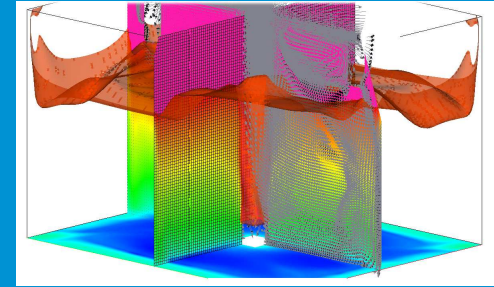


IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE



Etude numérique et expérimentale sur le comportement d'un feu dans un milieu confiné et mécaniquement ventilé

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

A. NASR, S. SUARD - IRSN
J.-P. GARO, H. EL-RABII - PPRIME
L. GAY - EDF

GDR 17-18 Juin 2010



Table des matières

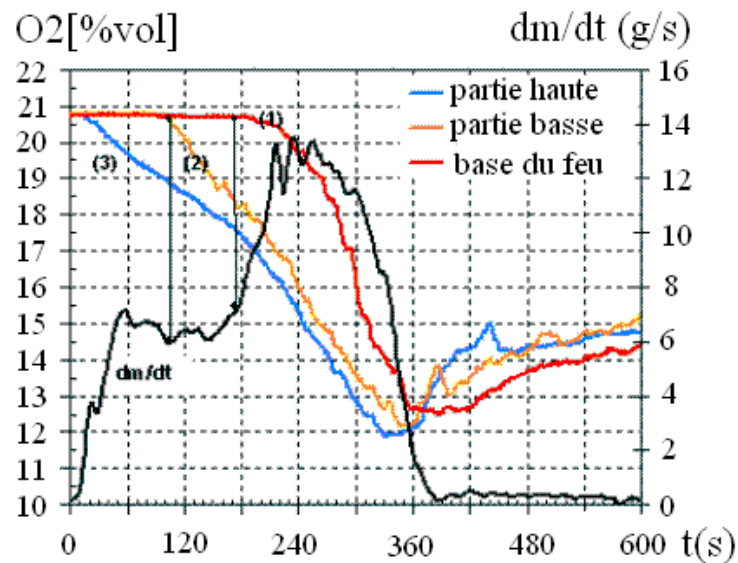
- 1. Rappel du contexte**
- 2. Démarche adoptée**
- 3. Synthèse des approches existantes**
- 4. Approche théorique**
- 5. Simulation numérique avec le code ISIS**
- 6. Validation du modèle**
- 7. Essais expérimentaux à échelle réduite**
- 8. Travaux envisagés**

Rappel du contexte de l'étude

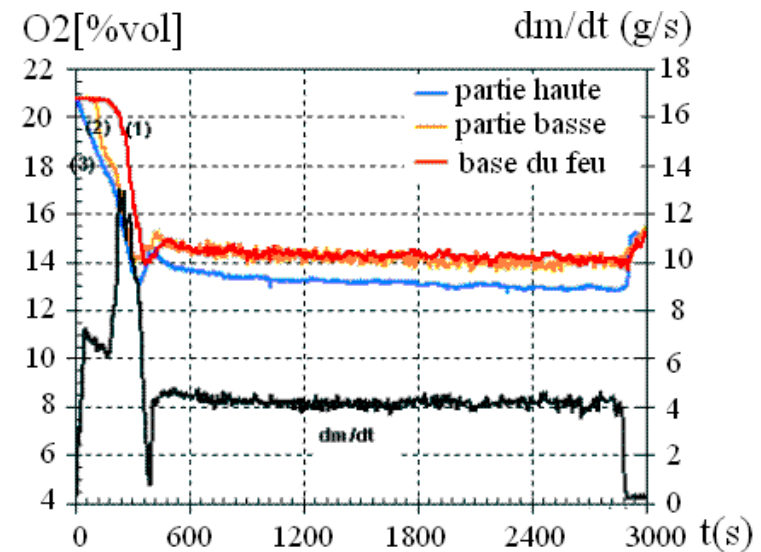
Local confiné et mécaniquement ventilé

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

Extinction par défaut d'oxygène



Extinction par défaut de combustible



Durée du feu est de 2 à 3 fois supérieure au foyer équivalent placé en milieu ouvert

Démarche adoptée

Effet du niveau d'oxygène sur le débit massique de combustible



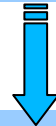
Prédiction de la puissance thermique dégagée par le foyer ainsi que les durées de feu



Analyse des modèles analytiques/empiriques



Implémentation de modèles « globaux » dans le code CFD ISIS permettant de prédire le MLR



Validation de la modélisation proposée (essais expérimentaux, littérature)

Synthèse des approches existantes

❖ Détermination du débit massique vaporisé

- Corrélation empirique de Beyler [1997] : essais expérimentaux
- Approche d'Utiskul [2005] : étude théorique

❖ Validation avec les essais PRISME-SOURCE (Melis et Audouin [2008])

- Bon accord pour la méthode de Beyler
- Inefficacité du modèle d'Utiskul à prédire le débit massique de TPH

❖ Inconvénients des modèles précédents

- Corrélation de Beyler
 - Relation empirique dépendant de 2 constantes (absence de modélisation)
 - Effet du rayonnement externe non considéré
- Approche d'Utiskul
 - Facteur de blockage $\ln(1+B)/B \approx 1$ lorsque B (nombre de Spalding) est petit
 - Flux radiatif de la flamme négligé

❖ Conclusion

- Développement d'un modèle théorique (bilan énergétique à la surface)
- Re-formulation du modèle de Peatross et Beyler

Approche théorique

❖ Bilan énergétique à la surface

$$\dot{m}'' L_v = \dot{q}_{f,c}'' + \dot{q}_{f,r}'' + \dot{q}_{e,r}'' - \dot{q}_{s,r}''$$

$$L_v = \Delta h_{\text{vap}} + c_{p1}(T_s - T_0)$$

❖ Flux thermiques issus de la flamme

□ Transfert convectif de la flamme

$$\dot{q}_{f,c}'' = \frac{h}{c_p} \left(\frac{\gamma}{e^\gamma - 1} \right) \left[\frac{Y_{O_2,\infty} \Delta H_c}{r} (1 - \chi_r) - c_p (T_s - T_\infty) \right]$$

$\gamma = c_p \dot{m}'' / h \approx 1$, Utiskul (2005)

Avantage : Le facteur $\gamma / (e^\gamma - 1)$ (blocking factor) est pris en compte

Approche théorique

- Transfert radiatif de la flamme

$$\dot{q}_{f,r}'' = \sigma(1 - e^{-\kappa L})(T_f^4 - T_s^4)$$

$$\kappa = 1225 f_v T$$

$$L = 0,65 D$$

Avantage : le flux radiatif de la flamme n'est plus négligeable à l'état stationnaire du feu

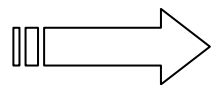
❖ Flux re-rayonné à la surface

$$\dot{q}_{s,r}'' = \sigma(T_s^4 - T_\infty^4)$$

❖ Flux thermique externe

$$\dot{q}_{e,r}'' = \sigma(1 - \varepsilon_f)\varepsilon_g(T_g^4 - T_s^4) + \sigma(1 - \varepsilon_f)(1 - \varepsilon_g)(T_w^4 - T_s^4)$$

≈ 1



$$\dot{q}_{e,r}'' = \sigma(1 - \varepsilon_f)\varepsilon_g(T_g^4 - T_s^4)$$

Simulation numérique avec le code ISIS



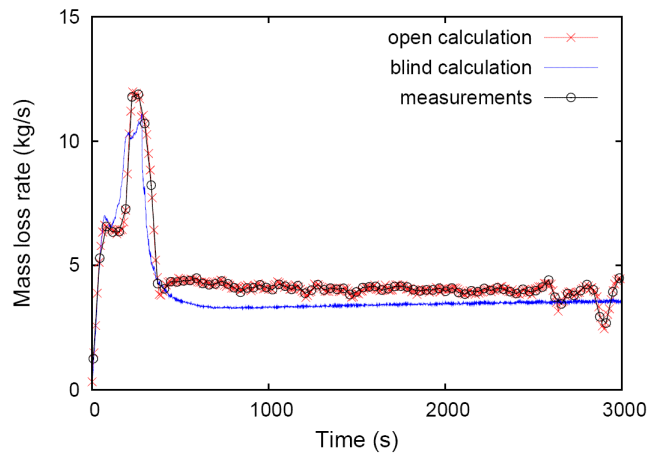
- Description de la simulation
 - Code CFD (ISIS)
 - Maillage de 150,000 cellules raffinée au niveau du bac et des parois
 - Temps physique de la simulation = 4000 s
 - Durée de la simulation : deux jours
 - Pas de temps adaptatif variant entre 10^{-3} s et 1 s
 - Calcul parallèle sur 18 processeurs

- Détermination du MLR
 - Flamme homogène
 - Domaine volumique (forme cylindrique) pour déterminer la température moyenne dans la flamme

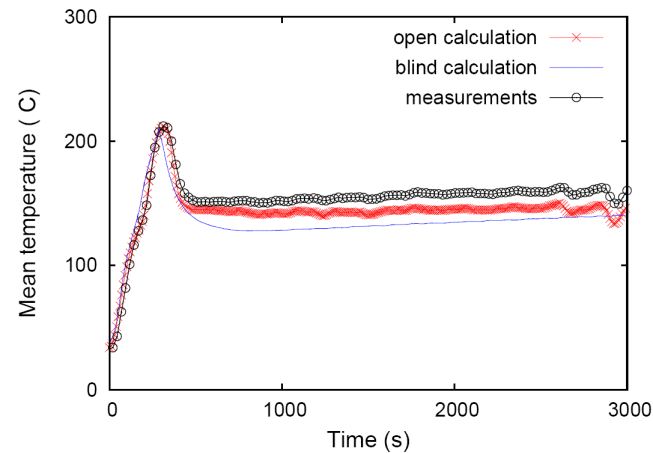
- Conditions environnementales
 - Domaine volumique autour du foyer pour déterminer la température ambiante et la concentration en oxygène
 - Valeur moyenne calculée dans tout le local pour la température des gaz

Validation du modèle

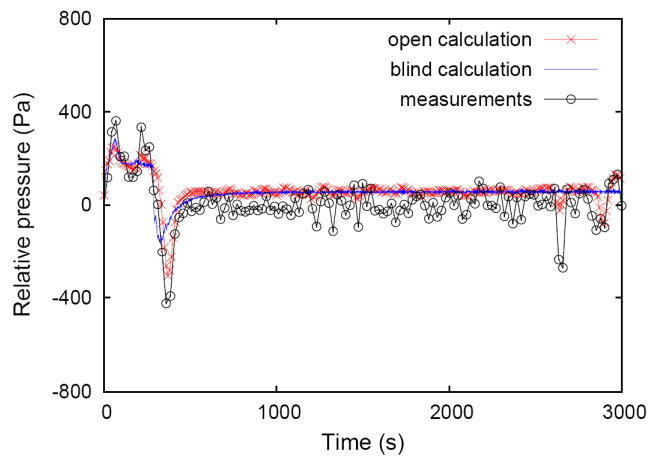
- Essais expérimentaux à l'IRSN (PRISME-SOURCE) Pretrel et al. [2005]
- Local (6 m x 5 m x 4 m) - Installation DIVA



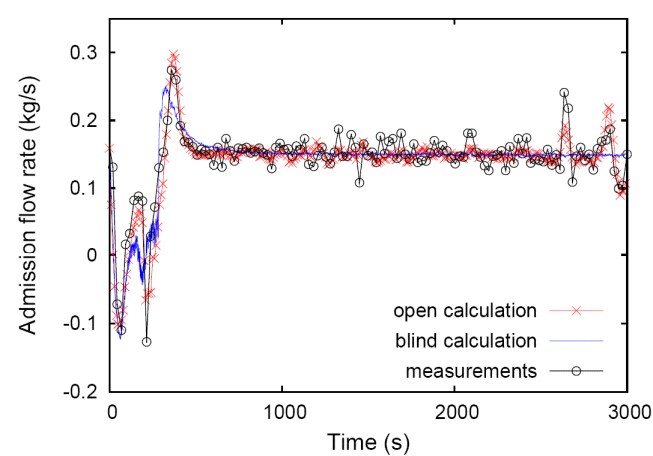
(a) Mass loss rate



(b) Mean gas temperature



(c) Relative pressure



(d) Admission mass flow rate

- TPH 0.4 m²
- Admission d'air en haut (560 m³/h)

Efficacité du modèle à prédire les mesures expérimentales

Modèle en cours de développement, MLR = fct(O₂[%])



Essais expérimentaux à échelle réduite

❖ Etude en similitude

- ❑ Intérêt
 - Eviter le problème de répétitivité des essais à grande échelle (coût et temps)
- ❑ Objectif
 - Représentativité des essais à échelle réduite par rapport aux essais PRISME-Source
 - Obtenir la même phénoménologie en fonction de la ventilation et de la surface du foyer
- ❑ Conservation des nombres adimensionnels (Richardson et Froude)

→ { Similitude géométrique échelle = $2 / 4,93 = 0,405$
Similitude cinématique échelle = 0,63
Similitude des puissances du feu échelle = 0,104

PRISME_SOURCE

- Dimension du local : 120 m³
- Diamètre du bac : 0.71 et 0.5 m
- Largeur des gaines : entre 0,4 et 1 m
- Renouvellement horaire d'air : 1,5 à 8,7



Caisson - LCD

- Dimension du local : 8 m³
- Diamètre du bac : 0.23, 0.3 et 0.4 m
- Largeur des gaines : entre 0,16 et 0,41 m
- Renouvellement horaire d'air : 1 à 13,2

Essais expérimentaux à échelle réduite

❖ Description

- Caisson à échelle réduite : PPRIME – Poitiers
- Installation de référence : DIVA - IRSN
- Combustible : Heptane et dodécane
- Diamètre du foyer : 0.23, 0.3 et 0.4 m
- Ventilation : admission d'air en partie basse ou haute du caisson
- Renouvellement horaire d'air : de 1 à 13



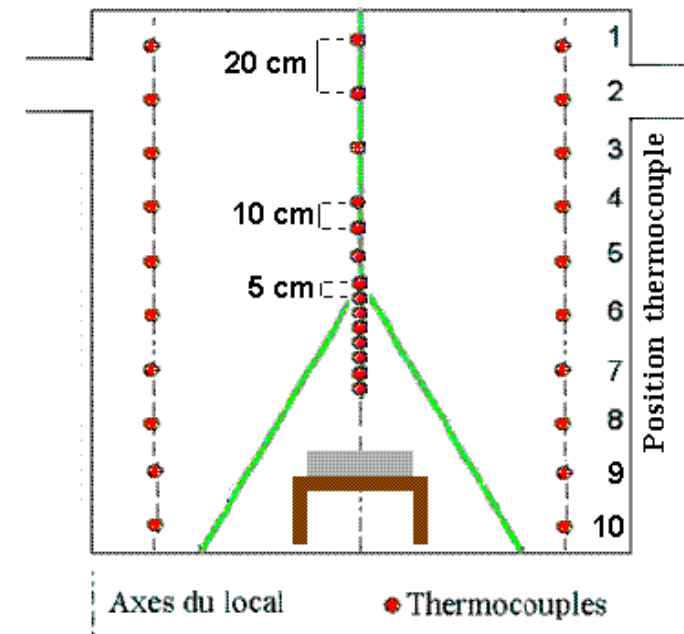
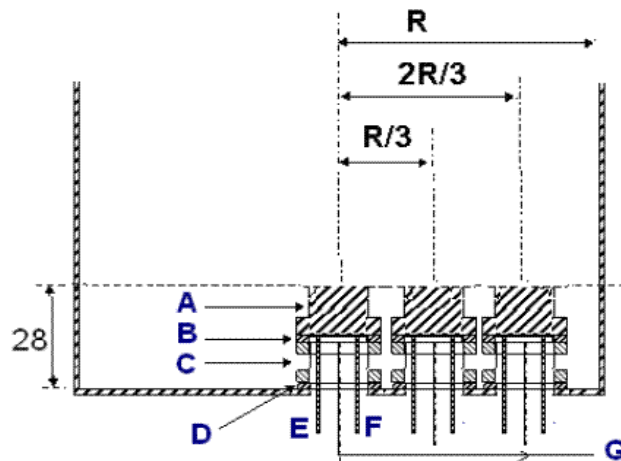
❖ Objectifs

- Comprendre et analyser l'influence de la viciation de l'air sur la puissance du feu
 - Influence de la ventilation et de la taille du bac sur le débit massique de combustible (validation de l'approche de Peatross-Beyler [1997])
- Produire des données permettant de valider le logiciel ISIS
- Valider les approches théoriques développées pour prédire le MLR en milieu confiné
 - mesures et détermination des flux à la surface du combustible
 - mesure de la concentration en oxygène pour prendre en compte la viciation de l'air

Essais expérimentaux à échelle réduite

❖ Moyens de mesure

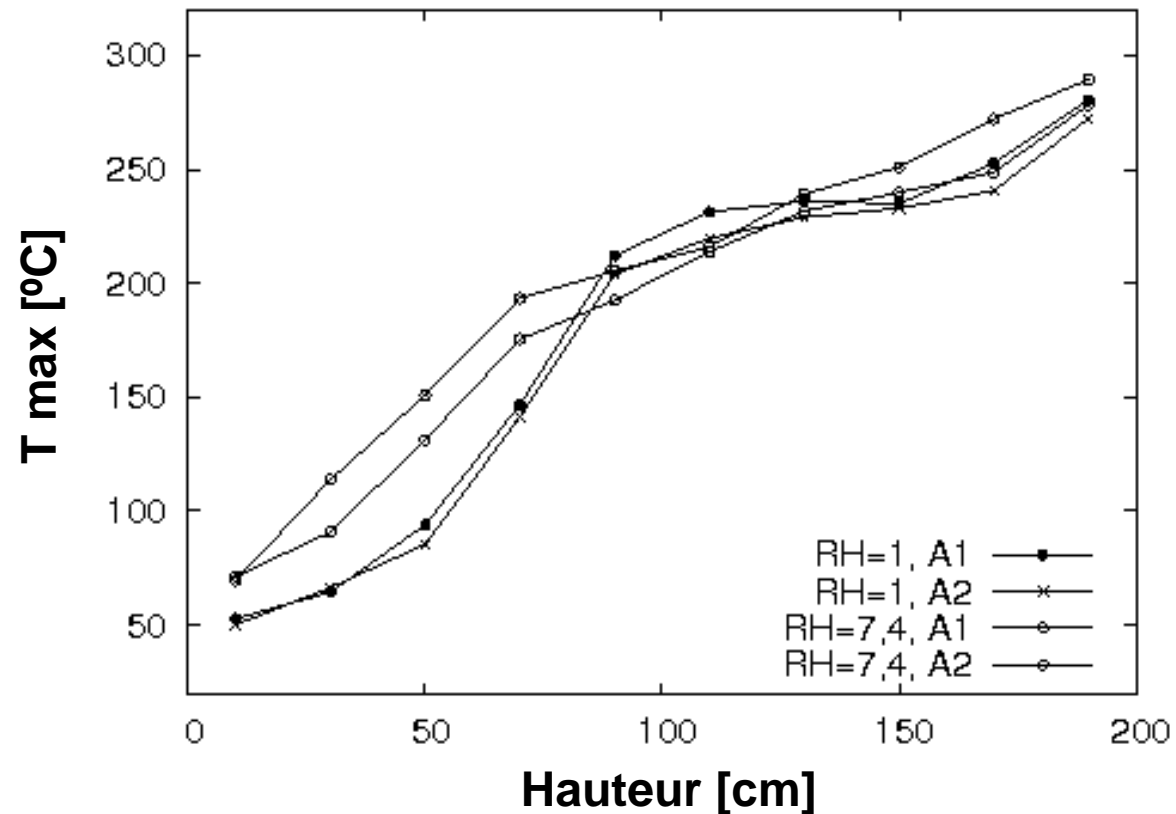
- MLR : peson SCAIME
- Concentration des gaz : sonde de prélèvement (armoire, Testo)
- Vitesse d'admission d'air : fil chaud
- Température des gaz : thermocouples de type K
- Flux thermique radiatif :
 - A la surface d'heptane : 3 capteurs MEDTHERM à l'intérieur du bac (thèse de J. Richard [2001])
 - En-dessous de la cuve : 1 capteur MEDTHERM
 - 4 capteurs MEDTHERM positionnés sur la paroi côté fenêtre du local (2 fluxmètres à une hauteur de 48,5 cm et 2 autres à 73 cm)
 - Flux transmis vers le toit : 1 capteur Captec
 - Flux total (radiatif + convectif) en-dessous de la cuve : 1 capteur MEDTHERM sans fenêtre



Essais expérimentaux à échelle réduite

❖ Stratification thermique au sein du local

□ Stratification horizontale en température



$\Delta P = -5$ Pa

Heptane : D = 23 cm

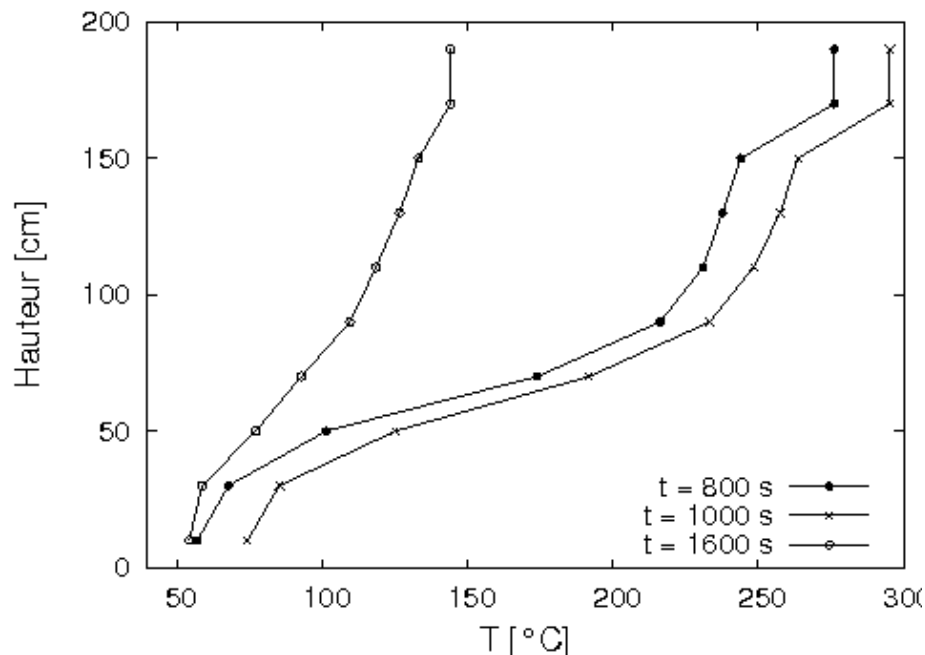
A1 = axe verticale gauche

A2 = axe verticale droite

Essais expérimentaux à échelle réduite

- Influence de la position de l'admission d'air

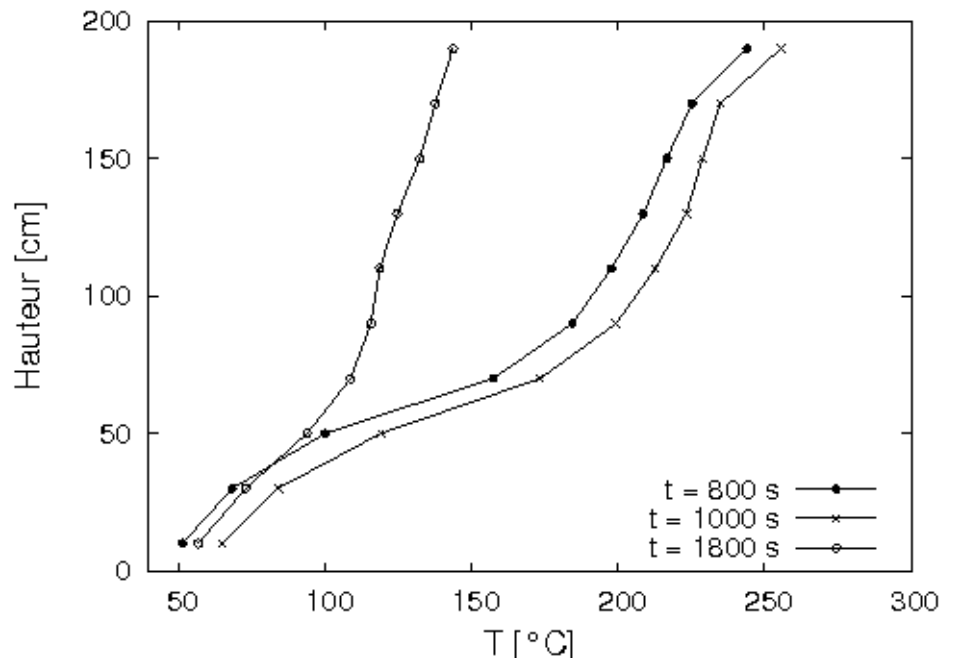
- Heptane (23 cm) $RH = 2,6$, $\Delta P = -5$



Entrée d'air basse

Tg indique trois zones :

1. Froid (près du sol)
2. Intermédiaire (gradient de température)
3. Chaud (au niveau du plafond)



Entrée d'air haute

Tg présente un gradient en fonction de la hauteur

Essais expérimentaux à échelle réduite

❖ Détermination des flux thermiques à la surface d'heptane

- ❑ Flux convectif

$$\dot{q}_{f,c}'' = \dot{m}_F'' \cdot L_v - \dot{q}_{t,r}'' + \sigma(T_s^4 - T_\infty^4)$$

$\dot{q}_{t,r}''$ Flux radiatif total à la surface

- ❑ Flux radiatifs externe et issu de la flamme mesurés à la surface d'heptane

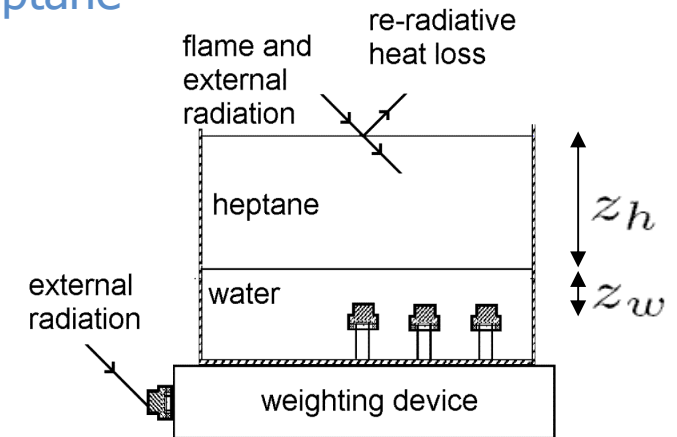
$$\dot{q}_{e,r}'' = \alpha \cdot \dot{q}_{un}'' / C \quad \alpha = (\dot{q}_{bt}'' / \dot{q}_{un}'')_{ext}$$

$$\dot{q}_{f,r}'' = \dot{q}_{bt}'' / C - \dot{q}_{e,r}'' \quad C = e^{-\mu_h \cdot z_h} \cdot e^{-\mu_w \cdot z_w}$$

\dot{q}_{un}'' Flux radiatif externe mesuré en-dessous de la cuve

\dot{q}_{bt}'' Flux radiatif total mesuré par les fluxmètres

C Coefficient d'atténuation dans l'eau et l'heptane



Essais expérimentaux à échelle réduite

□ Résultats

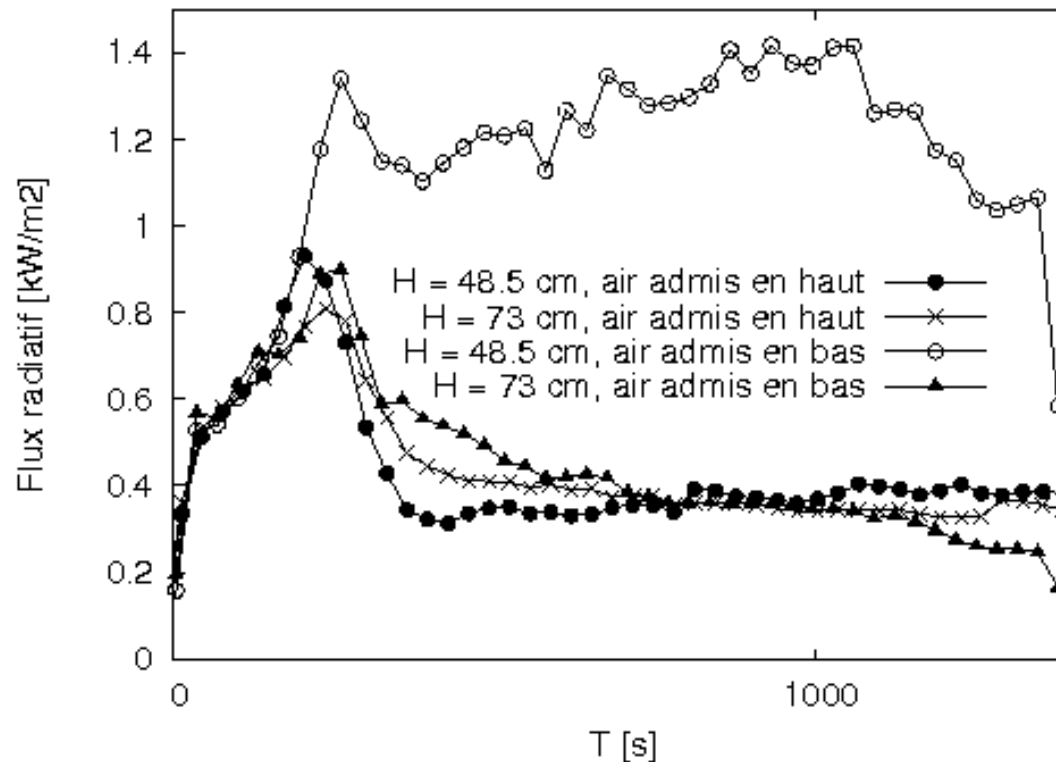
$\Delta P = -5 \text{ Pa}$		Heptane : $D = 23 \text{ cm}$			Steady state heat flux to the fuel surface (kW/m^2)		
Air inlet position	$\text{O}_2 [\%]$	\dot{m}''_F (g/s/m^2)	T_f ($^\circ\text{C}$)	T_g ($^\circ\text{C}$)	$\dot{q}''_{f,c}$	$\dot{q}''_{f,r}$	$\dot{q}''_{e,r}$
High	17.75	13.23	480	180	4	1	0.97
High	18.1	13.23	515	180	4	1.2	0.97
High	18.84	16.3	600	180	4.2	1.72	1.1
Low	19.85	19.25	610	200	4.4	1.9	1.56

□ Conclusions

- MLR, T_f et les flux thermiques reçus à la surface d'heptane augmentent avec l'oxygène autour du foyer
- $\dot{q}''_{f,r}$ est très sensible à la variation de T_f (une valeur de 5.8 kW.m^{-2} est mesurée en milieu ouvert (J. Richard [2001])). $\dot{q}''_{f,c}$ varie légèrement
- Influence du positionnement de l'entrée d'air sur $\dot{q}''_{e,r}$ (effet du rayonnement réfléchi par les parois dépendant de la répartition des fumées (Melis et Audouin [2008]))
- Méthode originale pour découpler les mesures des flux thermiques reçus à la surface d'heptane sous l'effet d'un rayonnement externe

Essais expérimentaux à échelle réduite

- ❖ Atténuation du rayonnement de la flamme par les fumées
 - Influence de la position de l'admission d'air



Lorsque l'air est admis en partie basse du local, le rayonnement issu de la flamme mesuré à H = 48,5 cm n'est pas atténué par les fumées

Essais expérimentaux à échelle réduite

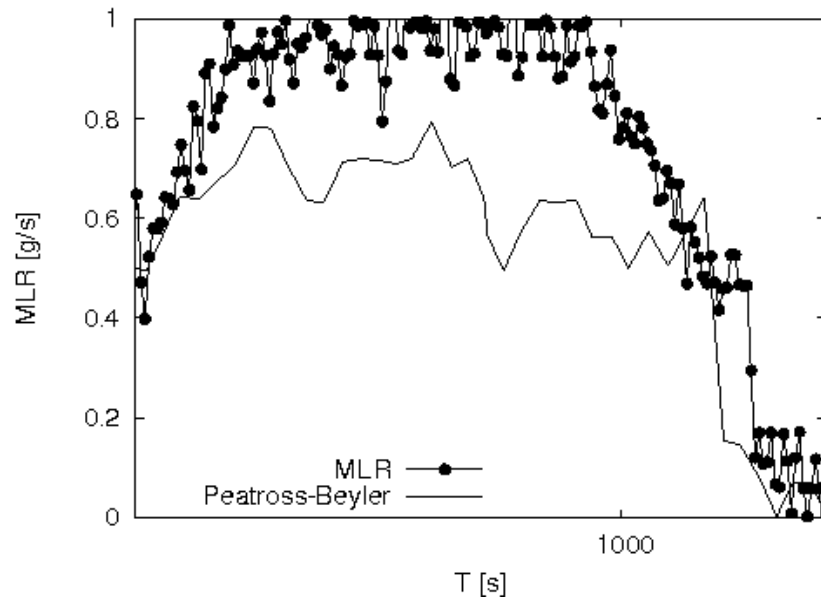
- ❖ Validation de l'approche de Peatross-Beyler (heptane, D=23 cm)

Corrélation Peatross et Beyler

$$\frac{\dot{m}''}{\dot{m}''_{21}} = 0.1 O_2 [\%] - 1.1$$

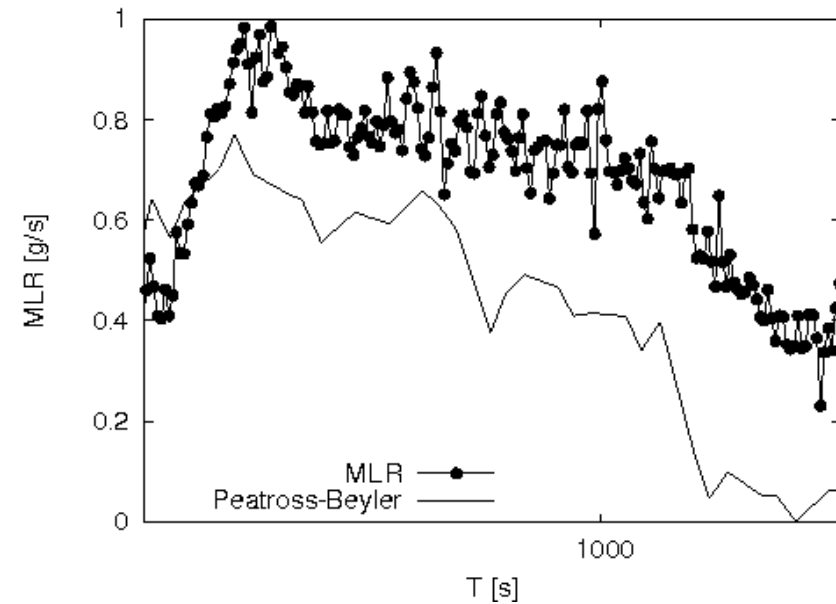


Effet du rayonnement externe



RH = 2,6
 $\Delta P = -63$ Pa

$T_g \approx 300^\circ\text{C}$



RH = 13,2
 $\Delta P = -22$ Pa

Flux radiatif externe est important !!

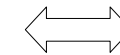
Essais expérimentaux à échelle réduite

❖ Validation de l'approche de Peatross-Beyler

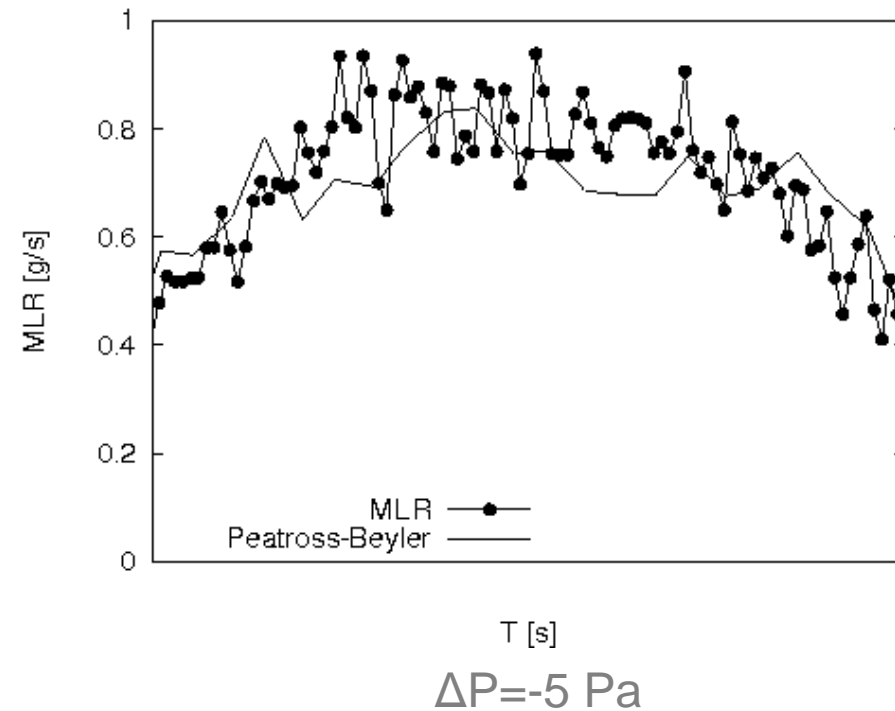
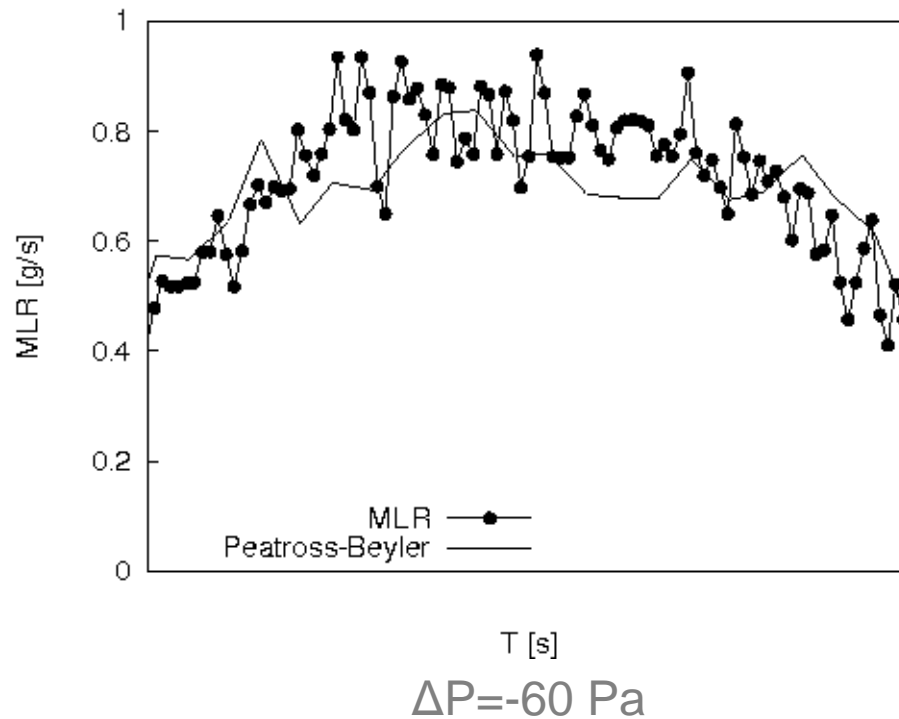
RH = 1 : feu moins puissant

$T_g < 250^\circ\text{C}$

Effet du rayonnement externe moins important



Bon accord
entre les résultats



Travaux envisagés

- ❖ Développement d'un modèle théorique destiné à prédire le débit massique (en cours)
 - **Effet de viciation de l'air sur la pyrolyse**
 - **Influence du rayonnement externe**

- ❖ Essais expérimentaux à échelle réduite (LCD - octobre 2010)
 - **heptane : diamètre du foyer = 30 cm (diminution de la concentration en oxygène)**
 - **Dodécane : diamètre du foyer = 40 cm (palier du MLR comparable au PRISME-SOURCE)**

- ❖ Validation du modèle proposé à l'aide du code ISIS

Merci pour votre attention