

Feux confinés: Aspects phénoménologiques

Alexis Coppalle

UMR 6614 CORIA (INSA Rouen)

e-mail : alexis.coppalle@coria.fr

Plan de l'exposé

- Introduction
- Quelques notions sur le développement d'un incendie
- La propagation d'une flamme sur un matériau
- Les équations simplifiées, lois de comportement
- La ventilation naturelle des foyers (et la sortie des fumées)
- 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 ?*

La réponse est OUI :

il existe des modèles (3D) de dynamique de feu
et la puissance des moyens de calcul est grande

Mais ces lois de comportements permettent de comprendre et d'estimer
les phénomènes importants
les principaux paramètres
les ordres de grandeur

➤ *Pour connaître 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 (géométrie, couplage,...)**
====> **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
- Désenfumage
- Evacuation



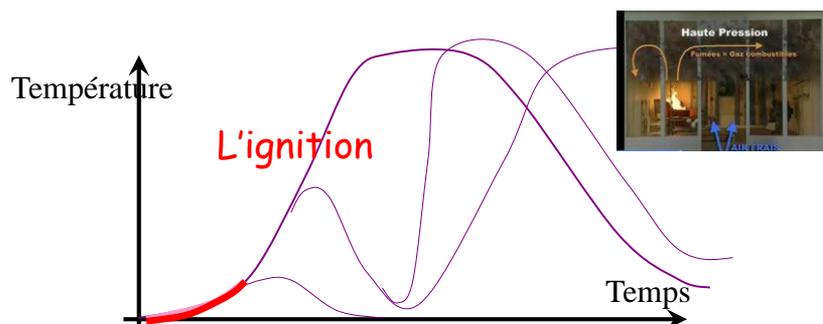
Plan de l'exposé

- Introduction
- **Quelques notions sur le développement d'un incendie**
- La propagation d'une flamme sur un matériau
- 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'embrassement généralisé



- Ignition des gaz
- Ignition des liquides
- Ignition des solides

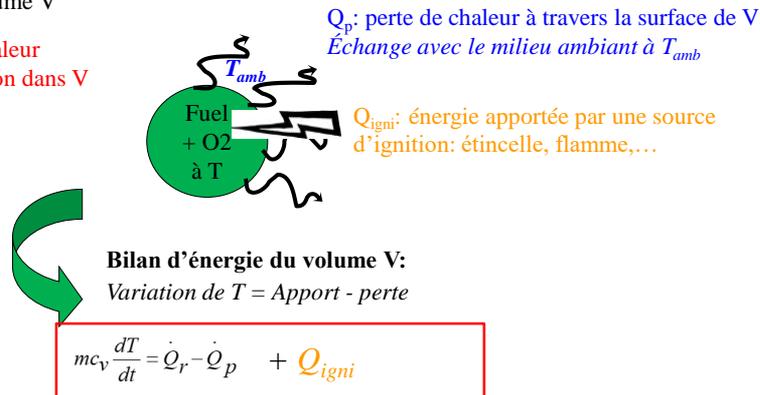
Quelques notions sur le développement d'un incendie

Ignition des gaz (pilotee)

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



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

Quelques notions sur le développement d'un incendie

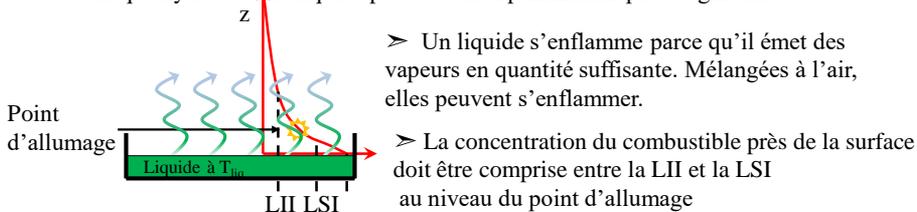
Ignition des liquides

- Expérience facile:

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

Réponse ?

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



> la quantité de vapeur combustible dépend de la T_p T_{liq} du liquide

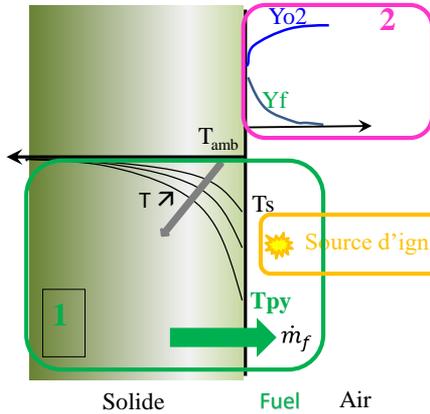
> **Définition: Le point feu T_f (fire point) est la température à partir de laquelle la combustion au dessus du liquide s'entretient d'elle même**

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

Source d'ignition **3**

t_{mel} temps pour mélanger O2 et fuel

t_{chem} temps chimique combustion

t_{py} temps pour atteindre T_{py}

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?

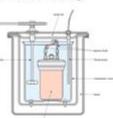
Réponse: **NON**

==> approche simplifiée

Essai à la petite flamme
 (EN ISO 11925-2)



Bombe calorimétrique
 (EN ISO 1716)



Single Burning Item
 (EN ISO 11925-2)

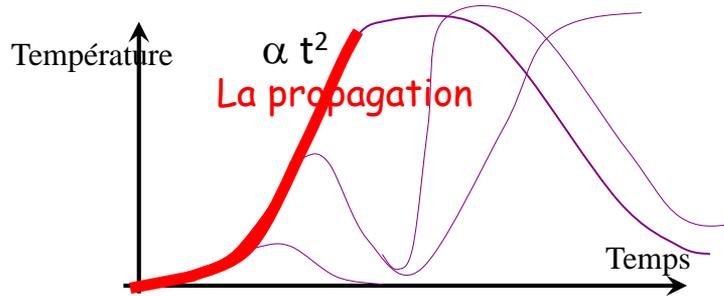


Panneau radiant
 (EN ISO 9239-1)



Quelques notions sur le développement d'un incendie

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

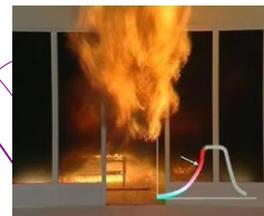
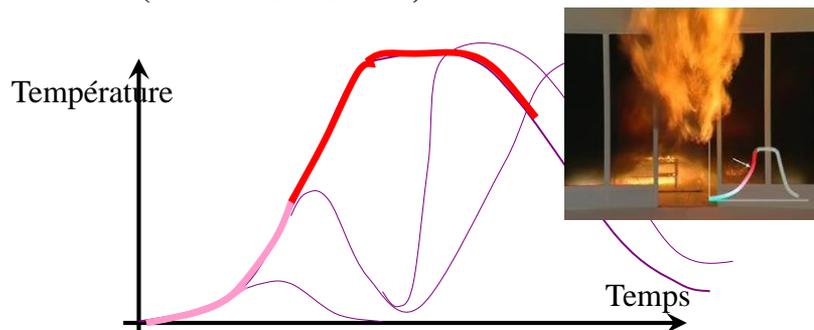


- Cette phase correspond à la propagation
 - des fronts de flamme sur les combustibles
 - par allumage d'autres matériaux vierges



Quelques notions sur le développement d'un incendie

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

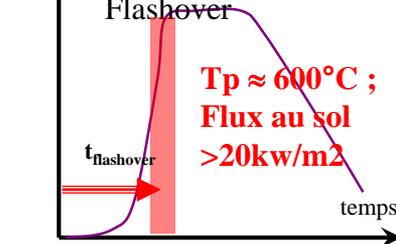


Quelques notions sur le développement d'un incendie

si la puissance dégagée est suffisante

==> vers l'embrasement généralisé

LE FLASHOVER



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

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

Kawagoe, 1958

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

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

A_w : Surface de l'ouverture (m^2) ;

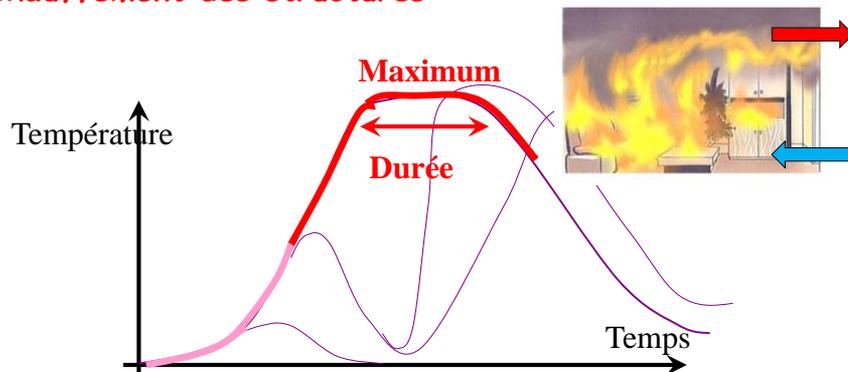
H : Hauteur de l'ouverture (m) ;

h_k : Coefficient effectif de perte de chaleur à travers les parois ($kW/m^2.K$) ;

A_t : Surface interne d'échange entre les parois et le compartiment (m^2).

Quelques notions sur le développement d'un incendie

L'échauffement des structures

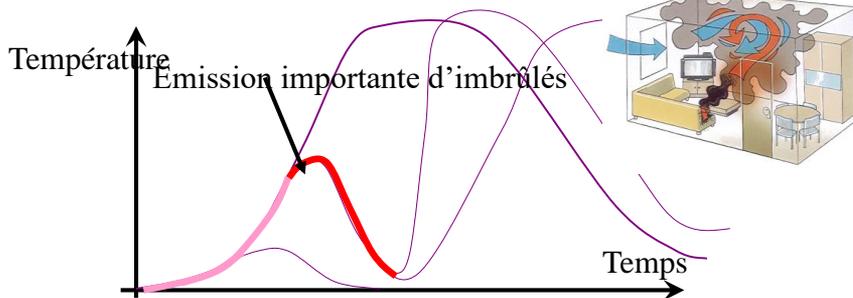


Pour la tenue des structures:

résister au maximum et à la durée du dégagement de chaleur

Quelques notions sur le développement d'un incendie

Si la ventilation du foyer est insuffisante



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

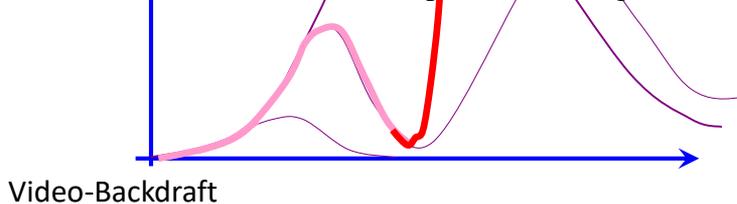
Quelques notions sur le développement d'un incendie

Si la ventilation des foyers est insuffisante

Cela peut entraîner un phénomène 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

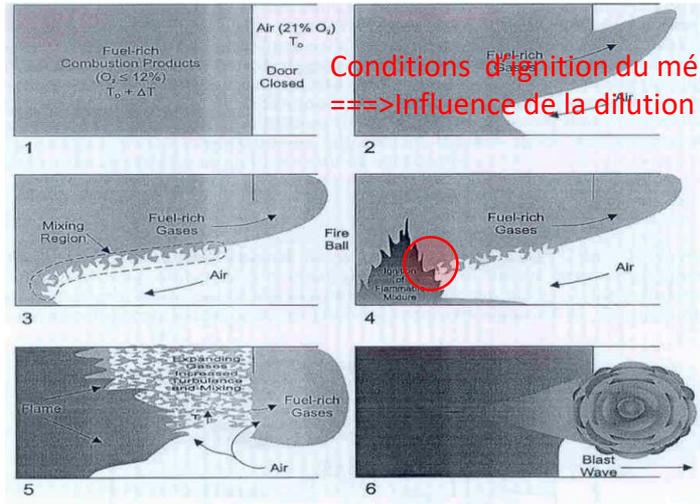


Figure 18 : Développement d'un backdraft (Gottuk, 1999).

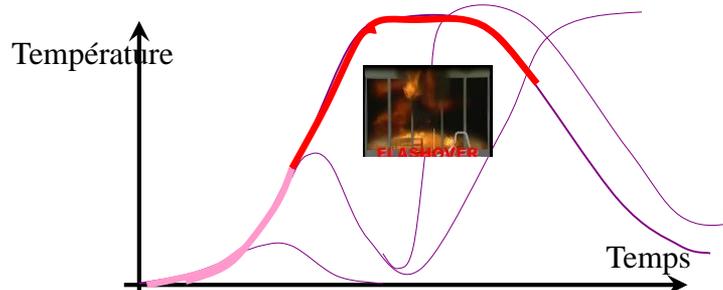
Quelques notions sur le développement d'un incendie

En conclusion:

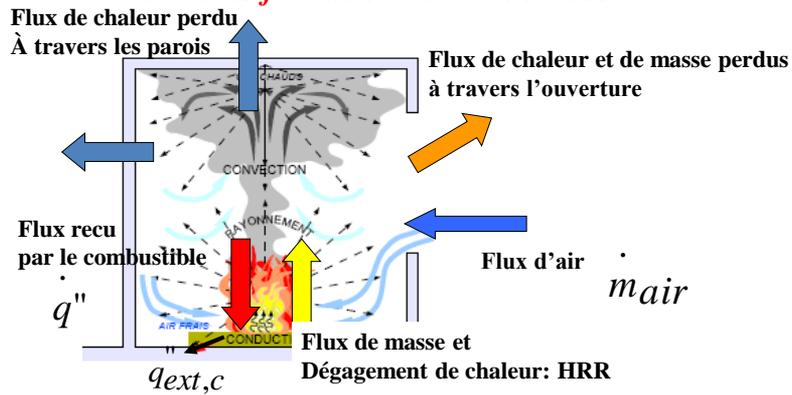
un feu confiné, c'est un scénario

qui dépend

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

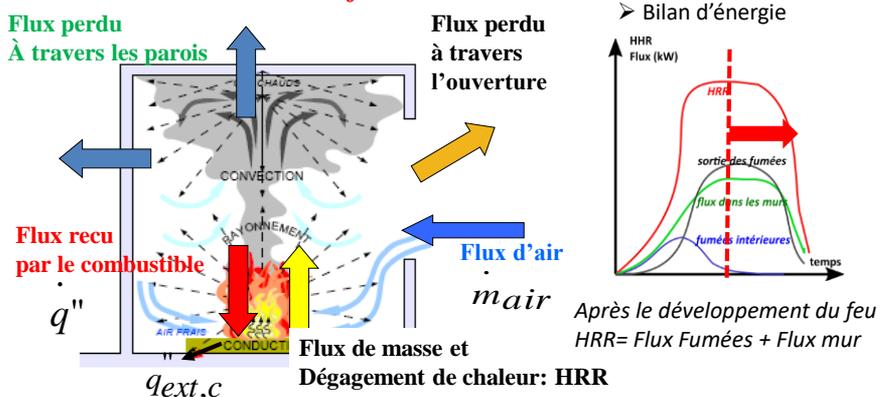


Quelques notions sur le développement d'un incendie
 ➤ Un feu confiné: ce sont des couplages
 entre les flux de chaleur et de masse



Rq: Flux de chaleur et de masse perdus à travers l'ouverture
 ==> Il y a une partie rayonnée,
 mais dans beaucoup de cas, on la considère faible
 devant le flux emporté par les fumées

Quelques notions sur le développement d'un incendie
 ➤ Un feu confiné: ce sont des couplages
 entre les flux de chaleur et de masse



➤ Bilan d'énergie à la surface du foyer

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

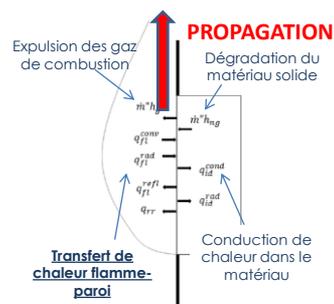
➤ le flux q_e est due au rayl. des parois, de la couche chaude de fumée sous plafond et des autres sources de combustion

Plan de l'exposé

- Introduction
- Quelques notions sur le développement d'un incendie
- **La propagation d'une flamme sur un matériau**
- 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 propagation d'une flamme sur un matériau combustible

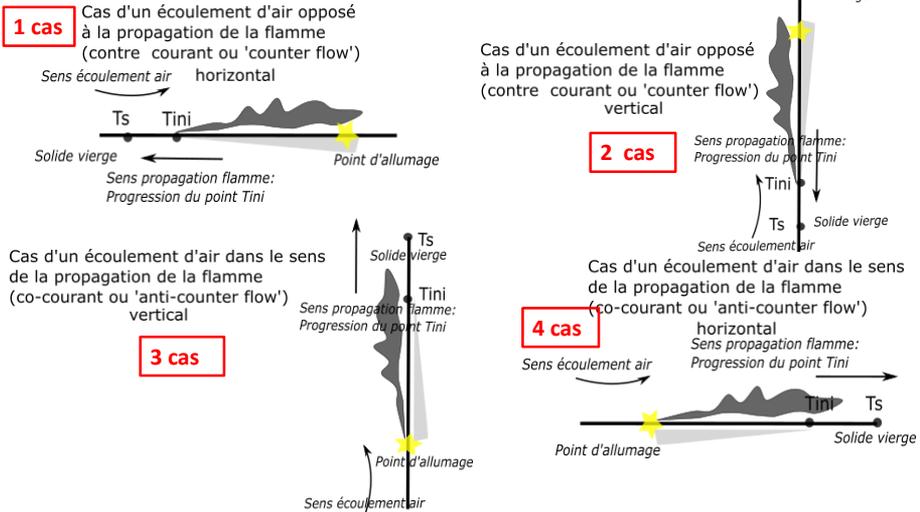
➤ La cas académique



- La vitesse de propagation V_p dépend du sens de l'apport d'air
 - Flamme à contre-courant, progression lente
 - Flamme à co-courant, progression rapide

La propagation d'une flamme sur un matériau combustible

➤ progression d'une flamme à contre ou co-courant



- La propagation d'une flamme sur un matériau combustible

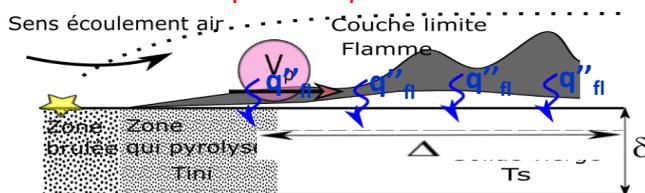
➤ Loi de comportement: Cas d'un matériau thermiquement épais

- Flamme à contre courant

$$V_p = \frac{1}{(\lambda \rho c)_s} \frac{\Phi}{(T_{ini} - T_s)^2}$$

- Cette loi est assez bien vérifiée expérimentalement avec l'appareil LIFT
- avec $V_{air}=0$, pas de soufflage
- Si $T_s > T_{s,min}$

- Flamme à co-courant: plus complexe



Mais la propagation de la flamme est plus rapide (/ contre courant) car:

- q''_{fl} est plus grand
- Δ est plus grand (la flamme est juste au dessus), $\Delta \sim$ longueur de flamme



Plan de l'exposé

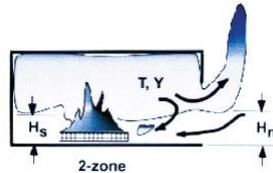
- Introduction
- Quelques notions sur le développement d'un incendie
- La propagation d'une flamme sur un matériau
- **Les équations simplifiées, lois de comportement**
- Les équations simplifiées, lois de comportementa ventilator
- Comportement des feux et des flammes sous-ventilés
- La production des espèces toxiques
- Flammes externes



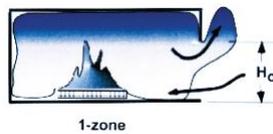
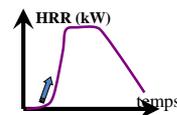
Equations simplifiées

Les paramètres importants:

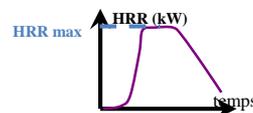
- Le dégagement de chaleur Q (=HRR)
- le débit d'air en entrée ,ventilation naturelle ou forcée
- le débit des fumées
- Le débit de pyrolyse
- La température des fumées



Au début du feu

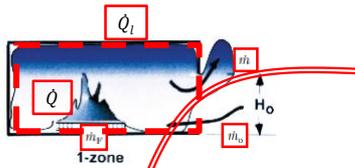


Feu pleinement développé

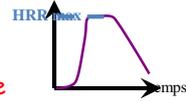


Equations simplifiées:

Une zone: 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

$$c_v \frac{d(mT)}{dt} = \frac{c_v V}{R} \frac{dp}{dt} = \dot{Q} - \dot{Q}_l \quad \begin{matrix} \dot{Q} = \text{dég. Chaleur} = \text{HRR} \\ \dot{Q}_l = \text{pertes} \end{matrix}$$

Combustion

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

Bilan de l'oxygène

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

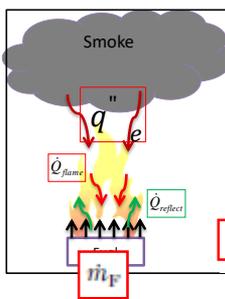
Δh_c = enthalpie de combustion / kg fuel

\dot{m}_F 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 combustion)
- des conditions de ventilation.
- du flux reçu par la surface combustible

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

Effet du confinement

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

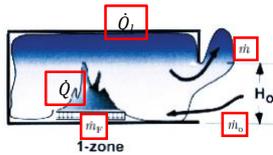
$$\dot{m}_F'' = \frac{q}{L} \quad \begin{matrix} L: \text{Chaleur de gazeification} \\ L = L_v \text{ pour les liquides} \end{matrix}$$

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

Mais q_{fi}'' et q_e'' dépendent aussi de la ventilation
 ==> phénomènes couplés



Equations simplifiées:



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

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

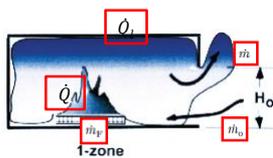
Δh_c = enthalpie de combustion / kg fuel

Le dégagement de chaleur (HRR)

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



Equations simplifiées:



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

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

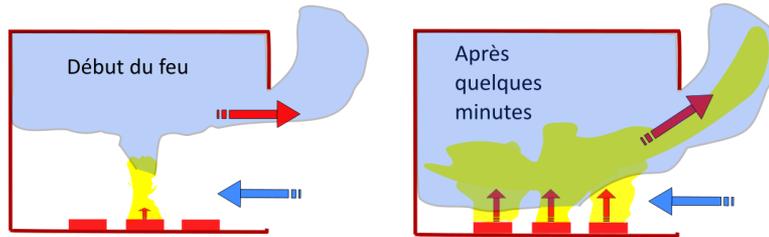
Δh_c = enthalpie de combustion / kg fuel

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

Equations simplifiées:

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:

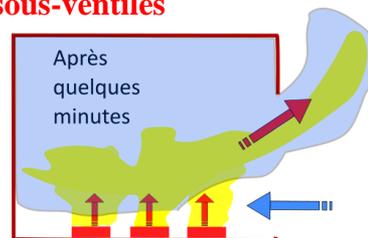
- est **contrôlée par la ventilation**
(l'air disponible)
- **Combustion peut être sous-ventilée**
 $\phi \geq 1$

Rq: En réalité la transition se fait à ϕ légèrement < 1

Equations simplifiées: Feu pleinement développé

Les conséquences associées aux feux sous-ventilés

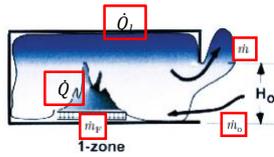
- fumées avec plus de CO et de suies
- Fumées avec plus d'imbrulées
- Extinction possible et ré-allumage possible
- Sortie de flamme



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

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

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

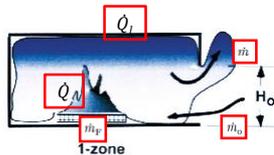
$$\frac{d(mY)}{dt} + mY - \dot{m}_o(0.233) = -0.233s\dot{Q}/\Delta h_c$$

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

$$Y = 0 \text{ pour } \Phi > 1$$

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

Equations simplifiées: Feu pleinement développé



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

\dot{Q} = dég. chaleur

\dot{Q}_l = pertes

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

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

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

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

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

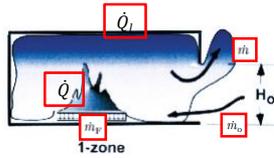
$$h A (T - T_0) ==>> \dot{Q}_{l,w} / \dot{m}_o c_p = X_w (T - T_0)$$

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

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

Rq: on néglige $\dot{Q}_{l,r}$ pertes par ray. à travers les ouvertures

Equations simplifiées: Feu pleinement développé



$$\dot{Q} = \dot{Q}_l \quad \begin{array}{l} \dot{Q} = \text{dég. chaleur} \\ \dot{Q}_l = \text{pertes} \end{array}$$

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

En résumé

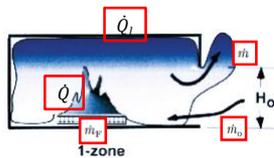
$$\dot{Q}_l = \dot{Q}_{l,s} + \dot{Q}_{l,w}$$

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

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

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

Equations simplifiées: Feu pleinement développé



$$\dot{Q} = \dot{Q}_l \quad \begin{array}{l} \dot{Q} = \text{dég. chaleur} \\ \dot{Q}_l = \text{pertes} \end{array}$$

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

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

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

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

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

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

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

Ouverture = porte L=0,9m et H0= 2,2m

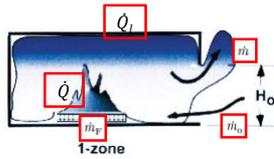
Cp air 1kJ/kg/K

Bac essence diamètre 50 cm =====> calcul de Q=HRR connaissant le MLR

h = 10 W/m2

=====> calcul de T-T0

Equations simplifiées: Feu pleinement développé



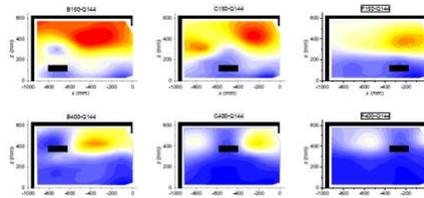
$$T = \dot{Q} / [\dot{m}_0 c_p (X_s + X_w)] + T_0$$

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

Ex: MQH

$$T_x = 480 \times \left(\frac{\dot{Q}}{\sqrt{g c_p \rho_w T_w A \sqrt{H}}} \right)^{1/2} \times \left(\frac{h_k A_f}{\sqrt{g c_p \rho_w T_w A \sqrt{H}}} \right)^{-1/2} + T_w \quad h_k = \frac{k_f}{\delta}$$

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)

Plan de l'exposé

- Introduction
- Quelques notions sur le développement d'un incendie
- La propagation d'une flamme sur un matériau
- Les équations simplifiées, lois de comportement
- **La ventilation naturelle des foyers (et la sortie des fumées)**
- Comportement des feux et des flammes sous-ventilés
- La production des espèces toxiques
- Flammes externes

La ventilation naturelle des foyers

➤ La sortie des fumées ou la rentrée d'air sont dues à des différences de pressions entre l'intérieur et l'extérieur

- Rappel: loi de la statique des fluides appliquée suivant la hauteur z

$$P(z) - P(0) = -\rho g z \implies -\rho g \text{ est la pente de } P \text{ en fonction de } z$$

- Si la hauteur z est représentée par un axe vertical

$$(P(z) - P(0)) / (-\rho g) = z \implies -1/(\rho g) \text{ est la pente de } z \text{ en fonction de } P$$

- Mais la densité ρ varie avec la Température

$$P = \rho r T \text{ avec } r = \text{constante massique des gaz parfaits}$$

conséquence: avec $P = P_{\text{amb}} = \text{cst}$

si $T_i > T_{\text{ext}} \implies \rho_i < \rho_{\text{ext}} \implies$ les pentes sont différentes

- Nous allons appliquer ce raisonnement au cas d'un local en feu, dans lequel on aura des fumées chaudes en haut et de l'air à la température ambiante en bas



La ventilation naturelle des foyers

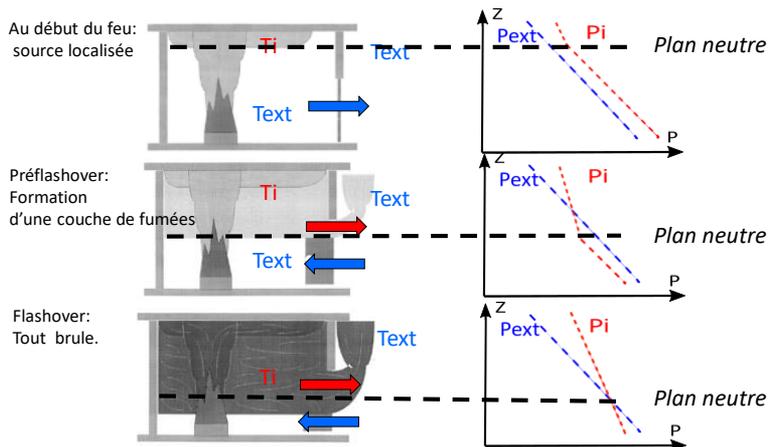
➤ La sortie des fumées ou la rentrée d'air sont dues à des différences de pressions entre l'intérieur et l'extérieur

- On applique la loi de la statique des fluides suivant la hauteur Z sur:

l'air extérieure à la T_{ext}

l'air en bas du local supposé être aussi à T_{ext}

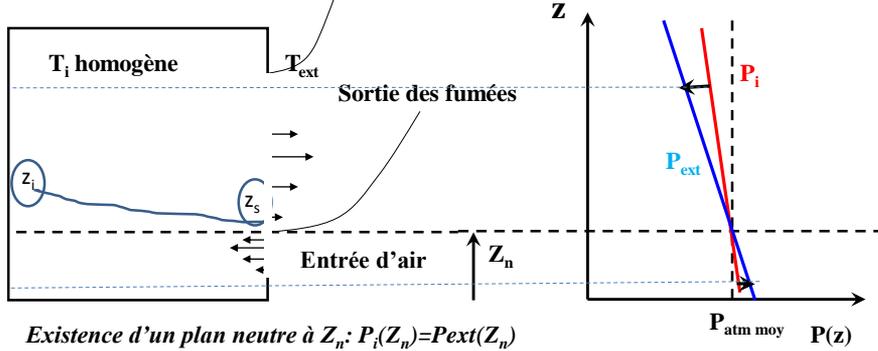
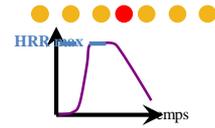
les fumées chaudes dans le local à $T_i > T_{\text{ext}}$



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 : $P_i(Z_n) = P_{ext}(Z_n)$

➤ loi de la statique des fluides:

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

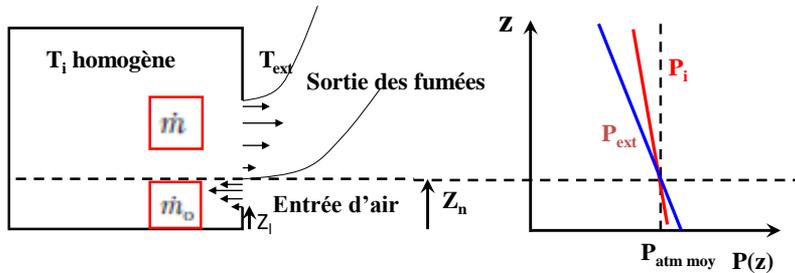
$$P_{int}(z) - P_{int}(z_n) = -\rho_{int}(z - z_n)$$

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 $\dot{m}_0/L = C_d \rho_{ext} \sqrt{2g} \sqrt{1 - \frac{T_{ext}}{T_i} \frac{2}{3} (z_n - z_1)^{3/2}}$

Bilan de masse $\dot{m} = \dot{m}_0 + \dot{m}_F = \dot{m}_0(1 + \phi/s)$ Et aussi $\dot{m}/L = f[(z_u - z_n)^{3/2}]$

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

A_0 : surface de l'ouverture
 H : hauteur
 L : largeur

➤ Conclusion: avec les valeurs usuelles des paramètres

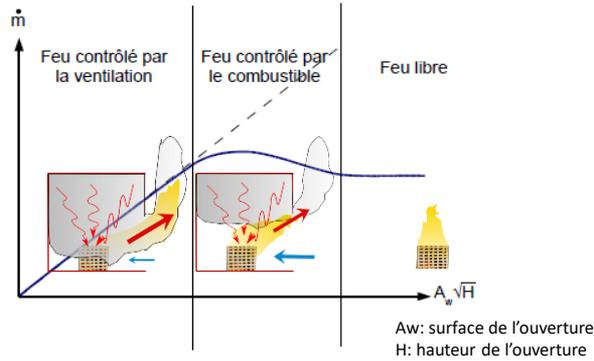
$$\dot{m}_0 = 0.5 A_0 \sqrt{H} \text{ (Kg/s, formule de Kawagoe)}$$

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

La ventilation naturelle des foyers



➤ *Variation de la perte de masse d'un foyer en fonction de sa ventilation*

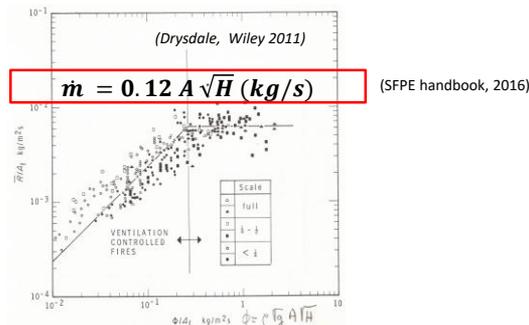


La ventilation naturelle des foyers



➤ *Variation de la perte de masse d'un foyer en fonction de sa ventilation*

Avec une série de tests (feux de buchettes), Kawagoe a montré :
 \dot{m} est proportionnel au facteur d'ouverture $A\sqrt{H}$.

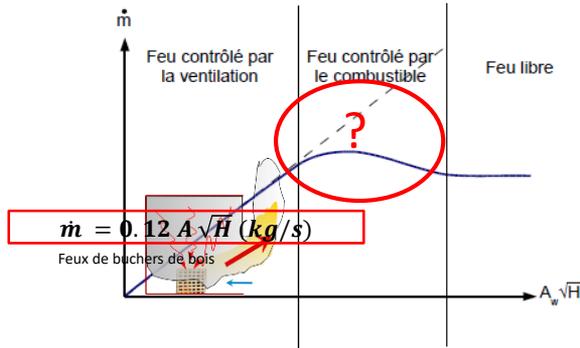


Attention: ceci ne s'appliquerait qu'à des feux de bûcher de bois
 ==> le combustible est largement masqué par la couche carbonisée apparaissant en surface,
 Ce qui réduit l'influence du confinement.
 ==> Des expériences menées avec d'autres types de combustible ont montré que le facteur de ventilation $A_w H^{*0.5}$ ne suffit pas à lui seul à déterminer le taux de combustion.

La ventilation naturelle des foyers



➤ Conclusion: dans le régime contrôlé par la ventilation, importance du facteur d'air $A\sqrt{H}$



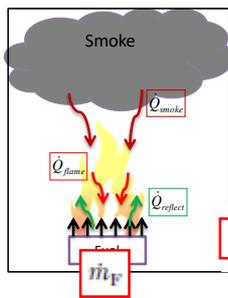
-Théoriquement, on a montré que le débit d'air entrant est donnée par:

$$\dot{m}_{air} = 0.5 A\sqrt{H} \text{ (kg/s)}$$

La ventilation naturelle des foyers



➤ perte de masse et flux recus

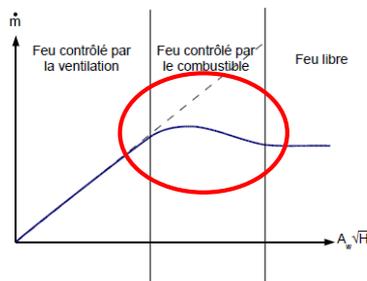


$$q'' = q''_{fl,c} + q''_{fl,r} + q''_e - \epsilon\sigma T_s^4 - q''_{ext,c}$$

Effet du confinement

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

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



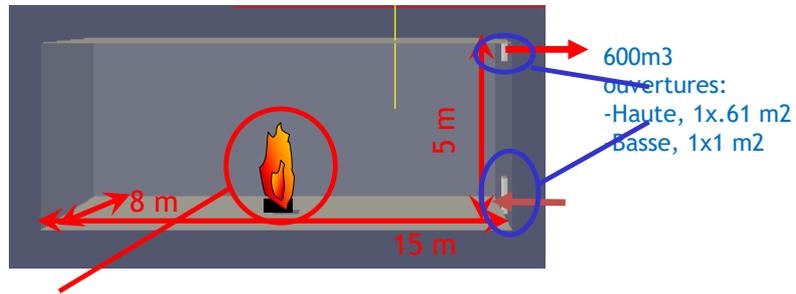
La ventilation naturelle des foyers



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

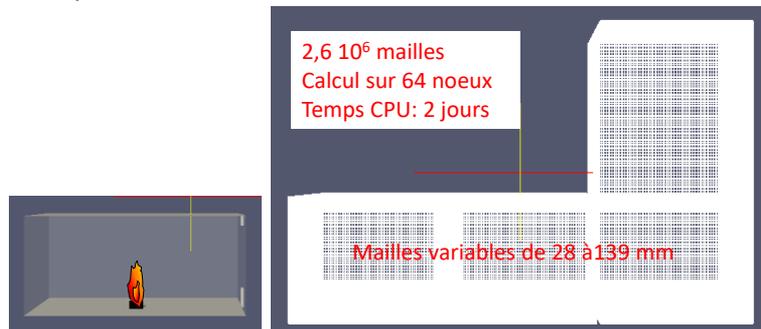
HHR = 188 t² ---> **HRR = 2,7 Mw** at t=120s (NFPA: very fast)

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

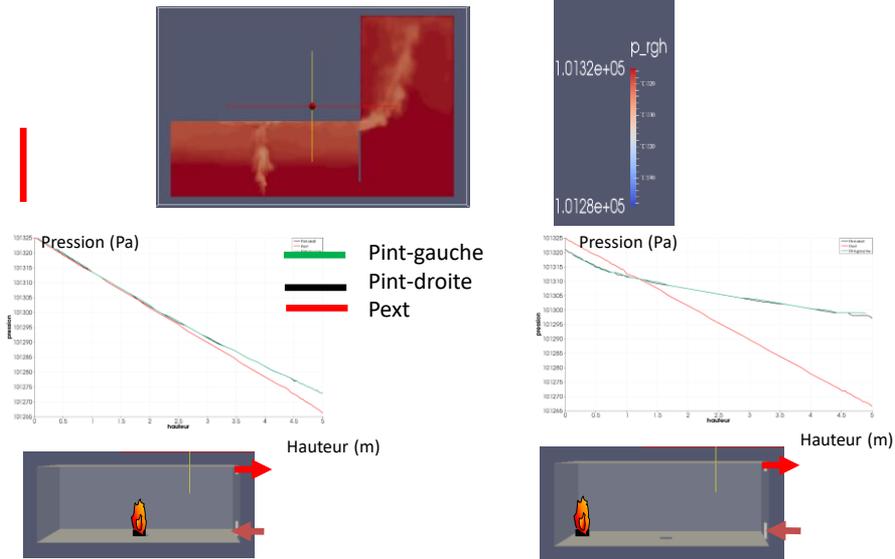


La ventilation naturelle des foyers



ATTENTION aux limites des lois de comportement

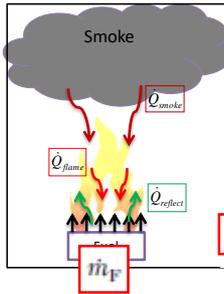
Deux cas: le foyer (2,7 MW) au milieu ou au fond du local



Plan de l'exposé

- Introduction
- Quelques notions sur le développement d'un incendie
- La propagation d'une flamme sur un matériau
- 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 O2 ↘ fortement:
 perte de masse ↘
 combustion ↘
 Extinction systématique ?

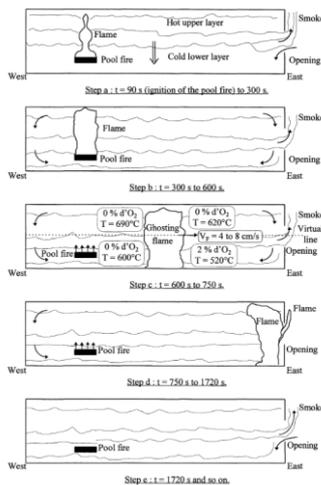
avant extinction

- 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

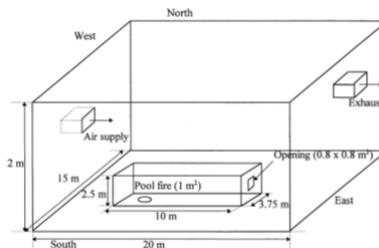
CONDITIONS PARTICULIÈRES GÉOMÉTRIQUES ET DE SOUS-VENTILATION

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

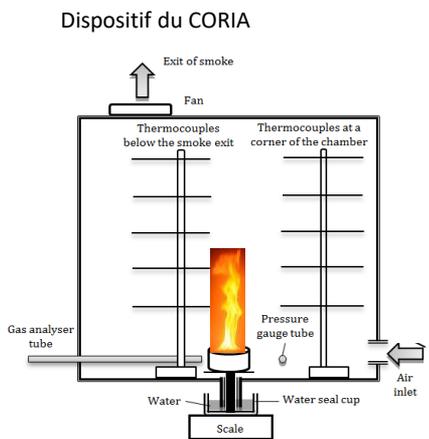
ATTENTION:
bruleur propane
==> forçage du MLR
pas de feedback

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



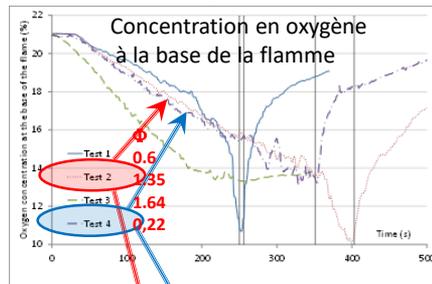
Comportement des feux et des flammes sous-ventilés

Ce phénomène s'observe aussi avec une enceinte mécaniquement ventilée

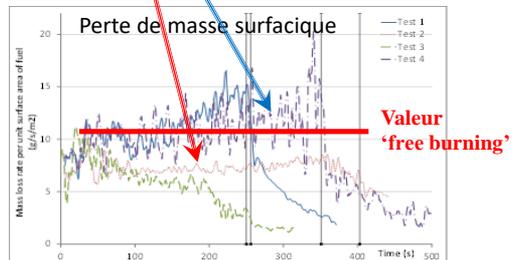


Combustible : n-Heptane
2 bac pyrex de 11cm de diamètre
Coppalle, AOSFST 2015

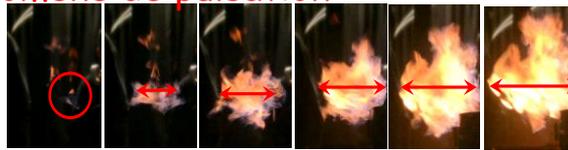
Video:D-flammeFantome-Test2
Video-Essai4



Les barres verticales = temps d'extinction



Comportement des feux et des flammes sous-ventilés Phénomène de pulsation



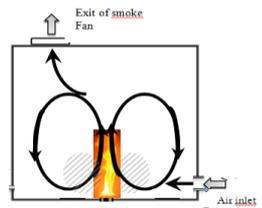
Temps
entre deux
images:
33 ms

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 flamme

(Video test 3 extinction)

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

====>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 C_p 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

- T_p adiabatique limite?

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

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



Plan de l'exposé

- Introduction
- Quelques notions sur le développement d'un incendie
- La propagation d'une flamme sur un matériau
- 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 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,
 perturbation du transport de O₂ dans le sang
 d'une exposition à d'autres gaz toxiques
 même en quantité très faible

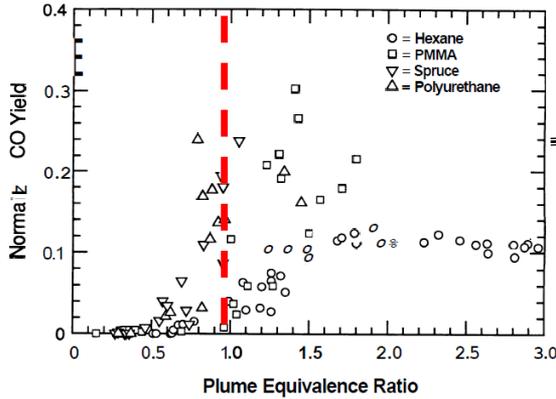
Les premiers travaux (Gottuk, Beyler, Pitt, Tewardson) ont montré que

La production de CO dépend de la ventilation du foyer

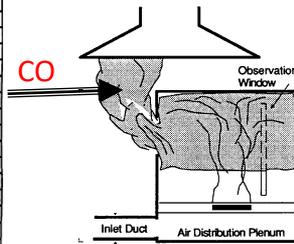
➤ si le régime du feu est sous ventilé ====> CO ↗

la production des espèces toxiques

➤ La production de CO: Travaux de Gottuk



(Gottuk 1992)

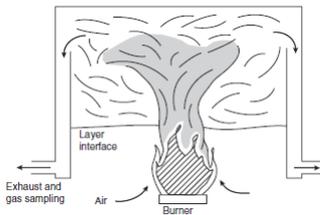


Notion de Yield:

Yield_{CO} = débit massique CO (dans le fumées) / débit massique comb

la production des espèces toxiques

➤ La production de CO: Travaux de Beyler



Dispositif de Beyler
(SFPE Handbook 2002)

L'idée de ces expériences est d'essayer de voir la validité de la relation

$$CO = CO(GER)$$

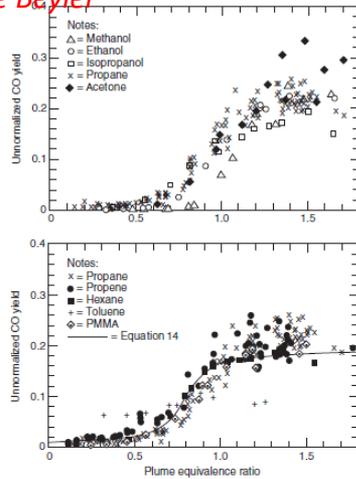


Figure 2-5.4. Unnormalized carbon monoxide yields as a function of the plume equivalence ratio for various fuels studied by Beyler in a hood apparatus.^{8,9}

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

la production des espèces toxiques

➤ La production de CO: Travaux de Tewarson

La production des suies

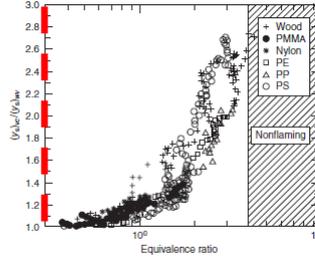
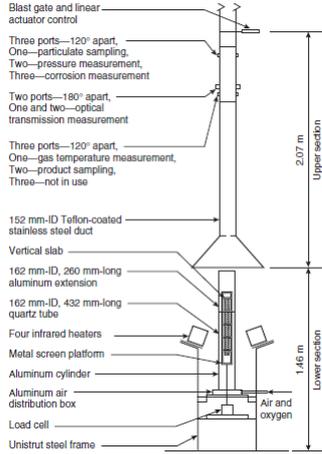


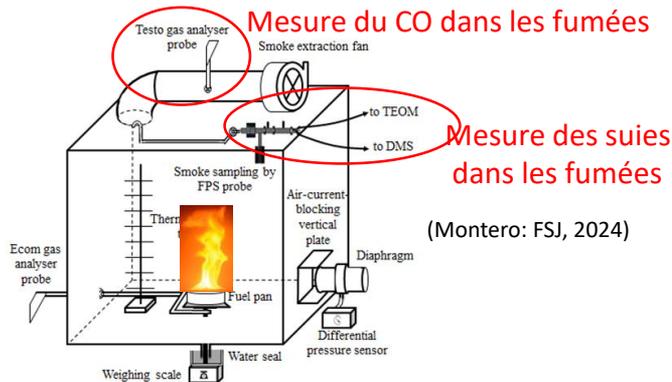
Figure 3-4.33. Ratio of the mass of smoke generated per unit mass of the fuel for ventilation-controlled to well-ventilated fires. Data are measured in the ASTM E2058 fire propagation apparatus and in the Fire Research Institute's enclosure.⁴⁴ Subscript vc represents ventilation-controlled fires, and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

Le dispositif de Tewarson:
FPA apparatus (ASTM E2058)
(SFPE Handbook 2002)

la production des espèces toxiques

Avec une ventilation mécanique

Dispositif du CORIA

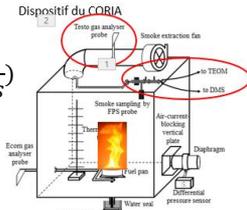
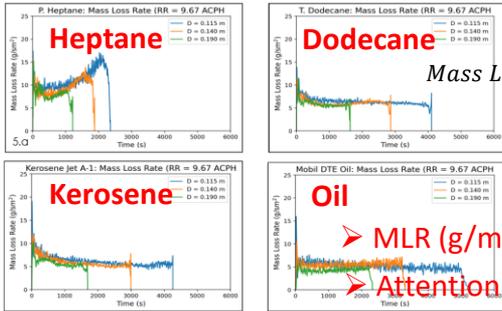


Résultats:
pour différents combustibles
====> influence de la nature du combustible
pour différents diamètres
====> influence de la ventilation (variation du GER)

la production des espèces toxiques

Avec une ventilation mécanique

Résultats pour différents combustibles et différent diamètres



- MLR ($g/m^2/s$) dépend peu du diamètre D
- Attention: Quand D ↗, GER ↗

➢ MLR ($g/m^2/s$) dépend du produit

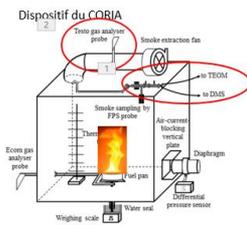
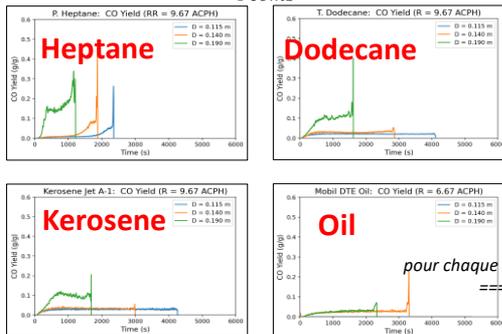
Experiment	Heat Combustion (kJ/g)	Heat Vaporization (kJ/g)	Flash Point (°C)	Boiling Temperature (°C)	Smoke point height (cm)
Pure n-Heptane [2]	46.4	0.365	-4	98	14.7
Technical Dodecane [2]	49.9	0.361	71	170-195	13.7
Kerosene Jet A-1	43.338	0.431	42.5	152.6	2.5
Mobil DTE Oil [3]	42.1	-	218-234	300-400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

la production des espèces toxiques

Avec une ventilation mécanique

Résultats pour différents combustibles et différent diamètres:

$$CO\ Yield\ (\frac{g_{CO}}{g_{comb}})$$



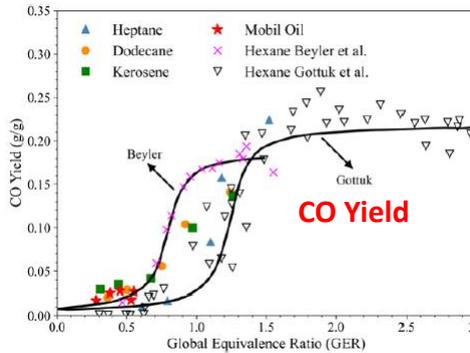
Rappel:
pour chaque combustible, Le GER ↗ si le diamètre du bac ↗
==> La production de CO ↗ si le GER ↗

Mais: par ordre décroissant pour la production de CO, on trouve
Heptane > Dodécane > kérosène > Oil
==> Sous les mêmes conditions de ventilations,
les hydrocarbures lourds produisent moins de CO (/ légers)

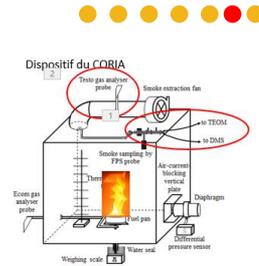
la production des espèces toxiques

Avec une ventilation mécanique

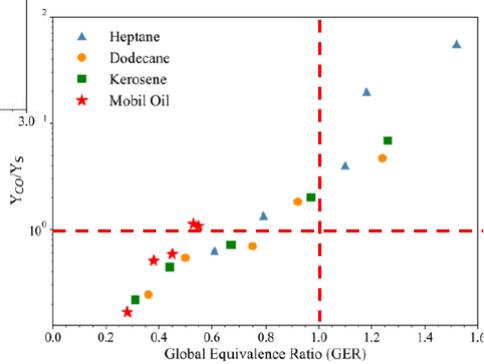
Résultats pour différents combustibles et différents diamètres:



CO yield as a function of GER



YCO/YS as a function of GER



la production des espèces toxiques

Calcul et prédiction: Quelle approche possible ?

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

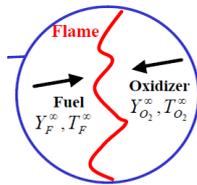
la production des espèces toxiques

Calcul et prédiction: Quelle approche possible ?

Exemple : le CO

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

Ex: $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ ==> Il faut calculer la disparition W_{CO} (g/s)



$$\frac{d\text{CO}}{dt} = -[\text{CO}]\sqrt{[\text{O}_2]}k e^{-\frac{E}{RT}} \text{ (Loi d'Arrhenius)}$$

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

La production W_{CO} (g/s) de CO est donc dépendante

-de l'efficacité de mélange de la turbulence

-et de la cinétique chimique de formation/oxydation

$$\text{Damköhler turbulent } \text{Da}_T = \frac{\tau_{\text{écoulement turbulent}}}{\tau_{\text{réaction}}} \approx 1$$

Comment calculer $\overline{W_{\text{CO}}} = \frac{d\overline{\text{CO}}}{dt}$?

- On peut négliger les effets du mélange (chimie lente) et écrire (FDS)

$$\frac{d\overline{\text{CO}}}{dt} = -[\overline{\text{CO}}]\sqrt{[\overline{\text{O}_2}]}k e^{-\frac{E}{RT}} \text{ (Loi d'Arrhenius)}$$

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)

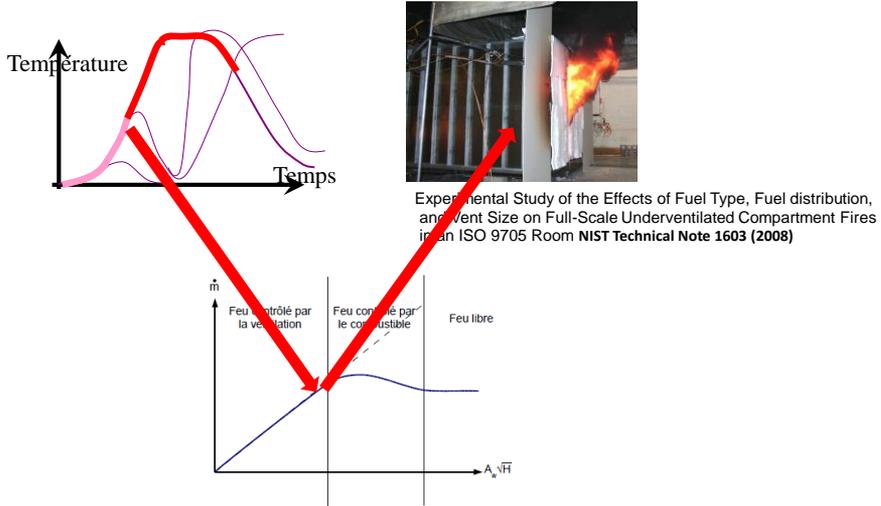
Plan de l'exposé

- Introduction
- Quelques notions sur le développement d'un incendie
- La propagation d'une flamme sur un matériau
- 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



Feux contrôlés par la ventilation: sortie de flammes



Flammes externes



➤ De nouveaux problèmes suite aux évolutions techniques: isolations par l'extérieur (ITE) ==> feux de façade



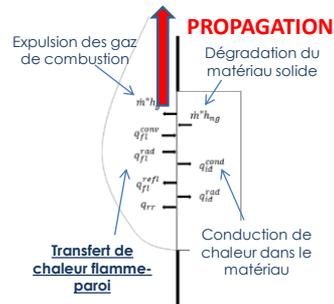
(Source le Parisien 2020)

Flammes externes



➤ progression d'une flamme sur un matériau combustible

➤ *La cas académique*



➤ La vitesse de propagation V_p dépend du sens de l'apport d'air
 Flamme à contre-courant, progression lente
 Flamme à co-courant, progression rapide

Flammes externes



➤ progression d'une flamme
 sur le dispositif d'isolation

➤ *La réalité est souvent plus complexe*

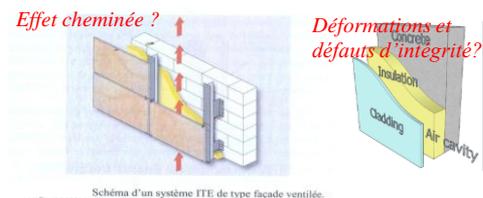


Schéma d'un système ITE de type façade ventilée.

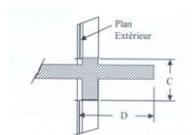


Figure 1.3-2: Définition du C+D

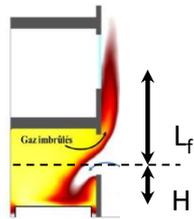
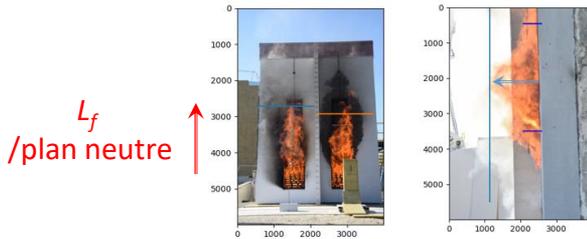


Brette métallique pour éviter la propagation d'un incendie entre étages par la façade.

Flammes externes



➤ les dimensions des flammes

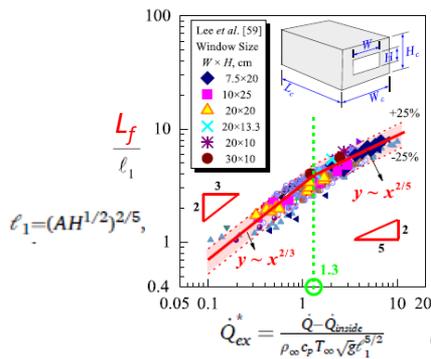
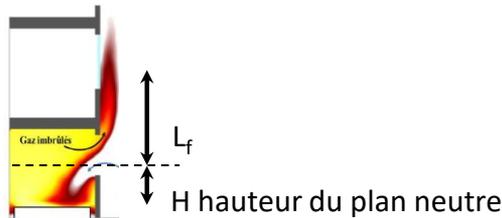


Comment varie L_f
avec la puissance dégagée
dans la flamme externe?
 $Q_{ext} = Q_{tot} - Q_{in}$

Flammes externes



➤ les dimensions des flammes



Deux régimes de variations:
L'entraînement de l'air dépend de la puissance
Avec une faible puissance: *flamme 2D*
Avec une forte puissance: *flamme 3D*

$$\frac{L_f}{(AH)^{2/5}} = 3.5 \left(\frac{\dot{Q}_{ex}^*}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} A \sqrt{gH}} \right)^{2/5}$$

(Sun et al, Prog. Ener. Comb Sci, 2023)

Flammes externes

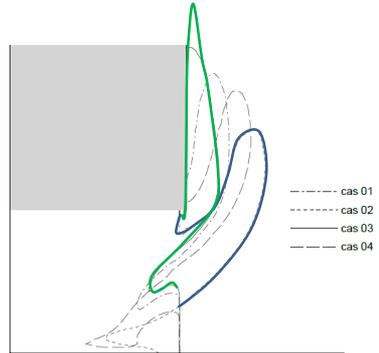


➤ *Problème complexe: forte influence de la géométrie de l'ouverture*

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

Simulation avec FDS

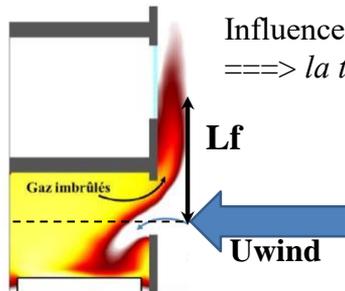
Cas	Largeur [m]	Hauteur [m]	Hauteur d'allège [m]	Facteur d'ouverture [m ² /2]
01	2.8	1.6	1.3	5.67
02	1.4	2.5	0.0	5.53
03	3.2	1.5	1.4	5.88
04	2.0	2.0	0.9	5.66



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

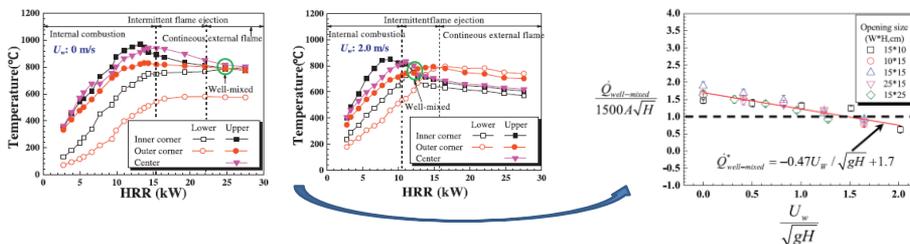
====> Effet important sur le flux à la paroi!

Flammes externes: 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 et distribution de l'énergie
(ex: Batteries, 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
 -