Étude des régimes de combustion dans un environnement sous-oxygéné et à haute température

Application aux sources d'incendie situées en hauteur dans un compartiment mécaniquement ventilé

E. Georges [a]***, H. Pretrel*** [a]***, S. Suard*** [a]***, L. Perrin*** [a]***, S. Vaux*** [a]***, G. Boyer*** [a]***, K. Varrall*** [b]***, O. Vauquelin*** [b]

(a) Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), PSN/RES/SA2I, Centre de Cadarache, St Paul-lez-Durance, 13115, France

(b) Aix-Marseille Université, Laboratoire IUSTI, UMR 7343, 5 rue Enrico Fermi, Château-Gombert - Marseille, 13453, France

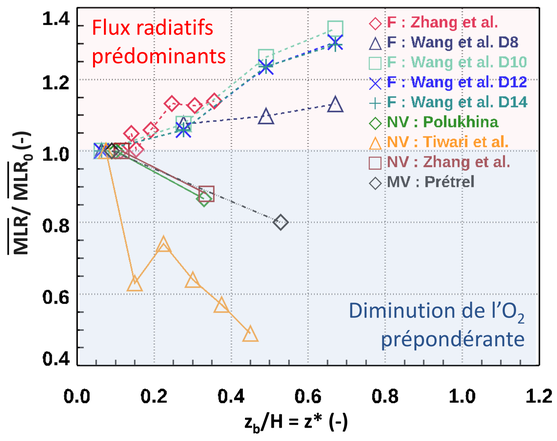
Contexte

→ Installations nucléaires : enceintes **fermées** et **mécaniquement ventilées**

→ Scénarios d'incendie en partie haute d'un local : environnement avec une **faible concentration en oxygène** et à **haute température**. Exemple : les feux de câbles

→ L'élévation de la température participe à **augmenter** la puissance du feu, la diminution en oxygène tend à la **réduire**.

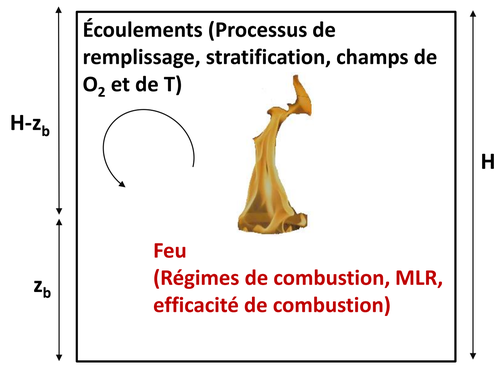
Deux phénomènes couplés, mais opposés qui entrent en compétition



La littérature a mis en évidence :

- Les **effets de la sous-oxygénation** et des **flux radiatifs** lors d'essais avec des sources incendies situées en hauteur
- Une **diminution de l'efficacité de la combustion** avec l'élévation de la source
- L'intervention de la **hauteur de flamme** dans un changement de régime de combustion
- L'influence de l'élévation sur la modification du **processus de remplissage** du caisson par les fumées et sur la **stratification thermique**

Sujets d'intérêts



Étude expérimentale à échelle réduite

- *Compréhension des phénomènes physiques entrant en jeu dans la dynamique des foyers en hauteur*
- *Étude de l'effet du milieu environnant sur la combustion du feu*

Le dispositif NYX

Le compartiment

→ Échelle ¼ d'un dispositif à échelle réelle

→ Volume de 1,875 m³

→ Ventilation : admission d'air frais **naturelle**, extraction de l'air vicié **mécanique**

Les moyens de mesure

→ Balance (débit de perte de masse MLR)

→ Thermocouples (température)

→ Sondes bidirectionnelles (débit volumique)

→ Analyseurs de gaz (concentration en O_2, CO_2 et CO)

→ Transmetteurs de pression (pression)

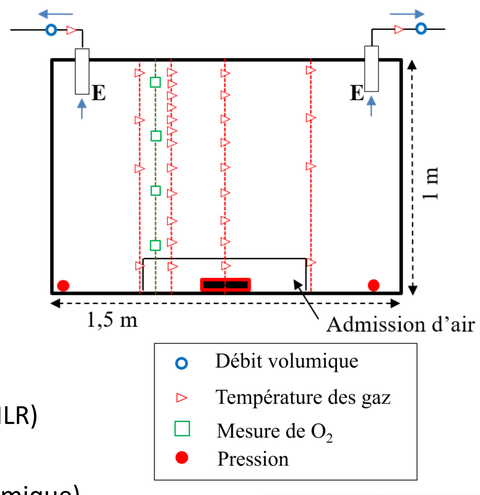
→ Fluxmètres pariétaux (flux totaux)

Paramètres d'entrée

→ Élévation de la source incendie : $z_b \in [0{,}06 ; 0{,}85]$ m

→ Diamètre du bac : $D \in [0{,}09 ; 0{,}23]$ m

→ Débit d'extraction : $\dot{q}_{ext} \in [0 ; 50]$ m³/h



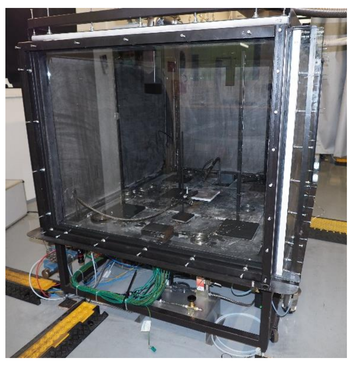


Photo et vue latérale du dispositif NYX

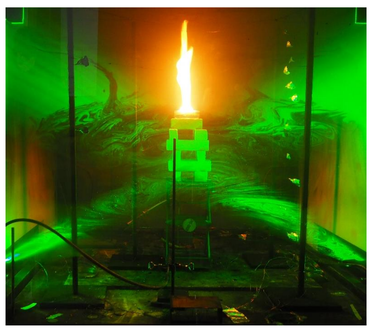


Photo d'un essai effectué à une hauteur de 60 cm. Visualisation de la couche de fumées à l'aide de plans laser.

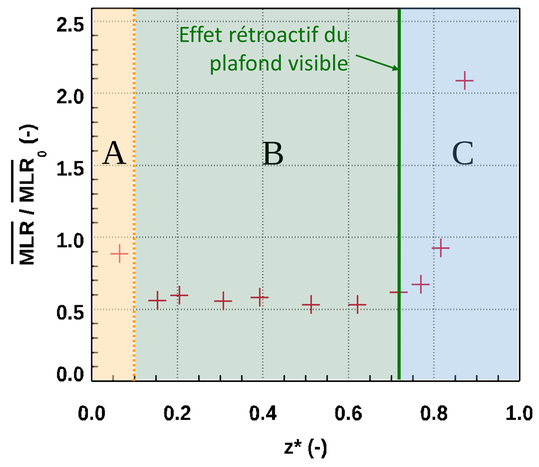
Effet de l'élévation de la source sur :

Le débit de perte de masse (MLR)

→ Résultats qui se divisent en **3 zones :**

- Partie basse : **Effets des ouvertures**
- Partie intermédiaire : Combustion pilotée par la **concentration en oxygène**
- Partie haute : **Flux radiatifs additionnels prépondérants**

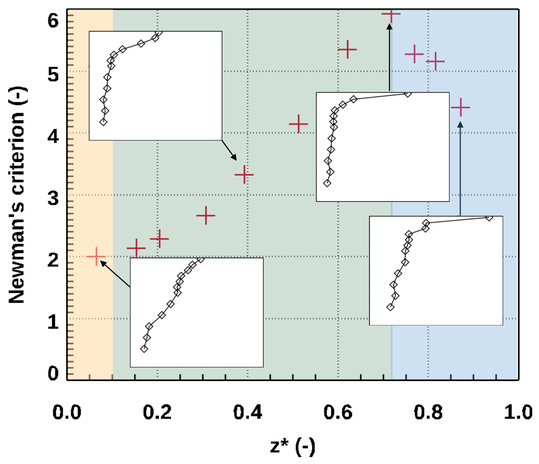
→ Changement de régime de combustion lié à la **hauteur de flamme**



La stratification thermique

→ Évolution de la stratification thermique avec l'élévation du feu :

- Partie basse : stratification à **gradient constant**
- Parties intermédiaire et haute : stratification en **deux couches** distinctes



E. Georges et al., Influence of source elevation on a pool fire in a forced-ventilated enclosure, 10th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Oslo, Norvège, 2022

Approche numérique avec CALIF³S-Isis

Utiliser l'outil numérique pour obtenir des données complémentaires à celles obtenues expérimentalement

Le code de calcul CFD CALIF³S-Isis

→ Code de **calcul à champs** développé par l'IRSN

→ Ensemble de modèles cohérents capables de décrire les **écoulements turbulents**, la **production de suies**, les **transferts thermiques** et la **combustion**

→ Basé sur une formulation à **faible nombre de Mach** des équations **de Navier-Stokes**

Première analyse physique

→ Diamètre : 0,15 m

→ Débit d'extraction : 50 m³/h

→ Au sol et à 40 cm de haut

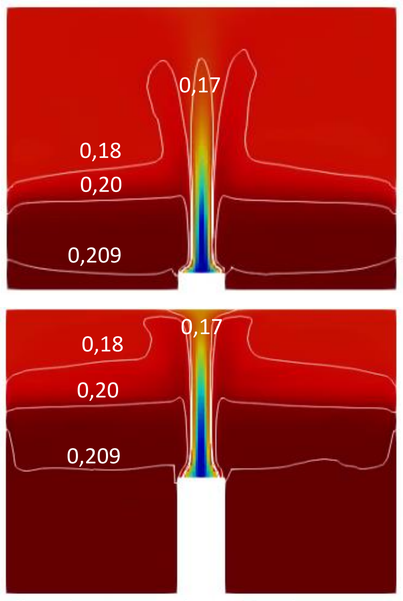
→ Modèle de turbulence : **LES**

→ Modèle de sous-maille : **WALE**

→ Modèle de combustion : **EDC**

→ Modèle de rayonnement : méthode des volumes finis

→ 550 000 mailles et dt = 0,025



Champs d'oxygène moyennés sur 10 s obtenus avec CALIF³S-Isis en LES. À gauche pour un bac situé au sol, à droite pour un bac à 40 cm de haut.

Développement d'un modèle analytique pour les foyers en hauteur

Étendre les modèles classiques de remplissage d'un caisson par les fumées (foyer au sol) à un feu situé en hauteur

→ Remplissage divisé en **2 phases** :

(1) Au dessus du foyer – Remplissage classique par le **panache** ($\dot{m}_p$)

(2) En dessous du foyer – disparition de la contribution du panache, **dilatation thermique** de la couche de fumées

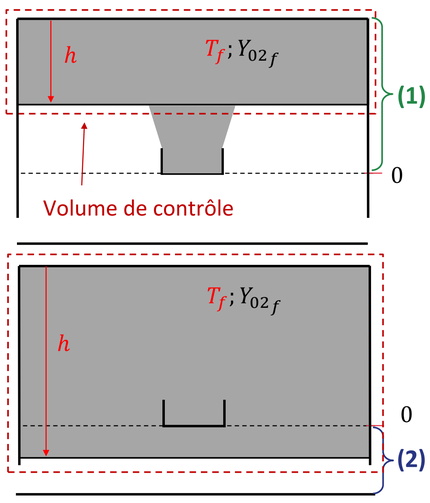
→ Écriture des bilans de **masse** et d'**énergie** sur le volume de contrôle

→ Prise en compte des phénomènes physiques suivants :

Sous-oxygénation du foyer : $f(O_2, T)$

Pertes thermiques aux parois : $\dot{Q}_w$

Pompage d'oxygène : β et $\dot{Q}_p$



Différentes phases de remplissage du modèle

Phase (1)

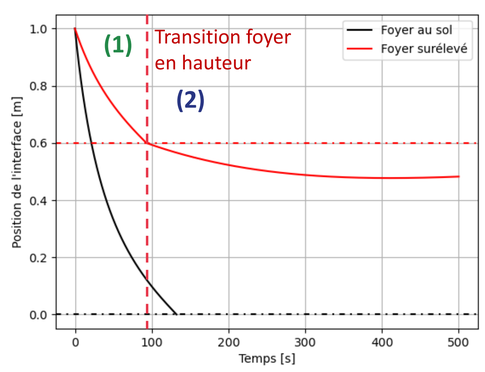
Masse : $\frac{dm}{dt} = \dot{m}_p$

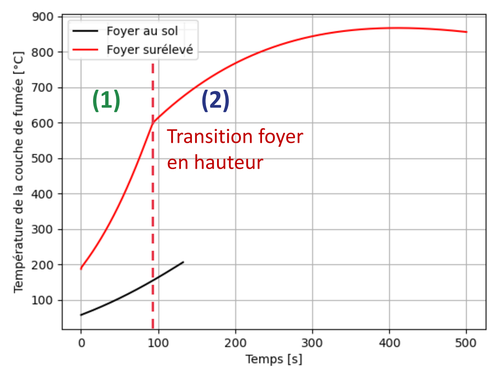
Énergie : $\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_c - \dot{Q}_w$

Phase (2)

$$\frac{dm}{dt} = 0 + \beta \dot{Q}_c$$

$$\frac{dE}{dt} = f(O_2, T) \times \dot{Q}_c - \dot{Q}_w + \dot{Q}_p$$





Bibliographie

J. S. Newman, Experimental evaluation of fire-induced stratification, Combust. Flame 57(1984) 33–39.

K. Polukhina, Elevated Fires, Master thesis, Lund University, Lund, Sweden, 2016.

M. K. Tiwari et al., "Effects of elevated pool fire in a naturally ventilated compartment," J. Therm. Anal. Calorim. 146 (2021) 341-353.

J. Wang et al. Early Stage of Elevated Fires in an Aircraft Cargo Compartment: A Full Scale Experimental Investigation. Fire Technol. 51 (2015) 1129–1147.

J. Zhang et al., "Smoke filling in closed compartments with elevated fire sources," Fire Saf. J., vol. 54, pp. 14–23, 2012

J. Zhang et al., Impacts of elevation on pool fire behavior in a closed compartment: A study based upon a distinct stratification phenomenon, J. Fire Sci. 31 (2012) 178–193.

J. Zhang et al., Experimental study on elevated fires in a ceiling vented compartment, J. Therm. Sci. 22 (2013) 377–382.