

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Influence du rayonnement sur l'évolution d'un feu en milieu confiné

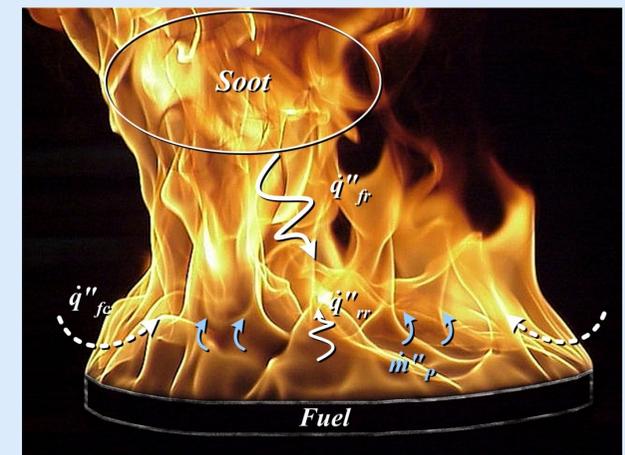
F. Babik, G. Boyer, A. Kacem,^{*}
C. Lapuerta, S. Suard

Laboratoire de l'Incendie et des Explosions

Journée Thématique

Rayonnement et transferts couplés

Société Française de Thermique - Paris 21/10/14



1 Contexte IRSN

2 Le code de calcul ISIS

- Modélisation des écoulements réactifs à bas nombre de Mach
- Implémentation de la FVM

3 Influence du rayonnement

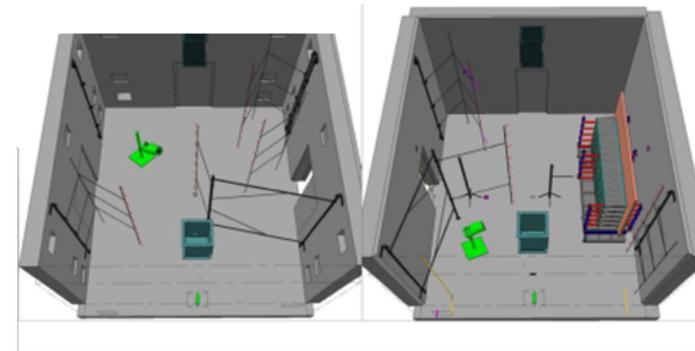
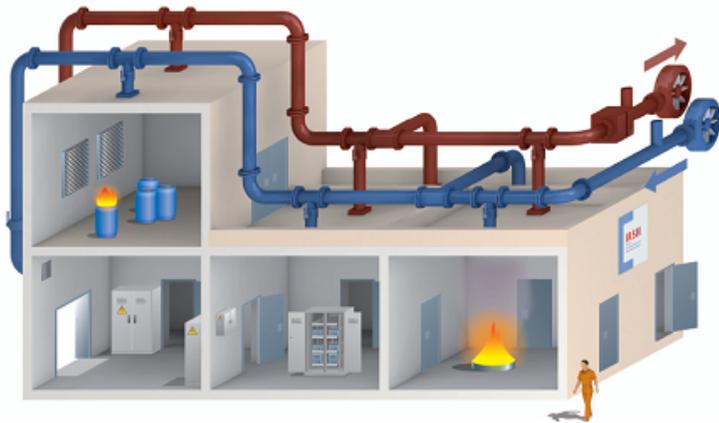
- Détermination du débit masse de combustible
- Dégradation des matériaux
- Essais à grande échelle

4 Perspectives

Contexte IRSN - *Feux compartimentés & Foyers analytiques*

Installation DIVA

- 3 locaux ($6 \times 5 \times 4 \text{ m}^3$) + 1 couloir ($15.6 \times 2.5 \times 4 \text{ m}^3$)
- Ventilation mécanique, parois en béton,...
- Programmes expérimentaux : PRISME, PRISME 2, PICSEL,...



Feux de gaz / liquide : Influence de la ventilation sur

- l'aéraulique du compartiment
- la sous-oxygénation du foyer (imb., inst., réinflam.)
- la propagation des fumées (\neq géométries, fuites).



Contexte IRSN - *Foyers complexes / cibles*

De + en + fréquent lors d'essais incendies (démonstrations, études,...)

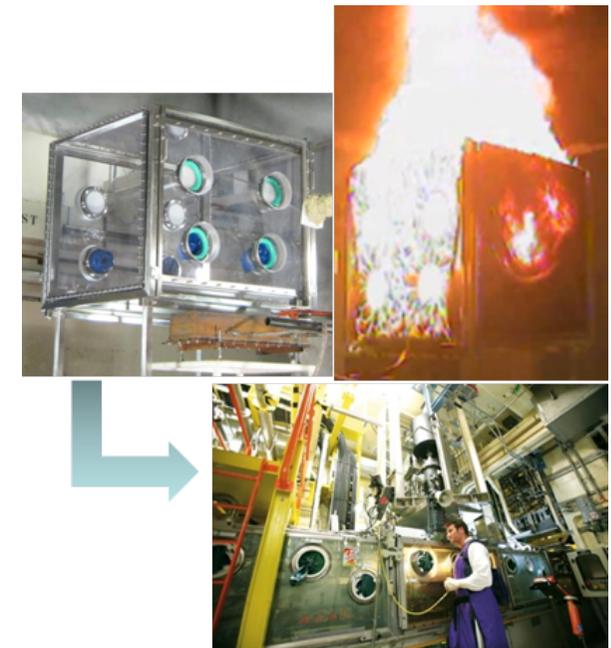
Problématiques de dégradation complexes :

- Hétérogénéité du foyer (multi-constituants, polymères),
- Géométrie complexe (assemblage de câbles,...),
- Dégradation thermique multi-échelle.

Feux de câbles

Armoires électriques

Boîtes à gants



Contexte IRSN - *Etudes et R&D en incendie*

Prédire à l'aide d'outils numériques :

1. Inflammation de foyers liquides/solides

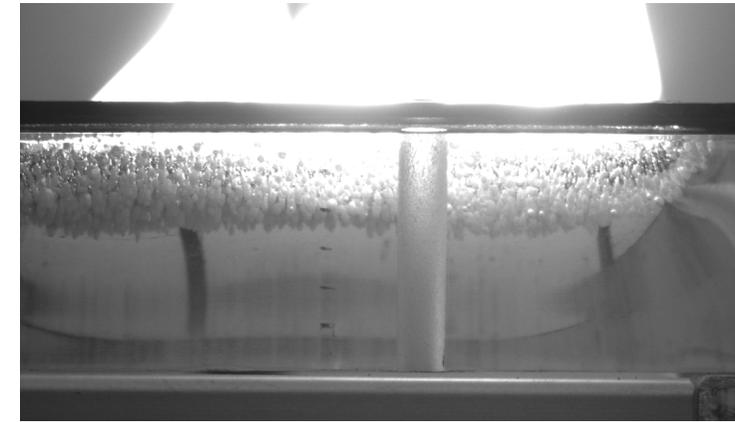
- ▶ Changement de phase
- ▶ Transfert de chaleur de la phase continue \rightsquigarrow phase condensée

2. Développement du feu

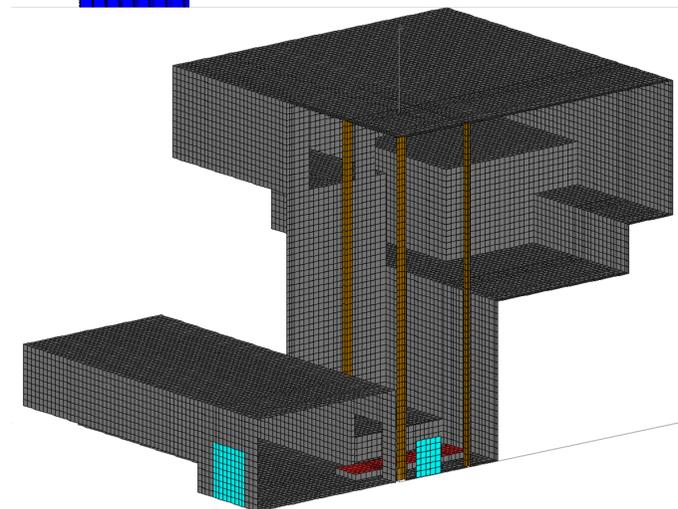
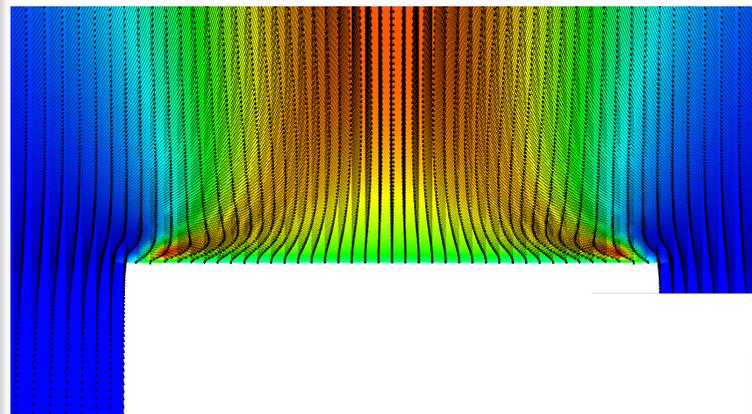
- ▶ Répartition de l'énergie (convective/radiative)
- ▶ Opacité du milieu
- ▶ Couplage des phases continue et condensée (feedback)

3. Impact sur les cibles

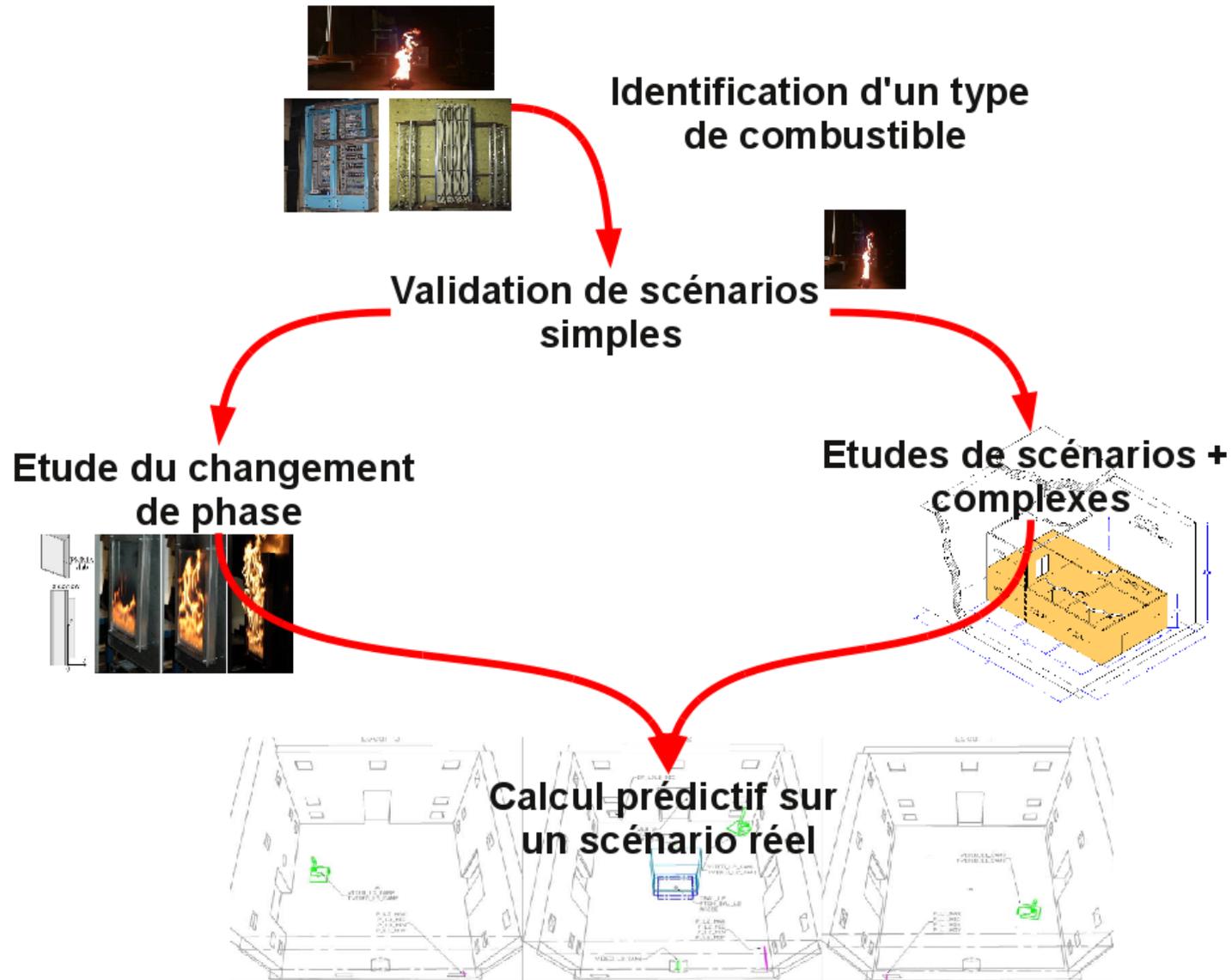
- ▶ Transfert de chaleur aux parois
- ▶ Résistance au feu des matériaux



Pizzo *et al.*



Contexte IRSN - *Méthodologie adoptée*



1 Contexte IRSN

2 **Le code de calcul ISIS**

- Modélisation des écoulements réactifs à bas nombre de Mach
- Implémentation de la FVM

3 Influence du rayonnement

4 Perspectives

Le code de calcul ISIS

Modélisation des écoulements réactifs à bas nombre de Mach

Turbulence

- RANS $k - \varepsilon$ (STD, RNG, REA),
- RANS $k - \omega$ SST,
- RANS $k - \varepsilon v^2 - f$,
- LES (Smagorinsky, Wale)

Combustion Non-prémélangée

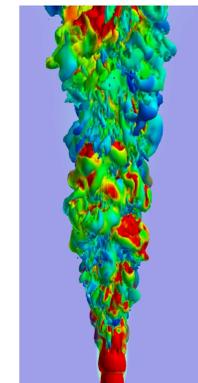
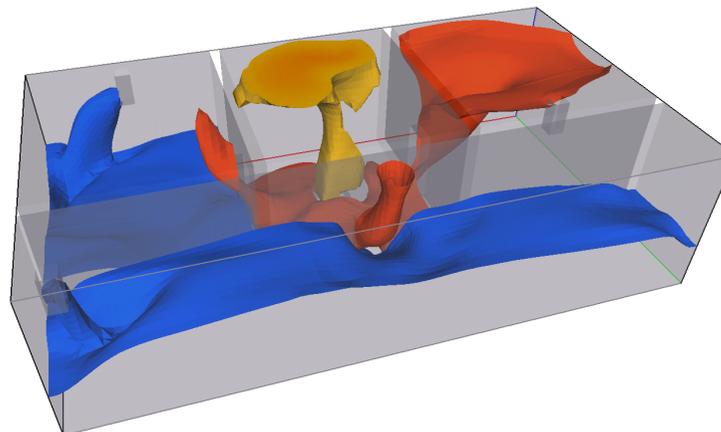
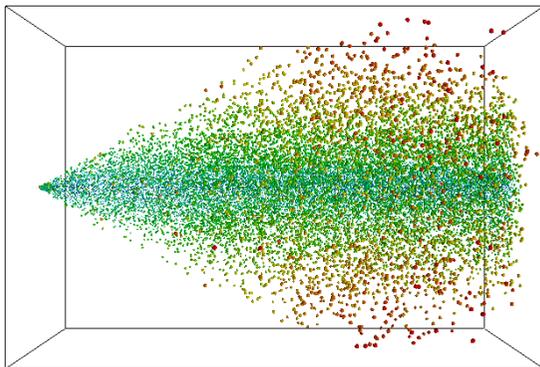
- Formulation EDC,
- Cinétique à 1 ou 2 étapes
- Production de suies (1 ou 2 equs)

Aspersion

- Solveur Lagrangien pour la phase dispersée,
- Couplage avec la phase continue.

Transferts de chaleur

- Conservation de l'enthalpie totale,
- Equ de la chaleur 1D dans les parois,
- Milieux gris non-diffusant
 - ▶ P1,
 - ▶ FVM



Le code de calcul ISIS - *Implémentation de la FVM*

Formulation de la RTE pour un milieu gris non-diffusant

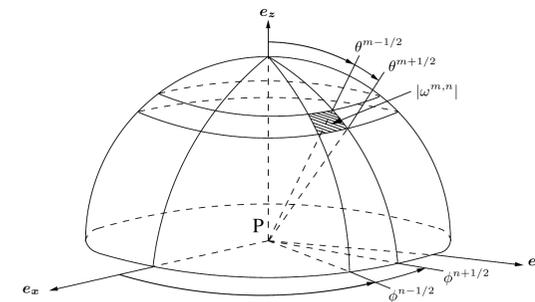
$$\begin{cases} \nabla \cdot (I \mathbf{s}) = \kappa \left(\frac{\sigma T^4}{\pi} - I \right), & I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \stackrel{\text{def}}{=} \int_0^\infty I_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s}) d\lambda \\ \nabla \mathbf{q}_r = \int_{4\pi} \nabla \cdot (I \mathbf{s}) d\Omega = 4\kappa\sigma T^4 - \kappa \mathbf{G}, & \mathbf{G} \stackrel{\text{def}}{=} \int_{4\pi} I d\Omega \end{cases}$$

Intégration :

$$\forall \omega^{m,n}, \forall \mathbf{K} : \int_{\omega^{m,n}} \int_{\mathbf{K}} \nabla \cdot (I \mathbf{s}) = \int_{\omega^{m,n}} \int_{\mathbf{K}} \kappa \left(\frac{\sigma T^4}{\pi} - I \right)$$

$$\sum_{\sigma \in \mathcal{E}(\mathbf{K})} |\sigma| I_\sigma^{m,n} \int_{\omega^{m,n}} \mathbf{s} \cdot \mathbf{n}_{\mathbf{K},\sigma} = |\mathbf{K}| |\omega^{m,n}| \kappa_{\mathbf{K}} \left(\frac{\sigma T_{\mathbf{K}}^4}{\pi} - I_{\mathbf{K}}^{m,n} \right)$$

$$\sum_{\sigma \in \mathcal{E}(\mathbf{K})} |\sigma| \mathbf{D}_{\mathbf{K},\sigma}^{m,n} I_\sigma^{m,n} = |\mathbf{K}| |\omega^{m,n}| \kappa_{\mathbf{K}} \left(\frac{\sigma T_{\mathbf{K}}^4}{\pi} - I_{\mathbf{K}}^{m,n} \right)$$



1 Contexte IRSN

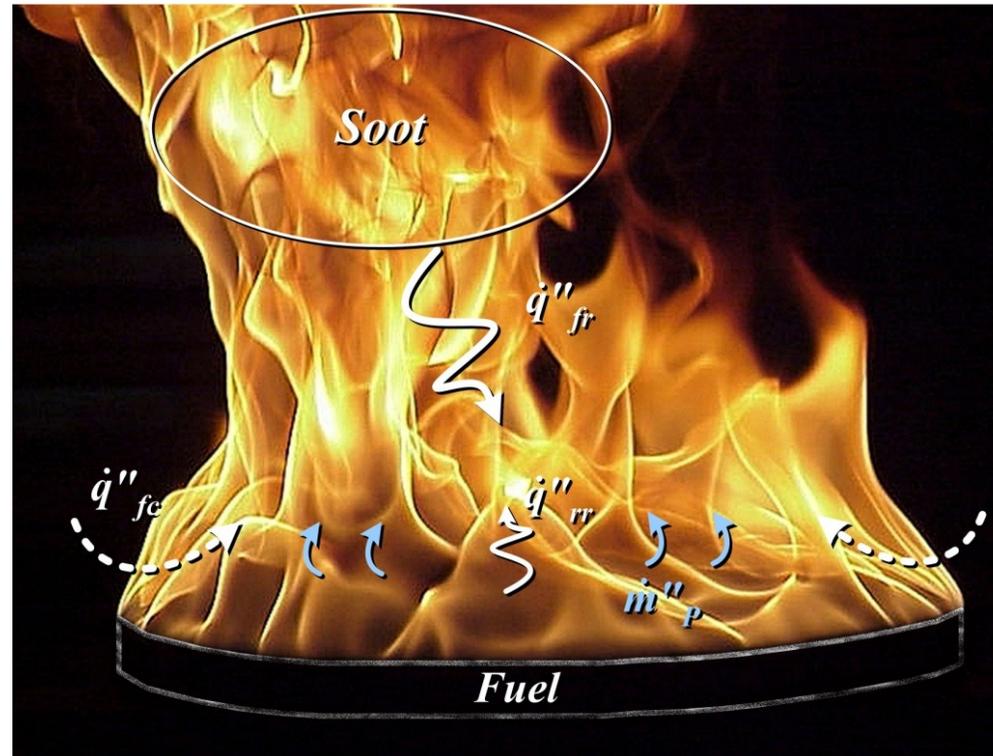
2 Le code de calcul ISIS

3 Influence du rayonnement

- Détermination du débit masse de combustible
- Dégradation des matériaux
- Essais à grande échelle

4 Perspectives

Influence du rayonnement - Détermination du débit masse de combustible



Modèle simple d'ablation :

□ $T_i < T_c :$

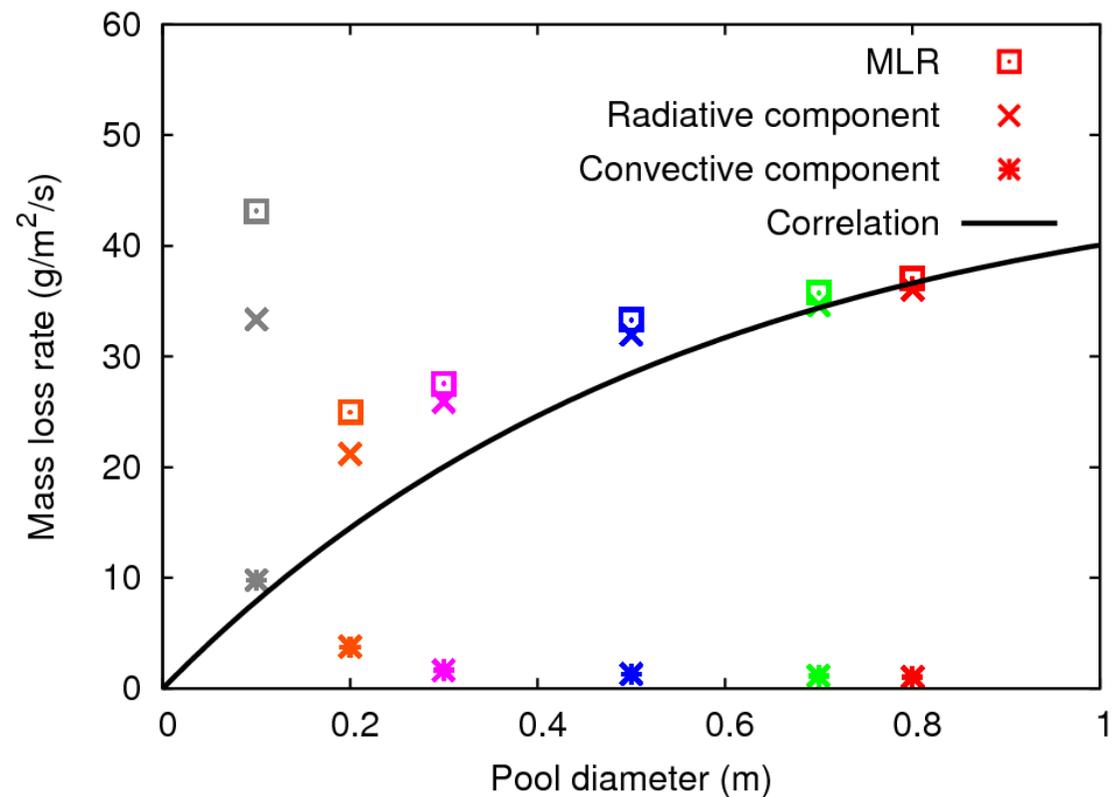
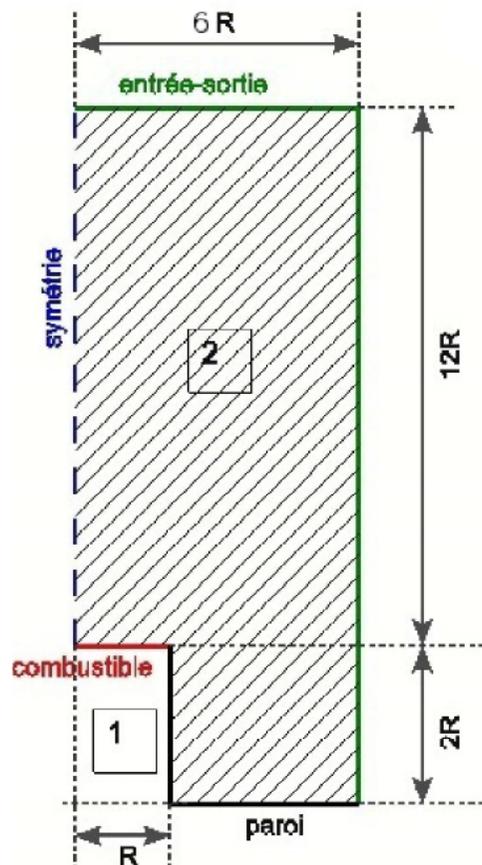
$$-\lambda_w \nabla T_w \cdot \mathbf{n} = h_c(T_f - T_i) + q_r$$

□ $T_i = T_c :$

$$\dot{m}'' = \frac{1}{L_v} \left(h_c(T_f - T_i) + q_r + \lambda_w \nabla T_w \cdot \mathbf{n} \right)$$

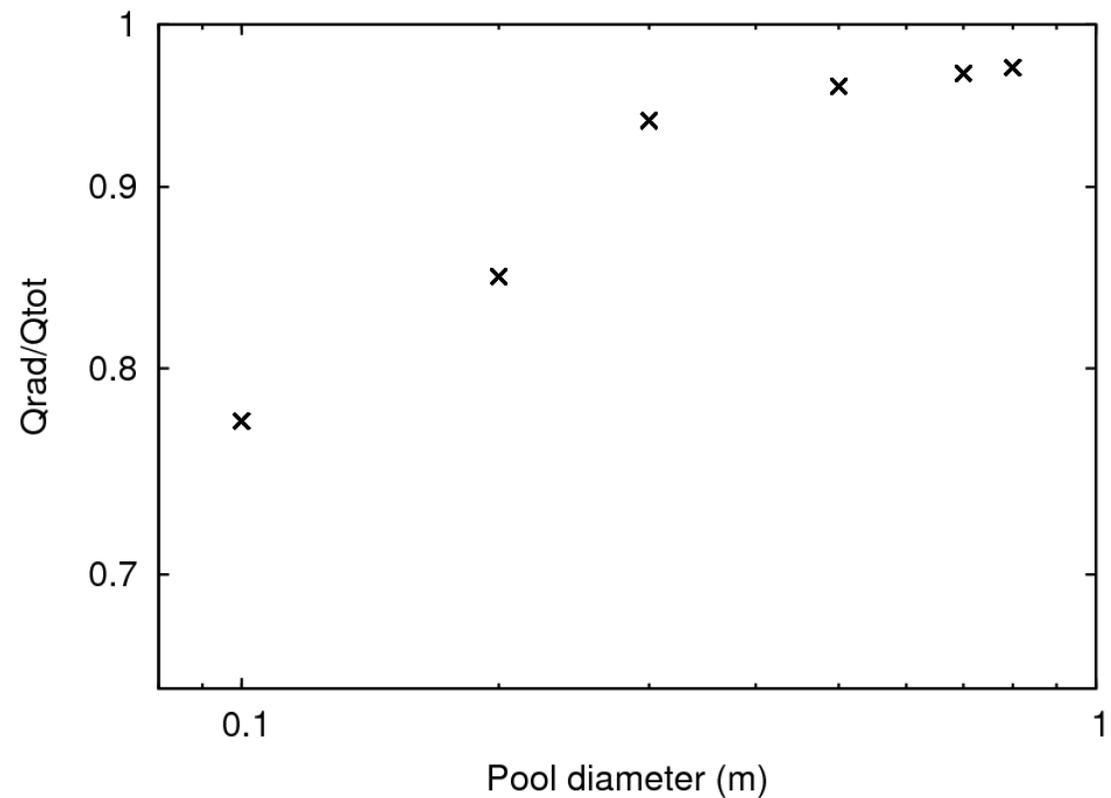
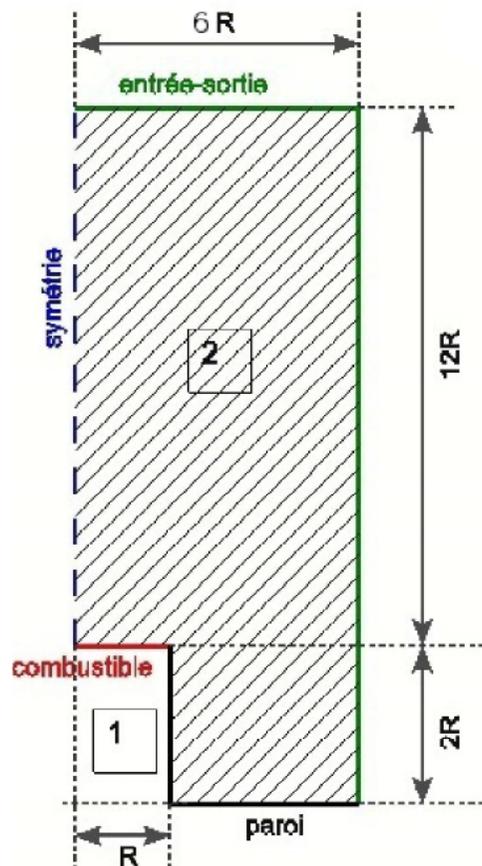
Influence du rayonnement - Détermination du débit masse de combustible

Effet d'échelle : Flamme de dodécane en milieu ouvert



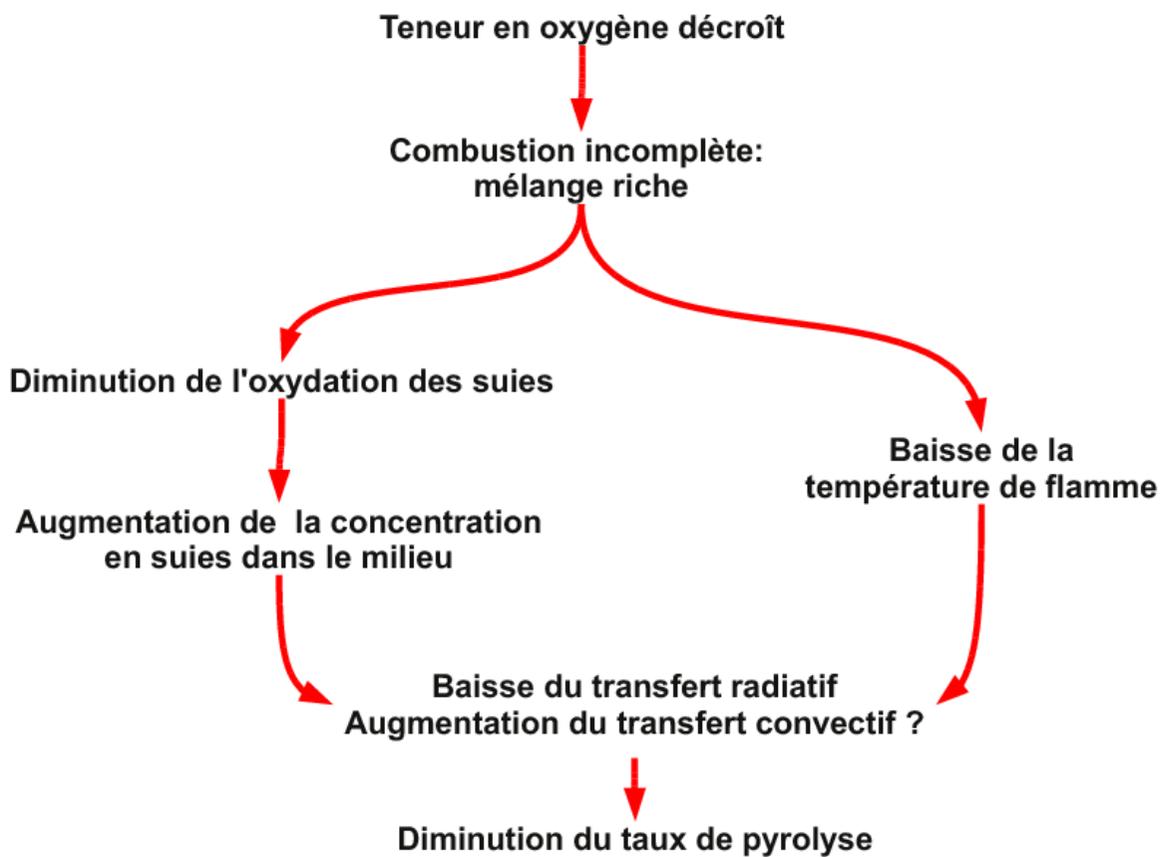
Influence du rayonnement - *Détermination du débit masse de combustible*

Effet d'échelle :
Flamme de dodécane en milieu ouvert



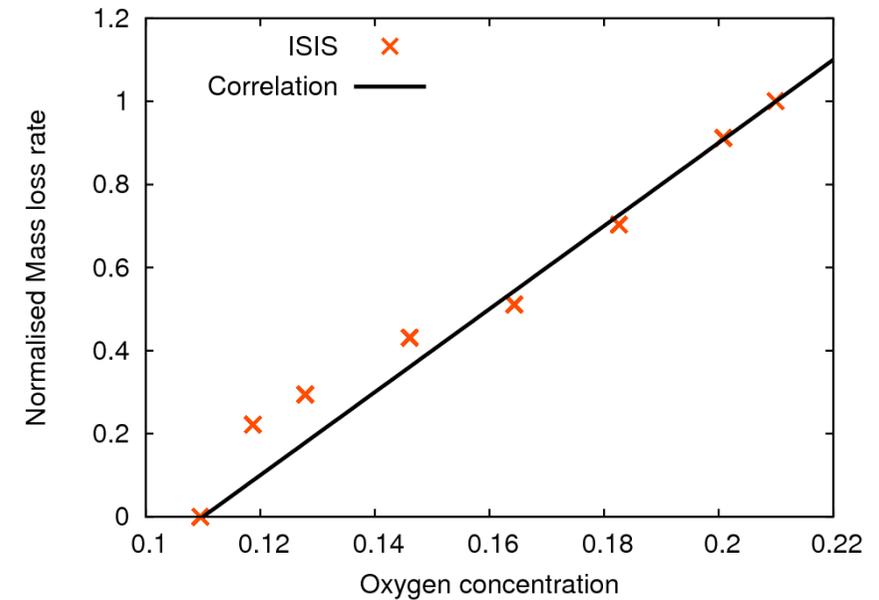
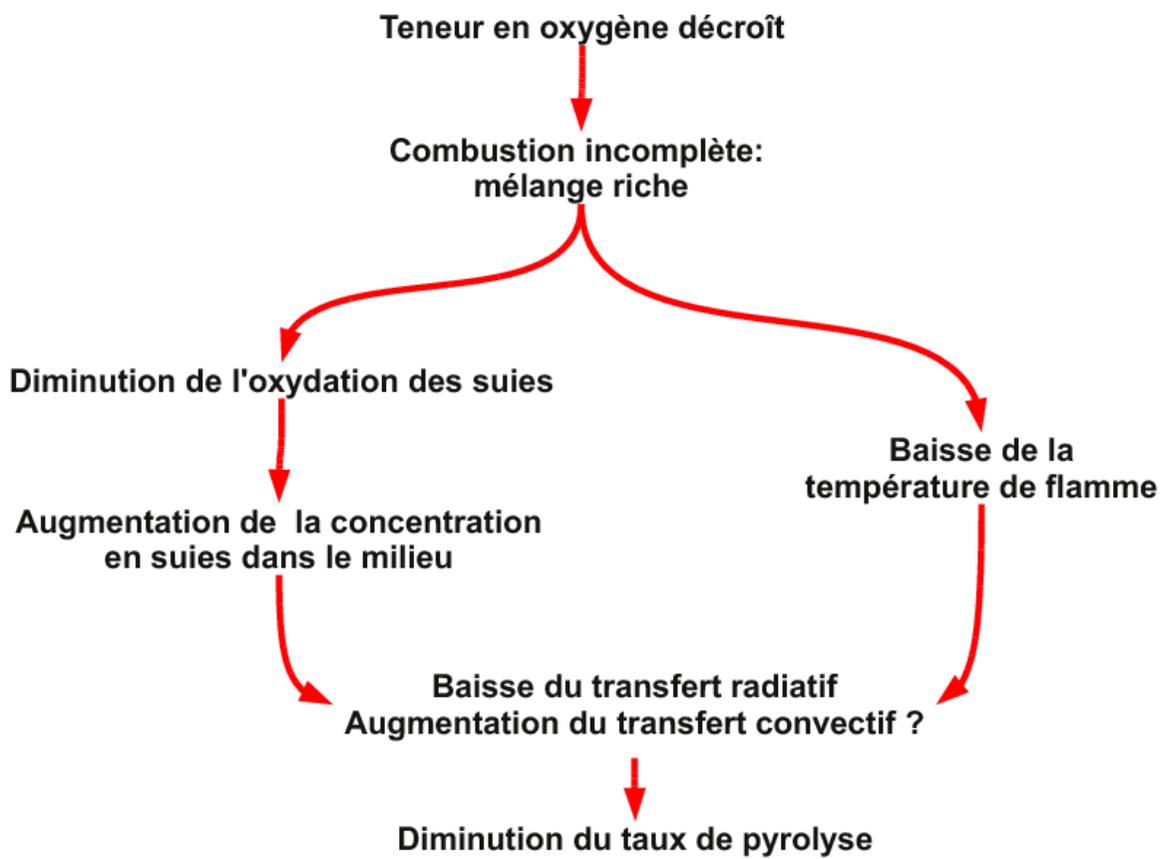
Influence du rayonnement - *Détermination du débit masse de combustible*

Effet de la sous-oxygénation



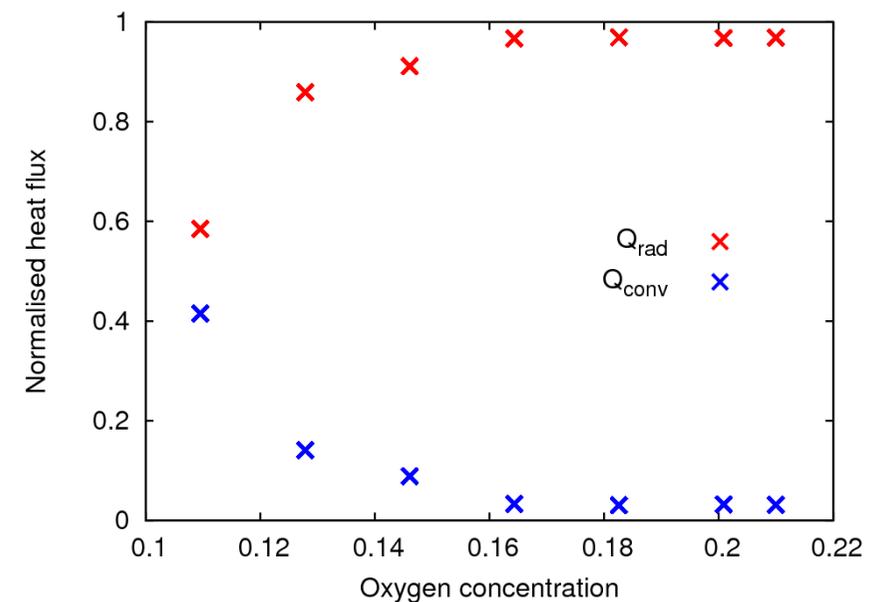
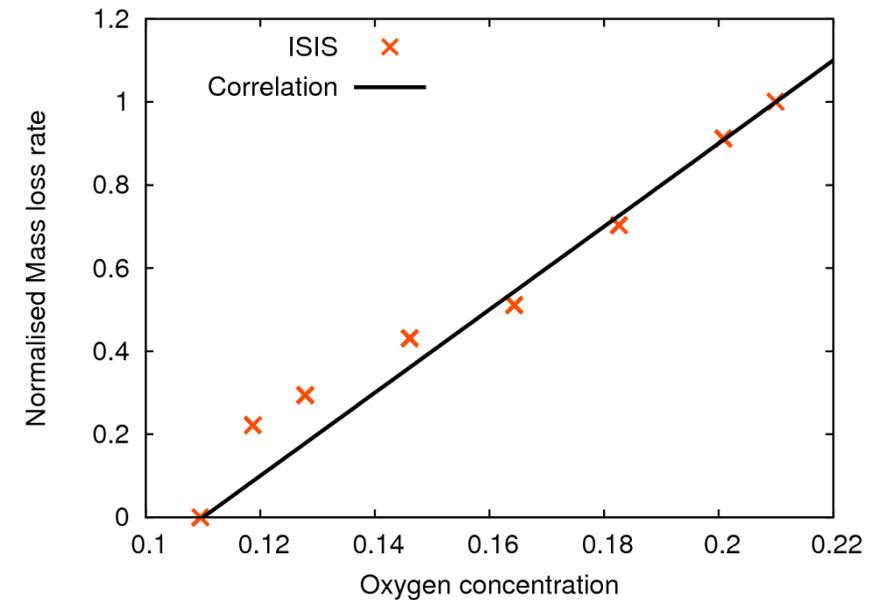
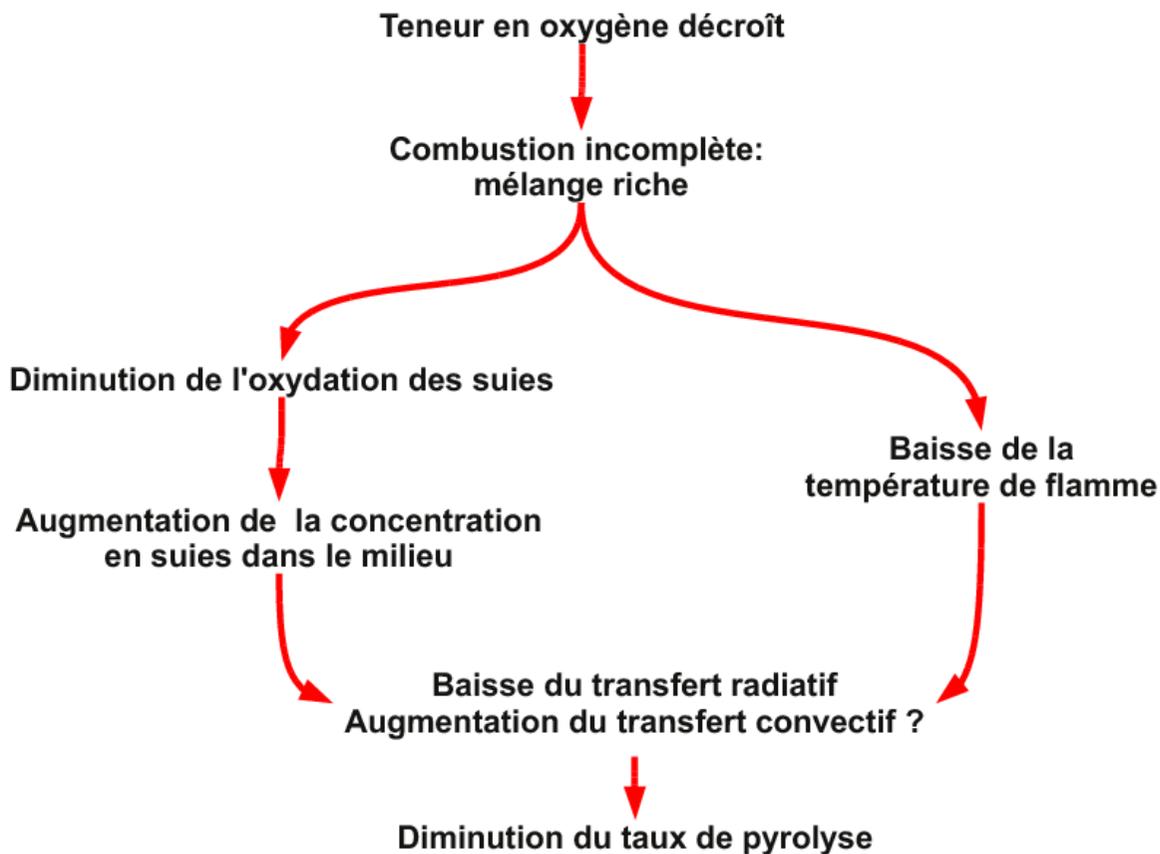
Influence du rayonnement - *Détermination du débit masse de combustible*

Effet de la sous-oxygénation



Influence du rayonnement - *Détermination du débit masse de combustible*

Effet de la sous-oxygénation



Influence du rayonnement *Dégradation des matériaux*

Thèse ETIC, A. Kacem, Dir. B. Porterie, collaboration IRSN/IUSTI

Modélisation de la pyrolyse en profondeur :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + q_{s,r}''' + q_{s,rad}''' \\ \dot{m}_f'' = \int_{s(t)}^L \dot{\omega}_s'''(x, t) dx \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} q_{s,r}''' = -\Delta H_R \rho_s A \exp(-T_a/T_s) \\ q_{s,rad}''' = - \int_0^\infty \nabla \cdot \mathbf{q}_\eta d\eta \\ = - \int_0^\infty \left(\frac{\partial \mathbf{q}_\eta^+}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{q}_\eta^-}{\partial x} \right) d\eta \end{array} \right.$$

Hypothèse sur le matériau (pas de diffusion)

- Opaque :

$$q_{s,rad}''' = 0$$

- Gris :

$$q_{s,rad}''' = - \int_0^\infty \left[2\kappa(q^+ + q^-) - 4\kappa E_b(T) \right] d\eta$$

- Spectral :

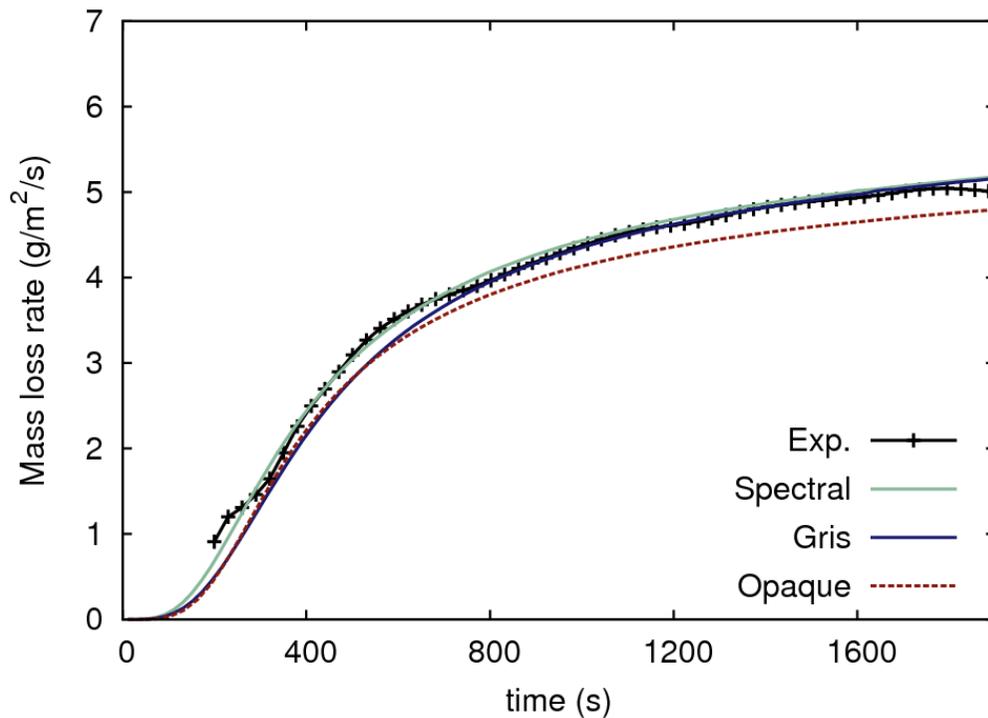
$$q_{s,rad}''' = - \int_0^\infty \left[2\kappa_\eta(q_\eta^+ + q_\eta^-) - 4\kappa_\eta E_{b\eta}(T) \right] d\eta$$

Influence du rayonnement *Dégradation des matériaux*

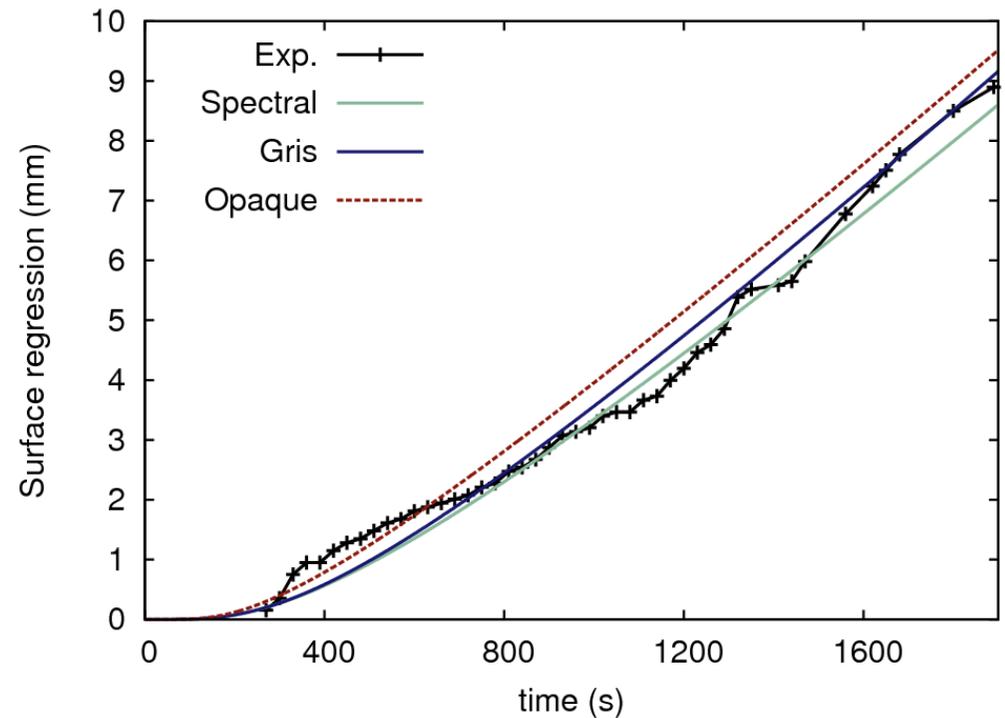
Thèse ETIC, A. Kacem, Dir. B. Porterie, collaboration IRSN/IUSTI

Paramètres déterminés à l'aide d'un algorithme génétique

Résultats sur 2 configurations :

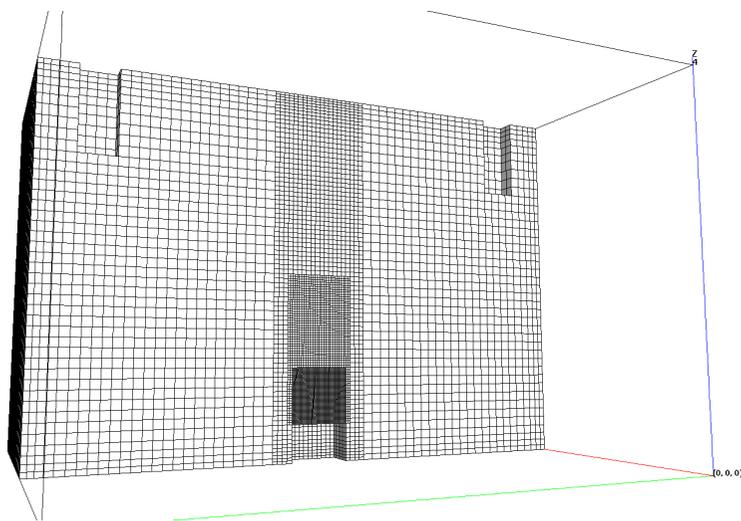
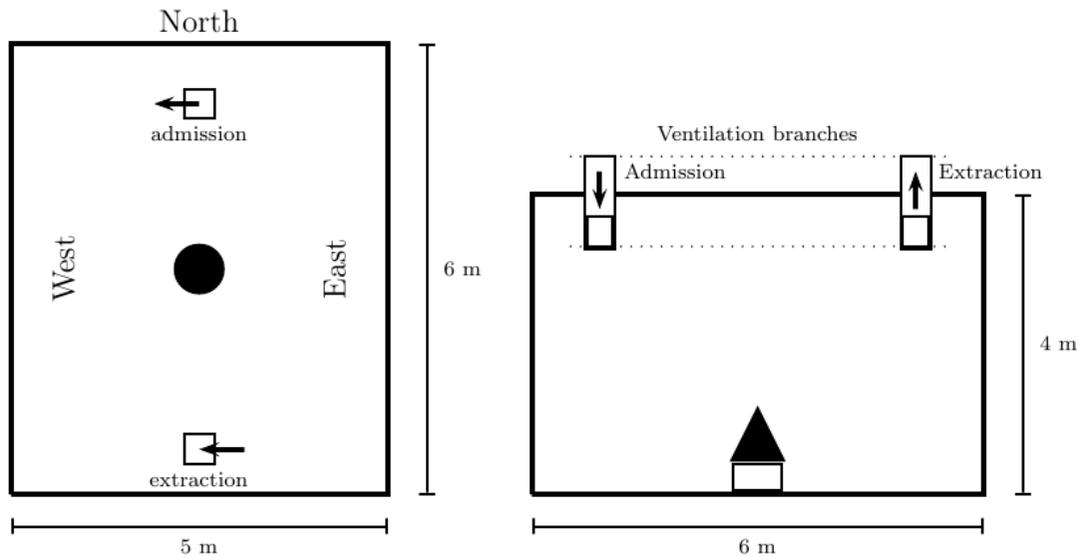


Cône, 18kW/m^2



Flamme

Influence du rayonnement - *Essais à grande échelle*



Modélisation

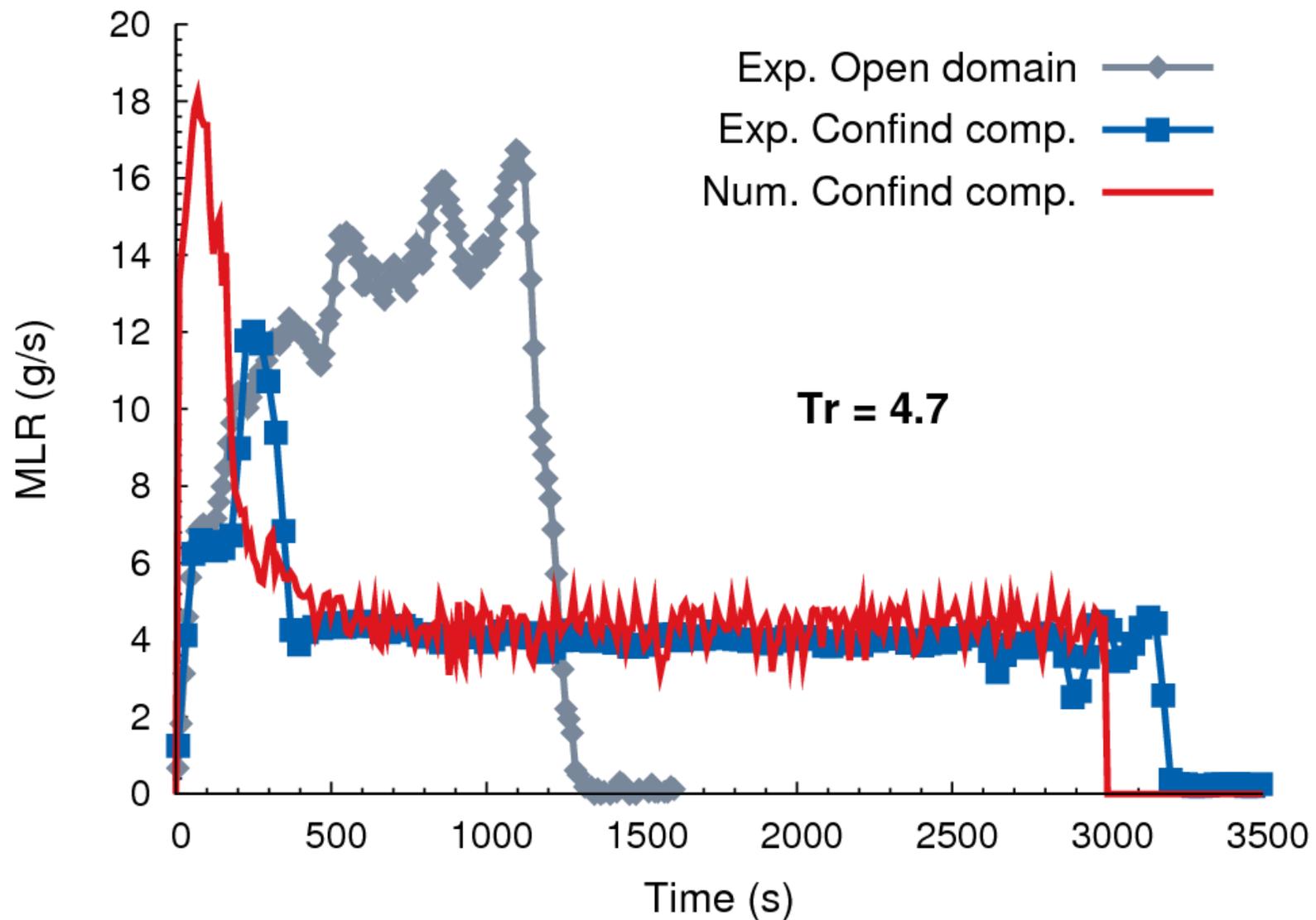
- Équ. RANS,
- Modèle de turbulence $k - \varepsilon$,
- Modèle anisotrope GGDH pour G_k ,
- Combustion : z, Y_F
- Energie + parois
- Transferts radiatifs : FVM, milieu gris
- Modèle de changement de phase de type ablation

Numérique

- $\approx 300\ 000$ volumes de contrôle,
- Raffinement local,
- Algo. en temps semi-implicite (CFL > 1)

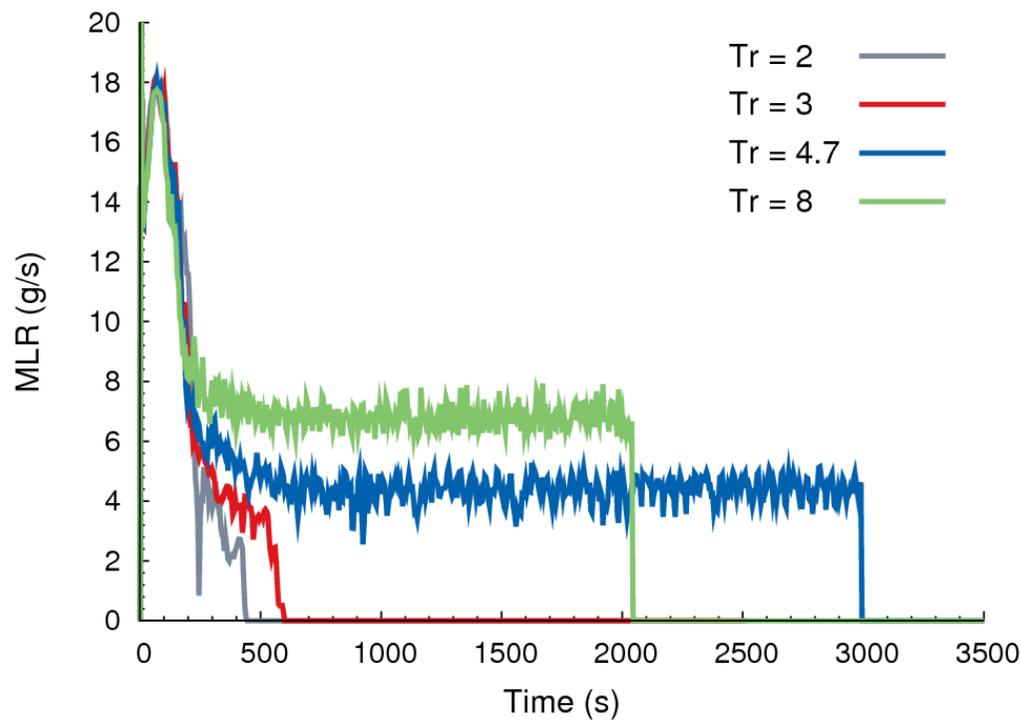
Débit masse de combustible

Taux de renouvellement : 4.7 h^{-1}

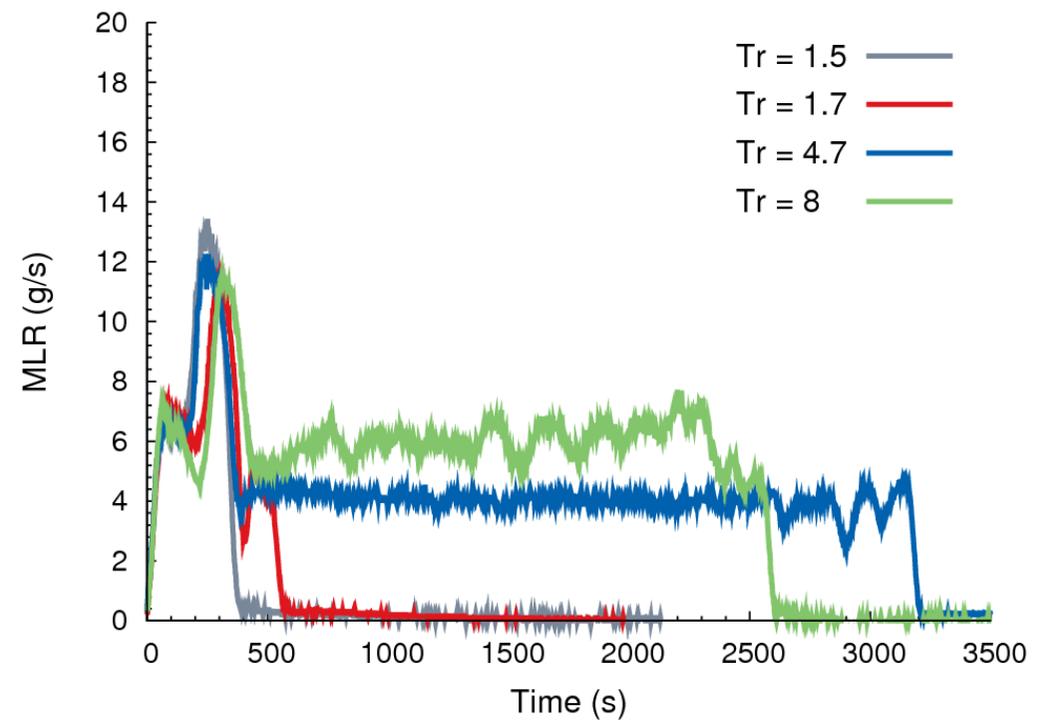


Débit masse de combustible

Simulations prédictives PRISME-Source



ISIS



Exp.

- 1 Contexte IRSN
- 2 Le code de calcul ISIS
- 3 Influence du rayonnement
- 4 Perspectives**

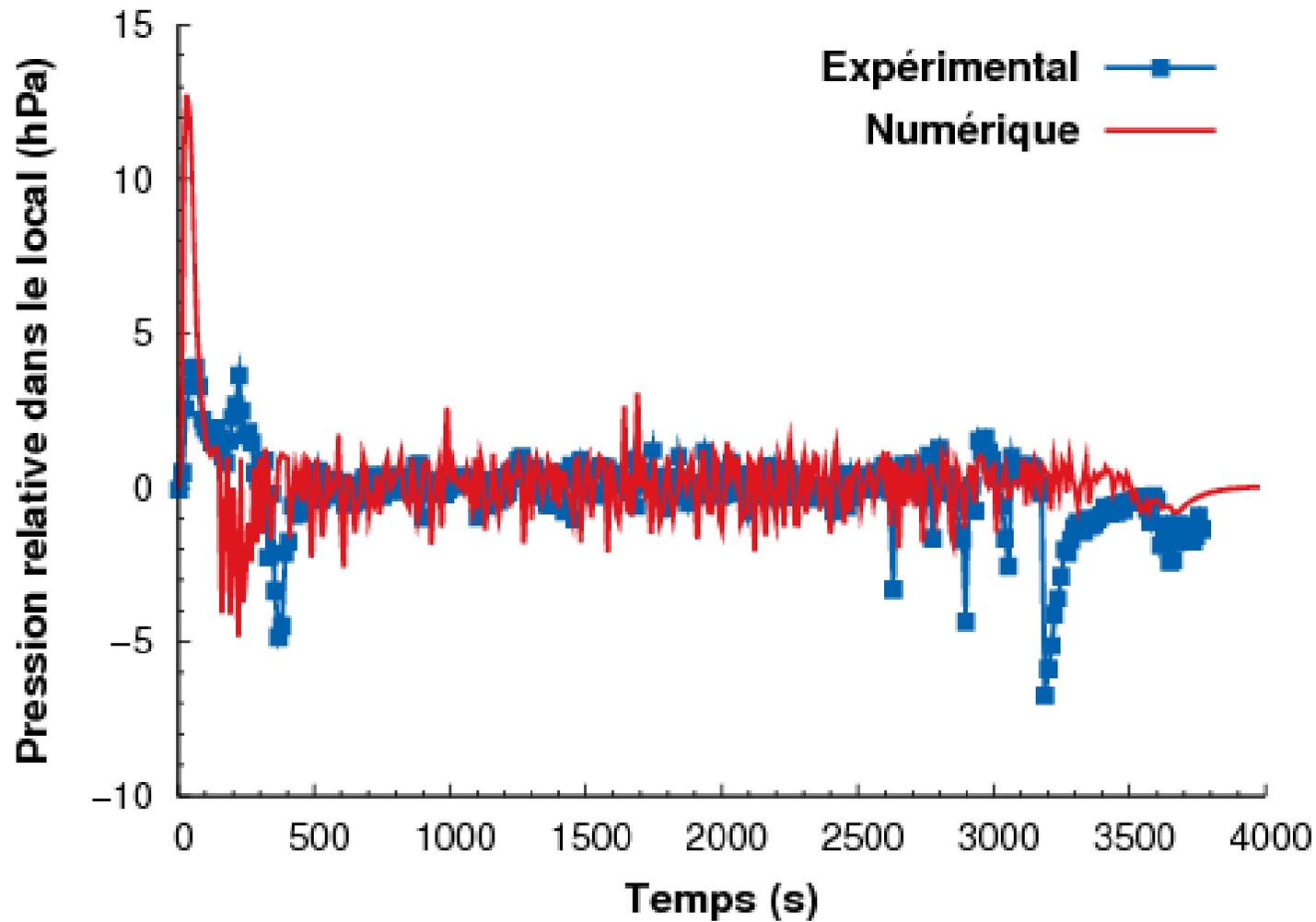
Perspectives

- **Implémentation du modèle WSGGM (version non-grise)**
- **Couplage phase condensée/continue**
 - ▶ Détermination numérique/expérimentale des flux radiatifs et convectifs
 - Étude expé. en cours avec l'IUSTI
 - ▶ Propagation de flamme sur surfaces solide/liquide
- **Influence de la sous-oxygénation**
 - ▶ Travail de recherche expérimental (thèse - IRSN/IUSTI)
 - ▶ Détermination expérimentale du débit masse et des flux de chaleur

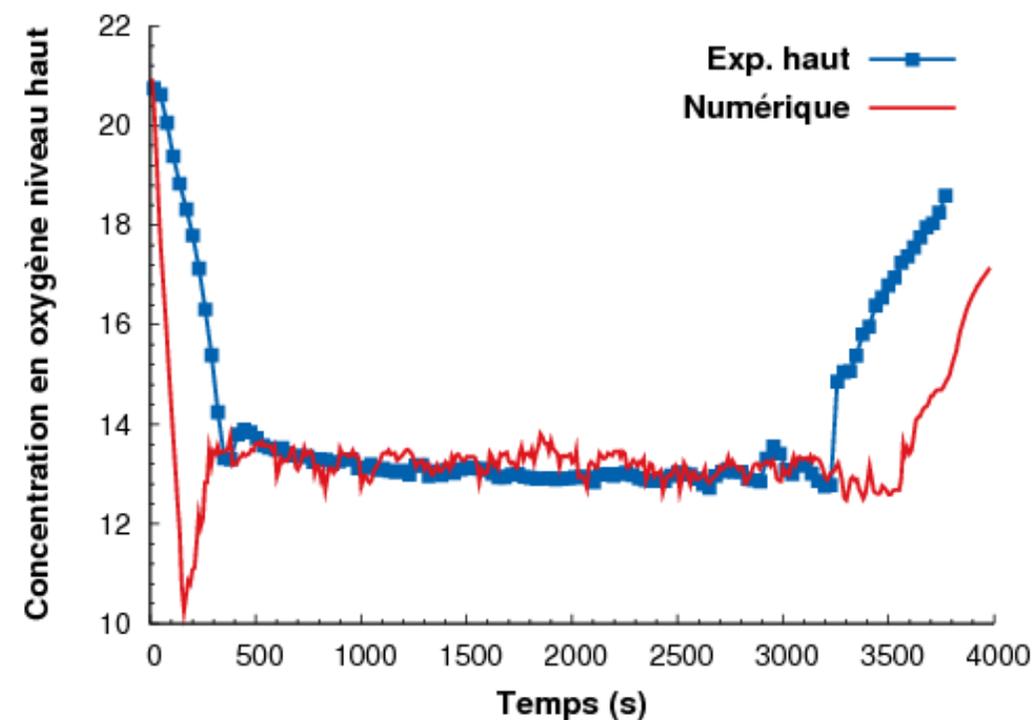
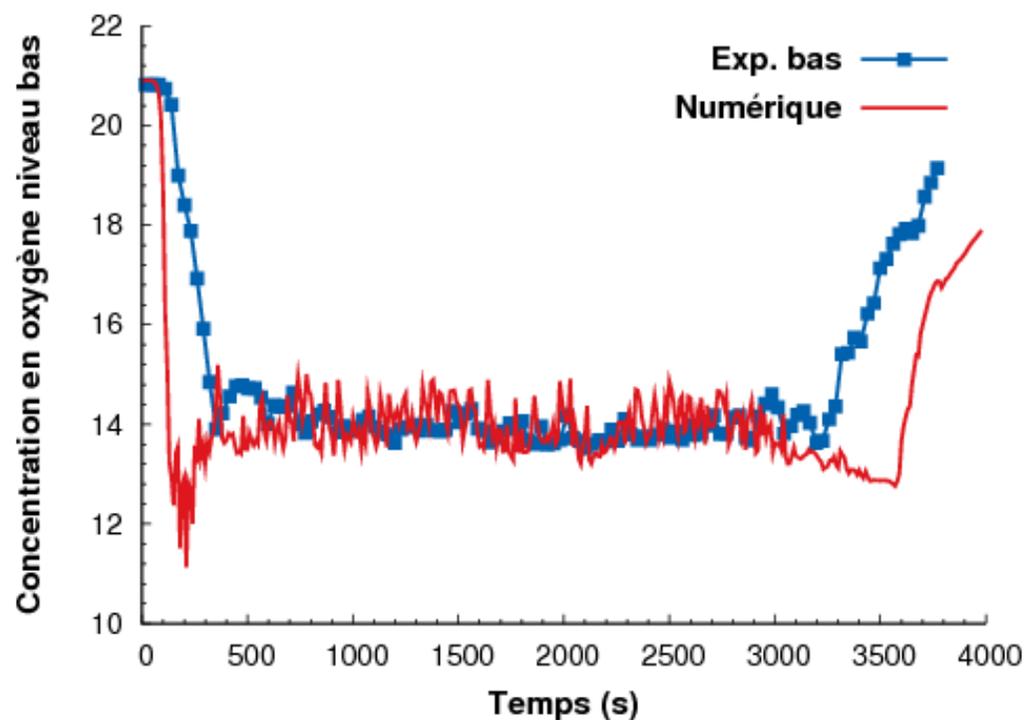
Merci de votre attention !

<https://gforge.irsna.fr/gf/project/isis>

Pression dans le local



Concentration en oxygène



Température dans le local

