

# *Le feu: cet obscur et lumineux objet de recherche*

A. Coppalle

UMR 6614 CORIA, coppalle@coria.fr

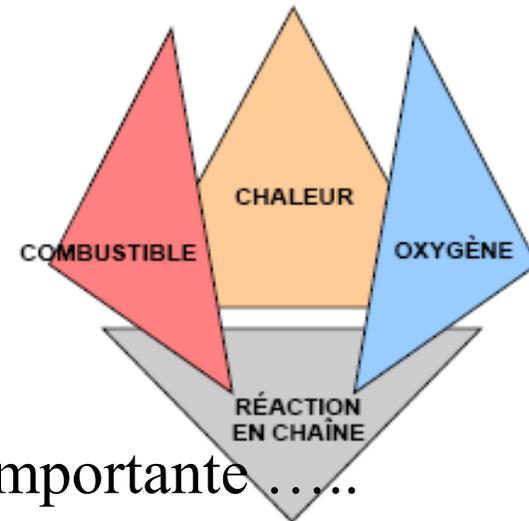
Points importants exposés

- Introduction
- Quelques notions sur le développement d'un feu  
les points de R & D à développer
- Les activités en France (GdR Incendie)
- Conclusions et perspectives

Rq: focalisé sur les feux compartimentés

# Introduction

Discours récurrent sur les incendies  
- le triangle du feu ...



Les chiffres clés

pas la source de mortalité la plus importante .....  
mais ...

Le risque incendie a évolué: cela concerne maintenant

- l'habitat,
- l'industrie,
- mais aussi les transports

# Introduction: Evolution dans l'habitat ?

## La Défense, Paris



## Downtown Burj Dubai



**Objectifs prioritaires de la sécurité incendie:**

- Tenue de la structure
- Désenfumage et évacuation

# Introduction: Evolution dans les transports?

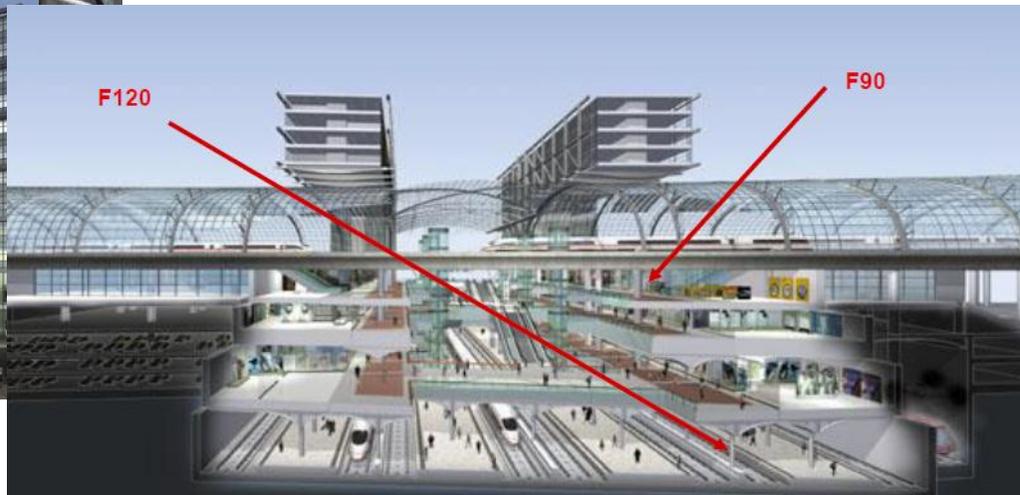
## APPLICATION AUX SYSTEMES DE TRANSPORTS

- Évaluation du comportement feu de matériels roulants.
- Mise en place de réponses opérationnelles adaptées.



## APPLICATION AUX FEUX DE TUNNELS

- Etudes des capacités de désenfumage et de stabilité au feu.
- Mise en oeuvre de mesures spécifiques, passives et actives.



# Introduction: Evolution dans le tertiaire et l'industrie?

## La logistique

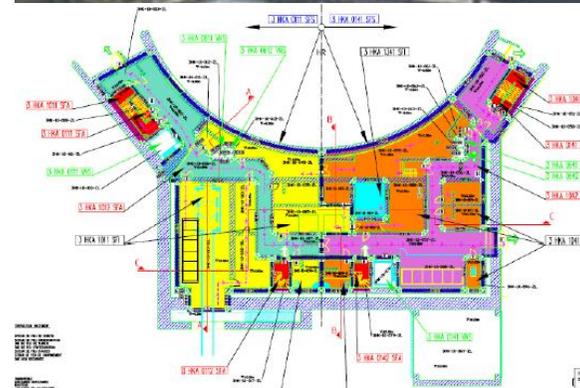
**Efficacité des systèmes  
D'extinction**



## L'industrie nucléaire

**Un objectif prioritaire:**

**Le confinement des feux potentiels**



# Introduction

- ▶ des projets architecturaux de plus en plus audacieux
- ▶ des évolutions importantes dans les constructions
  - L'utilisation de nouveaux matériaux (plastiques, composites, naturels,...
  - l'amélioration de l'isolation des locaux, influence sur le comportement des foyers
- ▶ des besoins spécifiques en terme de sécurité incendie dans l'industrie, nucléaire en particulier

**====>Evolutions importantes de la R&D**

# Introduction

Face à ces évolutions,

====> une nouvelle approche pour la sécurité incendie

====> Travaux du Projet National ISI

## FSE APPROACHES IN THE WORLD AND IN FRANCE



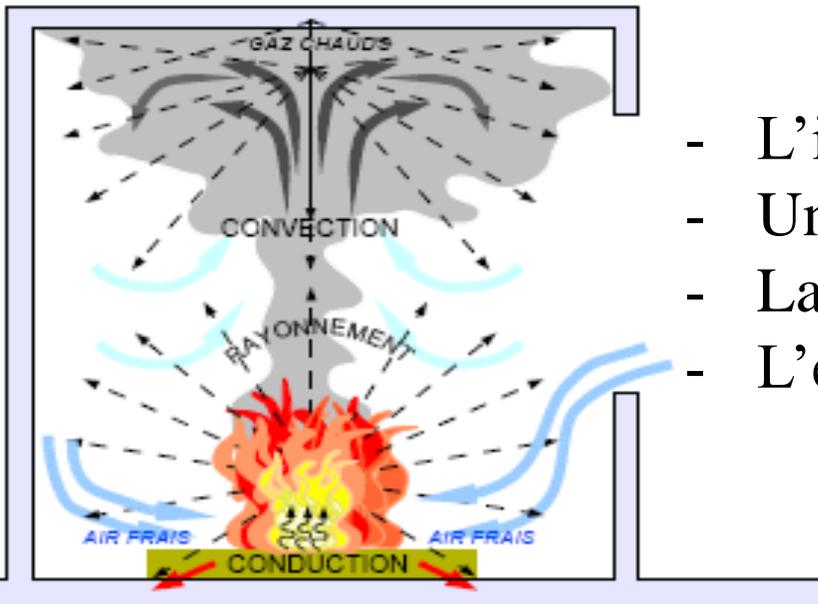
DES PROJETS REALISES OU EN COURS  
AVEC LA MISE EN ŒUVRE DES OUTILS ISI



ticm

ofire 2011

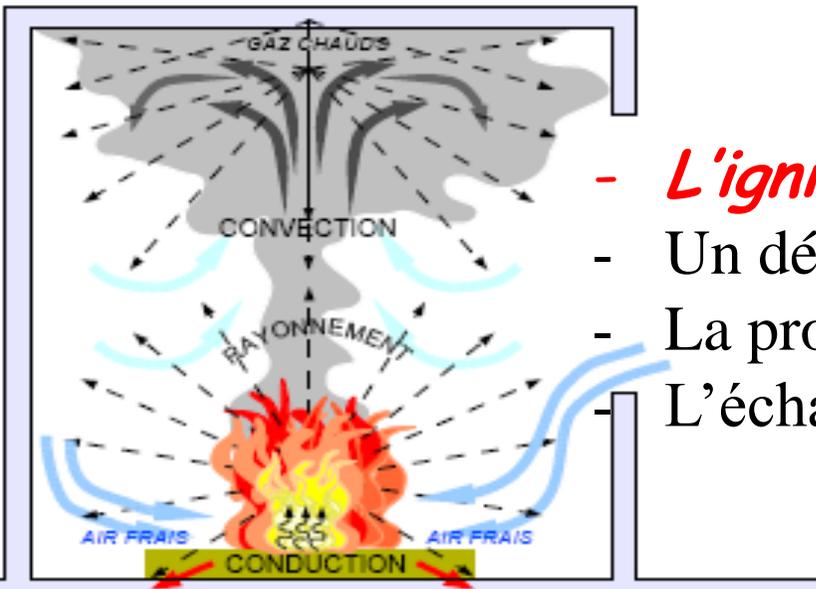
## Le feu: un couplage fort entre des phénomènes variés



- L'ignition et la dégradation des matériaux
- Un dégagement de chaleur et son développement
- La production et la circulation des fumées
- L'échauffement des structures

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## Le feu: un couplage fort entre des phénomènes variés

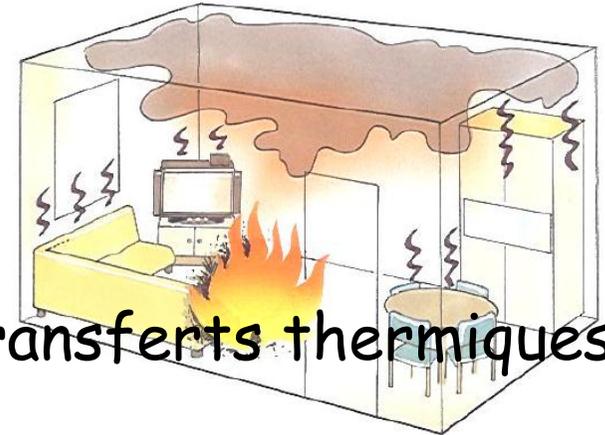
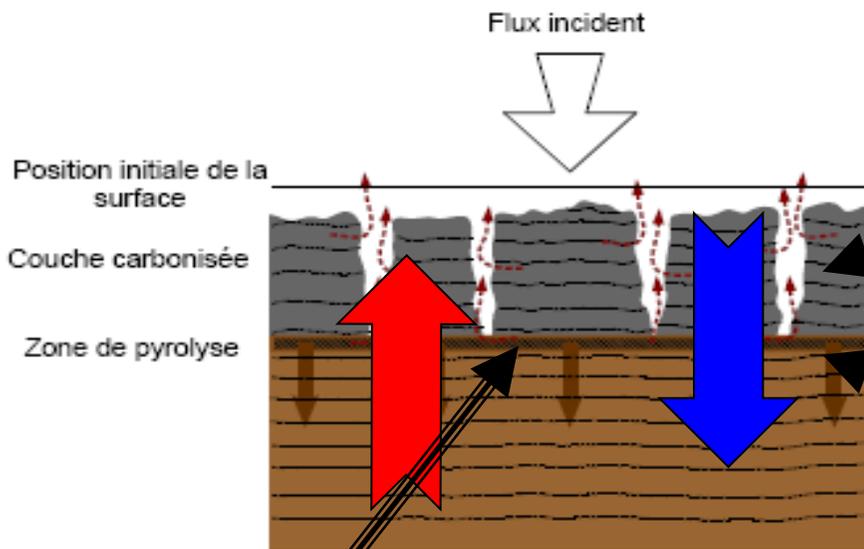


- *L'ignition et la dégradation des matériaux*
- Un dégagement de chaleur et son développement
- La production et la circulation des fumées
- L'échauffement des structures

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

*Dans beaucoup de scenarios: les combustibles sont solides!*

## L'ignition et la dégradation des matériaux



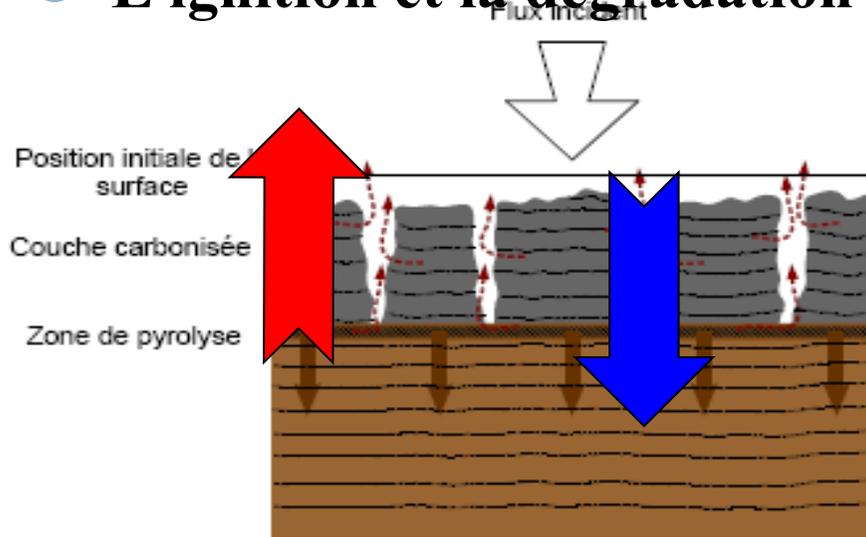
Transferts thermiques

Transformations  
physico-chimiques  
complexes  
Solide--->liquide--->gaz

Pyrolyse, taux de production des combustibles

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## ● L'ignition et la dégradation des matériaux



Approches actuelles de la modélisation  
Séparation phase solide/phase gaz  
Notion de flux critique

### *Faiblesse de l'approche:*

la réalité est parfois plus complexe que prévue!

- Combustion sans flamme
- Combustion de la matière divisée
  - nouveaux matériaux « naturels » d'isolation
  - végétaux

Dégradation/combustion des composites

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## L'ignition et la dégradation des matériaux

Un matériau composite: matrice (résine 'thermoset' ou 'thermoplastic')  
+ fibres (carbone, éléments minéraux, silice)

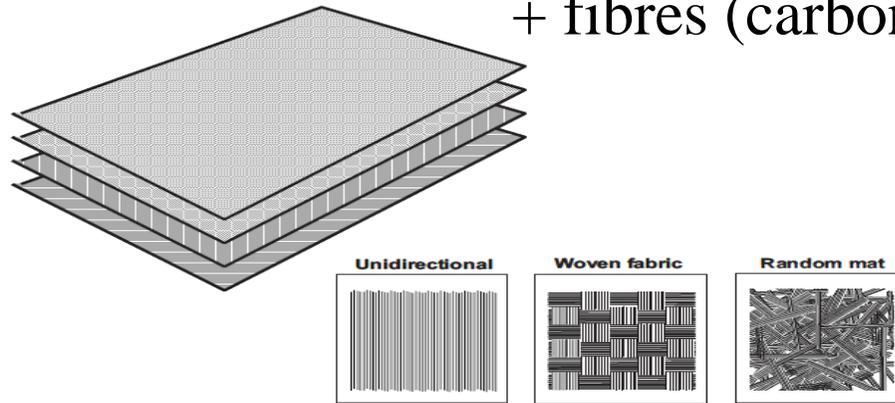


Figure 6.1. Ply structure of laminated composites and common examples of ply architecture

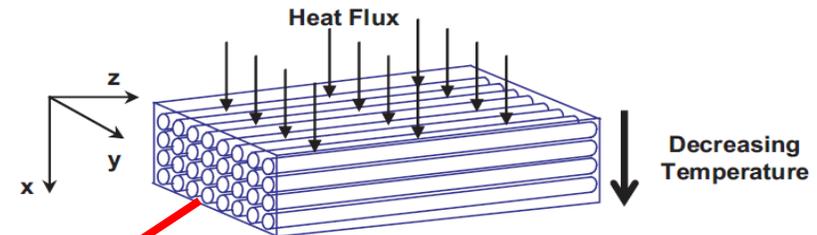
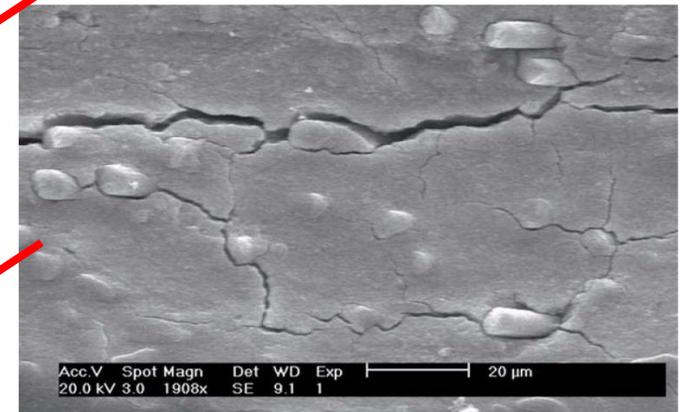


Table 5.1. Summary of the main processes when a composite is exposed to fire

- Anisotropic heat conduction through virgin material and char
- Thermal expansion/contraction
- Decomposition of polymer matrix and organic fibres
- Pressure rise due to formation of combustion gases and vapors
- Flow of gases from the reaction zone through the char zone
- Flow of gases into the virgin composite
- Thermally-induced strains.
- Formation of delamination and matrix cracks
- Reactions between char and fibre reinforcement
- Ablation

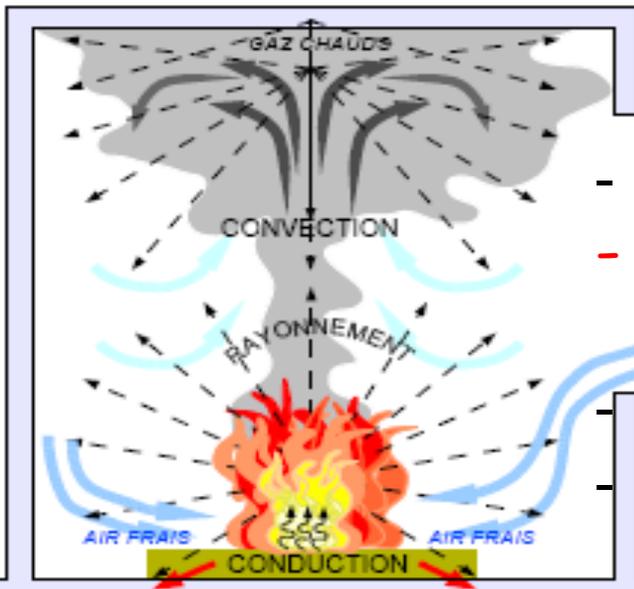


(b)

Figure 2.36. (a) Delamination and (b) matrix cracking within composite laminates exposed to fire.

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## Le feu: un couplage fort entre des phénomènes variés



- L'ignition et la dégradation des matériaux

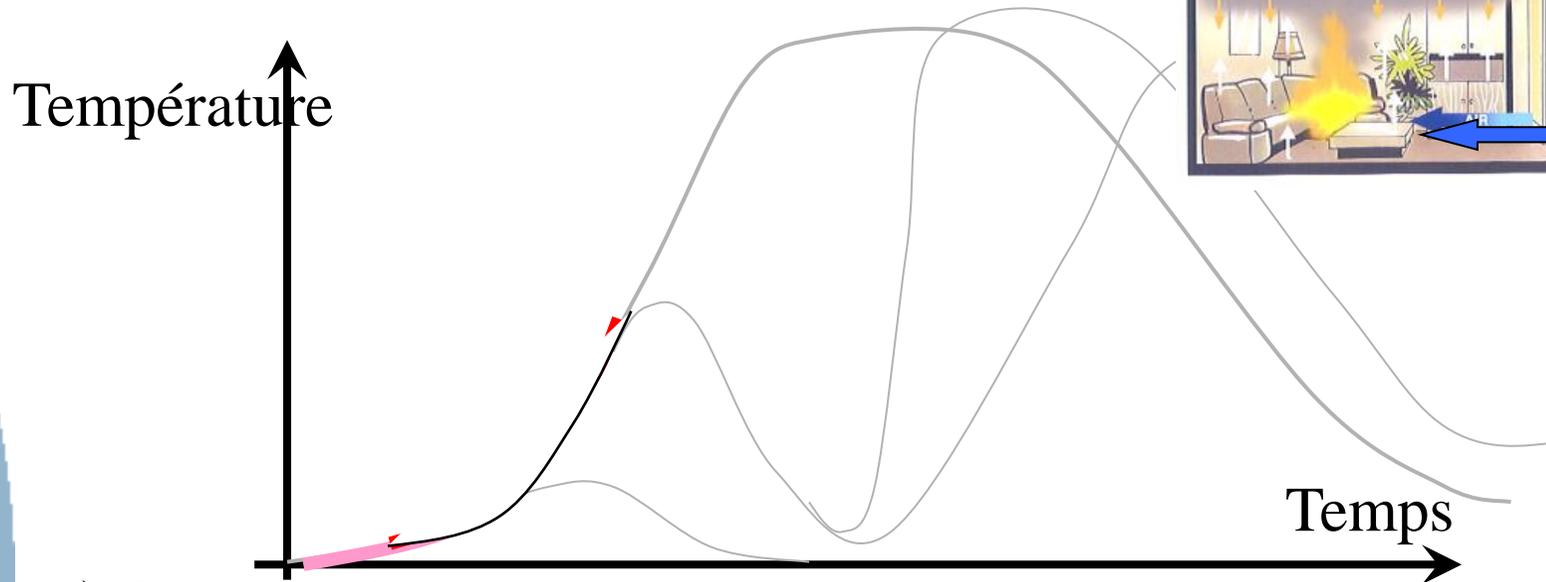
- *le dégagement de chaleur et  
le développement du feu*

La production et la circulation des fumées

L'échauffement des structures

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

- *le dégagement de chaleur et le développement du feu*



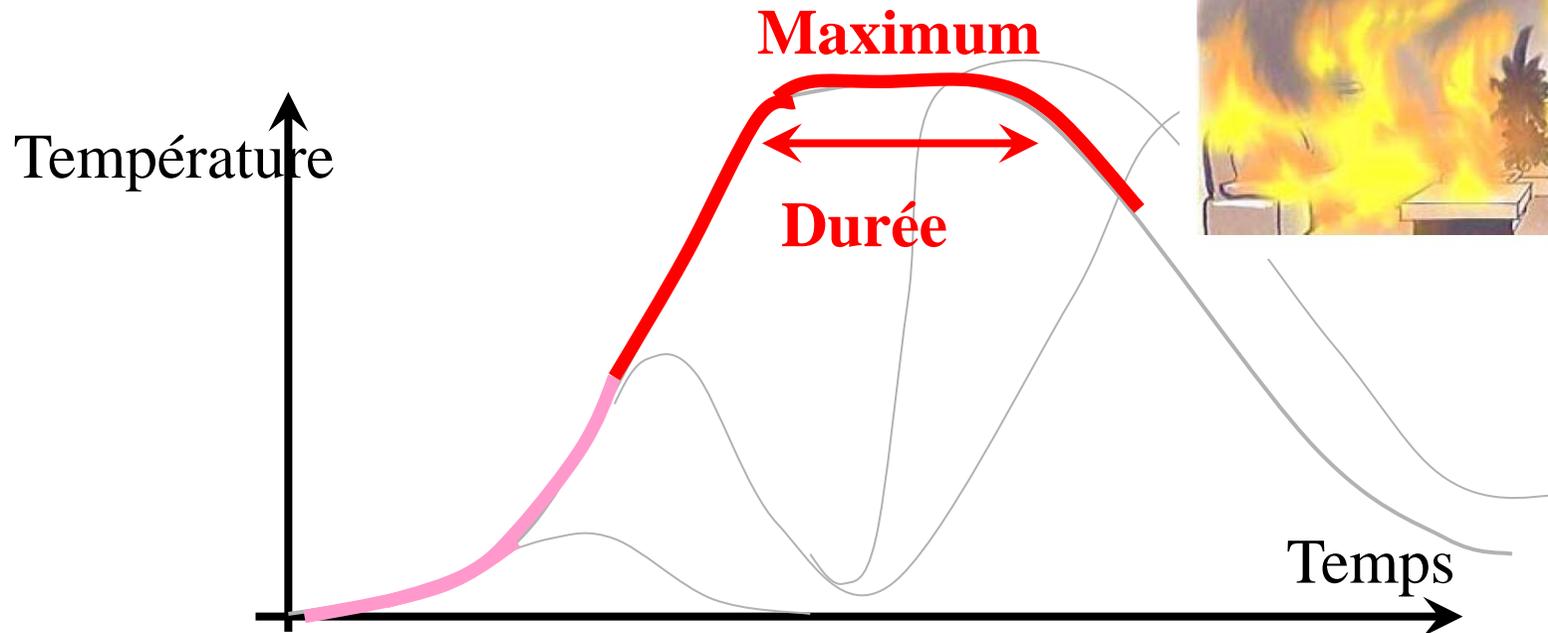
➤ Pour la sécurité incendie:

Un scénario = cinétique du dégagement de chaleur  
( $Q = \alpha \cdot t^2$   $\alpha =$  quelques  $W/s^2$  à  $200 W/s^2$ )

➤ Cette phase correspond à la propagation d'un front de flamme sur un combustible: Analogie avec les feux naturels ?

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

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

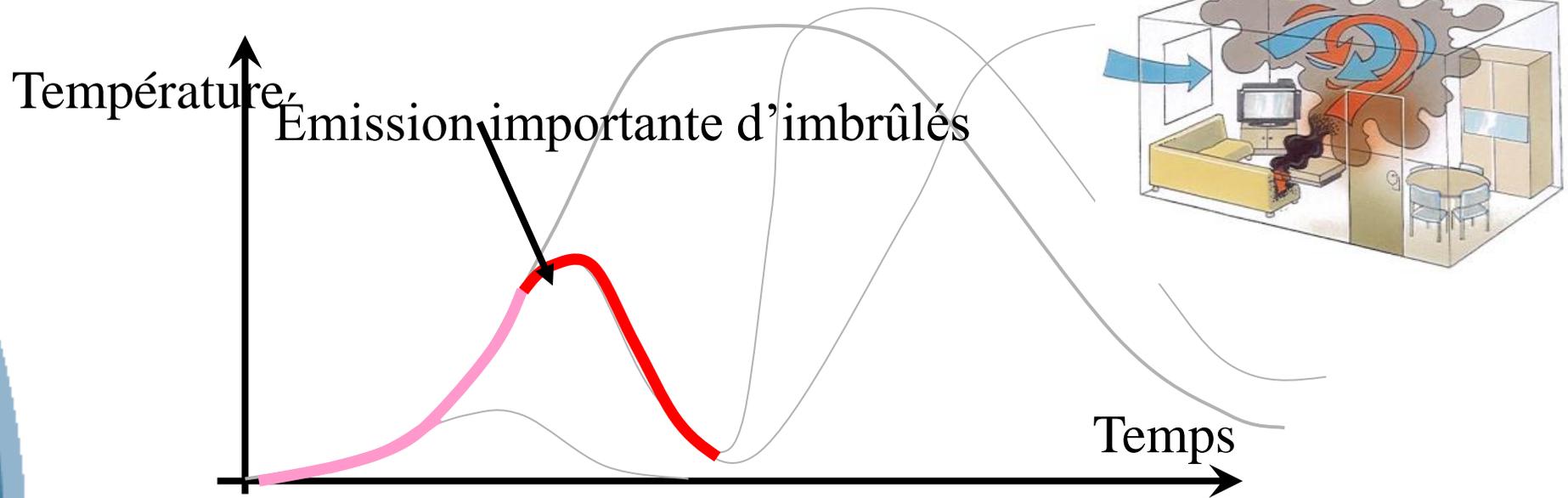


Pour la sécurité incendie:

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

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## Si la ventilation du foyer est insuffisante



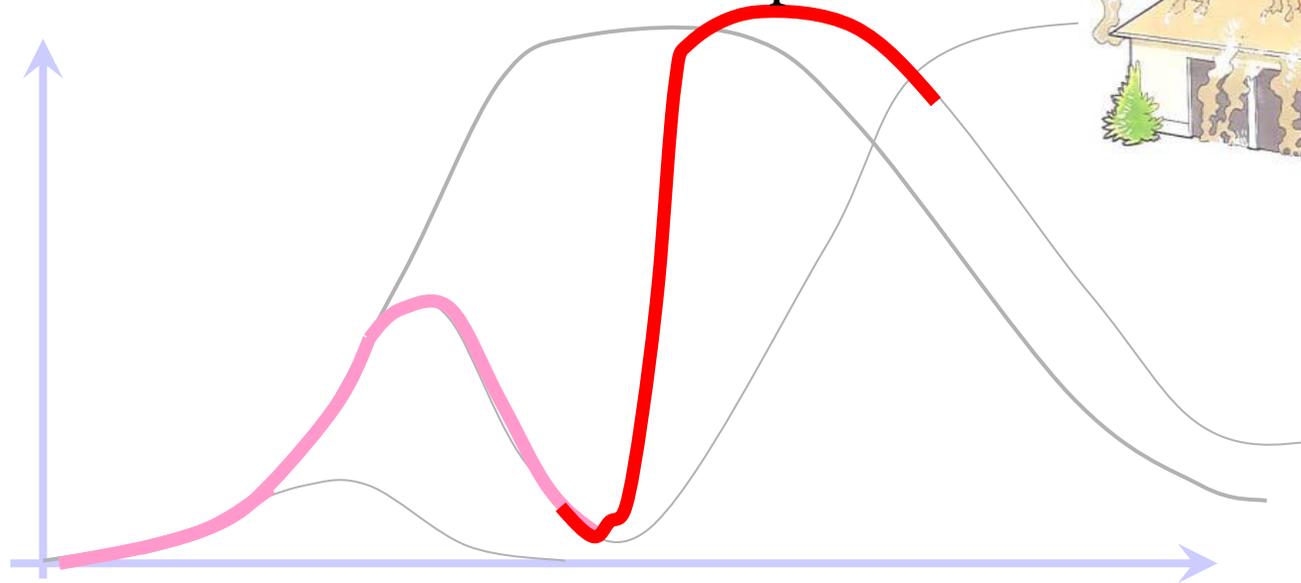
- le feu manque d'air, apparition d'un feu couvant et d'une diminution des températures dans la pièce.
- Cette phase est en générale à l'origine d'une production importante de gaz imbrûlés et de substances dangereuses.

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## Si la ventilation des foyers est insuffisante

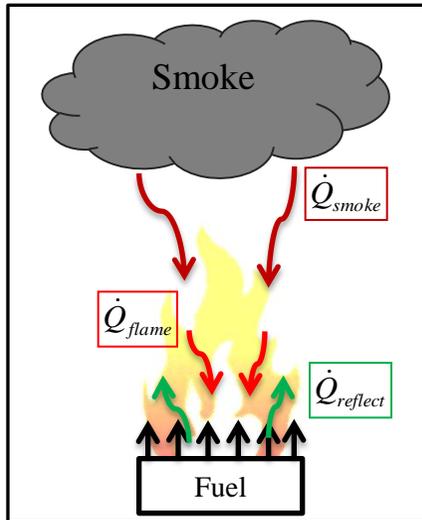
Cela peut entraîner un phénomène explosif :  
le *backdraft* ou explosion de fumée:

====>une montée brutale de la température.



# Quelques notions sur le développement d'un incendie

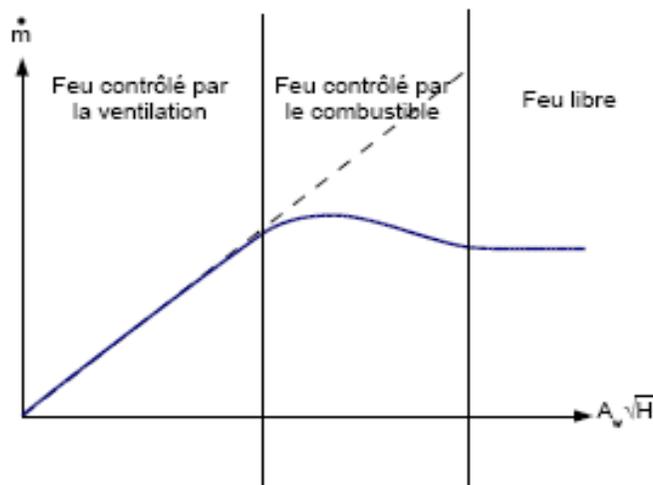
## Le dégagement de chaleur



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

$$\dot{m}_{loss} = \frac{\dot{Q}_{received} - (\dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{rerad} + \dot{Q}_{corr})}{L_v}$$

Mais la puissance dégagée dépend de la ventilation

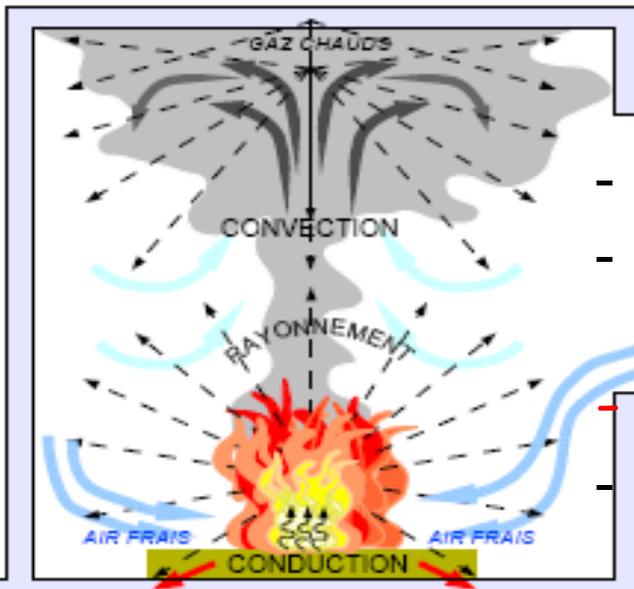


Évolution du taux de combustion d'un feu confiné en fonction du facteur d'ouverture

La ligne en pointillés représente le taux de combustion donné par la relation de Kawagoe.

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## Le feu: un couplage fort entre des phénomènes variés



- L'ignition et la dégradation des matériaux
- le dégagement de chaleur et

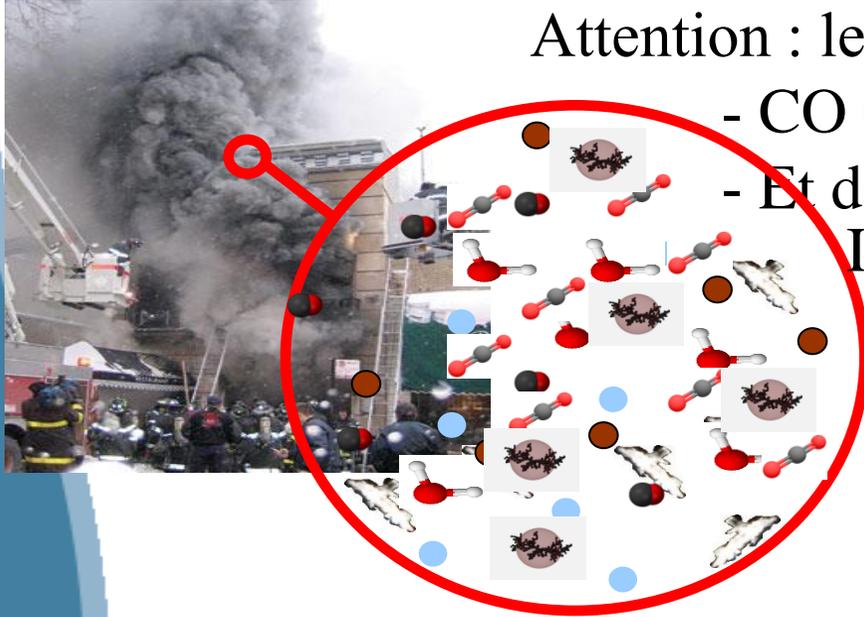
le développement du feu

***La production et la circulation des fumées***

L'échauffement des structures

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## la production et la circulation des fumées



Attention : les fumées d'incendies ce n'est pas que

- CO CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O en phase vapeur

- Et des particules de suies

Il y a aussi

des hydrocarbures lourds condensés

(goudrons)

des cendres (combustion du bois)

des gouttes d'eau si  $T_p < T_{p, rosée}$

et des gaz toxiques

➤ Une émission importante de fumées a pour conséquences:

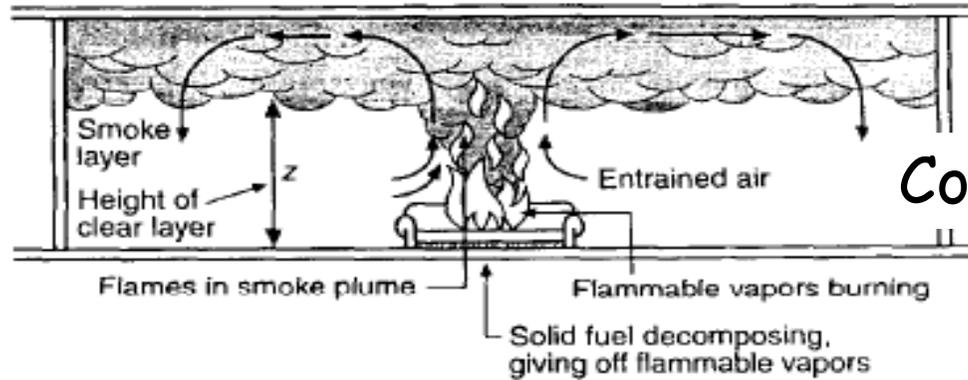
- un accroissement du risque de propagation

- Une perte de visibilité pour l'évacuation et les secours

- Une exposition à des gaz toxiques: CO, autres ...

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## la circulation des fumées et leur extraction



Convection naturelle

## Immeuble de grande hauteur: Effet cheminée

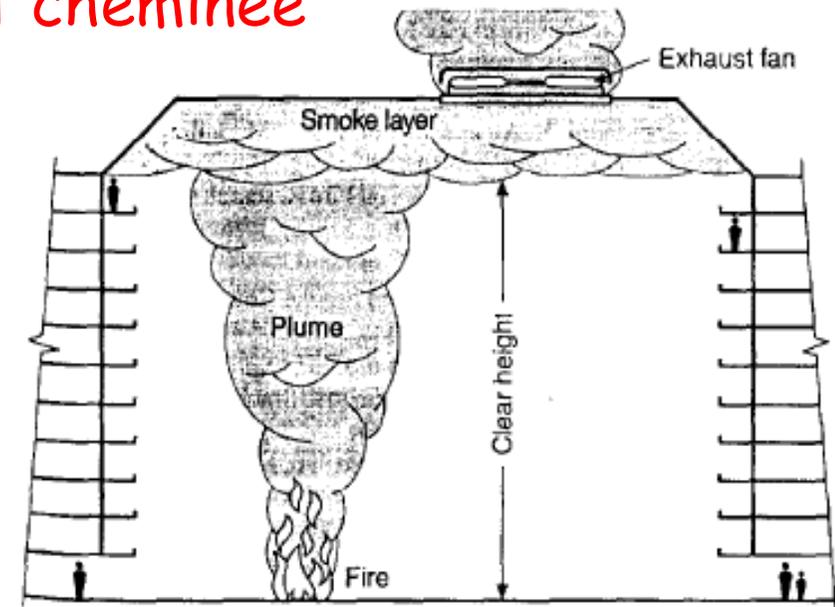
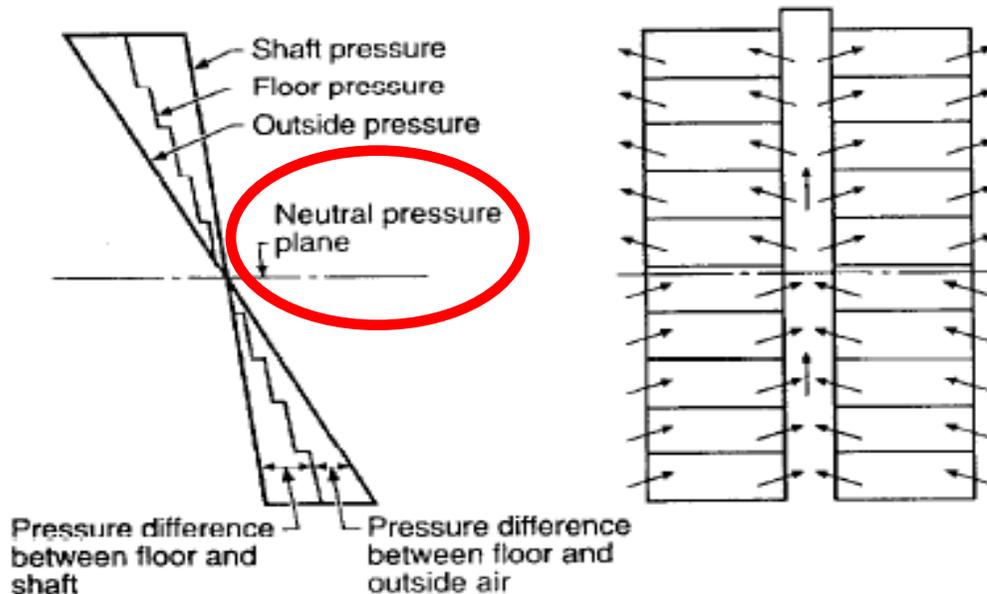
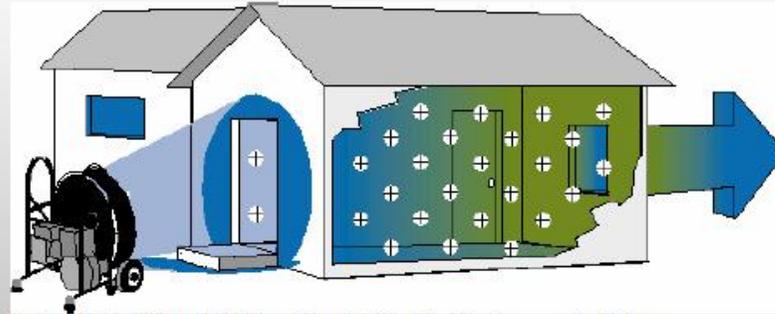


FIG. 7-6J. Atrium smoke exhaust to maintain a smoke-free clear height.

# Quelques notions sur le développement d'un incendie la circulation des fumées et leur extraction

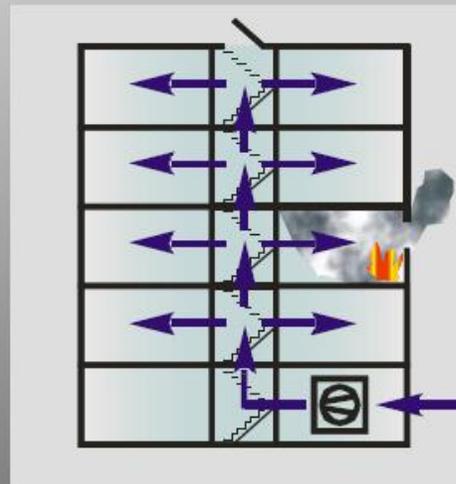
## ➤ Ventilation par pression positive

PPV



Stephen Kerber, William D. Walton, Characterizing Positive Pressure Ventilation using Computational Fluid Dynamics, Gaithersburg, MD, p-1

PDS



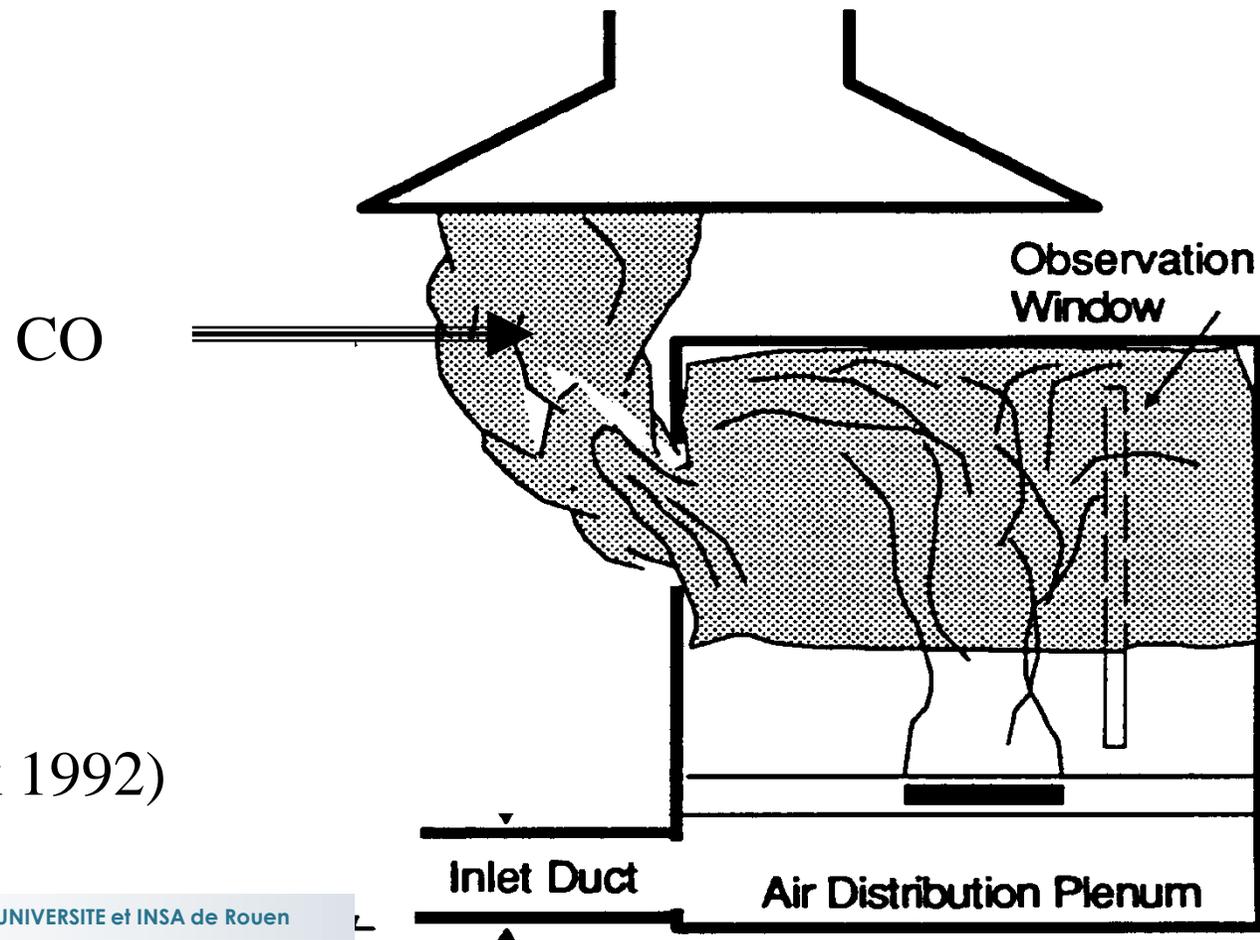
MISTRAL®

Eurofire 2011

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## *La production de CO*

La production de CO dépend de la ventilation du foyer  
si le régime du feu est sous ventilé  $\implies$  CO  $\nearrow$

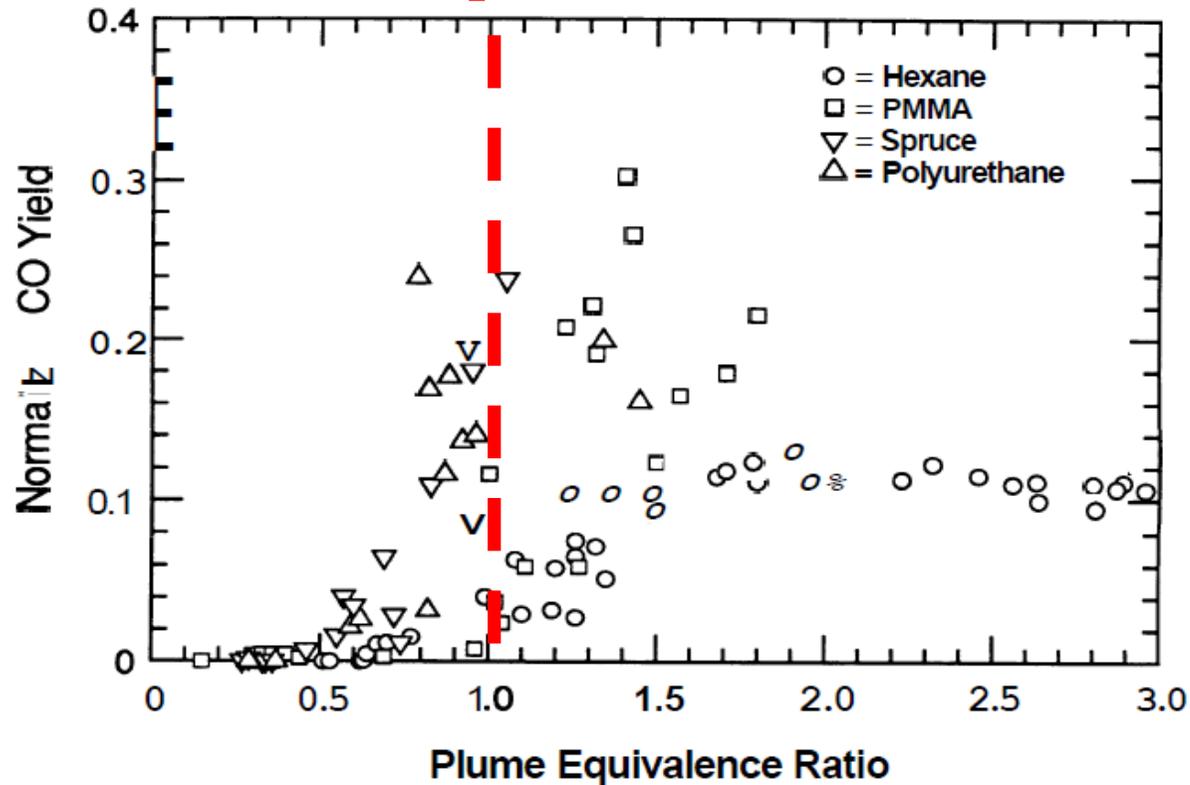


(Gottuk 1992)

## 5 Propriétés et caractéristiques des fumées d'incendies:

### La production de CO

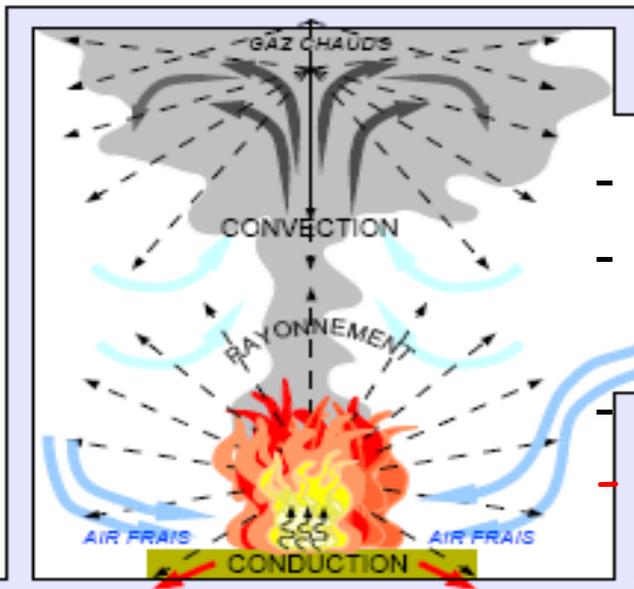
(Gottuk 1992)



CO Yield = débit massique CO / débit massique combustible

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

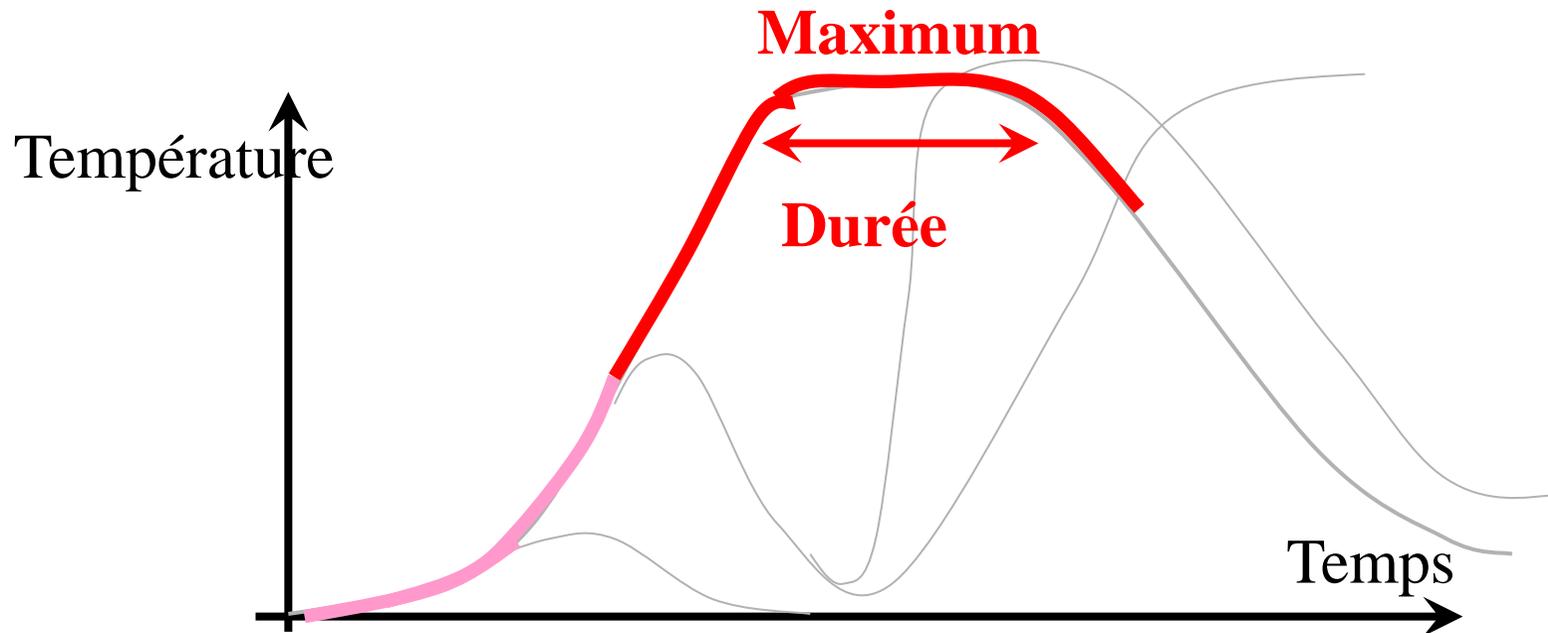
## Le feu: un couplage fort entre des phénomènes variés



- L'ignition et la dégradation des matériaux
- le dégagement de chaleur et le développement du feu
- La production et la circulation des fumées
- ***L'échauffement des structures***

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## *L'échauffement des structures: Fonction du scénario*



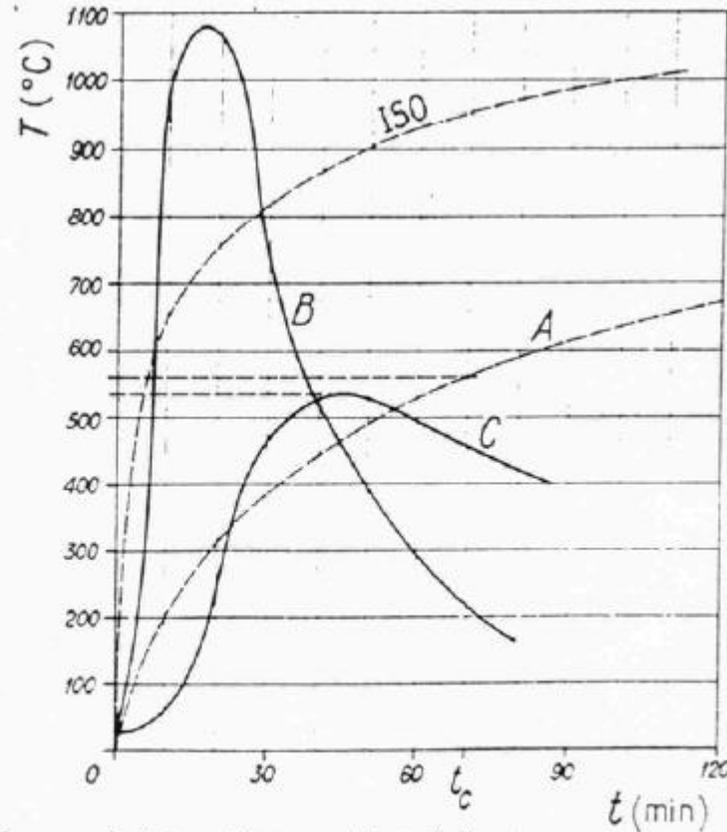
Pour la tenue des structures:

le maximum et la durée du dégagement de chaleur

**Principe de l'ingénierie : retenir les scénarios aboutissant aux sollicitations thermiques maximales pour chaque cible en fonction du critère de performances (stabilité au feu, coupe feu, ...)**

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## Résistance: Comportement au feu des structures

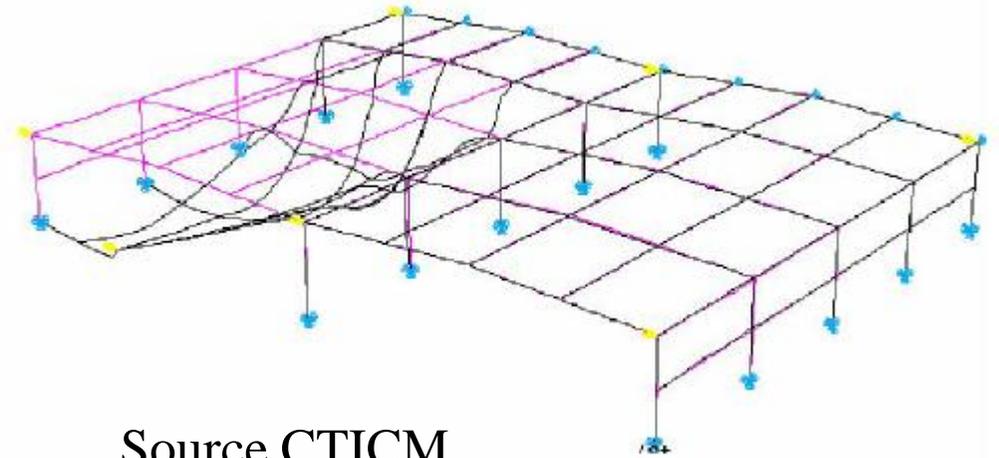
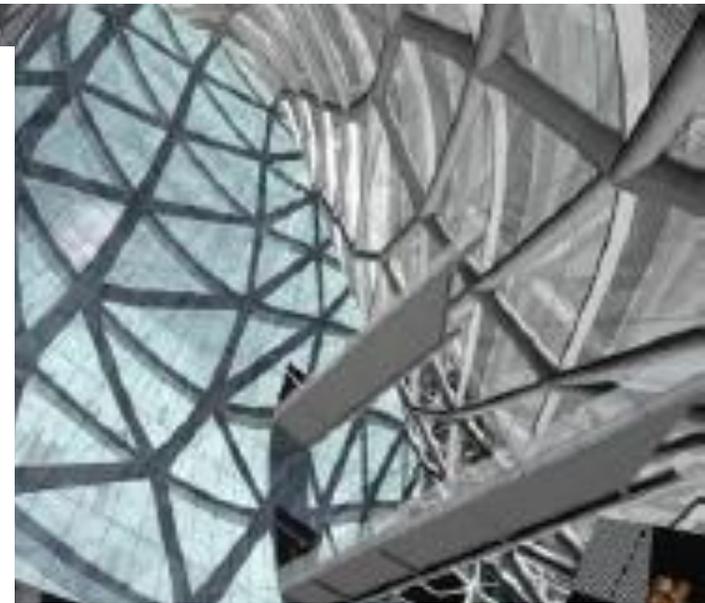


*Légende : ISO : courbe normalisée (température ambiante du four)  
A : réponse de l'élément dans le four soumis à la courbe ISO  
B : courbe de température ambiante d'un incendie naturel  
C : réponse de l'élément dans l'essai d'incendie naturel*

(Source INERIS)

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

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



Source CTICM

# Quelques notions sur le développement d'un incendie

## ➤ Echauffement et tenue des structures:

- L'effondrement peut être dramatique (WTC)
- Matériaux standards: acier, béton, mixte, bois
- Nouveau matériaux: composites
- Calcul du comportement de la structure

## ➤ Quelques nouvelles préoccupations

- Retour vers l'utilisation des matériaux naturels
- Feux de façades
- Systèmes de production distribuée d'énergie  
(ex:panneaux solaires)

# Groupe de Recherche Feux du CNRS

Piloté par les laboratoires



dépasser les frontières



CORIA (UMR6614) Université-INSA de Rouen.



LEMTA (UMR7563) [Nancy-Université](#).

IUSTI (UMR6595) Polytech'Marseille



P-PRIME (UPR 9028) ENSMA-Université de Poitiers



SPE (UMR 6134) Université de Corse

M2P2 (Université Aix-Marseille)

PRISME (Université Orléans)





[Accueil](#)

[Partenaires](#)

[Adhérer](#)

[Les réunions](#)

[Rencontres](#)

[Biblio.](#)

[Publis](#)

[Annonces](#)

[Conférences](#)

[Emplois](#)

[Post-Docs](#)

[Thèses](#)

[Stages](#)

[Administration](#)

# *GDR - Groupe de Recherche "Feux"*

## *GDR CNRS n°2864*

2005 - 2017

---

Les dernières journées GDR ont été organisées par l'Institut P' de Poitiers

11 et 12 avril 2013

[Quelques informations sur cette réunion](#)

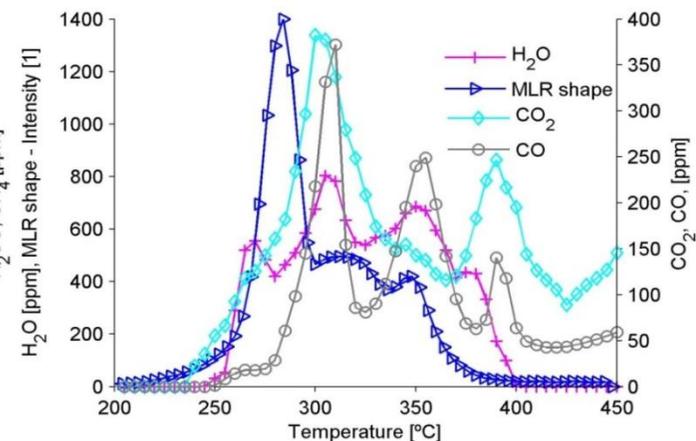
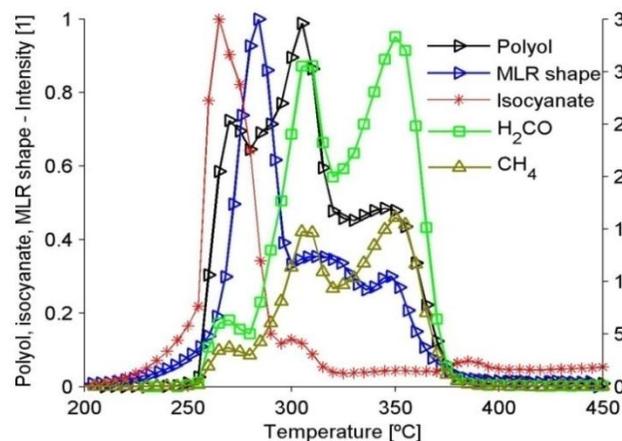
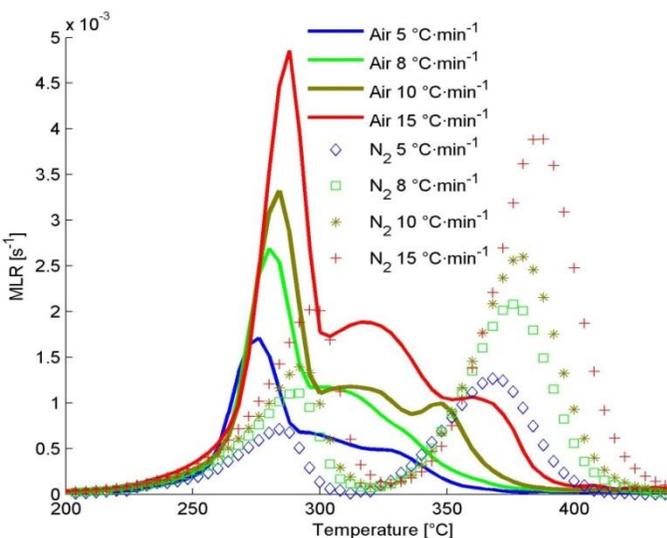
---

Ce Groupe de Recherche "Feux" a été constitué sous la responsabilité de l'Institut des Sciences et Technologies de l'Information et de l'Ingénierie (INST2I) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

## Etude de la décomposition thermique des solides

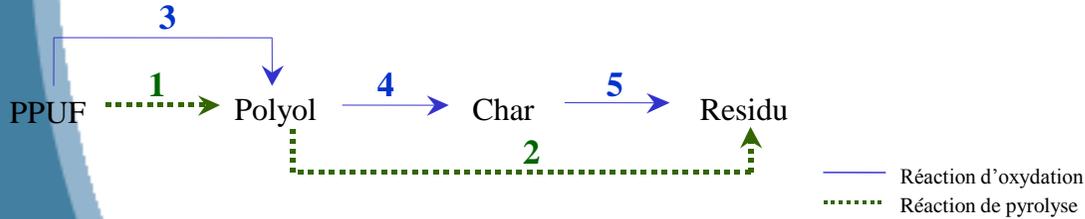
**Objectifs des études :** Améliorer les « modèles de pyrolyse » visant à décrire la décomposition thermique des solides : terme source.

**Démarche Multi-échelles :** ATG-DSC, cône calorimètre, panneau radiant, caisson 1m<sup>3</sup>, single burning Item caisson 8m<sup>3</sup>, container... avec étude simultanée des évolutions physiques et chimiques au cours de la dégradation.



ATG-IRTF sous air à 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$

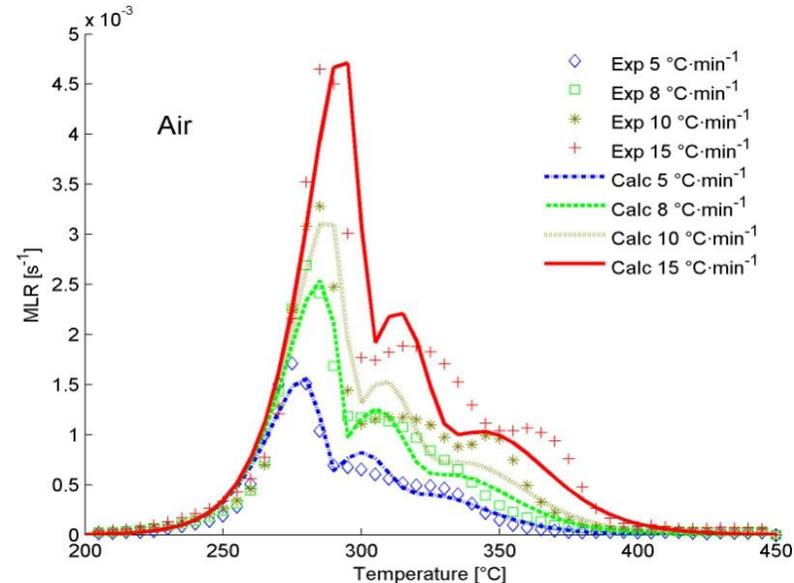
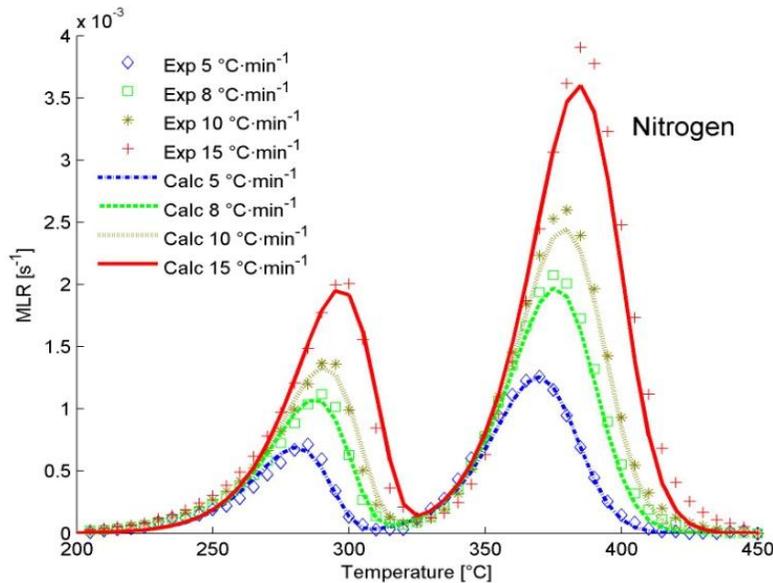
# Etude de la décomposition thermique des solides



$$\dot{\omega}_i = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) m_i^{n_i} y_{O_2}^{\delta}$$

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{b=1}^4 MLR_b = \frac{dm_{PPUF}}{dt} + \frac{dm_{Polyol}}{dt} + \frac{dm_{Char}}{dt} + \frac{dm_{Residu}}{dt}$$

$$\frac{dm}{dt} = (\nu_1 - 1)\dot{\omega}_1 + (\nu_2 - 1)\dot{\omega}_2 + (\nu_3 - 1)\dot{\omega}_3 + (\nu_4 - 1)\dot{\omega}_4 + (\nu_5 - 1)\dot{\omega}_5$$



*Comparaison des courbes de MLR numériques et expérimentales*

# Experimental study of the dynamic behavior of a flame in a 1 m<sup>3</sup> under-ventilated compartment: Application to fire safety.

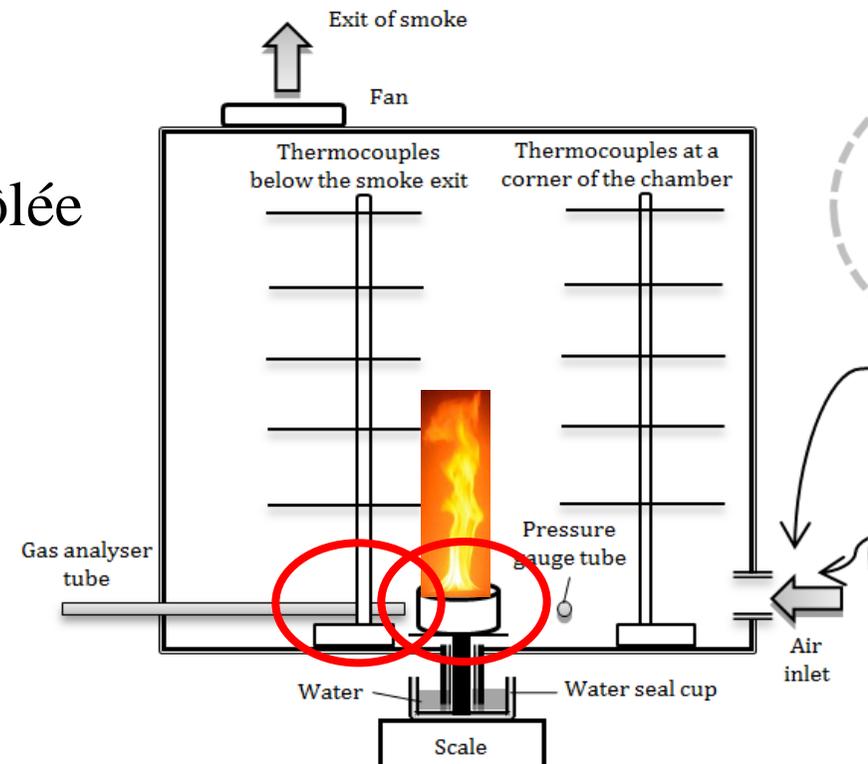
A. COPPALLE<sup>a</sup>, A. S. Loo<sup>a</sup>, P. Ainé<sup>b</sup>

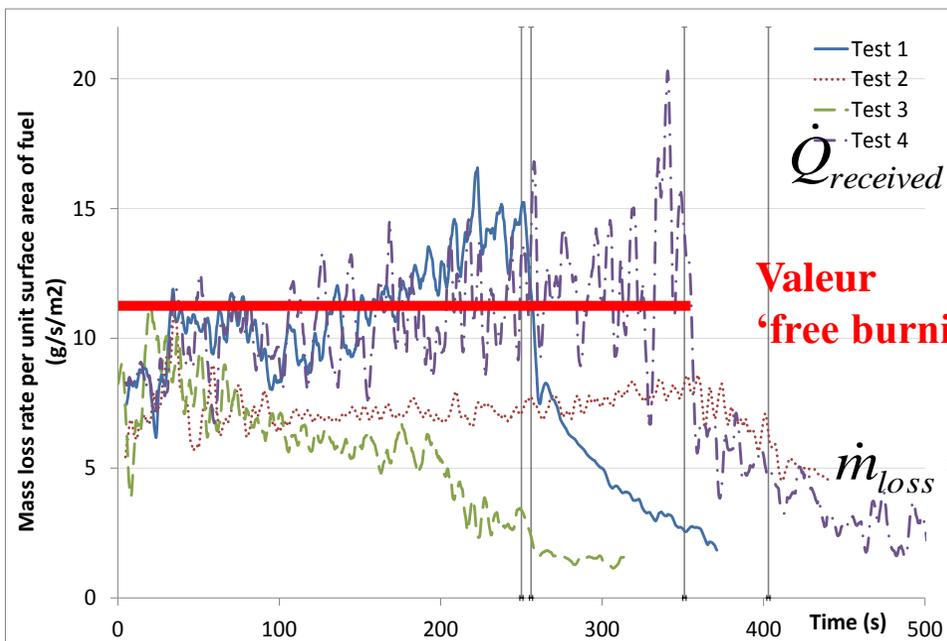
a. UMR 6614 CORIA, *St Etienne du Rouvray*, b. AREVA

*CFM 2013*

## Contexte:

- Les incendies dont la ventilation est contrôlée
  - immeubles de grandes hauteurs
  - locaux recevant du public
  - industrie nucléaire.





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

$$\dot{m}_{loss} = \frac{\dot{Q}_{received} - (\dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{rerad} + \dot{Q}_{corr})}{L_v}$$

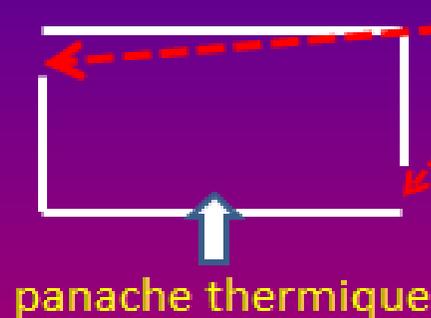
Perte de masse surfacique

Les barres verticales indiquent les temps d'extinction (vidéo)



Normandie-Université  
Le Havre, LOMC / Rouen, CORIA  
Contrôle des Mouvements de Fumées  
dans la Lutte contre les Feux de Compartiments

Etudes fondamentales avec maquette thermique, CORIA, CNRS UMR 6614

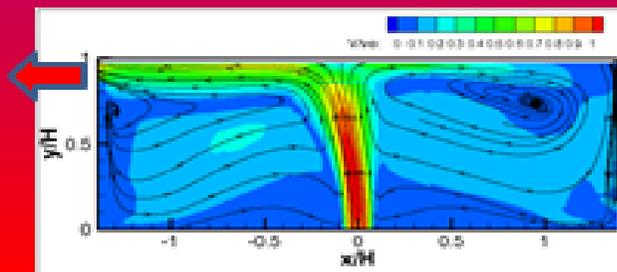


ouvertures

Des approches analytiques et expérimentales montrent que les régimes de ventilation dépendent du nombre de Froude densitométrique  $Fr_H^*$  (Paranthen et Gonzalez, 2010)

$$\overline{Fr}_H^* = (Q_0^2 / (\overline{\Delta\rho_H} / \rho_{ext}) g H (C_S A_S)^2 (\rho_0 / \rho_{ext}) (\rho_0 / \rho_{int} (H)))$$

- Régime de déplacement ou naturel  $Fr_H^* \ll 2$
- Régime intermédiaire  $Fr_H^* \sim 2$
- Régime bloqué  $Fr_H^* \gg 2$



Exemple du champ de vitesse à l'intérieur de l'enceinte (plan médian) en régime intermédiaire pour  $Fr_H^*=2,3$  (Ngondiep et al., 2012)

**Perspectives :** Contrôle des écoulements internes par soufflage par jet au niveau de l'ouverture basse.

# IUSTI (UMR 7343) — Equipe Risques & Transferts

*Ecoulements à masse volumique variable (type fumées d'incendie/hors cadre Boussinesq)  
en géométries + ou – complexes (du milieu libre aux locaux ventilés/connectés)*

## Action récente : Revisiter les modèles de panaches en milieux homogène et stratifiés

**Point de départ** : Les codes en ingénierie incendie utilisent, pour décrire les panaches, des solutions analytiques de type point source translaté donnant :

$$\text{diamètre} \sim z - z_v \quad \text{vitesse} \sim (z - z_v)^{-1/3} \quad \Delta\text{température} \sim (z - z_v)^{-5/3}$$

**Constat** : Ces solutions sont acceptables en champ lointain (de la source) mais peuvent conduire à des valeurs non physiques en champ proche.

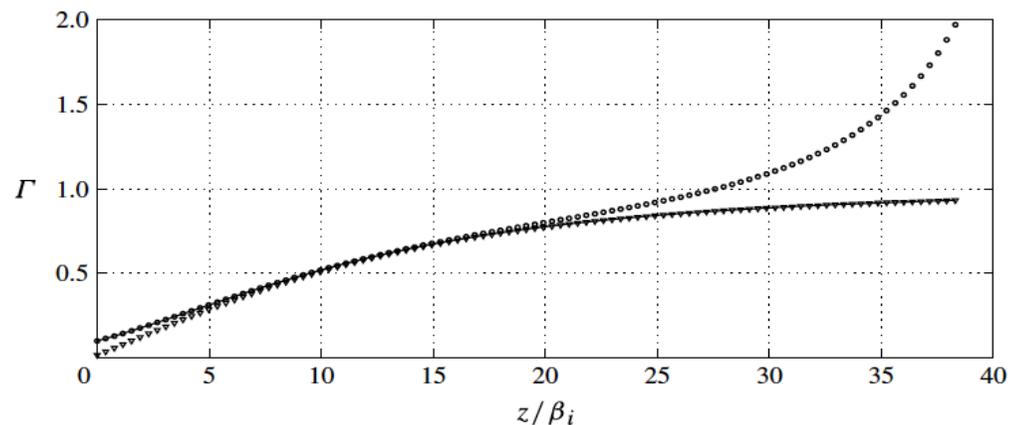
**Démarche** : Recherche de solutions analytiques simples sur la base du raccordement de solutions asymptotiques (champ proche et champ lointain) de l'équation d'évolution de la fonction panache  $\Gamma$  (forme normalisée du nombre de Richardson local) dont dépendent les variables primaires du panache (diamètre, vitesse et masse volumique ou température)

### Figure à droite : Evolution verticale de la fonction panache

Trait plein : solution exacte

Ronds : Solution analytique champ proche

Triangles : Solution analytique champ lointain



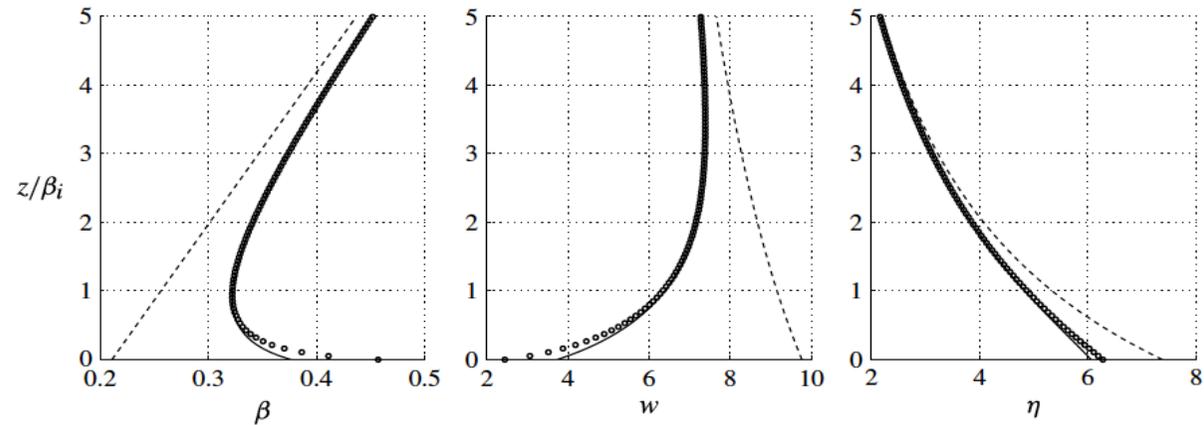
*Ecoulements à masse volumique variable (type fumées d'incendie/hors cadre Boussinesq)  
en géométries + ou – complexes (du milieu libre aux locaux ventilés/connectés)*

**Figure à droite :**  
**Evolution verticale des variables primaires  
du panache (taille, vitesse et densité)**

*Trait plein : solution exacte*

*Trait pointillé : par les solutions point source*

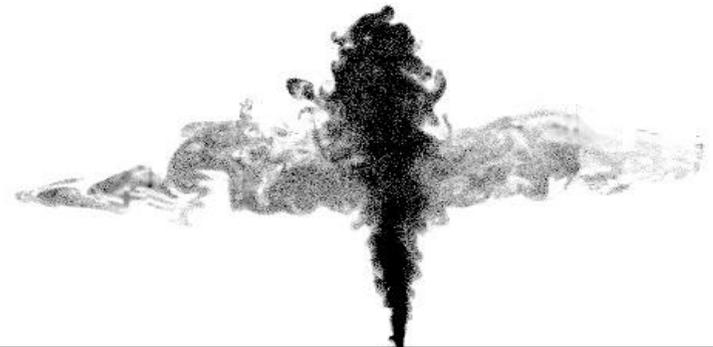
*Ronds : par les solutions asymptotiques raccordées*



**Référence** : Fabien Candelier and Olivier Vauquelin, Matched asymptotic solutions for turbulent plumes, *Journal of Fluid Mechanics*, **699**, pp 489 – 499 (2012)

Ce travail a été récemment étendu au cas des panaches turbulents se développant dans des milieux stratifiés (stables) et complété par des relations donnant les hauteurs maximales atteintes par ces panaches et les niveaux de dilution dans la couche d'étalement radial.

**Référence** : Rabah Mehaddi, Fabien Candelier and Olivier Vauquelin, Naturally bounded plumes, *Journal of Fluid Mechanics*, **717**, pp 472-483 (2013)



Opération scientifique Combustion, Feux de Forêts, Feux Confinés  
 LEMTA UMR 7563 – Université de Lorraine, CNRS

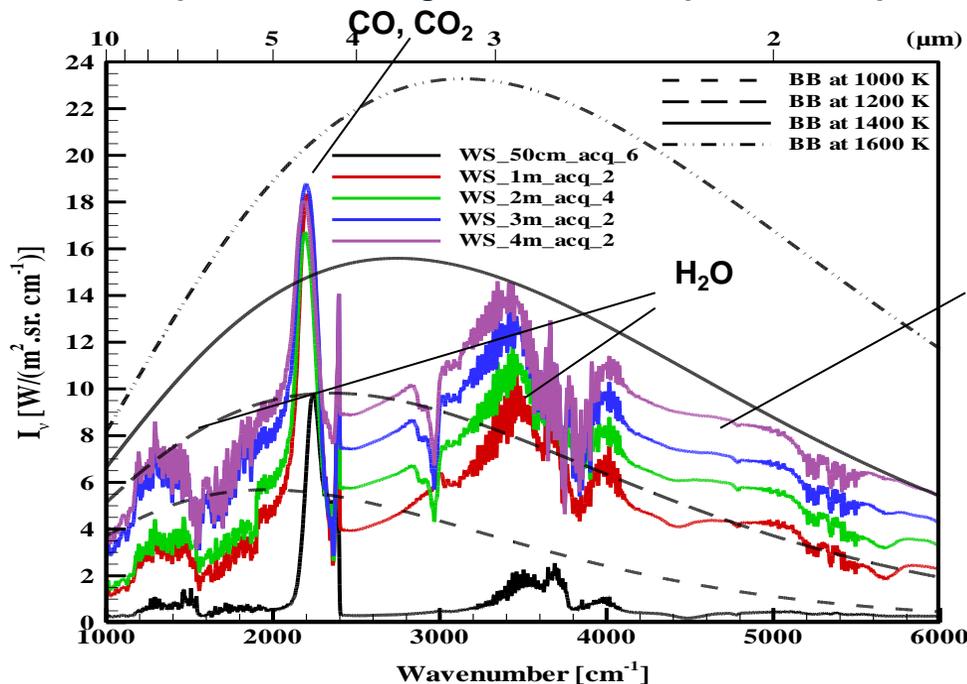
A l'origine : travaux de modélisation sur la propagation des feux par *O. Séro-Guillaume*  
 Aujourd'hui : 10 personnes dont 4 permanents

## Focus sur le rayonnement des feux de végétaux

Caractérisation de flammes en tunnel à feux (IUSTI, CEREN, LEMTA)

Mesures par spectromètre FTIR et caméra multispectrale

Les spectres infrarouges montrent l'importance respectives des suies et des gaz de combustion



En dehors des pics dus aux gaz, les suies rayonnent aussi, mais l'ensemble donne de fortes variations spectrales  
 L'épaisseur optique de la flamme augmente le niveau des flux rayonnés

Les températures caractéristiques, évaluées au niveau du pic CO<sub>2</sub>, approchent des 1600K

*Experimental investigation of radiation emitted by optically thin to optically thick wildland flames, Boulet et col., J. of Combustion, ID 137437, 2011*

Exemples de spectres sur feux de frises de bois, épaisseurs de flammes : 0,50 – 1 – 2 – 3 et 4m.  
 Des pics pour CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O, un fond continu pour les suies

# Identification de concentrations en espèces et température

## Utilisation de modèles radiatifs et d'algorithmes génétiques collaboration / IUSTI

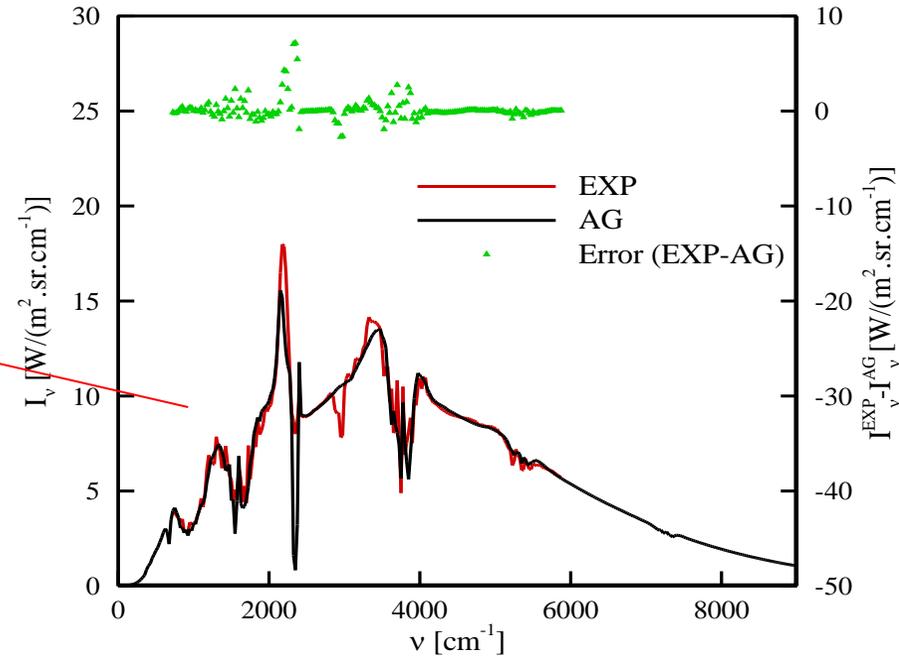


1° On sait reconstruire un spectre sur la base d'une composition de flamme (température et concentrations en espèces rayonnantes)

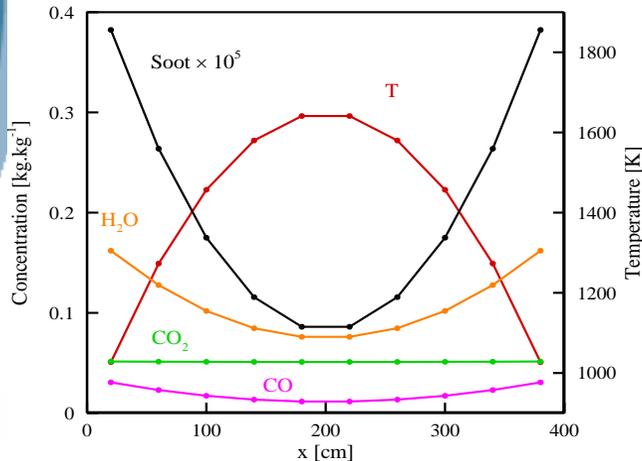
**Spectre expérimental et reconstruit pour une flamme de 4m d'épaisseur avec identification des champs de concentration et température optimaux**



2° On accède à des profils de température et d'espèces dans l'épaisseur de flamme par identification sur la base de mesures de rayonnement

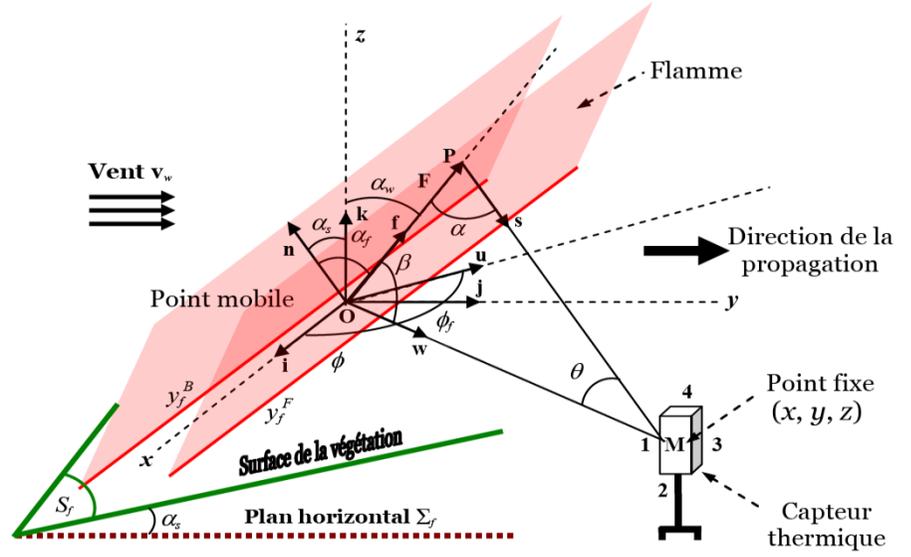
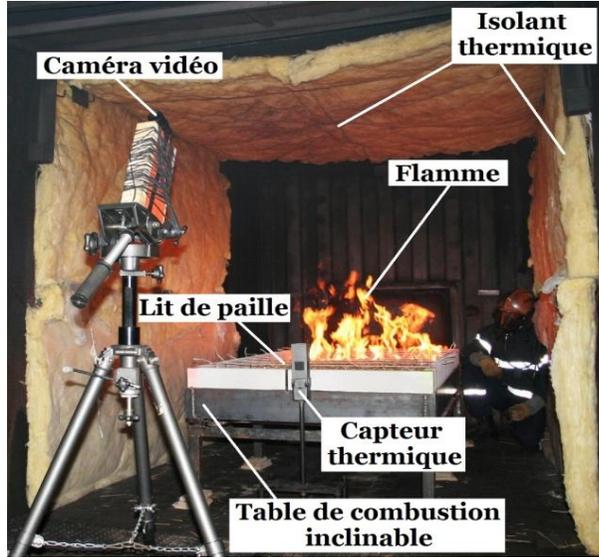


**Recherche de profil parabolique dans ce cas. Des données inédites, obtenues par mesure non intrusive!**



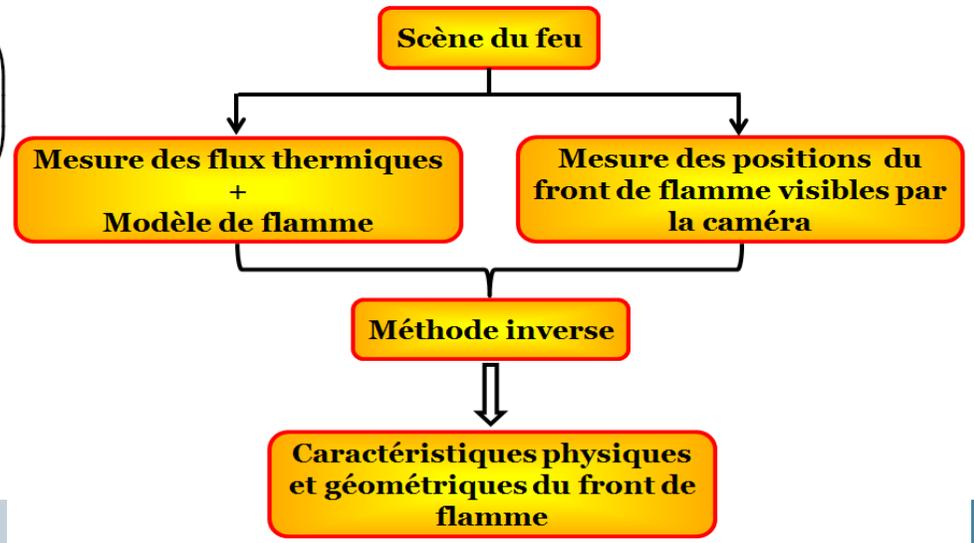
*Determination of woody fuel flame properties by means of emission spectroscopy using a genetic algorithm, Billaud et col., Combust. Sci. Technol., 185, 579-599, 2013*

# PRISME: Caractérisation physique et géométrique des fronts de flamme (1/2)

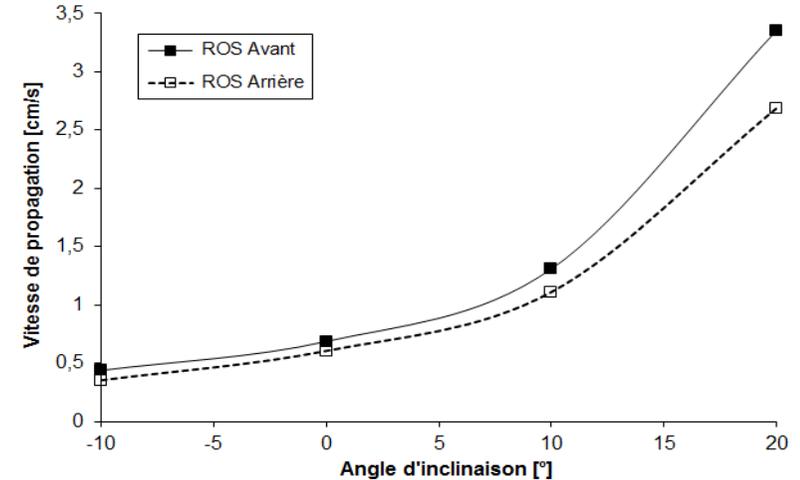
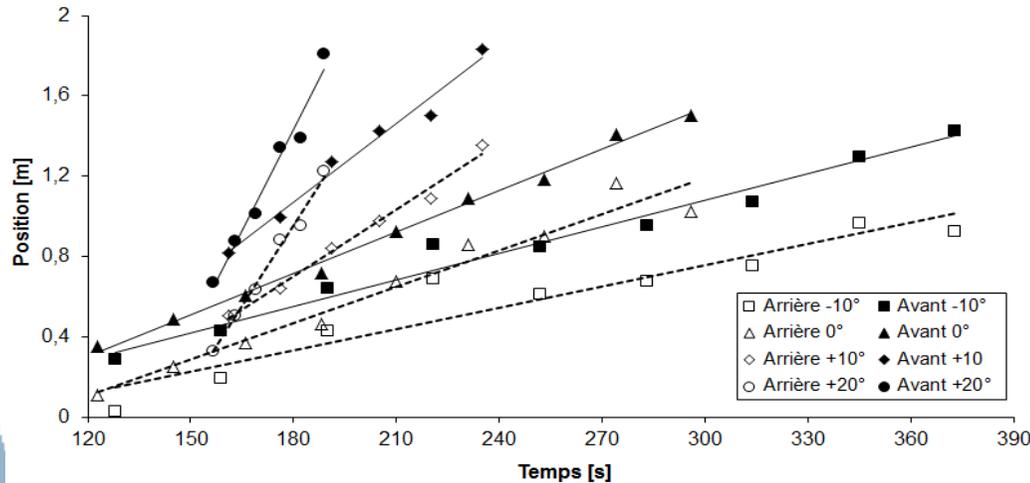


$$\Phi_a^{th}(M) = \frac{B}{\pi} \int_{-W}^W K_f T_f^4 \ln \left( \frac{\sqrt{(y_0 - y_f^f)^2 + X^2} l_f + \sqrt{(y_0 - y_f^B)^2 + X^2 + l_f^2}}{\sqrt{(y_0 - y_f^B)^2 + X^2} l_f + \sqrt{(y_0 - y_f^f)^2 + X^2 + l_f^2}} \right) dY$$

$$\Phi_l^{th}(M) = \frac{B}{\pi} \int_{y_0 - y_f^B}^{y_0 - y_f^f} K_f T_f^4 \ln \left( \frac{Y}{\sqrt{Y^2 + W^2}} \frac{l_f + \sqrt{Y^2 + W^2 + l_f^2}}{l_f + \sqrt{Y^2 + l_f^2}} \right) dY$$



# PRISME: Caractérisation physique et géométrique des fronts de flamme (2/2)



Pente [°]	-10	0	+10	+20
Flux radiatif volumique de flamme $\phi_f$ [kW·m <sup>-3</sup> ]	7,630	7,624	24,023	40,552
Température de flamme $T_f$ °C	602	602	893	1056
Émissivité de la flamme $\varepsilon_f$	0,18	0,18	0,25	0,27
Longueur de flamme $l_f$ cm	53,5	65,2	116,5	112
Épaisseur moyenne de flamme $\delta_f$ cm	28,2	27,0	40,8	42,9

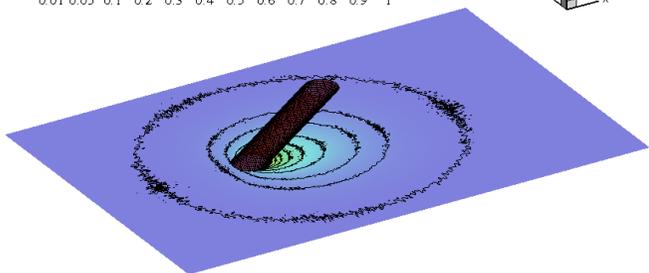
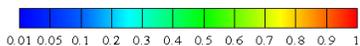
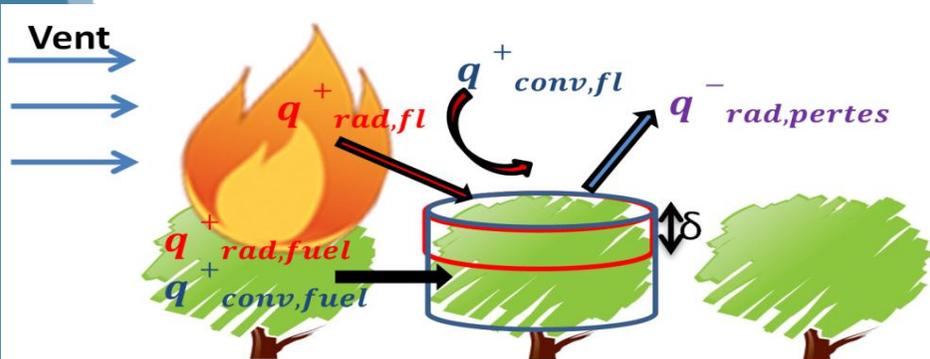


**S. Rudz, K. Chetehouna, O. Séro-Guillaume**, Metrological Tool for the Characterization of Flame Fronts Based on the Coupling of a Heat Flux Approach with Image Processing Data, *Fire Technology*, Vol. 47, pp. 491–505, 2011.

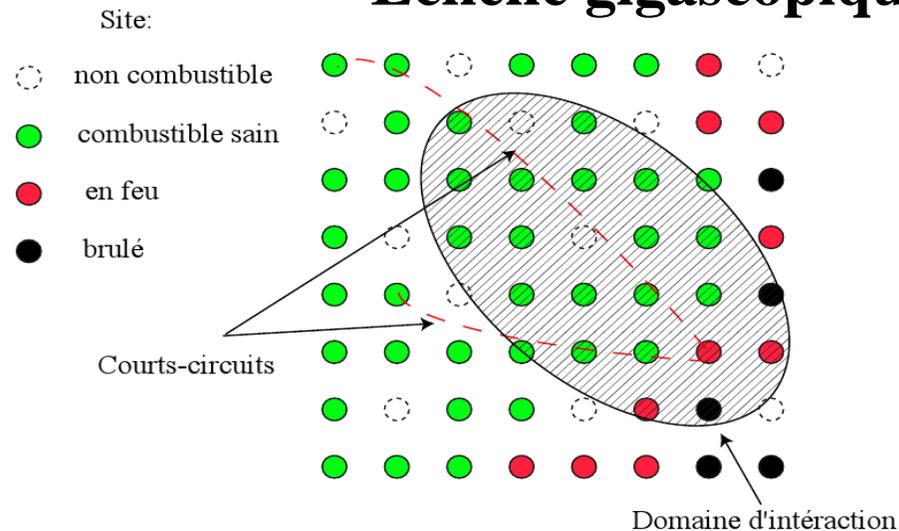
**Présentation du modèle de propagation**

**Modèle de réseau stochastique de « petit monde »** basé sur une équation bilan d'énergie à l'échelle macroscopique **incluant l'ensemble des mécanismes de propagation** (rayonnement des flammes et des braises, convection des gaz chauds, refroidissement radiatif, sautes de feu) et **utilisant le vent local**  
 → simulation « super-real time » (CPU~1/100 temps réel)

**Echelle macroscopique**



**Echelle gigascopique**



**Calcul du rayonnement des flammes:** Modèle de flamme solide+ méthode de Monte Carlo

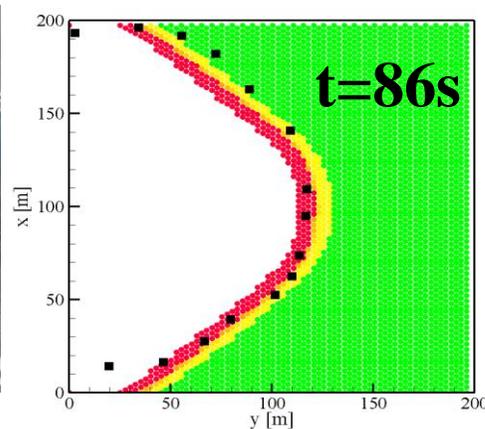
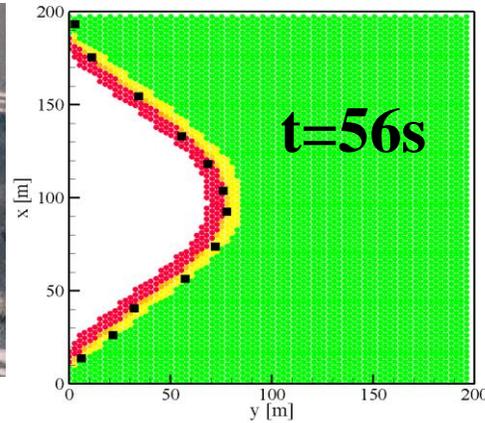
**Calcul de la convection:** méthode de Monte Carlo

**Intrants du modèle:** MNT, COS, Météo, propriétés de la végétation (géométriques, thermo-physiques, inflammabilité et combustibilité)

# Simulating wildfire patterns using a small-world network model (*Ecological Modeling* 221, 2010)

## Validation du modèle de propagation

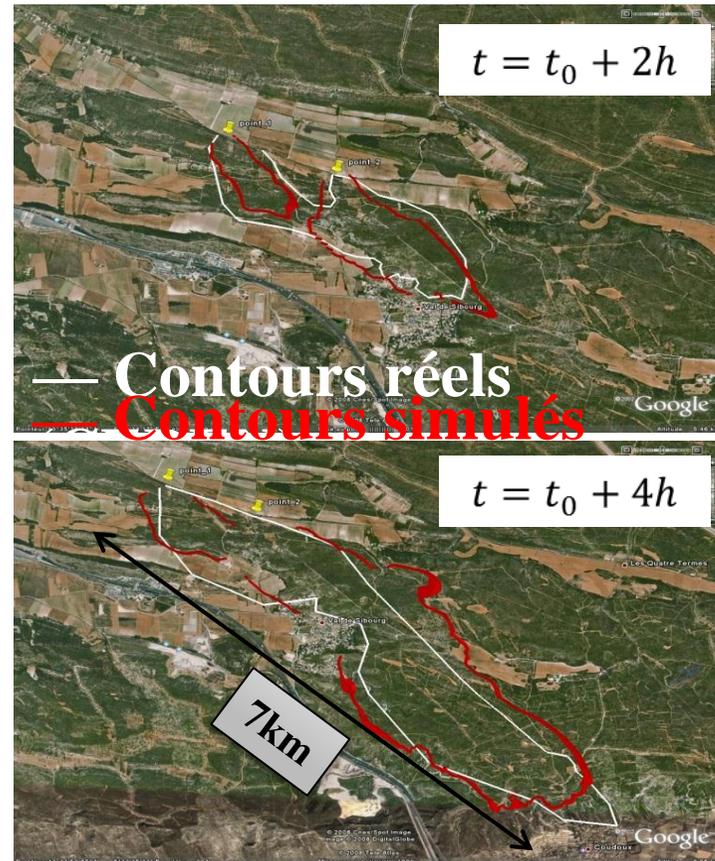
- validation sur brûlage dirigé (Cheney, 1986)



Epaisseur du front: 10m (modèle) vs. 11m (exp.)

- validation sur feux réels (Lançon, 2005)

Benchmark GdR « feux »



CPU  
~3min

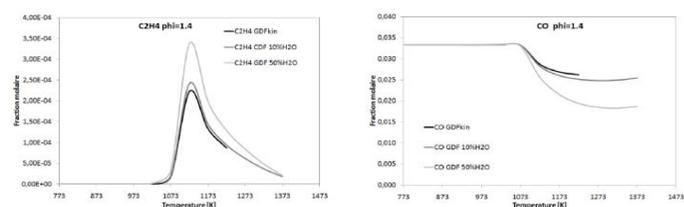
- validation sur feux réels → reproduit le comportement fractal des grands feux



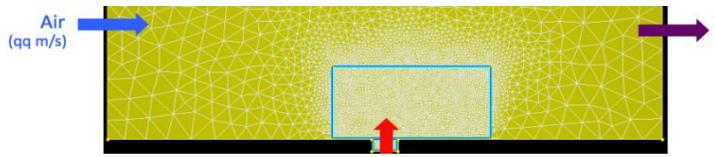
# Incendies de forêts : simulation de la **D**ynamique et des **E**missions **A**tmosphériques par couplage de code.

Approche complètement numérique (informatique) à toute les échelles de l'incendie - ANR COSINUS 2009-2013

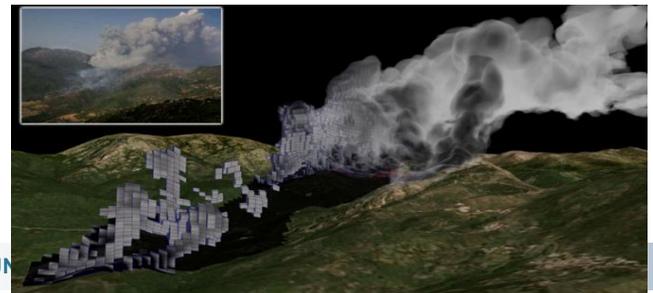
**Echelle feu:** (code GDFKin) développement de schémas cinétiques réduits spécifiques aux feux de végétation, intégrant les précurseurs des polluants (oxydes d'azote) (taille 10 cm<sup>3</sup>, temps de calcul 10 min).



**Echelle flamme:** (code AVBP/Firestar) simulation de propagation de flamme turbulente en utilisant les schémas réduits de l'échelle feu. (résolution 1mm, taille m<sup>3</sup>, temps de calcul 100 heures).



**Echelle front:** (ForeFire++) Modèles et simulation rapide de la dynamique de front de flamme utilisant les paramétrisations de l'échelle flamme. Méthodes et base de données d'incendies réels pour la validation des codes, l'estimation d'incertitude par simulation d'ensembles perturbés. Modèles de flux d'énergies et d'espèces diagnostiques (résolution 10cm, échelle 10000 Ha, temps de calcul 1 min par cas).



## Produits potentiels pour les opérations:

**Code rapide utile en première alerte** Permet de disposer des contours à 10 minutes, 1 heure, 10 heures. Résultats une minute après éclosion



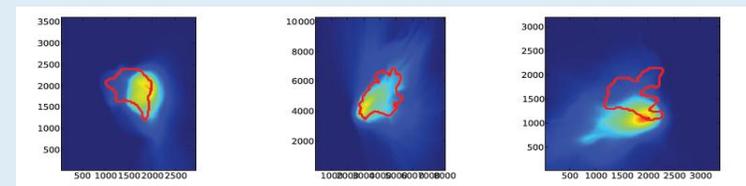
## Code de simulation incendie intégré aux modèles météo, utile en cas d'accident avéré

Permet de disposer, en un temps plus long, de la simulation de la modification de la météo due à l'incendie (changement de régime, pyro-cumulus), évolution et concentration des fumées et toxicité potentielles



## Calcul d'incertitude et diagnostic physique, utile à la prise de décision.

Permet de disposer, grâce à un grand nombre de simulations aux conditions initiales légèrement perturbées, d'une carte de probabilité de zone de propagation, de puissance...



**Echelle atmosphérique:** (Code MESONH/ForeFire++) Simulation de la dynamique du front de flamme couplé avec le modèle atmosphérique pour prendre en compte les interactions feu/atmosphère, le transport et la diffusion des fumées. (résolution 50m(météo) & 10cm (incendie), échelle régionale, temps de calcul 20 000 heures). Accessible sur supercalculateur.



# Interaction entre deux fronts d'incendie (application aux contre-feux)

D. MORVAN, S. MERADJI, W. MELL

Fire Safety Journal Vol.58 pp.121-131, 2013.

10<sup>th</sup> IAFSS June 2011, pp.1415-1424.

programme européen 'FIREPARADOX



Simulation numérique (WFDS)

Domaine de calcul: 120 m x 130 m

Parcelle combustible: 20 m x 50 m

Maillage:  $\Delta x = \Delta y = 0.25$  m  $\Delta z = 0.05 \rightarrow 2$  m

$16 \times 10^6$  nœuds

# Interaction feu/contre-feu ( $U_{10} = 1$ m/s)



# *C//:Les défis de la recherche en Sec. Inc.*

*-Des projets architecturaux de plus en plus audacieux*

*-Une évolution des matériaux*

*==> Evolution du risque incendie*

Bâtiment

Transports aérien, ferroviaire

Industrie, nucléaire en particulier



*==> Développement d'une approche performentielle:  
L'Ingénierie de La Sécurité Incendie (ISI)*

# *C//:Les défis de la recherche en Sec. Inc.*

- Un incendie est un processus complexe,
- Il résulte de l'enchaînement et de l'imbrication de plusieurs phénomènes physique et chimique
- Les expériences à l'échelle du laboratoire et à taille réelle sont nécessaires
  - pour comprendre
  - mais aussi pour valider les outils numériques.
- la modélisation des processus est incontournable
- des efforts doivent être faits pour améliorer
  - Les modèles (ignition, pyrolyse, combustion sous-ventilée, écoulements stratifiés, rayonnement)
  - les méthodes et les outils numériques, en particulier au niveau
    - du couplage des modèles à différentes échelles (combustion des solides: couplage phases solide/gaz, échauffement des structures: transfert Fluide/Struc.)
    - de l'utilisation du calcul intensif

*C//:Des collaborations seront nécessaires ...*