

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**
- **Comportement des feux et des flammes sous-ventilés**
- **La production des espèces toxiques**
- **Flammes externes**

Feux confinés: Aspects phénoménologiques

Objectif de l'exposé

- Bien connaître les phénomènes importants

===> développement d'un incendie

(intensité et durée)

- Etablir des équations simplifiées, *lois de comportement*

➤ *Est-ce nécessaire à l'heure actuelle ?*

il existe des modèles (3D) de dynamique de feu

la puissance des moyens de calcul est grande

➤ *La réponse est OUI* : ces lois de comportements permettent d'estimer

les phénomènes

les paramètres importants

les ordres de grandeur

➤ *Connaissances nécessaire* à l'heure du développement de

l'Ingénierie de la Sécurité Incendie

et d'une volonté politique de simplification (loi à venir)

Pour atteindre les performances souhaitées en sécurité incendie

====> *recours à la modélisation 3D*

➤ Mais la connaissance de ces aspects phénoménologiques

ne permet pas de quantifier et résoudre des cas complexes

====> *recours à la modélisation 3D*

Introduction: quelques exemples



- les bâtiments : habitats, bureaux

video: Feu-Flashover

- les bâtiments industriels: les entrepôts , les locaux techniques

- les installations souterraines: tunnels

Video: Tunnel Mt Blanc <https://www.youtube.com/watch?v=YzIk66-kGv0>

- 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

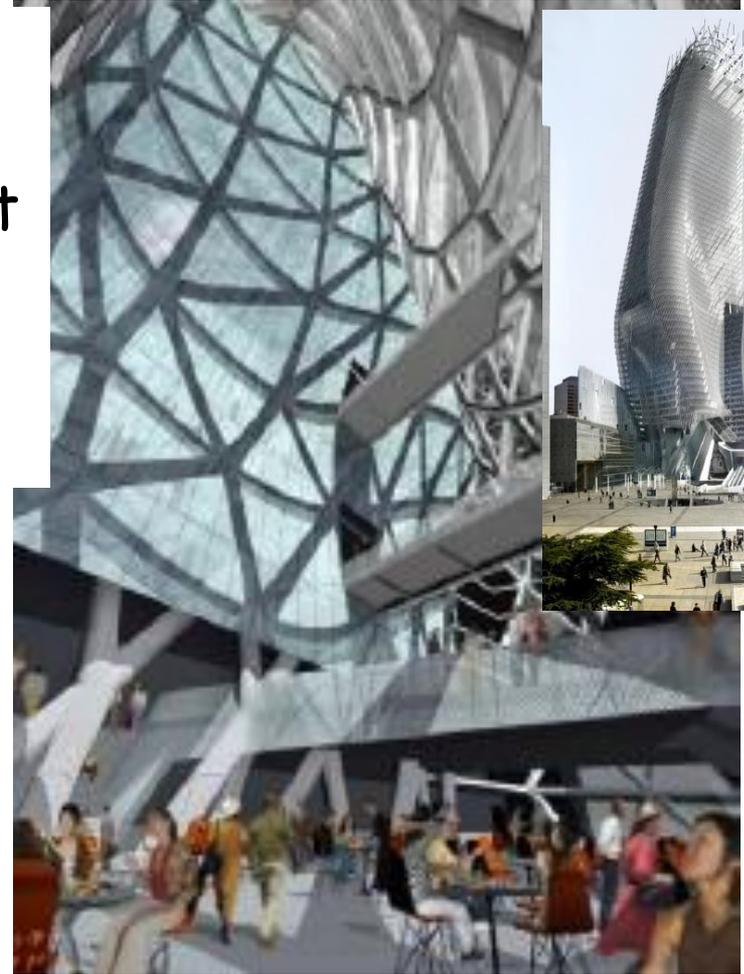
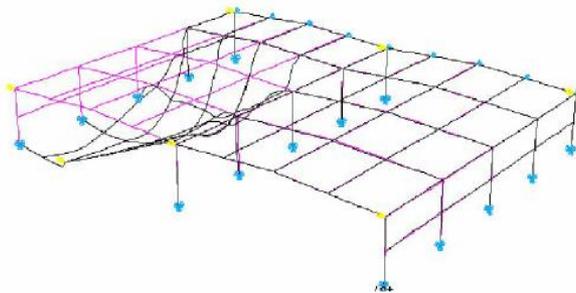


Introduction:



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

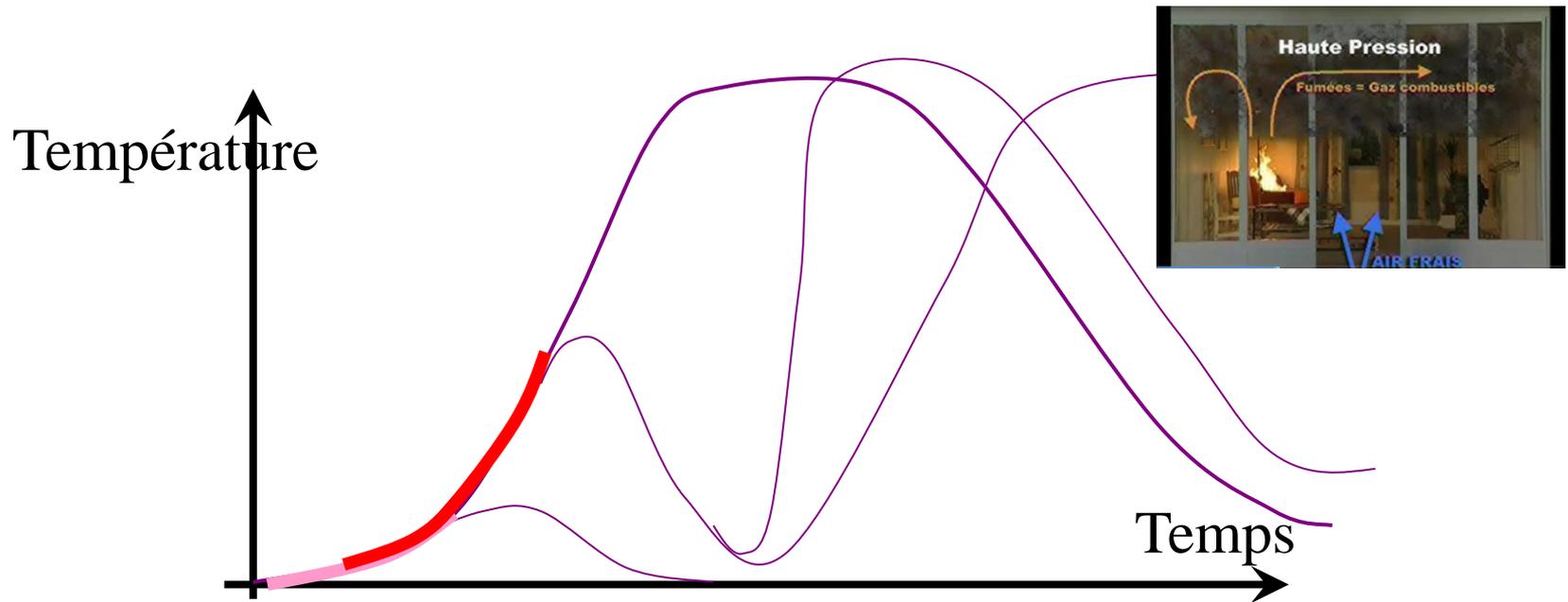


Plan de l'exposé

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

Quelques notions sur le développement d'un incendie

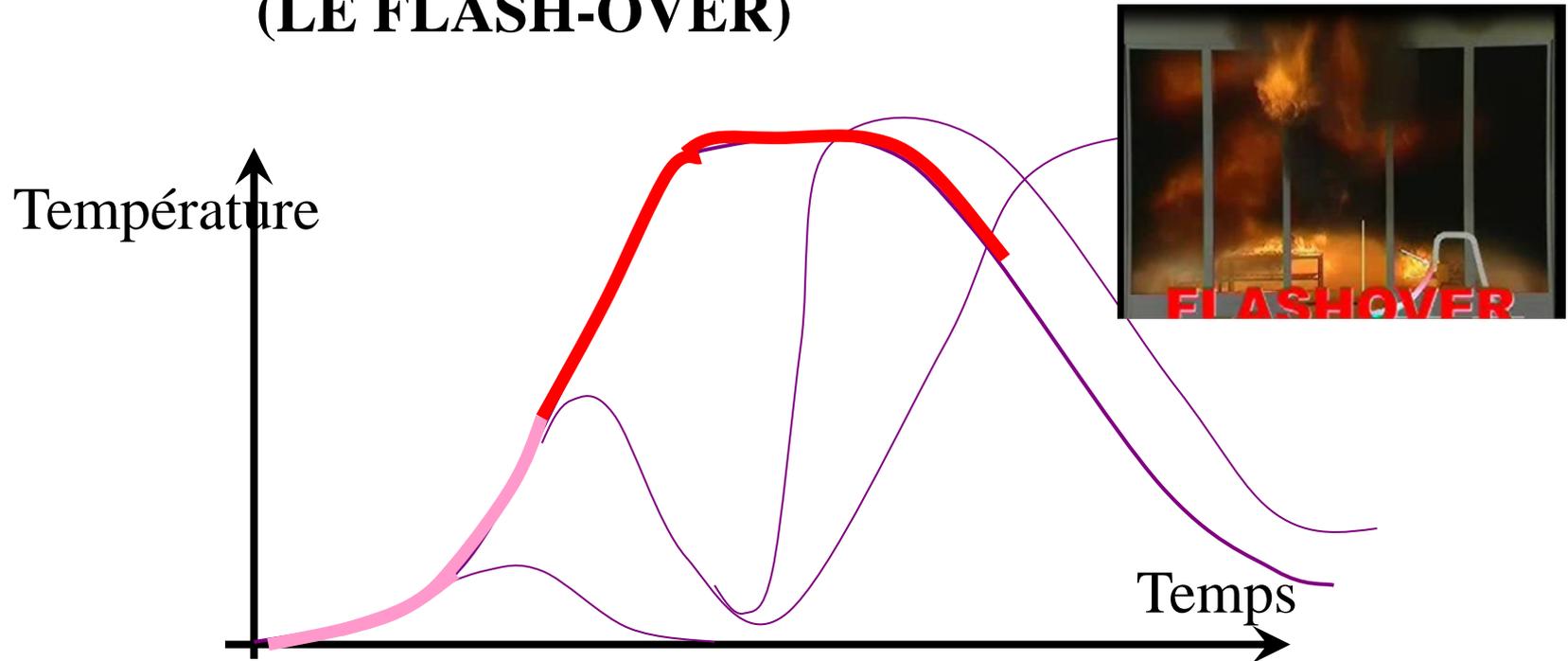
le déroulement d'un feu confiné: de l'ignition à l'embrasement généralisé



- 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)

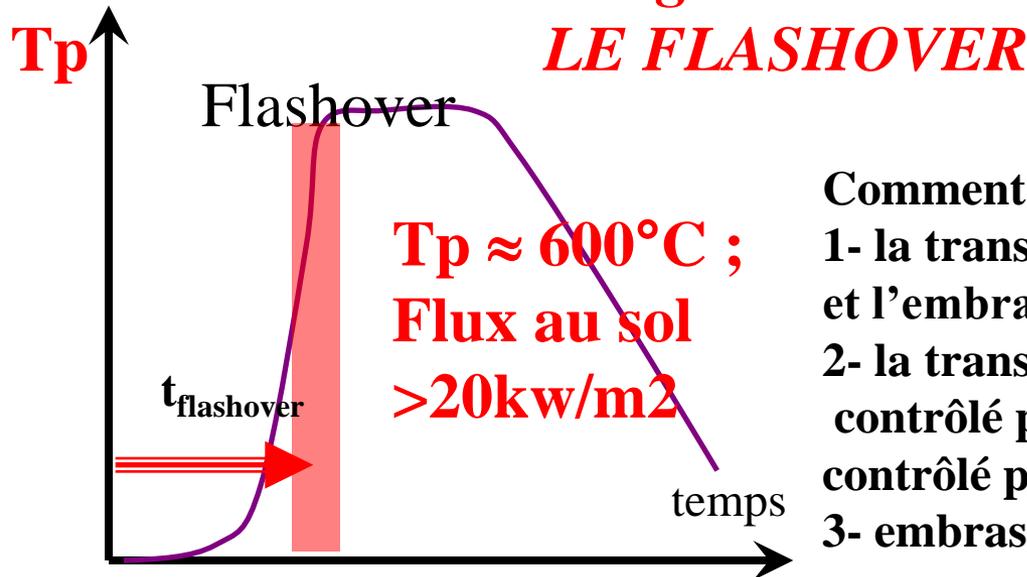


Lorsque l'apport en air frais est suffisant, l'incendie progresse jusqu'à une élévation importante de la température, $T_p = 500 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$, flux R_y au sol de l'ordre 20kw/m^2 .

Quelques notions sur le développement d'un incendie

si la puissance dégagée est suffisante

====> vers l'embraselement généralisé



Comment définir le flashover?

- 1- la transition entre un feu localisé et l'embraselement généralisé
- 2- la transition entre le régime de ventilation contrôlé par le fuel au régime de ventilation contrôlé par la ventilation
- 3- embraselement de la couche de fumée

$$Q_{FO} = 610 \cdot (h_k \cdot A_t \cdot A_w \cdot \sqrt{H})^{1/2}$$

Kawagoe, 1958

(Drysdale, avec des piles de bois
Et un critère de $\Delta T=500\text{K}$)

Q_{fo} : Débit calorifique (en kW) conduisant au flashover (critère $\Delta T=500\text{K}$) ;

A_w : Surface de l'ouverture (m²) ;

H : Hauteur de l'ouverture (m) ;

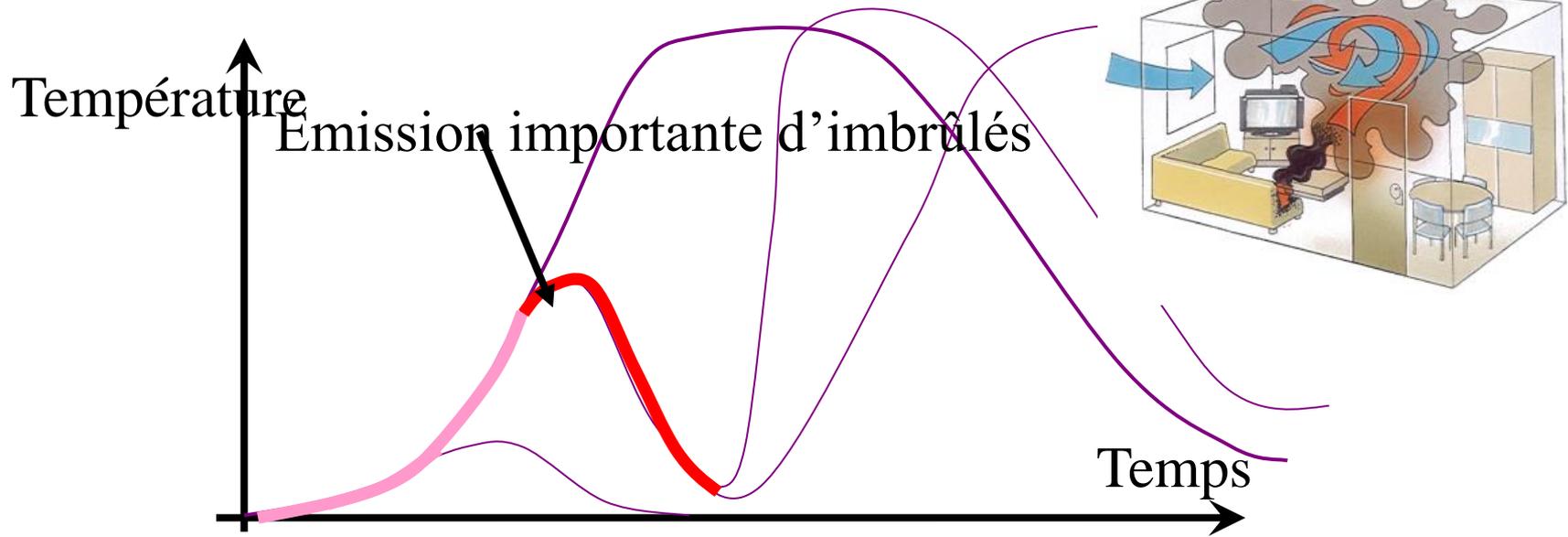
h_k : Coefficient effectif de perte de chaleur à travers les parois (kW/m².K) ;

A_t : Surface interne d'échange entre les parois et le compartiment (m²).

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.

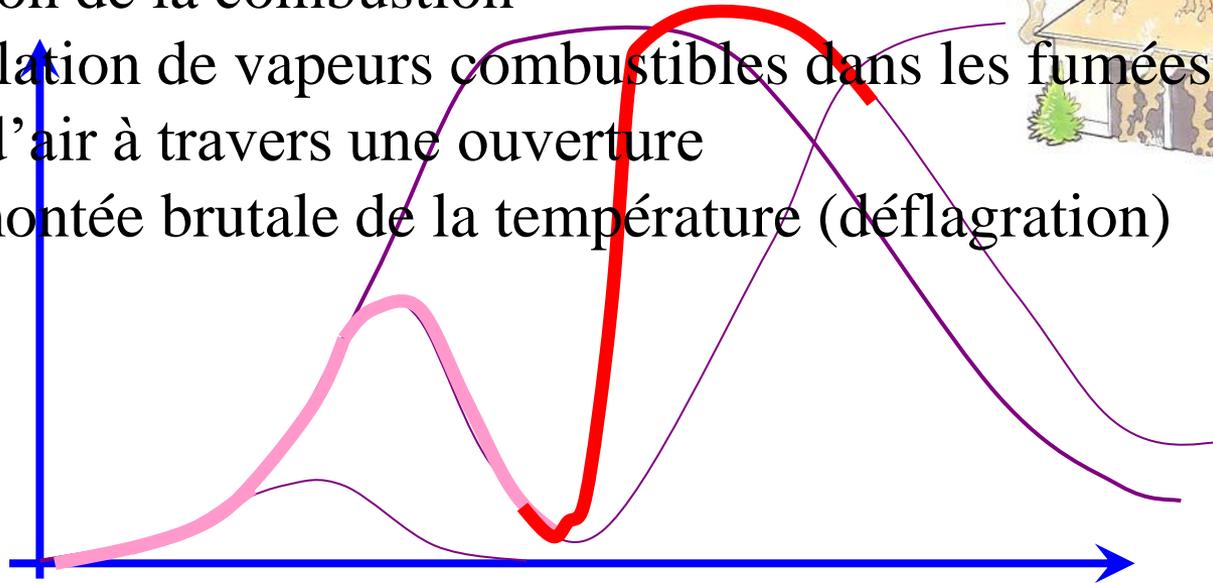
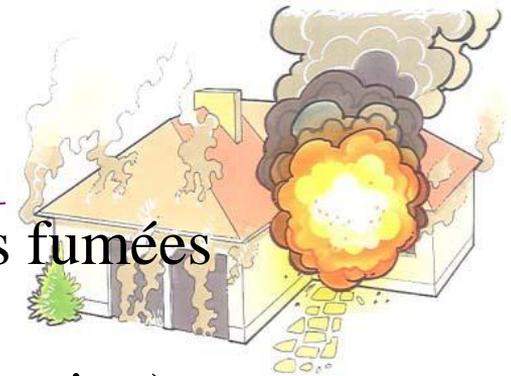
Quelques notions sur le développement d'un incendie

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)



Quelques notions sur le développement d'un incendie

Si la ventilation des foyers est insuffisante

le *backdraft* ou explosion de fumée

Re-inflammation des fumées

Conditions d'ignition du mélange air+fumée
==> Influence de la dilution N₂, CO₂ H₂O

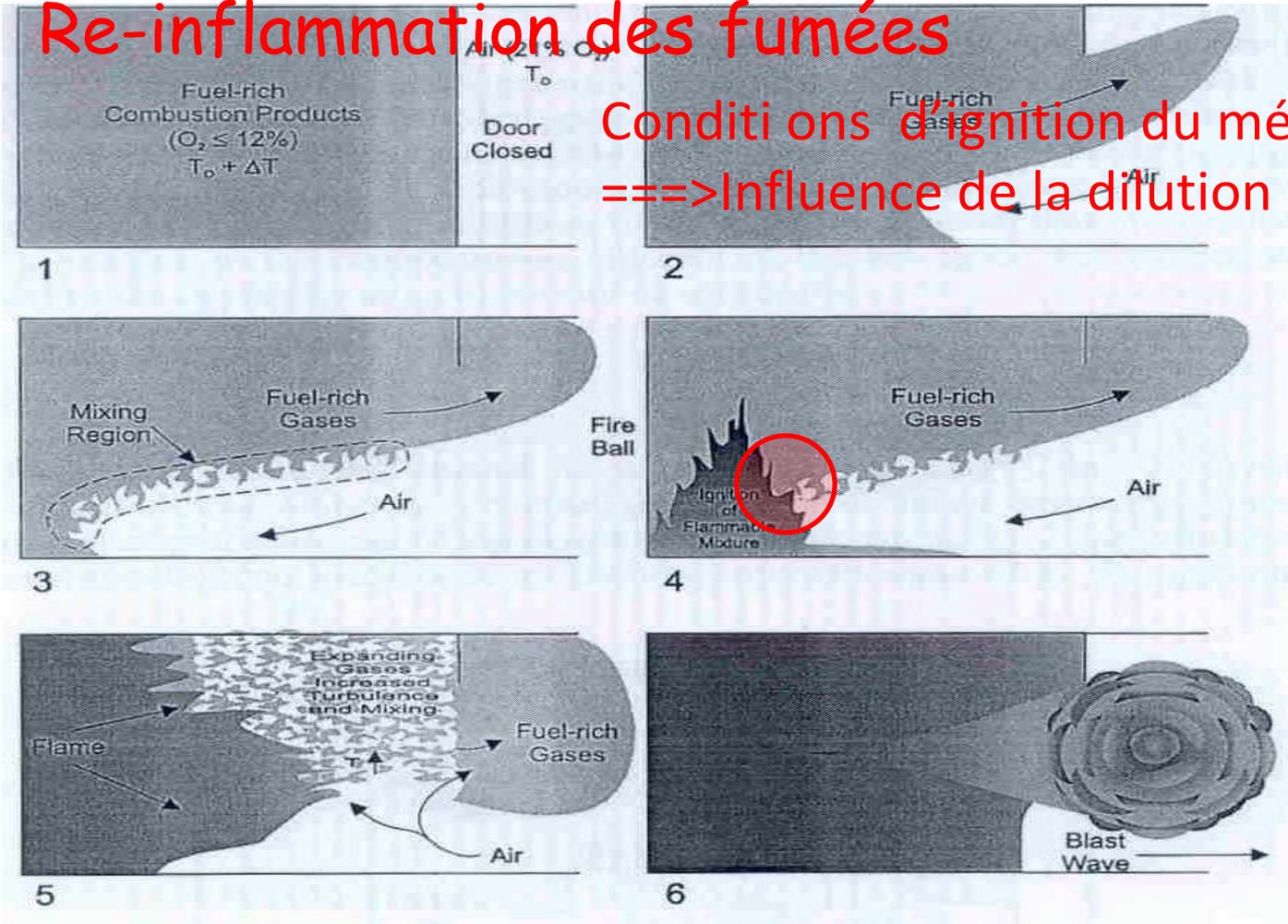
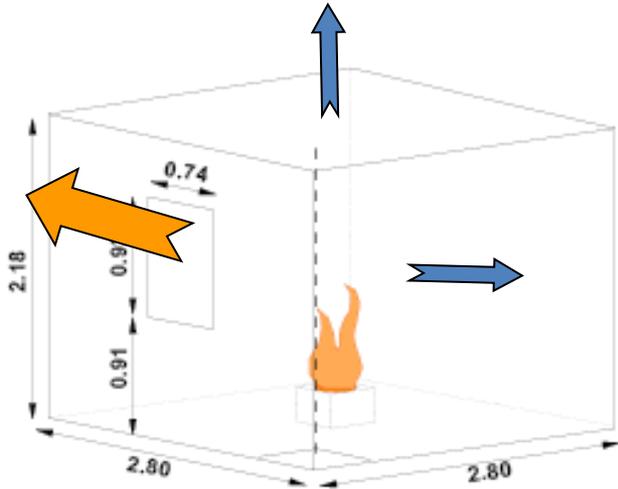


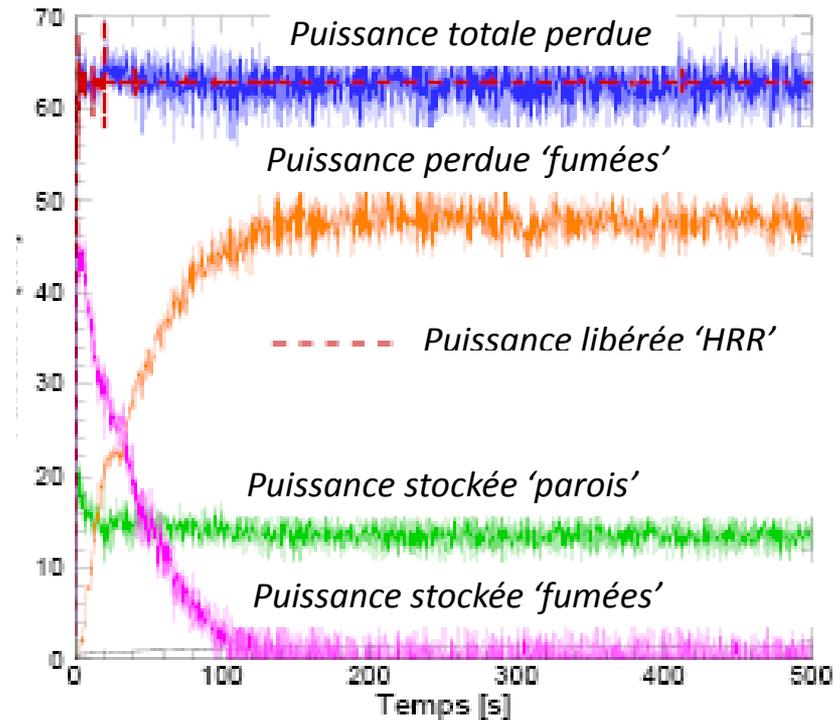
Figure 18 : Développement d'un backdraft (Gottuk, 1999).

Quelques notions sur le développement d'un incendie

Source: thèse S. Désanghère, 2006



dimensions en mètres.



Répartition des puissances au cours du temps

Ordre de grandeur

$HRR = \text{'stockée parois'} + \text{'perdue 'fumées'}$



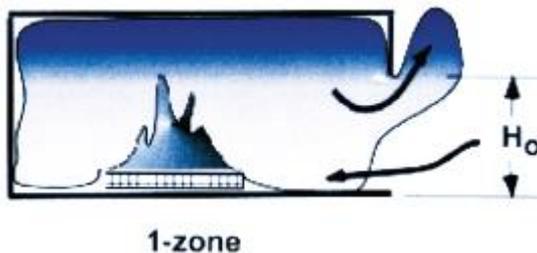
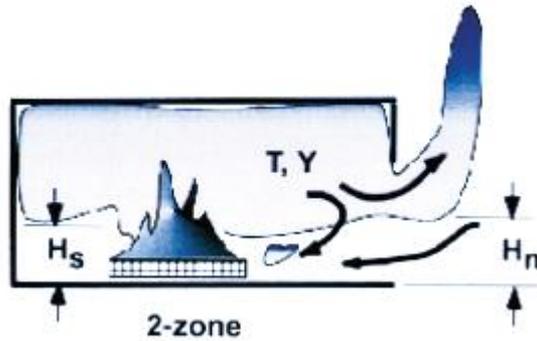
Plan de l'exposé

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

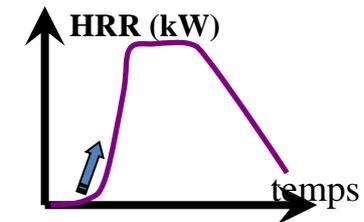
Equations simplifiées (approche par zones)

Les paramètres importants:

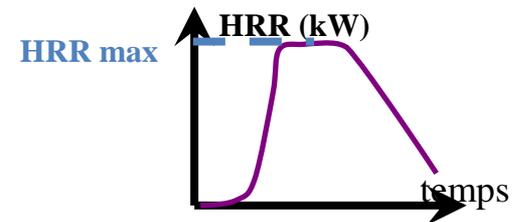
- Le dégagement de chaleur Q (=HRR)
- le débit d'air en entrée, ventilation naturelle ou forcée
- le débit des fumées
- Le débit de pyrolyse
- La température des fumées (résistance des structures)



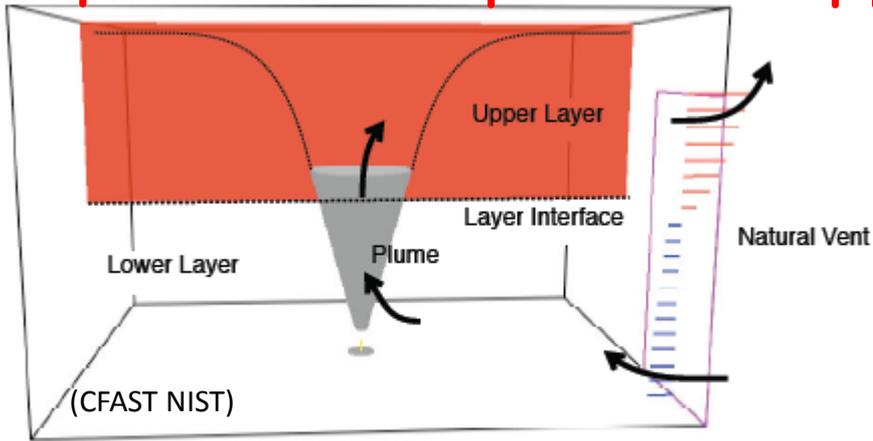
Au début du feu



Feu pleinement développé



Equations simplifiées: approche par deux zones



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

Principe: deux zones + zone de Flamme

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

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

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

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

Résultats typiques

Attention: le HRR est souvent prescrit

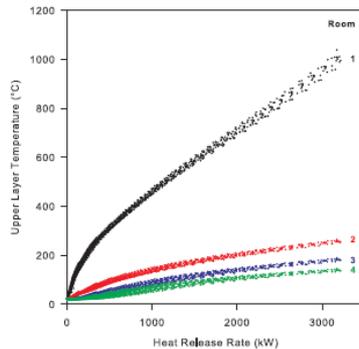


Figure 5.4: Comparison of the time dependent heat release rate and layer temperatures in several rooms for a four-room growing fire scenario.

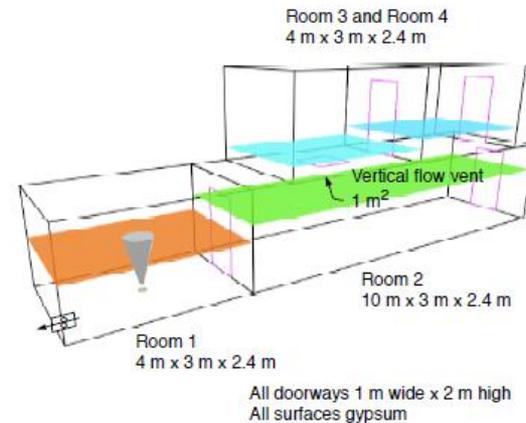
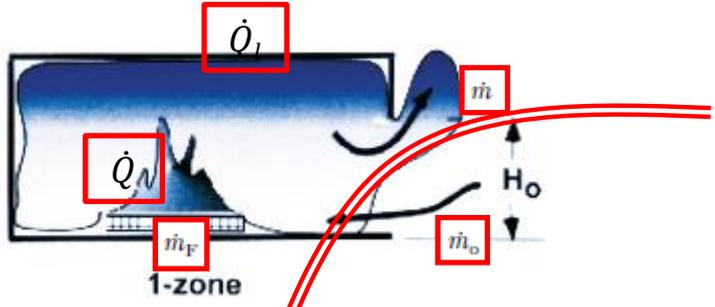


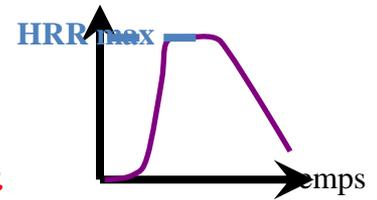
Figure 5.1: Building Geometry for base case scenario.



Equations simplifiées: Feu pleinement développé (une zone)



(Quintiere, 2002)



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

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

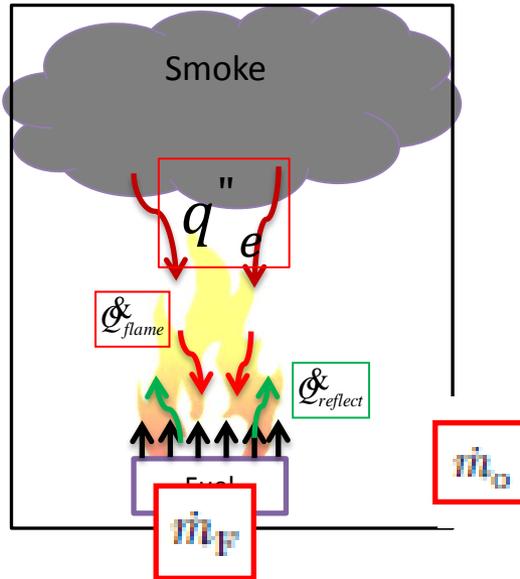
Δh_c = enthalpie de combustion / kg fuel

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

Equations simplifiées

La perte de masse

$$\dot{m}_F$$



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

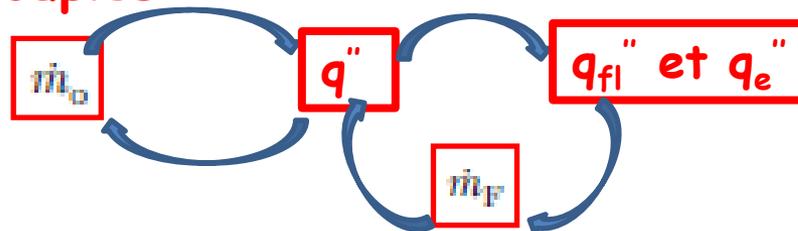
Effet du confinement

$$\dot{m}_F'' = \frac{q''}{L}$$

L: Chaleur de gazeification
L = L_v pour les liquides

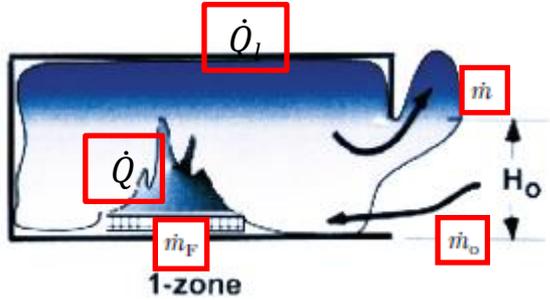
$$\dot{m}_F'' = \dot{m}_{F,free}'' f(Y_{O_2}) + F_{S+W \rightarrow F} \sigma (T^4 - T_0^4) / L$$

Mais q''_{fl} et q''_e dépendent aussi de la ventilation
==> phénomènes couplés





Equations simplifiées: 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)

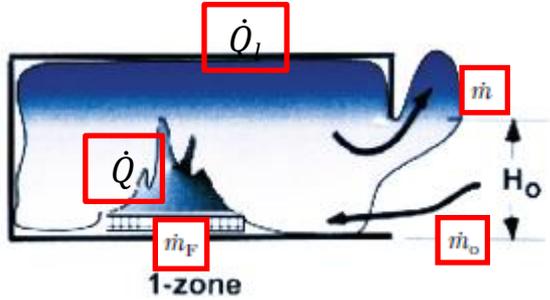
$$Q = \dot{m}_{F,b}'' A_F \Delta h_c$$

ou

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



Equations simplifiées: 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

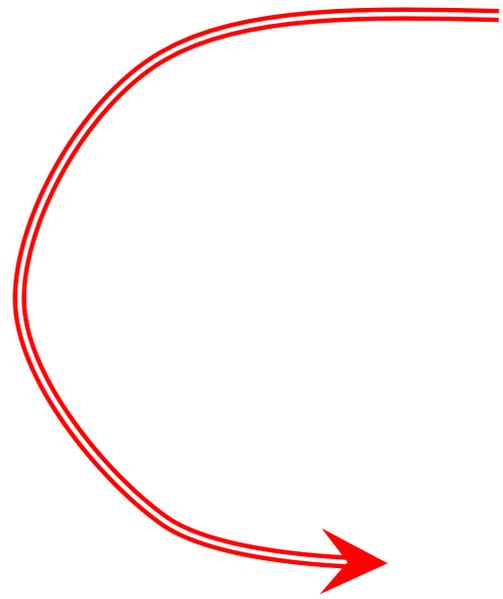
Combustion

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

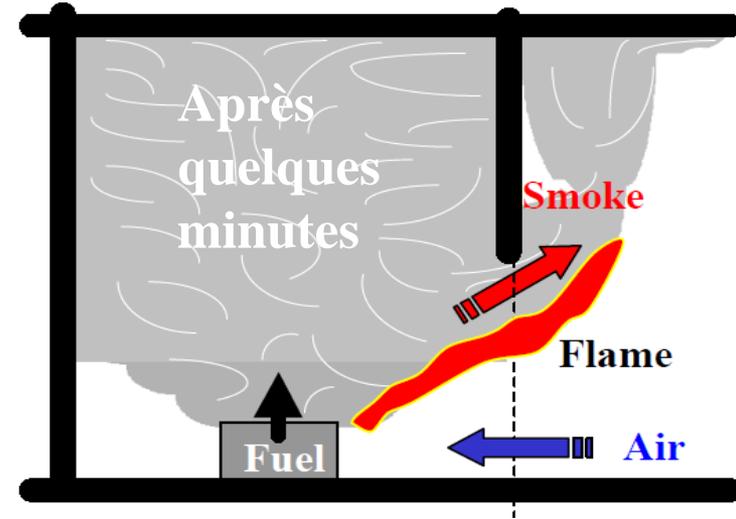
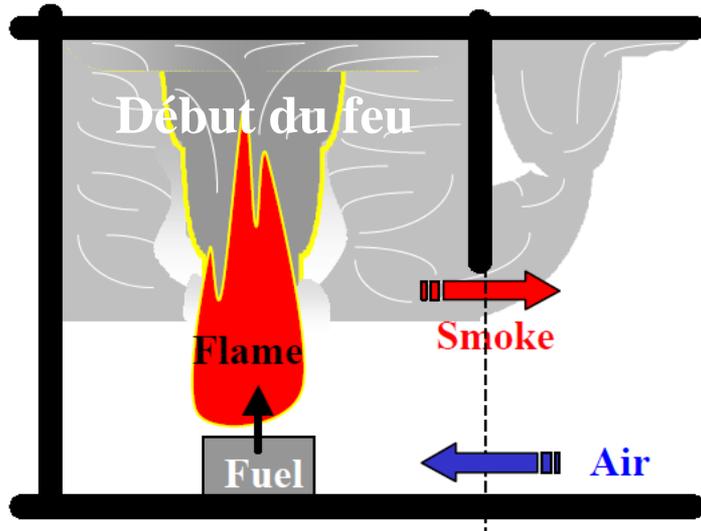


En réalité, \dot{m}_o et \dot{m}_F ne sont pas dans des proportions stochiometriques ==> Ventilation du foyer

Equations simplifiées: Feu pleinement développé

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

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

la puissance dégagée:

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

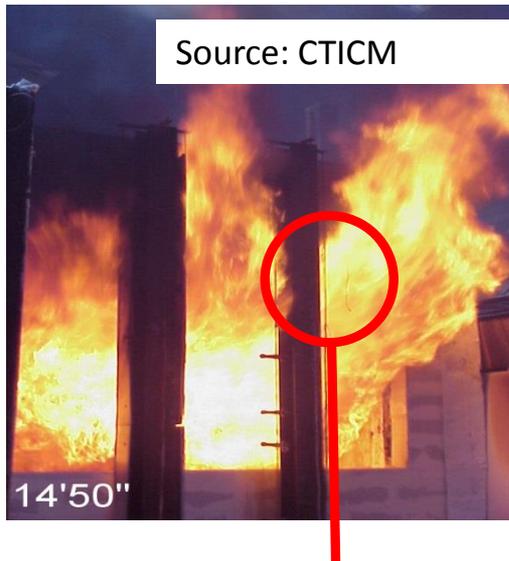
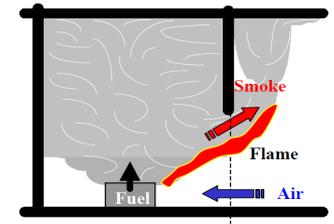
la puissance dégagée:

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

Equations simplifiées: Feu pleinement développé

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
- Sortie de flamme

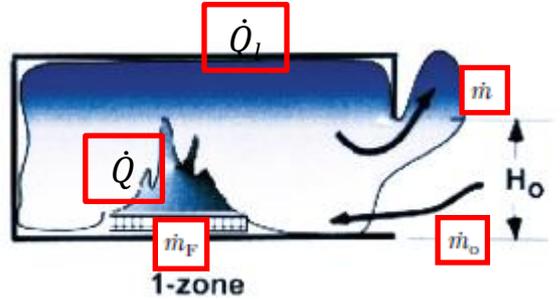


Feu généralisé avec sortie de flammes

Action de la flamme
Sur la résistance mécanique
de la structure



Equations simplifiées: Feu pleinement développé



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

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

====>

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

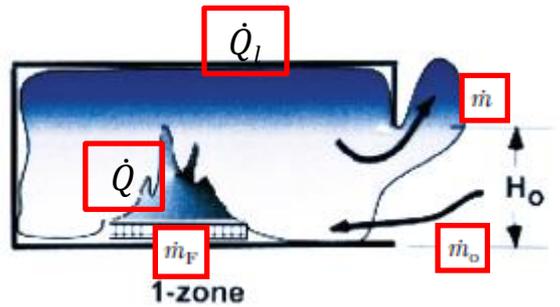
Y= 0 pour $\Phi > 1$

Summary box containing the simplified equations and their physical meanings, with the heat balance equation circled in red.

Systeme d'equations simples utiles pour comprendre les couplages entre les phenomenes mis en jeu



Equations simplifiées: Feu pleinement développé



$$\dot{Q} = \dot{Q}_l \quad \dot{Q} = \text{dég. chaleur}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

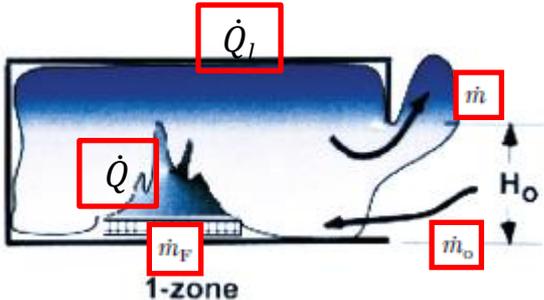
+ $\dot{Q}_{l,r}$ *pertes par ray. à travers les ouvertures*

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

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



Equations simplifiées: Feu pleinement développé



$$\dot{Q} = \dot{Q}_l \quad \dot{Q} = \text{dég. chaleur}$$

$$Q = \dot{m}_{F,b} A_F \Delta h_c \quad \dot{Q}_l = \text{pertes}$$

En résumé

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

$$\implies \dot{Q}_l / \dot{m}_0' c_p = (X_s + X_w + X_r) (T - T_0)$$

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

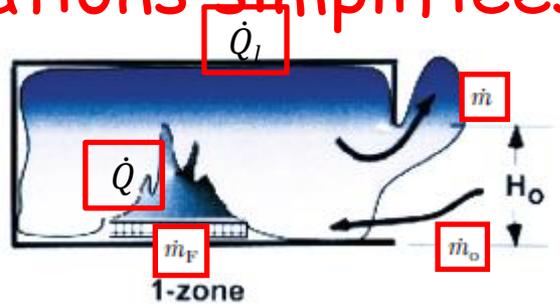
$$X_w = h A / \dot{m}_0 c_p$$

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

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



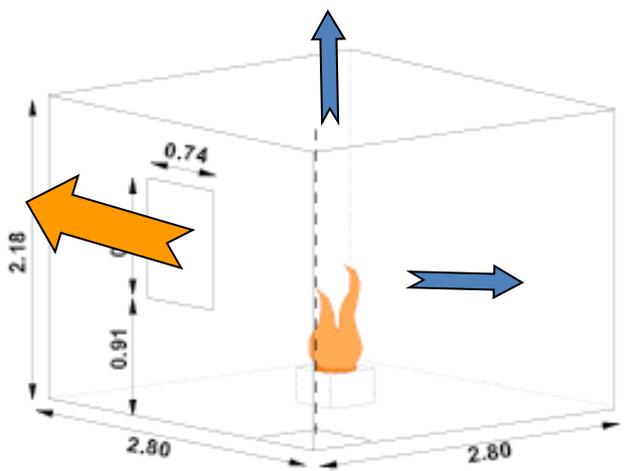
Equations simplifiées: Feu pleinement développé



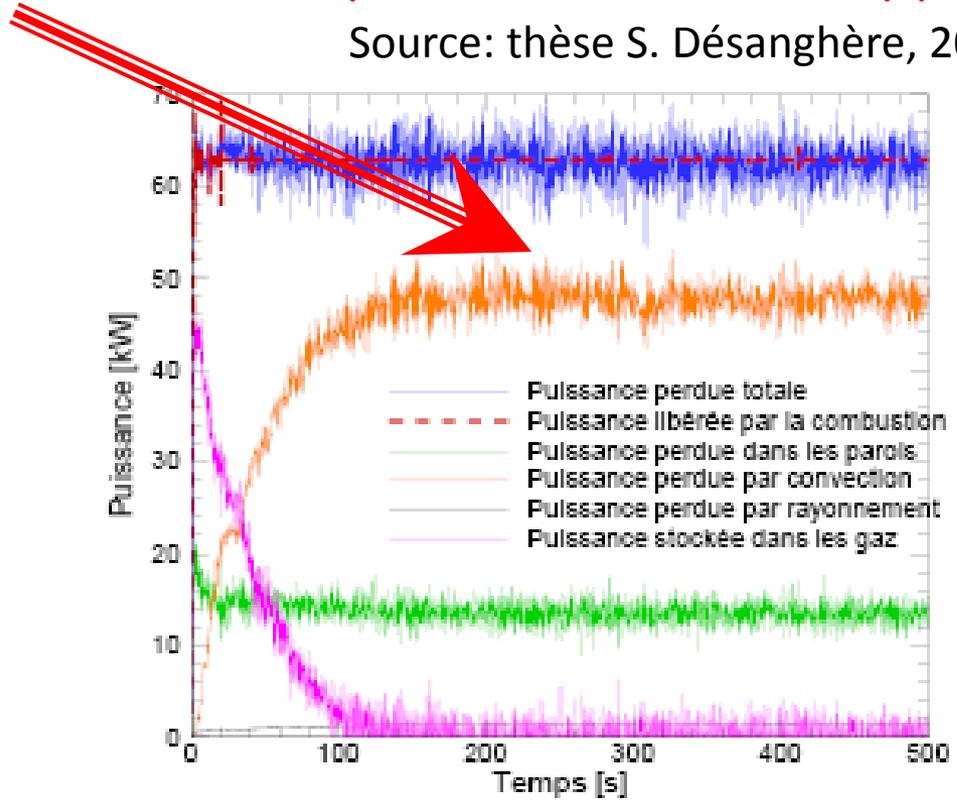
\dot{Q}_l = pertes \dot{Q} = dég. chaleur

$$\dot{Q}_l / \dot{m}_0 c_p = (X_s + X_w + X_r) (T - T_0): \text{Feu pleinement développé}$$

Source: thèse S. Désanghère, 2006



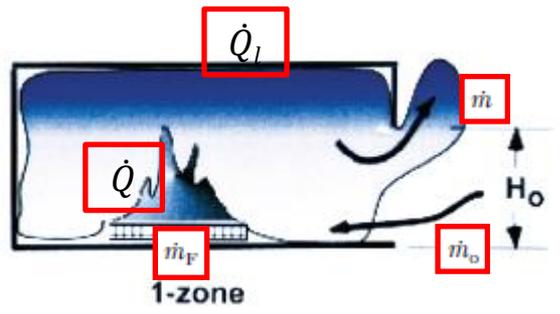
dimensions en mètres.



Répartition des puissances au cours du temps



Equations simplifiées: Feu pleinement développé



$$\dot{Q} = \dot{Q}_l \quad \dot{Q} = \text{dég. chaleur}$$

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

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

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

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

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

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

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

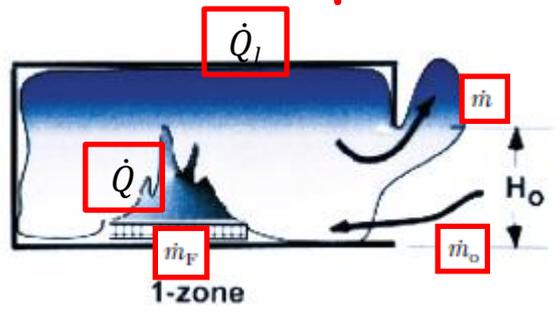
h = 10 W/m²

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: 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?

Température caractéristique de flashover: 500°C

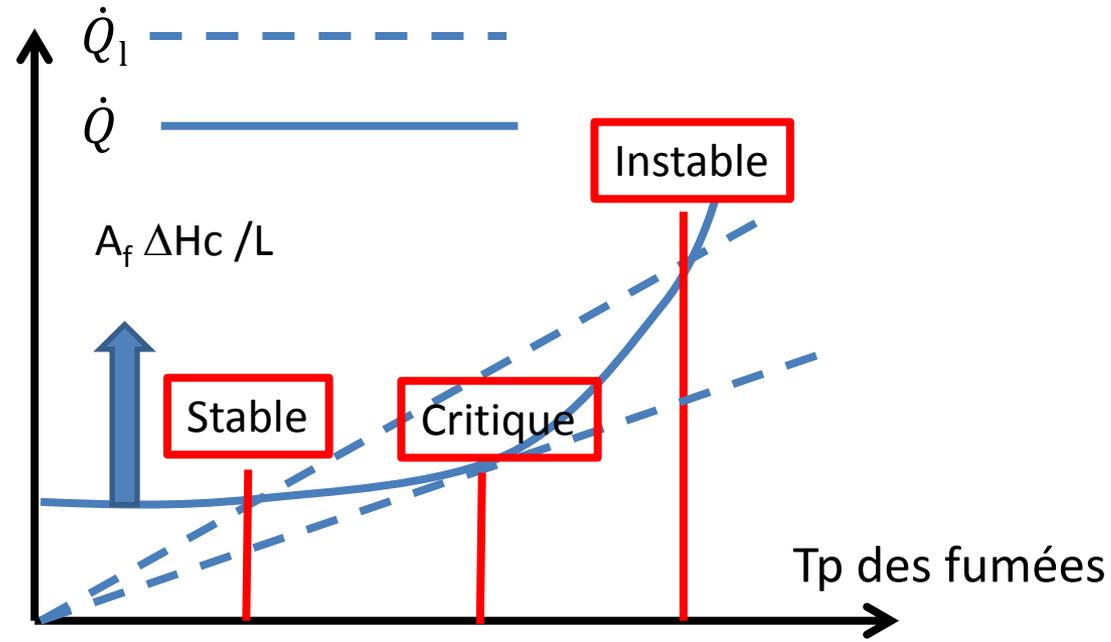


Diagramme de Semenov



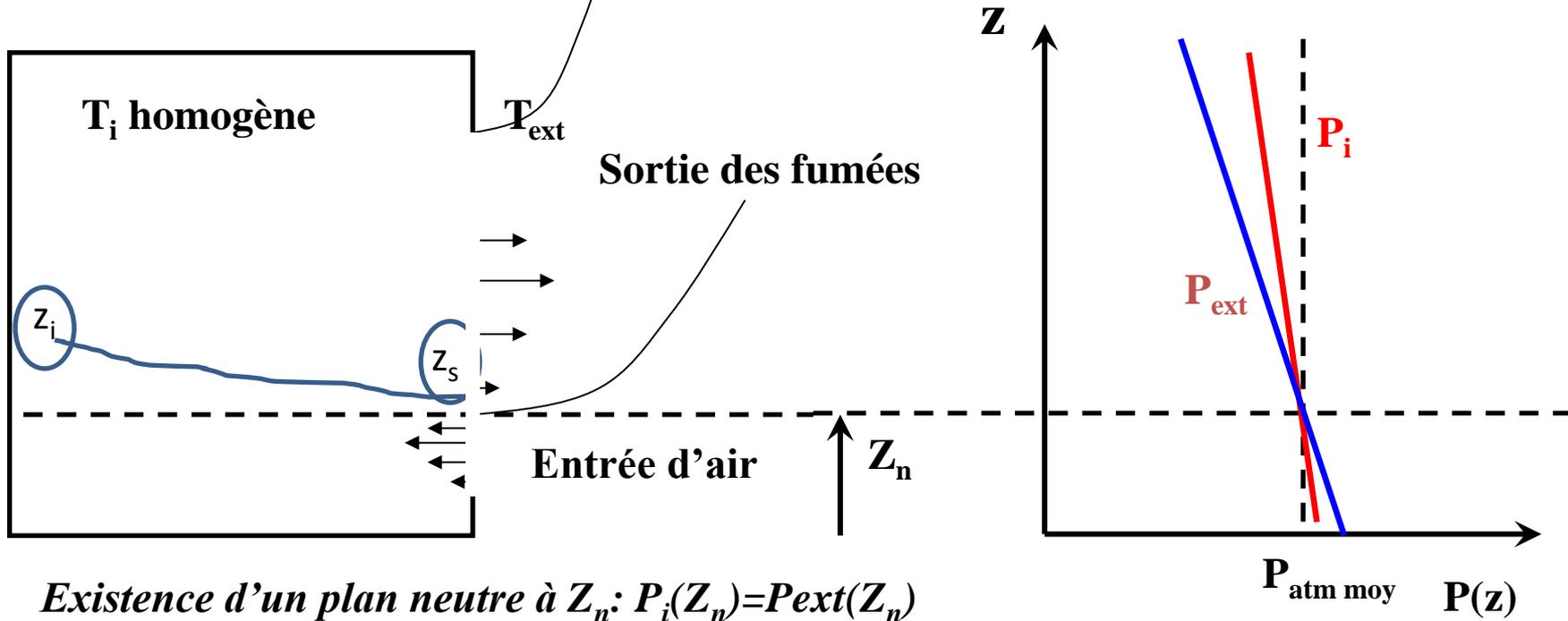
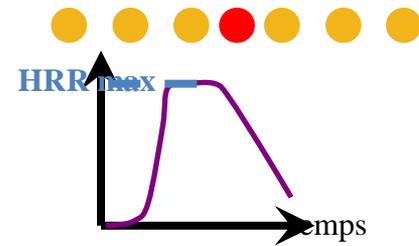
Plan de l'exposé

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

La ventilation naturelle des foyers

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:

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

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

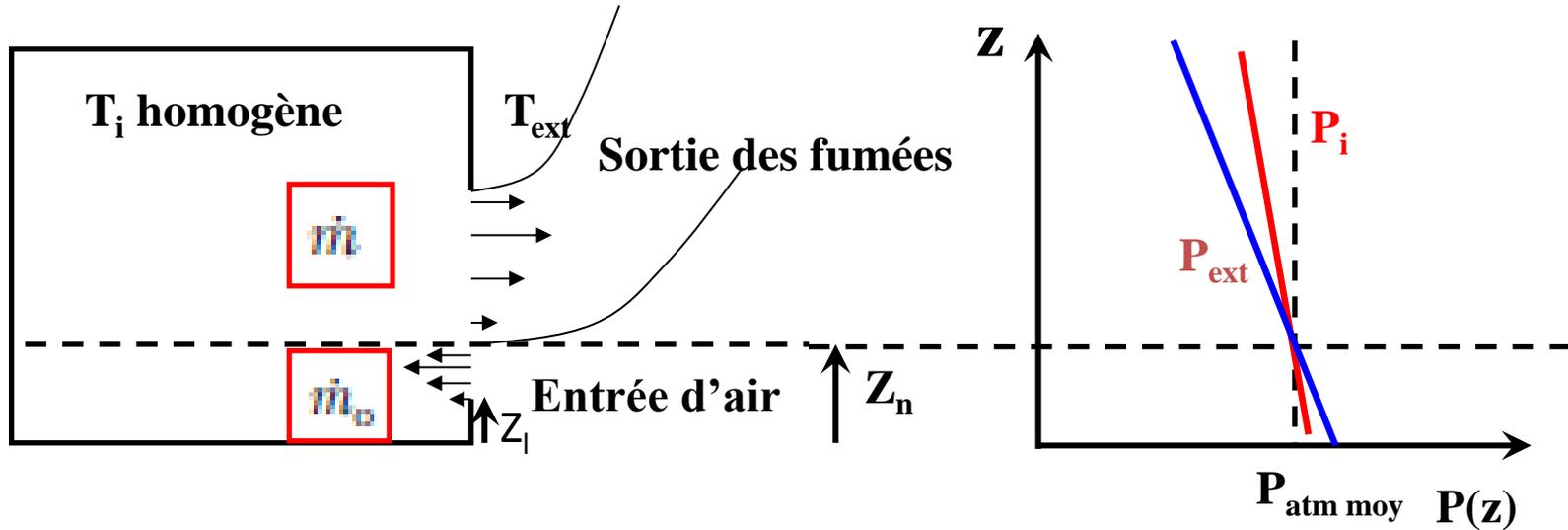
Mais $\rho_{ext} > \rho_i$

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

La ventilation naturelle des foyers



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



➤ en intégrant de z_1 à z_n $\dot{m}_0/L = C_d \rho_{ext} \sqrt{2g} \sqrt{1 - \frac{T_{ext}}{T_i}} \frac{2}{3} (z_n - z_1)^{3/2}$ Et aussi $\dot{m}/L = f[(z_u - z_n)^{3/2}]$

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

$$\dot{m}_0 = \frac{2}{3} C_d \rho_{ext} \sqrt{2g} \sqrt{1 - \frac{T_{ext}}{T_i}} \frac{A_0 \sqrt{H}}{\left[1 + \left(\frac{T_i}{T_{ext}}\right)^{\frac{1}{3}} \left(1 + \frac{\phi}{r}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{3/2}}$$

A_0 : surface de l'ouverture

H : hauteur

L : largeur

➤ Conclusion: avec les valeurs usuelles des paramètres

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

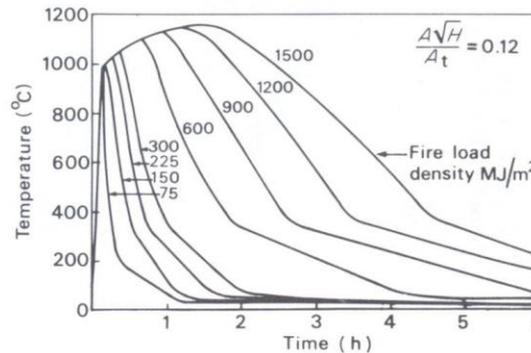
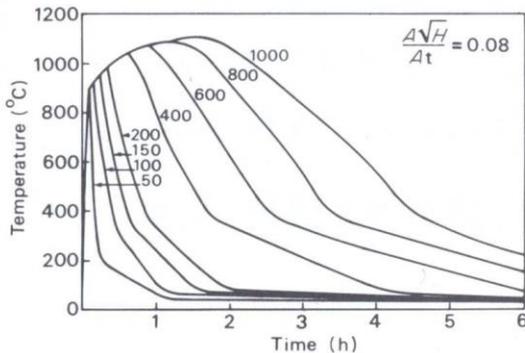
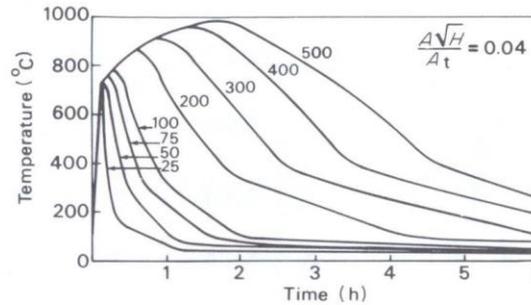
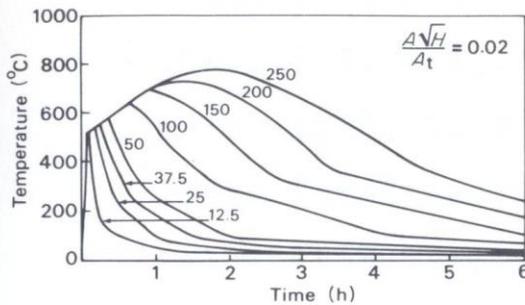
correctif de Délichatsios

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

La ventilation naturelle des foyers

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/m²) and opening factors, $A_w H^{1/2}/A_t$ (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, $\rho_c = 1700$ kJ/m³.K)

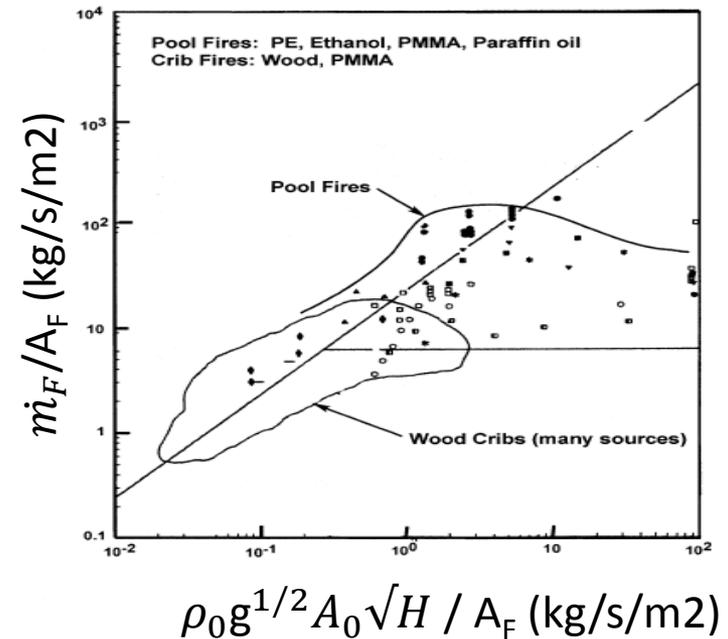
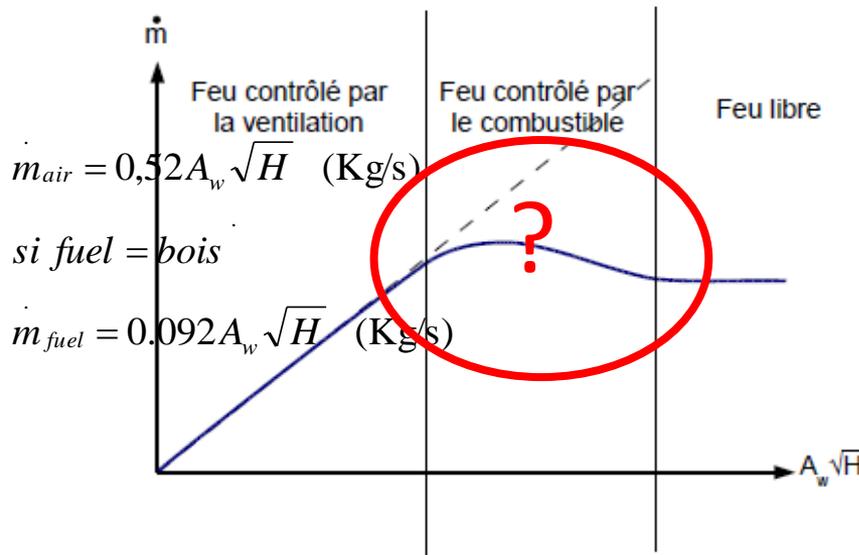
La ventilation naturelle des foyers



➤ *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



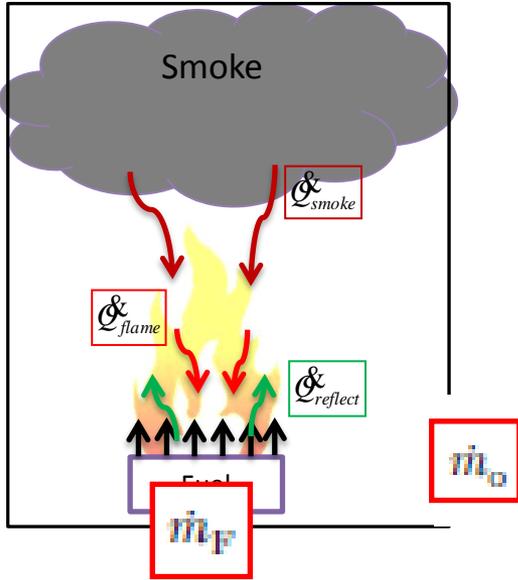
Bullen & Thomas

Proc Comb. Inst 1978

La ventilation naturelle des foyers



➤ *perte de masse*

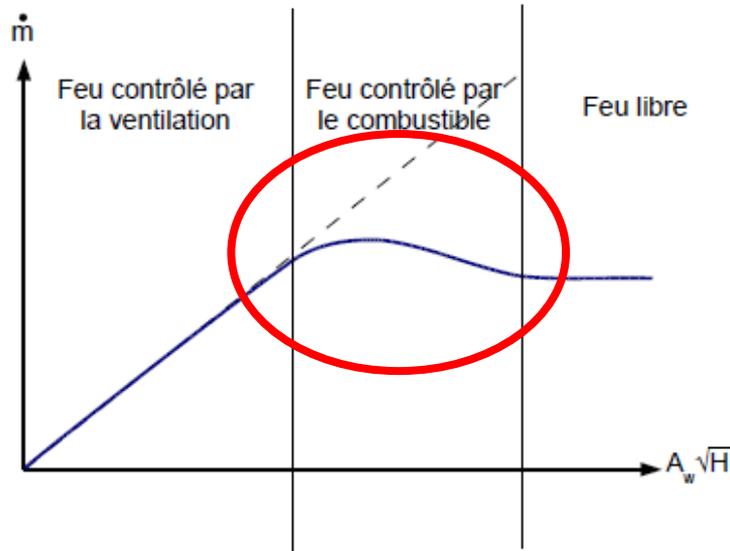


$$\dot{q}'' = \dot{q}_{fl,c}'' + \dot{q}_{fl,r}'' + \dot{q}_e'' - \epsilon \sigma T_s^4 - \dot{q}_{ext,c}''$$

Effet du confinement

$$\dot{m}_F'' = \frac{\dot{q}''}{L}$$

$$\dot{m}_F'' = \dot{m}_{F,free}'' f(Y_{O_2}) + F_{S+W \rightarrow F} \sigma (T^4 - T_0^4) / L$$

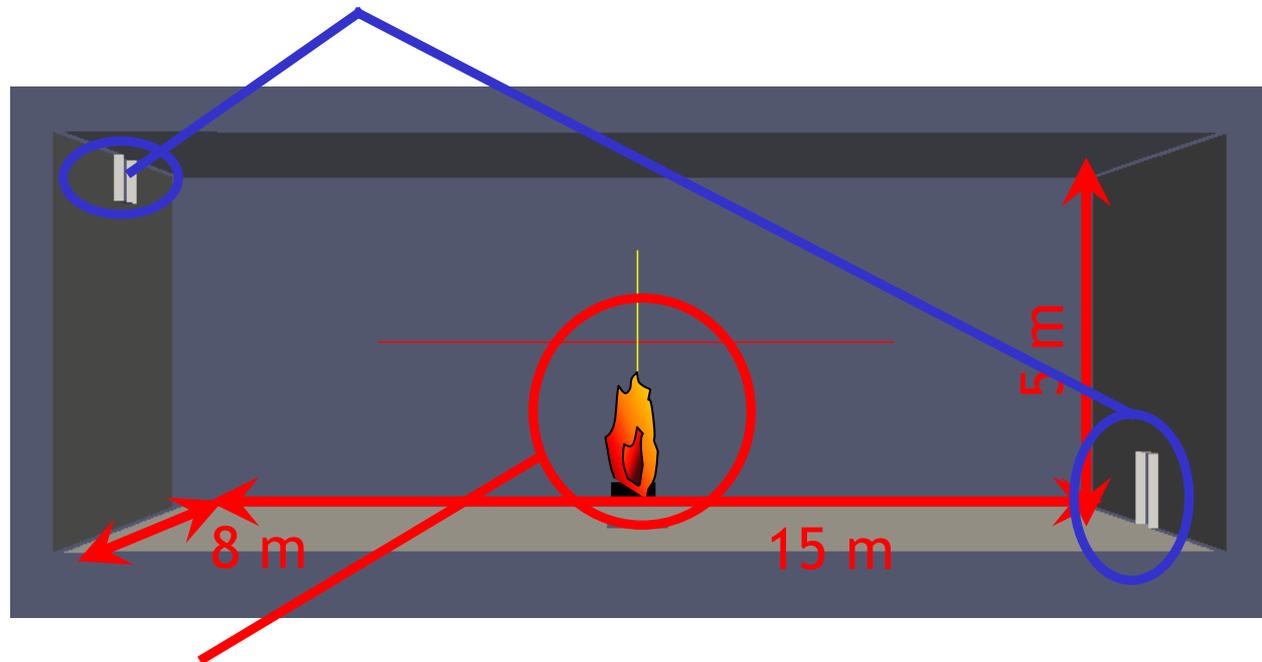


La ventilation naturelle des foyers



Modelisation plus fine: utilisation de openFoam/fireFoam

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

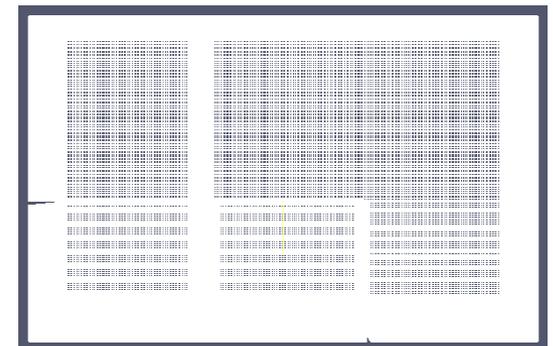
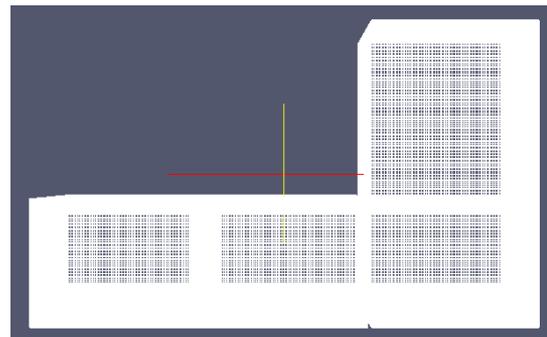
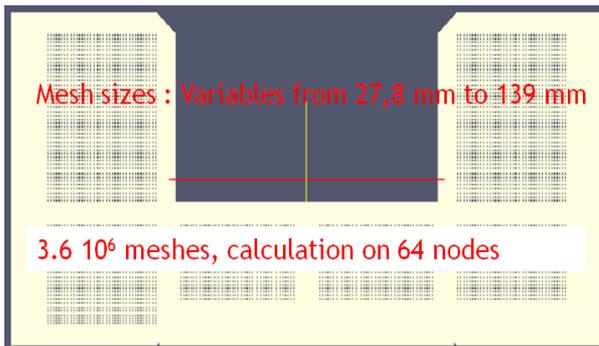
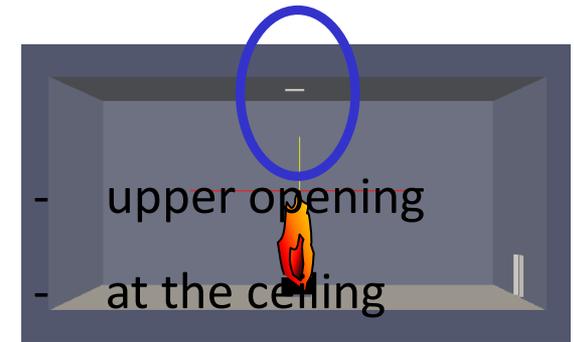
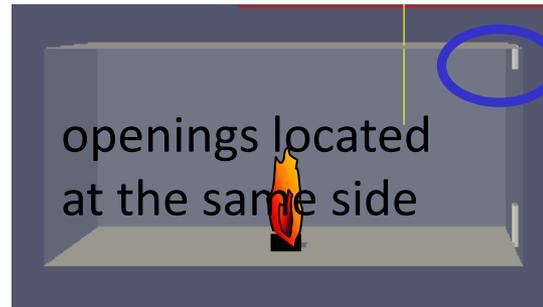
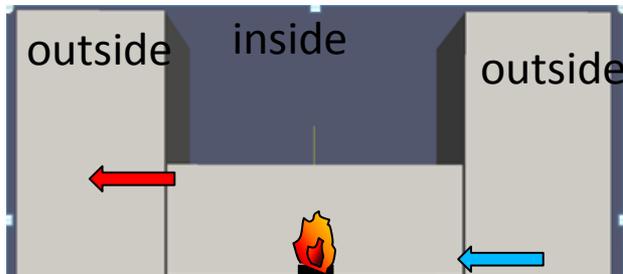
HHR = 188 t² ---> **HRR= 2,7 Mw** at t=120s (NFPA: very fast)

Feux avec ventilation naturelle



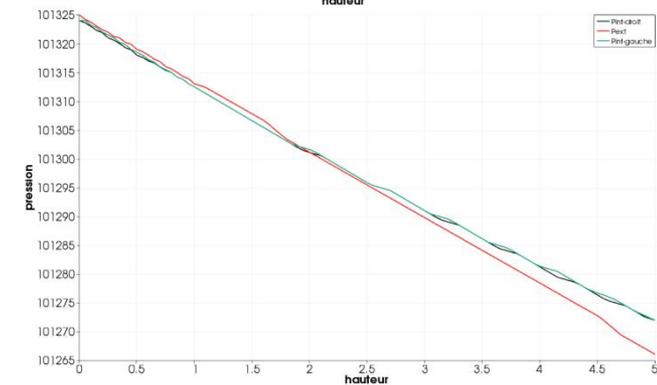
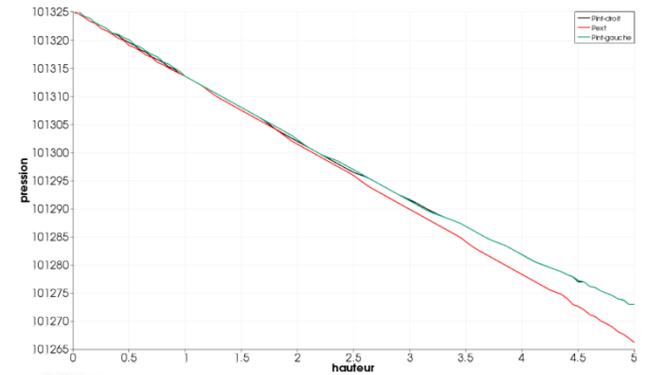
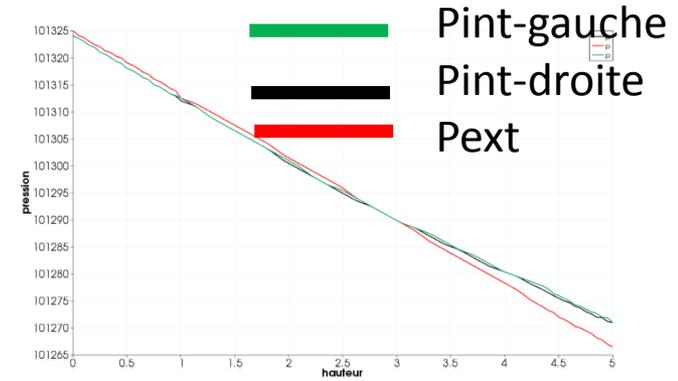
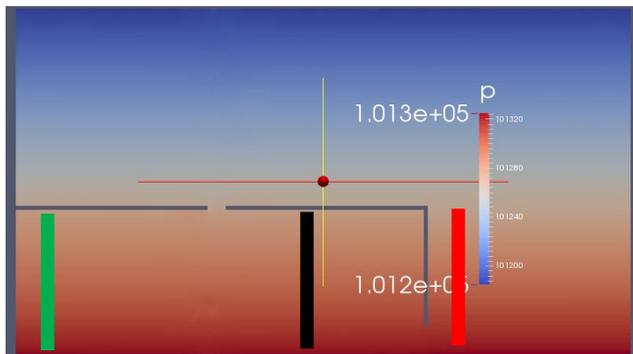
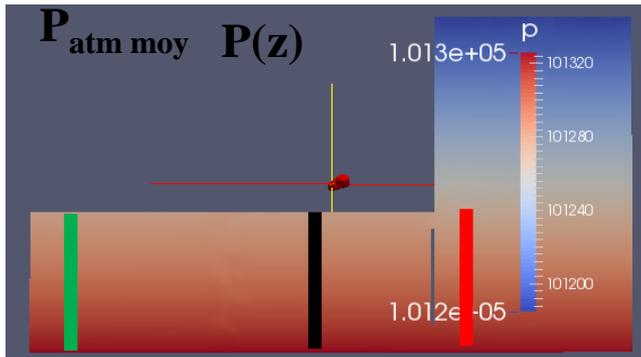
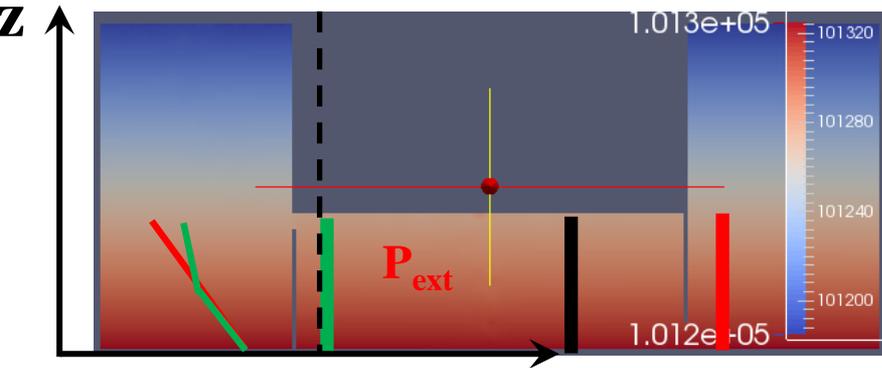
Modelisation plus fine: utilisation de openFoam/fireFoam

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



Feu avec ventilation naturelle: modelisation fireFoam

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

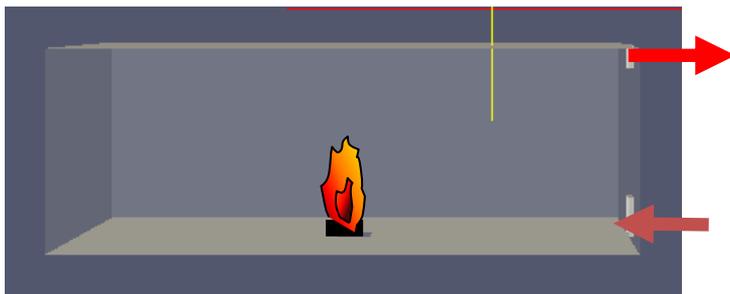
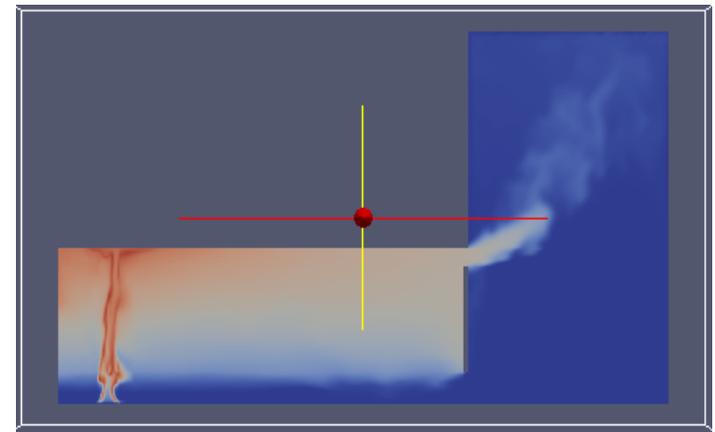
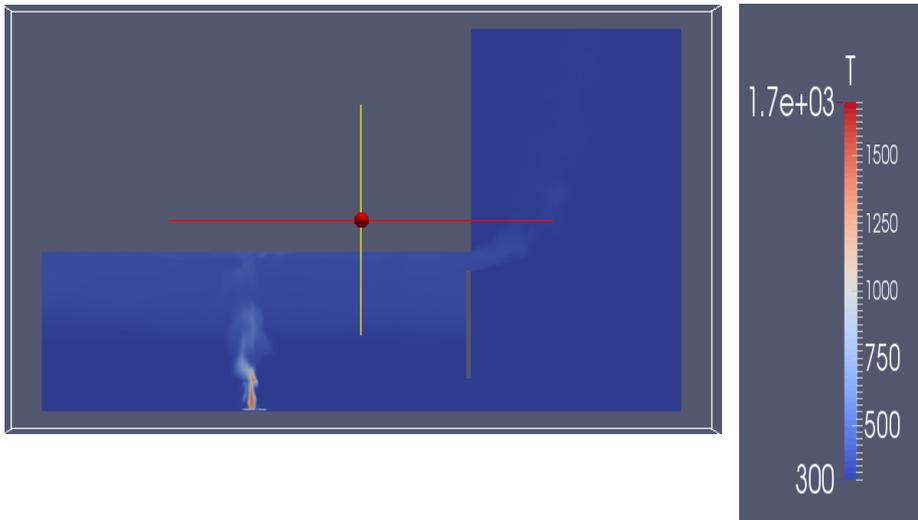




Feu avec ventilation naturelle: modelisation fireFoam

Une autre comparaison: ouvertures du même coté

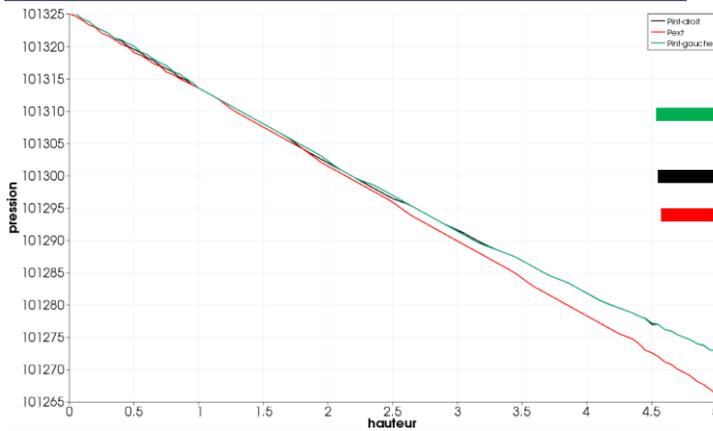
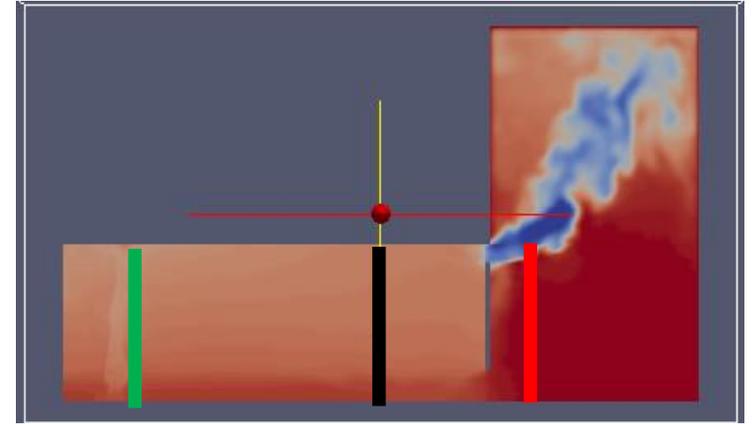
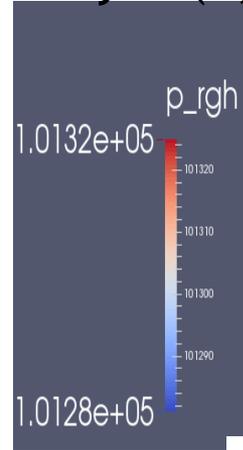
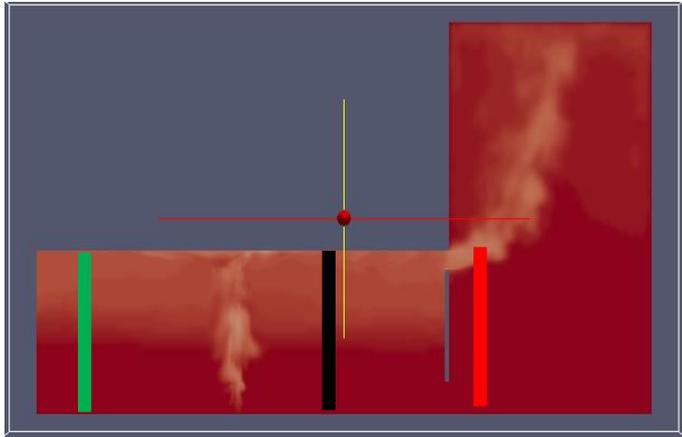
Mais le foyer (2,7 MW) pas au même endroit



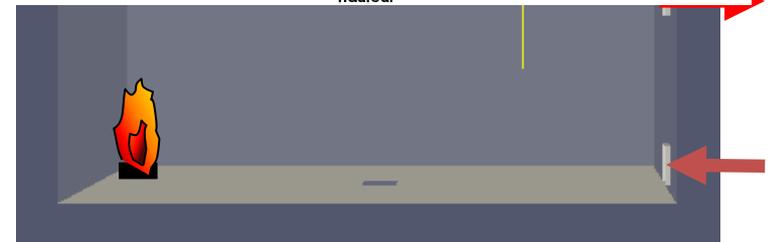
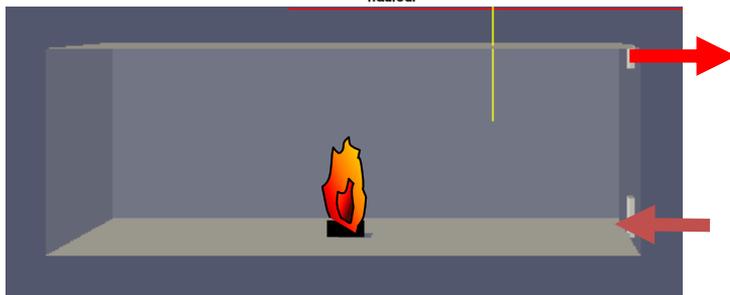
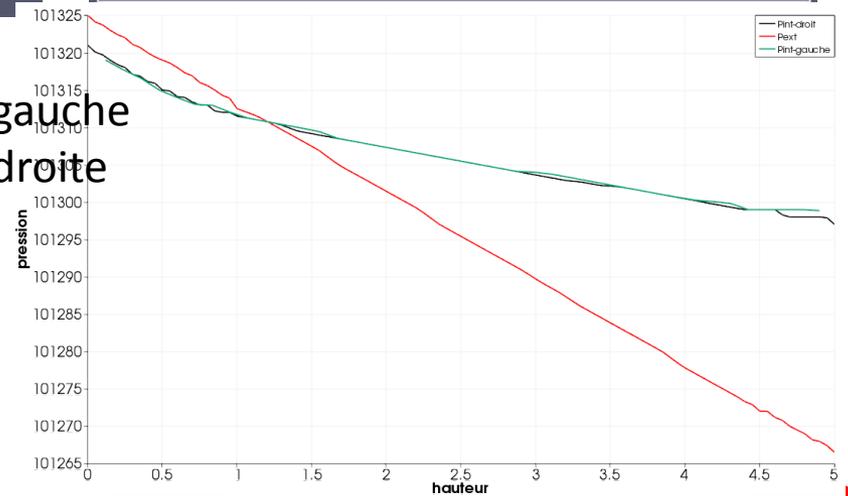
Feu avec ventilation naturelle: modelisation fireFoam

Une autre comparaison: ouvertures du même coté

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



Pint-gauche
Pint-droit
Pext

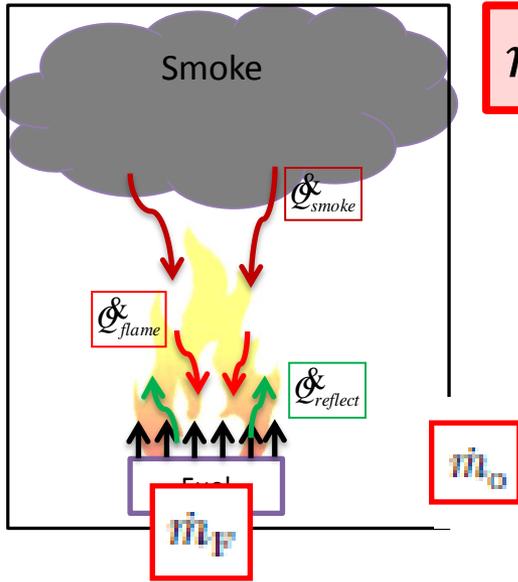




Plan de l'exposé

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

Comportement des feux et des flammes sous-ventilés



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

Si $O_2 \searrow$ fortement:

perte de masse et combustion ?
Extinction systématique ?

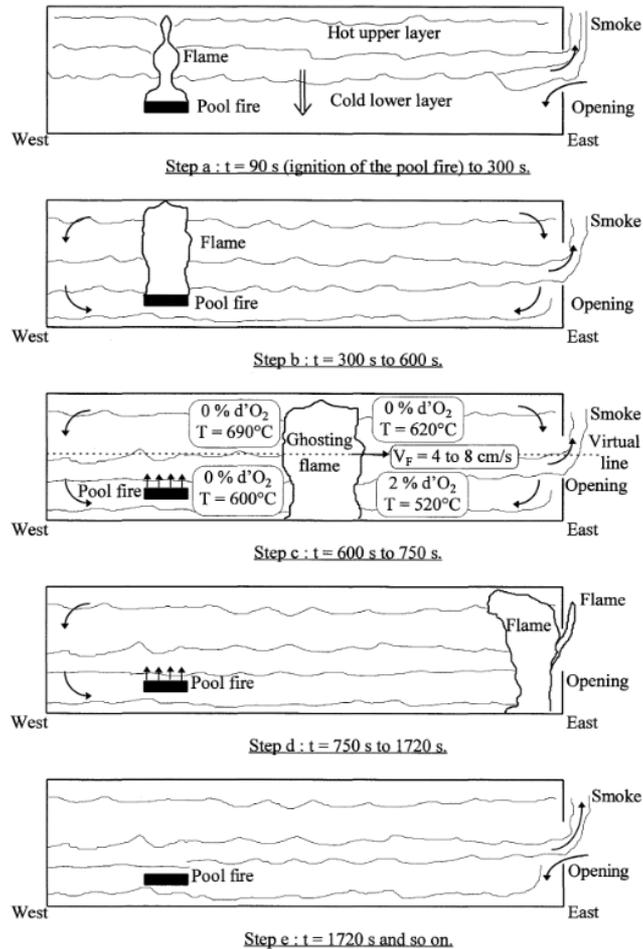
Réponse: avant extinction

- Baisse de la perte de masse et du dégagement de chaleur
- **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)

Comportement des feux et des flammes sous-ventilés

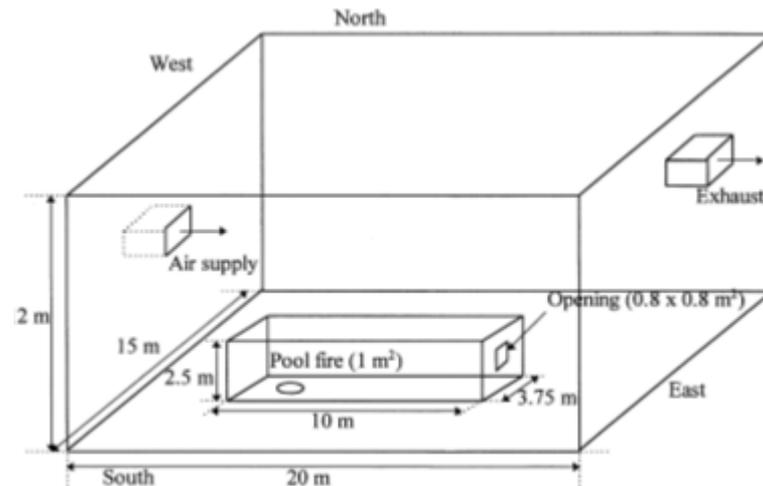
CONDITIONS PARTICULIÈRES GÉOMÉTRIQUES ET DE SOUS-VENTILATION

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



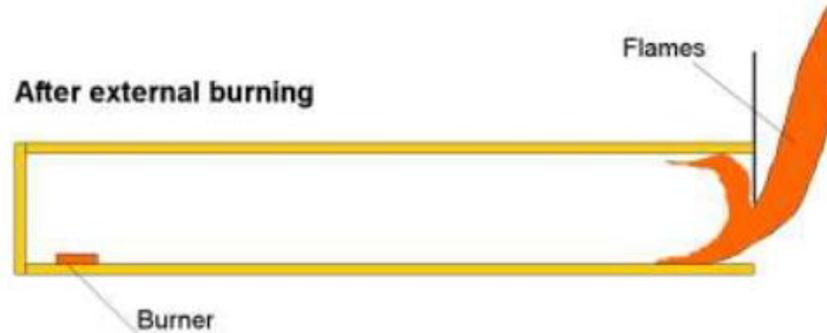
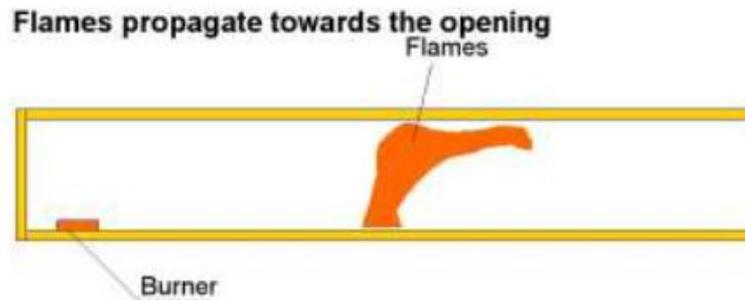
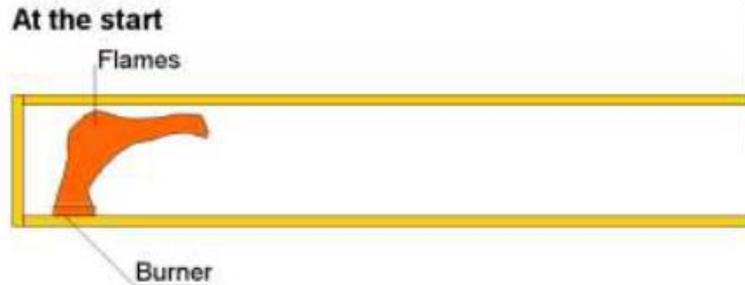
GHOSTING FLAMES

TBP/TPH pool fire



Comportement des feux et des flammes sous-ventilés

CONDITIONS PARTICULIÈRES GÉOMÉTRIQUES ET DE SOUS-VENTILATION



GHOSTING FLAMES

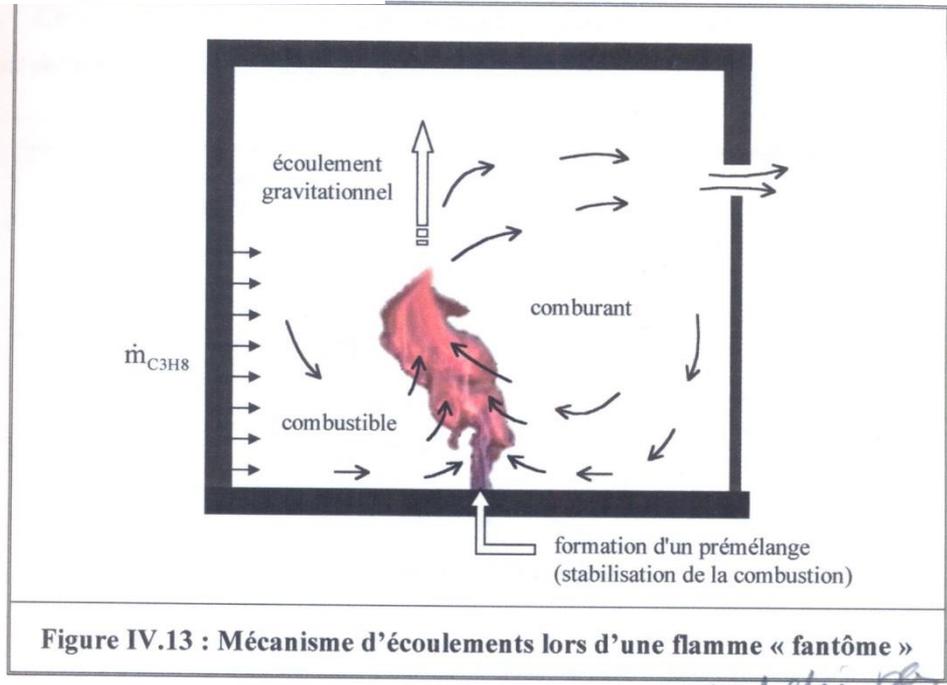
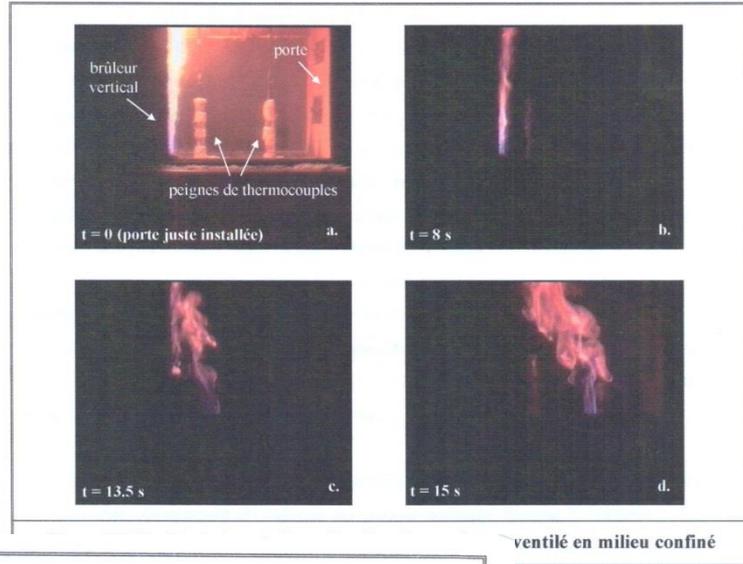
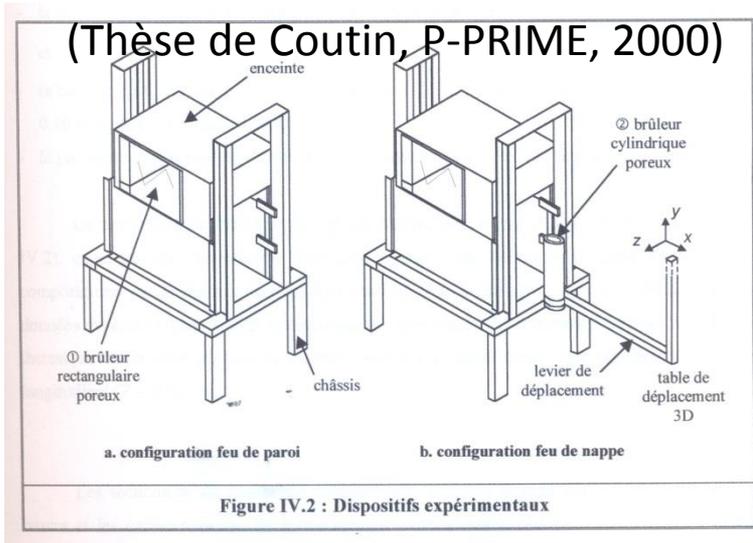


ATTENTION:
bruleur propane
==> forçage du MLR
pas de feedback



Production of smoke and carbon monoxide in underventilated enclosure fires.
PhD S Ukleja 2012

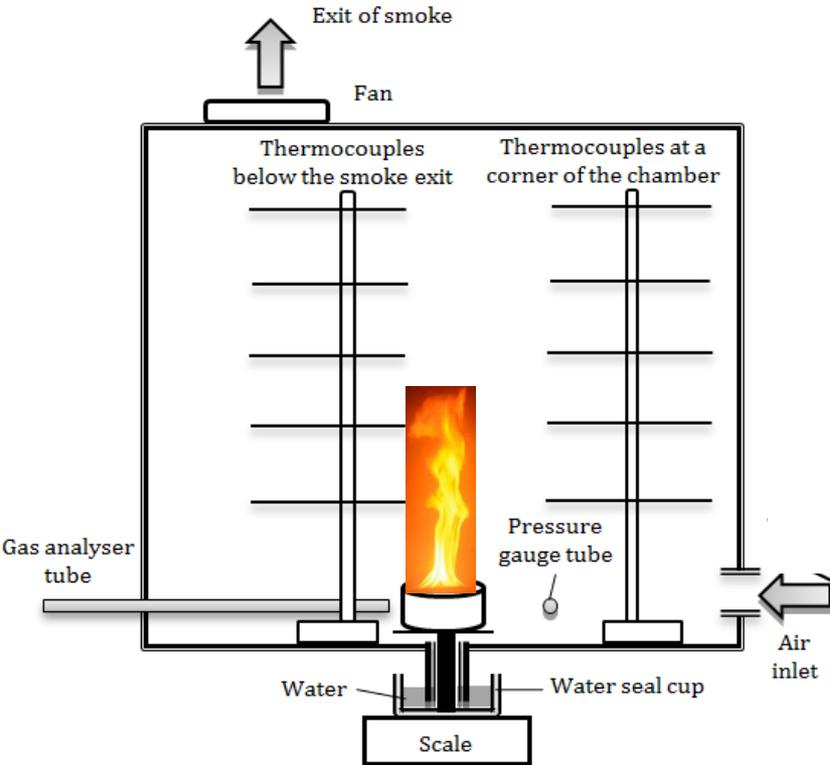
Comportement des feux et des flammes sous-ventilés



Comportement des feux et des flammes sous-ventilés

Ce phénomène s'observe aussi avec une enceinte mécaniquement ventilée

Dispositif du CORIA

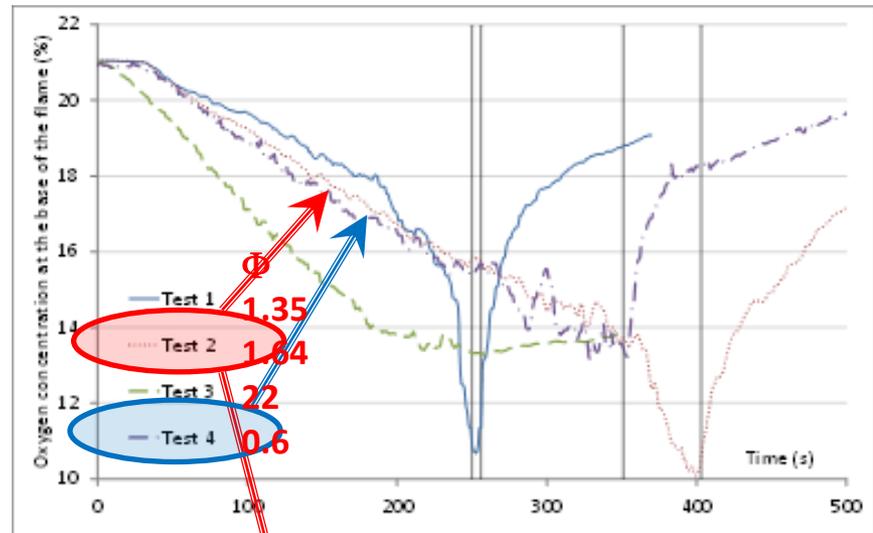


Combustible : n-Heptane
2 bac pyrex de 11cm de diamètre

Coppalle, AOSFST 2015

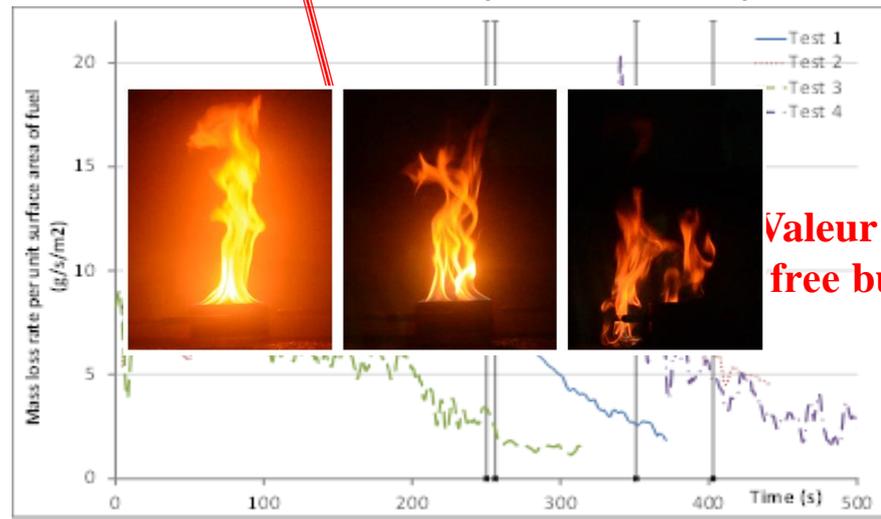
Video:D-flammeFantome-Test2

Video-Essai4



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

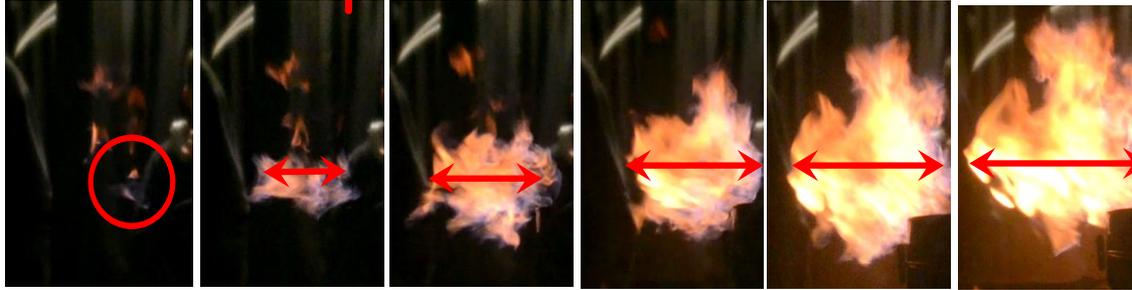
Les barres verticales indiquent les temps d'extinction



Valeur
free burning'

Comportement des feux et des flammes sous-ventilés

Phénomène de pulsation



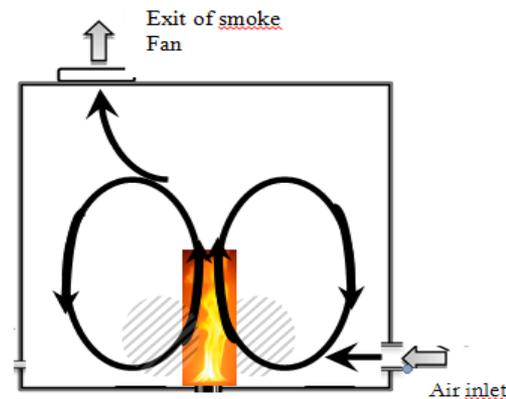
*Temps
entre deux
images:
33 ms*

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

(Video test 3 extinction)

En faisant référence au bilan de la flamme : $dT/dt \sim Q - Q_l$

====>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 (N₂, CO₂, ...)
ou apportés par un gaz ayant un Cp important

- aux effets chimiques inhibants de certaines molécules

Critères d'extinction:

- XO₂ au pied de la flamme limite ?

Heptane et dodecane: Extinction souvent observée si au pied de la flamme XO₂ <12-14 %

Critère global, pas explicatif

- Tp 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 Ry ?



Plan de l'exposé

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



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

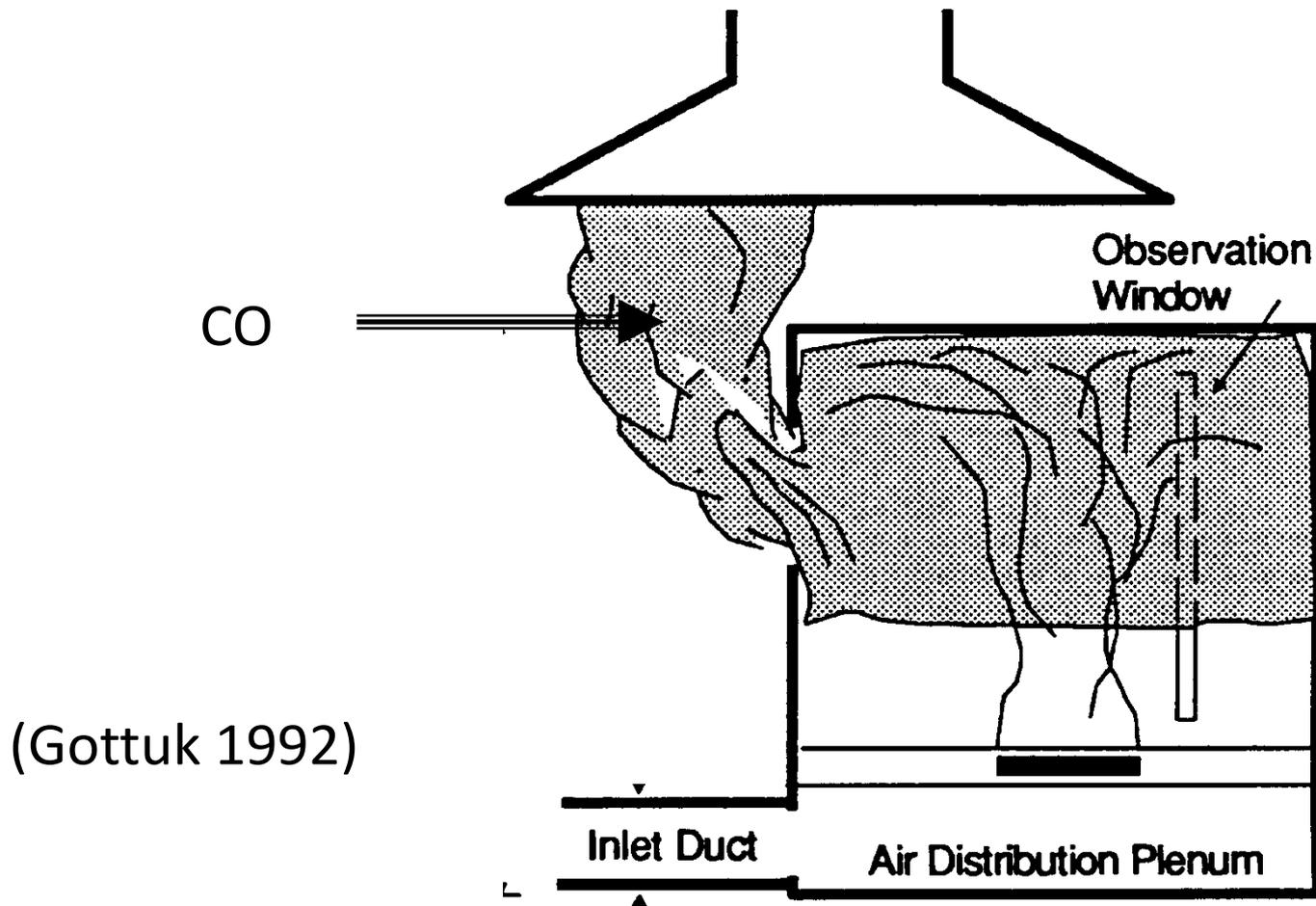
Les effets du CO

==> 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 ↗

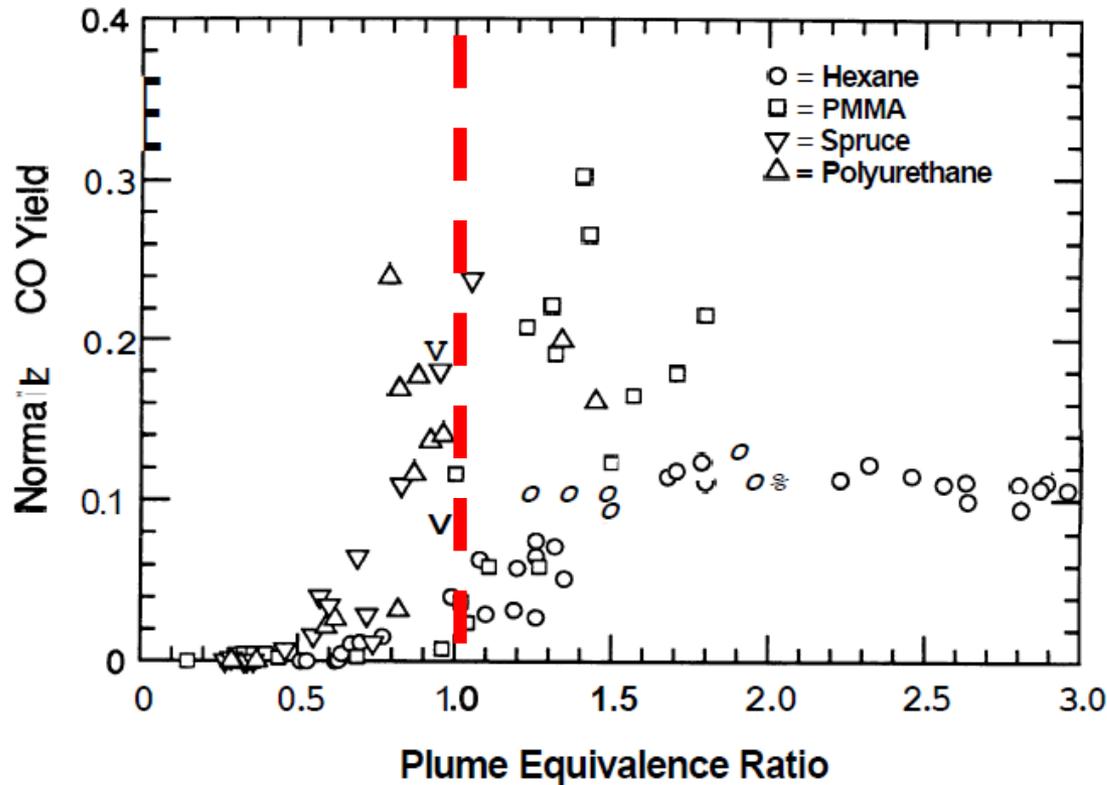


la production des espèces toxiques

La production de CO



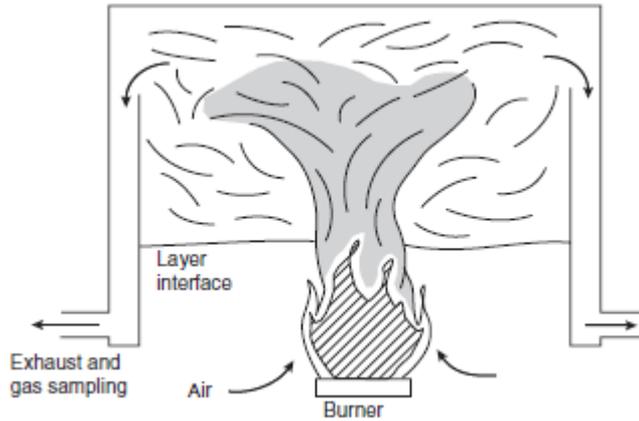
(Gottuk 1992)



Notion de Yield:

$\text{Yield}_{\text{CO}} = \text{debit massique CO} / \text{debit massique comb}$

la production des espèces toxiques



Autre dispositif: Beyler
(SFPE Handbook 2002)

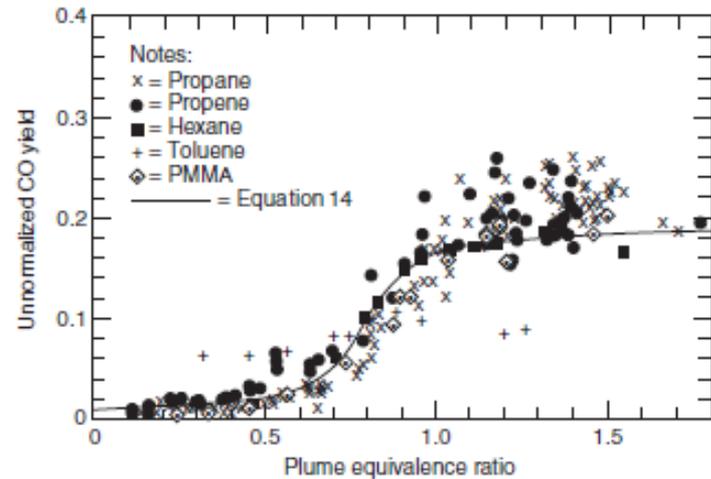
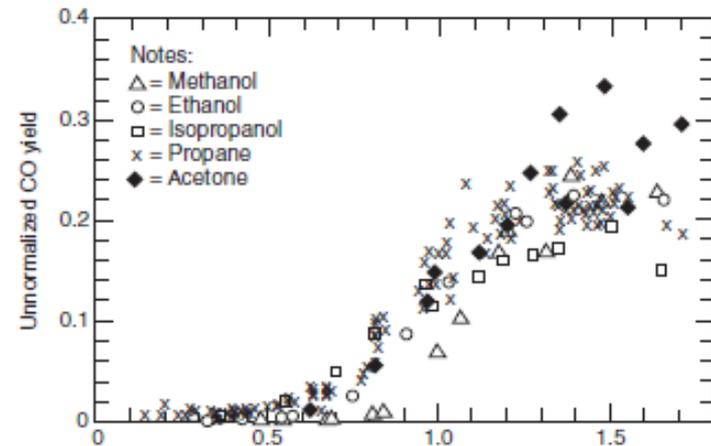


Figure 2-5.4. Unnormalized carbon monoxide yields as a function of the plume equivalence ratio for various fuels studied by Beyler in a hood apparatus.^{8,9}

la production des espèces toxiques

Autre dispositif: FPA apparatus (ASTM E2058)

(SFPE Handbook 2002)

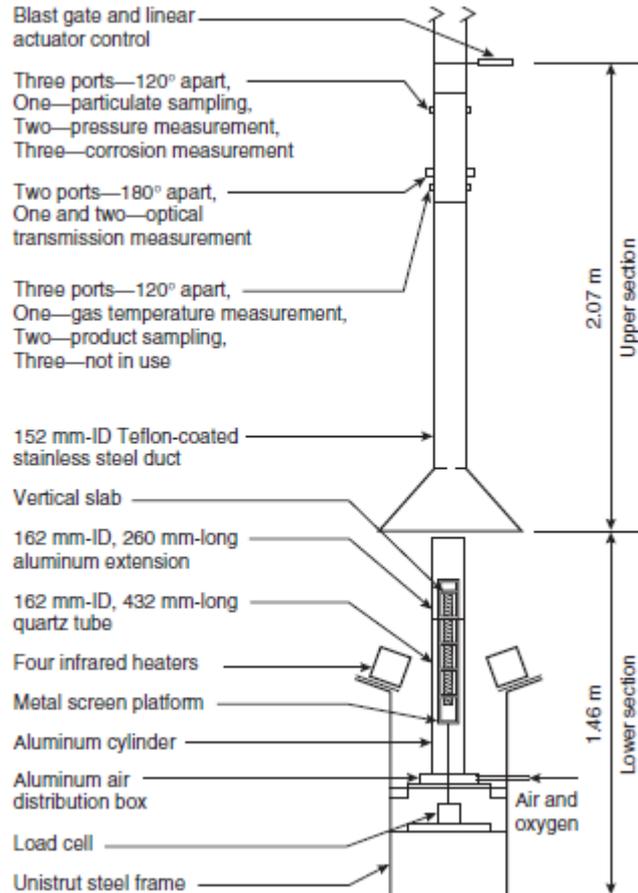


Figure 3-4.28. Sketch of the ASTM E2058 fire propagation apparatus showing locations where measurements are made for the product concentration, optical transmission, particulate concentration, and corrosion.

(SFPE Handbook 2002)

La production des suies

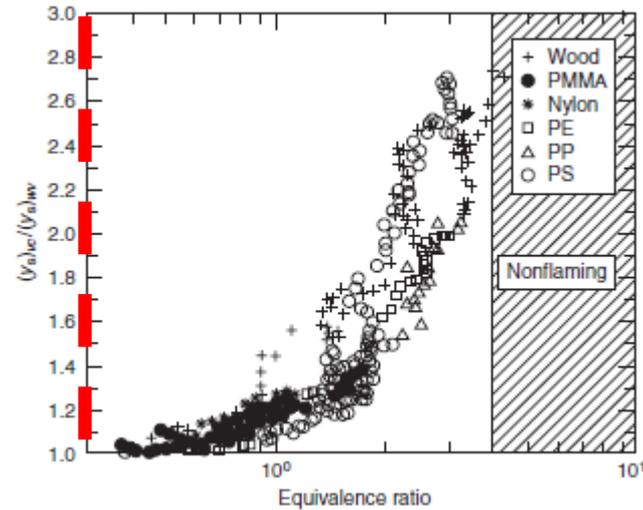


Figure 3-4.33. Ratio of the mass of smoke generated per unit mass of the fuel for ventilation-controlled to well-ventilated fires. Data are measured in the ASTM E2058 fire propagation apparatus and in the Fire Research Institute's enclosure.⁴⁴ Subscript vc represents ventilation-controlled fires, and subscript wv represents well-ventilated fires.

la production des espèces toxiques



Quelle approche ?

Exemple : le 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



Quelle approche ?

Exemple : le CO

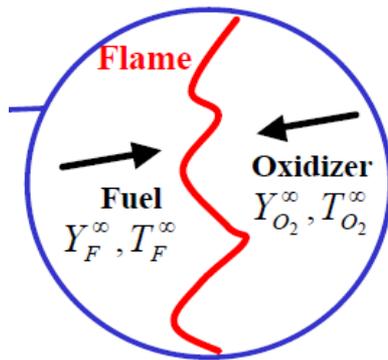
- Quel le problème rencontré quand on veut prédire dans le 'détail' la production de CO ?
(et d'autres espèces inflammables ou toxiques) ?

==> 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



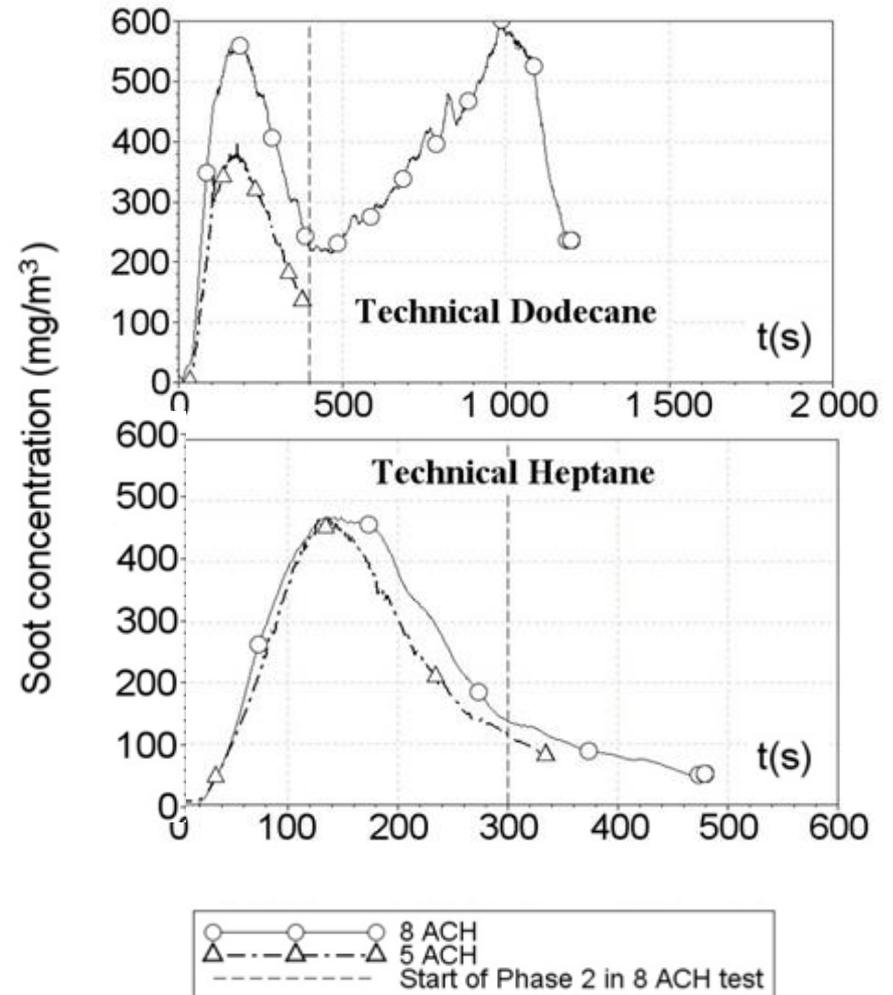
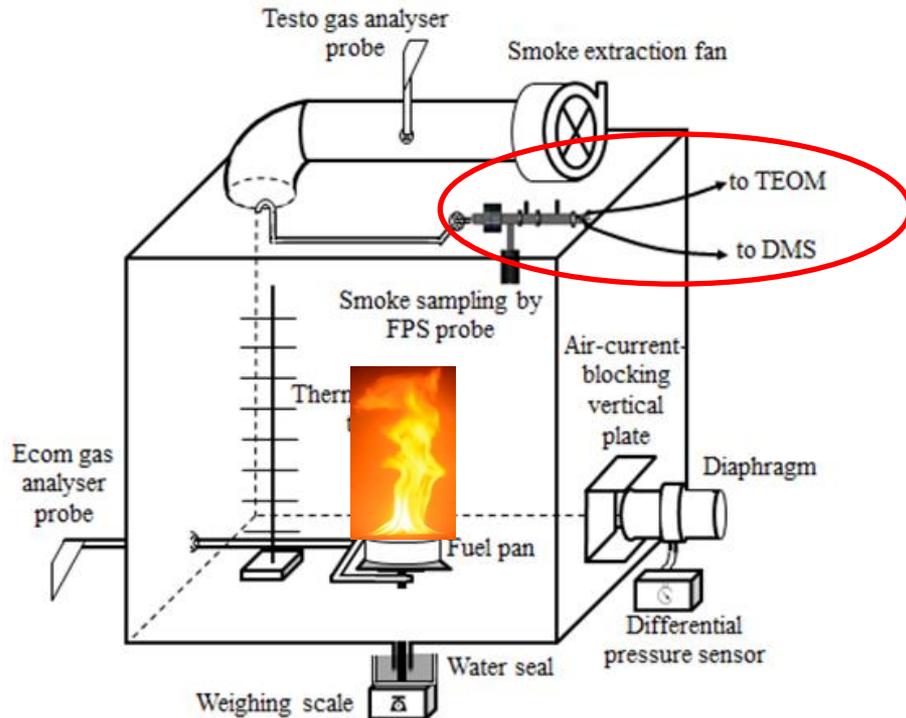
Une approche récente:

A. Trouvé, Int Symp Comb 2007

la production des espèces toxiques

Avec une ventilation mécanique

Dispositif du CORIA

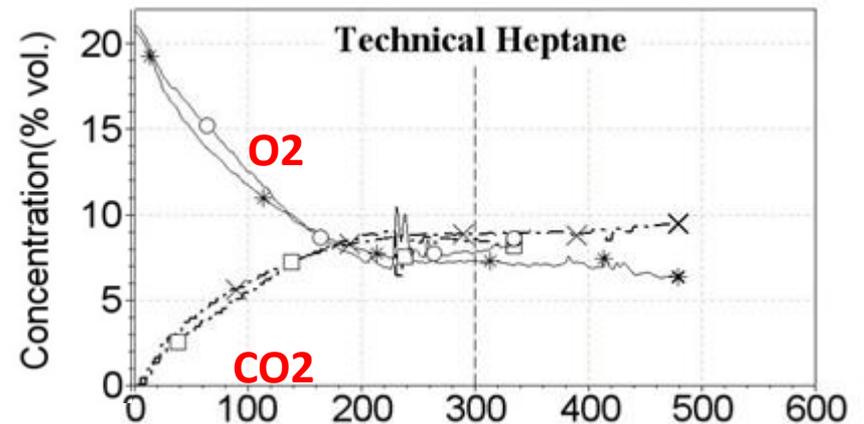
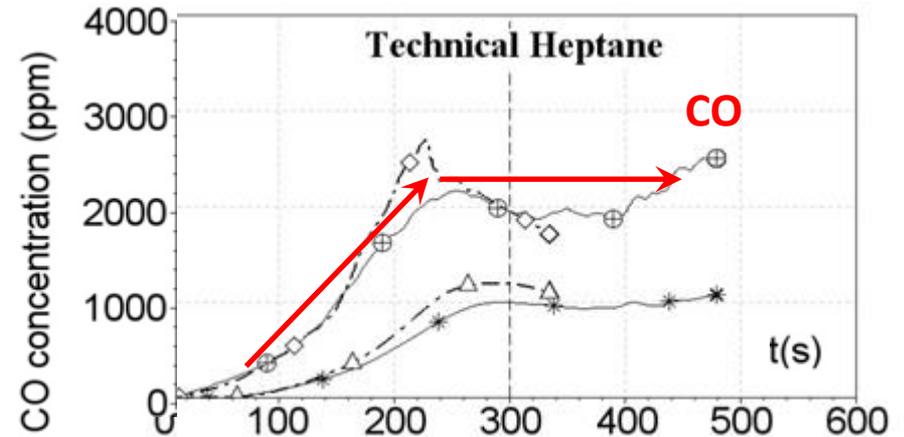
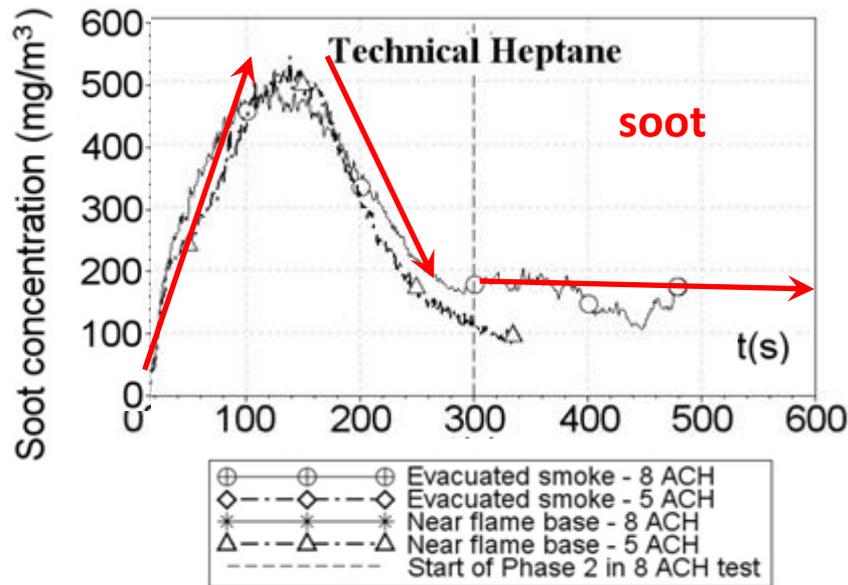


Coppalle, FSJ 2016

la production des espèces toxiques

Avec une ventilation mécanique

CO and soot emissions



- Aux premiers instants: suffisamment de O₂====> prod de suies
- Ensuite: Moins de O₂====> baisse de la prod suies

Compétition entre la formation de CO et des suies

overfire region + free-burning conditions, (Koylu 1991): $Y_{CO} < Y_{soot}$

Confined fire:

$Y_{CO} > Y_{soot}$



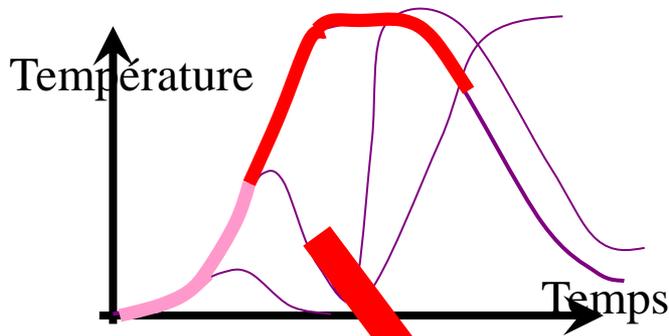
Plan de l'exposé

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

Flammes externes sortie de flammes



EMBRASEMENT GENERALISE (FLASH-OVER)



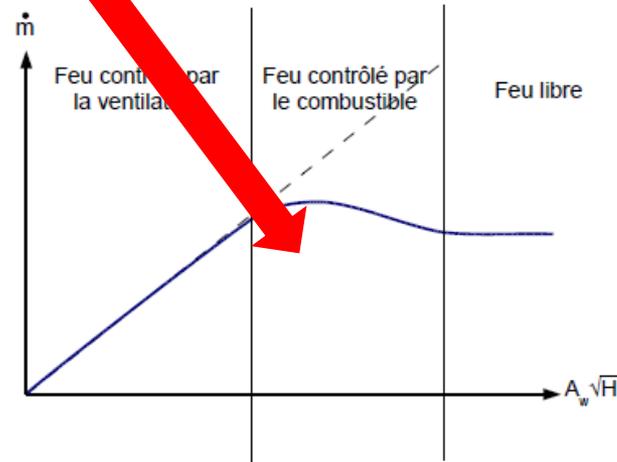
Experimental Study of the Effects of Fuel Type, Fuel ddistribution, and Vent Size on Full-Scale Underventilated Compartment Fires in an ISO 9705 Room

NIST Technical Note 1603 (2008)

$$\dot{m}_{air} = 0,52A_w \sqrt{H} \quad (\text{Kg/s})$$

si fuel = bois

$$\dot{m}_{fuel} = 0.092A_w \sqrt{H} \quad (\text{Kg/s})$$



Flammes externes



➤ *Evolutions techniques:*

isolations et décorations extérieurs (ITE) ==> feux de façade



a



b

Immeuble du foyer ADOMA à Dijon : a) poubelle et façade après l'incendie
une pièce où l'incendie s'est propagé.



Grenfell Tower fire

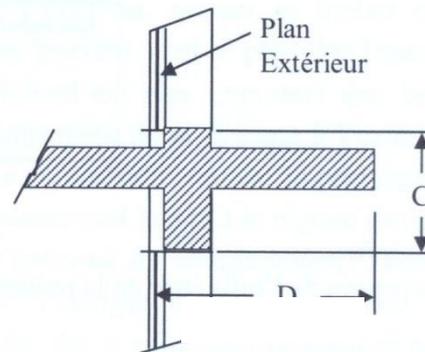


Figure 1.3-2: Définition du C+D



Bavette métallique pour éviter la propagation d'un incendie entre étages par la façade.

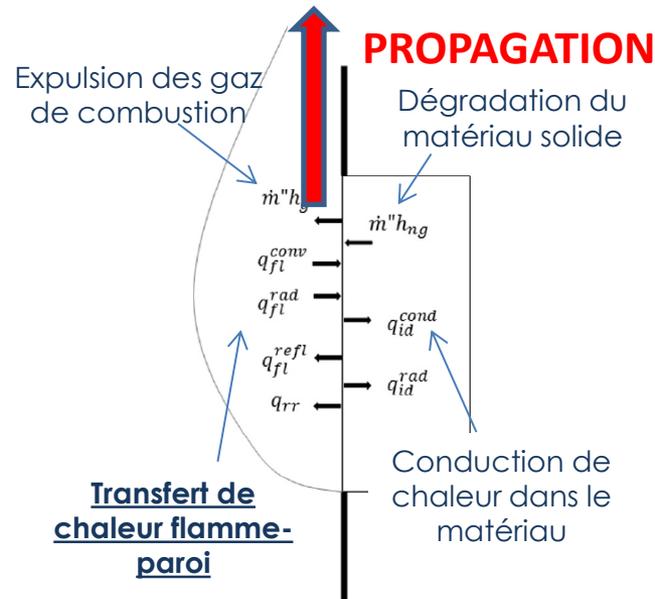
Flammes externes



➤ *progression verticale d'une flamme*

sur (ou dans) le dispositif d'isolation

➤ *La cas académique*



➤ *La réalité est souvent plus complexe*

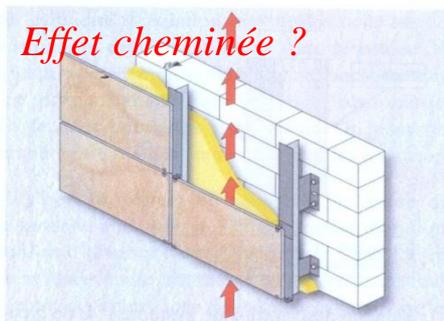
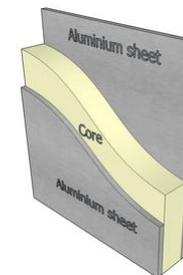
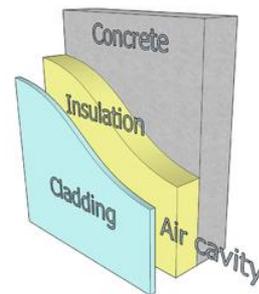


Schéma d'un système ITE de type façade ventilée.



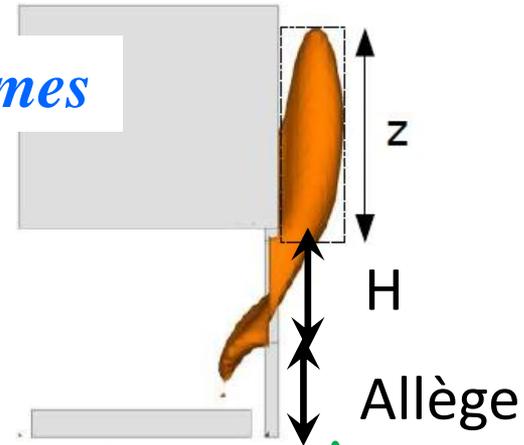
Déformations et défauts d'intégrité?

Flammes externes

➤ un cas particulier: les sorties de flammes

$$\frac{z + h}{h} = 16 \left(\frac{\dot{m}_{\text{fuel}}}{A_w \rho \sqrt{gh}} \right)^{2/3}$$

M. LAW. (American Institute of Steel Construction, 1978.)

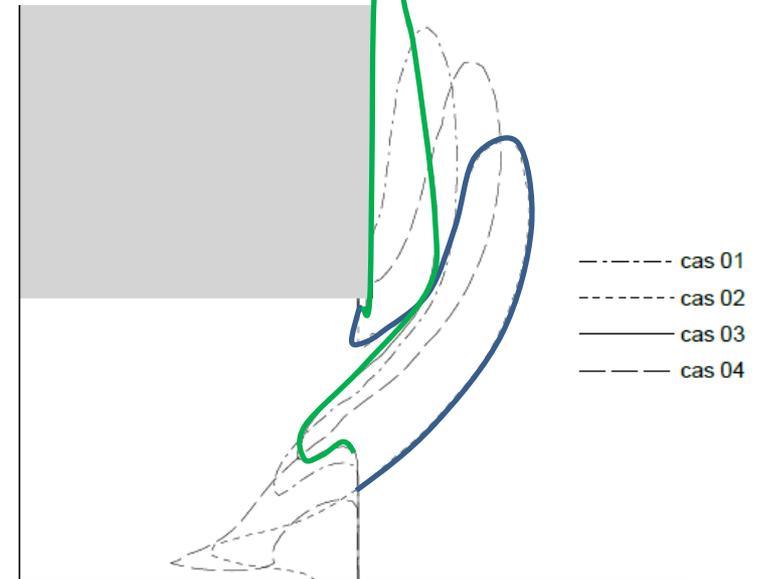


➤ Problème complexe: forte influence de la géométrie

(Thèse S. Desanghere INSA Rouen 2006,
voir aussi thèse M. Dunny Poitiers 2016)

Simulation avec FDS

Cas	Largeur [m]	Hauteur [m]	Hauteur d'allège [m]	Facteur d'ouverture [m ^{5/2}]
01	2.8	1.6	1.3	5.67
02	1.4	2.5	0.0	5.53
03	3.2	1.5	1.4	5.88
04	2.0	2.0	0.9	5.66



Contours de température 500 °C

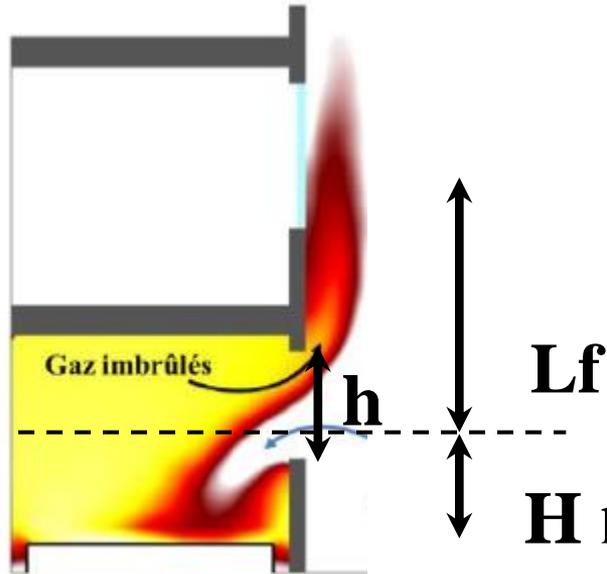
coupe verticale passant par le milieu du compartiment.

====> Effet important sur le flux à la paroi!

Flammes externes



➤ *un cas particulier: les sorties de flammes*



La hauteur de flamme L_f (Tang 2012 comb & flame)

$$\frac{L_f - H_n}{(A\sqrt{h})^{2/5}} = 2 \left(\frac{HRR_{ext}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} A \sqrt{gh}} \right)^{0.44}$$

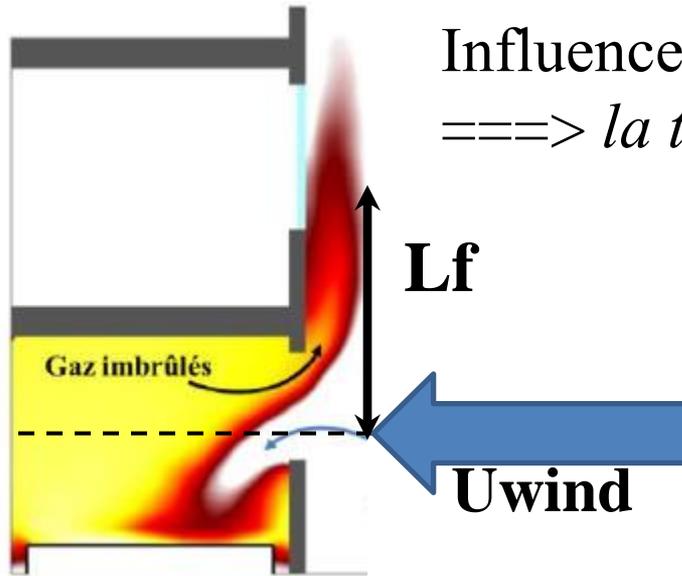
L_f

H hauteur du plan neutre

HRR_{ext} est la puissance dégagée à l'extérieure

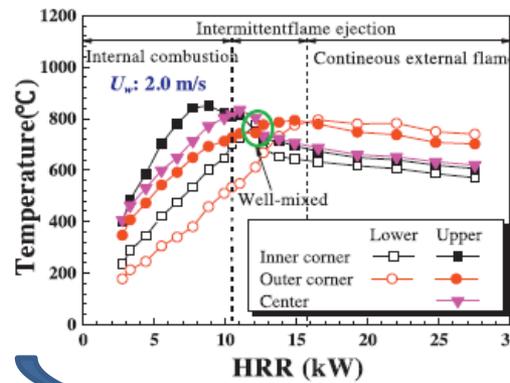
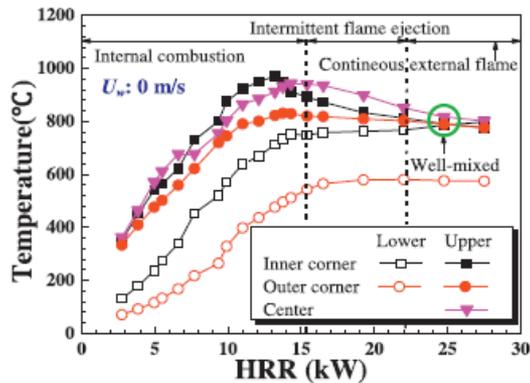
$$HRR_{ext} = HRR_{tot} - HRR_{in} \quad (HRR_{tot} \text{ peut être délicat à calculer})$$

Flammes externes: Effet du vent

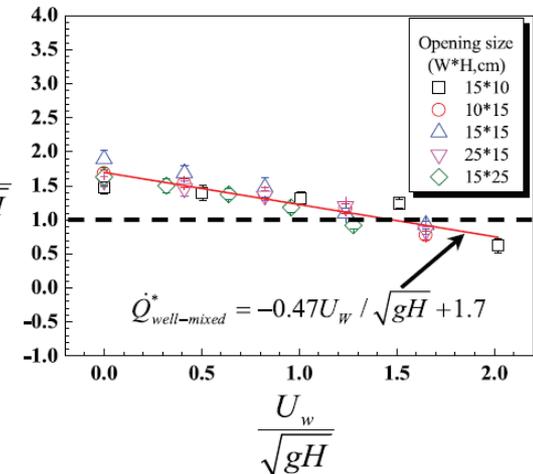


Influence à l'intérieur: *Renforce le mélange ?*
 ==> *la transition vers 'flamme externe' change ?*

(Longhua Hu Symp Comb 2017)



$$\frac{\dot{Q}_{well-mixed}}{1500A\sqrt{H}}$$



ATN: pour une inertie de paroi donnée

Commentaire: on atteint les limites d'une approche phénoménologique

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 matériaux composites
- La propagation des flammes sur ces matériaux
-