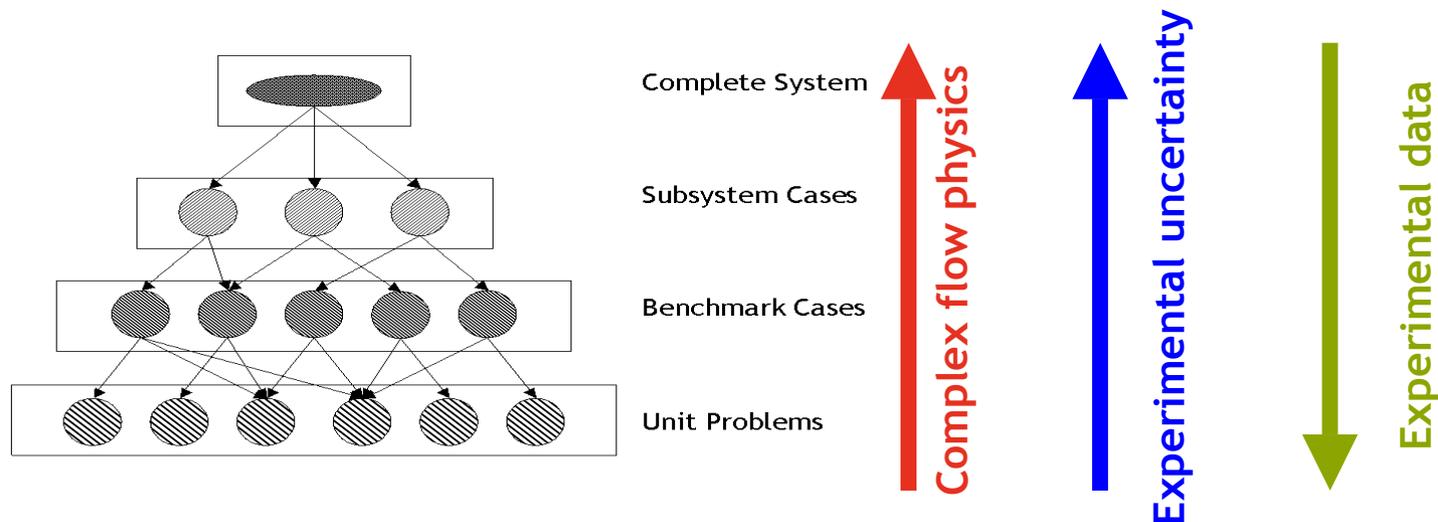
Maillage	80 x 80	240 x 240	400 x 400	560 x 560
Nombre de Nusselt	8.83e-03	1.24e-03	4.89e-04	2.59e-04
Pression	9.89e-03	1.4e-03	5.99e-4	3.60e-04

Erreur relative pour le nombre de Nusselt moyen et la pression thermodynamique

Processus de Validation

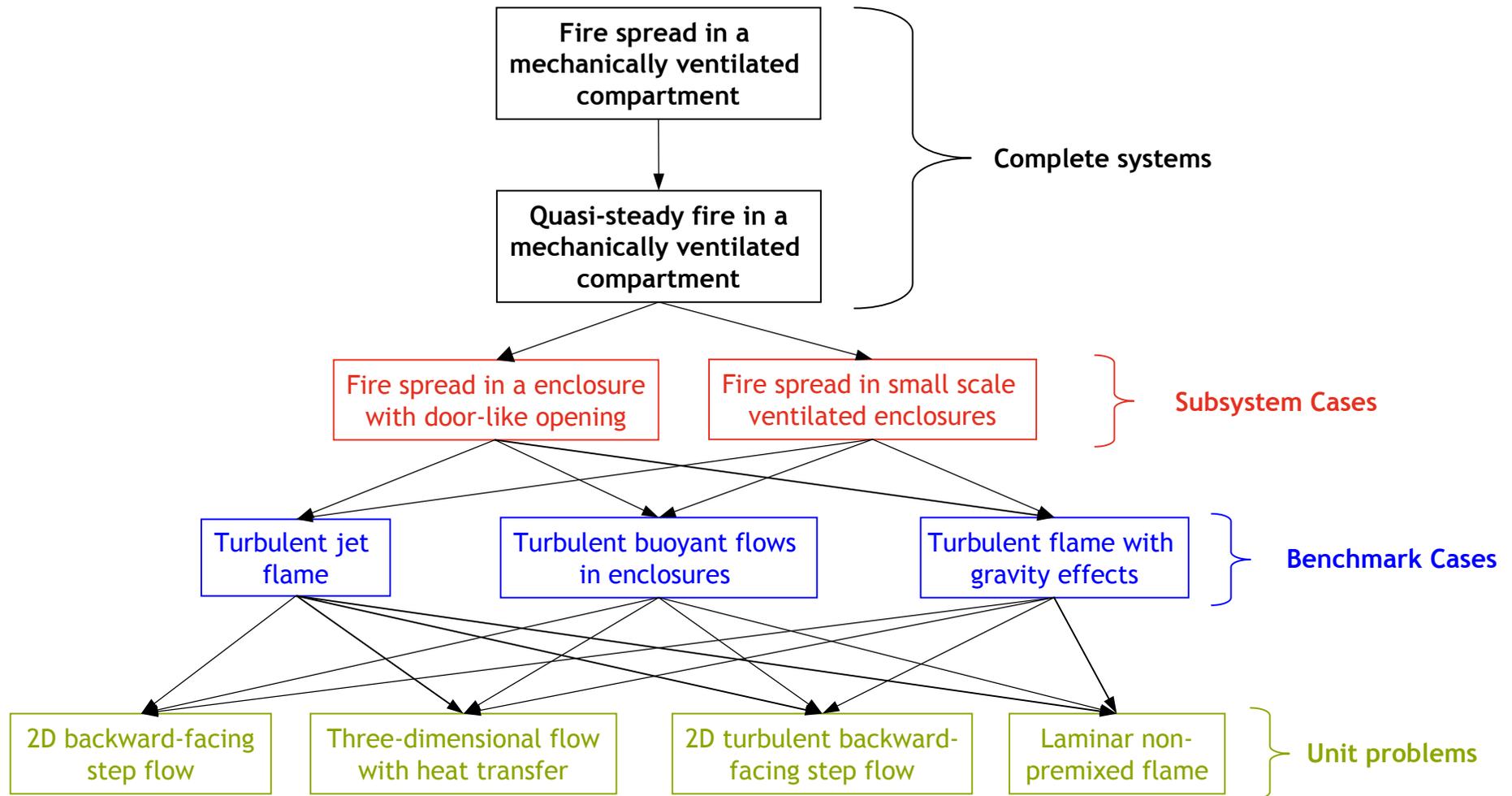
Identification et quantification des erreurs et des incertitudes du modèle conceptuel et informatique

La précision de la solution numérique est obtenue en comparant les résultats des simulations à des données expérimentales



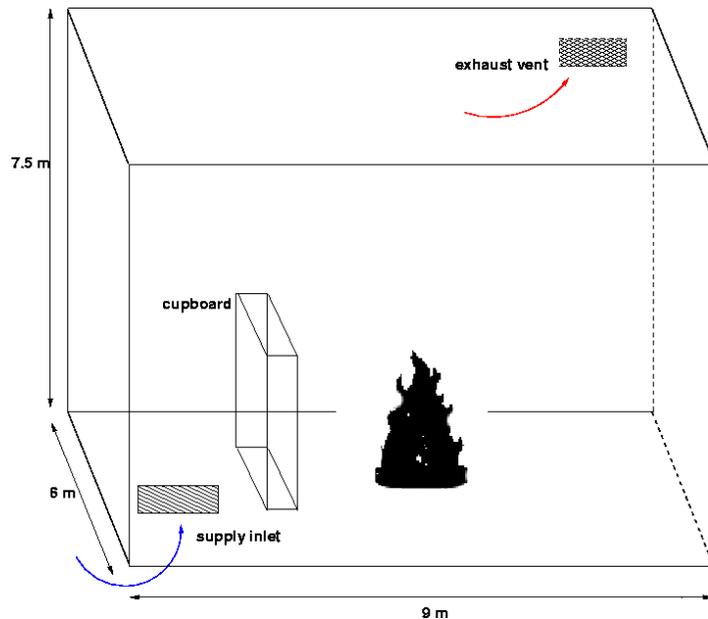
Chaque phase du processus de validation représente un niveau différent de complexité (couplage des phénomènes physiques, géométrie, échelle de temps,...)

Matrice de Validation



Incendie en milieu confiné - Essai LIC1.14

■ Configuration



- local de 405 m³ (9 m x 6 m x 7.5 m)
- temps : 35 min
- foyer d'éthanol (1m²) :
 - puissance : 563 kW,
 - débit massique : 0.022kg/sec/m²
 - temps : 25 min
- armoire en acier, conduction 1D
- murs en béton, conduction 1D

■ Équations résolues :

- ⇒ Reynolds Averaged Navier-Stokes
- ⇒ Enthalpie
- ⇒ Fraction massique de combustible
- ⇒ Fraction de mélange
- ⇒ Conduction dans les parois
- ⇒ équation de Bernoulli
- +
- ⇒ équation de la masse (P_{th})

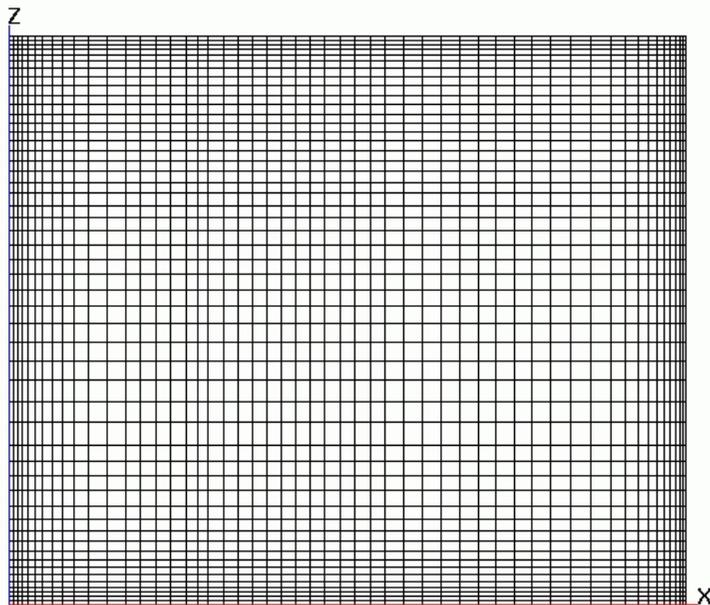
■ Validation : expérimentale

- ⇒ pression thermodynamique
- ⇒ température du local
- ⇒ débit

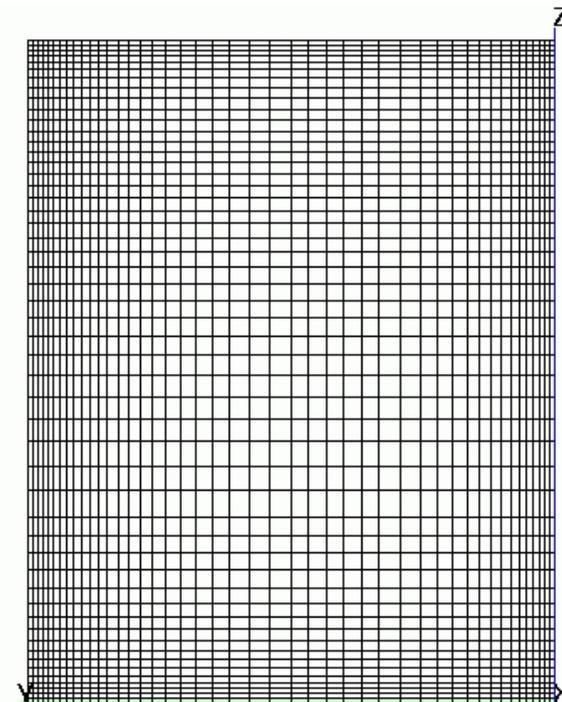
Maillage :

- 119 200 nœuds pour les scalaires (p , h , k , ε , Y_F , z)
- 365 000 nœuds pour la vitesse

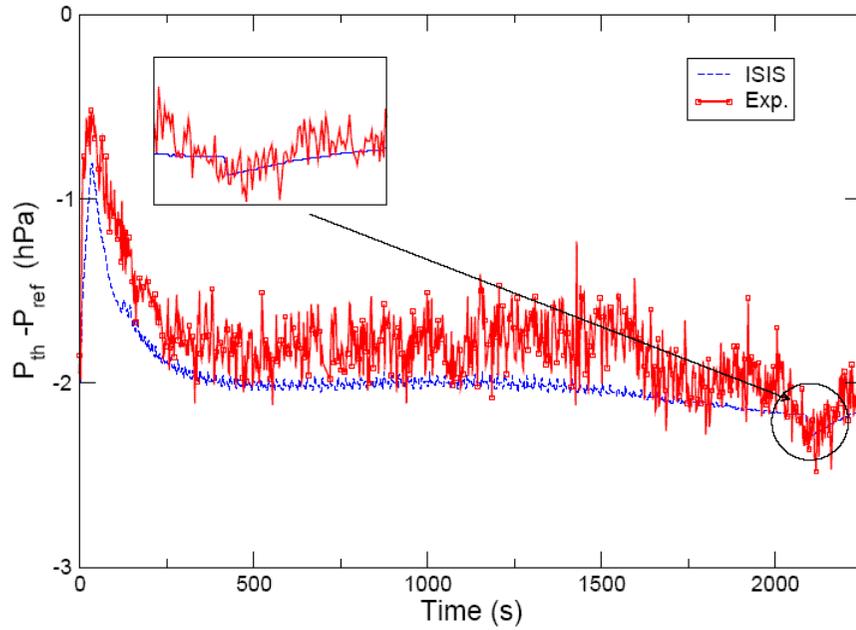
⇒ 1 million d'inconnues



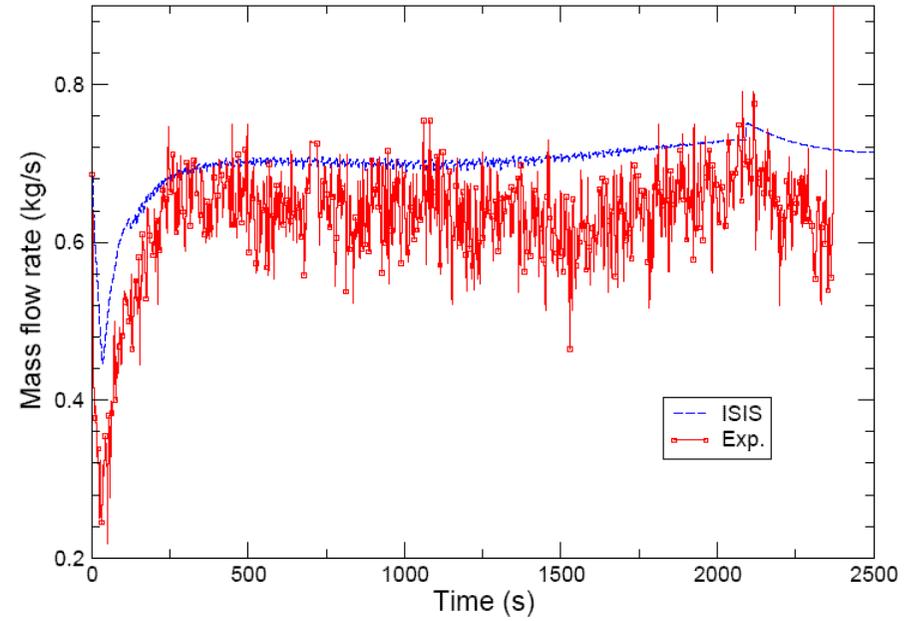
plan x-z
vue de face



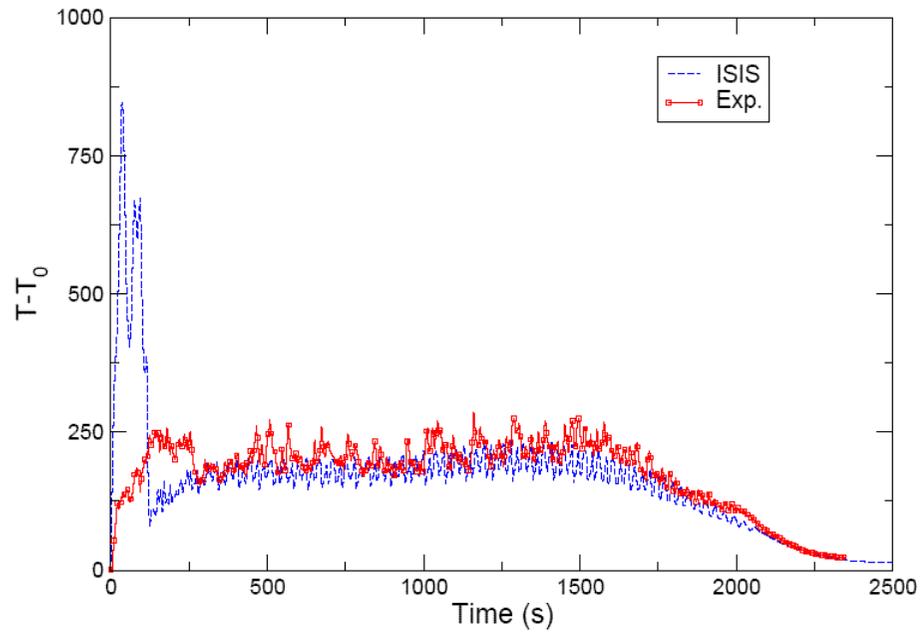
plan y-z
vue de dessus



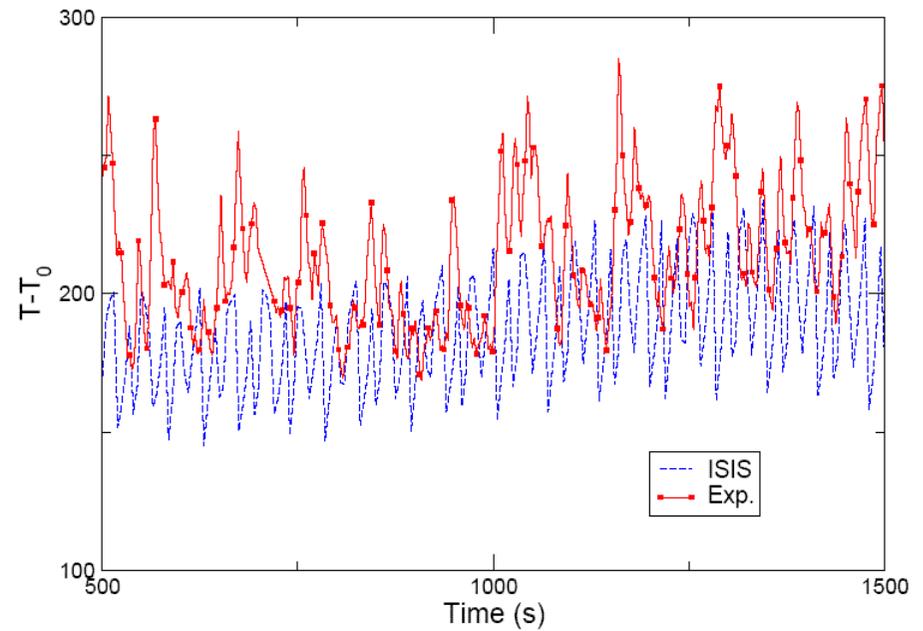
Évolution temporelle de la pression thermodynamique du local



Évolution temporelle du débit massique à l'admission



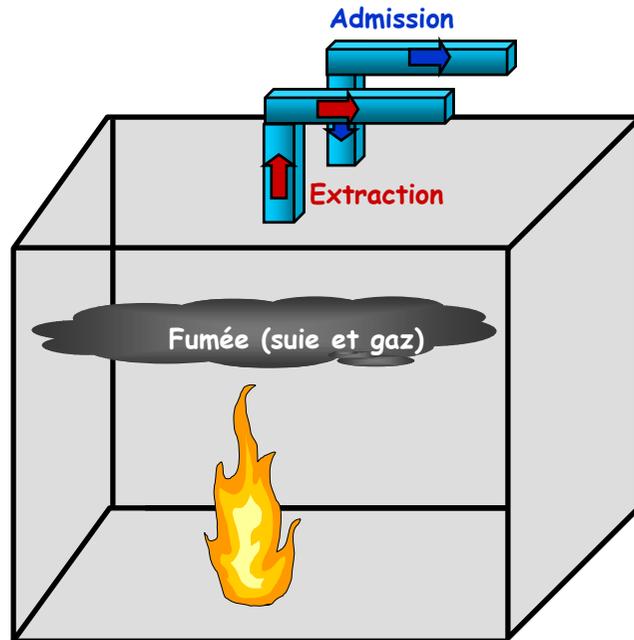
Évolution temporelle de la température
(3 mètres au dessus du foyer)



Évolution temporelle de la température
(3 mètres au dessus du foyer)
temps : 500 s – 1500 s

Résultats de simulations : Essai PRISME-SOURCE

▪ Configuration



- local de 120 m³ (5 m x 6 m x 4 m)
- parois et plancher en béton
- plafond en Thermipan
- temps des essais : 6 min - 1 heure
- foyer : TPH (dodécane - 0,4 m²)
- taux de renouvellement : 1,5 (D3) - 4,7 (D1)

▪ Équations résolues :

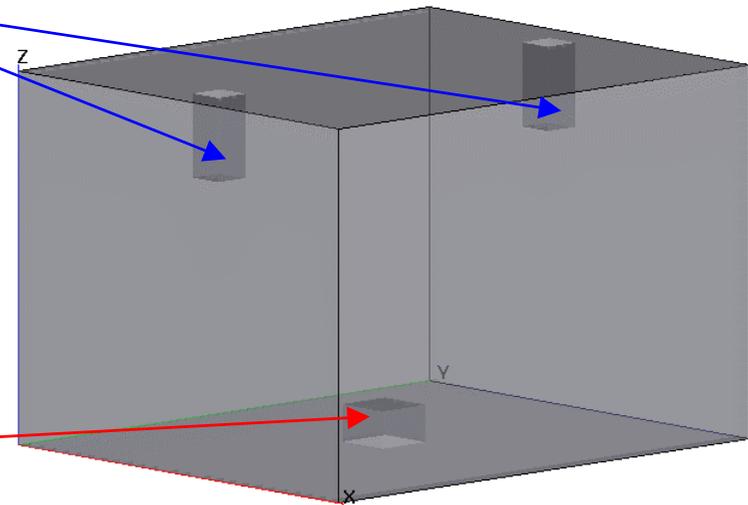
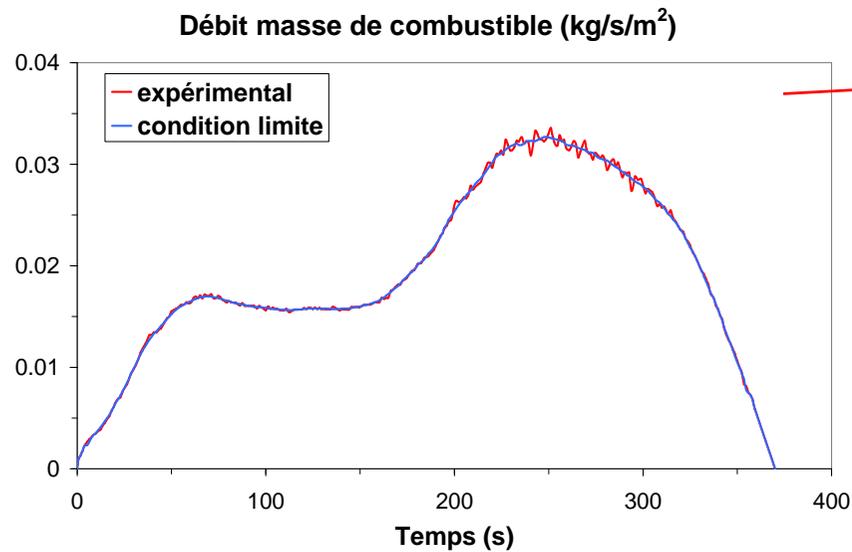
- ⇒ Reynolds Averaged Navier-Stokes
- ⇒ Enthalpie
- ⇒ Fraction massique de combustible
- ⇒ Fraction de mélange
- ⇒ Conduction dans les parois
- ⇒ équation de Bernoulli
- +
- ⇒ équation de la masse (P_{th})

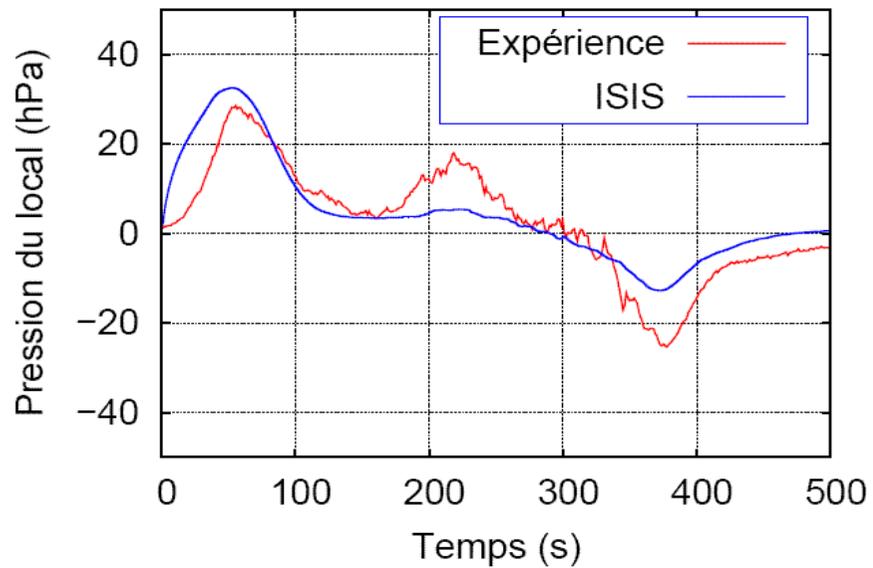
- **Validation** : expérimentale
- ⇒ pression thermodynamique du local
- ⇒ températures dans le local
- ⇒ débits

Condition limite de type Bernoulli
pour l'admission et l'extraction

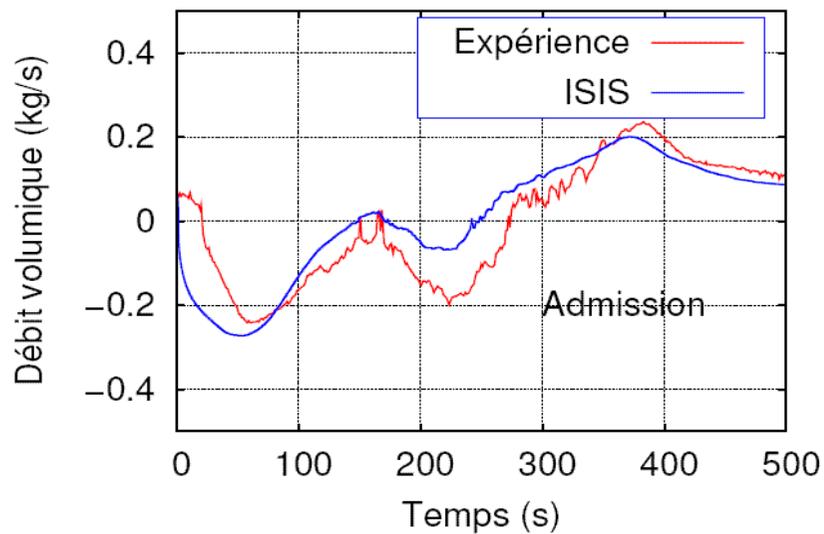
$$\frac{\partial Q_i}{\partial t} = \frac{S}{L} (P_{th} - P_i + f(R_i, \rho, Q_i))$$

Condition limite pour le débit masse de
combustible

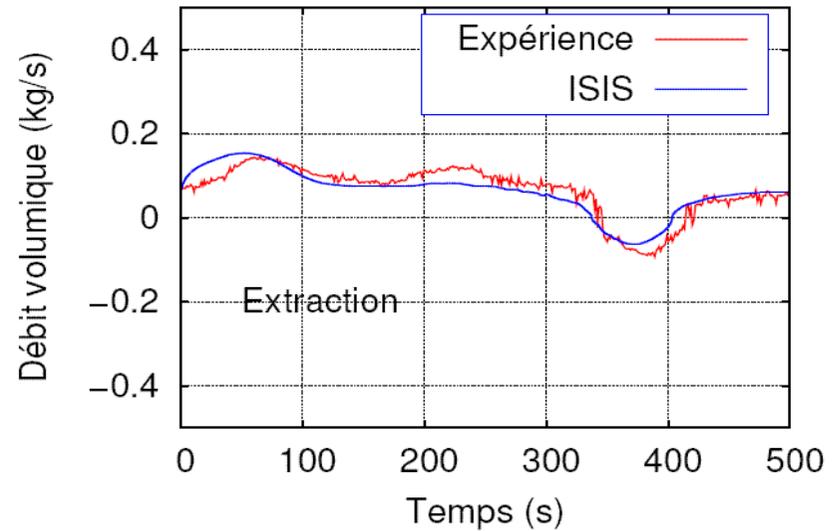




Évolution temporelle de la pression thermodynamique du local

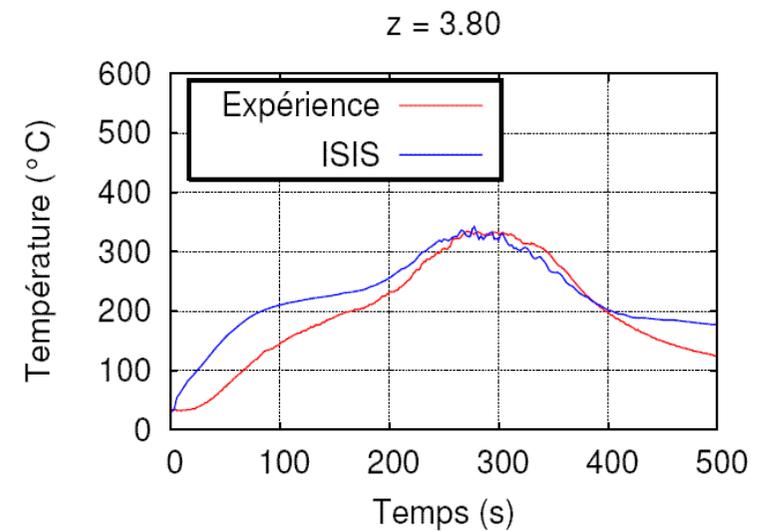
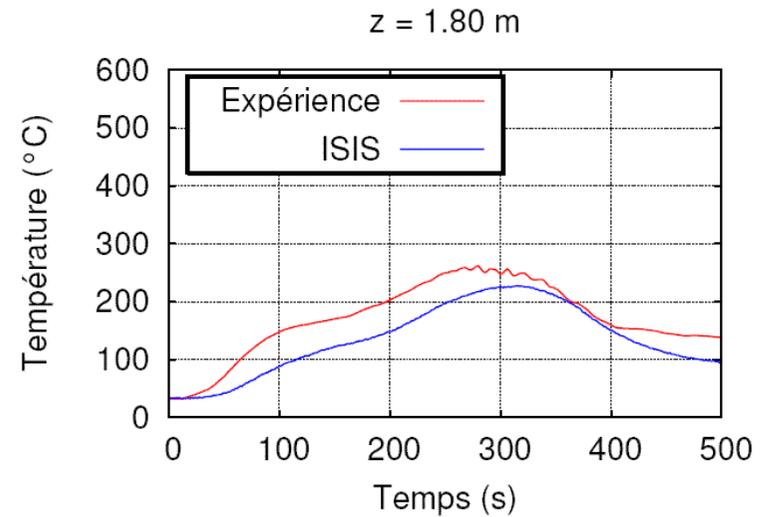
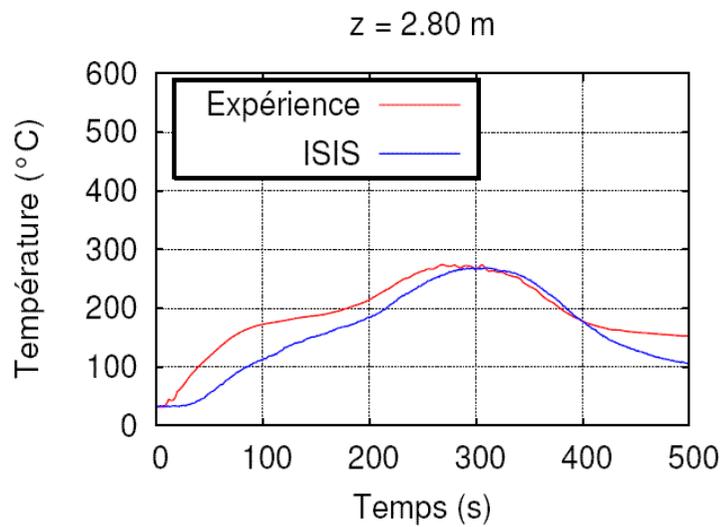


Évolution temporelle du débit à l'admission



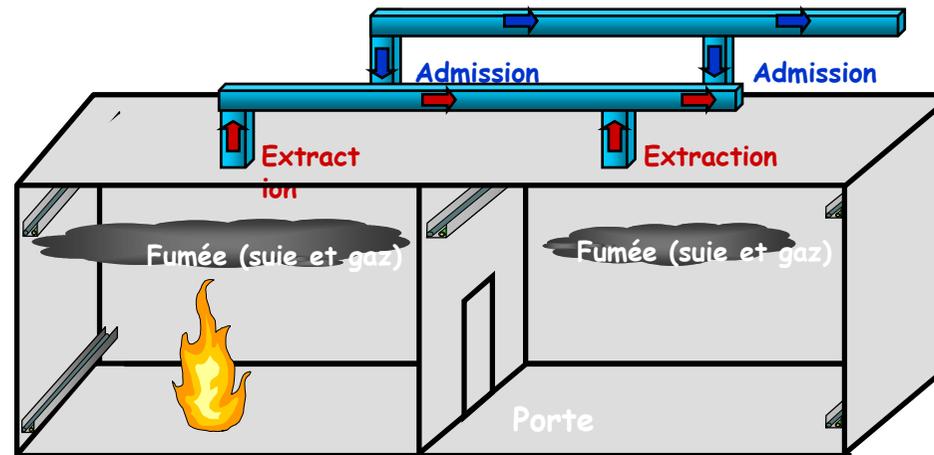
Évolution temporelle du débit à l'extraction

Évolution temporelle de la température des gaz
à différentes hauteurs,
dans le quart sud-est de local



Essai PRISME-DOOR Configurations

- 2 locaux ventilés, séparés par une porte
- Taux de ventilation : 4,7 r/h (560 m³/h)
- Surface de foyer variable : 0,4 m² (PRS-D3) et 1 m² (PRS-D6)

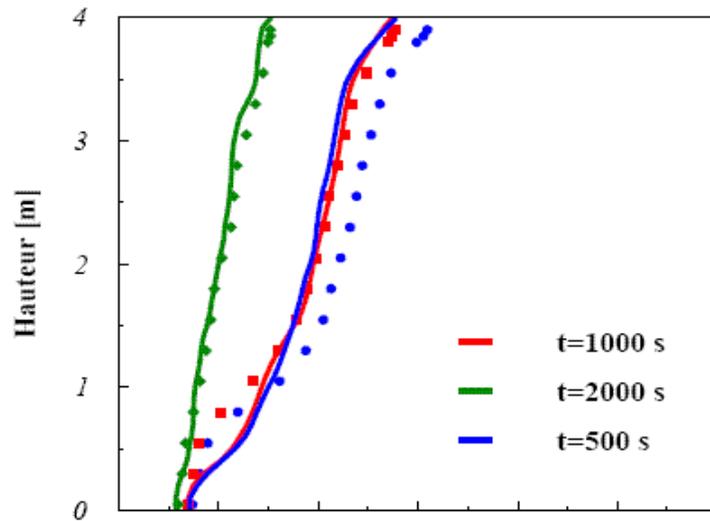


Résultats expérimentaux :

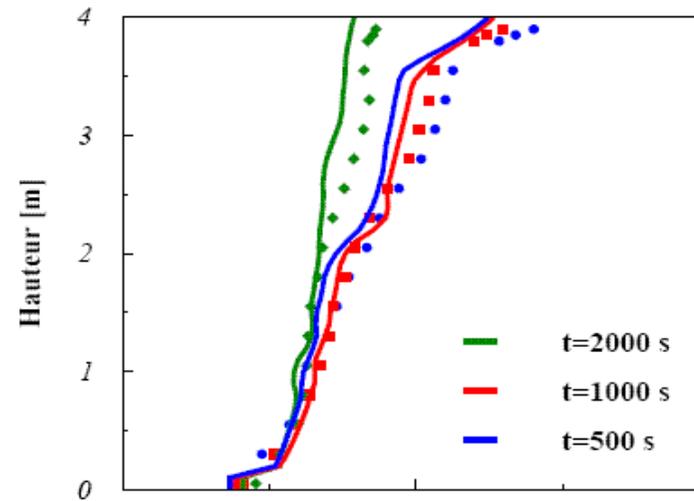
- profils de température (gaz et parois)
- évolution de la pression et des débits d'admission et d'extraction
- flux thermiques aux parois

Résultats numériques

- Gradients de température dans les deux locaux



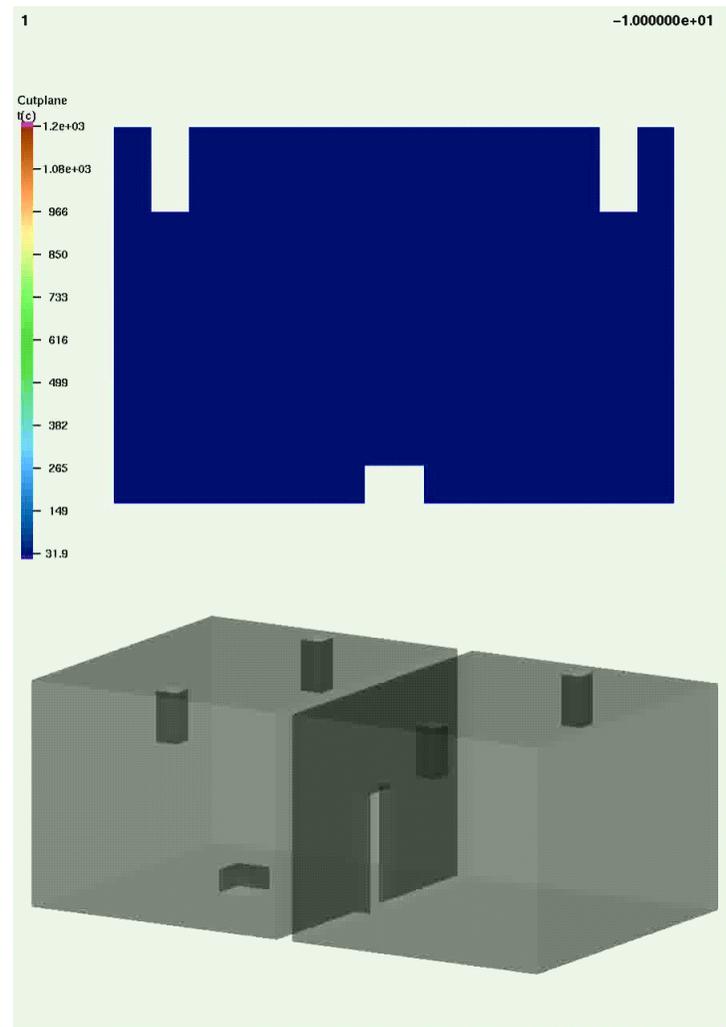
Température [°C]
local feu



Température [°C]
local cible

Résultats numériques

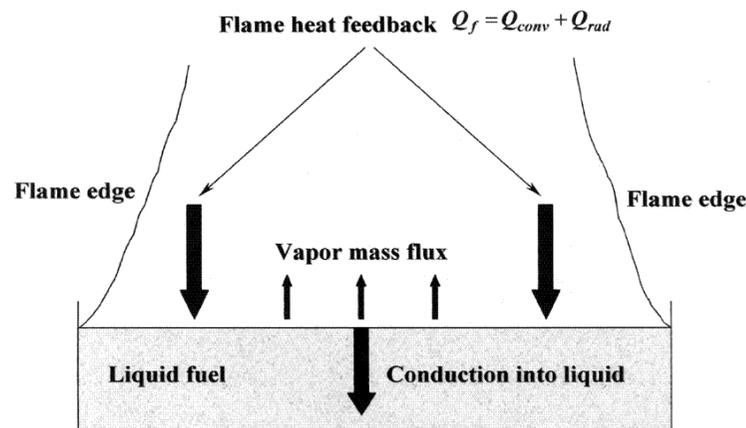
- Évolution du champ de température



Développements en cours

- Obtenir une simulation prédictive d'un feu de nappe :
 1. en atmosphère libre
 2. en milieu confiné et ventilé

- Nécessité d'un couplage entre les phases gazeuses et liquides (ou solides) pour s'affranchir de la condition limite « débit masse de combustible »



Meilleure estimation des flux aux interfaces liquide/gaz, solide/gaz

⇒ Modèle de pyrolyse
+
Modèle de turbulence
(intensité turbulente faible,
fermetures au second ordre)

➤ Modélisation plus fine des transferts radiatifs :

Actuellement :

- milieux à grande épaisseur optique
- « milieu gris »

⇒ Modèles valides sur une large gamme d'épaisseur optique

⇒ Discrétisation angulaire

⇒ Calcul de l'absorption du gaz en fonction des concentrations locales

➤ Modélisation plus fine de la production de suies

Actuellement :

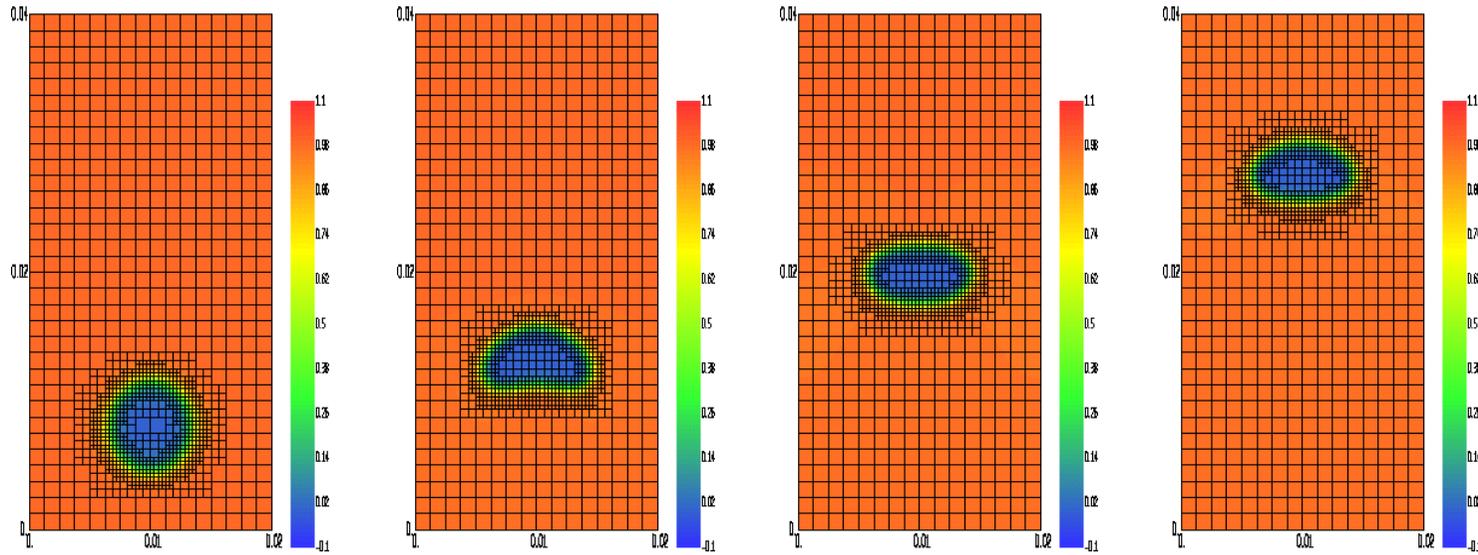
- fraction de suies déterminées à partir d'un % donné par l'utilisateur

⇒ Prise en compte de la formation des suies

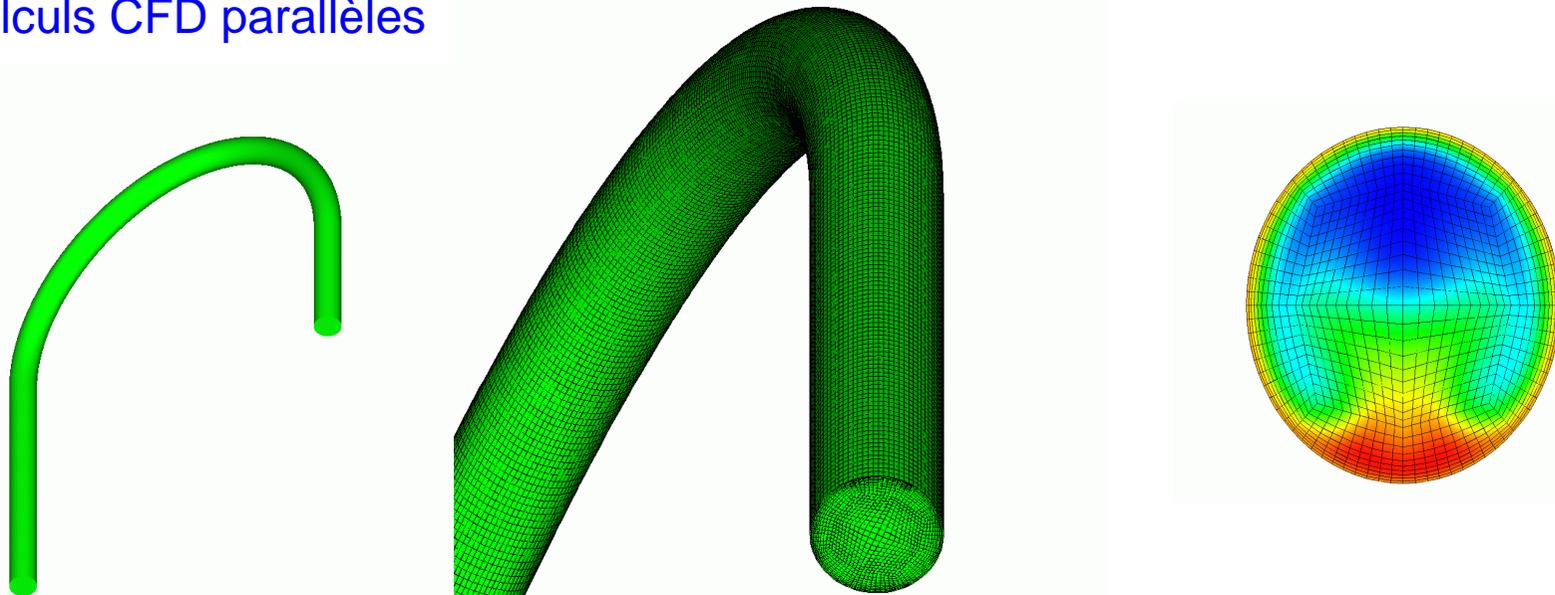
⇒ Modèles à 1 ou 2 équations

➤ Modélisation LES en vue d'un couplage RANS/LES

☐ Raffinement local adaptatif

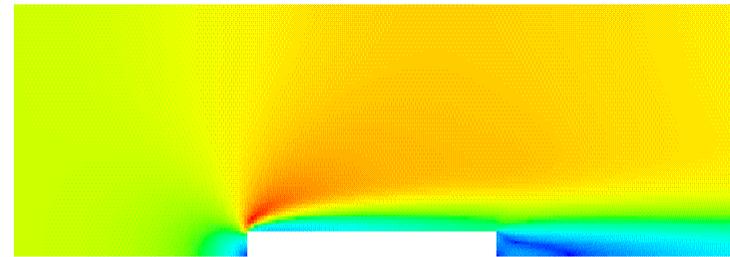
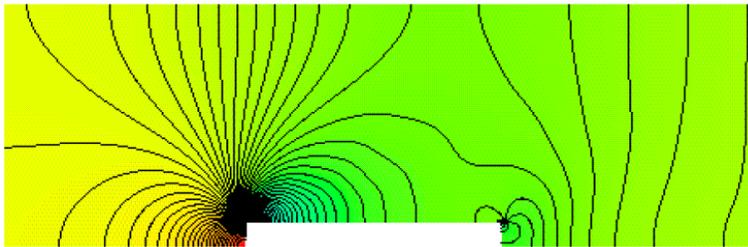


☐ Calculs CFD parallèles

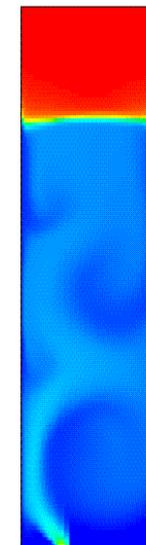
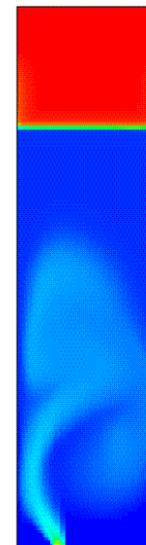
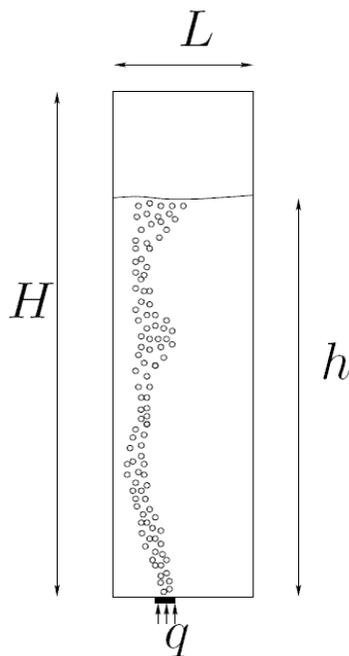


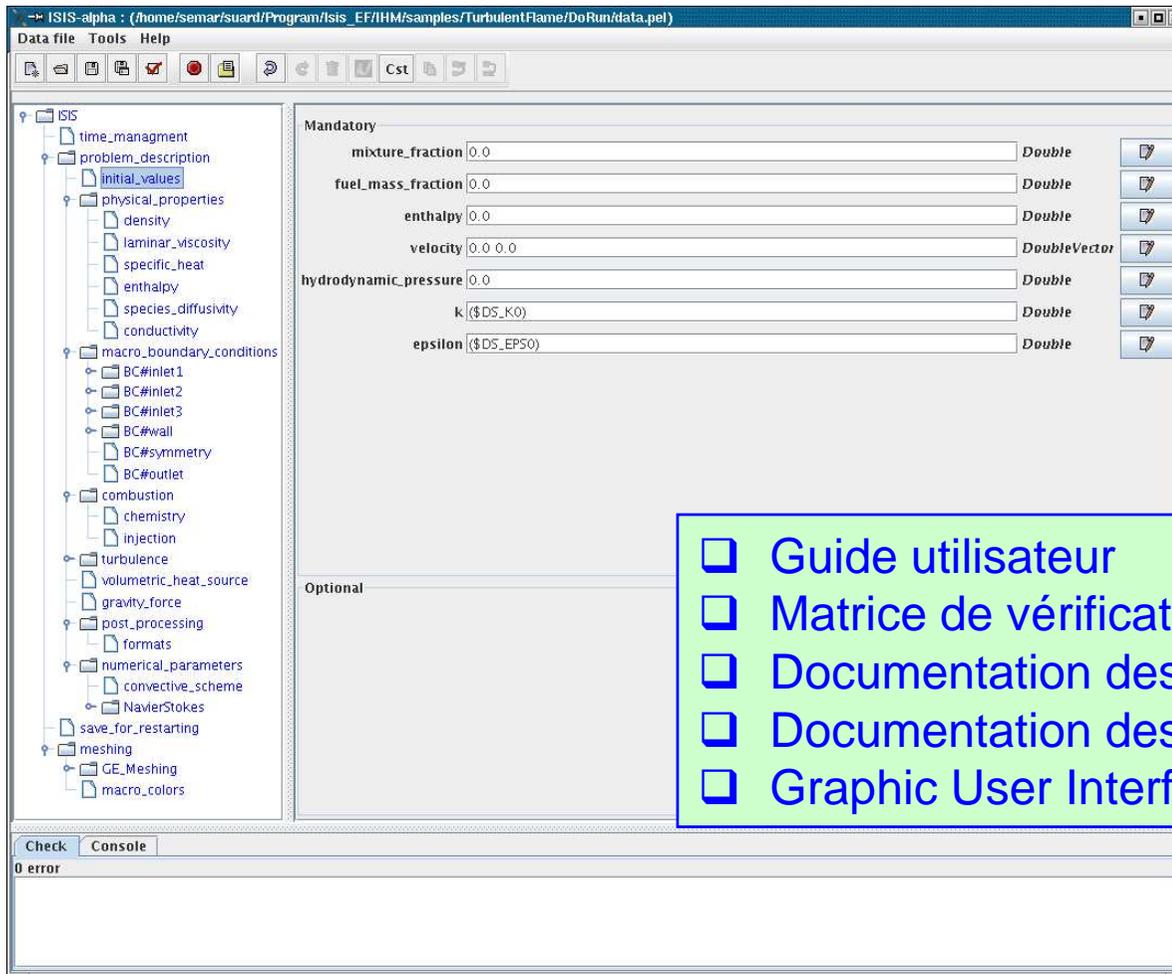
□ Écoulements compressibles :

écoulement dans un canal avec un obstacle rectangulaire



□ Écoulements diphasiques compressibles : colonne à bulles, test de Becker 2D





- Guide utilisateur
- Matrice de vérification et de validation
- Documentation des modèles physiques
- Documentation des méthodes numériques
- Graphic User Interface

Mise sous licence libre (type Cecill) :

- Début 2008 mais mise à disposition anticipée possible
- Objectif : renforcer notre partenariat avec les organismes de recherche
- ISIS : un code de calcul CFD générique open source
 - documenté,
 - qualifié,
 - adapté à la problématique de l'incendie en milieu industriel,
 - permettant une implémentation pérenne des modèles physiques,
 - assurant un suivi de l'historique et une gestion des versions.