

Feux confinés: Aspects phénoménologiques

Alexis Coppalle

UMR 6614 CORIA (INSA Rouen)

e-mail : coppalle@coria.fr

Plan de l'exposé

- **Introduction**
- **Quelques notions sur le développement d'un incendie**
- **Les équations simplifiées, lois de comportement**
- **La ventilation naturelle des foyers**
- **La production des espèces toxiques**
- **Comportement des flammes sous-ventilées**

Introduction: quelques exemples



- les bâtiments : habitats, bureaux

- les bâtiments industriels: les entrepôts , les locaux techniques ;

- les installations souterraines: tunnels

- Les transports: trains, bateaux, avions

Introduction: Evolution dans l'habitat



La Défense, Paris



Downtown Burj Dubai

Objectifs prioritaires de la sécurité incendie:

- Tenue de la structure
- Désenfumage et évacuation

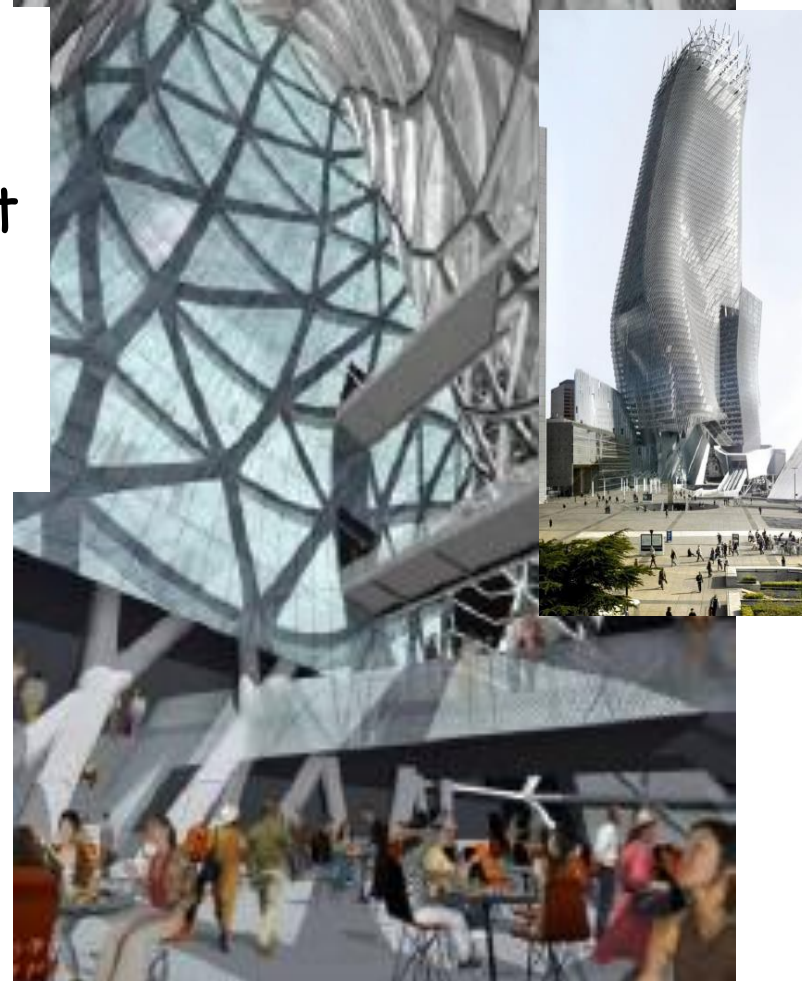
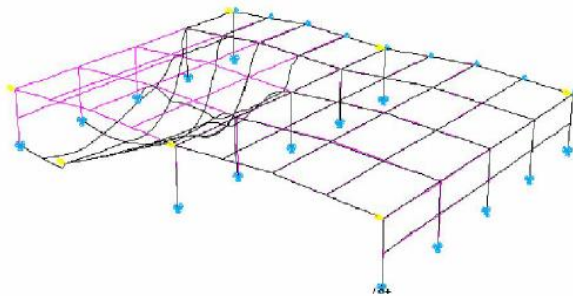


Introduction:



Résistance: Comportement au feu des structures

L'échauffement des structures:
Un challenge pour la R&D
Passer d'un calcul du comportement
à chaud de chaque
élément à un calcul
pour l'ensemble de la structure



Source CTICM

Introduction: quelques exemples



- les bâtiments : habitats, bureaux

- les bâtiments industriels: les entrepôts , les locaux techniques ;

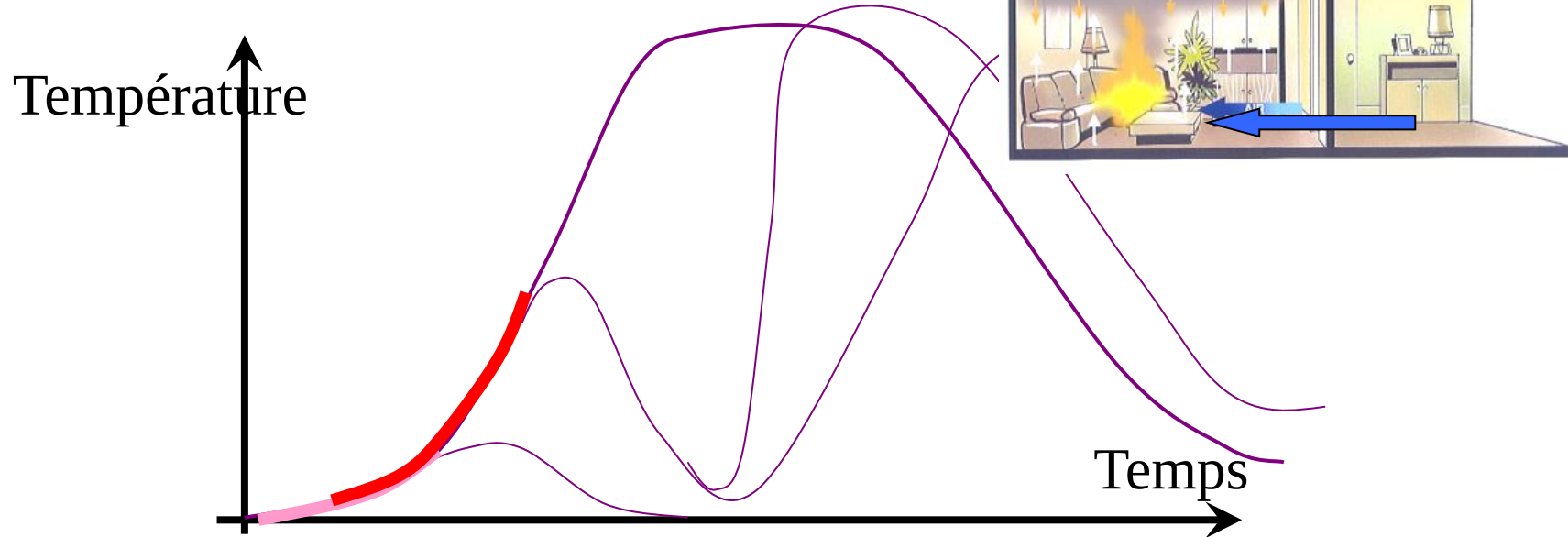
- les installations souterraines: tunnels

- Les transports: trains, bateaux, avions



Quelques notions sur le développement d'un incendie

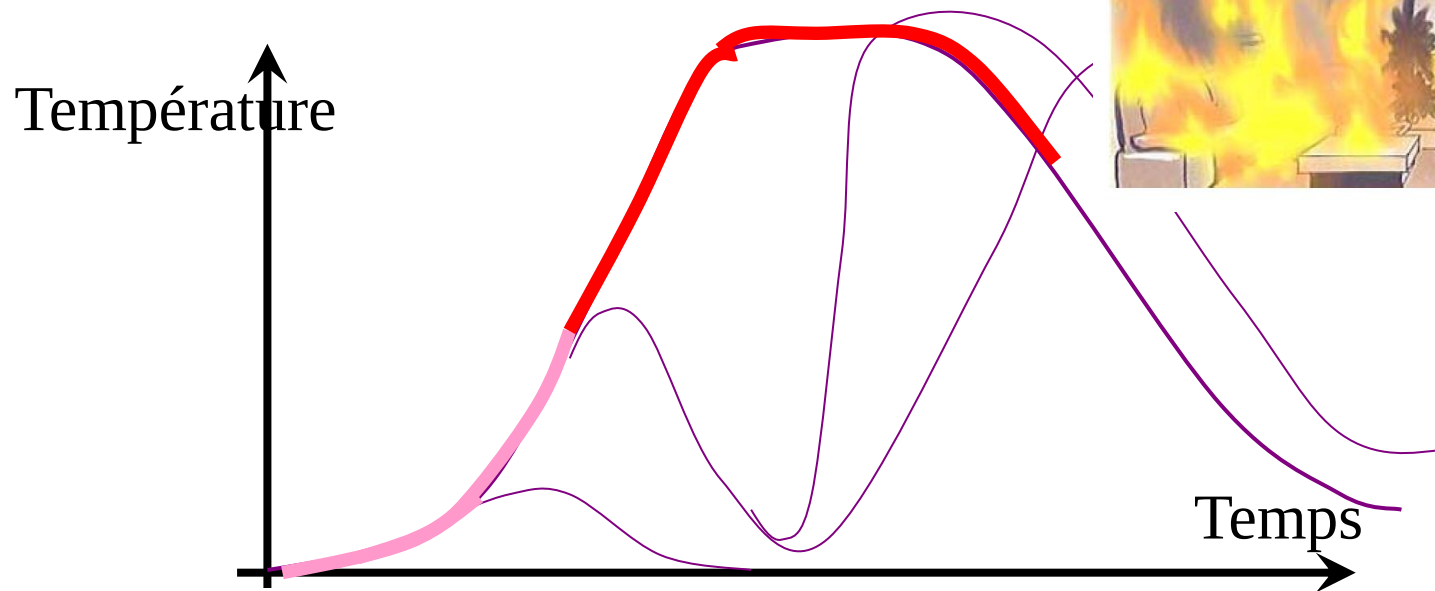
le déroulement d'un feu confiné: de l'ignition à l'embrasement généralisé



- Cette phase correspond à la propagation des fronts de flamme sur les combustibles

Quelques notions sur le développement d'un incendie

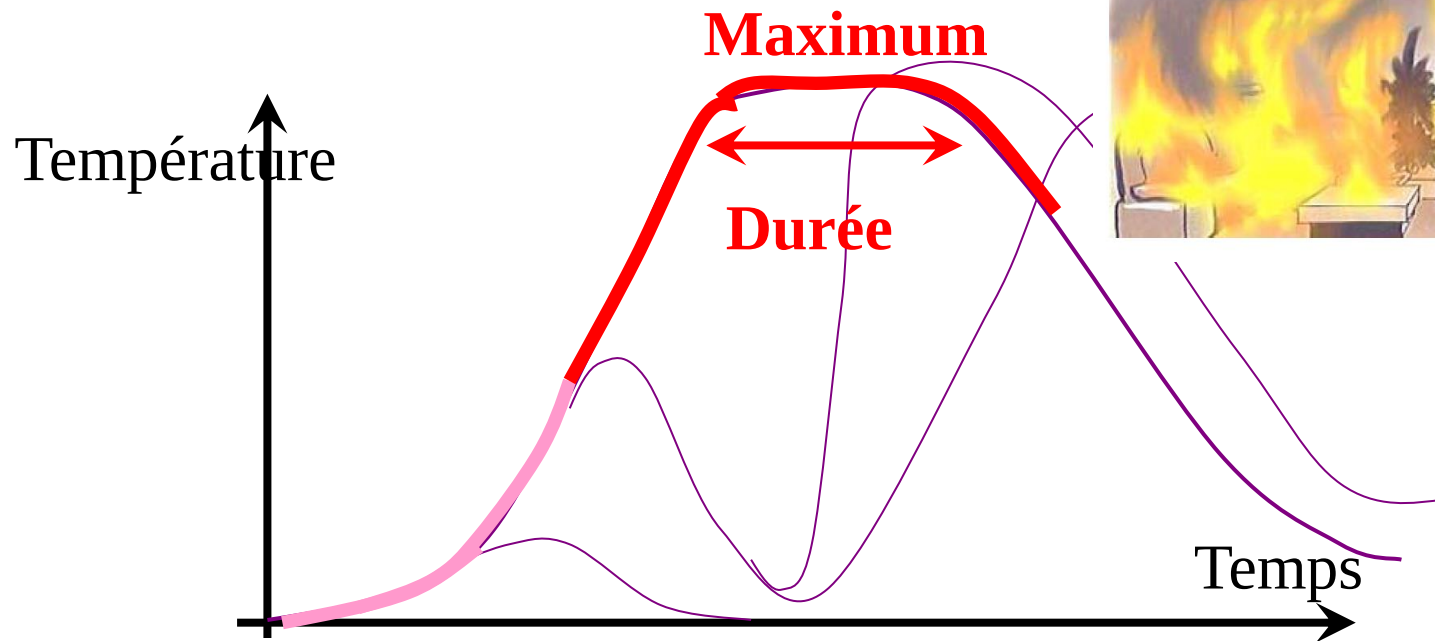
TRANSITION VERS L'EMBRASEMENT GENERALISE : (LE FLASH-OVER)



Lorsque l'apport en air frais est suffisant, l'incendie progresse jusqu'à une élévation importante de la température, $T_p = 500 - 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$, flux R_y au sol de l'ordre 20 kW/m^2 .

Quelques notions sur le développement d'un incendie

L'échauffement des structures

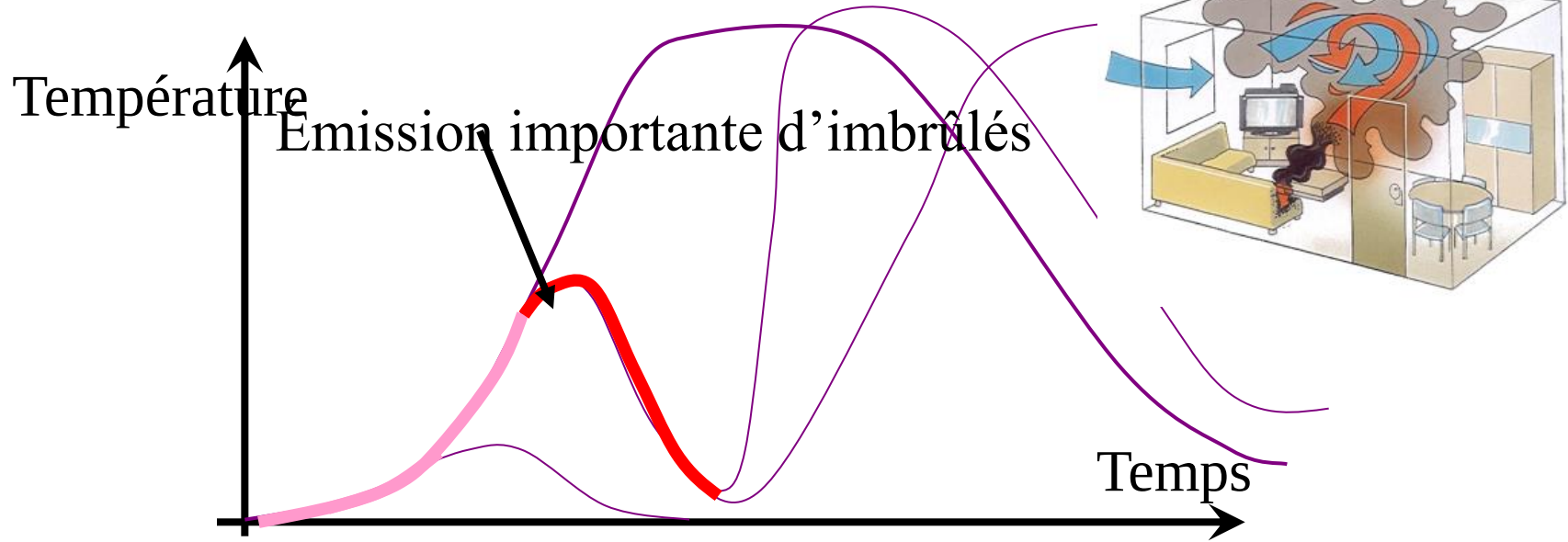


Pour la tenue des structures:
résister au maximum et à la durée du dégagement de chaleur



Quelques notions sur le développement d'un incendie

Si la ventilation du foyer est insuffisante



- le feu manque d'air, apparition d'un feu couvant et d'une diminution des températures dans la pièce.
- Cette phase est en générale à l'origine d'une production importante de gaz imbrûlés et de substances dangereuses.

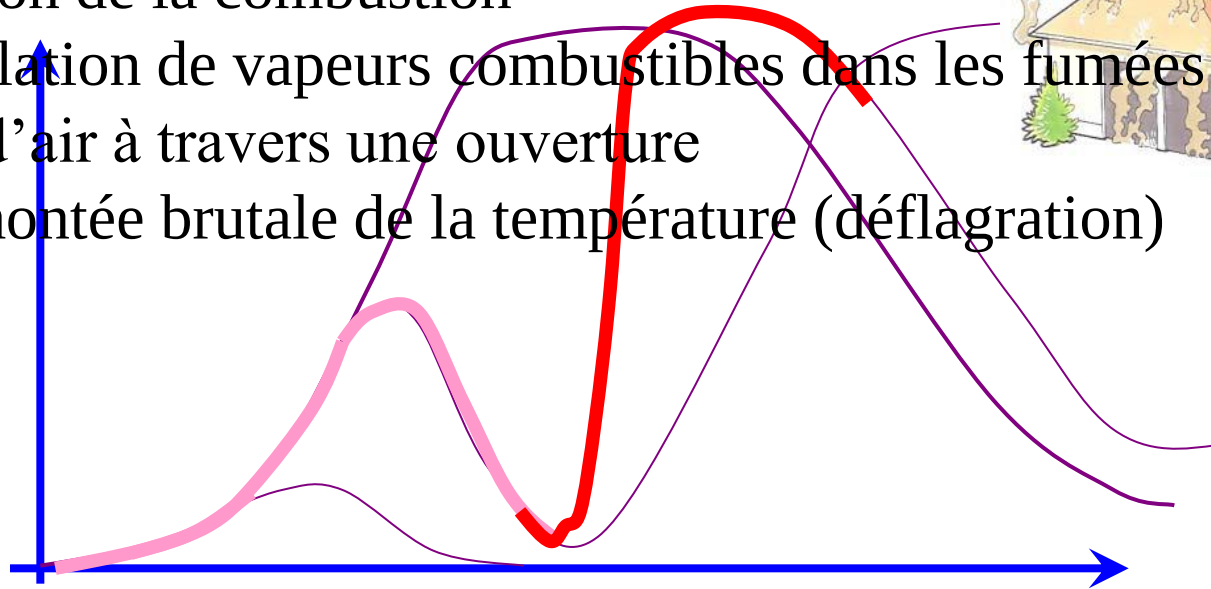
Quelques notions sur le développement d'un incendie

Si la ventilation des foyers est insuffisante

Cela peut entraîner un phénomène explosif :
le **backdraft** ou explosion de fumée:

Le scénario:

- 1- un confinement important
- 2- Réduction de la combustion
- 3- accumulation de vapeurs combustibles dans les fumées
- 4- apport d'air à travers une ouverture
- 5- ==> montée brutale de la température (déflagration)



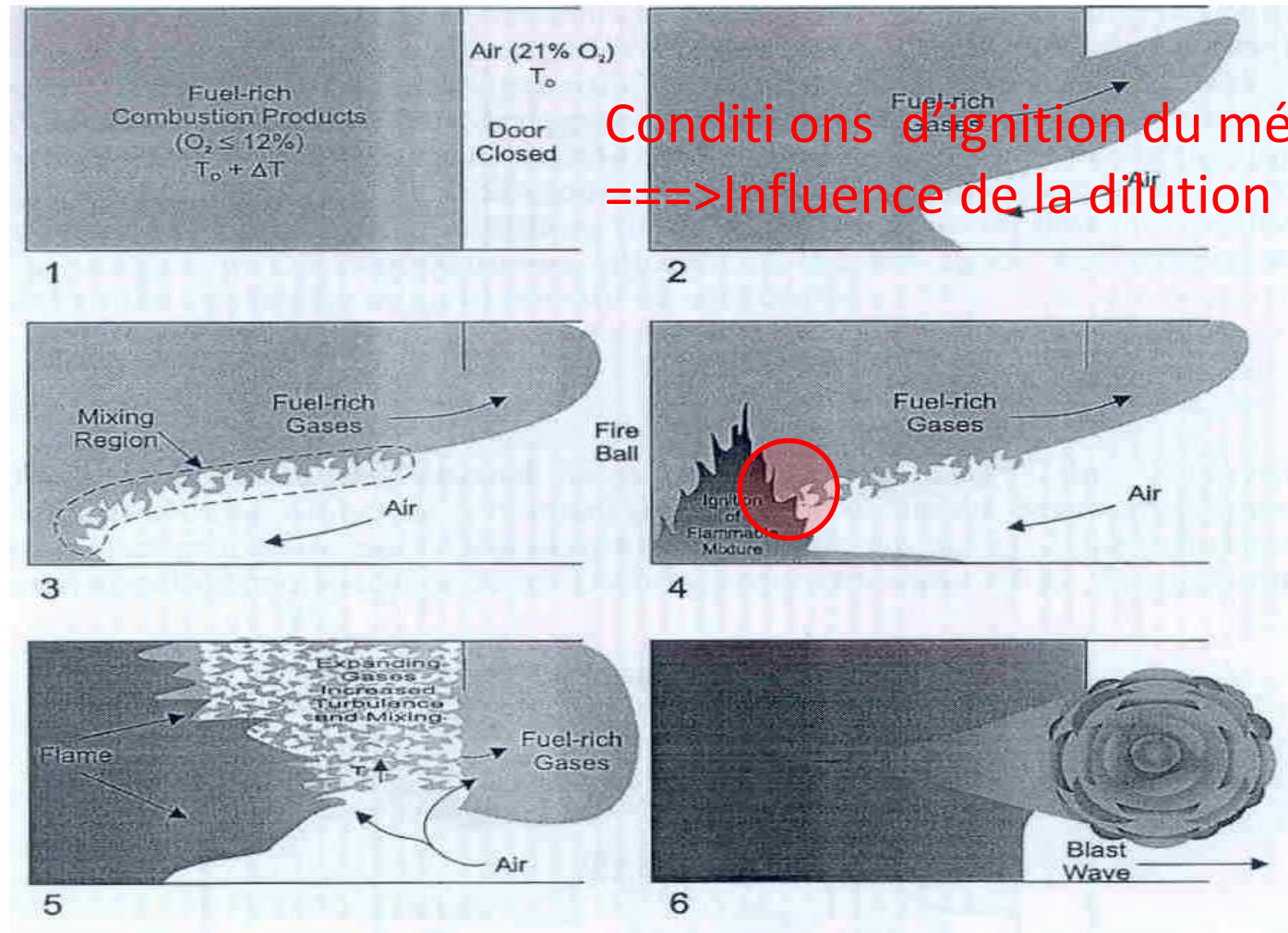
Cas récent: feu de Neuilly

Comportement des flammes sous-ventilé



Re-inflammation des fumées

le *backdraft* ou explosion de fumée



Conditions d'ignition du mélange air+fumée
==>Influence de la dilution N_2 , CO_2 , H_2O

Figure 18 : Développement d'un backdraft (Gottuk, 1999).

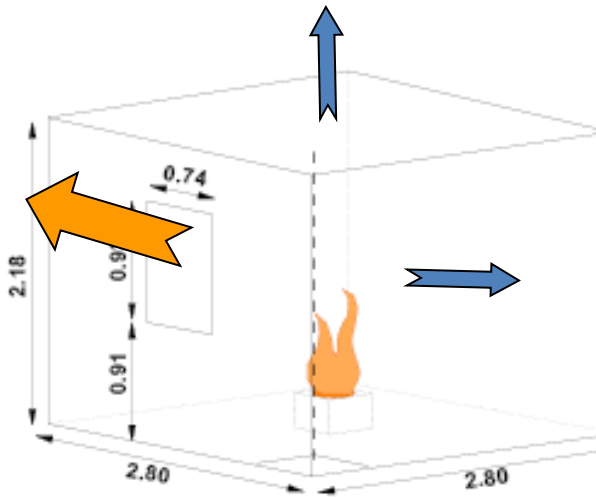
[illegible]

$$q'' = q''_{fl,c} + q''_{fl,r} + q''_e - \varepsilon \sigma T_s^4 - q''_{ext,c}$$

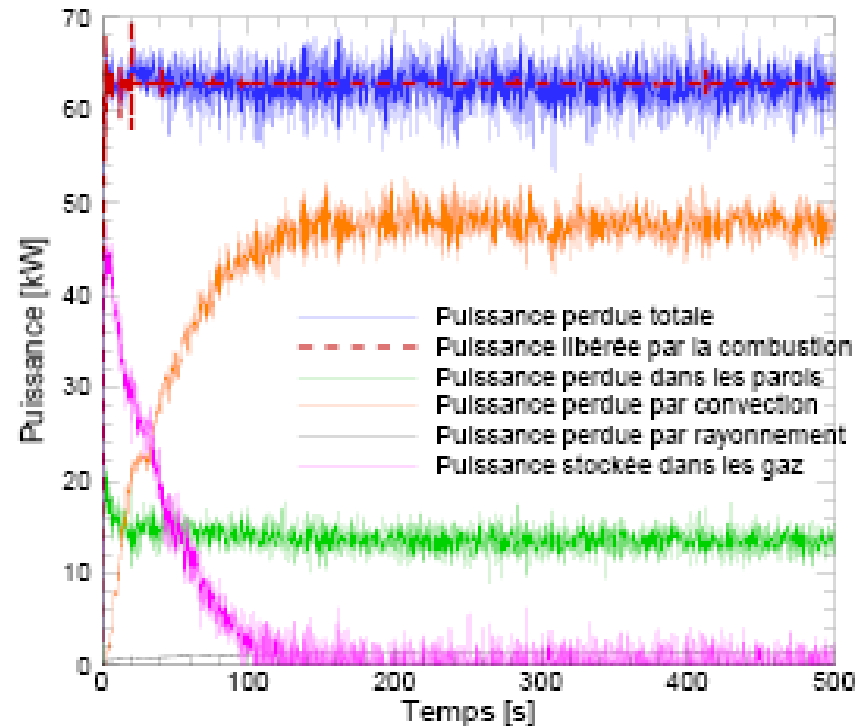
➤ le flux q_e est due au ray^t. des parois, de la couche chaude de fumée sous plafond et des autres sources de combustion

Quelques notions sur le développement d'un incendie

Source: thèse S. Désanghère, 2006



dimensions en mètres.

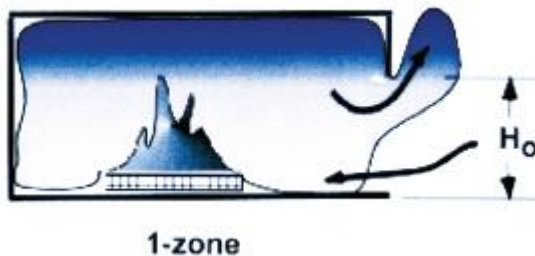
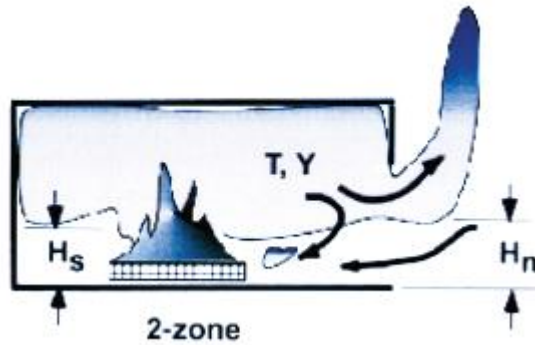


Répartition des puissances au cours du temps

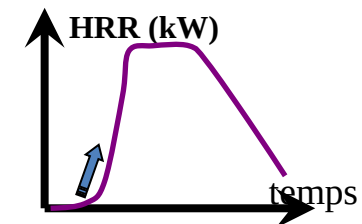
Equations simplifiées (approche par zones)

Les paramètres importants:

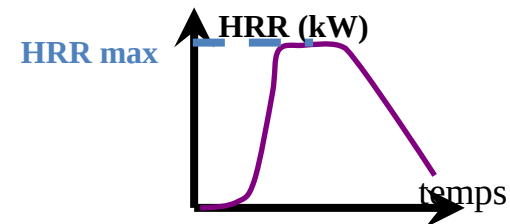
- Le dégagement de chaleur Q (=HRR)
- le débit d'air en entrée ,ventilation naturelle ou forcée
- le débit des fumées
- La température des fumées (résistance des structures)



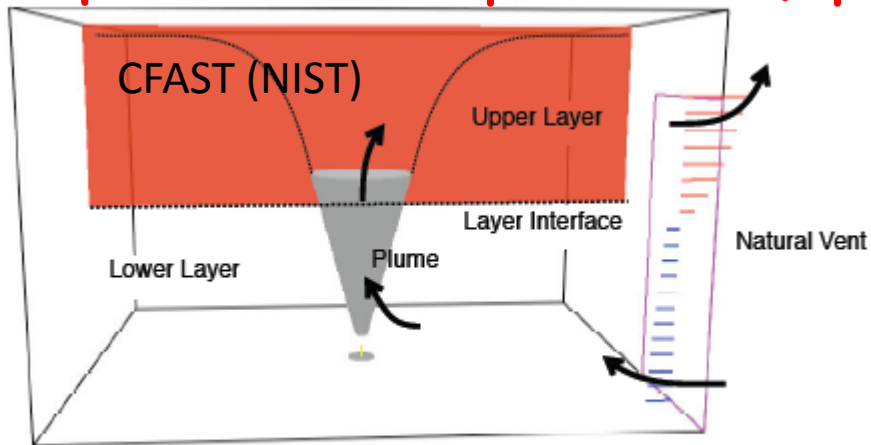
Au début du feu



Feu pleinement développé



Equations simplifiées (approche par deux zones)



→ Components of mass and enthalpy entering or leaving a control volume

Principe de deux zones + zone de Flamme

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma - 1}{V} (h_L + h_U)$$

$$\frac{dV_U}{dt} = \frac{1}{P\gamma} \left((\gamma - 1) \dot{h}_i - V_U \frac{dP}{dt} \right)$$

$$\frac{dT_U}{dt} = \frac{1}{c_p \rho h_o i V_U} \left((h_U - c_p \dot{m}_U T_U) + V_U \frac{dP}{dt} \right)$$

$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{1}{c_p \rho h_o i V_L} \left((h_L - c_p \dot{m}_L T_L) + V_L \frac{dP}{dt} \right)$$

Attention: le HRR doit être prescrit
Résultats typiques

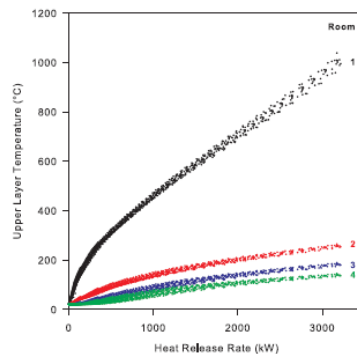


Figure 5.4: Comparison of the time dependent heat release rate and layer temperatures in several rooms for a four-room growing fire scenario.

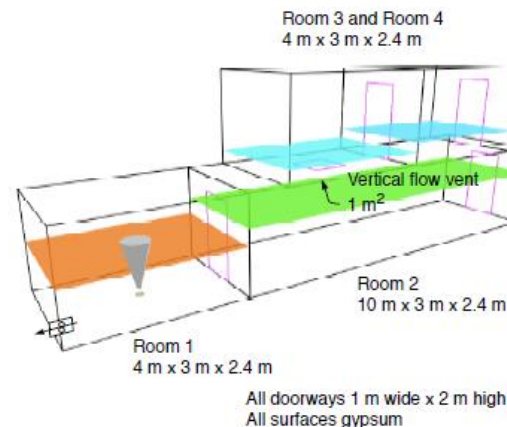


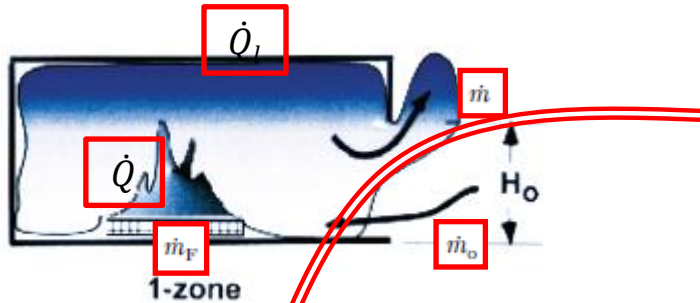
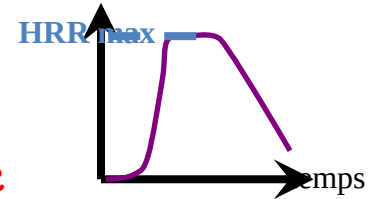
Figure 5.1: Building Geometry for base case scenario.



Equations simplifiées: approche pour une zone

(Quintiere, 2002)

Feu pleinement développé



Conservation de la masse

$$-\frac{pV}{RT^2} \frac{dT}{dt} + \dot{m} = \dot{m}_o + \dot{m}_F$$

Conservation de l'énergie

$$c_v \frac{d(mT)}{dt} = \frac{c_v V}{R} \frac{dp}{dt} = \dot{Q} - \dot{Q}_l$$

$\dot{Q}$ = dég. Chaleur = HRR
 $\dot{Q}_l$ = pertes

Combustion

1kg fuel + s Kg air ==> (1+s) prod (CO₂, H₂O, N₂)

Bilan de l'oxygène

$$\frac{d(mY)}{dt} + \dot{m}Y - \dot{m}_o(0.233) = -0.233s\dot{Q}/\Delta h_c$$

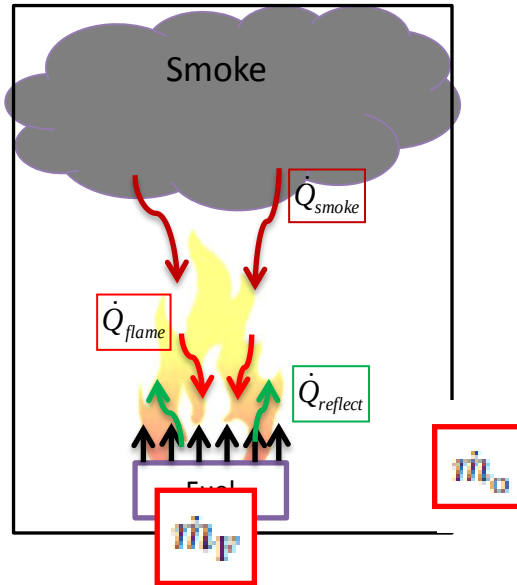
Δh_c = enthalpie de combustion / kg fuel

$\dot{m}_F$ est du à l'échauffement du combustible
==> flux de la flamme et du confinement

Equations simplifiées

La perte de masse

$$\dot{m}_F$$



$$\dot{Q}_{received} = \dot{Q}_{flame,rad} + \dot{Q}_{flame,conv-cond} + \dot{Q}_{ext,rad} - \dot{Q}_{reflect}$$

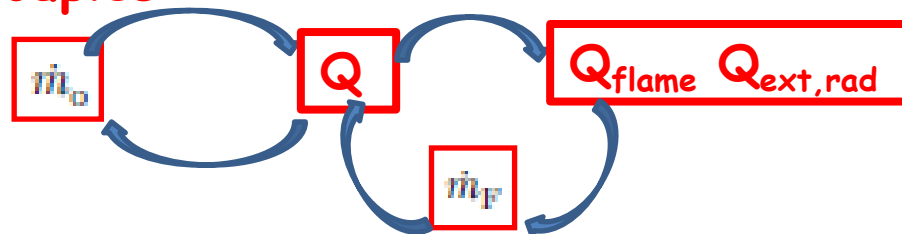
Effet du confinement

$$\dot{m}_F = \frac{\dot{Q}_{received} - (\dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{emis})}{L}$$

L : Chaleur de gazeification
 $L = L_v$ pour les liquides

$$\dot{m}_F = \dot{m}_{F,free} f(Y_{O_2}) + F_{S+W \rightarrow F} \sigma (T^4 - T_0^4) / L$$

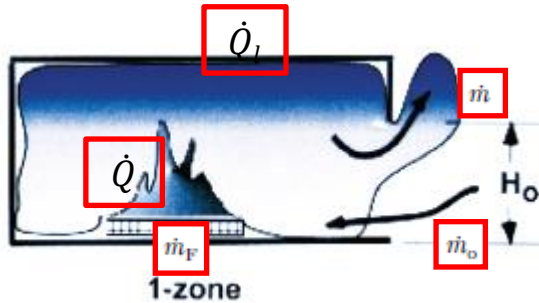
Mais $\dot{Q}_{flame}$ et $\dot{Q}_{ext,rad}$ dépend aussi de la ventilation
 ==> phénomènes couplés





Equations simplifiées: approche pour une zone

Feu pleinement développé



Conservation de la masse

$$-\frac{pV}{RT^2} \frac{dT}{dt} + \dot{m} = \dot{m}_O + \dot{m}_F$$

Conservation de l'énergie

$$c_v \frac{d(mT)}{dt} = \frac{c_v V}{R} \frac{dp}{dt} = \dot{Q} - \dot{Q}_l$$

$\dot{Q}$ = dég. chaleur
 $\dot{Q}_l$ = pertes

Combustion

1kg fuel + s Kg air ==> (1+s) prod (CO₂, H₂O, N₂)

Bilan de l'oxygène

$$\frac{d(mY)}{dt} + \dot{m}Y - \dot{m}_O(0.233) = -0.233s\dot{Q}/\Delta h_c$$

Δh_c = enthalpie de combustion / kg fuel

Le dégagement de chaleur (HRR)

$$Q = \dot{m}_{F,b}'' A_F \Delta h_c$$

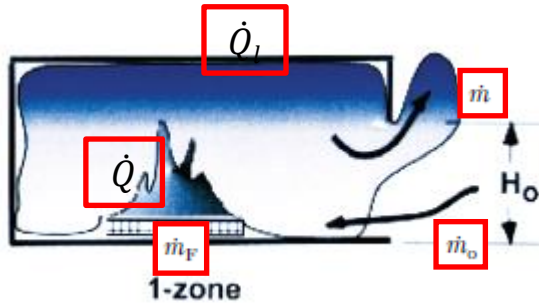
ou

$$Q = \dot{m}_{air,b}'' A_F \Delta h_{air}$$



Equations simplifiées: approche pour une zone

Feu pleinement développé



Conservation de la masse

$$-\frac{pV}{RT^2} \frac{dT}{dt} + \dot{m} = \dot{m}_o + \dot{m}_F$$

Conservation de l'énergie

$$c_v \frac{d(mT)}{dt} = \frac{c_v V}{R} \frac{dp}{dt} = \dot{Q} - \dot{Q}_l$$

$\dot{Q}$ = dég. chaleur
 $\dot{Q}_l$ = pertes

Combustion

1kg fuel + s Kg air ==> (1+s) prod (CO₂, H₂O, N₂)

Bilan de l'oxygène

$$\frac{d(mY)}{dt} + \dot{m}Y - \dot{m}_o(0.233) = -0.233s\dot{Q}/\Delta h_c$$

Δh_c = enthalpie de combustion / kg fuel

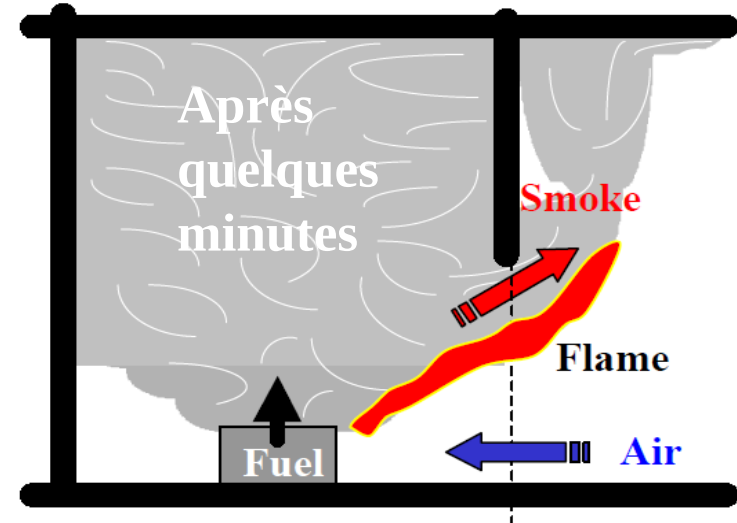
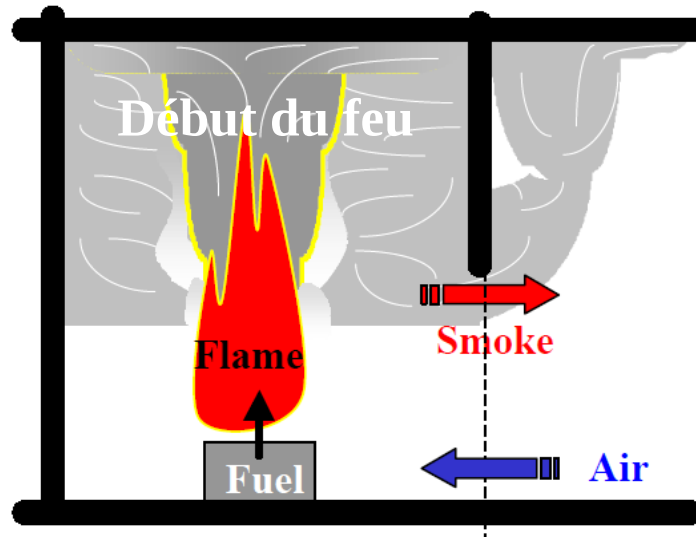
En réalité, $\dot{m}_o$ et $\dot{m}_F$ ne sont pas dans des proportions stoechiométriques ==> Ventilation du foyer

Equations simplifiées

Ventilation du foyer



➤ *régime (HRR) contrôlé par le combustible ou la ventilation*



➤ Il est courant d'introduire la richesse globale ϕ qui est une adimensionnalisation du débit de fuel

$$\Phi = [m_F/m_{air}] / [m_F/m_{air}]_{\text{stochio}} = s [m_f/m_{air}] \quad (= \text{GER})$$

la puissance dégagée:

- est **contrôlée par le combustible**
(surface en feu, vitesse de perte de masse, ...)
- Combustion bien ventilée, $\phi < 1$

la puissance dégagée:

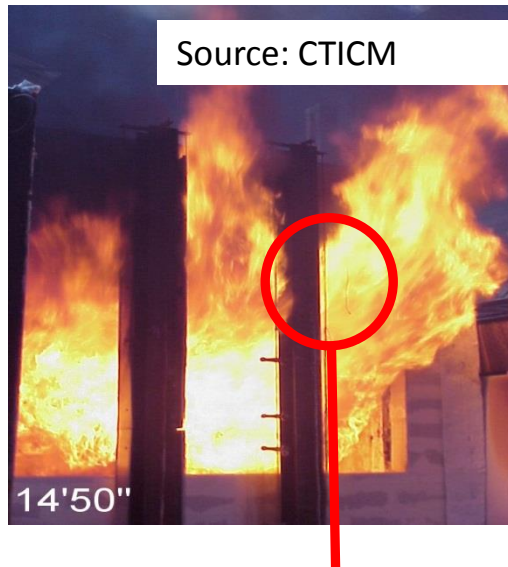
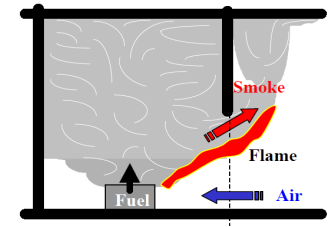
- est **contrôlée par la ventilation**
(l'air disponible)
- **Combustion peut être sous-ventilée**
 $\phi \geq 1$
- En réalité $\phi < 1$ aussi possible

Equations simplifiées



Les conséquences associées aux feux sous-ventilés

- fumées avec plus de CO et de suies
- Fumées avec plus d'imbrulées
- Extinction possible et ré-allumage possible



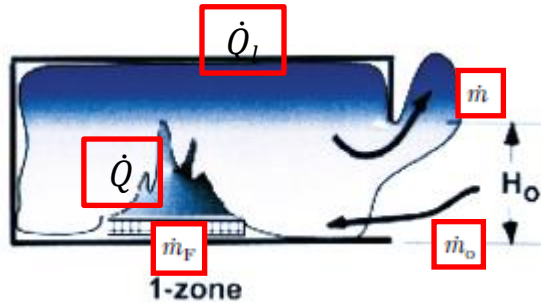
Feu généralisé avec sortie de flammes

Action de la flamme
Sur la résistance mécanique
de la structure



Equations simplifiées: approche pour une zone

Feu pleinement développé



L'évolution de T, O2 et P à l'intérieur du local est rapide / toutes contraintes

==> *état quasi-stationnaire*

$$-\frac{pV}{RT^2} \frac{dT}{dt} + \dot{m} = \dot{m}_o + \dot{m}_F$$

==>

$$\dot{m} = \dot{m}_o + \dot{m}_F$$

$$c_v \frac{d(mT)}{dt} = \frac{c_v V}{R} \frac{dp}{dt} = \dot{Q} - \dot{Q}_l$$

==>

$$\dot{Q} = \dot{Q}_l$$

$\dot{Q}$ = dég. chaleur

$\dot{Q}_l$ = pertes

1kg fuel + s Kg air ==> (1+s) prod (CO2, H2O, N2)

$$\frac{d(mY)}{dt} + \dot{m}Y - \dot{m}_o(0.233) = -0.233s\dot{Q}/\Delta h_c$$

==>

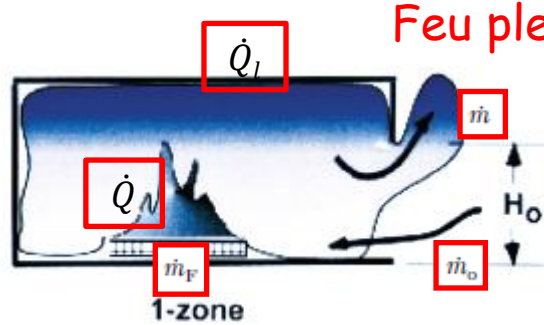
$$Y = 0.233(1 - \phi)/(1 + \phi/s) \text{ for } \phi \leq 1$$

Y= 0 pour $\Phi > 1$

Système d'équations simples utiles pour comprendre les couplages entre les phénomènes mis en jeu



Equations simplifiées: approche pour une zone



Feu pleinement développé

$$\dot{Q} = \dot{Q}_l$$

$\dot{Q}$ = dég. chaleur

$\dot{Q}_l$ = pertes

$$Q = \dot{m}_{F,b} A_F \Delta h_c$$

$$\dot{Q}_l = \dot{Q}_{l,s} \text{ pertes par les fumées}$$

$$\dot{m} c_p (T - T_0) ==> \dot{Q}_{l,s} / \dot{m}_0 c_p = X_s (T - T_0)$$

$$X_s = 1 + \phi/s$$

$$+ \dot{Q}_{l,w} \text{ pertes dans les parois}$$

$$h A (T - T_0) ==> \dot{Q}_{l,w} / \dot{m}_0 c_p = X_w (T - T_0)$$

$$X_w = h A / \dot{m}_0 c_p$$

$$1/h = 1/(h_{cv} + h_r) + 1/h_{cd}$$

$$+ \dot{Q}_{l,r} \text{ pertes par ray. à travers les ouvertures}$$

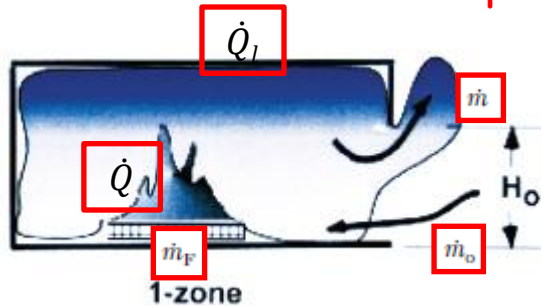
$$A_0 \sigma (T^4 - T_0^4) ==> \dot{Q}_{l,r} / \dot{m}_0 c_p = X_r (T - T_0)$$

$$X_r = A_0 \sigma T^3 / \dot{m}_0 c_p$$



Equations simplifiées: approche pour une zone

Feu pleinement développé



$$\dot{Q} = \dot{Q}_l$$

$\dot{Q}$ = dég. chaleur

$\dot{Q}_l$ = pertes

$$\dot{Q} = \dot{m}_{F,b} A_F \Delta h_c$$

En résumé

$$\dot{Q}_l = \dot{Q}_{l,s} + \dot{Q}_{l,w} + \dot{Q}_{l,r}$$

$$\implies \dot{Q}_l / \dot{m}_0 c_p = (X_s + X_w + X_r) (T - T_0)$$

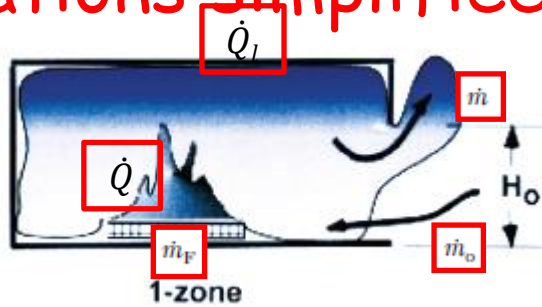
$$X_s = 1 + \phi/s$$

$$X_w = h A / \dot{m}_0 c_p$$

$$X_r = A_0 \sigma T^3 / \dot{m}_0 c_p$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_0 c_p (X_s + X_w + X_r) (T - T_0)$$

Equations simplifiées: approche pour une zone

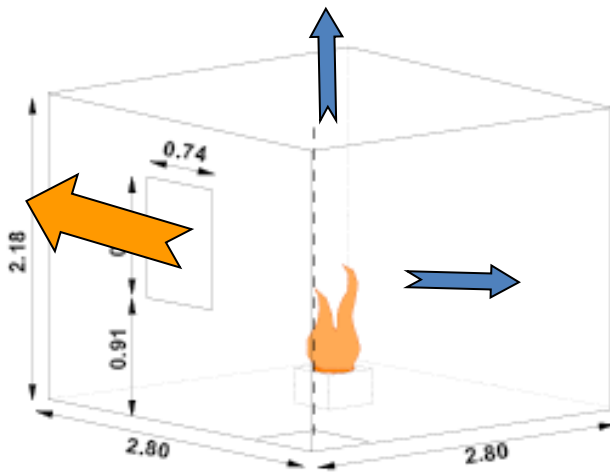


Feu pleinement développé

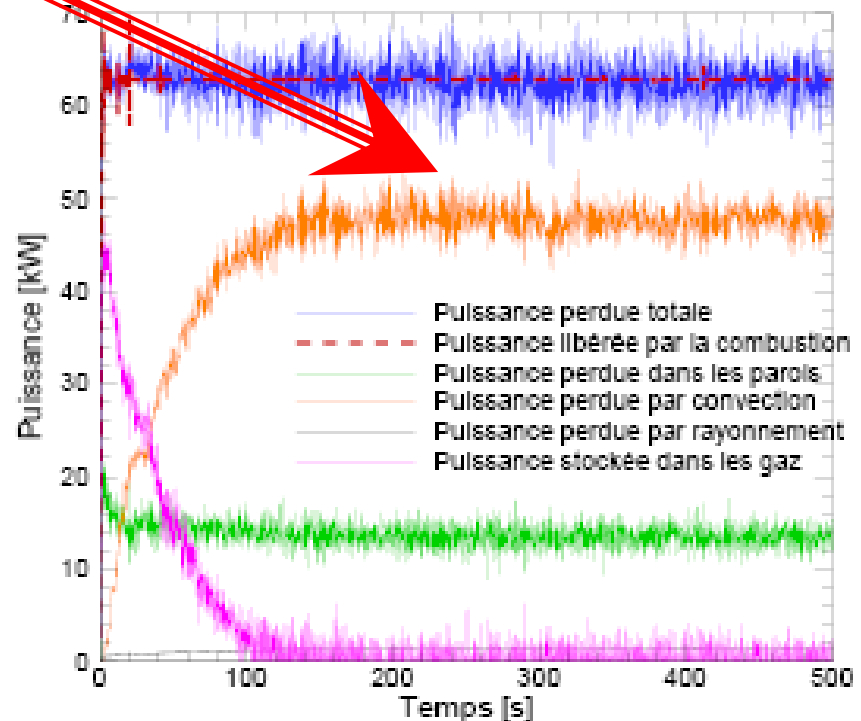
$\dot{Q}_l$ = pertes $\dot{Q}$ = dég. chaleur

$$\dot{Q}_l / \dot{m}_o c_p = (X_s + X_w + X_r) (T - T_0): \text{Feu pleinement développé}$$

Source: thèse S. Désanghère, 2006



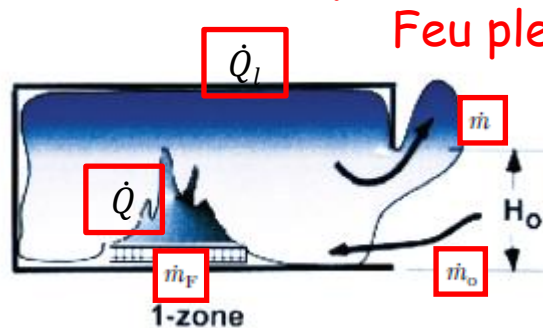
dimensions en mètres.



Répartition des puissances au cours du temps



Equations simplifiées: approche pour une zone



$$\dot{Q} = \dot{Q}_l$$

$\dot{Q}$ = dég. chaleur
 $\dot{Q}_l$ = pertes

$$Q = \dot{m}_{F,b} A_F \Delta h_c$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_0 c_p (X_s + X_w + X_r) (T - T_0)$$

$$X_s = 1 + \phi/s$$

$$X_w = h A / \dot{m}_0 c_p$$

$$X_r = A_0 \sigma T^3 / \dot{m}_0 c_p$$

Exemple: ordre de grandeur de X_s , X_w , X_r pour un local 4*4*2,5m³

Ouverture = porte L=0,9m et H₀= 2,2m

C_p air 1kJ/kg/K

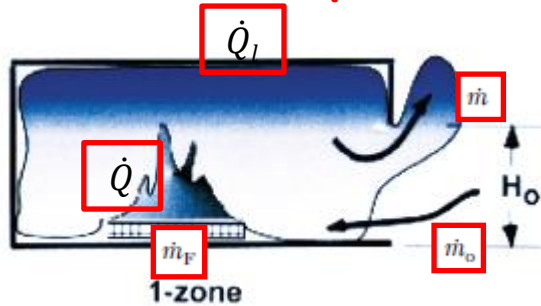
Bac essence diamètre 50 cm

h = 10 W/m²

Application: calcul de T-T₀

Le débit d'air entrant est donné par $\dot{m}_0 = 0.5 A_0 \sqrt{H}$ (Kg/s, formule de Kawagoe)

Equations simplifiées: approche pour une zone



Feu pleinement développé

$$Q = \dot{m}_{F,b} A_F \Delta h_c$$

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_o c_p (X_s + X_w + X_r) (T - T_0)$$

État stationnaire du feu dans le local $\dot{Q} = \dot{Q}_l$

Est il possible d'avoir un emballement?

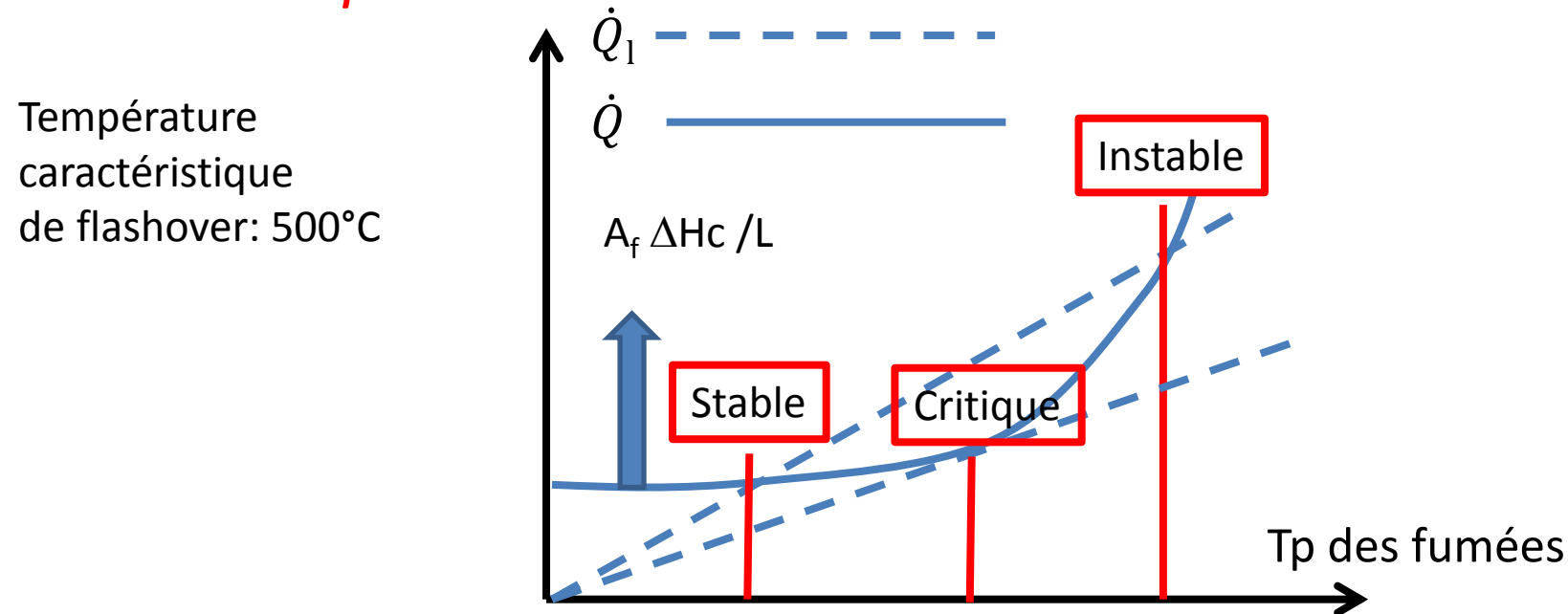
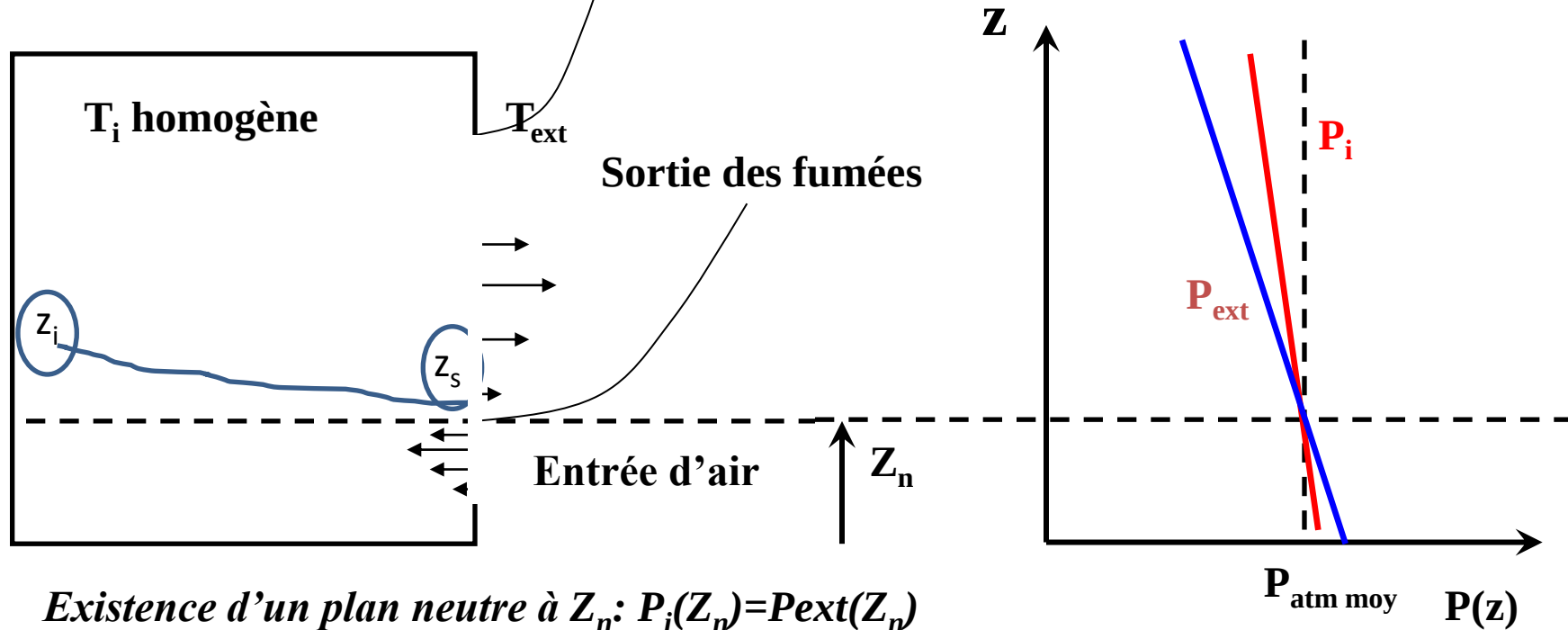
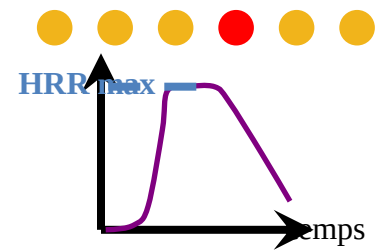


Diagramme de Semenov

Feux avec ventilation naturelle

Feu pleinement développé

➤ débits de fumées et d'air à travers une ouverture



Existence d'un plan neutre à Z_n : $P_i(Z_n) = P_{ext}(Z_n)$

➤ loi de la statique des fluides:

$$P_{ext}(z) - P_{ext}(z_n) = -\rho_{ext}(z - z_n)$$

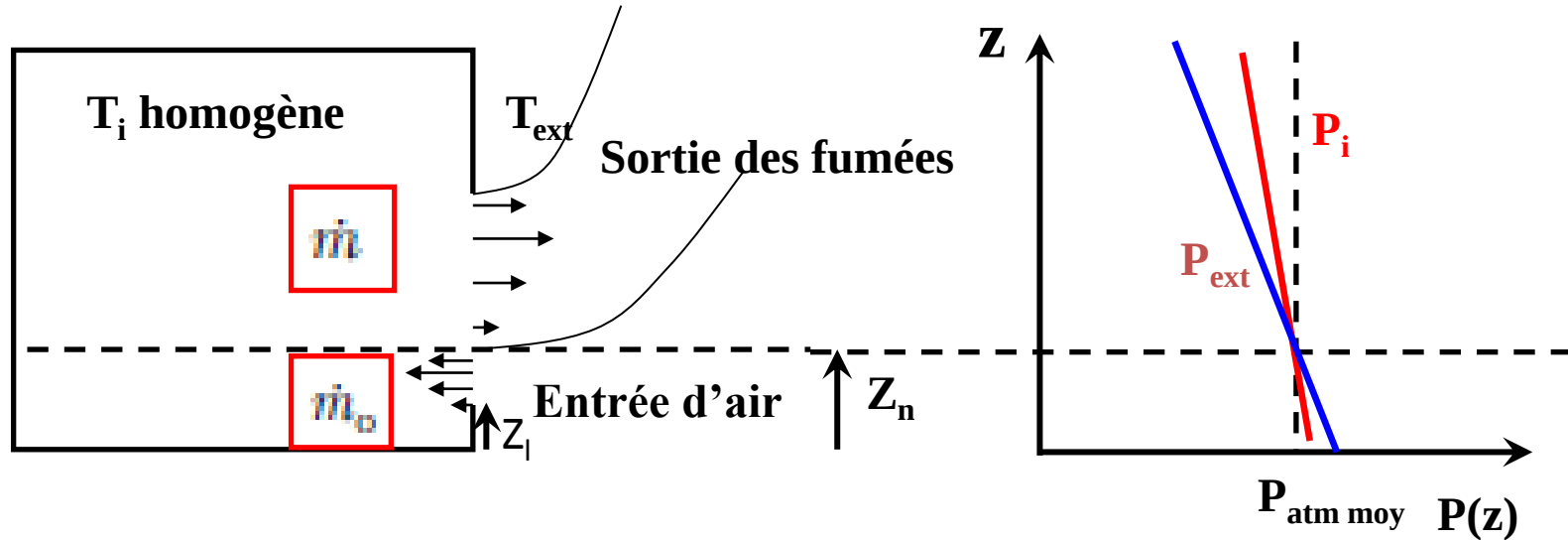
$$P_{int}(z) - P_{int}(z_n) = -\rho_{int}(z - z_n)$$

Mais $\rho_{ext} > \rho_i$

➤ loi de Bernoulli: $P_{int}(z_i) = P_{ext}(z_s) + V_s(z)^2 / 2g$

Feux avec ventilation naturelle

➤ débits de fumées et d'air à travers une ouverture



➤ en intégrant de z_l à z_n $\dot{m}_0/L = C_d \rho_0 \sqrt{2g} \sqrt{1 - \frac{T_i}{T_0} \frac{2}{3} (z_n - z_l)^{3/2}}$ Et aussi $\dot{m}/L = f[(z_u - z_n)^{3/2}]$

Bilan de masse $\dot{m} = \dot{m}_0 + \dot{m}_F = \dot{m}_0 (1 + \phi/s)$

$$\dot{m}_0 = \frac{2}{3} C_d \rho_0 \sqrt{2g} \sqrt{1 - \frac{T_i}{T_0}} \frac{A_0 \sqrt{H}}{[1 + (\frac{T_i}{T_0})^{\frac{1}{3}} (1 + \frac{\phi}{s})^{\frac{2}{3}}]^{3/2}}$$

A_0 : surface de l'ouverture

H : hauteur

L : largeur

➤ Conclusion: avec les valeurs usuelles des paramètres

$$\dot{m}_0 = 0.5 A_0 \sqrt{H} \quad (\text{Kg/s, formule de Kawagoe})$$

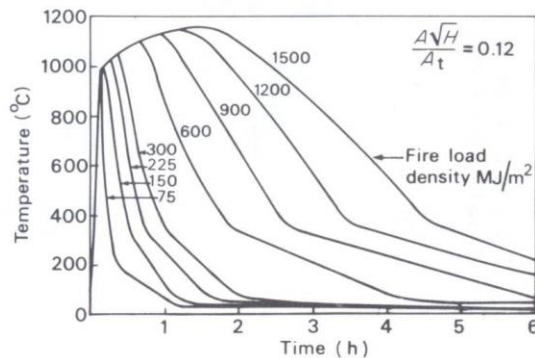
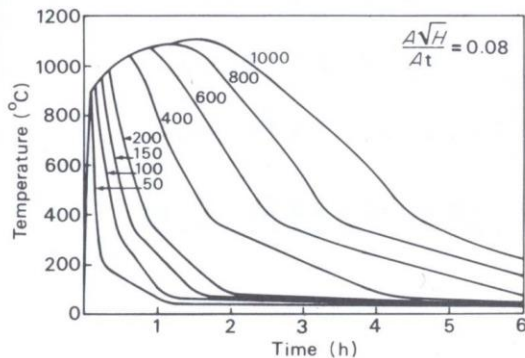
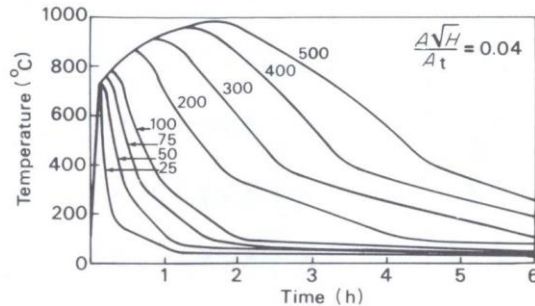
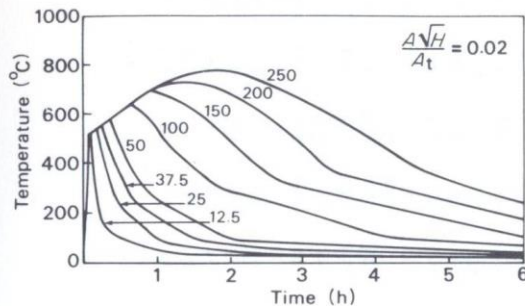
correctif de Délichatsios

$$\dot{m}_0 = 0.5 A_0 \sqrt{H} - 0.5 \dot{m}_F$$

Feux avec ventilation naturelle

Modèle à une zone

- Le feu est dans un régime contrôlé par la ventilation
- La puissance de combustion (HRR) est constante et appliquée dès le début
- Elle s'arrête après la fin de la disponibilité du combustible
- La transmission de la chaleur à travers les murs est variable



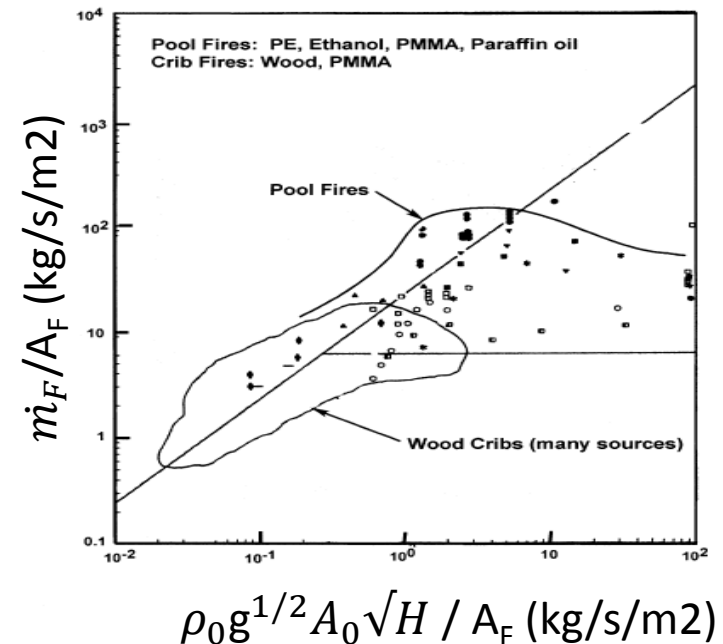
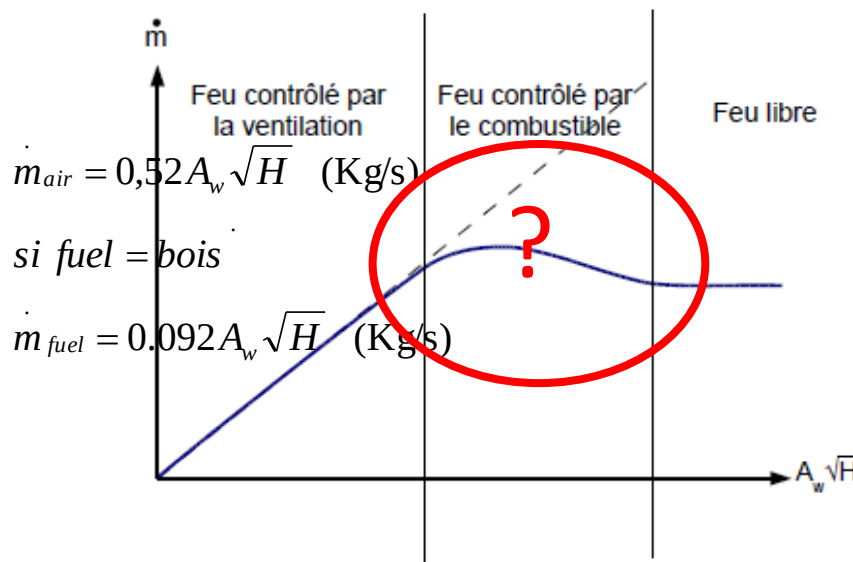
temperature-time curves for compartment fires with different load densities (MJ/m^2) and opening factors, $A_w H^{1/2}/A_t$ ($\text{m}^{1/2}$). (Pettersson *et al.*, 1976. Reproduced by permission of The Swedish Institute of Steel Construction). (Pettersson's "Standard compartment", Wall thickness 0.2m, $k = 0.8$ W/m.K , $q_c = 1700$ $\text{kJ/m}^3.\text{K}$)

Feux avec ventilation naturelle

➤ *perte de masse*

➤ Évolution de la perte de masse (maximale) d'un feu confiné en fonction du facteur d'ouverture.

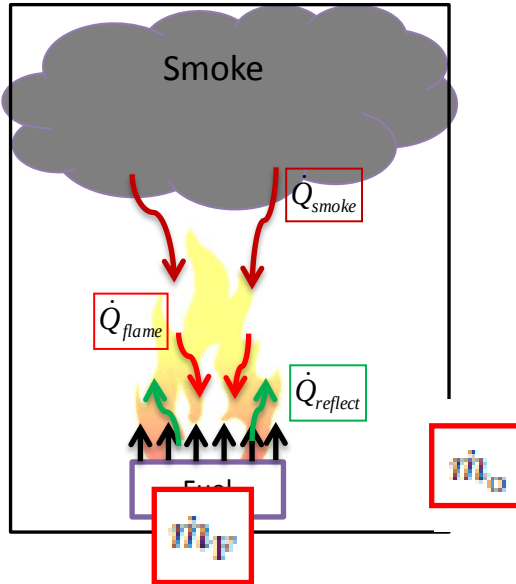
➤ La ligne en pointillés représente le taux de combustion dans un régime contrôlé par la ventilation



Bullen & Thomas
Proc Comb. Inst 1978

Feux avec ventilation naturelle

➤ *perte de masse*



$$\dot{Q}_{received} = \dot{Q}_{flame,rad} + \dot{Q}_{flame,conv-cond} + \dot{Q}_{ext,rad} - \dot{Q}_{reflect}$$

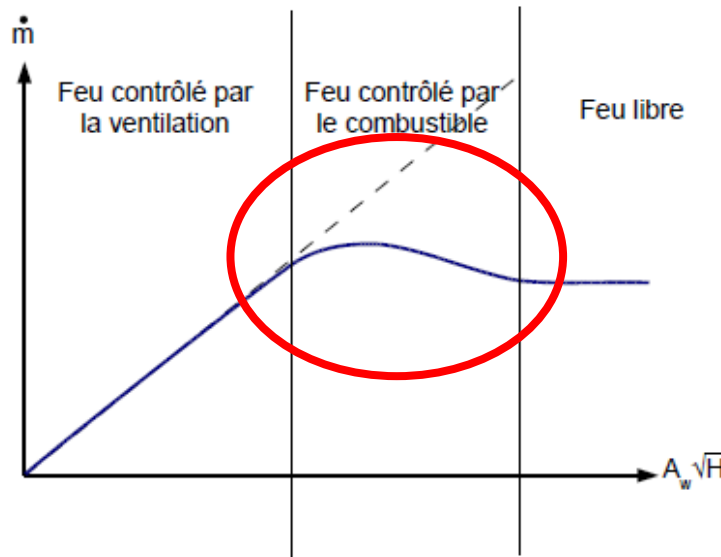
Effet du confinement

$$\dot{m}_F = \frac{\dot{Q}_{received} - (\dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{emis})}{L}$$

L : Chaleur de gazeification

$L = L_v$ pour les liquides

$$\dot{m}_F = \dot{m}_{F,free} f(Y_{O_2}) + F_{S+W \rightarrow F} \sigma (T^4 - T_0^4) / L$$



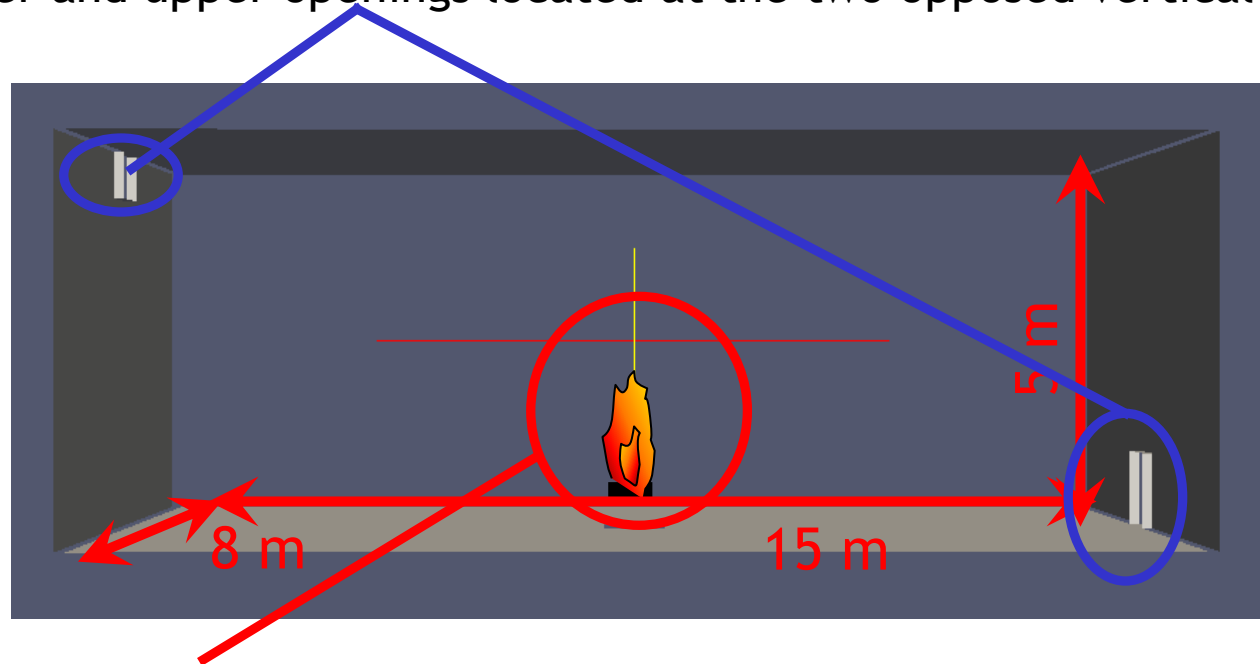
Feux avec ventilation naturelle



Modelisation plus fine: utilisation de openFoam/fireFoam

- The case: without mechanical ventilation

lower and upper openings located at the two opposed vertical walls



600m³

Apertures:

-up, 1x.61 m²

-down, 1x1 m

- The source = at the center, surface injection 0.83m²
methane combustion

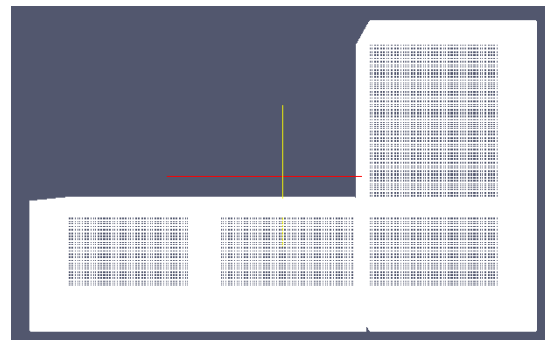
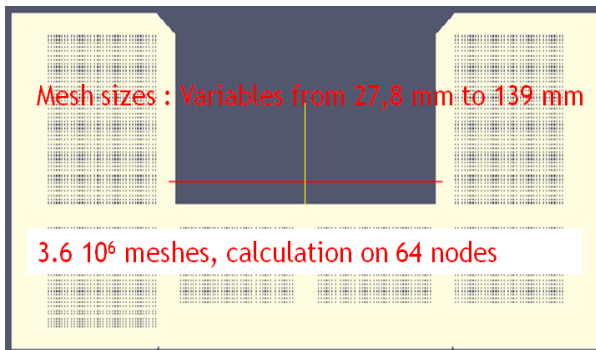
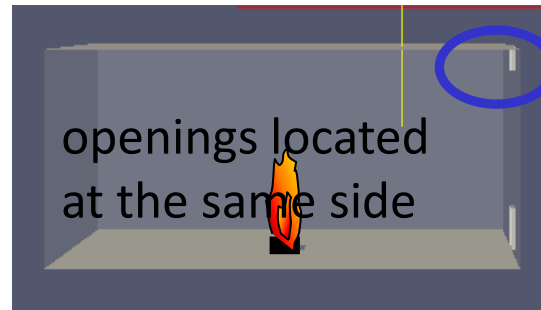
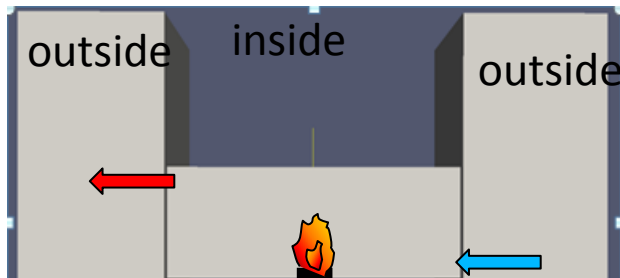
HRR = 188 t² ---> **HRR= 2,7 Mw** at t=120s (NFPA: very fast)

Feux avec ventilation naturelle



Modelisation plus fine: utilisation de openFoam/fireFoam

- Modelling with *fireFoam* (2.1.1)
 - turbulence: LES
 - Combustion: CH₄ , infinitively fast réaction+eddy breakup
 - Radiation: yes
 - time step: 0.001s / 0.005s

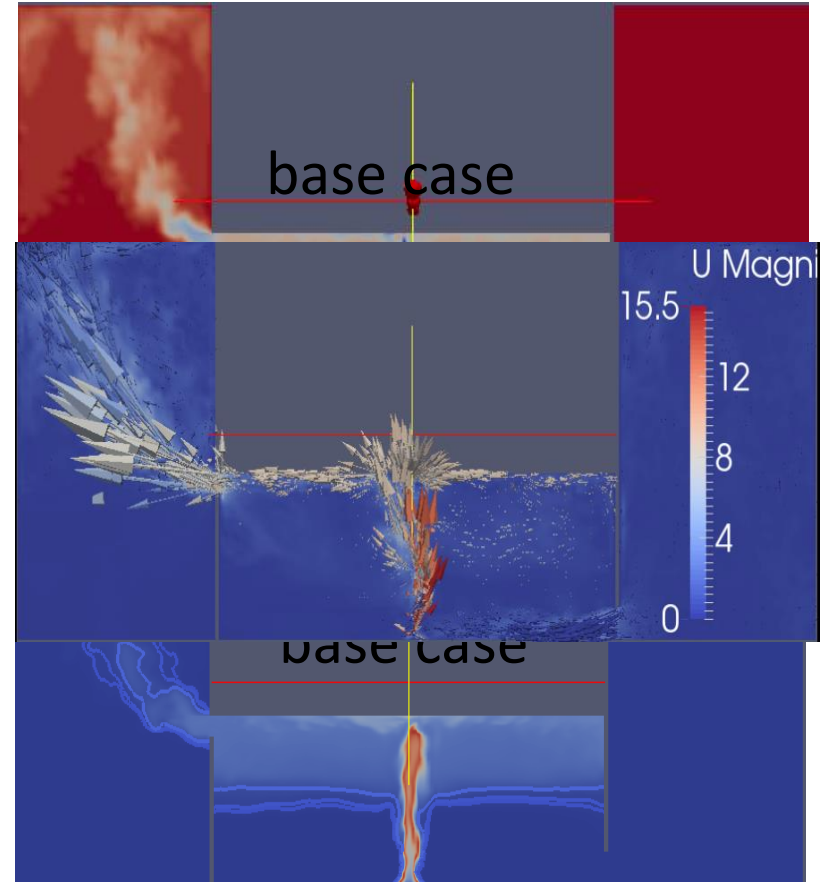
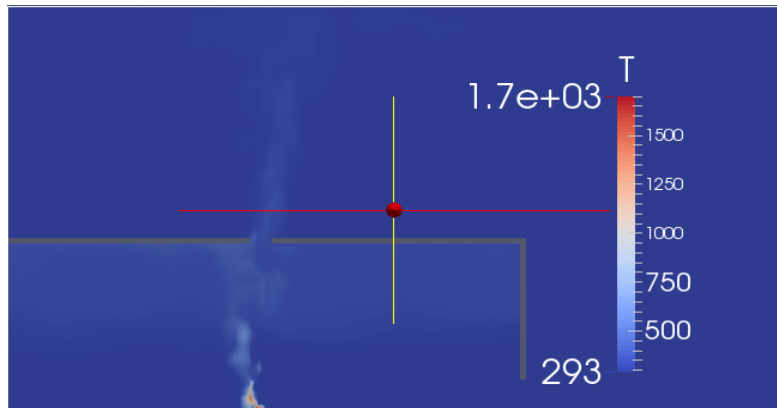
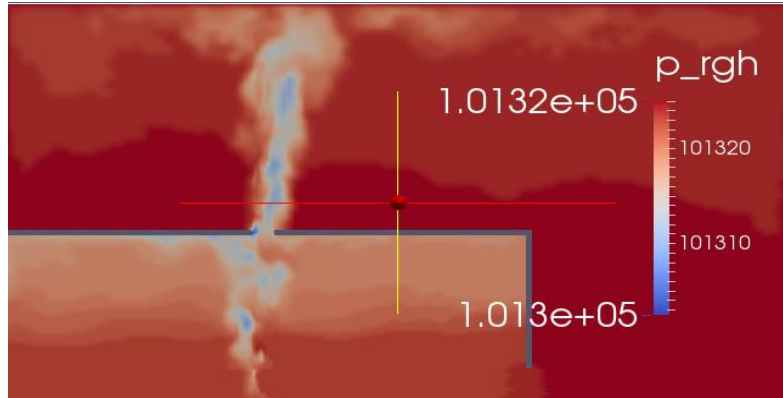


Feux avec ventilation naturelle



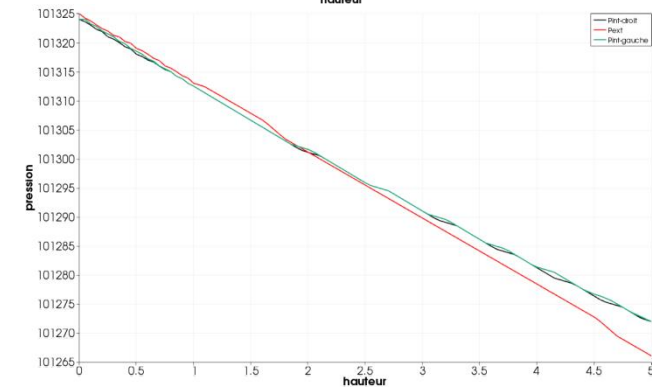
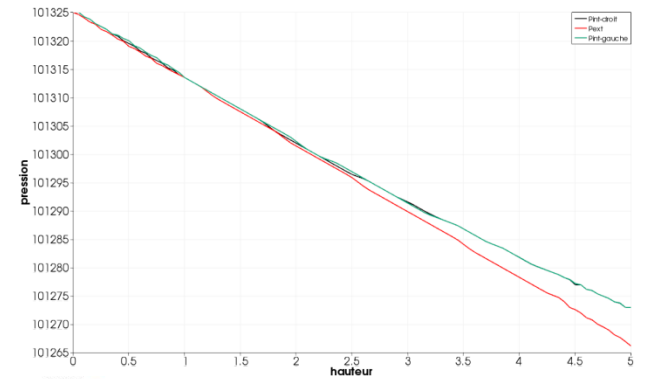
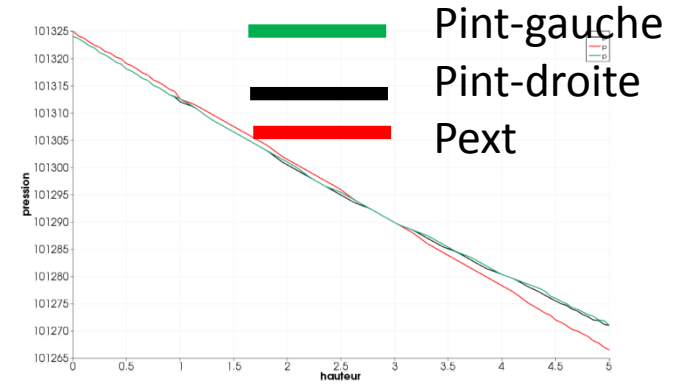
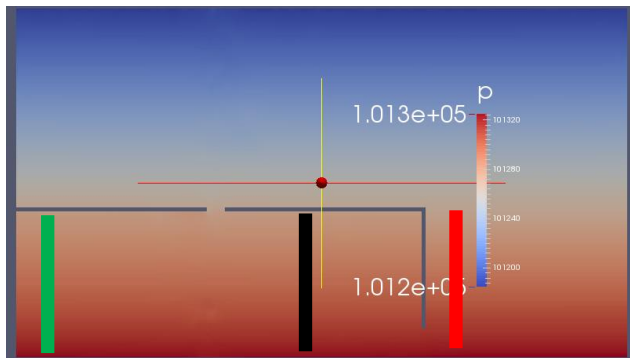
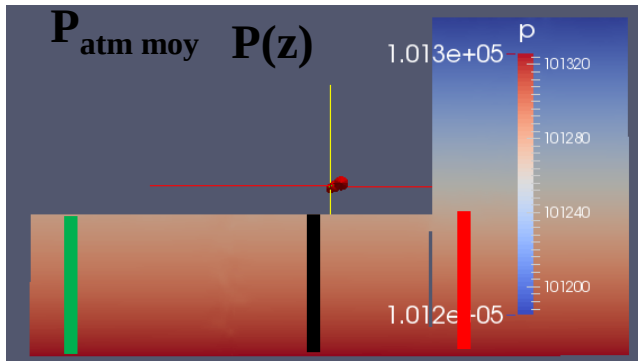
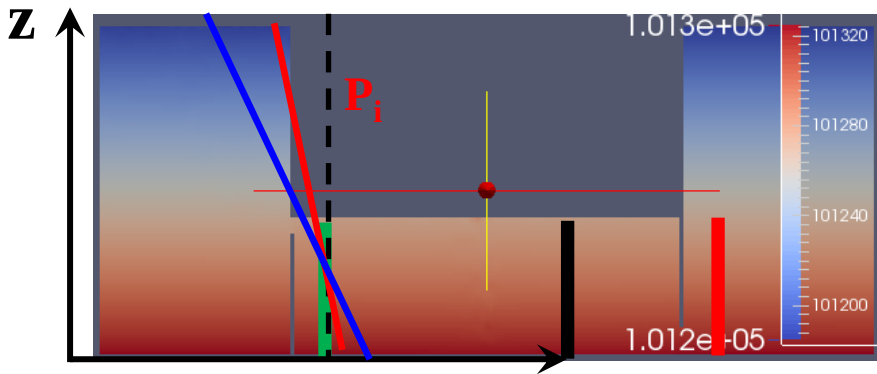
Modelisation plus fine: utilisation de openFoam/fireFoam

Resultats: dans le plan median



Feu avec ventilation naturelle: modelisation fireFoam

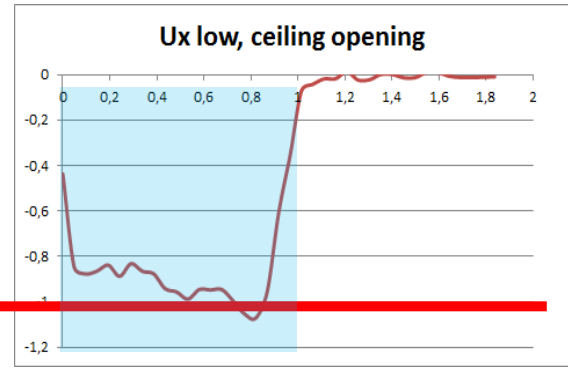
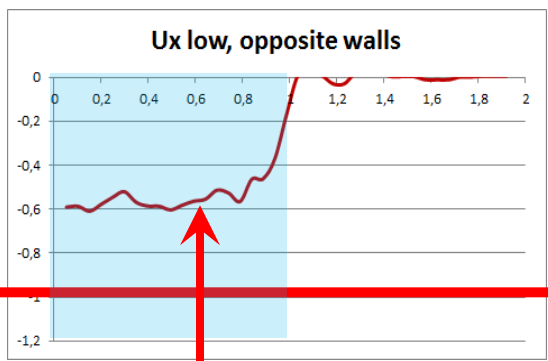
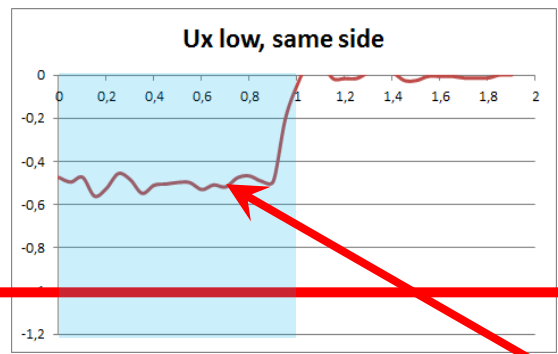
Modèles simples: utilisation de la loi de la statique des fluides



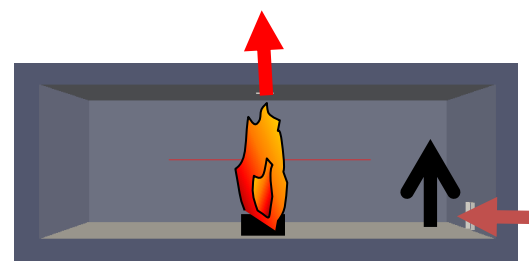
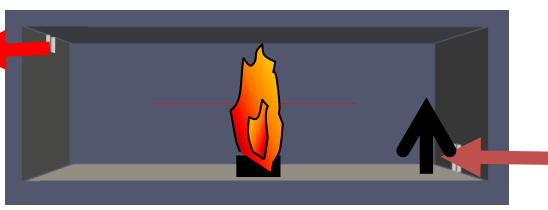
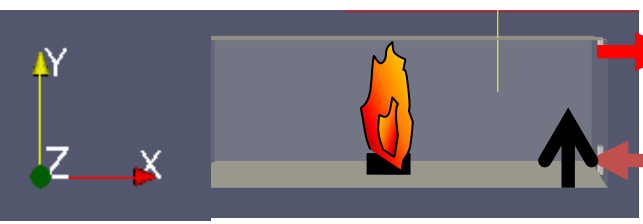


Feu avec ventilation naturelle: modelisation fireFoam

Profils à l'ouverture en bas



$$\dot{m}_0 = 0.5 A \sqrt{H} \text{ (Kg/s)} \implies U_x = 0,41 \text{ m/s}$$

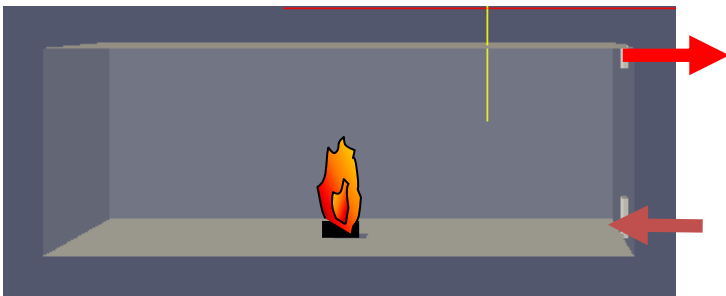
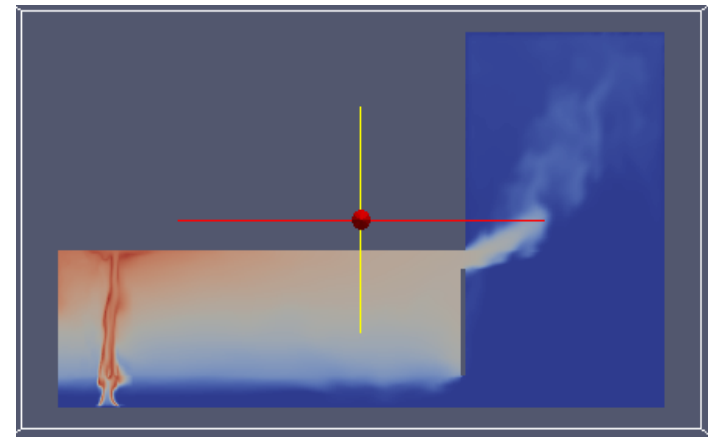
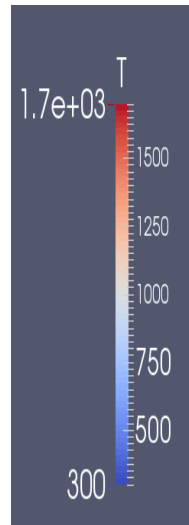
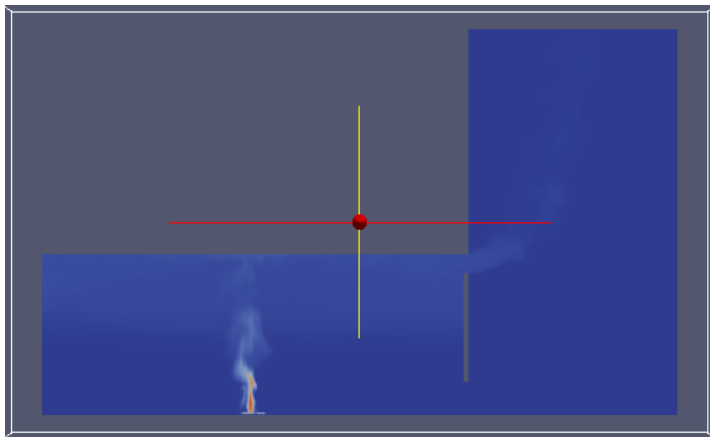




Feu avec ventilation naturelle: modelisation fireFoam

Une autre comparaison: ouvertures du même coté

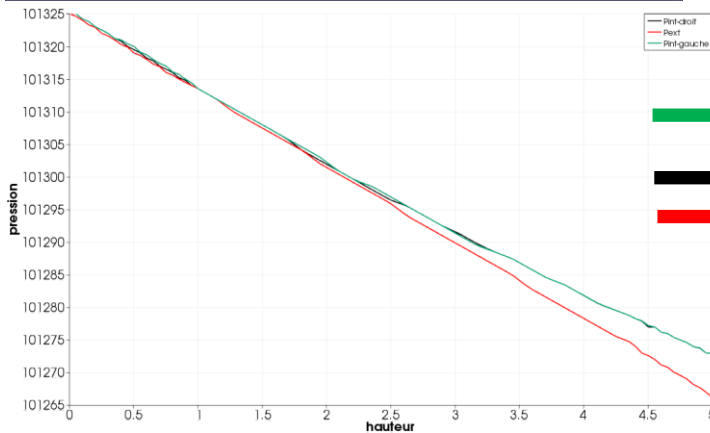
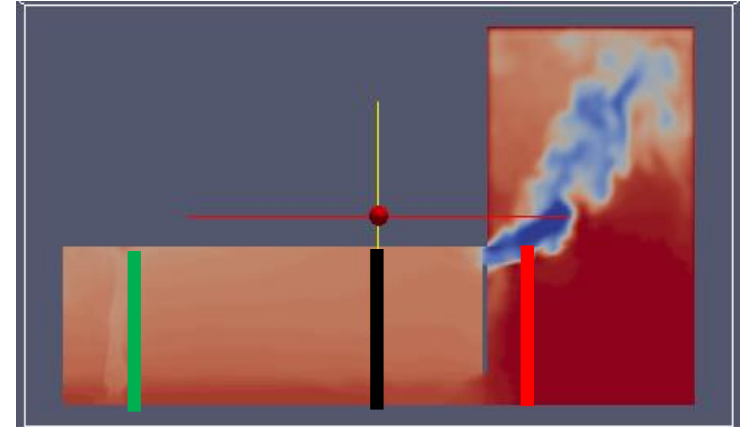
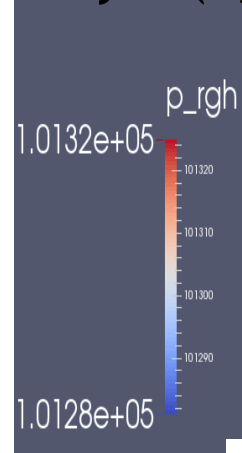
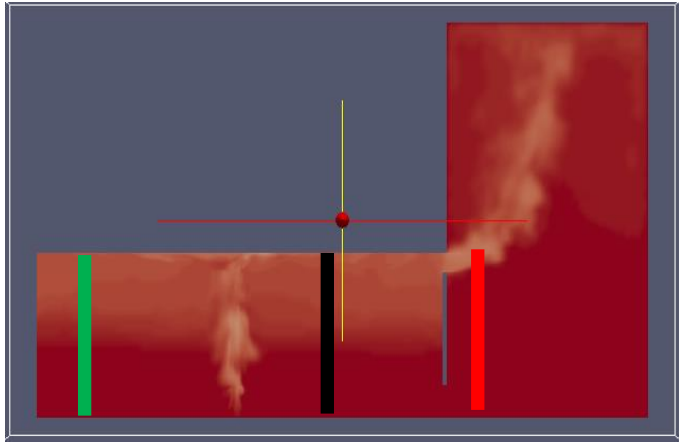
Mais le foyer (2,7 MW) pas au même endroit



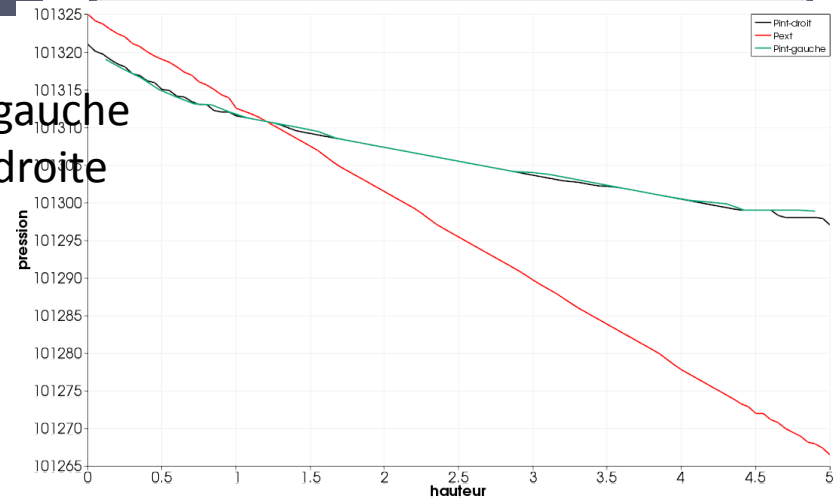
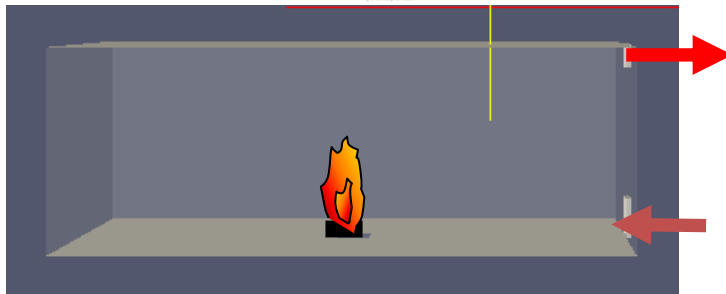
Feu avec ventilation naturelle: modelisation fireFoam

Une autre comparaison: ouvertures du même coté

Mais le foyer (2,7 MW) pas au même endroit



Pint-gauche
Pint-droit
Pext





la production des fumées et des espèces toxiques

Une émission importante de fumées a pour conséquences:

- un accroissement du risque de propagation
- Une perte de visibilité pour l'évacuation et les secours
- des émissions de toxique: CO, autres

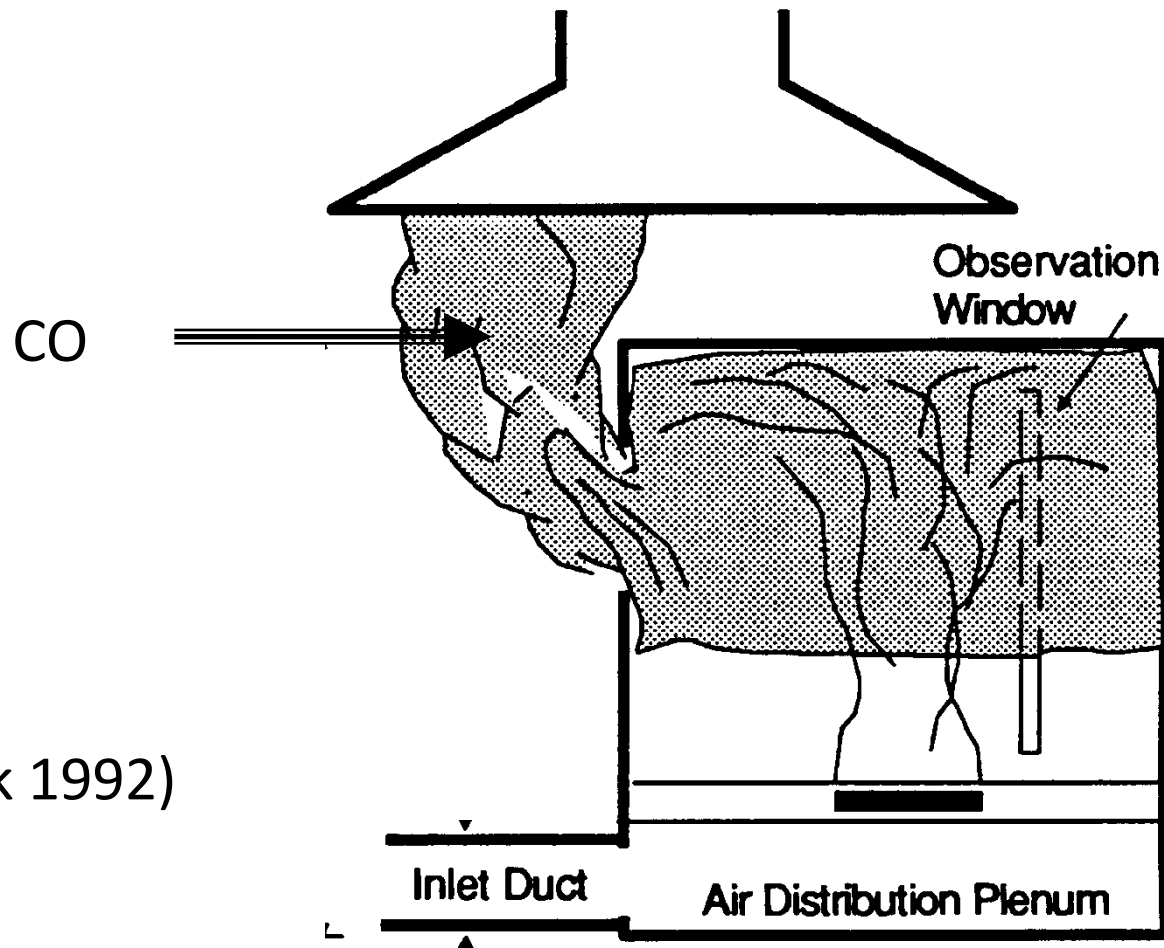
Les effets du CO

==> l'homme est très sensible aux effets
d'une exposition au CO

la production des espèces toxiques

La production de CO

La production de CO dépend de la ventilation du foyer
si le régime du feu est sous ventilé ==> CO ↗



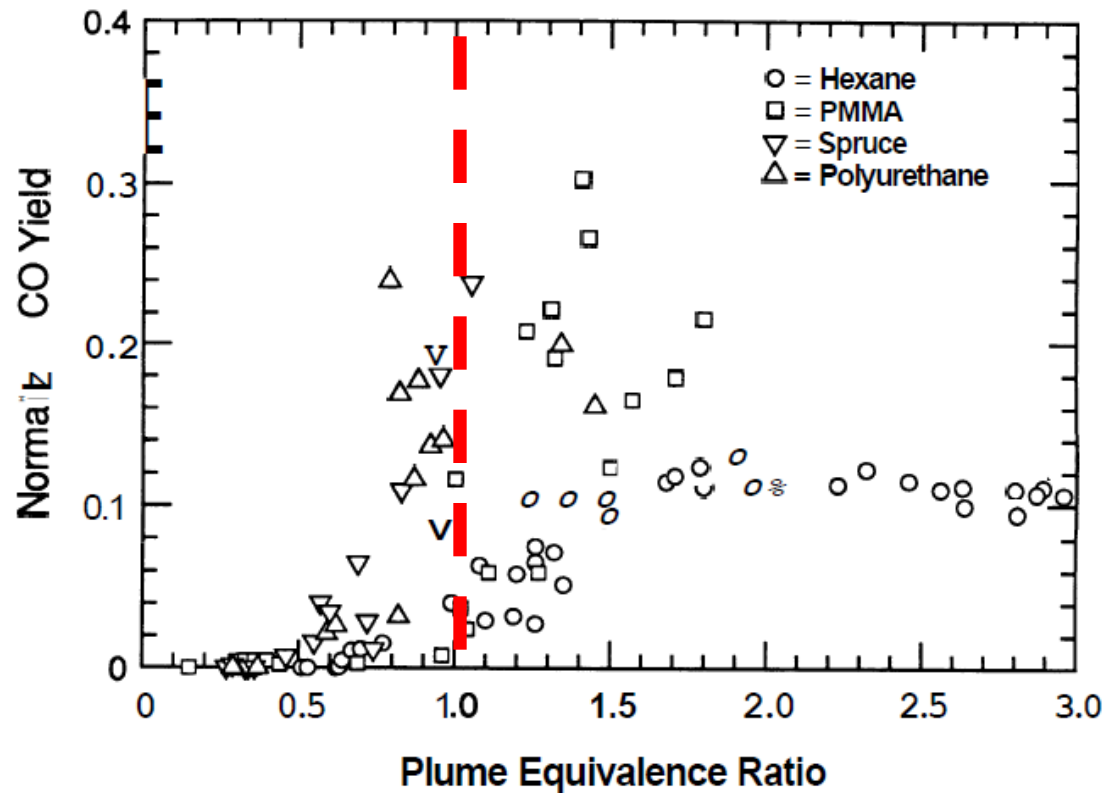
(Gottuk 1992)

la production des espèces toxiques

La production de CO



(Gottuk 1992)



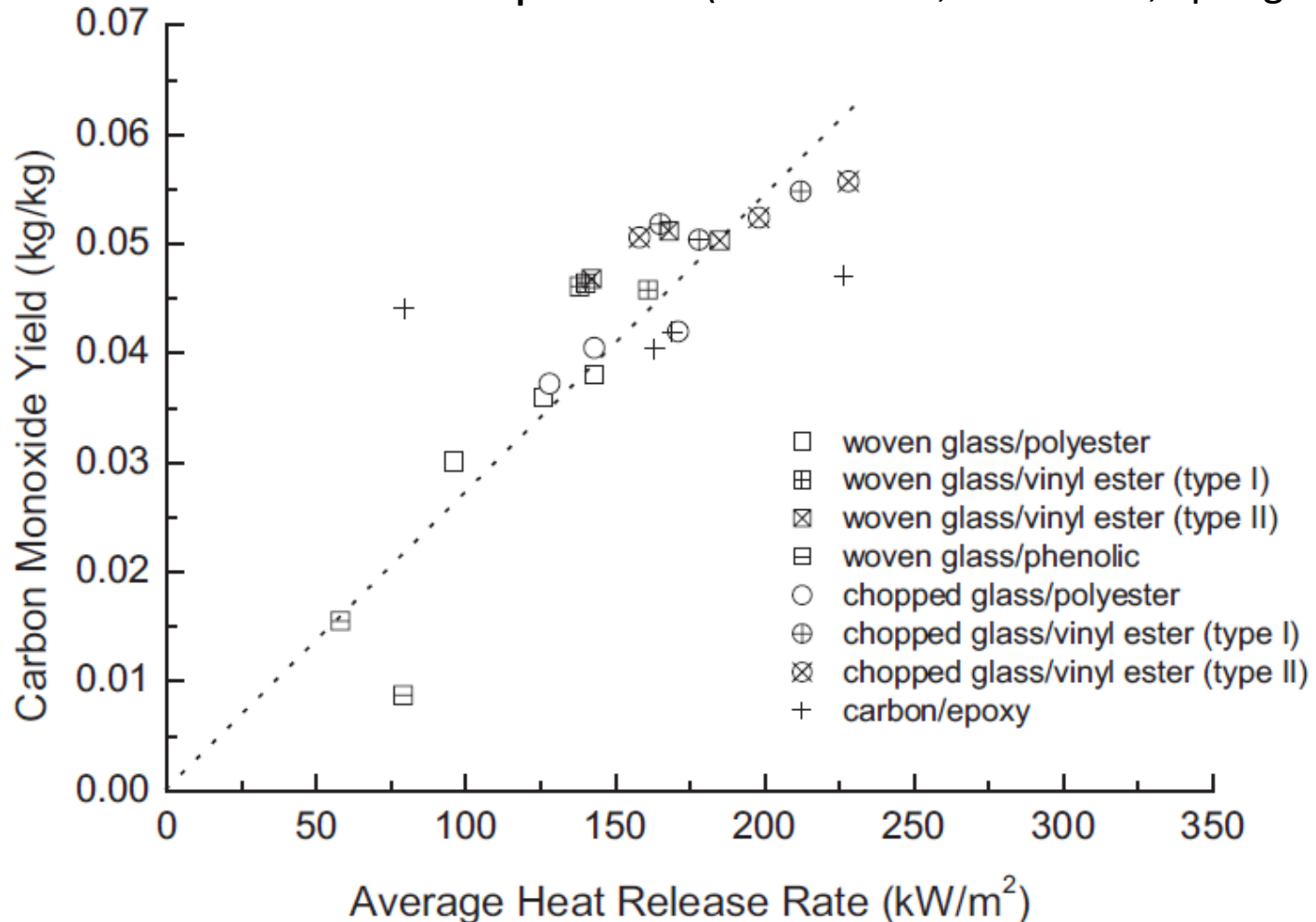
CO Yield = debit massique CO / debit massique comb

la production des espèces toxiques

La production de CO



Cas des matériaux composites (A. MOURITZ, A. GIBSON, Springer 2006)



la production des espèces toxiques



La production de CO

➤ Des essais à petites ou moyennes échelles permettent de ***connaître le taux de production de CO (Yield) en fonction du GER (ou ϕ)***

➤ ***Pourquoi avoir une approche 'empirique' aussi simplifiée?***

➤ On sait faire des simulations idéalisées avec une chimie détaillée (réacteur parfaitement mélangé, flamme de diffusion laminaire)

➤ ***on ne sait pas*** encore modéliser dans le détail et correctement la production de CO dans les flammes turbulentes et dans les fumées!

➤ Dans la plupart des outils CFD actuels, la modélisation du CO dans les fumées repose sur des valeurs du Yield(GER)

la production des espèces toxiques



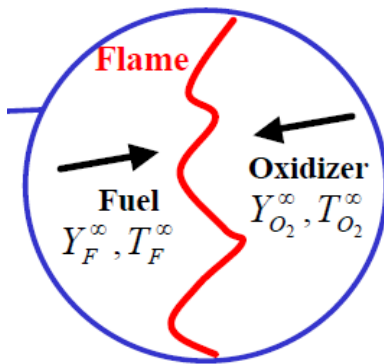
La production de CO

- Quel le problème rencontré quand on veut prédire dans le 'détail' la production de CO ?
(et d'autres espèces inflammables ou toxiques) ?

==> la chimie du CO n'est pas infiniment rapide!

La production w_{CO} de CO est donc dépendante

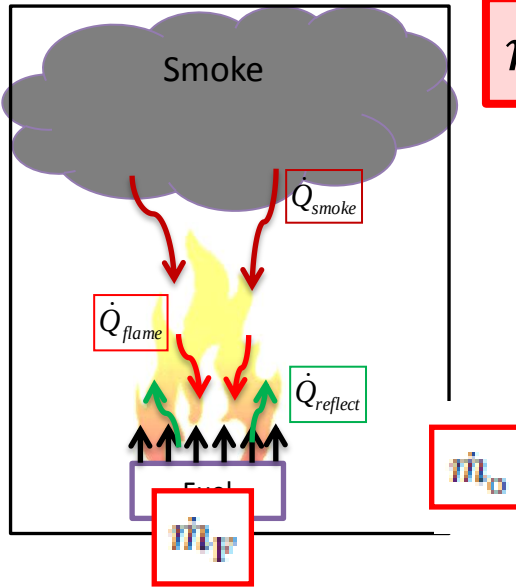
- de l'efficacité de mélange de la turbulence
- et de la cinétique chimique de formation/oxidation



Une approche récente:

A. Trouvé, Int Symp Comb 2007

Comportement des flammes sous-ventilées



$$\dot{m}_F = \dot{m}_{F,free} \left[f(Y_{O_2}) + F_{S+W \rightarrow F} \sigma (T^4 - T_0^4) \right] / L$$

Si $O_2 \searrow$ fortement: que se passe-t-il?
Extinction systématique ?

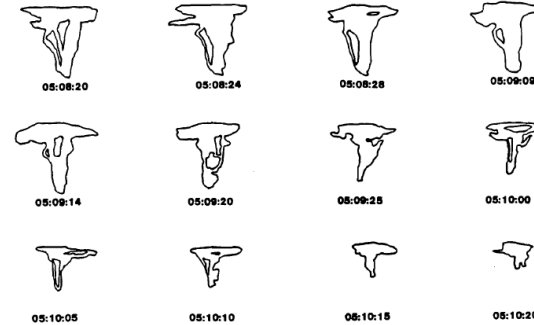
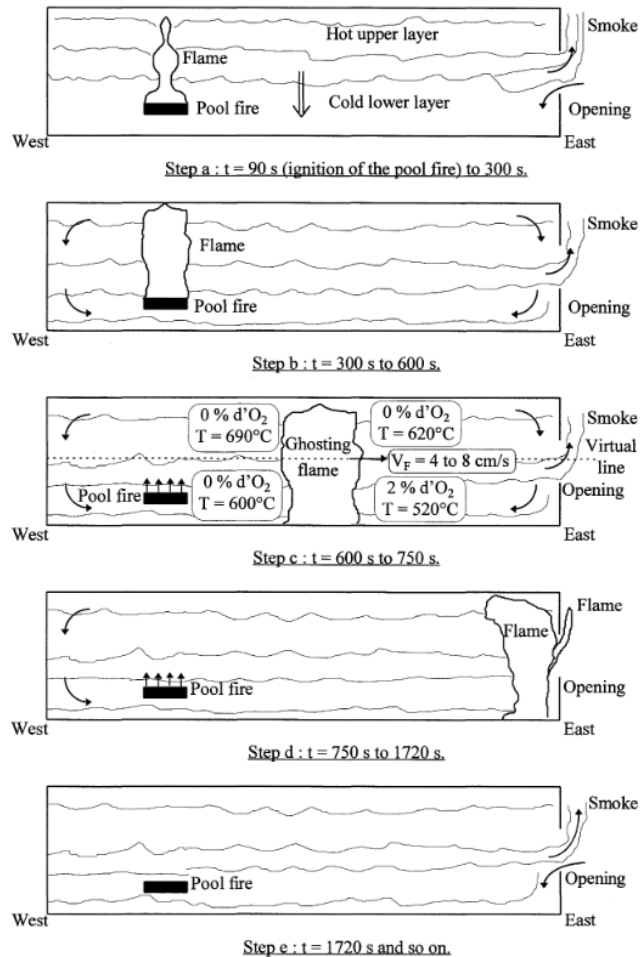
Réponse: avant extinction

la flamme adopte un comportement différent

- *La flamme se décroche de la zone de combustible*
- *Elle peut se déplacer dans l'enceinte*
Flamme fantôme (ghosting flame)
- *Apparition de pulsations à basses fréquences*

Comportement des flammes sous-ventilées

Figure 9 : The main steps of a real scenario for a ghosting flame



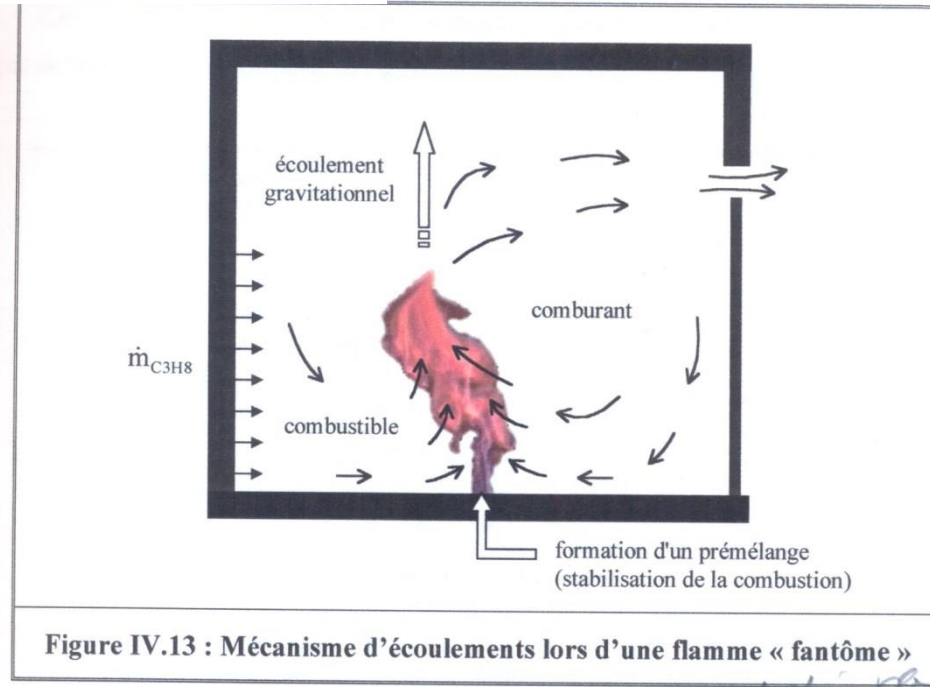
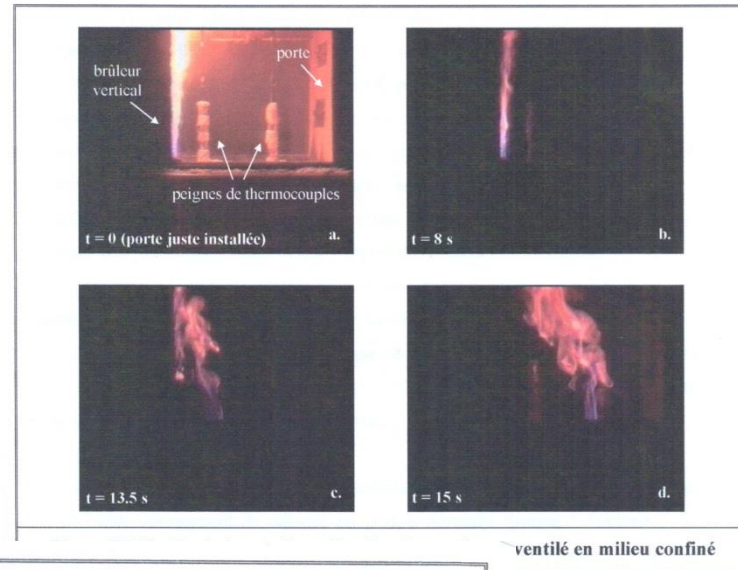
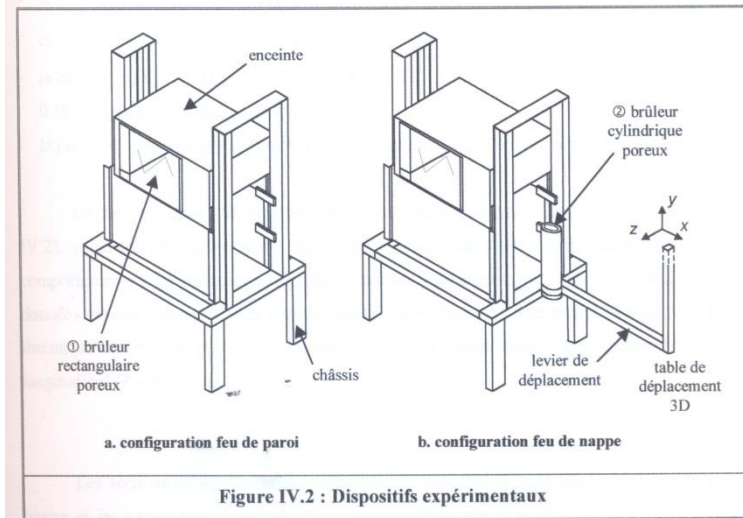
Ghosting flames

Sugawa et al. (1989) Fire Science and Technology

Audoin et Al, 5th IAFSS conference 1997

Comportement des flammes sous-ventilées ●●●●●●●

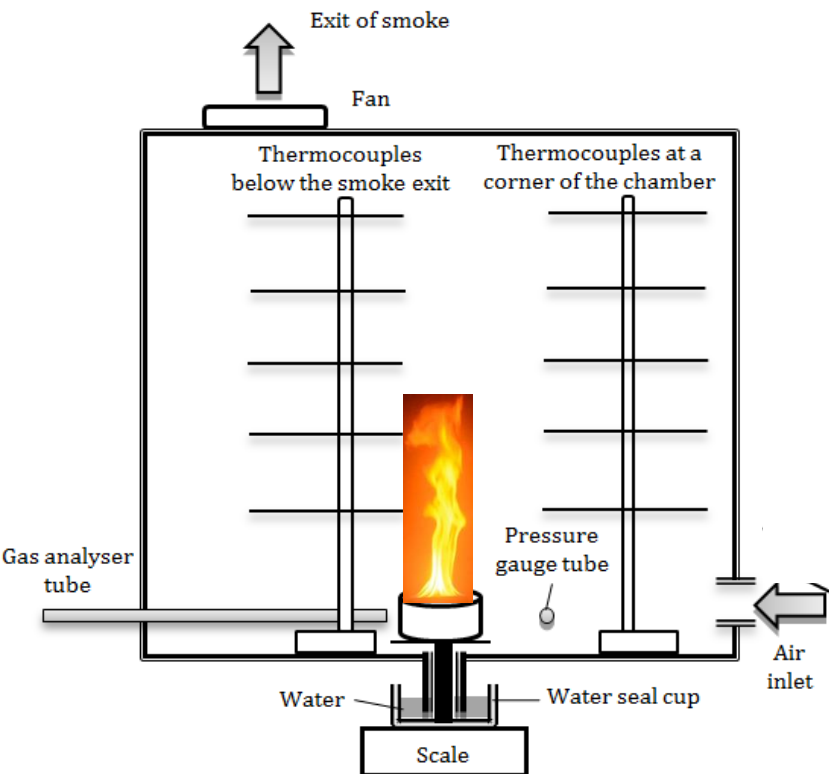
(Thèse de Coutin, P-PRIME, 2000)



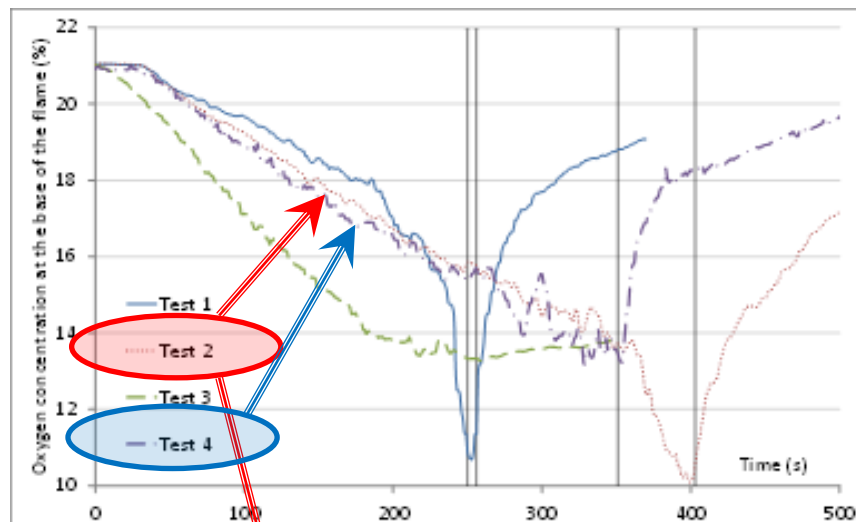
Comportement des flammes sous-ventilées

Ce phénomène s'observe aussi avec une enceinte mécaniquement ventilée

Dispositif du CORIA

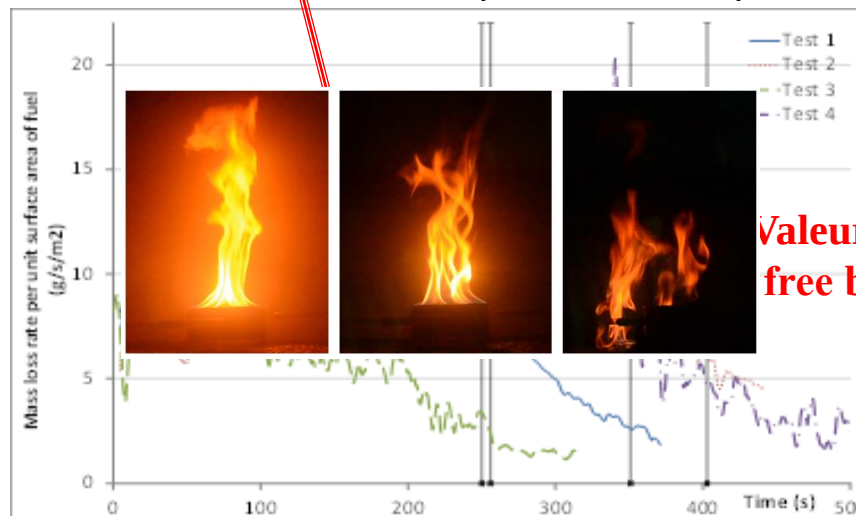


Combustible : n-Heptane
2 bac pyrex de 11cm de diamètre



Concentration en oxygène à la base de la flamme
Perte de masse surfacique (en dessous)

Les barres verticales indiquent les temps d'extinction



Valeur
free burning'

Comportement des flammes sous-ventilées ●●●●●●●●

Phénomène de pulsation



Temps
entre deux
images:
33 ms

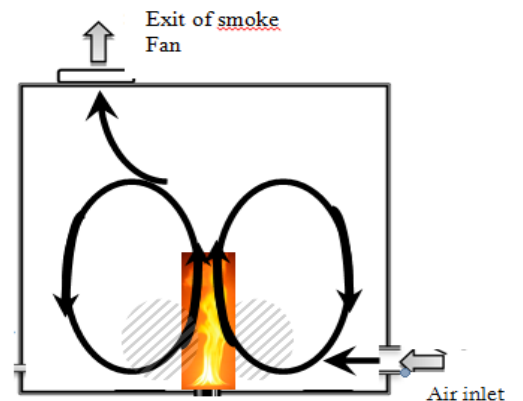
Phénomène renforcé si la flamme est légèrement sous-ventilée

Phénomène en quatre étapes:

- 1 Déflagration, vitesse de l'ordre de 0,2 m/s
- 2 Développement vertical d'une flamme lumineuse
- 3 Disparition de la flamme lumineuse
- 4 période plus longue de latence

Fréquence: de l'ordre de 0,8 hz < à la fréquence de 'puffing' (4 hz)

Origine du phénomène:



Comportement des flammes sous-ventilées ●●●●●●●

Extinction de la flamme (phase gaz)

- Extinction en présence de combustible

L'extinction de la flamme peut être due

- aux pertes (par rayonnement)
- aux effets de ballast thermique

Apportés par le mélange avec des gaz inertes et la dilution (N_2 , CO_2 , ...)
ou apportés par un gaz ayant un C_p important

- aux effets chimiques de certaines molécules

Critères d'extinction:

- X_{O_2} au pied de la flamme limite ?

Heptane et dodecane: Extinction souvent observée si au pied de la flamme $X_{O_2} < 12-14\%$

Critère global, pas explicatif

- T_p adiabatique limite?

pour rendre compte des effets de ballasts thermiques de la dilution (*FDS*)

- Théoriquement : La température adiabatique limite est justifiée par un Damkohler critique. Comment le calculer? Effet du R_y ?

Conclusion

Concernant les feux dans des espaces confinés

➤ Quelques nouvelles préoccupations

- Utilisation de plus en plus intense des matériaux composites
- Utilisation des matériaux à partir de produits naturels
- Feux de façades
- Systèmes de production distribuée d'énergie
(ex:panneaux solaires)

➤ Quelques thématiques de R &D

- Combustion dans des atmosphères sous-ventilés
- La production des toxiques (CO, fumée, ...)
- L'extinction, les domaines d'inflammabilité des fumées
- La dégradation des composites
-