# 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 connaitre 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**

**et la puissance des moyens de calcul est grande**

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

**les phénomènes importants**

**les principaux paramètres**

**les ordres de grandeur**

Souvent utiles pour les outils numériques de dynamique de feu, dans les cas ou la modélisation des phenom. n'est pas possible

➤ **à l'heure du développement de**

**l'Ingénierie de la Sécurité Incendie**

**et d'une volonté politique de simplification des règles**

***===>Il faut avoir un minimum de connaissances pour se déclarer 'sachant' ou expert***

➤ **Pour connaitre les limites et les avantages de la modélisation 3D**

***===> il faut avoir un minimum de connaissances dans la science du feu***

➤ **Rappel pour quantifier et résoudre des cas complexes**

**====> recours à la modélisation 3D**

# Introduction: quelques exemples

- les bâtiments : habitats, bureaux

  video: Feu-Local-Scénario

- les bâtiments industriels: les entrepôts , les locaux techniques

- les installations souterraines: tunnels

  Video: Feu-Tunnel-MtBlanc (https://www.youtube.com/watch?v=YzIk66-kGv0)

- Les transports: trains, bateaux, avions

# Introduction: Evolution dans les bâtiments

Grands bâtiments (IGH, ERP)

La Défense, Paris

**Objectifs prioritaires de la sécurité incendie:**

**- Tenue de la structure**

**- Désemfumage**

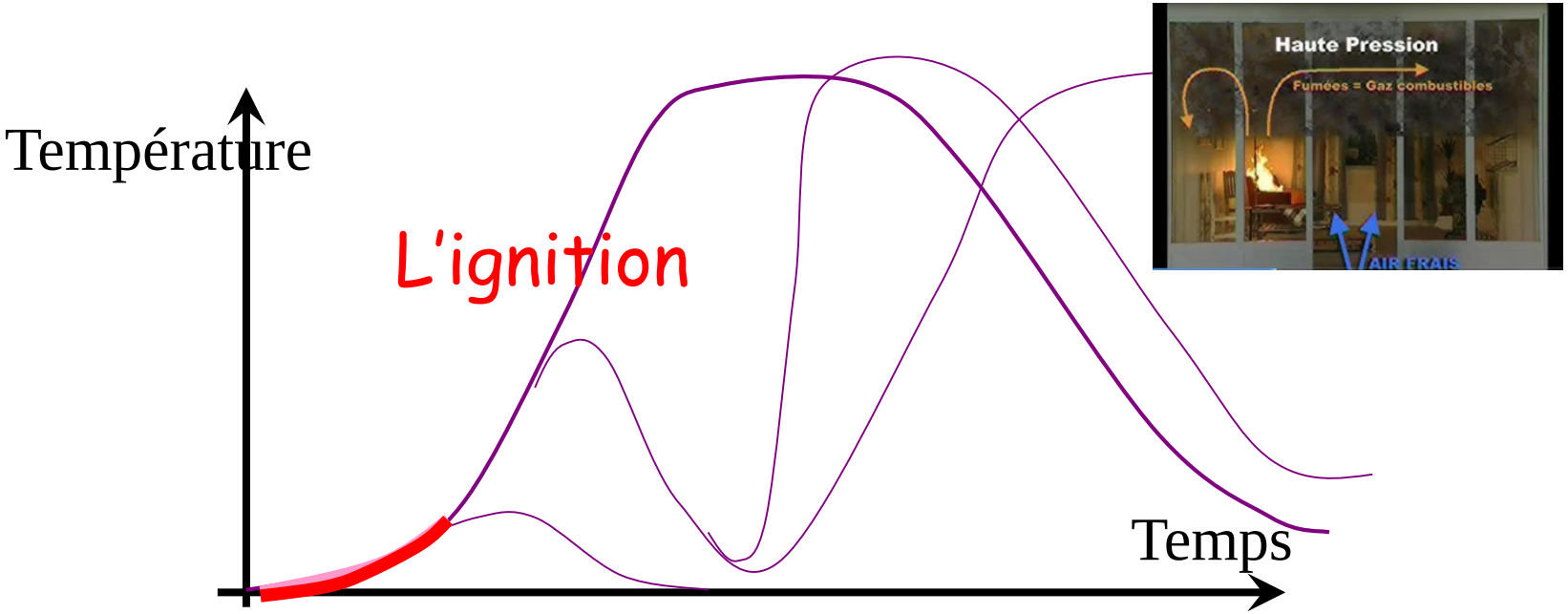
**- Evacuation**

## 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*




- Ignition des gaz

- Ignition des liquides

- Ignition des solides

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

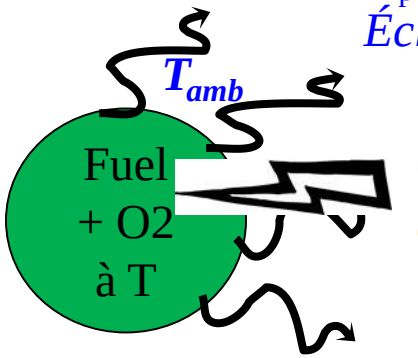
## Ignition des gaz (pilotée)

l'allumage d'un petit volume V contenant du gaz combustible et d'air

Pour le volume V

$Q_r$: apport de chaleur par la combustion dans V

$Q_p$: perte de chaleur à travers la surface de V
*Échange avec le milieu ambiant à $T_{amb}$*




$Q_{igni}$: énergie apportée par une source d'ignition: étincelle, flamme,…

**Bilan d'énergie du volume V:**
*Variation de T = Apport - perte*

$$mc_v \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_r - \dot{Q}_p + Q_{igni}$$

Dans la réalité: Existence des limites inférieure et supérieure d'inflammabilité, LII et LSI

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

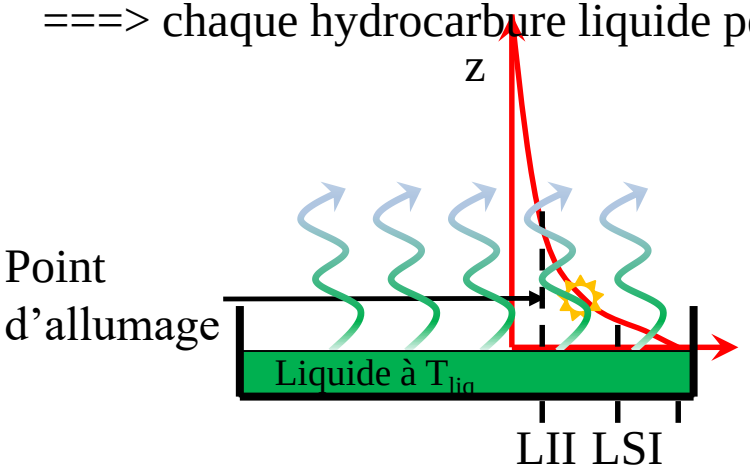
## Ignition des liquides

- Expérience facile:

dans un petit recipient, essayer d'enflammer de l'essence ou du diesel à la Tp ambiante

Réponse ?

===> chaque hydrocarbure liquide possède une Tp minimum pour l'ignition




➢ Un liquide s'enflamme parce qu'il émet des vapeurs en quantité suffisante. Mélangées à l'air, elles peuvent s'enflammer.

➢ La concentration du combustible près de la surface doit être comprise entre la LII et la LSI au niveau du point d'allumage

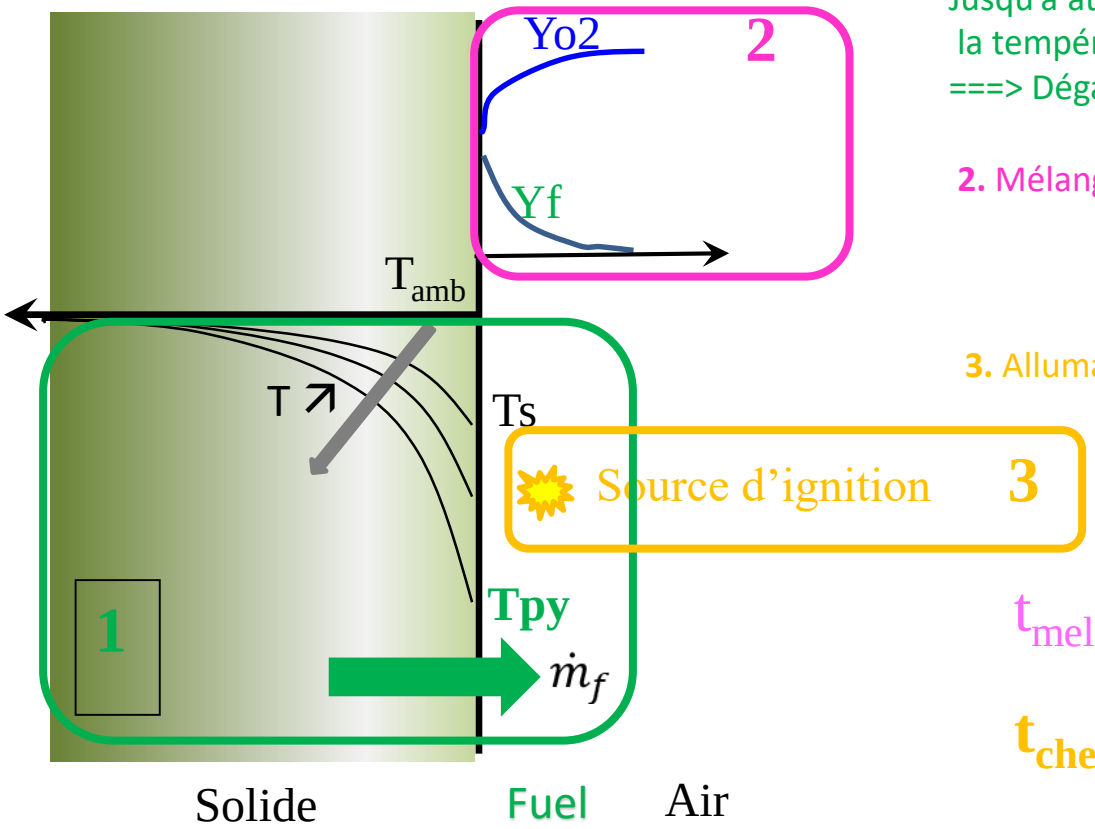
➢ la quantité de vapeur combustible dépend de la Tp $T_{liq}$ du liquide

➢ ***Définition: Le point feu Tf (fire point) est la température à partir de laquelle la combustion au dessus du liquide s'entretient d'elle même***

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## Ignition des solides

- Trois phénomènes sont responsables de l'ignition d'un solide
- Ils interviennent avec des *temps différents*




**1.** Echauffement du solide
Jusqu'à atteindre à la surface
la température de décomposition $T_{py}$
===> Dégagement de vapeurs combustibles

**2.** Mélange des vapeurs combustibles avec l'air

**3.** Allumage avec une source d'ignition

$t_{mel}$ temps pour mélanger O2 et fuel

**$t_{chem}$ temps chimique combustion**

**$\wedge\wedge$**

**$t_{py}$ temps pour atteindre Tpy**

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## Ignition des solides

***Question**: est ce que les modèles de dynamique de feu (FDS,openFoam, ...) peuvent prédire* EN DETAIL *cette première phase d'allumage?*

*Réponse:* NON

*===> approche simplifiée*

***Question**: Comment connaitre et comparer facilement la rapidité d'allumage des matériaux?*

*Réponse: par des tests normalisés*

*===> Notion de réaction au feu*

***Question**: Quel est le point commun entre l'ignition des gaz, liquides et solides?*

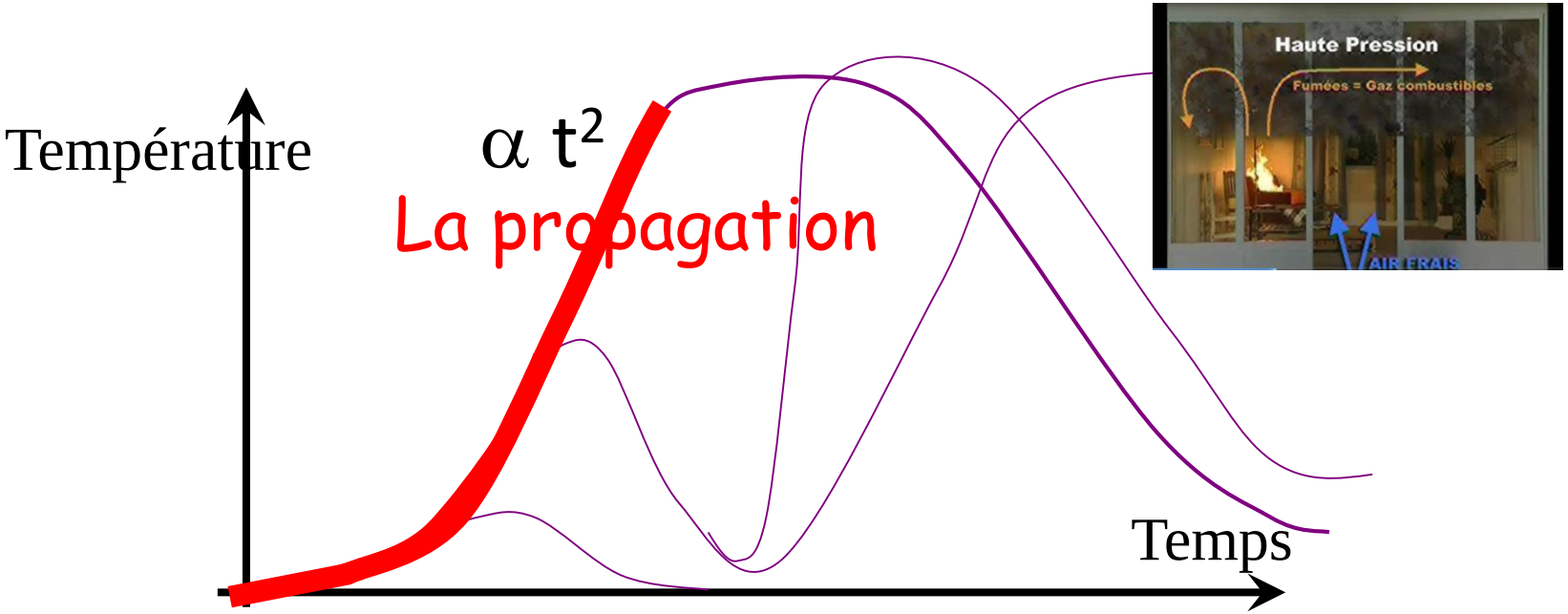
*Réponse:Pour les incendies===>* IGNITION ET COMBUSTION DANS LA PHASE GAZ

***Question**: Il existe une combustion sans flamme, laquelle?*

*Réponse: combustion des braises (Dég. Chaleur << cas flamme)*

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

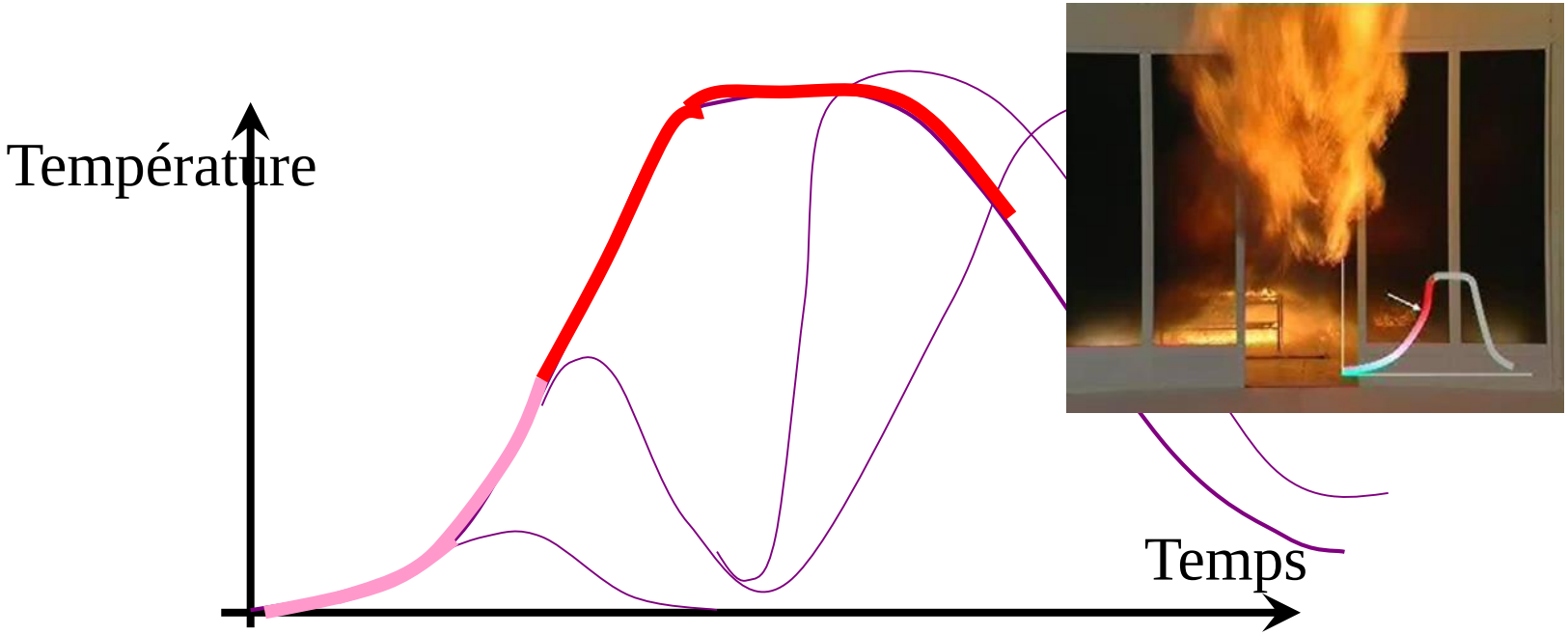
*le déroulement d'un feu confiné: de l'ignition à l'embrasement généralisé*




- Cette phase correspond à la propagation
  - -des fronts de flamme sur les combustibles
  - -par allumage d'autres matériaux vierges

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

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

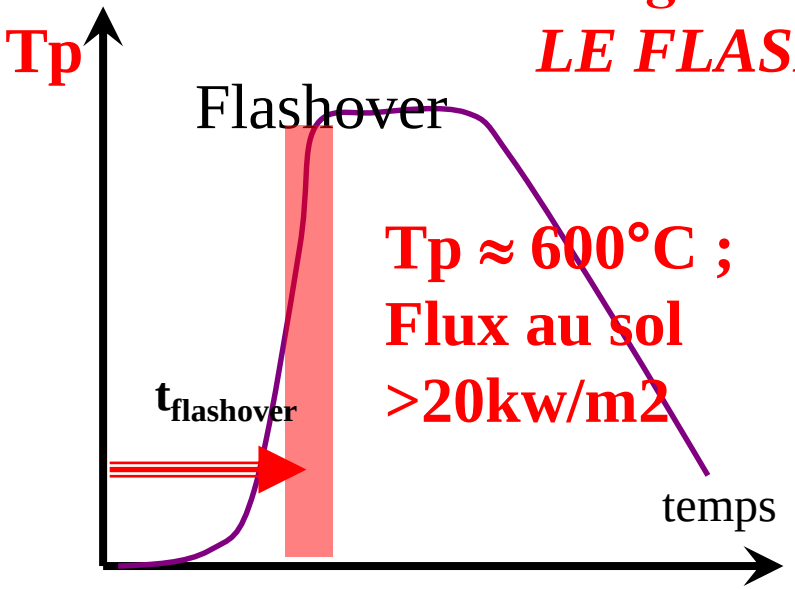


# Quelques notions sur le développement d'un incendie

**si la puissance dégagée est suffisante**

***===> vers l'embrasement généralisé***

***LE FLASHOVER***




**Tp ≈ 600°C ;**
**Flux au sol**
**>20kw/m2**

**Comment définir le flashover?**
**1- la transition entre un feu localisé et l'embrasement généralisé**
**2- la transition entre le régime de ventilation contrôlé par le fuel au régime de ventilation contrôlé par la ventilation**
**3- embrasement de la couche de fumée**

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

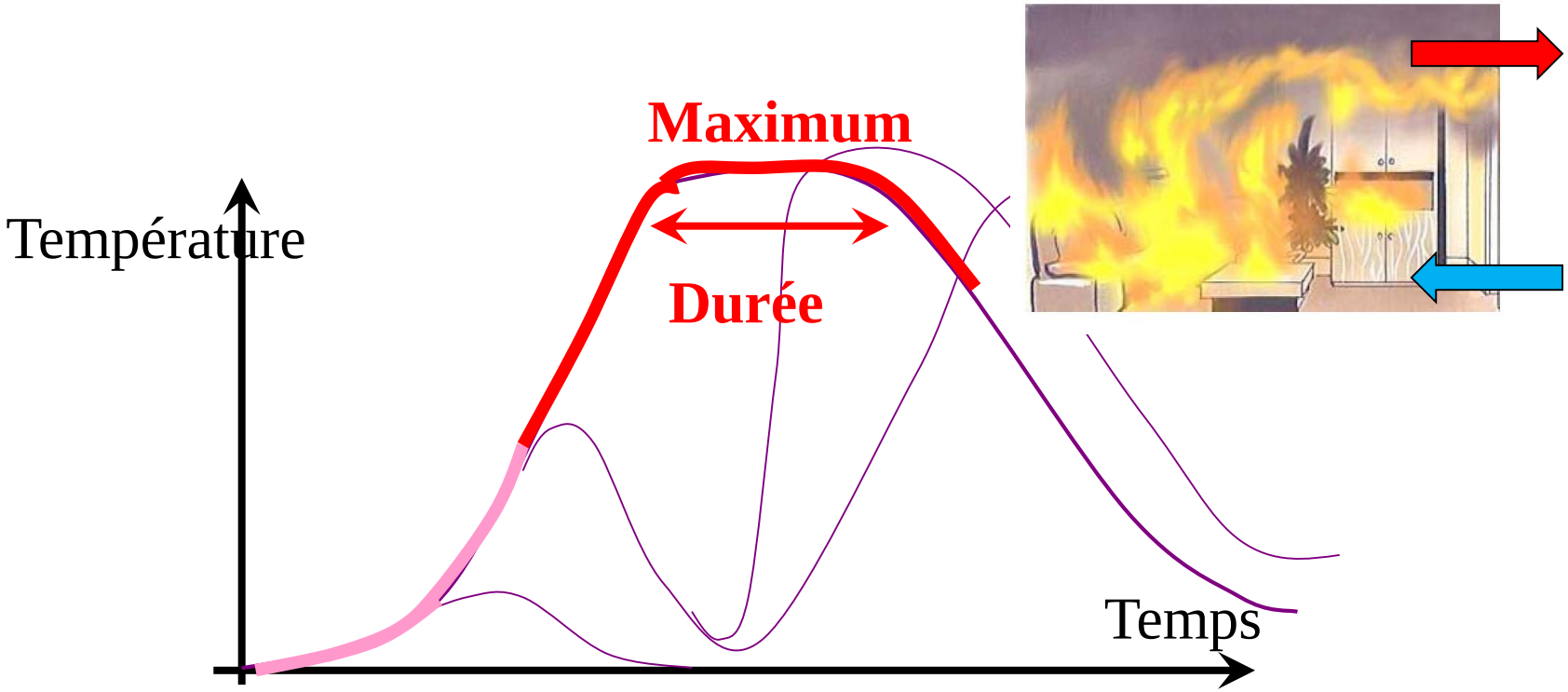
Kawagoe, 1958

(Drysdale, avec des piles de bois
Et un critère de ΔT=500K)

Qfo : Débit calorifique (en kW) conduisant au flashover (critère ΔT=500K) ;
Aw : Surface de l'ouverture (m²) ;
H : Hauteur de l'ouverture (m) ;
hk : Coefficient effectif de perte de chaleur à travers les parois (kW/m².K) ;
At : Surface interne d'échange entre les parois et le compartiment (m²).

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

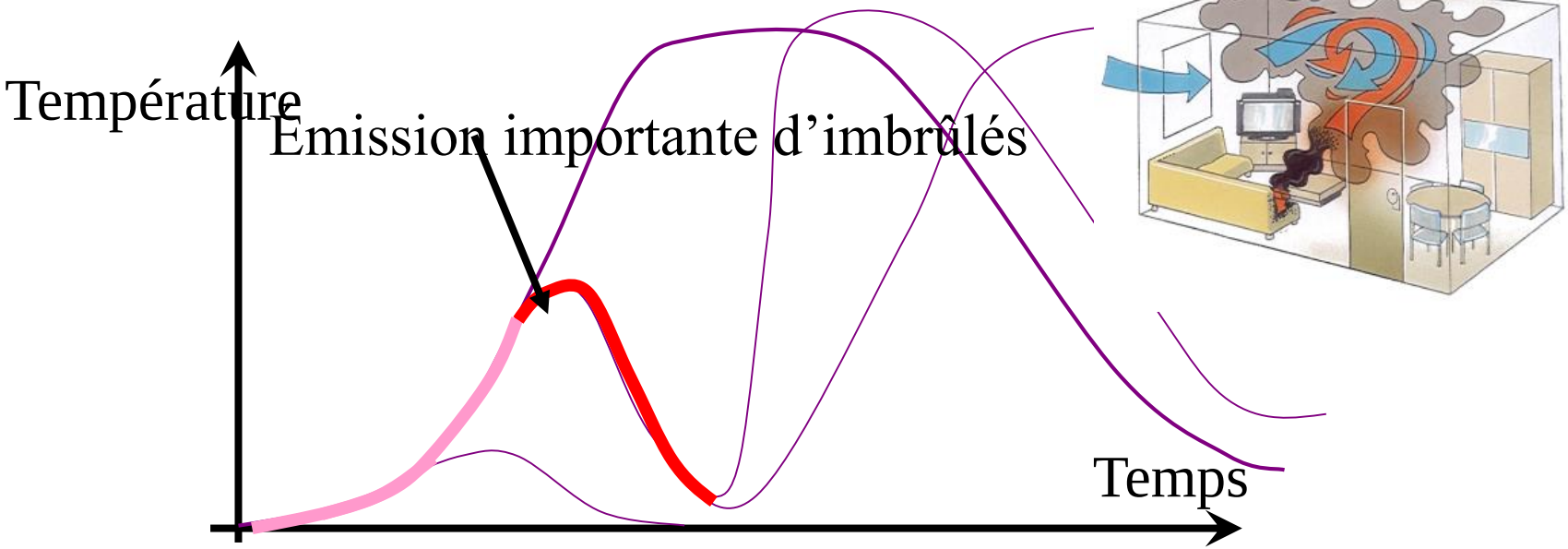
## *L'échauffement des structures*




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.

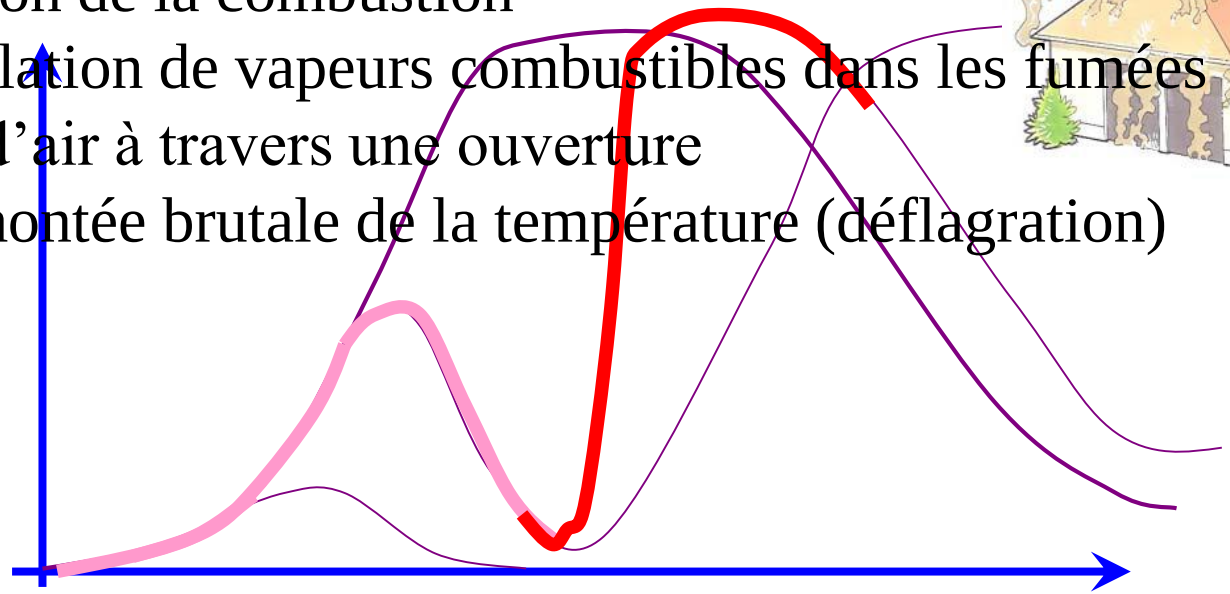
# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## Si la ventilation des foyers est insuffisante

Cela peut entraîner un phénomène rapide et brutal :
le ***backdraft*** ou explosion de fumée:

Le scénario:

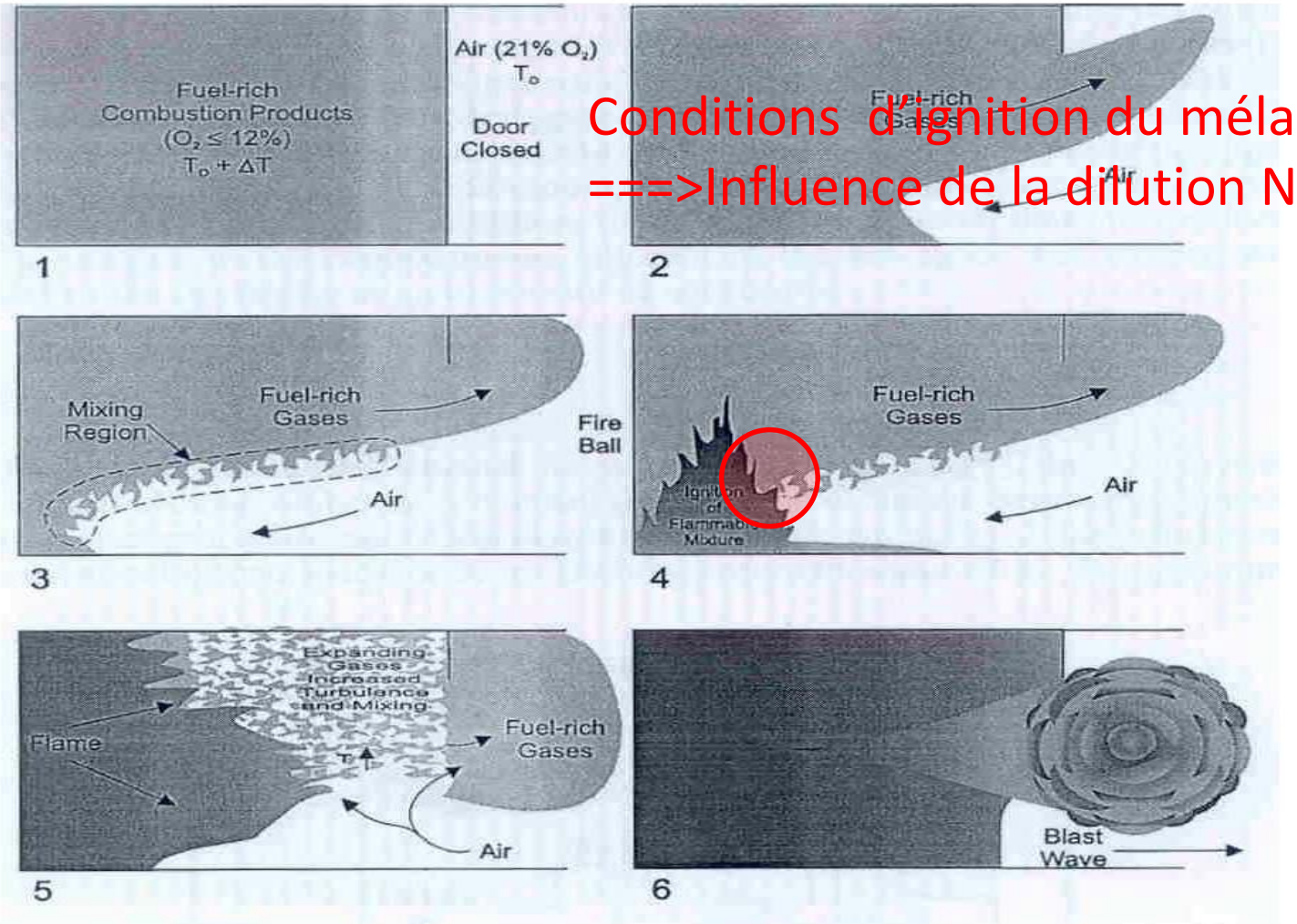
1- un confinement important
2- Réduction de la combustion
3- accumulation de vapeurs combustibles dans les fumées
4- apport d'air à travers une ouverture
5- ===> montée brutale de la température (déflagration)



# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## Si la ventilation des foyers est insuffisante

le ***backdraft*** ou explosion de fumée




Conditions d'ignition du mélange air+fumée

===>Influence de la dilution N2, CO2 H2O

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

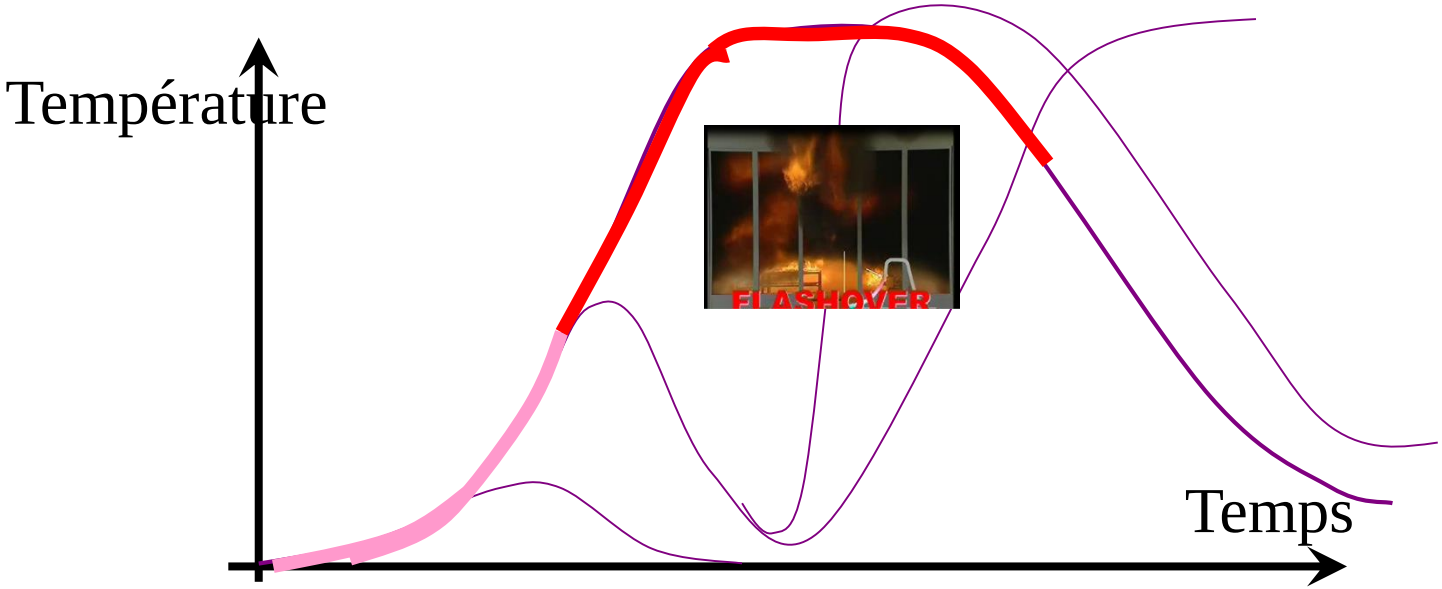
# Quelques notions sur le développement d'un incendie

**En conclusion:**

**un feu confiné, c'est un scénario**

**qui dépend**

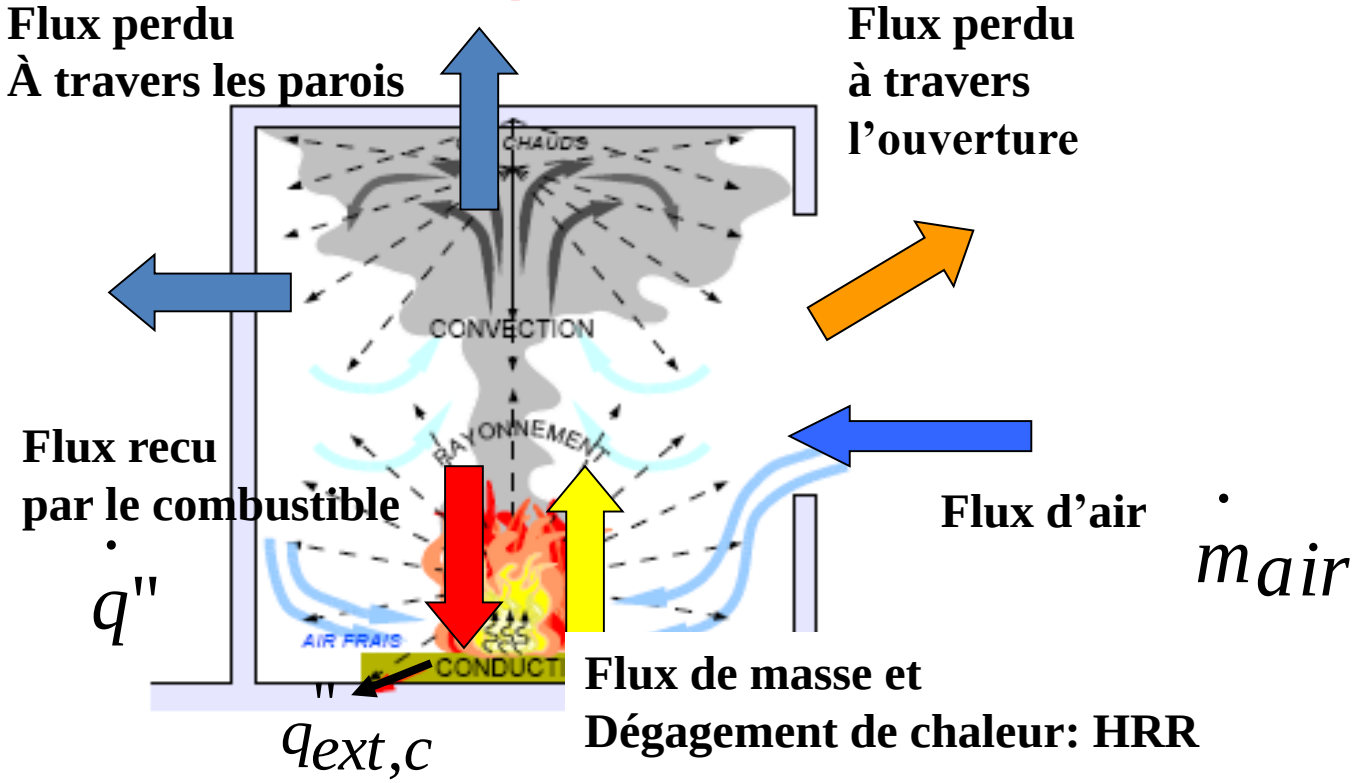
- **de l'intensité du dégagement de chaleur (HRR)**
- **Du niveau de ventilation du foyer**
- **de l'inertie thermique des murs**



# Quelques notions sur le développement d'un incendie

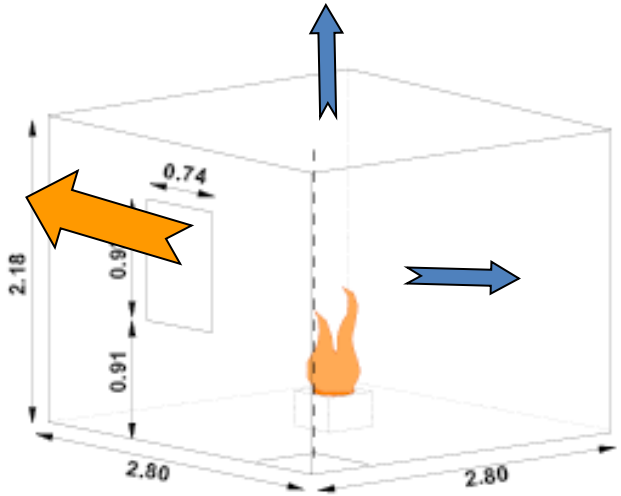
## ➢ Un feu confiné: *ce sont des couplages*

***entre les flux de chaleur et de masse***

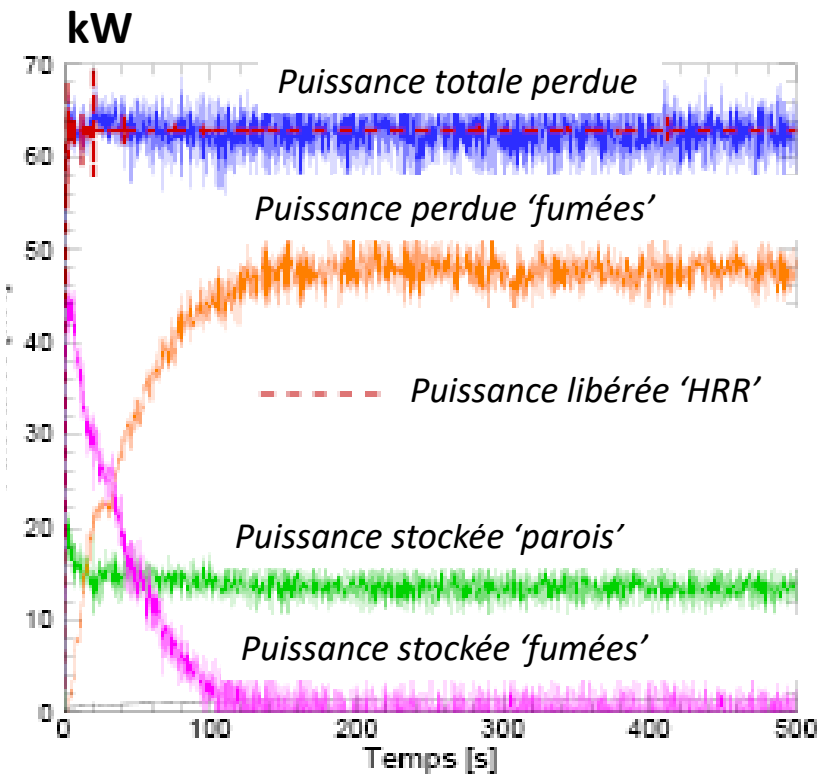


# Quelques notions sur le développement d'un incendie

Source: thèse S. Désanghère, 2006




**dimensions en mètres.**




**Répartition des puissances au cours du temps**

*Ordre de grandeur*

*HRR = 'stockée parois' + perdue 'fumées'*

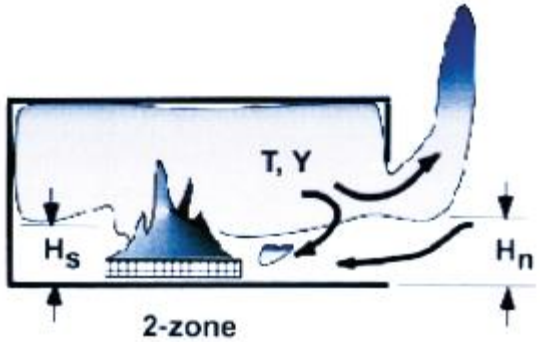
## Plan de l’exposé

- 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

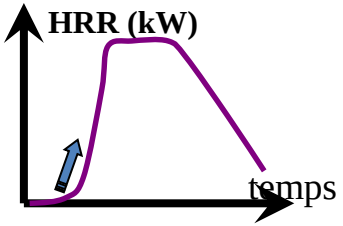
# Equations simplifiées

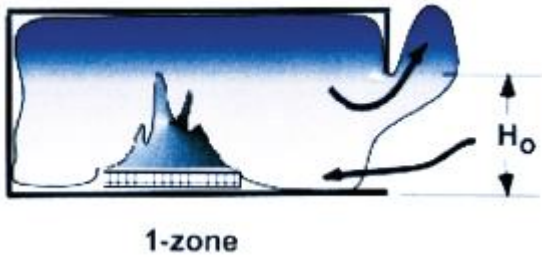
Les paramètres importants:

- 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

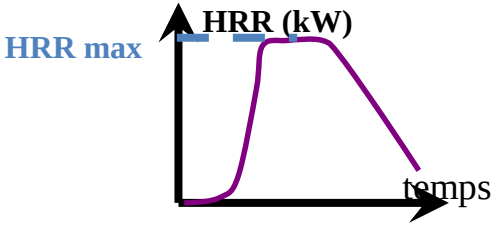



Au début du feu

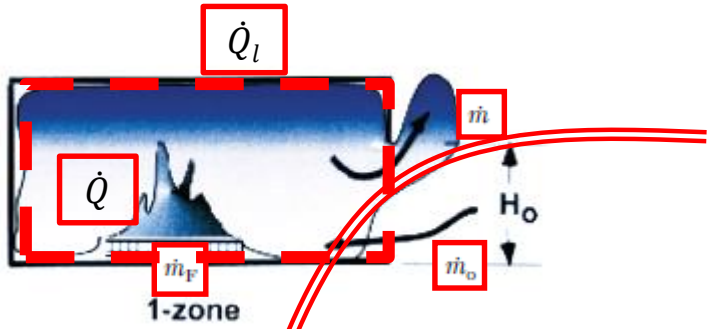


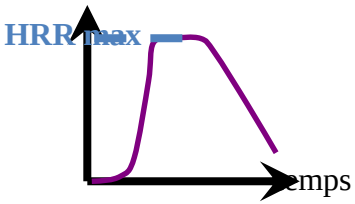

Feu pleinement développé



# Equations simplifiées: Feu pleinement développé




(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

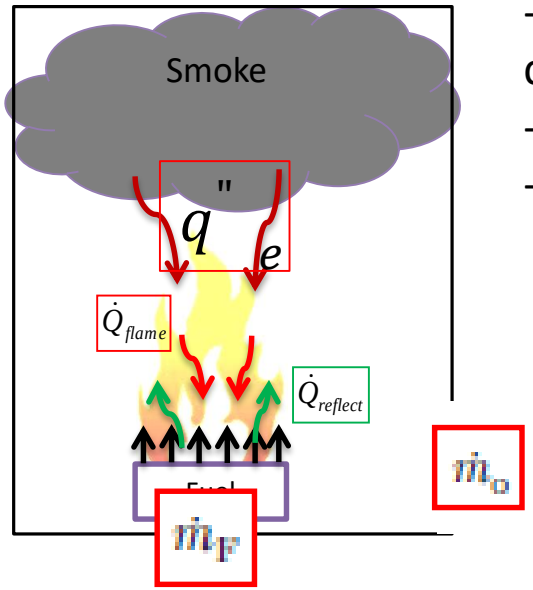
$$\frac{d(mY)}{dt} + \dot{m}Y - \dot{m}_o(0.233) = -0.233s\dot{Q}/\Delta h_c$$

$\Delta h_c$ = enthalpie de combustion / kg fuel

$\dot{m}_F$ La perte de masse du combustible

# Equations simplifiées

## La perte de masse $\dot{m}_F$ dépend




-du potentiel combustible: surface, propriétés de pyrolyses et de combustion (chaleurs de vaporisation, gazéification, de combusti
- des conditions de ventilation.
- du flux reçu par la surface combustible

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

**Effet du confinement**

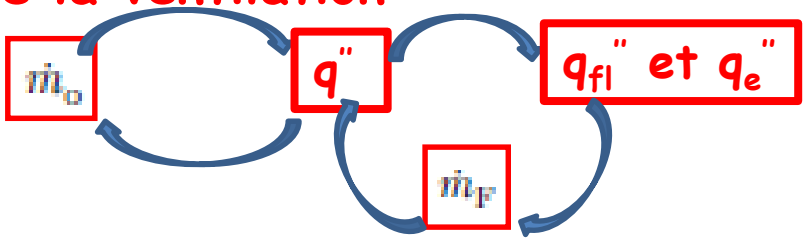
*le flux $q_e$ est due au ray$^t$. des parois, de la couche chaude de fumée sous plafond et des autres sources de combustion*

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

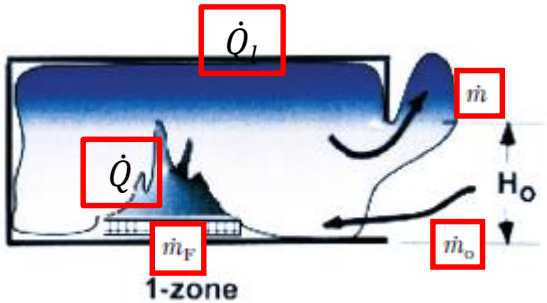
$L$: Chaleur de gazeification
$L = L_v$ pour les liquides

$$\dot{m}_F \text{“}= \dot{m}_{F,free}\text{“}\ f(Y_{O2}) + F_{s+w\to F}\sigma\,(T^4 - T_0^{\ 4})\,/L$$

**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

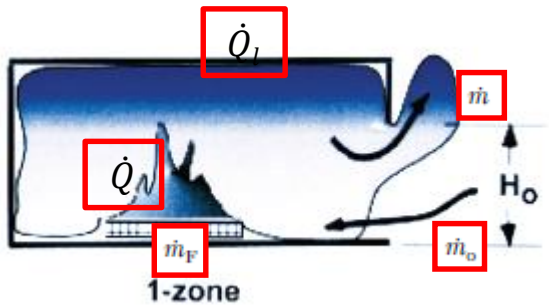
$$\frac{d(mY)}{dt} + \dot{m}Y - \dot{m}_o(0.233) = -0.233s\dot{Q}/\Delta h_c$$

$\Delta h_c$ = enthalpie de combustion / kg fuel

## *Le dégagement de chaleur (HRR)*

$$Q = \dot{m}''_{F,b}\, A_F \Delta h_c \quad \textbf{ou} \quad Q = \dot{m}''_{air,b}\, A_F \Delta h_{air}$$

# 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) (kg)

$\dot{m}_F$ + $\dot{m}_o$ ===> prod(CO2,H2O,N2) (kg/s)

## Bilan de l'oxygène

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

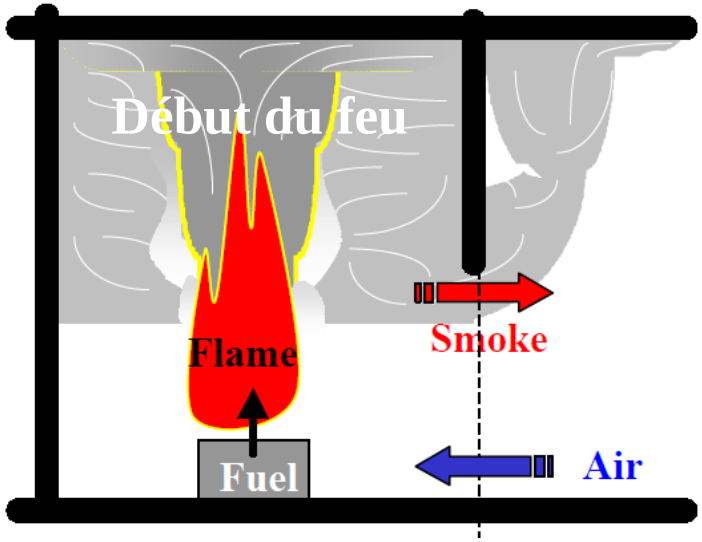
$\Delta h_c$ = enthalpie de combustion / kg fuel

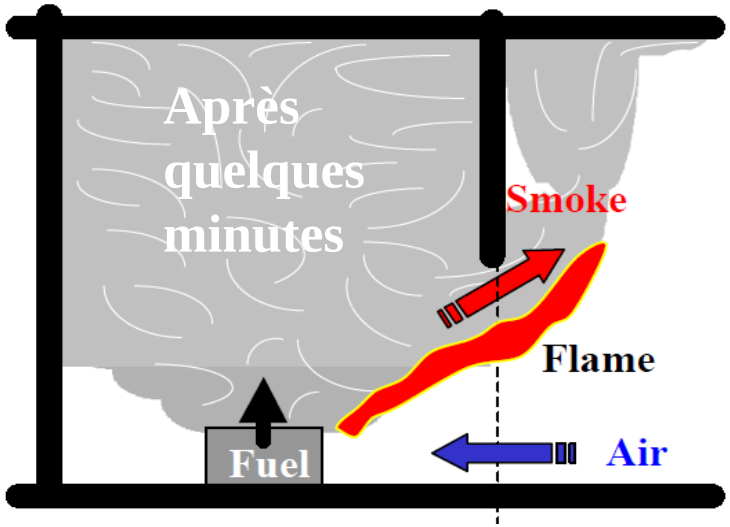
En réalité, $\dot{m}_o$ et $\dot{m}_F$ ne sont pas dans des proportions stochiometriques ===> Ventilation du foyer

# 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 $\phi$ qui est une adimensionnalisation du débit de fuel

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

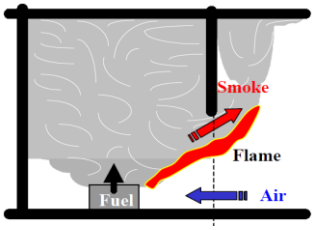
la puissance dégagée:
- est **contrôlée par le combustible** (surface en feu, vitesse de perte de masse, …)
- Combustion bien ventilée, $\boldsymbol{\phi < 1}$

la puissance dégagée:
- est contrôlée par la ventilation (l'air disponible)
- Combustion peut être sous-ventilée $\boldsymbol{\phi >= 1}$

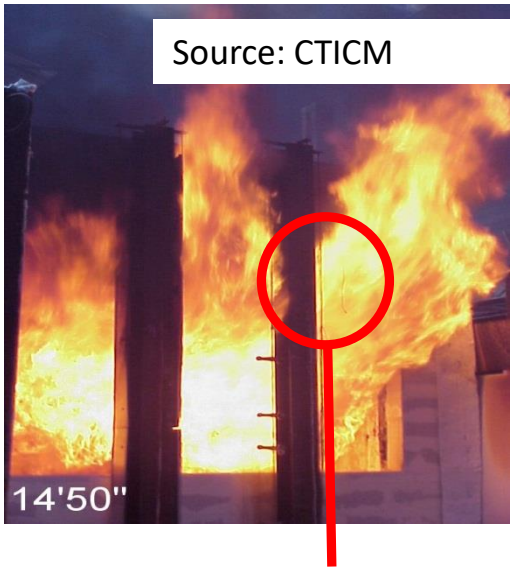
Rq: En réalité la transition se fait à $\phi$ légèrement <1

# 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



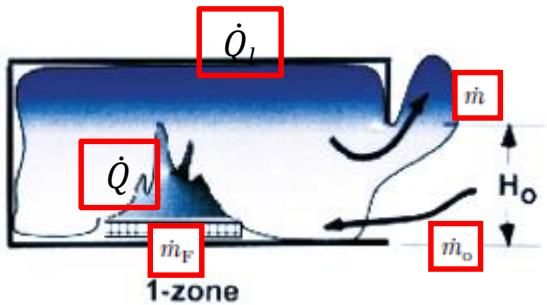

Action de la flamme

Sur la résistance mécanique

de la structure

Feu généralisé avec sortie de flammes

# 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

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

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

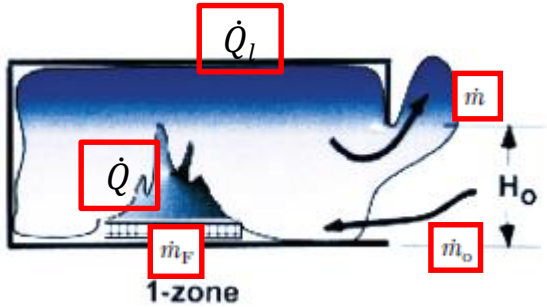
$$\frac{d(mY)}{dt} + \dot{m}Y - \dot{m}_o(0.233) = -0.233 s\dot{Q}/\Delta h_c$$

===> $Y = 0.233(1 - \phi)/(1 + \phi/s)$ 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: Feu pleinement développé




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

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

$\dot{Q}$= dég. chaleur

$\dot{Q}_l$= pertes

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

$$\dot{m}\, cp\, (T - T0) \Longrightarrow \dot{Q}_{l,s} / \dot{m}_0\, c_p = Xs\, (T - T0)$$

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

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

$$h\, A\, (T - T0) \Longrightarrow \dot{Q}_{l,w} / \dot{m}_0\, c_p = X_w (T - T0)$$

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

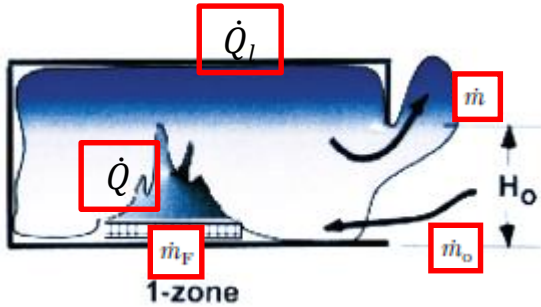
$$1/h = 1/(h_{cv} + h_r) + 1/h_{cd}$$

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

$$A_0\, \sigma\, (T^4 - T_0^4) \Longrightarrow \dot{Q}_{l,r} / \dot{m}_0\, c_p = X_r (T - T0)$$

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

# Equations simplifiées: Feu pleinement développé




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

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

$\dot{Q}$= dég. chaleur

$\dot{Q}_l$= pertes

*En résumé*

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

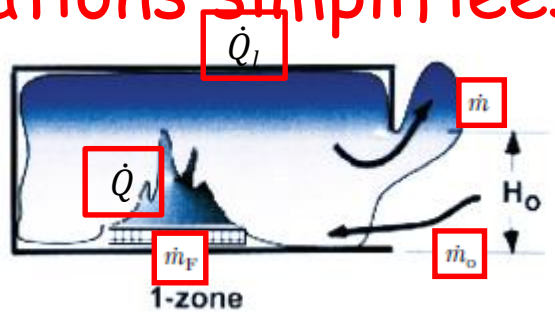
$$\Longrightarrow \dot{Q}_l = \dot{m}_0\, c_p\, (Xs+Xw+Xr)\, (T-T0)$$

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

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

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

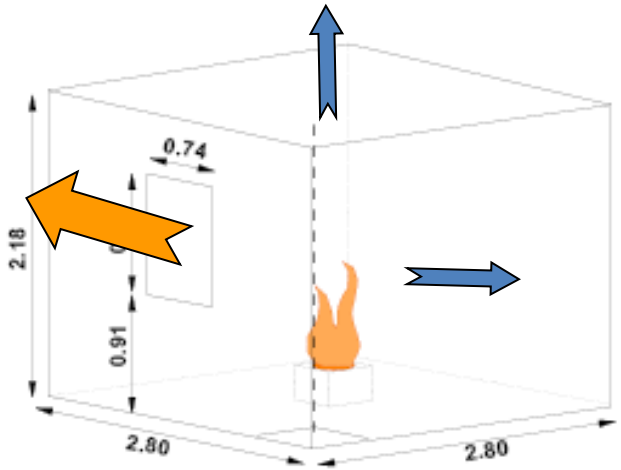
# Equations simplifiées: Feu pleinement développé



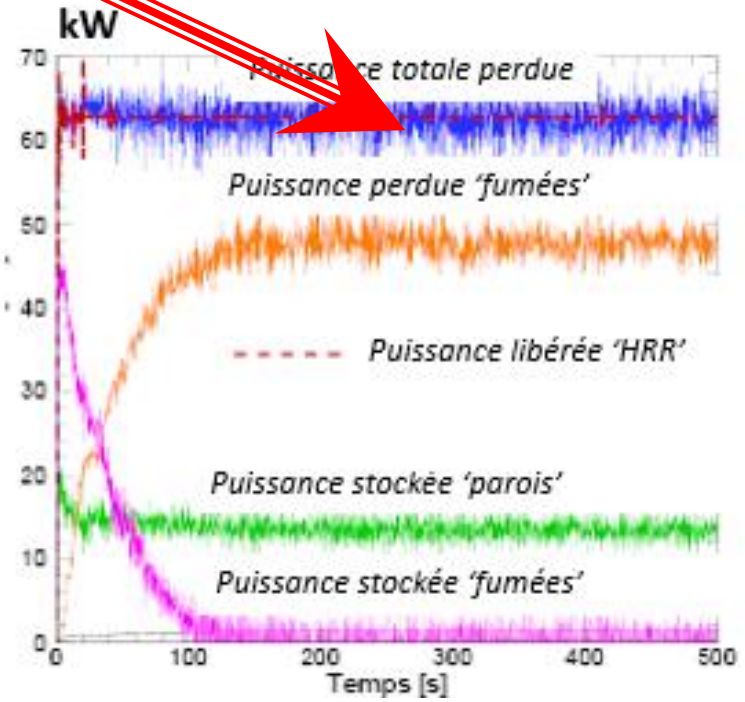

$\dot{Q}_l$= pertes  $\dot{Q}$= dég. chaleur

$\dot{Q}_l / \dot{m}_0 \; c_p$ = (Xs+Xw+Xr) (T-T0): Feu pleinement développé

Source: thèse S. Désanghère, 2006

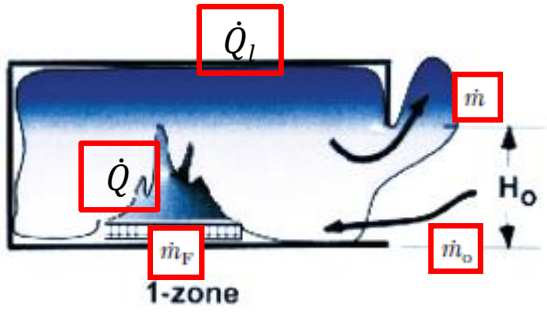



**dimensions en mètres.**




**Répartition des puissances au cours du temps**

# Equations simplifiées: Feu pleinement développé




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

$\dot{Q}$= dég. chaleur

$\dot{Q}_l$= pertes

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

$$\dot{Q} = \dot{m}_0\ c_p\ (Xs + Xw)\ (T - T0)$$

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

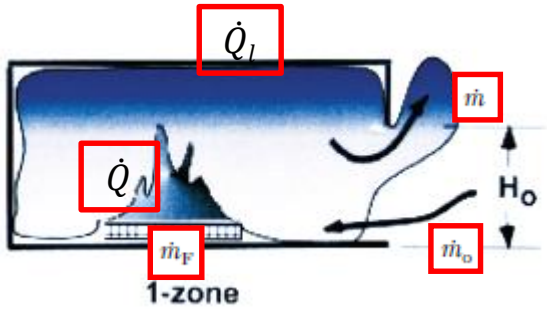
$$X_w = h\ A / \dot{m}_0\ c_p \quad avec\ 1/h = 1/(h_{cv} + h_r) + 1/h_{cd}$$

$$h_{cd} = k_w/\delta$$

$$\dot{m}_0 = 0.5\ A0\ \sqrt{H}$$ (Kg/s, formule de Kawagoe)

Exemple: ordre de grandeur de Xs, Xw pour un local 4*4*2,5m3
Ouverture = porte L=0,9m et H0= 2,2m
Cp air 1kJ/kg/K
Bac essence diamètre 50 cm
h = 10 W/m2
Application: calcul de T-T0
Le debit d'air entrant est donné par la formule de Kawagoe

# Equations simplifiées: Feu pleinement développé




loi de comportement

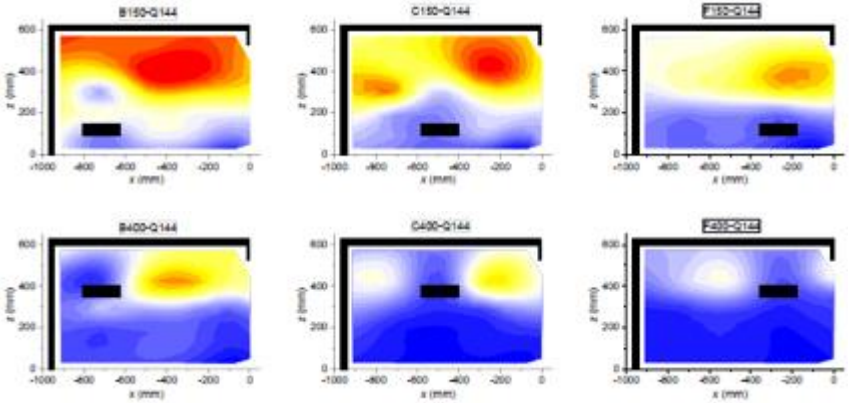
$$T = \dot{Q} / [\dot{m}_0 \, c_p \, (Xs + Xw)] + T0$$

Il existe plusieurs lois empiriques, basées sur cette loi de comportement

Ex: MQH

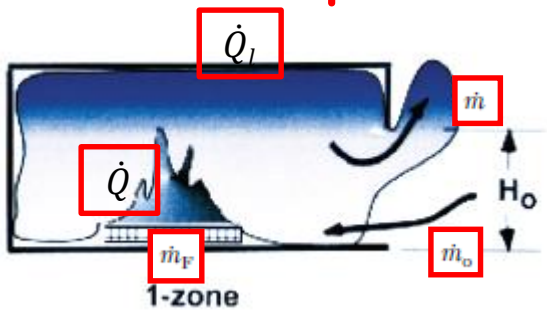
$$T_g = 480 \times \left( \frac{\dot{Q}}{\sqrt{g} c_p \rho_\infty T_\infty A \sqrt{H}} \right)^{2/3} \times \left( \frac{h_K A_T}{\sqrt{g} c_p \rho_\infty T_\infty A \sqrt{H}} \right)^{-1/3} + T_\infty \qquad h_K = \frac{k_w}{\delta}$$

**ATTENTION: ce ne sont que des lois de comportement**




Effects of burner location (left to right) and burner height (top to bottom) for $Q$ = 144 kW.
( D. Kolaitis ISFEH proceedings 2022)

# Equations simplifiées: Feu pleinement développé




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

$$\dot{Q}_l = \dot{m}_0\, c_p\, (Xs + Xw)\, (T - T0)$$

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

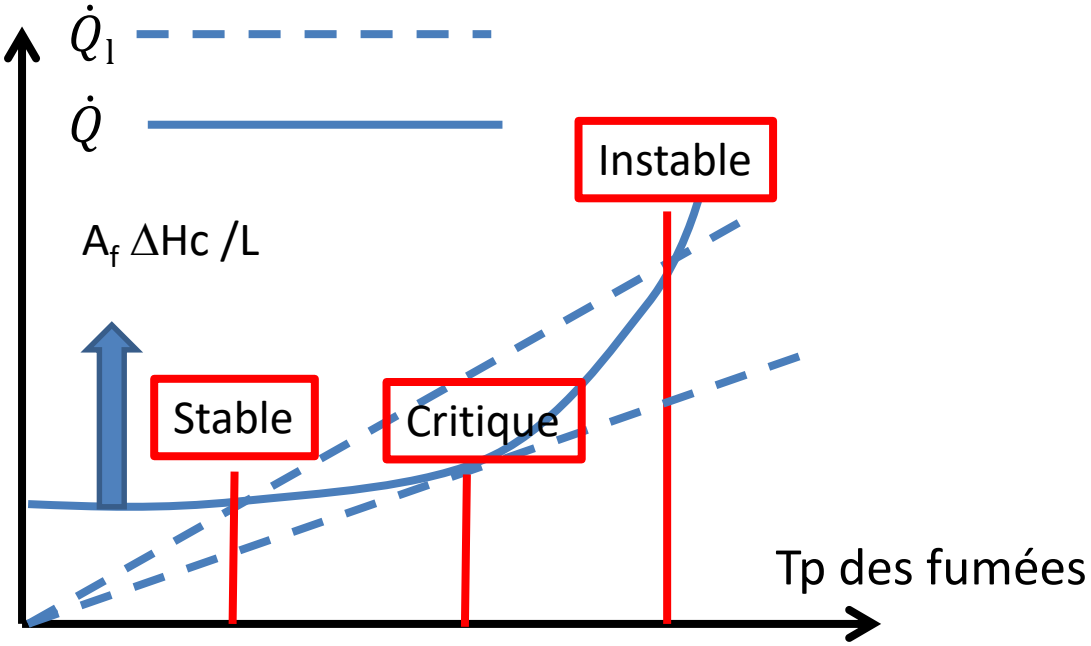



Diagramme de Semenov

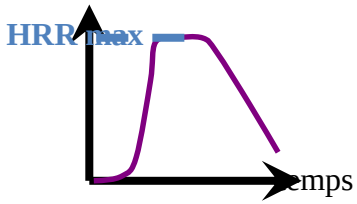
## Plan de l’exposé

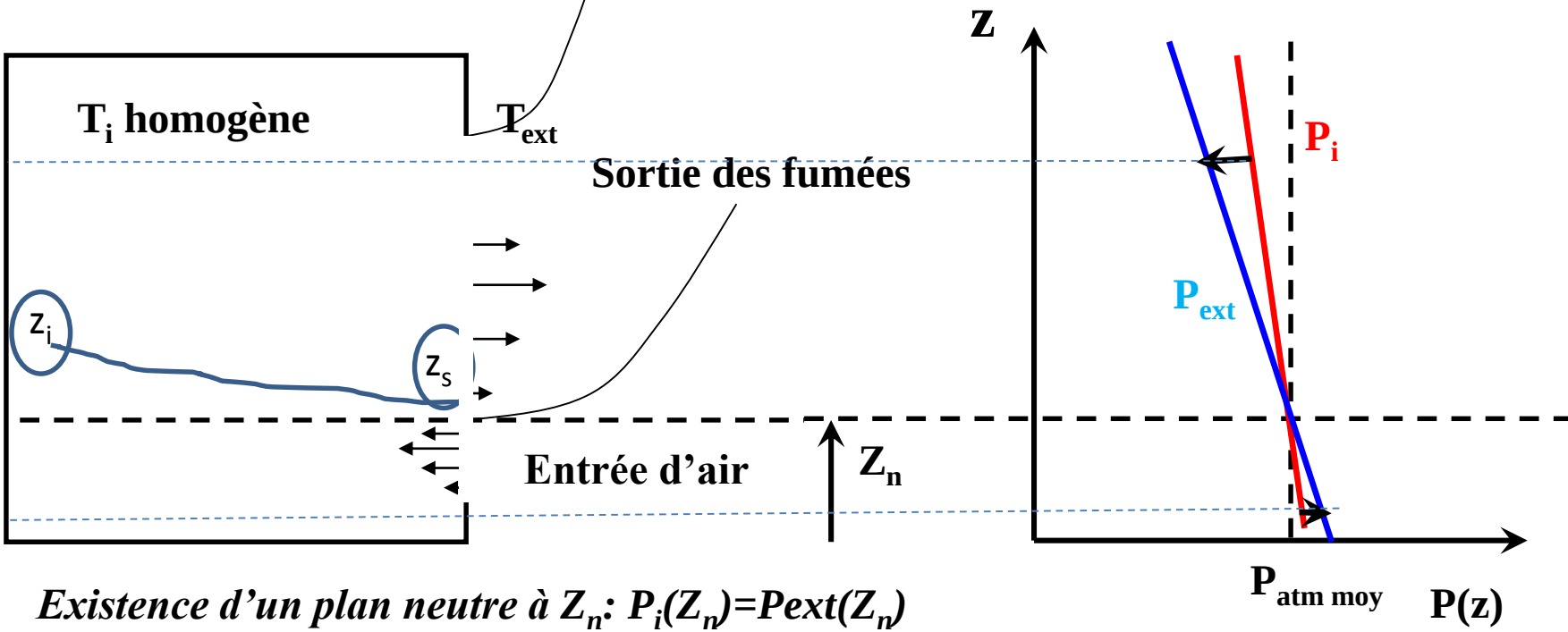
- Introduction
- Quelques notions sur le développement d’un incendie
- Les équations  simplifiées, lois de comportement
- **La ventilation naturelle des foyers**
- Comportement des feux et des flammes sous-ventilés
- La production des espèces toxiques
- Flammes externes

# La ventilation naturelle des foyers

Feu pleinement développé

➢ *débits des fumées et d'air à travers une ouverture*




*Existence d'un plan neutre à $Z_n$: $P_i(Z_n)=Pext(Z_n)$*

➢ **loi de la statique des fluides:**

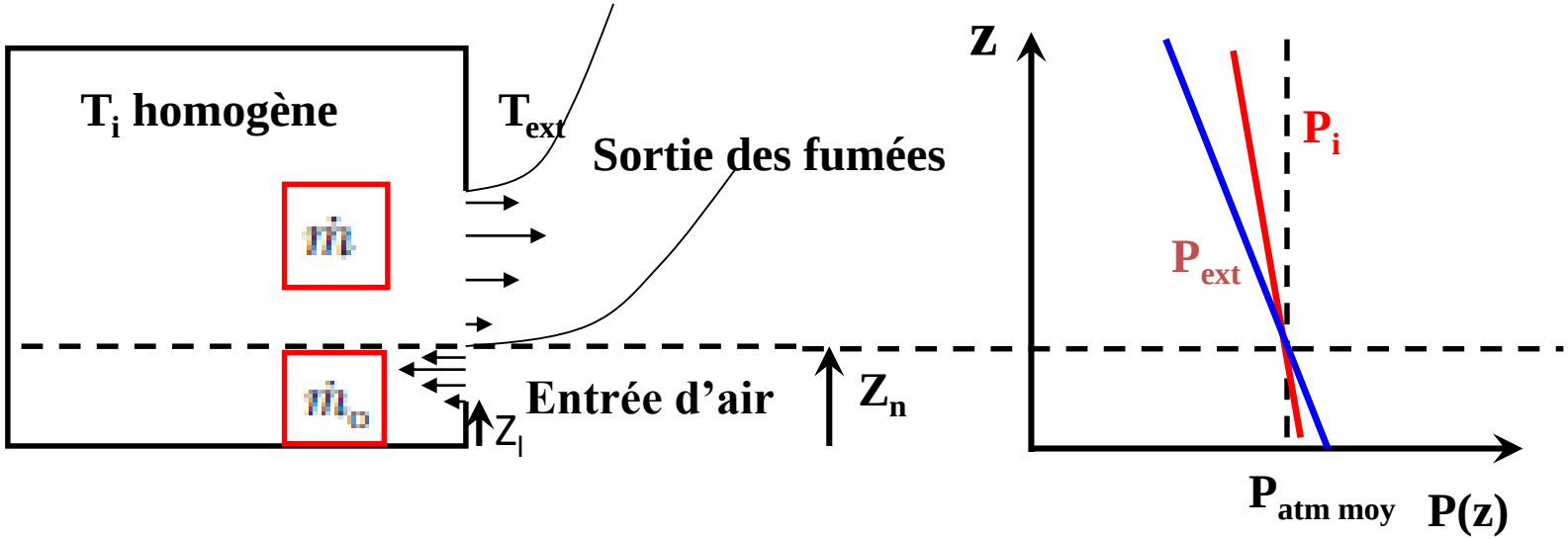
$$P_{ext}(z) - P_{ext}(zn) = -\rho_{ext}(z-zn)$$
$$P_{int}(z) - P_{int}(zn) = -\rho_{int}(z-zn)$$

*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 $z_l$ à $z_n$** $\dot{m}_0/L = C_d\, \rho_{ext} \sqrt{2g} \sqrt{1 - \frac{T_{ext}}{T_i}} \frac{2}{3} (Zn-Zl)^{3/2}$ Et aussi $\dot{m}/L = f[(Zu-Zn)^{3/2}]$

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

$$\dot{m}_0 = \frac{2}{3} C_d\, \rho_{ext} \sqrt{2g} \sqrt{1 - \frac{T_{ext}}{T_i}} \frac{A0\sqrt{H}}{[1+\left(\frac{T_i}{T_{ext}}\right)^{\frac{1}{3}}\left(1+\frac{\emptyset}{r}\right)^{\frac{2}{3}}]^{3/2}}$$

A0 : surface de l'ouverture
H: hauteur
L: largeur

➢ **Conclusion: avec les valeurs usuelles des paramètres**

$\dot{m_0} = 0.5\, A0\, \sqrt{H}$ (Kg/s, formule de Kawagoe)

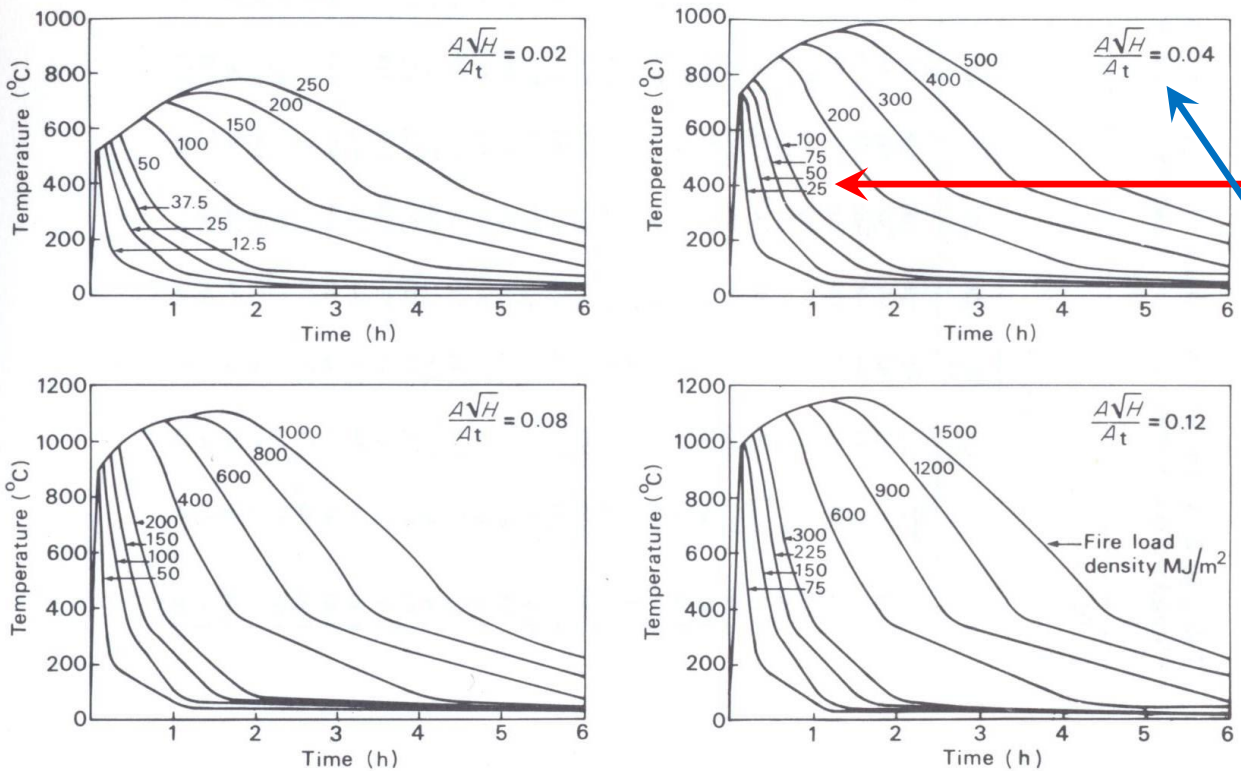
*correctif de Délichatsios*

$\dot{m_0} = 0.5\, A0\, \sqrt{H}$ - $0.5\dot{m}_F$

# La ventilation naturelle des foyers

## Modèle à une zone: approche simple pour l'ingénierie de la sécurité incendie

- 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



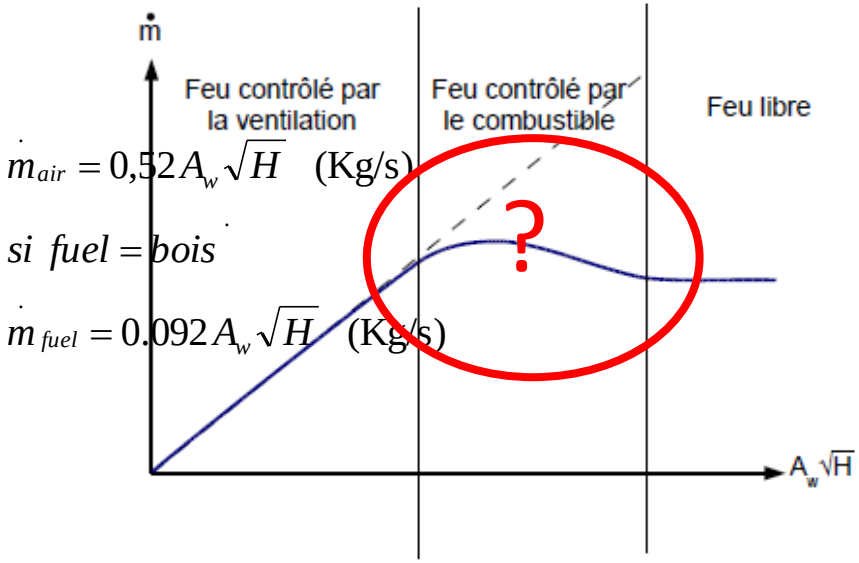

temperature–time curves for compartment fires with different load densities (MJ/m$^2$) and opening factors, $A_w H^{1/2}/A_t$ (m$^{1/2}$). (Pettersson *et al.*, 1976. Reproduced by permission of The Swedish Institute of Steel Construction). (Pettersson's "Standard compartment", Wall thickness 0.2m, k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

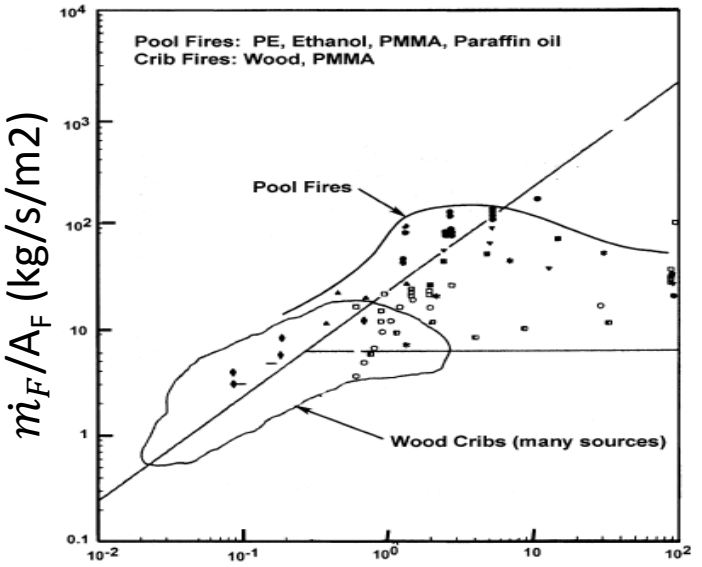
# La ventilation naturelle des foyers

## ➢ *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

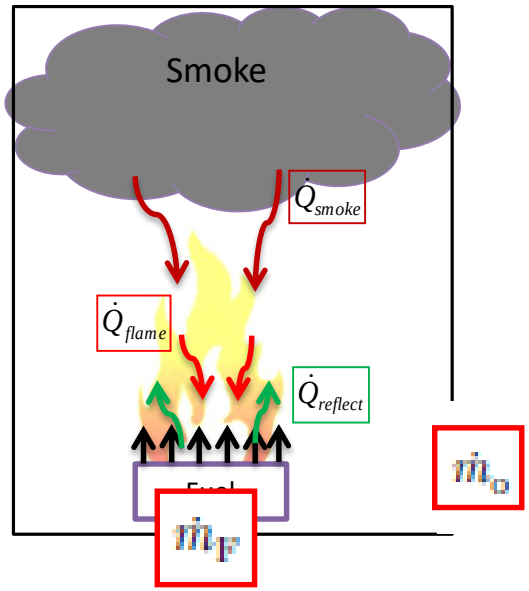



Bullen & Thomas
Proc Comb. Inst 1978

# La ventilation naturelle des foyers

➢ *perte de masse*

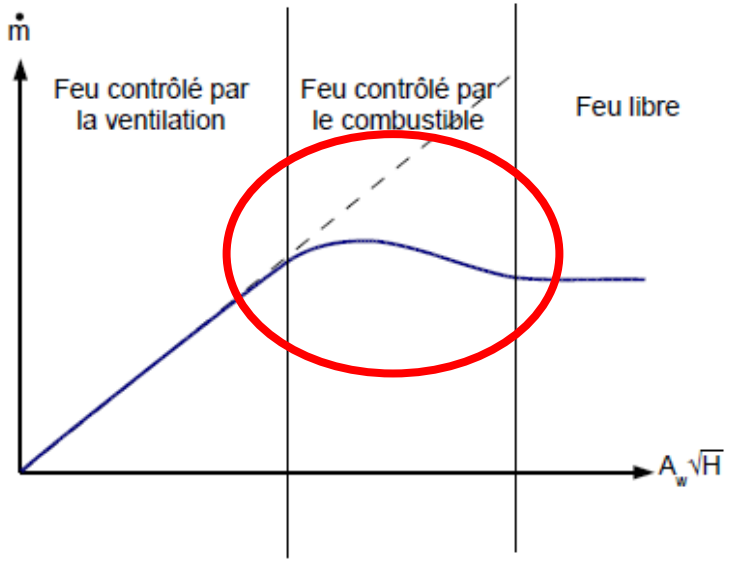



$$q'' = q''_{fl,c} + q''_{fl,r} + q''_e - \varepsilon\sigma T_s^4 - q''_{ext,c}$$

**Effet du confinement**

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

$$\dot{m}_F'' = \dot{m}_{F,free}'' \; f(Y_{O2}) + F_{s+w\to F}\,\sigma\,(T^4 - T_0^4)/L$$

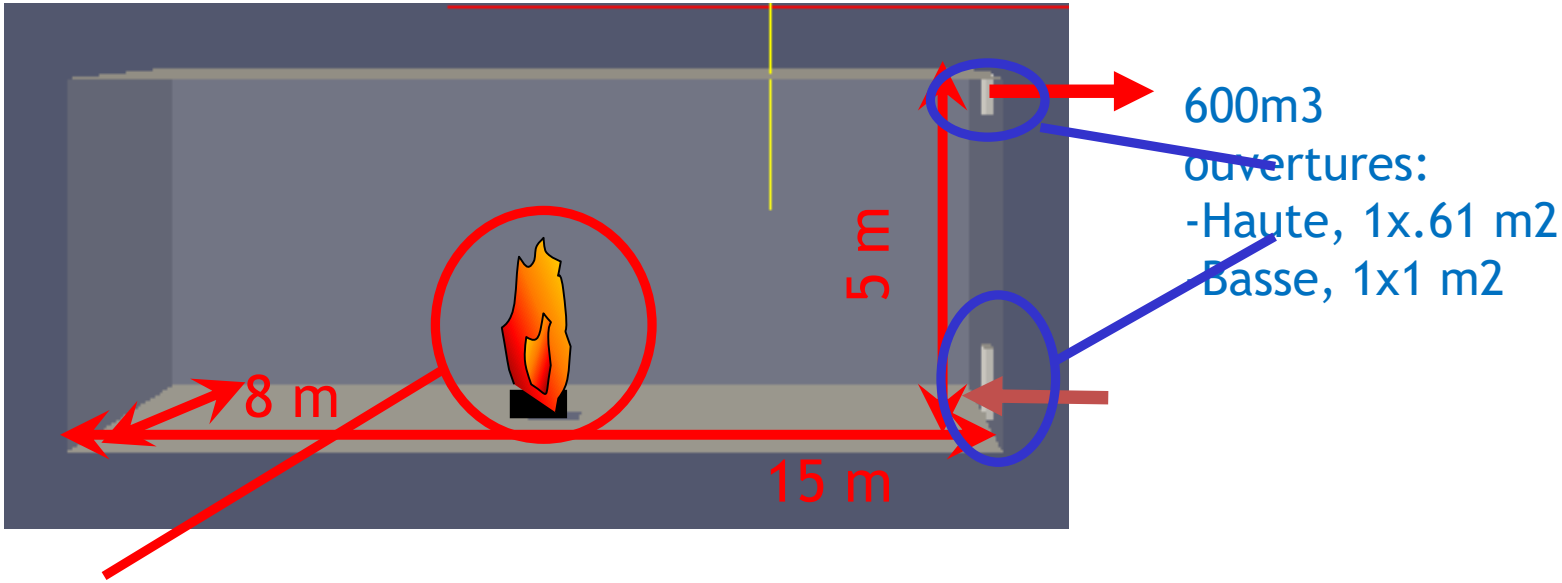


# La ventilation naturelle des foyers

## ATTENTION aux limites des lois de comportement

*Modélisation de la pression avec openFoam/fireFoam dans un local ventilé naturellement*

Bouches de ventilation haute et basse sur le même mur vertical




- source au centre, surface d'injection 0.83m2

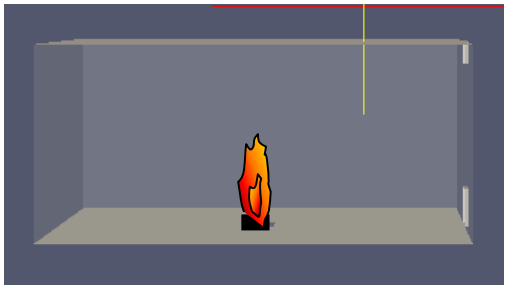
Combustion methane

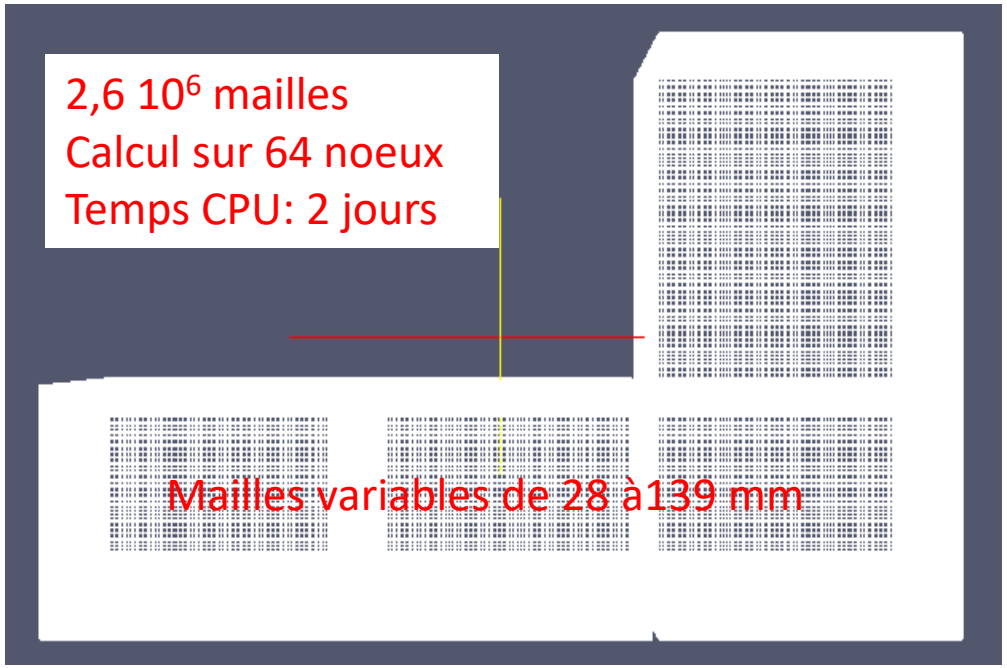
HHR = 188 $t^2$ ---> ***HRR= 2,7 Mw*** at t=120s (NFPA: very fast)

# La ventilation naturelle des foyers

*Modélisation de la pression avec openFoam/fireFoam dans un local ventilé naturellement*

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

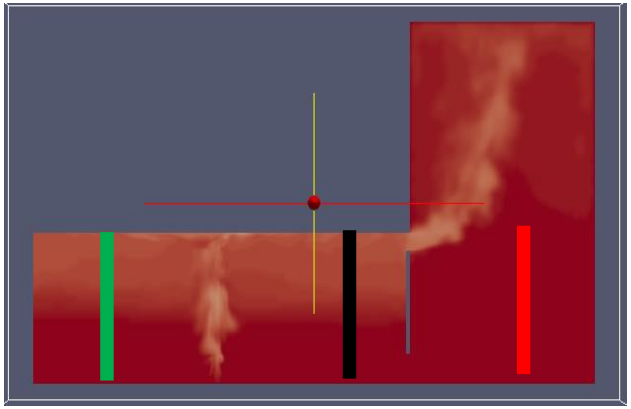


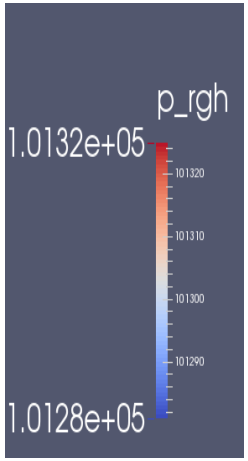


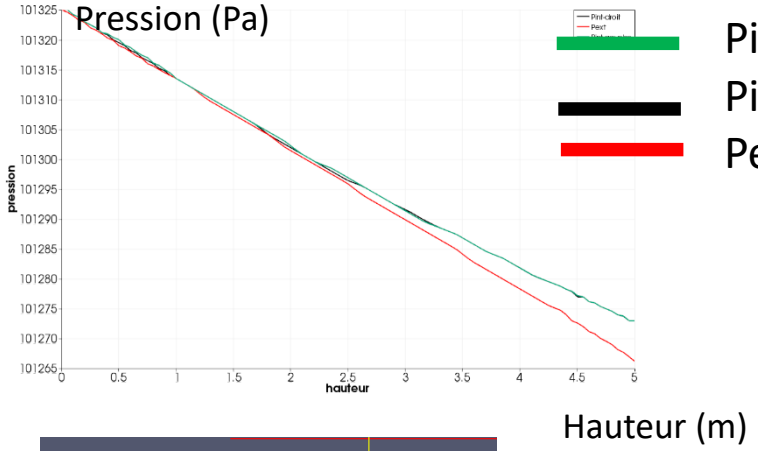
# La ventilation naturelle des foyers

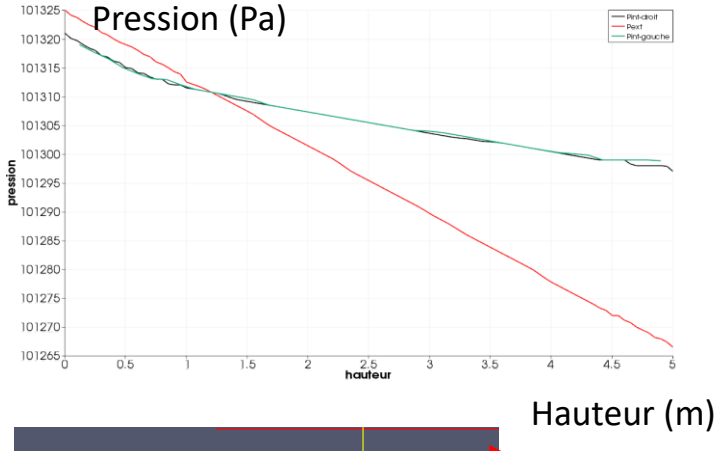
## ATTENTION aux limites des lois de comportement

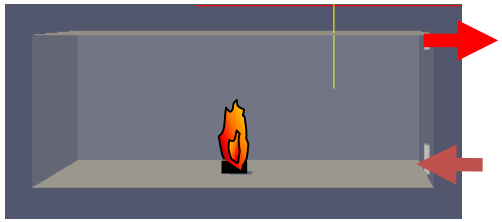
Deux cas: le foyer (2,7 MW) au milieu ou au fond du local

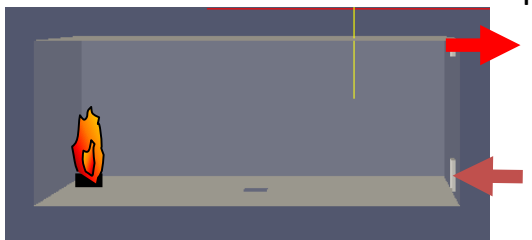




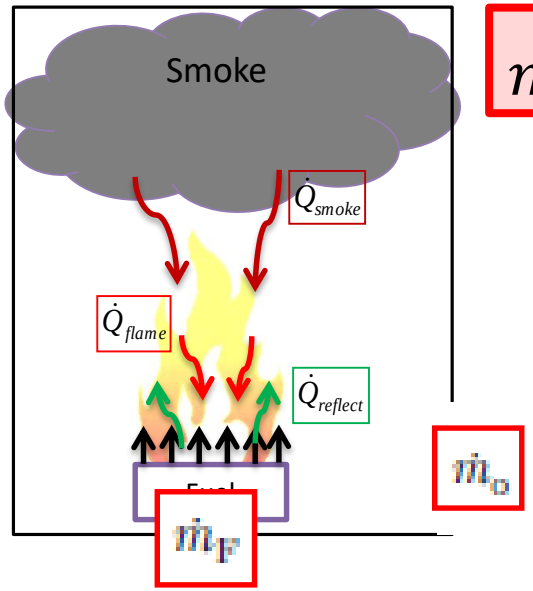





## Plan de l’exposé

- 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




$$\dot{m}_F \text{ “}= \dot{m}_{F,free}\text{“ } f(Y_{O2}) + F_{s+w\rightarrow F}\sigma\,(T^4 - T_0^{\ 4})\,/L$$

Si O2 ↘ fortement:

perte de masse ↘

combustion ↘

Extinction systématique ?

*avant extinction*

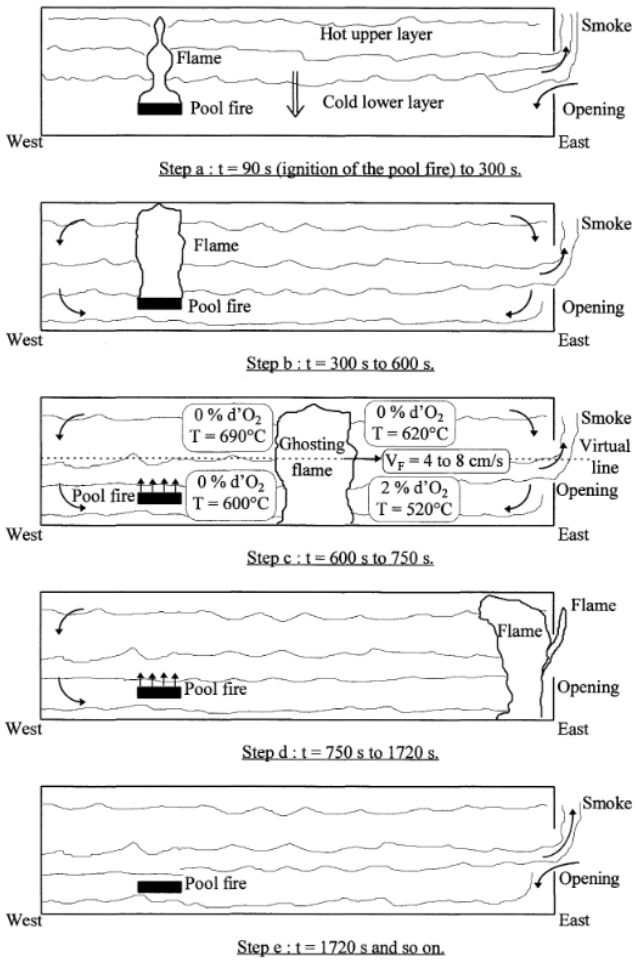
- Baisse de la perte de masse et du dégagement de chaleur
- **la flamme adopte un comportement différent**
- *La flamme se décroche de la zone de combustible*
- *Elle peut se déplacer dans l'enceinte*

*Flamme fantôme (ghosting flame)*

# Comportement des feux et des flammes sous-ventilés

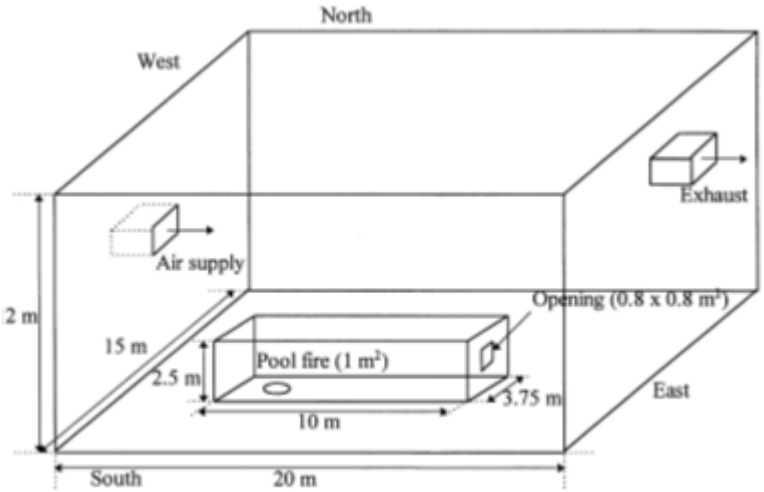
## *CONDITIONS PARTICULIÈRES GÉOMÉTRIQUES ET DE SOUS-VENTILATION*

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




## *GHOSTING FLAMES*

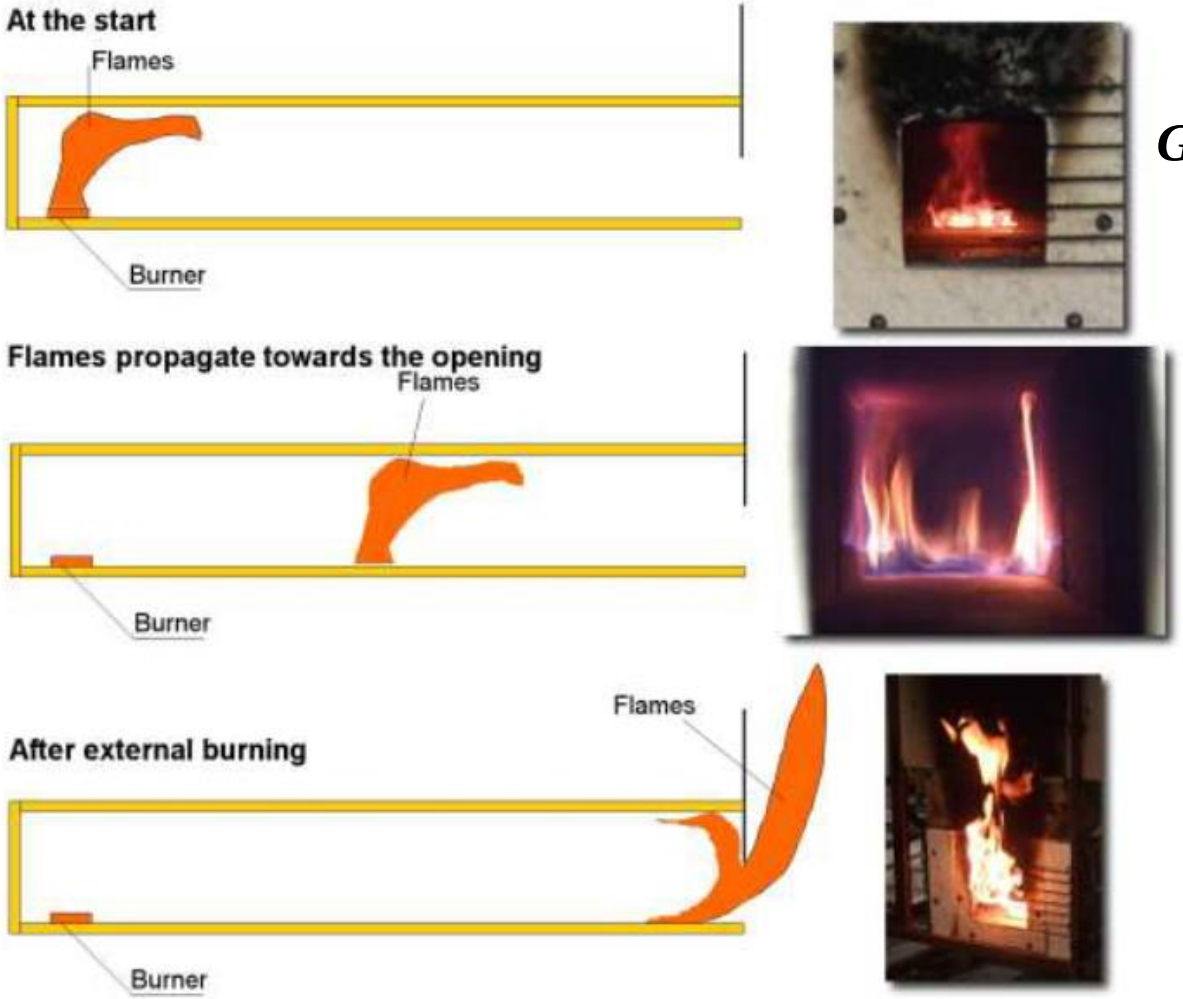
TBP/TPH pool fire




Audoin et Al, 5th IAFSS conference 1997

# Comportement des feux et des flammes sous-ventilés

***CONDITIONS PARTICULIÈRES GÉOMÉTRIQUES ET DE SOUS-VENTILATION***




***GHOSTING FLAMES***

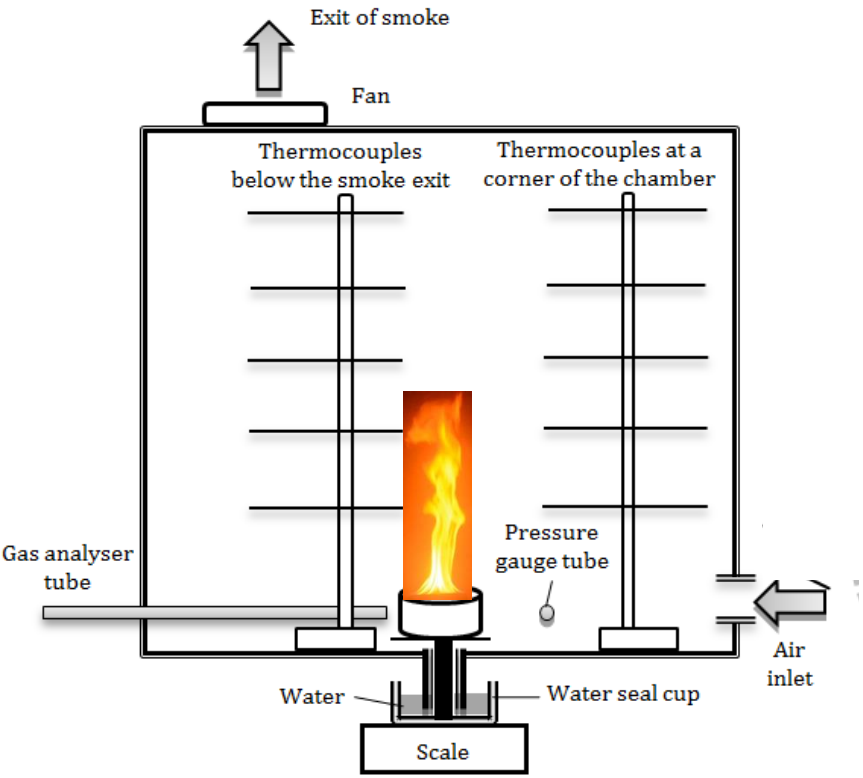
**ATTENTION**:
bruleur propane
===> forçage du MLR
pas de feedback

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

# Comportement des feux et des flammes sous-ventilés

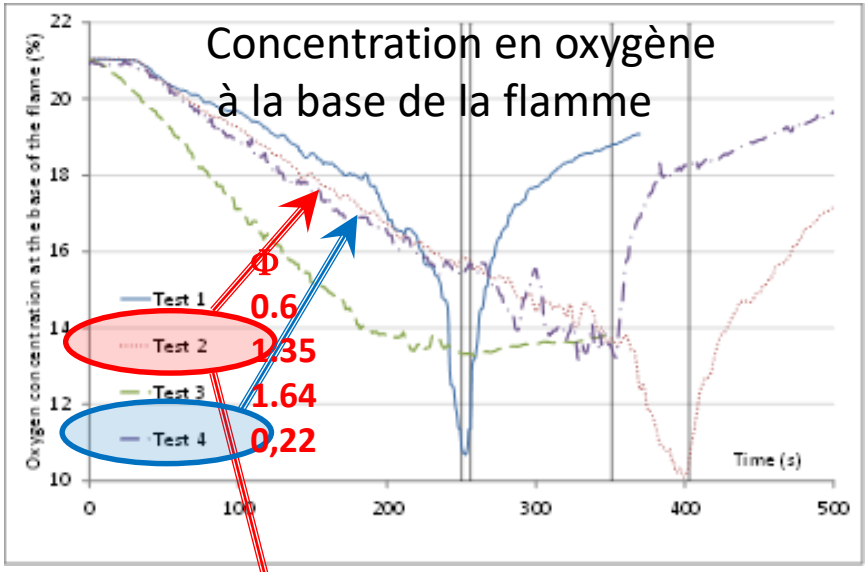
*Ce phénomène s'observe aussi avec une enceinte mécaniquement ventilée*

Dispositif du CORIA

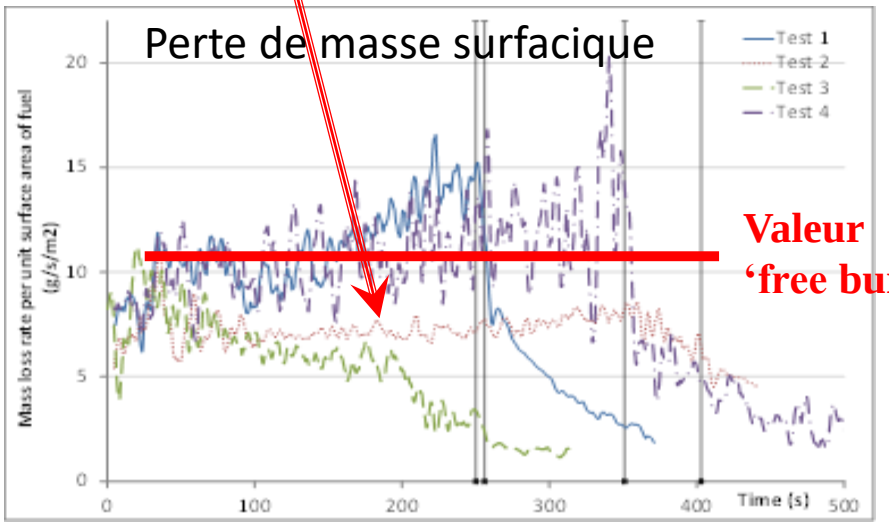



Combustible : n-Heptane
2 bac pyrex de 11cm de diamètre

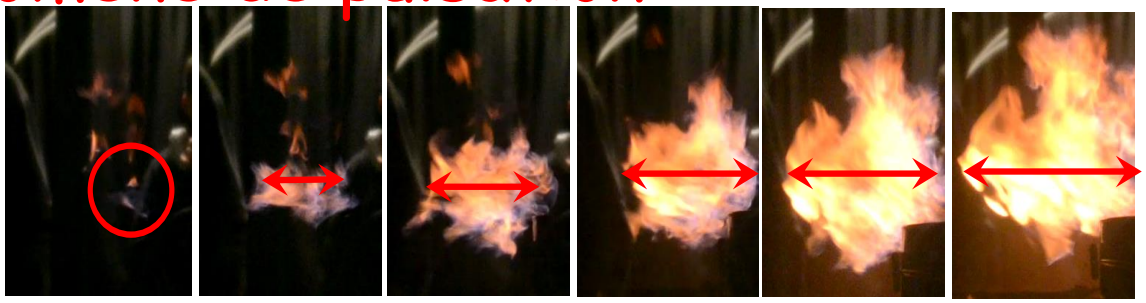
Coppalle, AOSFST 2015




Les barres verticales = temps d'extinction



# 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

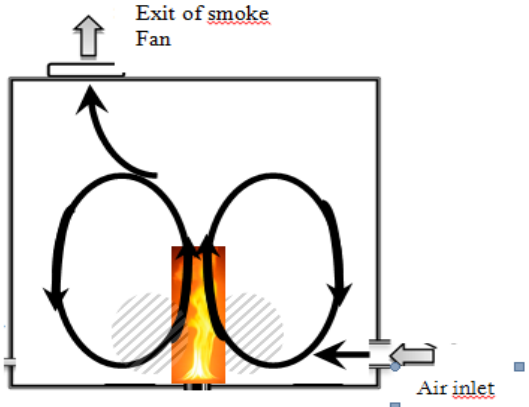
-2 Développement vertical d'une flamme lumineuse

-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 flame

(Video test 3 extinction)

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

===>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, …

## Les effets du CO

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

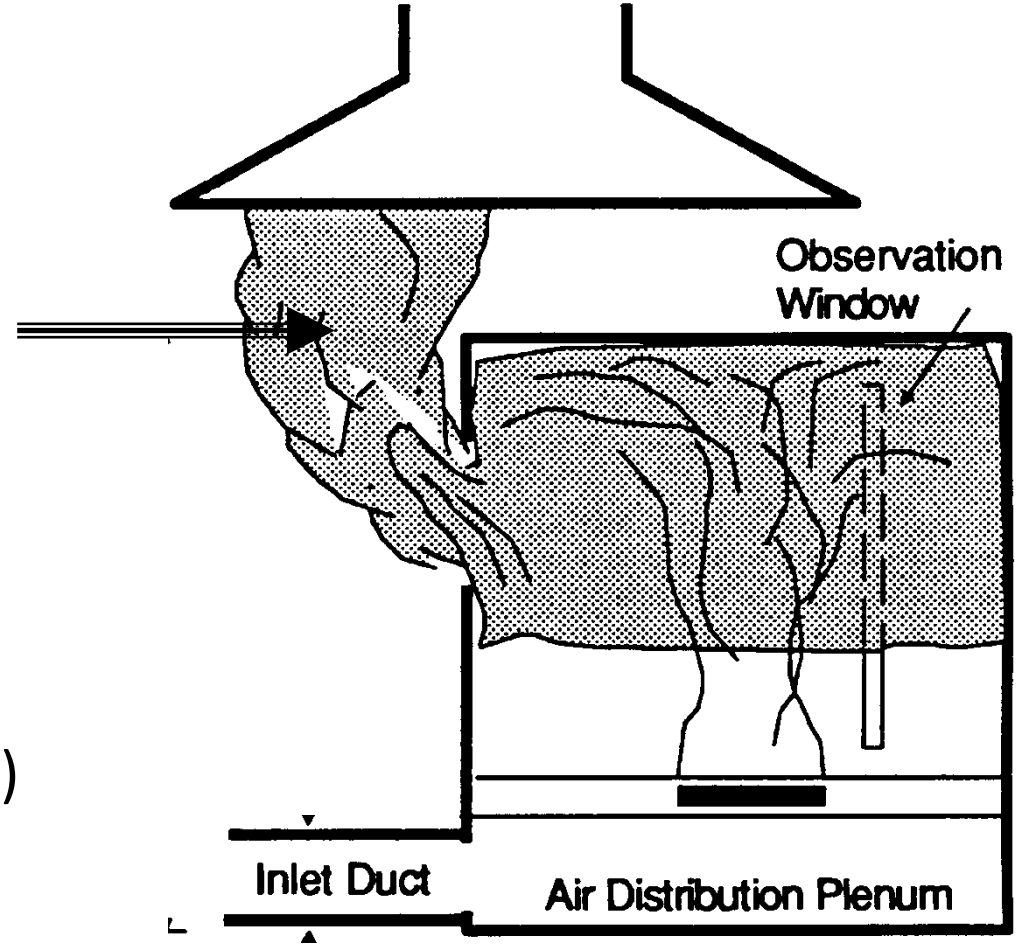
# la production des espèces toxiques

## *La production de CO*

La production de CO dépend de la ventilation du foyer

si le régime du feu est sous ventilé ===> CO ↗

CO

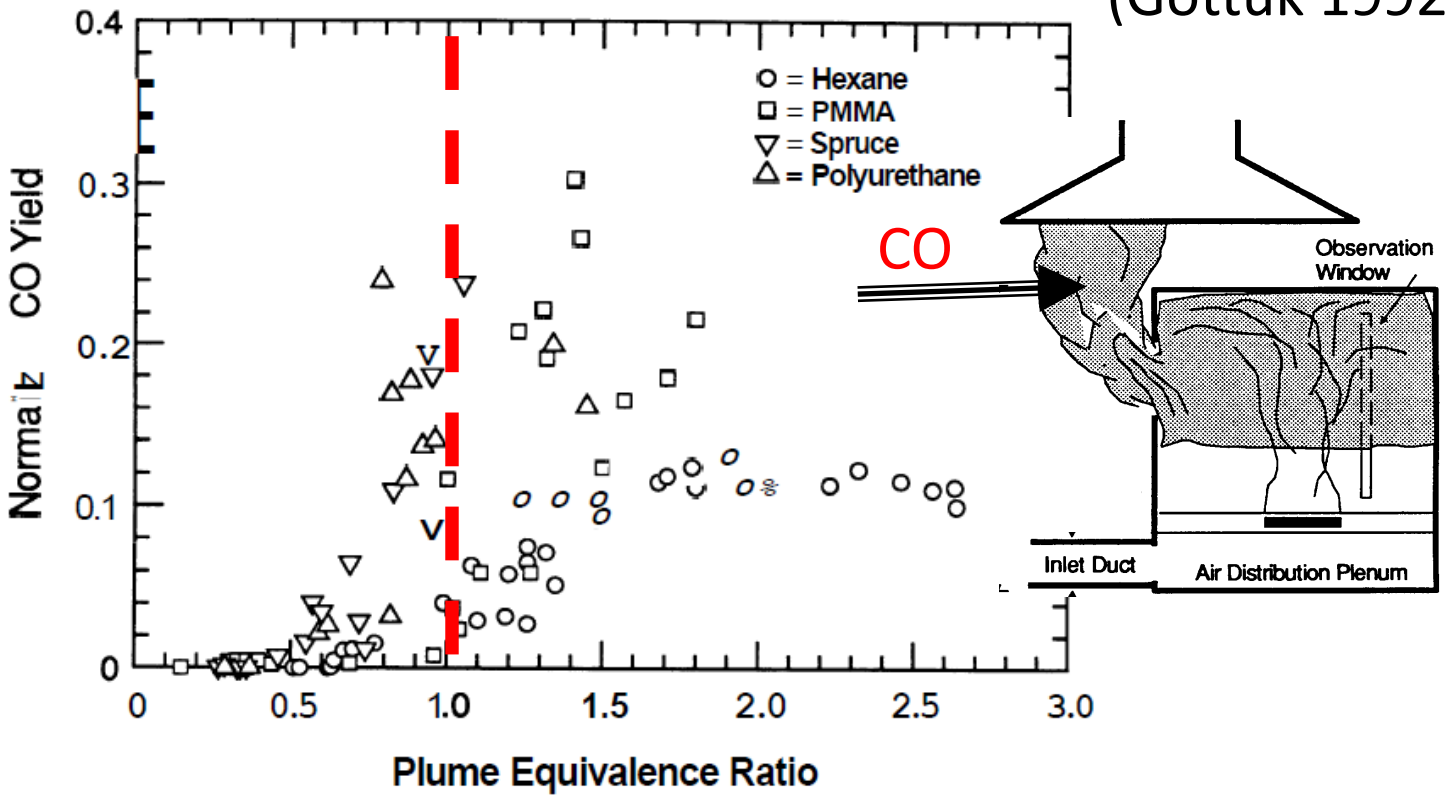



(Gottuk 1992)

# la production des espèces toxiques

## *La production de CO*

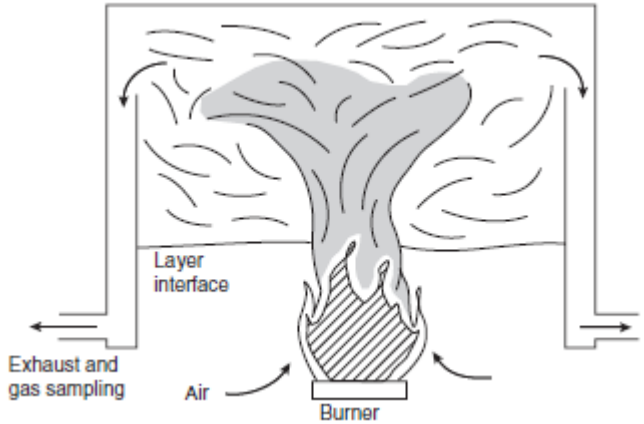
(Gottuk 1992)




**Notion de Yield:**

$Yield_{CO}$ = debit massique CO / debit massique comb

# la production des espèces toxiques




*Autre dispositif:Beyler*

*(SFPE Handbook 2002)*

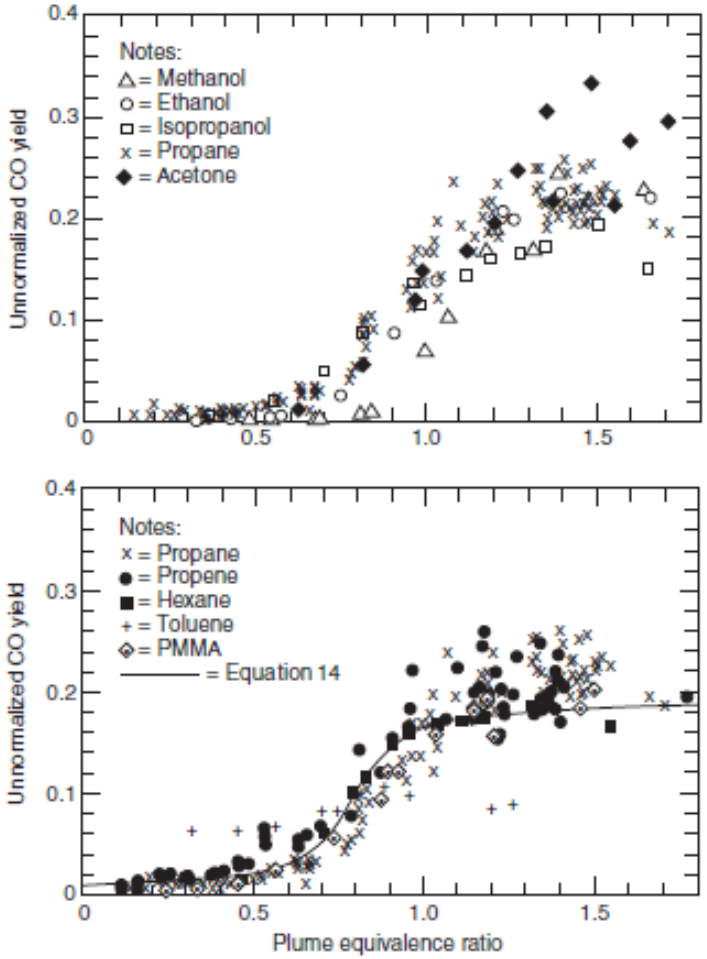



**Figure 2-5.4.** *Unnormalized carbon monoxide yields as a function of the plume equivalence ratio for various fuels studied by Beyler in a hood apparatus.*[8,9]

L'idée de ces expériences est d'essayer de voir si il existe une relation CO=CO(GER)

===> comme on peut le voir, cela n'est pas évident!

# la production des espèces toxiques

## *Calcul et prédiction: 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 $\phi$ )***

➢ ***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 certains outils CFD, la modélisation du CO dans les fumées repose sur la notion de Yield=Yield(GER)

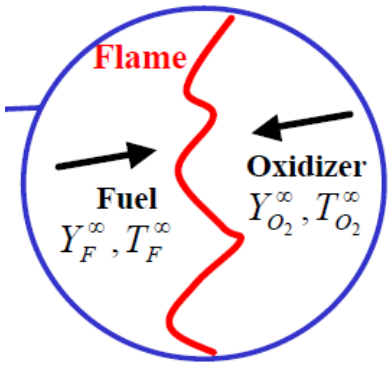
# la production des espèces toxiques

## *Quelle approche ?* *Exemple : le CO*

➢ Quel est le problème rencontré quand on veut prédire la production de CO ?

$$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$$ ===> Il faut calculer la production Wco (g/s)

$$\frac{dCO}{dt} = -[CO]\sqrt{[O_2]}k\, e^{-\frac{E}{RT}}$$ (Loi d'Arrhenius)




*Mais la chimie du CO n'est pas infiniment rapide!*

La production Wco (g/s) de CO est donc dépendante

-de l'efficacité de mélange de la turbulence

-et de la cinétique chimique de formation/oxydation

Damköhler turbulent $Da_T = \frac{\tau_{\text{écoulement turbulent}}}{\tau_{\text{réaction}}}$ ≈1

Comment calculer $\overline{W}_{co} = \overline{\frac{dCO}{dt}}$ ?

➢ On peut négliger les effet du mélange (chimie lente) et écrire (FDS)

$$\frac{d\overline{CO}}{dt} = -[\overline{CO}]\sqrt{[\overline{O_2}]}k\, e^{-\frac{E}{R\overline{T}}}$$ (Loi d'Arrhenius)

Il existe des travaux proposant des approches pour bien représenter ces phénomènes:

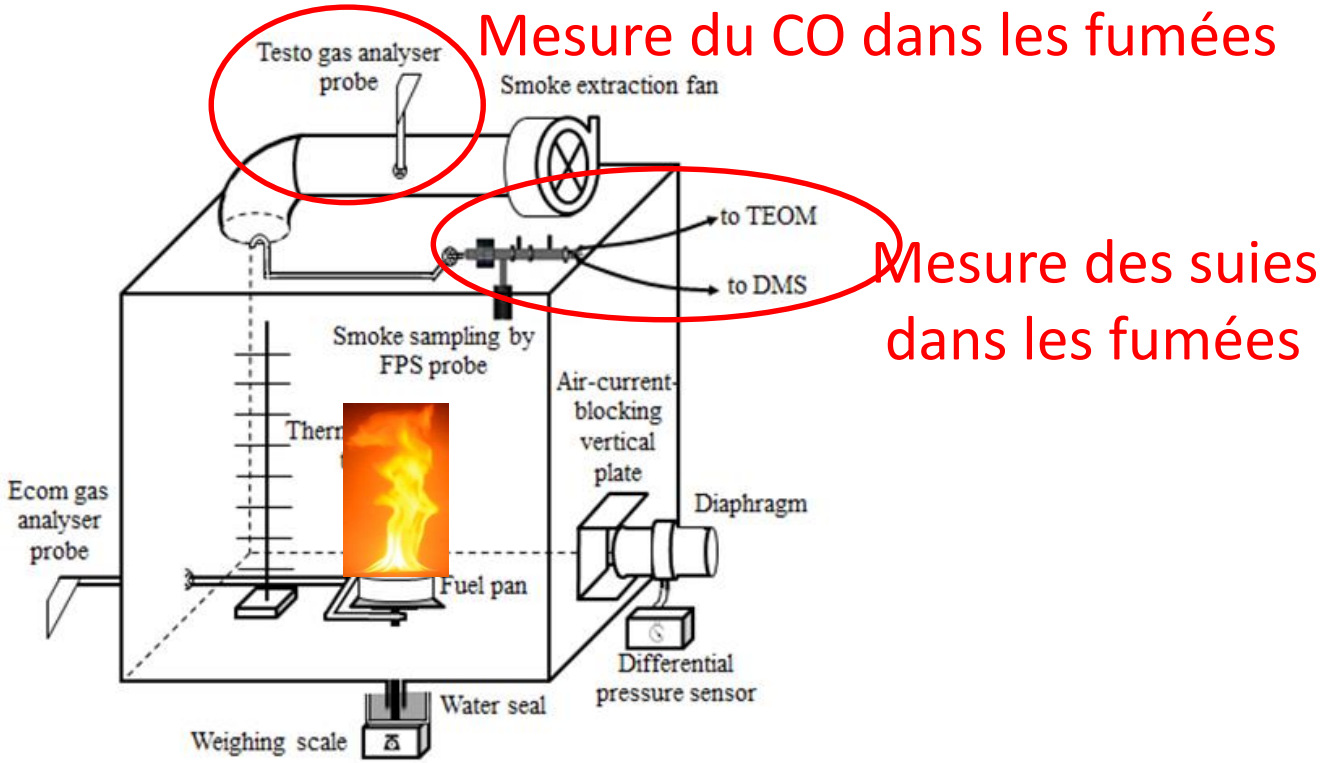
➢ simple: A. Trouvé, Int Symp Comb 2007

➢ Des méthodes plus sophistiquées permettant de prendre en compte des cinétiques chimiques détaillées (méthodes de tabulation)

# la production des espèces toxiques

## *Avec une ventilation mécanique*

Dispositif du CORIA

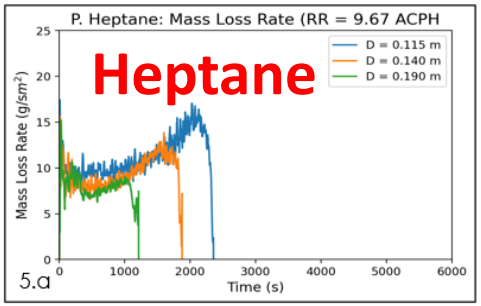


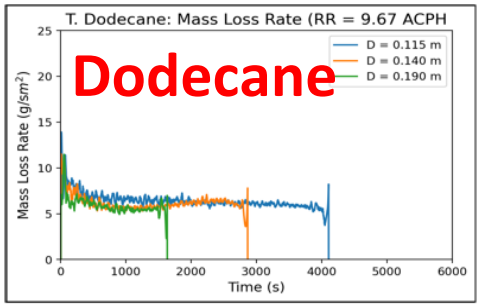

**Résultats**
**pour différents combustibles**

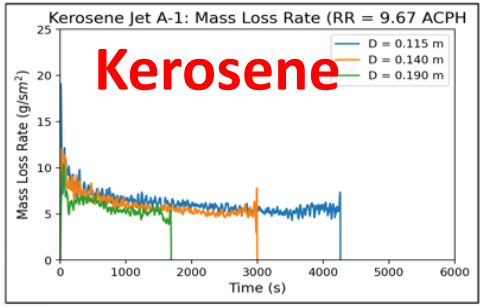
# la production des espèces toxiques

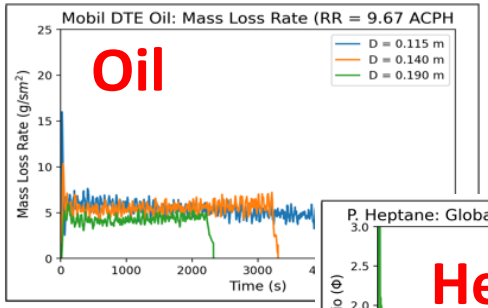
## *Avec une ventilation mécanique*

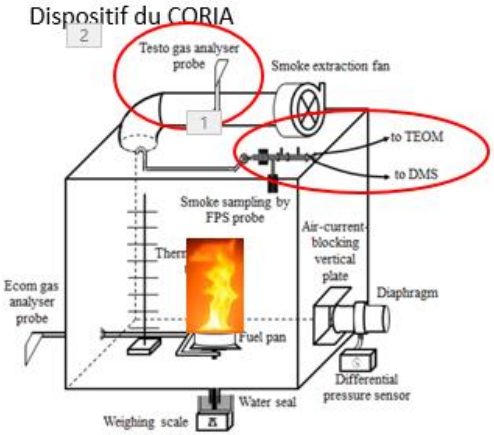
**Résultats pour différents combustibles et différent diamètres**

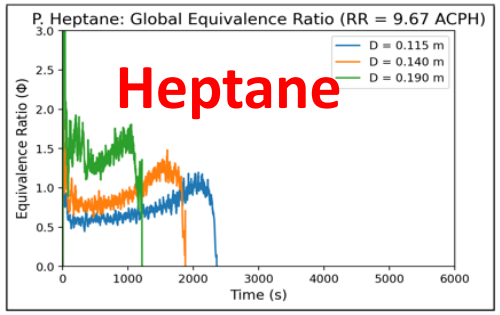


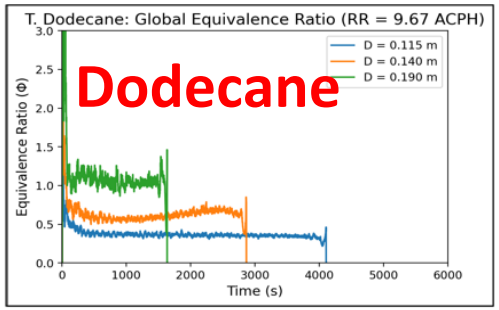



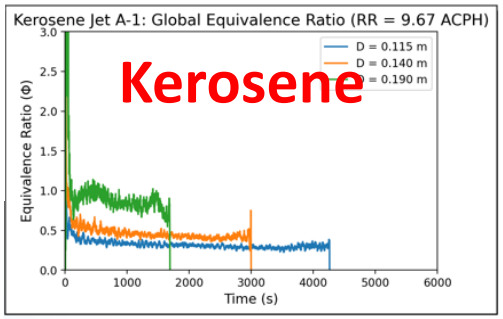



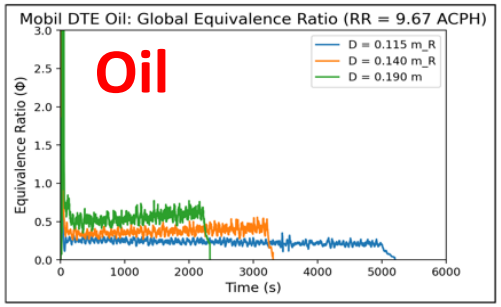



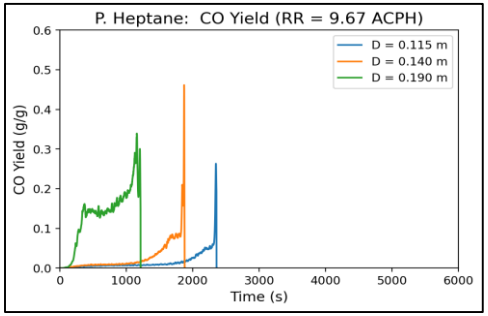



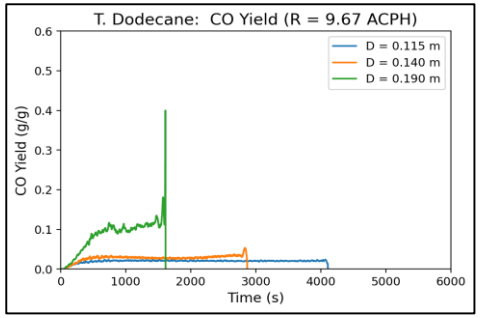

| Experiment | Heat Combustion (kJ/g) | Heat Vaporization (kJ/g) | Flash Point (°C) | Boiling Temperature (°C) | Smoke point height (cm) |
|---|---|---|---|---|---|
| Pure n-Heptane [2] | 46.4 | 0.365 | - 4 | 98 | 14.7 |
| Technical Dodecane [2] | 49.9 | 0.361 | 71 | 170 - 195 | 13.7 |
| Kerosene Jet A-1 | 43.338 | 0.431 | 42.5 | 152.6 | 2.5 |
| Mobil DTE Oil [3] | 42.1 | - | 218 - 234 | 300 - 400 | - |

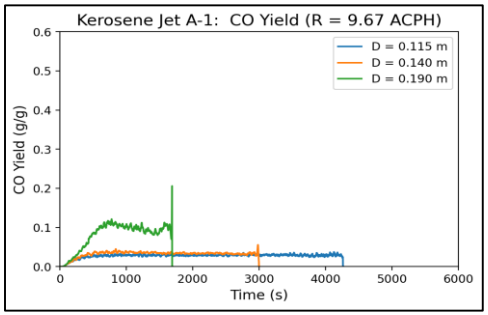
# la production des espèces toxiques

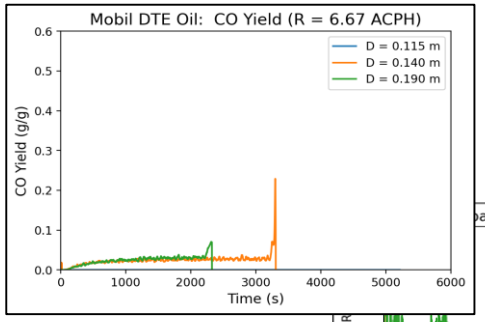
## *Avec une ventilation mécanique*

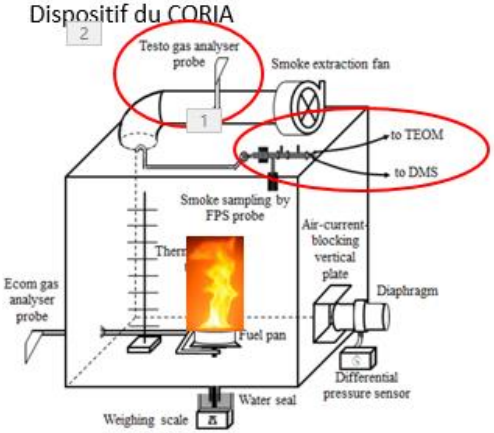
**Résultats pour différents combustibles et différent diamètres**

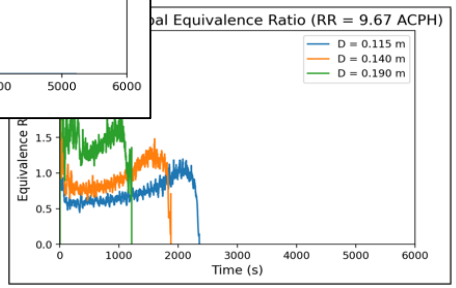


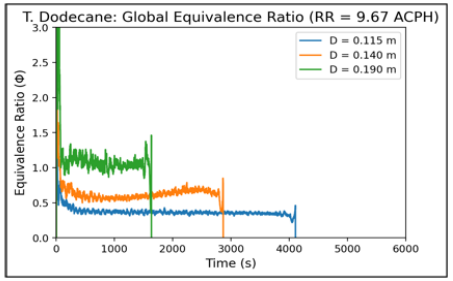



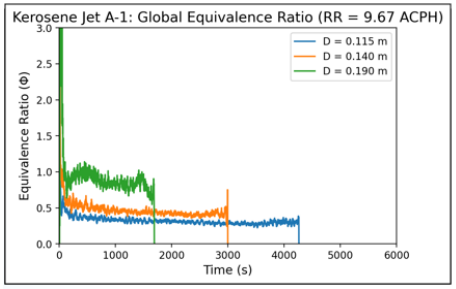



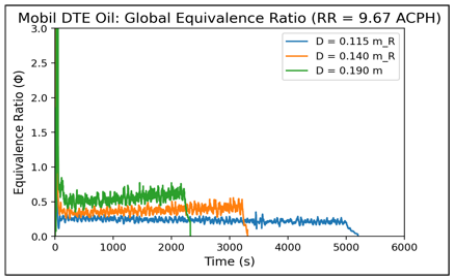



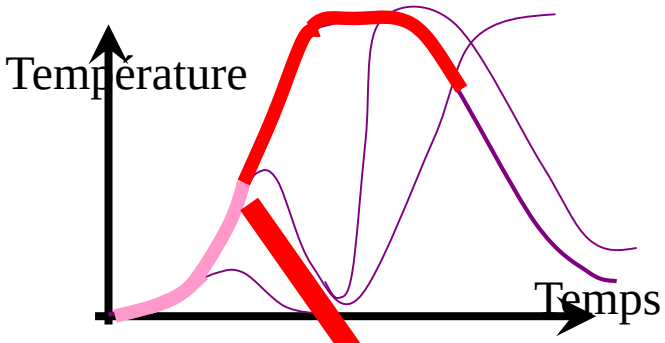



## Plan de l’exposé

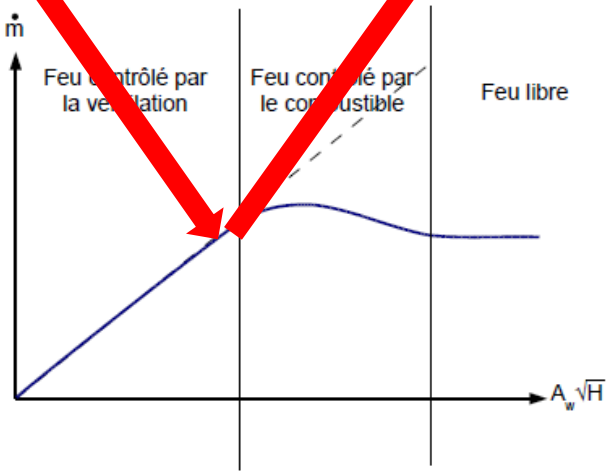
- Introduction
- Quelques notions sur le développement d’un incendie
- Les équations  simplifiées, lois de comportement
- La ventilation naturelle des foyers
- Comportement des feux et des flammes sous-ventilés
- La production des espèces toxiques
- **Flammes externes**

# Flammes externes
## sortie de flammes

***SI EMBRASEMENT GENERALISE: Feux contrôlés par la ventilation***



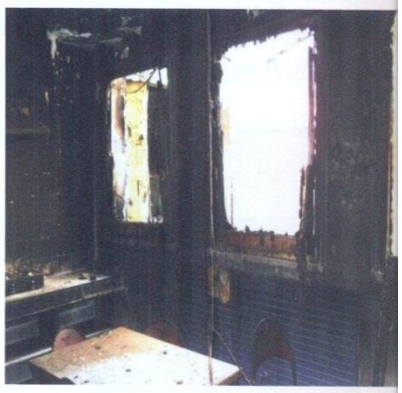
Experimental Study of the Effects of Fuel Type, Fuel distribution, and Vent Size on Full-Scale Underventilated Compartment Fires in an ISO 9705 Room **NIST Technical Note 1603 (2008)**



# Flammes externes

➢ **De nouveaux problèmes suite aux 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

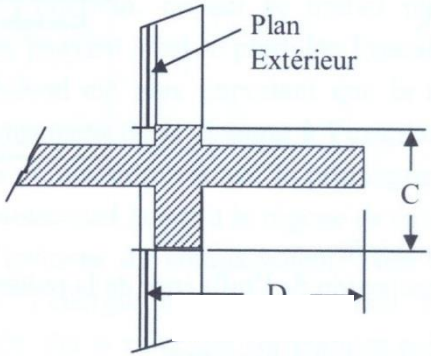


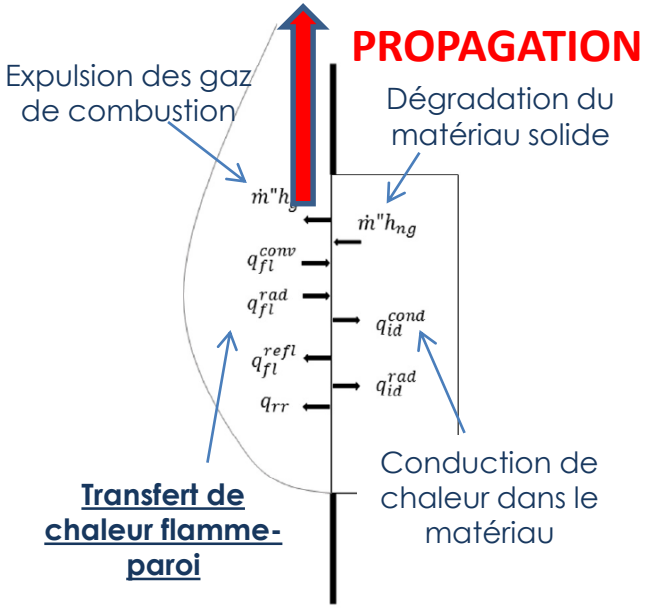

Figure 1.3-2: Définition du C+D

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***

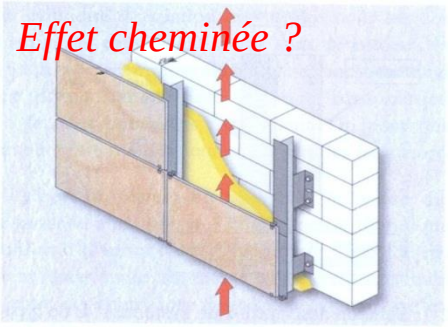
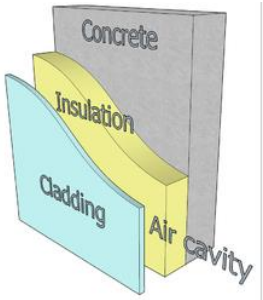
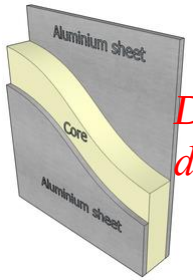



Schéma d'un système ITE de type façade ventilée.



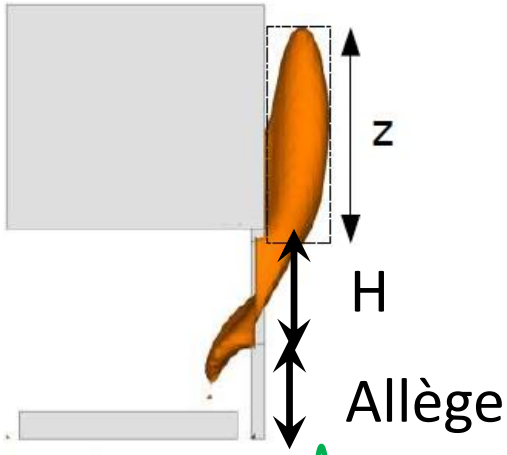

*Déformations et défauts d'intégrité?*

# Flammes externes

## ➢ les dimensions des 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.)

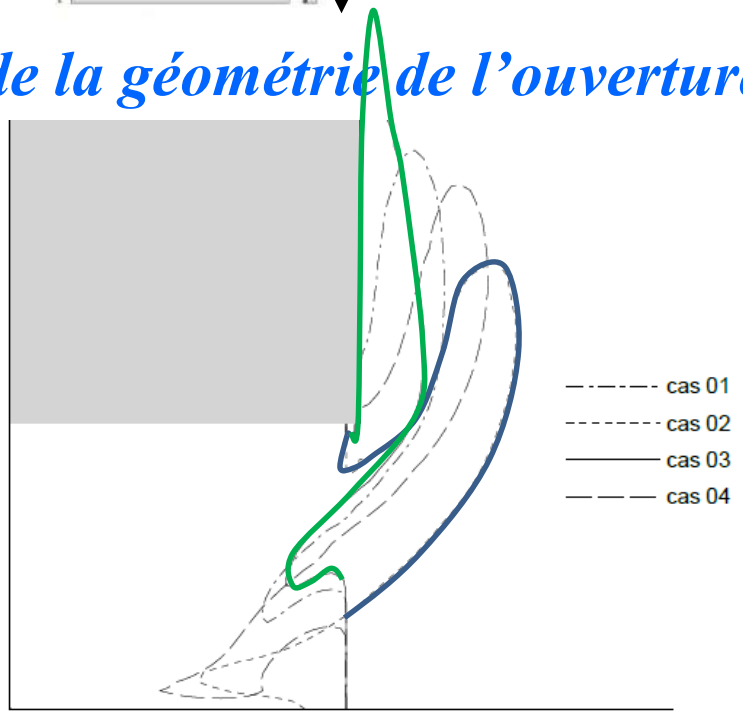



## ➢ *Problème complexe: forte influence de la géométrie de l'ouverture*

(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 |

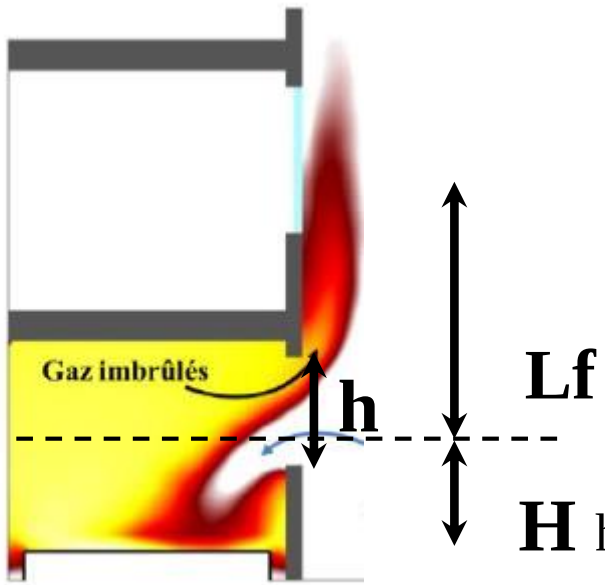



===> Effet important sur le flux à la paroi!

Contours de température 500 °C
coupe verticale passant par le milieu du compartiment.

# Flammes externes

## ➢ les dimensions des flammes




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

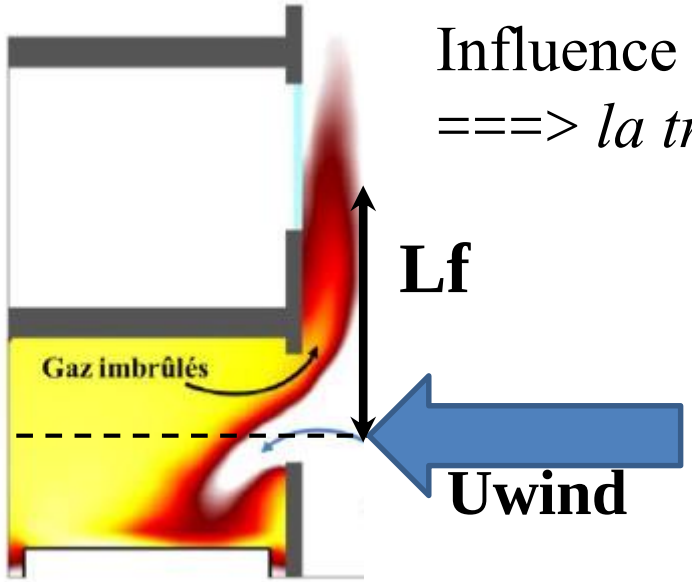
$$\frac{L_f - H_n}{(A\sqrt{h})^{2/5}} = 2\left(\frac{HRR_{ext}}{\rho_\infty c_p T_\infty A\sqrt{gh}}\right)^{0.44}$$

**H** hauteur du plan neutre

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

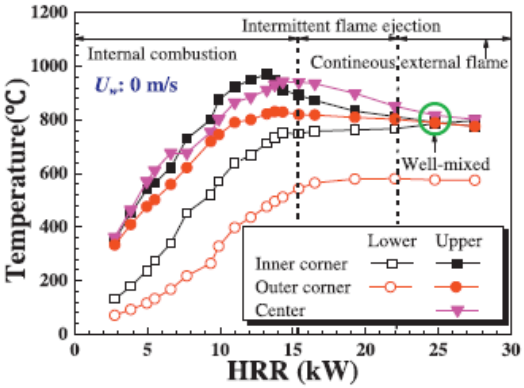
$HRR_{ext} = HRR_{tot} - HRR_{in}$ *($HRR_{tot}$ peut être délicat à calculer)*

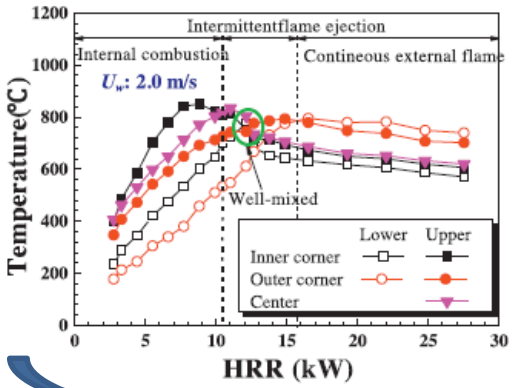
# Flammes externes: Effet du vent

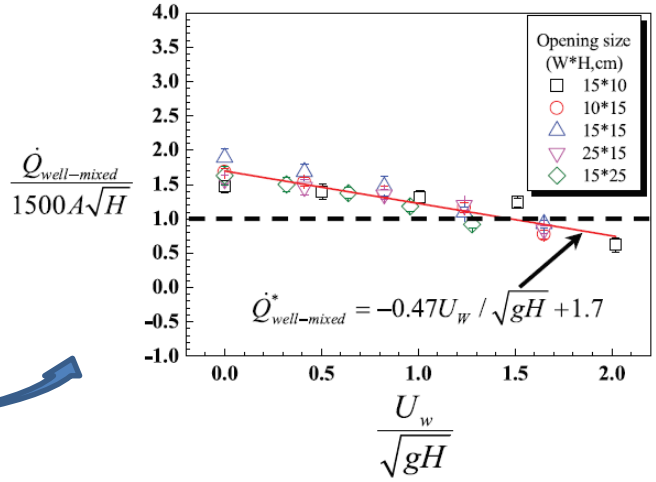



Influence à l'intérieur: *Renforce le mélange ?*
*===> la transition vers 'flamme externe' change ?*

(Longhua Hu Symp Comb 2017 )




*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
- ….