

Utilisation du logiciel OpenFoam

# Modélisation d'une flamme de diffusion

Virginie DREAN - EFECTIS France

Alexis COPPALLE - CORIA

## CONTEXTE

---

- Modélisation incendie
- En France : utilisation majoritaire du logiciel FDS (NIST)
- Logiciel OpenFoam - FireFoam : utilisation grandissante (USA)
- Intérêt de disposer d'un outil supplémentaire
  - En R&D
  - Quand FDS n'est pas applicable (géométries complexes, ...)
- Etude faisabilité du logiciel OpenFoam - FireFoam (OF-FF)
  - Cas d'une flamme jet influencée par les effets de gravité
  - Résultats expérimentaux [1] + modèle FDS [2] disponibles

[1] D. Joyeux ; *Études expérimentales et numériques de la production des suies dans des flammes de diffusion turbulentes*, thèse de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université de Rouen, 1993.

[2] S. Desanghère ; *Détermination des conditions d'échauffement de structure extérieure à un bâtiment en situation d'incendie*, thèse de l'Institut national des sciences appliquées de Rouen, 2006.

## Déroulement de la présentation

---

- Les logiciels OpenFoam - FireFoam
  - Description
  - Contenu
- Cas d'étude : flamme de diffusion
  - Hypothèses sur l'écoulement
  - Données d'entrée
- Résultats obtenus
  - Comparaison avec les valeurs expérimentales
  - Comparaison avec les calculs FDS
- Synthèse

# LES LOGICIELS OPENFOAM ET FIREFOAM

- Open Field Operation And Manipulation (FMGlobal)
- Outil multi-physiques principalement axé sur la résolution des équations de la mécanique des fluides (CFD)
- Problèmes fluides impliquant entre autre
  - des réactions chimiques,
  - de la turbulence,
  - du transfert radiatif,
  - du transfert thermique
  - + problèmes de dynamique des solides ou d'électromagnétisme.
- Maillage et solveur à la fois
- Open-source (sous licence GNU/GPL) gratuit
- Environnement Linux
- Ensemble de sources écrites en C++
- Puissance du langage orienté objet: facilité de développer de nouveaux solveurs pour un problème particulier.

- OpenFoam (OF) : modèle de combustion limité

- Pas de solveur pour traiter les problèmes de combustion avec diffusion espèces + effets de flottabilité



- FireFoam (FF) : solveur LES pour la modélisation de la combustion (diffusion+turbulence+flottabilité...) basé sur la structure d'OF

- Extension des domaines d'application d'OF

- Diffusion
- Rayonnement
- Transport de particules (suies)
- Pyrolyse du solide

## ○ Génération du maillage

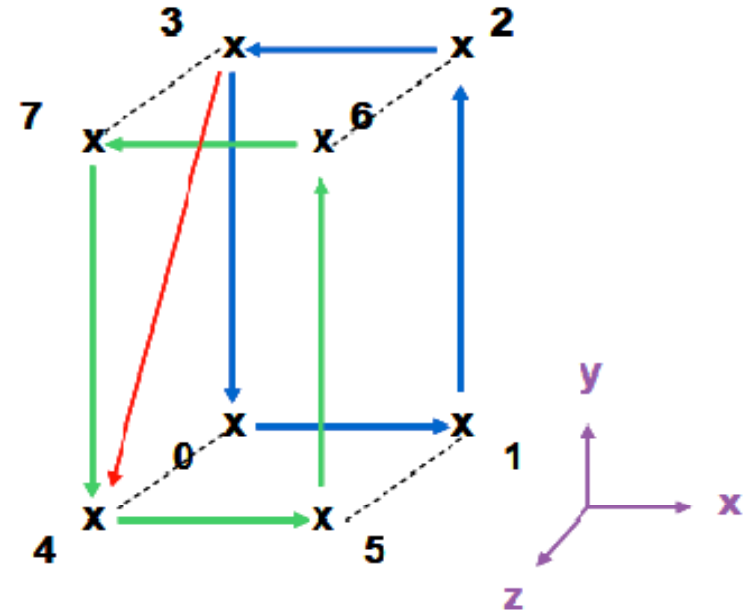
- Maillur interne
- Possibilité d'importer maillages
  - Fluent, Gambit, Star-CD, Gmsh, ...

## ○ Résolution équations fluides

- Navier Stockes
  - Ecoulements stationnaires / instationnaires
  - Compressibles / incompressibles
  - Multi phases ...
- Volumes finis/Eléments finis

## ○ Schéma numérique

- Résolution temporelle implicite
- Résolution explicite (OpenFoam)



## ○ OF : Solveurs

- Choix du solveur et non des équations à résoudre
- Quasiment autant de solveurs que de types de cas...
- Choix du préconditionneur, et de la méthode de résolution des équations liées à la pression (algorithmes: PISO, SIMPLE)

### Exemple:

Nom du solveur		Type d'écoulement lié
Basique	« laplacianFoam »	Diffusion thermique dans un solide.
	« potentialFoam »	Pour initialiser un écoulement potentiel simple avant la résolution des équations de Navier-Stokes.
Incompressible	« boundaryFoam »	Écoulement permanent 1D avec turbulences.
	« channelFoam »	Pour un écoulement dans un tube avec de grandes turbulences.
	« icoFoam »	Transitoire, Laminaire et isotherme pour fluide Newtonien.
	« nonNewtonianIcoFoam »	Transitoire, laminaire, isotherme, non-Newtonien.
	« pimpleDyMFoam »	Transitoire, fluide Newtonien sur parois en translation.
	« pimpleFoam »	Transitoire, grand pas de temps.
	« pisoFoam »	Transitoire.
	« shallowWaterFoam »	Transitoire, fluide non visqueux et peu profond, rotation.
	« simpleFoam »	Permanent, turbulent.

## ○ FF : solveur lesBuoyantFoam

- Combustion: diffusion, avec/sans prémélange
- Pyrolyse (solide)
- Rayonnement, suies



### ○ Modèle de combustion (FF)

- Modèle fraction de mélange (définie par fraction massique des espèces)
- Chimie infiniment rapide et irréversible

### ○ Rayonnement

- P1, gris, FVDOM

### ○ Modèles de turbulence

- DNS, LES ou laminaire (FF seulement LES)

### ○ Calcul

- Série
- Parallèle (OpenMPI)

### ○ Post traitement / visualisation

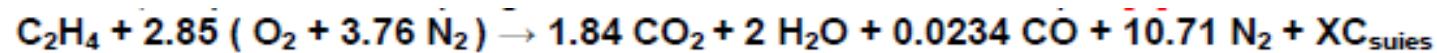
- ParaFoam basé sur ParaView

## CAS D'ÉTUDE : FLAMME DE DIFFUSION

## DESCRIPTION DE L'ÉCOULEMENT CONSIDÉRE [1]

- Flamme-jet (diffusion turbulente) créée par jet axisymétrique d'éthylène dans l'air ambiant

- Réaction: stœchiométrie



- Vitesse débitante d'éthylène:  $V = 5 \text{ cm / s}$
- Brûleur : 10 cm de diamètre
- Froude :  $Fr = 0.0025$  bas; Reynolds:  $Re = 550$ 
  - Effets de flottabilité importants
- Grosses structures turbulentes observées

⇒ Flamme représentative d'un feu;  
⇒ Cas validation codes CFD

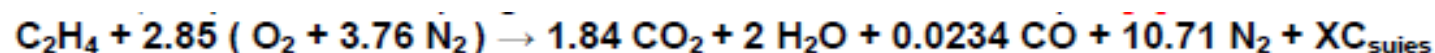


[1] D. Joyeux , thèse 1993.

## MODELISATION AVEC OF-FF

---

- Jet axisymétrique d'éthylène dans l'air ambiant
- Brûleur de section carrée équivalente à  $\Phi$  100 mm
- Vitesse du gaz  $V = 5$  cm/s sur toute la surface du brûleur
- Stœchiométrie précisée dans FF

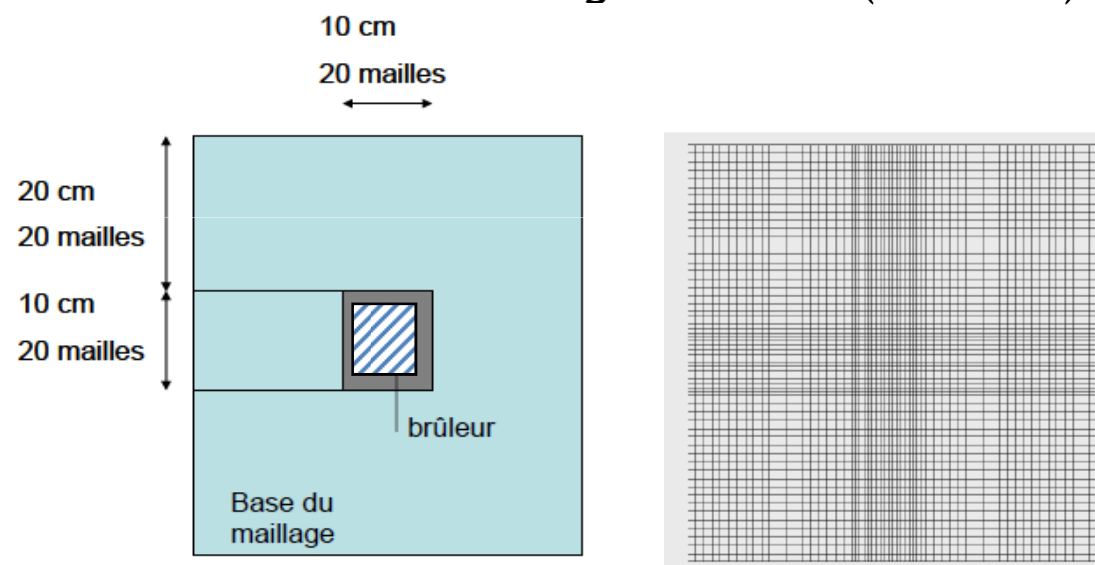


- X suies calculé par modèle de combustion de FF
- Perte de puissance par rayonnement : 22 % (paramètre d'entrée)
- Turbulence : LES, One Equation Eddy Model pour k (k et  $\mu$  pour petites échelles non résolues)
- Rayonnement : P1 (régime de diffusion du rayonnement)
- Combustion: fraction de mélange, chimie infiniment rapide et irréversible (solveur adapté: FireFoam)

# MODELISATION AVEC OF-FF

## ○ Maillage

- Structuré
- $0,5 \times 0,5 \times 1,65 \text{ m}^3$  raffiné autour du brûleur (60 x 60 x 200 mailles)
- Frontières extérieures du domaine de calcul : gradient nul (ouvertes)



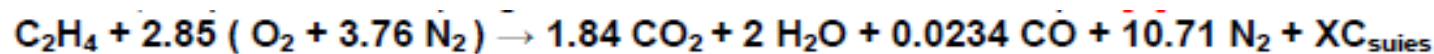
## ○ Temps de calcul

- 300 s,  $dt = 0,05 \text{ s}$
- OpenMPI : 8 processeurs utilisés, 1h30 de calcul

## MODELISATION AVEC FDS [2]

---

- Jet axisymétrique d'éthylène dans l'air ambiant
- Brûleur: section équivalente à  $\Phi$  100 mm
- Stœchiométrie non précisée dans FDS



- $X_{\text{suies}} = 0,14$
  - Taux de production des suies: 3%
- 
- Perte de puissance par rayonnement : 20 % (paramètre d'entrée)
  - Turbulence : LES, One Equation Eddy Model
  - Rayonnement : gris (par défaut)
  - Combustion: fraction de mélange, chimie infiniment rapide et irréversible

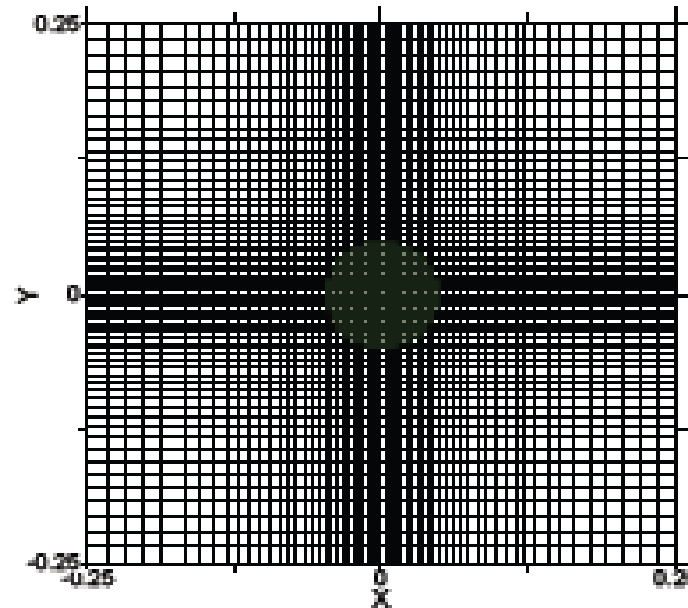
[2] S. Desanghère ; thèse 2006.

# MODELISATION AVEC FDS

---

## ○Maillage

- Structuré, progression géométrique (raffiné) autour du brûleur
- 0,5 x 0,5 x 1,65 m<sup>3</sup> (nbre mailles non communiqué)
- Frontières extérieures du domaine de calcul : ouvertes



PVH1

## Diapositive 15

---

**PVH1**

voir avec OLJ s'il est capable de retrouver le CDROM de la sauvegarde de la thèse de Sylvain

PVH; 24/11/2011

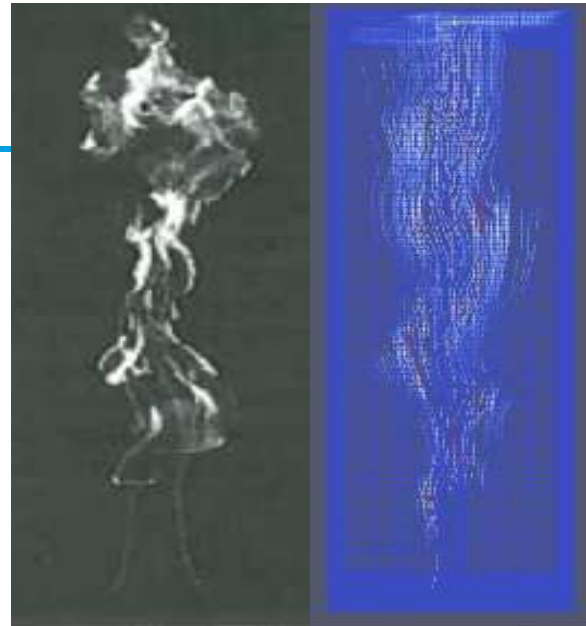


# RÉSULTATS

# RÉSULTATS

## ○ Visualisation

Exp [1]



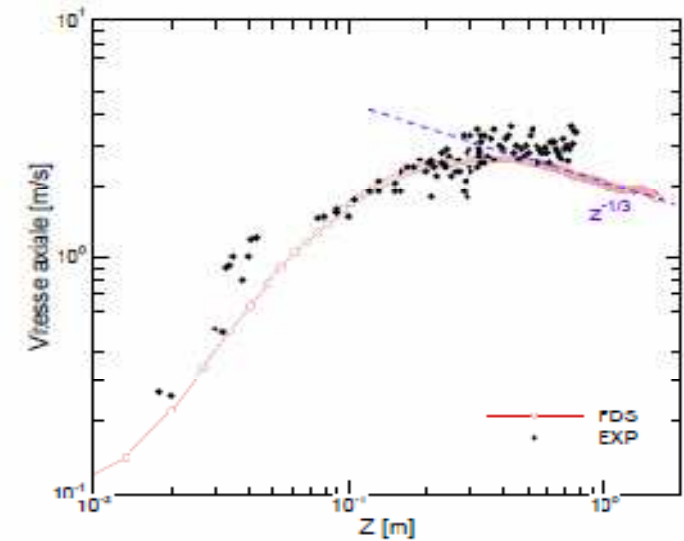
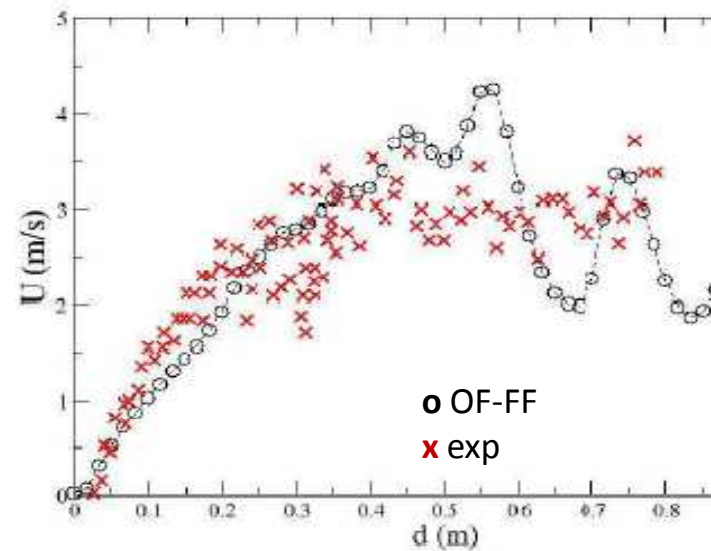
OF - FF

[1] D. Joyeux , thèse 1993.

[2] S. Desanghère ; thèse 2006.

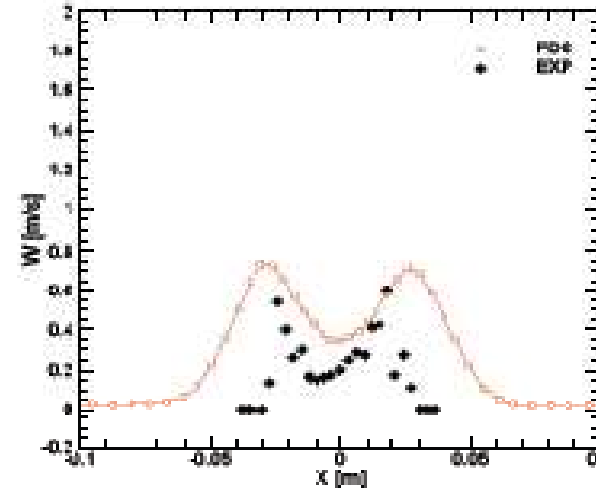
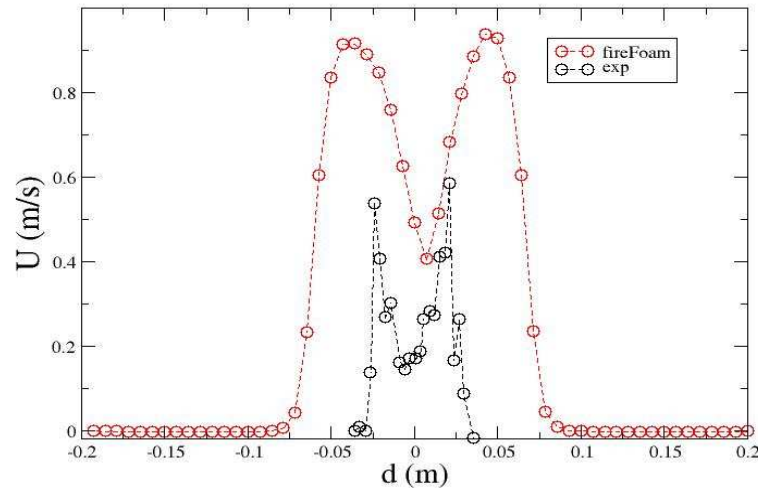
## ○ Vitesse axiale

- Comparaison FDS [2] + Comparaison exp [1]
- = Résultats cohérents pour évolution vitesse
- Oscillations :  
V non moyennée



## RÉSULTATS: VITESSES RADIALES

- Même effet observable pour calcul OF-FF et FDS à  $z = 3$  cm du brûleur



=> restriction de l'écoulement par dimensions données du brûleur mal respectée.

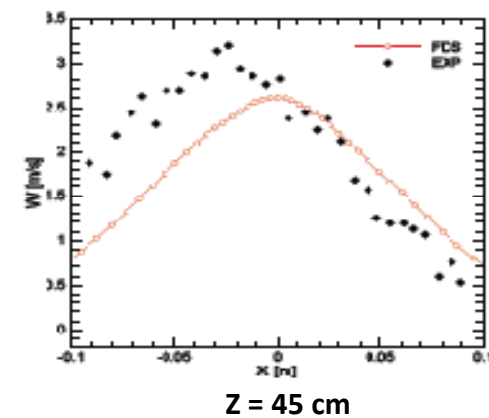
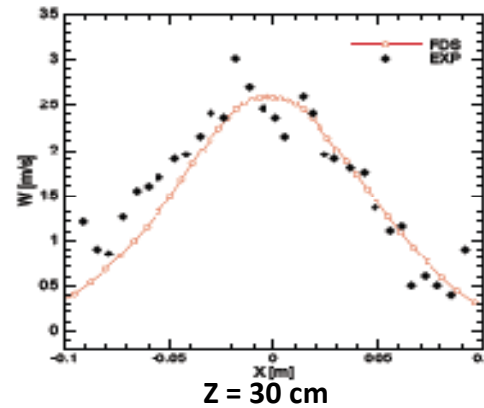
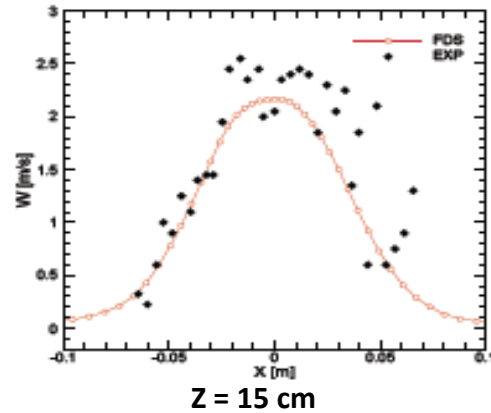
- Sortie du brûleur:

- Gaz + rapidement réchauffés par combustion et davantage accélérés que le fluide situé sur l'axe (zone de mélange en périphérie écoulement fuel: dégagement chaleur)
- La vitesse présente un max pas sur l'axe (flottabilité)

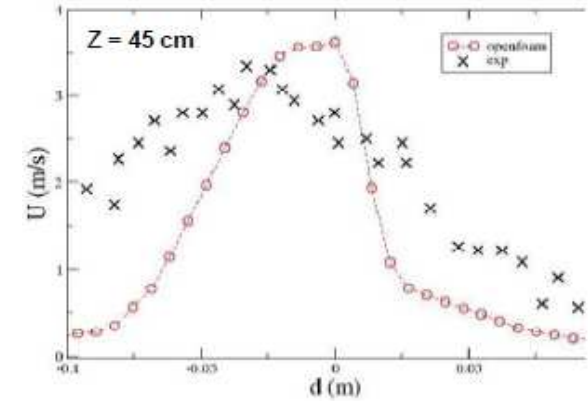
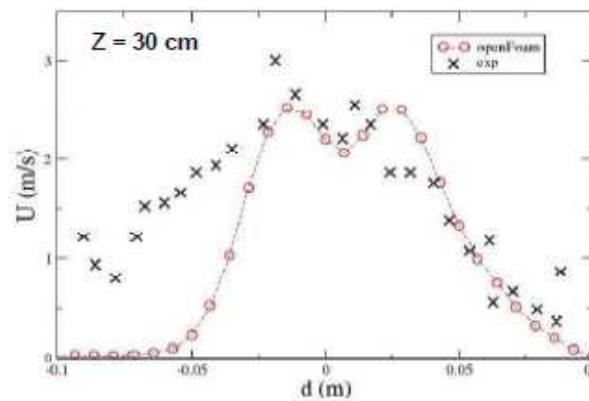
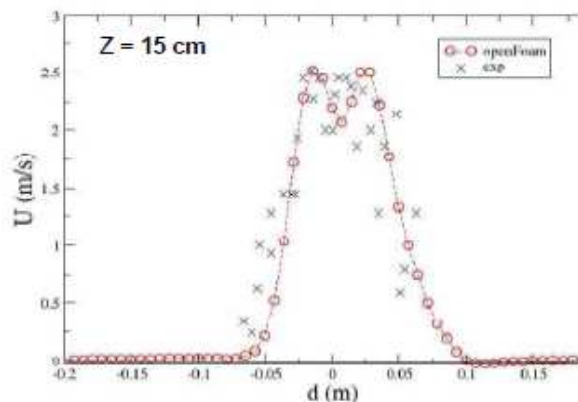
=> Phénomène bien reproduit par la simulation

# RÉSULTATS: VITESSES RADIALES (AXE DU BRÛLEUR - DIFFÉRENTES HAUTEURS)

## Exp [1] + FDS [2]



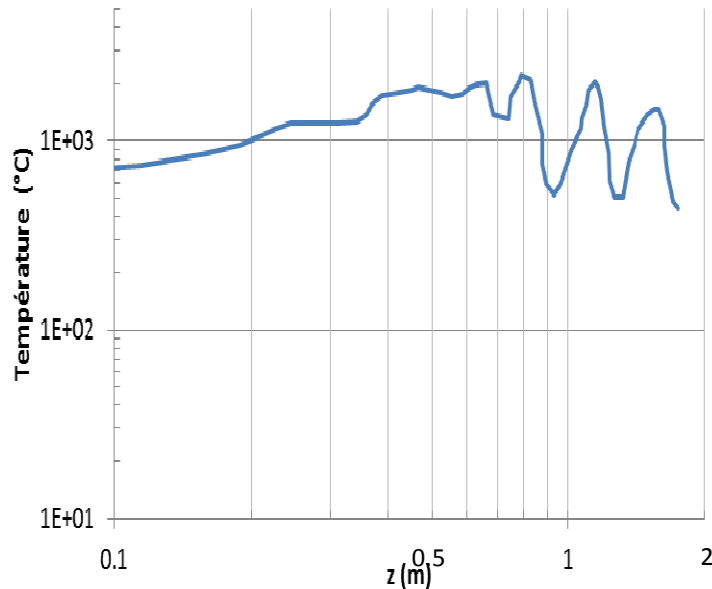
## Valeurs expérimentales [1] + OF-FF



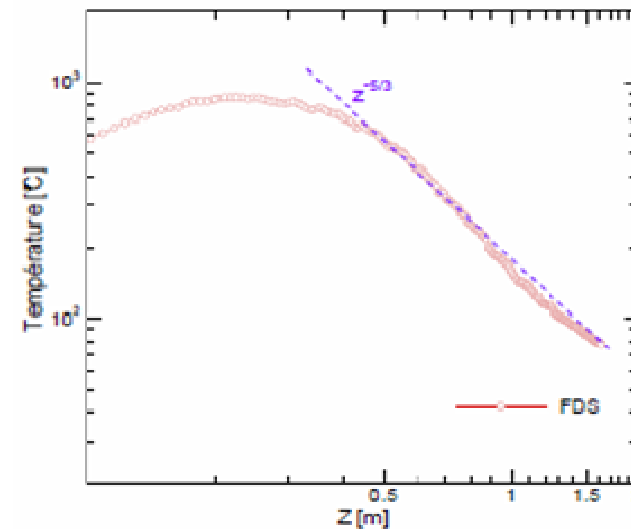
- Max de vitesse pas sur l'axe: bien reproduit par la simulation OF-FF
- $Z > 45$  cm : vitesse surestimée par OF-FF et sous-estimée par FDS

# RÉSULTATS: TEMPÉRATURE AXIALE

- Température plus élevée que celle estimée par [2]
  - FDS~900°C max, OF-FF~1300°C
  - Traitement numérique? Modèle physique?
- Oscillations : grandeur non moyennée en temps
- Décroissance similaire pour les 2 calculs après 0.5 m



OF-FF



FDS

# SYNTHÈSE

# UTILISATION D'OF-FF

---

## ○ Avantages

- Logiciel très complet, possédant de nombreuses librairies, solveurs, modèles => applicable à de nombreux problèmes CFD
- Calcul parallèle très facile et efficace
- Maillage non structuré, 3D (cas FDS non applicable)
- Calcul implicite, stabilité des schémas numériques
- Très bon outil de visualisation, complet, simple

## ○ Désavantages

- Logiciel difficile à appréhender
  - Peu de documentation
  - Beaucoup (trop?) de solveurs, librairies et modèles (sans doc...)
- Beaucoup de fichiers d'entrée à renseigner
- Mailleur interne lourd et difficilement utilisable pour géométrie complexe

# RÉSULTATS MODÉLISATION FLAMME DE DIFFUSION

---

## ○ Calcul OF-FF:

- Cohérents avec valeurs expérimentales
- Encore des aspects à mieux comprendre (température)
- Effets de gravité bien retranscrits avec OF-FF: maximum de la vitesse radiale pas sur l'axe du brûleur

## ○ Calcul FDS:

- Reproduit mal ce phénomène sauf sortie du brûleur ( $z = 3 \text{ cm}$ )
- Ordres de grandeurs des vitesses ok
- Températures cohérentes avec expérience

## ○ Conclusion

- Logiciel OF-FF complet et puissant
- Bon outil comparaison-validation FDS
- Orienté R&D pour l'instant



Merci pour votre attention...



## ○ Modèles thermophysiques (OF)

- Concernent enthalpie (équation de conservation de l'énergie), chaleur, propriétés physiques
- Gaz parfaits, tables (Janaf) ...

## ○ Modèle de combustion (FF)

- Modèle de mélange (Z) pour fraction de masse (Y) des espèces
- Chimie infiniment rapide et irréversible: toutes les variables ne dépendent que de Z
- Taux de réaction contrôlé par l'espèce en défaut (Eddy dissipation model) et par temps de mélange turbulent

$$\overline{\rho \dot{\omega}_F} = \alpha \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \min \left( \tilde{Y}_F, \frac{\tilde{Y}_O}{s}, \beta \frac{\tilde{Y}_P}{1+s} \right)$$

## ○ Modèles de rayonnement

- P1: régime de diffusion du rayonnement, faiblesse du modèle au niveaux des parois
- FVM: équation de transport radiatif résolue dans chaque direction moyenne de propagation

## ○ Modèles de turbulence

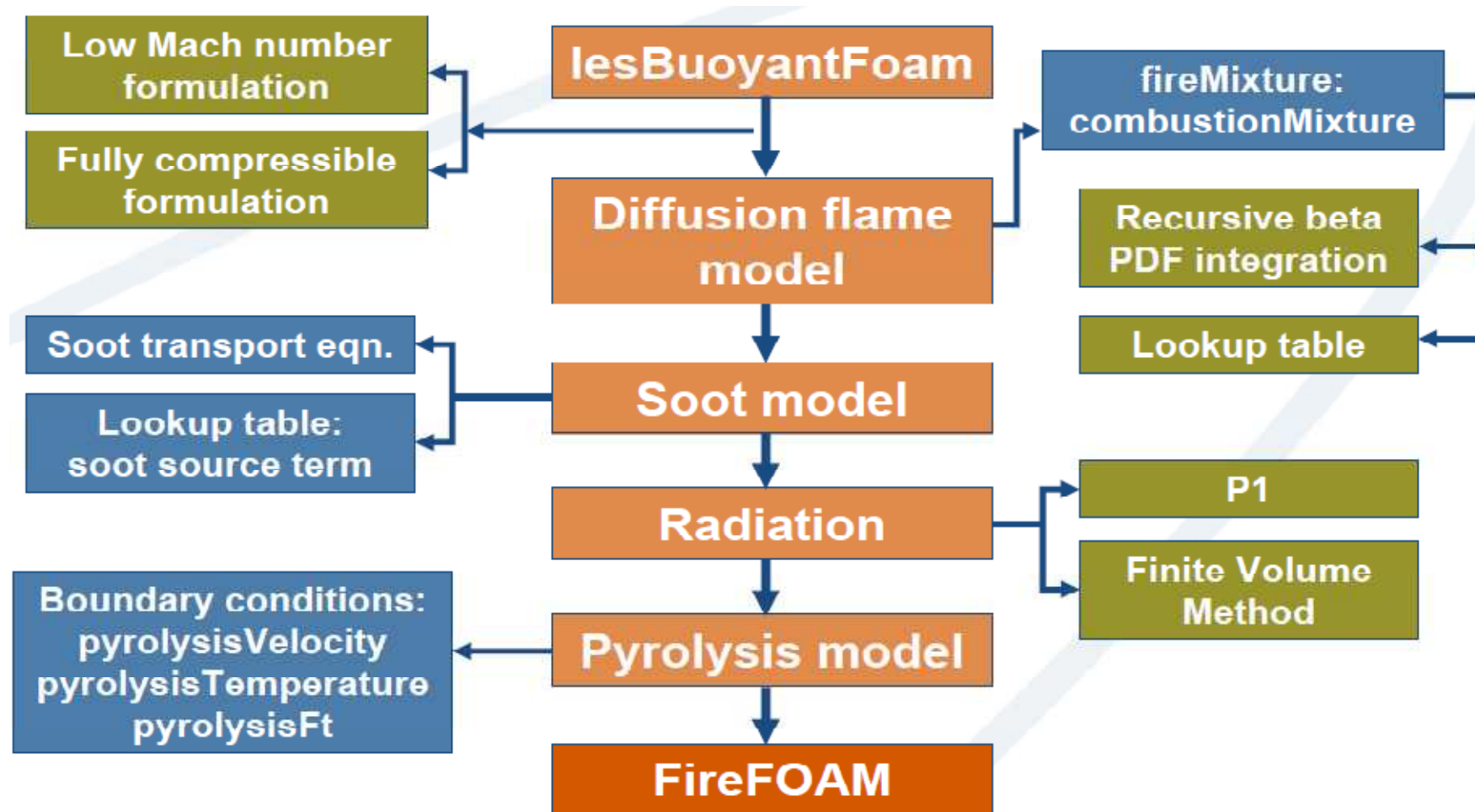
- OF : RAS et LES / ou laminaire
  - $k-\epsilon$ , ...
- FF : LES
  - Viscosité turbulente (One Equation Eddy)
  - Smagorinsky, Spalart-Allmaras, ...

## ○ Calcul

- Série
- Parallèle (OpenMPI)

## ○ Post traitement / visualisation

- Visualisation: ParaFoam basé sur ParaView
- Post traitement : échantillonnage des grandeurs physiques le long d'un axe, en un point ...



Mass

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0$$

Momentum

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) + \bar{\rho} g_i, \quad i = 1, 2, 3$$

Total Enthalpy

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}}{\partial x_j} = \frac{\overline{Dp}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \left( D + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} \right)$$

Mixture Fraction

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Z}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \left( D + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x_j} \right)$$

State Eqn

$$\bar{p} = \bar{\rho} \frac{R_u}{M} \bar{T}$$

Species

$$\tilde{Y}_k = \int_0^1 f_k(Z) Pdf(Z) dZ$$

$$\tilde{h} = \sum_k h_{f,k}^\circ \tilde{Y}_k + \int_{T_0}^{\tilde{T}} \sum_k (Cp_k(\tau) \tilde{Y}_k) d\tau$$

Chemical enthalpy

Sensible enthalpy

$$\bar{p} = \bar{p}_t + \bar{p}_d = \bar{p}_0 + \bar{\rho} g_i x_i + \bar{p}_d$$