



Détermination par un code CFD de l'évolution de la puissance d'un feu en régime de sous ventilation dans un milieu confiné et mécaniquement ventilé

Ayoub NASR

Octobre 2008 – Octobre 2011

Directeurs de thèse : Jean Pierre GARO (LCD – CNRS UPR 9028)
Hazem El Rabii (LCD – CNRS UPR 9028)

Encadrant : Sylvain Suard (IRSN) – Laurent Gay (EDF)

Table des matières

Problématique & Démarche

Terminologie

Effet de la ventilation

Analyses des résultats

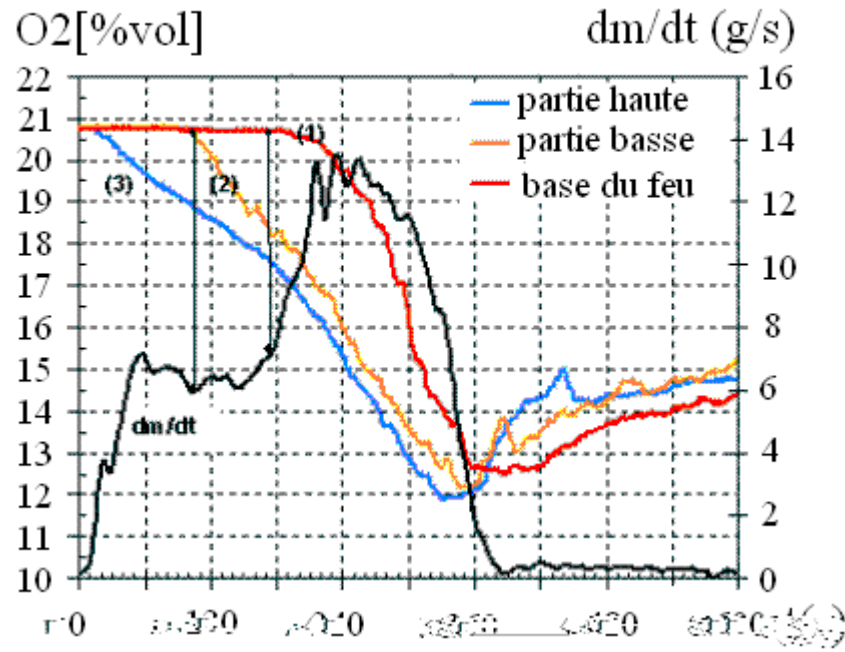
Perspectives

Problématique

Modélisation de l'évolution de la puissance du foyer en milieu confiné ventilé jusqu'à son extinction

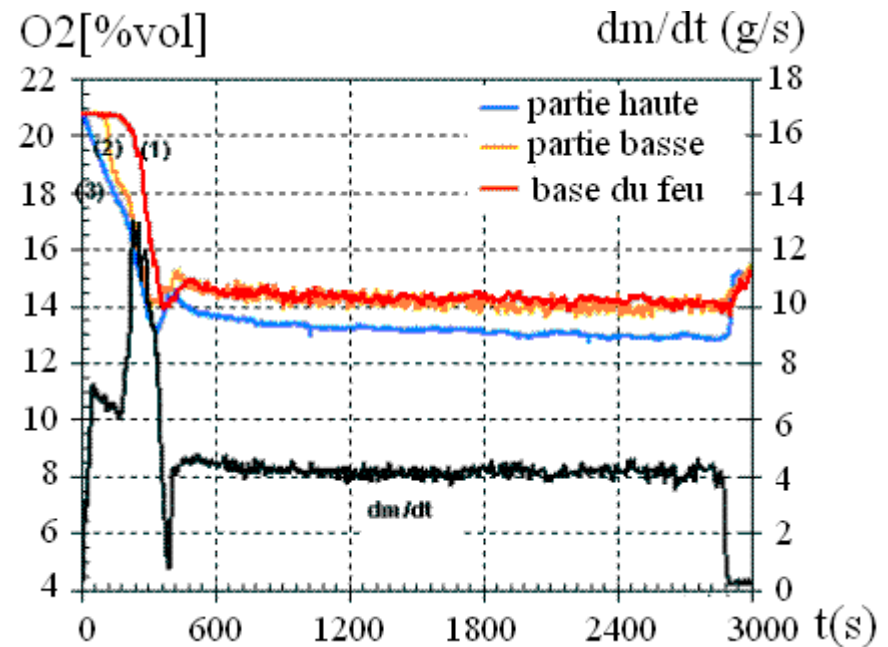
Foyer en régime de sous-ventilation : \Rightarrow Pretrel et al. [2005]

Extinction par défaut d'oxygène



Diminution importante du débit
massique de combustible

Extinction par défaut de combustible



Durée du feu peut être 2 à 3 fois supérieure au foyer
équivalent placé en milieu ouvert

Démarche adoptée

Prédiction de l'effet du **niveau d'oxygène** dans le local feu sur le **débit massique** de combustible pour des configurations représentatives de la problématique nucléaire

Prédiction de la puissance thermique dégagée par le foyer ainsi que les durées de feu en régime de combustion sous ventilé



Analyse des modèles de pyrolyse et de combustion existants permettant d'élaborer une modélisation pertinente et cohérente du problème

Implémentation de la modélisation du problème dans un code CFD (ISIS) de l'IRSN

Validation de la modélisation proposée :

Analyse des résultats sur les prédictions du débit massique de combustible et de la durée du feu.
Comparaison des résultats numériques obtenus avec les données issues de la littérature et des essais réels de l'IRSN.

Terminologie

1. I. Débit calorifique (kW)

Rendement de la combustion

Débit massique surfacique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

$$\dot{Q} = \chi \cdot A_f \cdot \dot{m}_F'' \cdot \Delta H_c \rightarrow \text{Chaleur de la combustion (kJ} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$$

Surface de combustible (m^2)



$$\dot{m}_F = \dot{m}_b + \dot{m}_u$$

$$\dot{m}_b = \dot{m}_F \quad \phi \leq 1 \text{ Régime sur-ventilé}$$

$$\dot{m}_b = \dot{m}_o \cdot r \quad \phi > 1 \text{ Régime sous-ventilé}$$

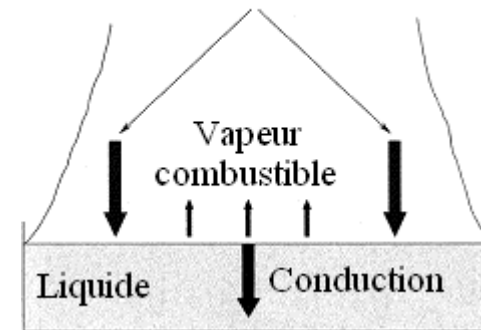
$$\dot{Q} = \dot{m}_b \cdot \Delta H_c$$

1. II. Débit massique surfacique

$$\dot{m}_F'' = \frac{\dot{Q}_F'' - \dot{Q}_L''}{L_v} \begin{cases} \dot{Q}_F'' = \dot{q}_f'' + \dot{q}_{\text{externe}}'' \\ \dot{Q}_L'' = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \end{cases}$$

$$\dot{q}_f'' = \dot{q}_{\text{conv}}'' + \dot{q}_r'' + \dot{q}_{\text{cond}}''$$

Flux thermique de la flamme
radiatif + convectif



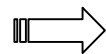
Effet de la ventilation

2. I. Effet de la concentration en oxygène

Essais de *Tewarson et al.* [1981]
G. Santo et F. Tamanini [1981]
Beaulieu et Dembsey [2007]

polyméthylméthacrylate
heptane
polypropylène
polystyrène
polyoxyméthylène
Propylène

Concentration en
oxygène augmente



T_f moins sensible
 Emissivité de la flamme augmente
 Flux radiatif augmente
 Flux convectif moins sensible

POM : Le flux convectif augmente avec l'oxygène mais le flux radiatif est moins sensible

Effet de la ventilation

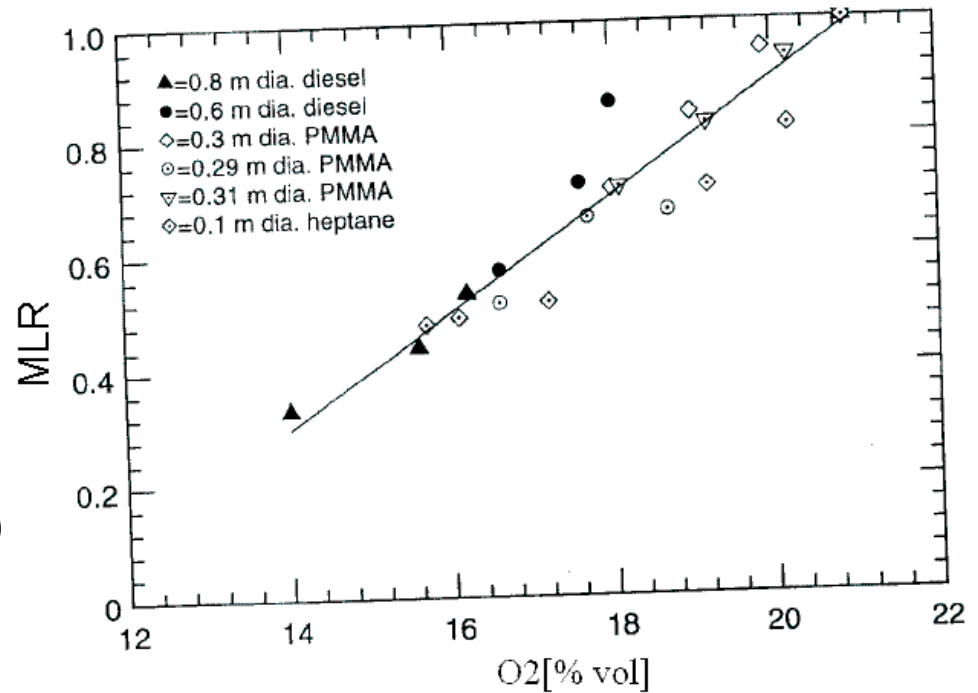
2. II. Essais Peatross-Beyler [1997]

Diesel, bois, polyuréthane

Grande échelle
 Regime sous-ventilé
 Ventilation forcée
 Diesel

Petite échelle

Tewarson et al. [1981] (PMMA et heptane)
 Santo et Tamanini [1981] (PMMA)



Corrélation de Peatross-Beyler

$$\frac{\dot{m}_F''}{\dot{m}_{21}''} = \alpha O_2[\%] - \beta$$

$\alpha = 0,1$

$\beta = 1,1$

Effet de la ventilation

2. III. Modèle d'Utiskul [2005]

nappes de liquide, fagots du bois

Echelle réduite
Régime sous-ventilé
Ventilation naturelle
Effet thermique externe

Analyse théorique

Nombre B (Quintiere)

$$\dot{q}''_f = \dot{q}''_c + \dot{q}''_r \quad \dot{q}''_c = \frac{h_{conv}}{c_p} \left[\frac{\ln(1+B)}{B} \right] (Y_{ox,\infty} \Delta h_c / r - c_p (T_s - T_\infty))$$

Flux radiatif négligeable
Nombre B petit

Modèle théorique d'Utiskul

$$\dot{m}_F = \dot{m}''_{F,o} A_{F,b} \frac{Y_{ox,l}}{Y_{ox,o}} + \frac{\dot{q}_{externe}}{L}$$

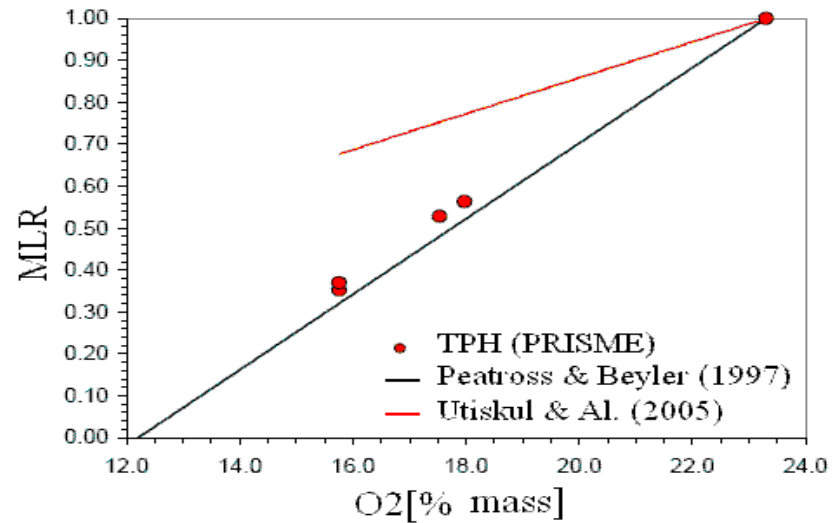
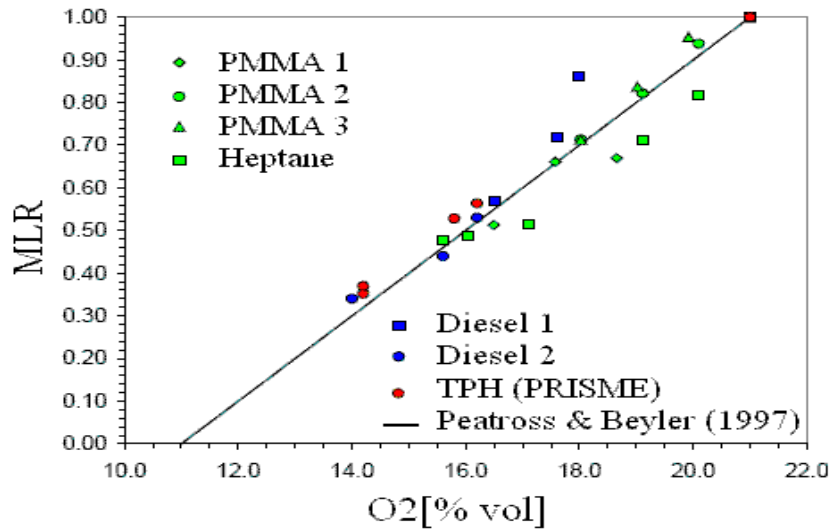


Utiskul et Quintiere [2005] $\Rightarrow A_{F,b}$

Effet de la ventilation

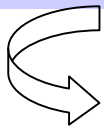
2. IV. Limites sur les applications des modèles (Projet Prisme source - Audouin [2006])

Essais réalisés à grande échelle à l'IRSN sur les feux du TPH pour étudier l'efficacité de la corrélation de Beyler (schéma gauche) et de la théorie d'Utiskul (schéma droite)



Bon accord entre les résultats expérimentaux issus de Prisme source et la corrélation de Peatross Beyler

Inefficacité du modèle théorique d'Utiskul à prédire les résultats expérimentaux lorsque O₂ [%] diminue



Local à une zone (Melis et Audouin [2008])



Validation des modèles

Données expérimentales
 Projet « PRISME – SOURCE »
 IRSN (2006)

- Grande échelle
- Local 120 m³
- Admission d'air en haut ou en bas
- TPH 0,2 et 0,4 m²
- Ventilation forcée

Objectif :

Capacité des modèles existants à prédire le débit massique vaporisé

- Application du modèle empirique de **Peatross et Beyler**
- Application du modèle théorique d'**Utiskul**

Corrélation Peatross et Beyler

Rappel :

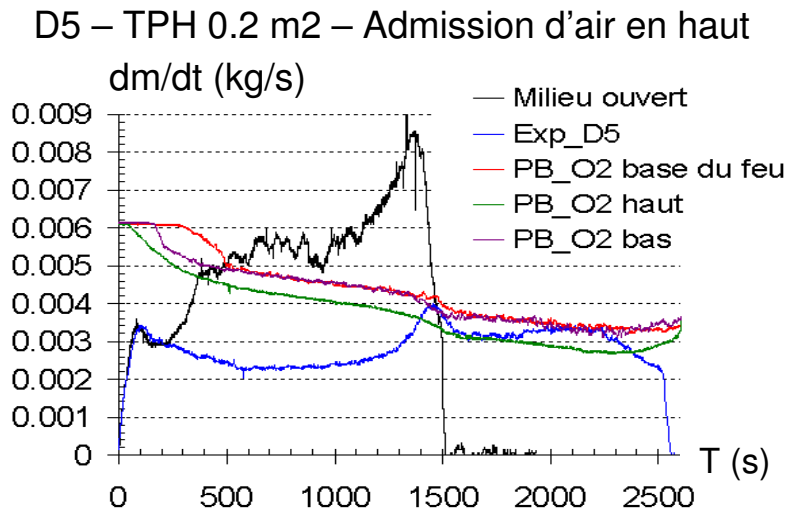
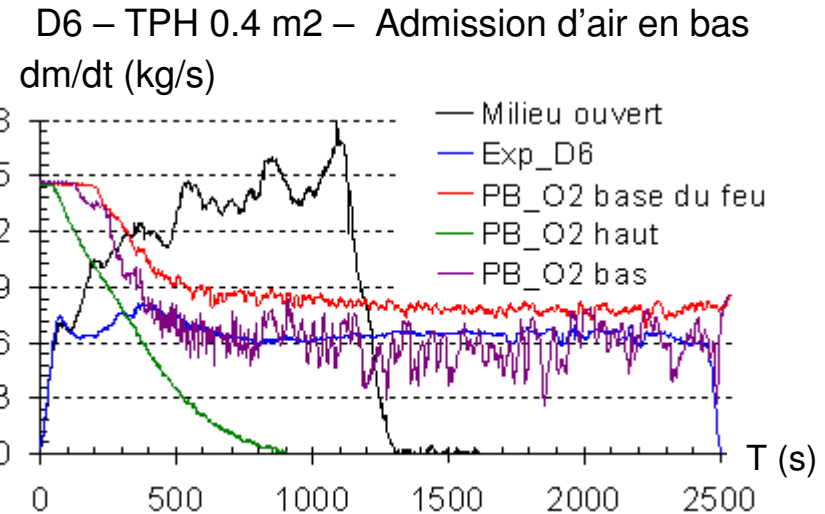
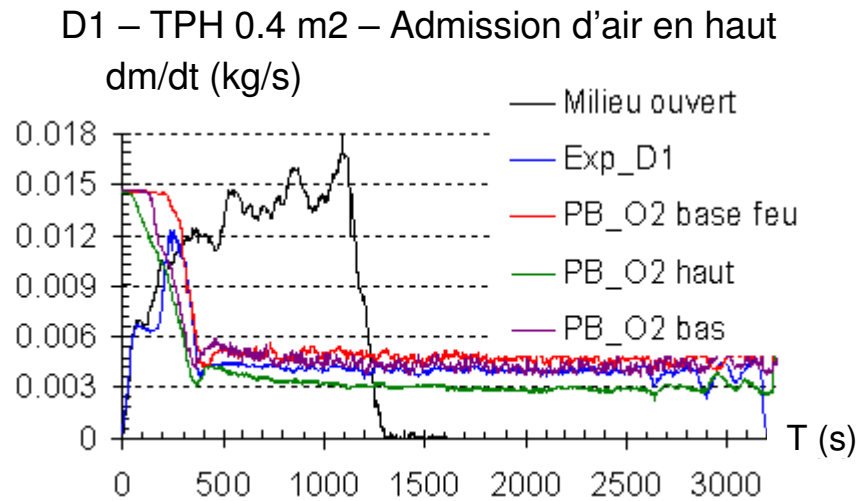
$$\frac{\dot{m}_F''}{\dot{m}_{21}''} = \alpha O_2 [\%] - \beta$$

$$\alpha = 0,1 \quad \beta = 1,1$$

$$\dot{m}_{21}'' = \dot{m}_\infty'' \cdot (1 - e^{-K \cdot D}) \quad (\text{Babrauskas})$$

$$O_2 [\%] \left\{ \begin{array}{l} \text{Mesurée autour du bac} \\ \text{Mesurée dans la partie haute et basse du local} \end{array} \right.$$

Validation des modèles



Phase d'allumage : Variation du débit massique suit celle en milieu ouvert

Phase stationnaire : La corrélation empirique de Beyler prévoit correctement le débit massique

Estimation d'une valeur approchée pour la durée totale du feu

Validation des modèles

Modèle théorique d'Utiskul

Rappel :

$$\dot{m}_F = \dot{m}_{F,o}'' A_{F,b} \frac{Y_{ox,l}}{Y_{ox,o}} + \frac{\dot{q}_{externe}}{L}$$

$Y_{ox,o}$: Mesurée à l'entour de combustible

$$Y_{ox,o} = 0.223 \quad \dot{m}_{F,o}'' = \dot{m}_{21}''$$

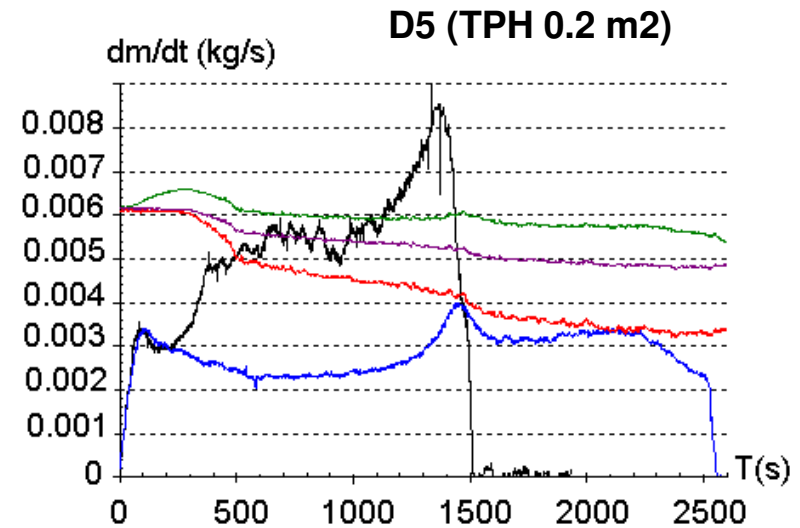
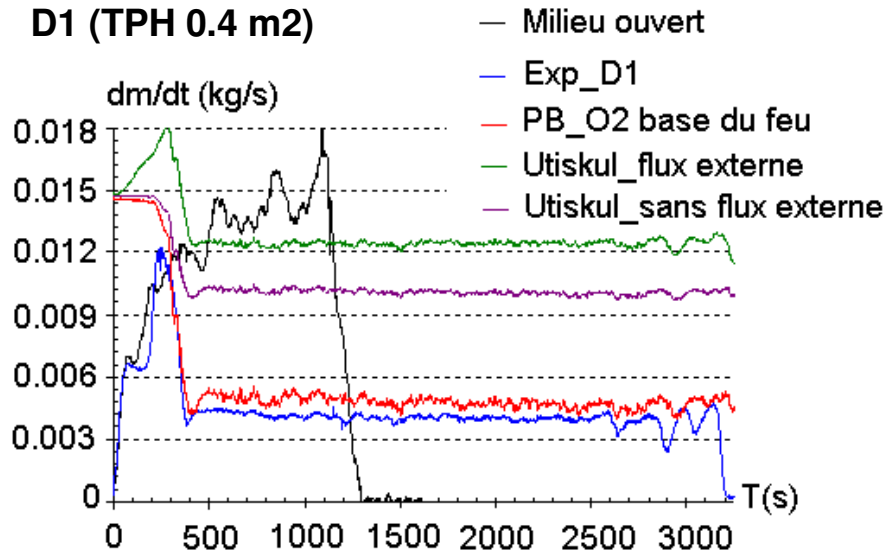
$$\dot{q}_{externe} = A_F \cdot \sigma [T_g^4 - (298)^4]$$

T_g = moyenne des valeurs mesurées par 18 thermocouples sur un axe vertical

Essai D1 et D5

- Deux cas ont été étudiés : Avec ou sans flux thermique externe

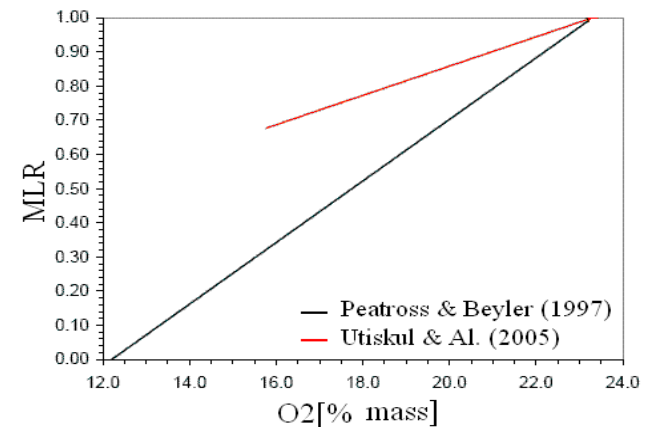
Validation des modèles



Conclusions

Le débit massique de TPH est mal prédit par cette théorie

Plus O2 [% mass] diminue à l'état stationnaire, la différence entre les résultats va augmenter



Perspectives - Modèle d'Utiskul

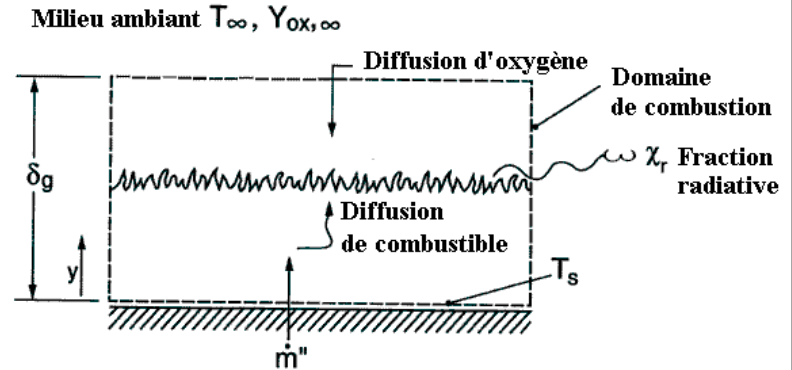
Equations de conservation d'énergie et d'oxygène



Quintiere

$$\dot{m}'' = \frac{h_{conv}}{c_g} \ln(1+B)$$

$$B = \frac{Y_{ox,\infty}(1 - \chi_r / \chi_a) \Delta h_c / s - c_p(T_s - T_\infty)}{L}$$



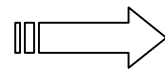
Utiskul

$$\dot{q}_c'' = \frac{h_{conv}}{c_p} \left[\frac{\ln(1+B)}{B} \right] (Y_{ox,\infty} \Delta h_c / s - c_p(T_s - T_\infty))$$

Phase stationnaire → YO2 petite

B petit donc $\ln(1+B)/B \approx 1$

Faible contribution pour $h_{conv}(T_v - T_\infty)$ et le flux radiatif est négligeable



$$\dot{m}_F = \dot{m}_{F,o}'' A_{F,b} \frac{Y_{ox,l}}{Y_{ox,o}} + \frac{\dot{q}_{externe}}{L}$$

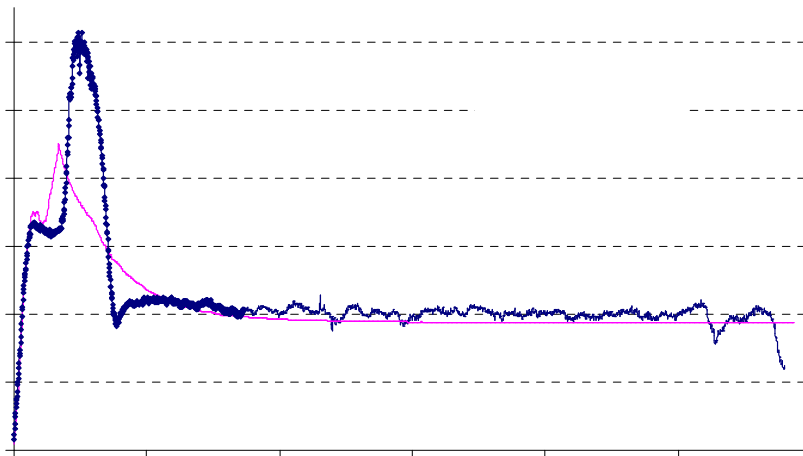
Modélisation avec ISIS

Simulation numérique d'un feu dans des locaux confinés et ventilés mécaniquement
Implémentation des modèles théoriques et empiriques proposés

PRISME – SOURCE Essai D1

Débit massique vaporisé calculé suivant la corrélation de Beyler :

- Concentration en oxygène simulée à l'aide d'une moyenne volumique obtenue dans un volume choisi autour du bac et ayant la même hauteur que la surface de TPH



Bon accord entre les résultats numériques et expérimentaux

Le code a permis de prédire les niveaux de température, les concentrations des gaz et la pression locale

Essais expérimentaux (LCD)



- Validité de la théorie d'Utiskul à petite échelle (Q_{conv} en fonction du B , effet de XO_2 sur B)



- Validité de la corrélation de Peatross & Beyler à petite échelle (effets thermiques externes)

- Evolution du flux radiatif en fonction d'oxygène

- Contribution du flux radiatif au flux thermique total issu de la flamme (phase stationnaire)

Représentation des essais à grande échelle (PRISME-SOURCE) sur une maquette

Validation du code numérique ISIS



Essais expérimentaux
(LCD)

Mesure des flux radiatifs au niveau du bac

Mesure du débit massique produit

Mesure de la concentration en oxygène proche du récipient

Mesure des niveaux de température sur deux axes

Merci

pour votre attentio



2-3 Juillet 2009