

Faculté d Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

COURS

Calcul des structures métalliques exposées au feu

Présenté par :
DIMIA Mohamed Salah

Option
Charpente métallique et mixte

Plan du cours

INTRODUCTION AU PROBLEME

ANALYSE THERMIQUE: Modélisation du feu-distribution des températures

Modèle de feu conventionnel

Modèle de feu paramétrique (feu naturel) application

Caractéristiques thermiques des matériaux en fonction de T°
Modèles de transferts thermique

ANALYSE STRUCTURELLE: - Comportement mécanique

Caractéristiques mécaniques des matériaux en fonction de T°
(acier : f_e , E_s); béton: f_{c28} , f_{t28} , E_b

Méthodes de calcul: -

VALEURS TABULÉES

MÉTHODES DE CALCUL SIMPLIFIÉES

MÉTHODES DE CALCUL AVANCÉES par logiciel

Applications

INTRODUCTION AU PROBLÈME

La performance des structures soumises au feu est devenu un axe d'étude majeur

Une mise en conscience de l'ampleur des **dégâts du feu** sur le comportement et la stabilité locale et de l'ensemble d'une structure.

.Un grand intérêt est donnée actuellement à l'étude des effets de de la rupture locale sur la structure globale. **Exemple les colonnes.**

Les structures en béton armé ont généralement présentées de bonne résistance au feu par rapport aux structures en acier et mixtes, même en face **de graves incendies.**



Damaged and Burning WTC 1 (right) and WTC 2 (left) on Sept. 11, 2001

Structure en BA

1-Université de Technologie de Delft (Pays-Bas) mai 2008

- le bâtiment de 13 étages de la Faculté d'architecture subie un effondrement partiel.
- Il a pris feu au 6ème étage à cause d'un distributeur de café.
- Le feu s'est propagé rapidement en limitant l'intervention des pompiers
- **il a duré sept heures.**
- Il n'y avait pas de décès, mais le bâtiment **a été démoli** en raison des grands dégâts.



**Collapse of Faculty of Architecture Building
(Meacham et al., 2009)**

Structure en BA

2-Saint-Pétersbourg bloc habitation (juin 2002)

- L'immeuble (9 étages) s'est complètement effondré suite à un incendie
- L'accident a causé la mort d'une personne, deux blessés et a laissé environ 430 sans-abri



**Collapse of St. Petersburg Apartment Block
(Bietel & Iwankiw, 2002)**

Structure en BA

L'usine de vêtement en Egypte (Juillet 2000) (phase de refroidissement))

- Le bâtiment de (10 étages) s'est complètement effondré suite à un incendie
- le feu a duré 7h pour l'éteindre
- L'accédant a causé la mort de plus de 15 personne, plusieurs blessés le cout était de 2.5MD
- Quand l'immeuble semblait être mis hors du feu, *le bâtiment s'est soudainement effondré*

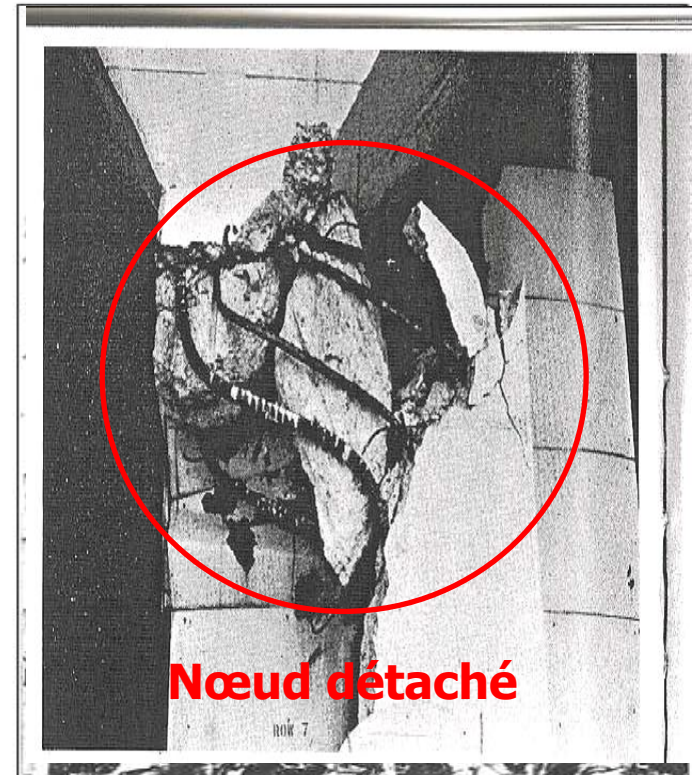


**Collapse of clothing factory in Alexandria,
Egypt (Reuters News, 2000; BBC News, 2000)**

Structure en BA

Katrantzos : Département de Sport (Athènes, Grèce)

- Le bâtiment de (8 étages) s'est complètement effondré suite à un incendie au 7eme étage
- Les températures atteignent 1000° C au cours d'une durée de 2-3 heures
- Les étages du 5eme au 8eme sont effondrés.
- La cause de ces collapses est la dilatation thermique empêchée.



Collapse of Katrantzos Sports Department Store (Papaioannou, 1986)

Structure en ACIER

Word Trade Center bâtiment 5

- Le 9 étage du WTC 5 a subi des dommages structuraux importants sous les débris du WTC 1, qui a conduit à l'effondrement partiel de 4 étages en raison des incendies.



Fires in WTC 5



Partial Connection and Floor Failures in WTC 5

Structure en ACIER

Word Trade Center bâtiment 5

- 47 étage du WTC 7 sont effondrés complètement, 8h après WTC 1, les portiques en acier sont avec protection

Plaza de New York , Août 1970 (Conseil NY, 1970)

- L' immeuble (bureaux) de 50 étages en acier avec un noyau en béton armé. Les poutres et les colonnes sont protégés contre le feu.
- L'incendie s'est déclaré au 33e étage et a duré environ 5 heures. Les dommages ont été limité au 33ème et 34ème étage, dans lesquels des poutres ont été visiblement voilées et déversées. La rupture des boulons ont été attribués à des zones non protégées isolées .

LE PENTAGONE

Le Pentagone, 5 étages a été frappé par un avion, ce qui a entraîné des dommages importants et des effondrements partiels dans le bâtiment à cause des incendies qui ont suivi, environ 30 minutes après l'impact.



Pentagon Collapse from the Sept. 11, 2001 Attack

Structure Mixte

Incendies sans effondrements mais avec des endommagements structuraux majeurs (essai à grande échelle)

Bâtiment mixte acier-béton Cadington-UK 8 étages (Newman, et al., 2000).

Bâtiment en béton Cadington-UK 7 étage (Bailey, 2001).



**(Newman, et al., 2000). (Bailey, 2001).
Building Research (BRE) Laboratory**

Structure Mixte

**Des désordres importants dans les éléments structuraux, rupture
des connexions en phase de refroidissement Pas de rupture globale**

Rupture dans les planchers mixtes



INTRODUCTION AU PROBLÈME

Incendies après les tremblements de terre

Séisme de Kobe jan, 1995 : site Web EEQ

Environ 142 incendies ont été déclenchés après quelques minutes du tremblement de terre



Post-earthquake Fires in Kobe, Japan



Burned Area in the Nagata Ward of Kobe

Thèmes traités

Partie 1: Actions Thermiques & Mécaniques

Partie 2: Comportement thermique

Partie 3: Comportement mécanique au feu des structures

Partie 4: Exemples d'application

Partie 5: Logiciels de calculs

Problème

□ **Trois problèmes sont à résoudre. Chacun est gouverné par différentes équations**

- 1. Développement du feu => (CFD problem) => (data for SAFIR)**
- 2. Réponse Thermique => Temperatures dans elements de la structure. un model 2D est généralement suffisant (SAFIR).**
- 3. Réponse Mécanique => comportement mécanique des éléments de la structure. (SAFIR)**

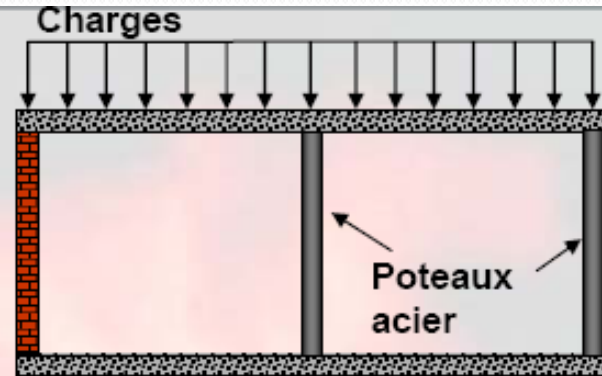
Résistance au feu - Succession des événements



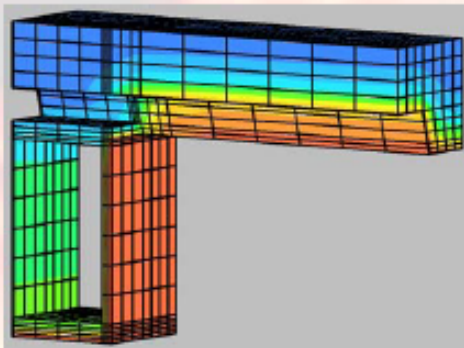
1: Ignition



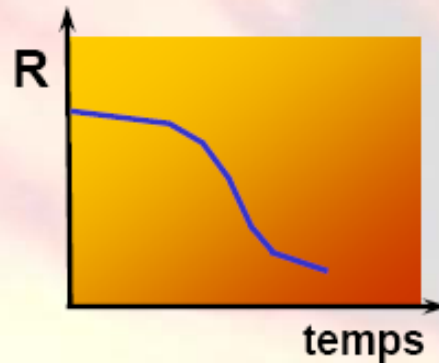
2: Action thermique



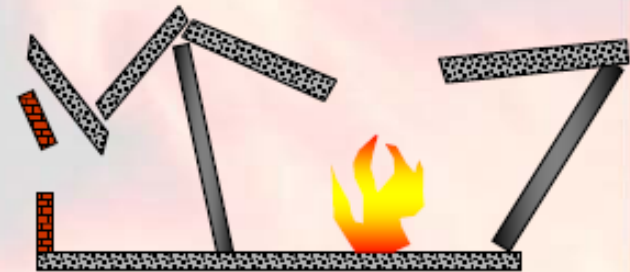
3: Action mécanique



4: Transfert thermique



5: Comportement mécanique



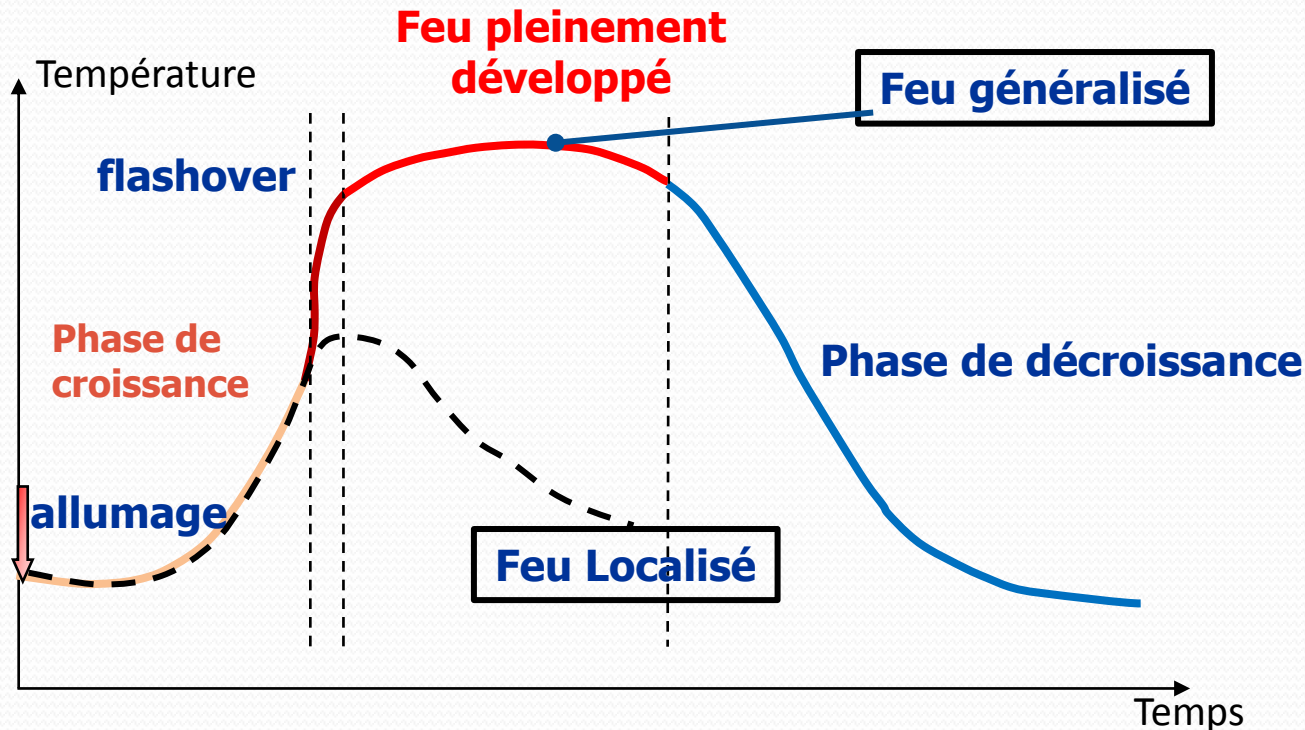
6: Effondrement éventuel

Modélisation du feu

- ➔ Pour prédire l'effet du feu sur les structures, il faut comprendre la physique de la propagation de l'incendie dans un compartiment et la façon dont le combustible interagit avec la flamme et son environnement.
- ➔ **L'accent est mis sur l'étude des incendies entièrement développés** où tout le combustible disponible s'implique dans l'incendie et peut potentiellement produire les déficiences sévères aux éléments de la structure.
- ➔ Pour être en mesure de comprendre les théories derrière les calculs de développement de l'incendie, il est nécessaire de savoir comment se comporte un incendie dans une enceinte.

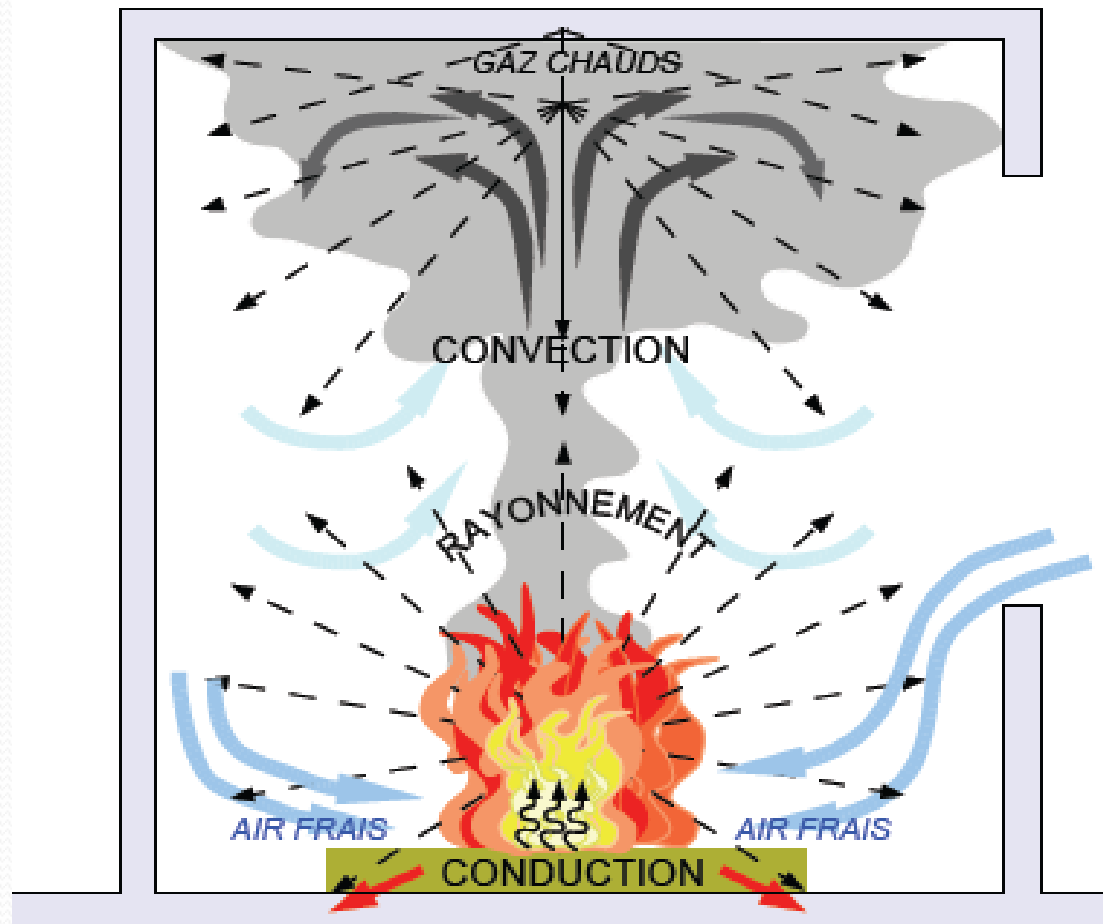
Modélisation du feu

Illustration schématique du développement de l'incendie (Walton et Thomas, 1995).



- une phase de croissance, la température moyenne est faible et le feu est localisé au voisinage de son origine ;
- une phase où la température a moyenne élevée et l'embrassement est généralisé à tout le combustible présent .
- une phase de décroissance correspondant à l'épuisement du combustible

Modélisation du feu



Bilan énergétique:

$$\dot{Q}_f(t) = \dot{Q}_g(t) + \dot{Q}_w(t) + \dot{Q}_d(t).$$

Bilan massique

$$\dot{m}_{\text{entrant}} + \dot{m}_{\text{fuel}} = \dot{m}_{\text{sortant}}$$

Partie 1 : Actions thermiques

Courbe Température-Temps

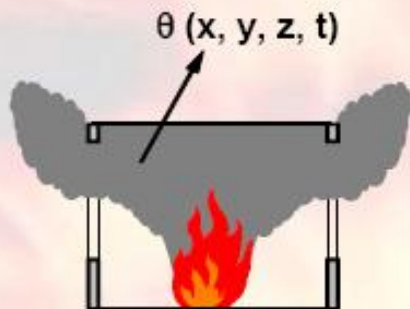
***) Actions prédéterminées**
Courbe ISO, feu extérieur, HC, HCM

Aucune autre donnée
nécessaire

***) modèles de calcul simplifiés**

Feu localisé

- HESKESTADT
- HASEMI



Feu généralisé

- Feu paramétrique
- $\theta(t)$ homogène
Dans le compartiment



Débit calorifique
Surface impliquée par
le feu
Parois
Ouvertures
Hauteur du
compartiment

***) Modèles de calcul avancés**

- Modèle à 2 zones

- Modèle à 1 zone

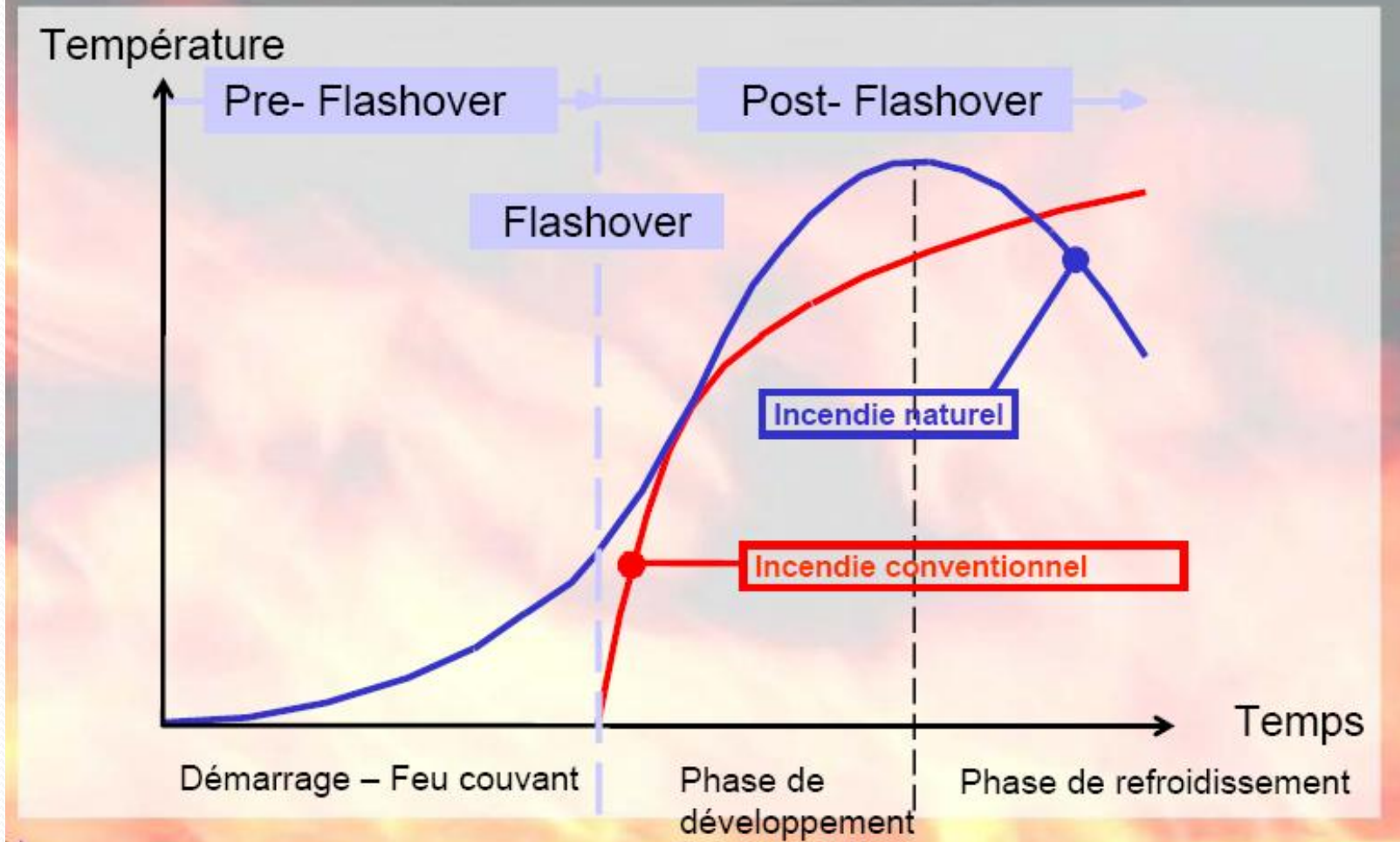
- Combinaison entre modèles

- Modèle de champ

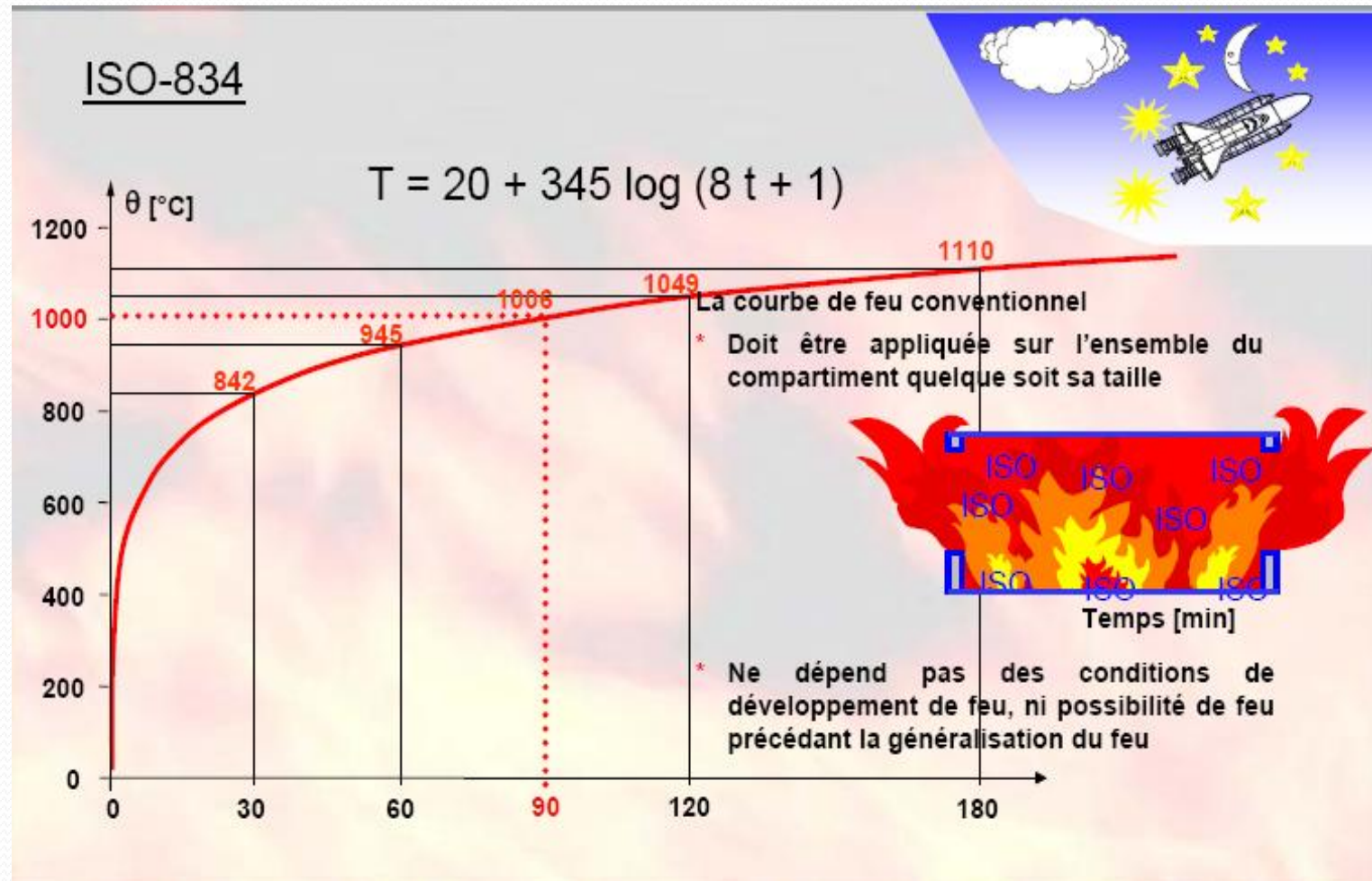
+

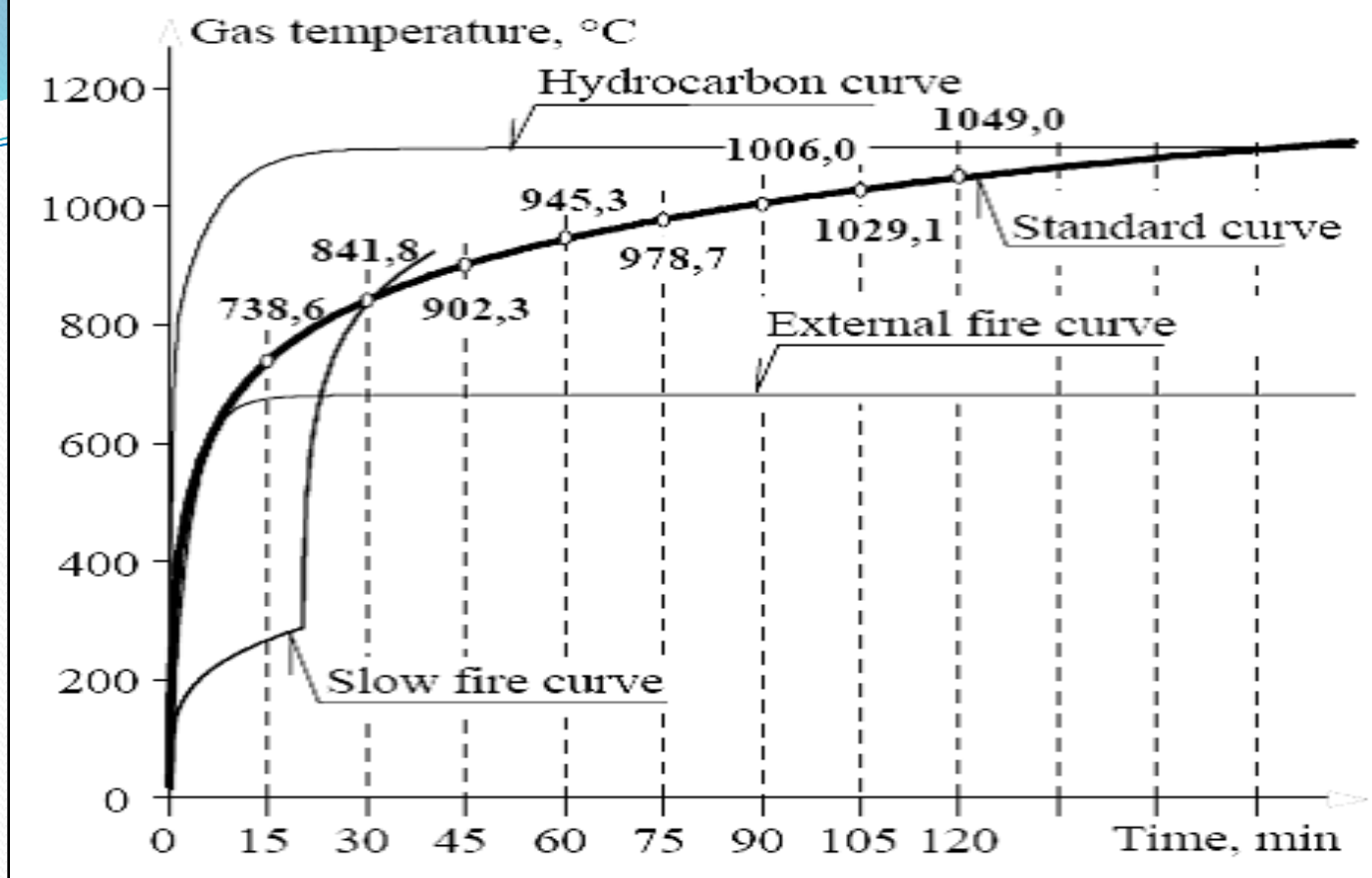
Géométrie

Etape du développement d'un incendie naturel / Conditions de l'incendie conventionnel



Exigences descriptives basées sur la courbe de feu conventionnel





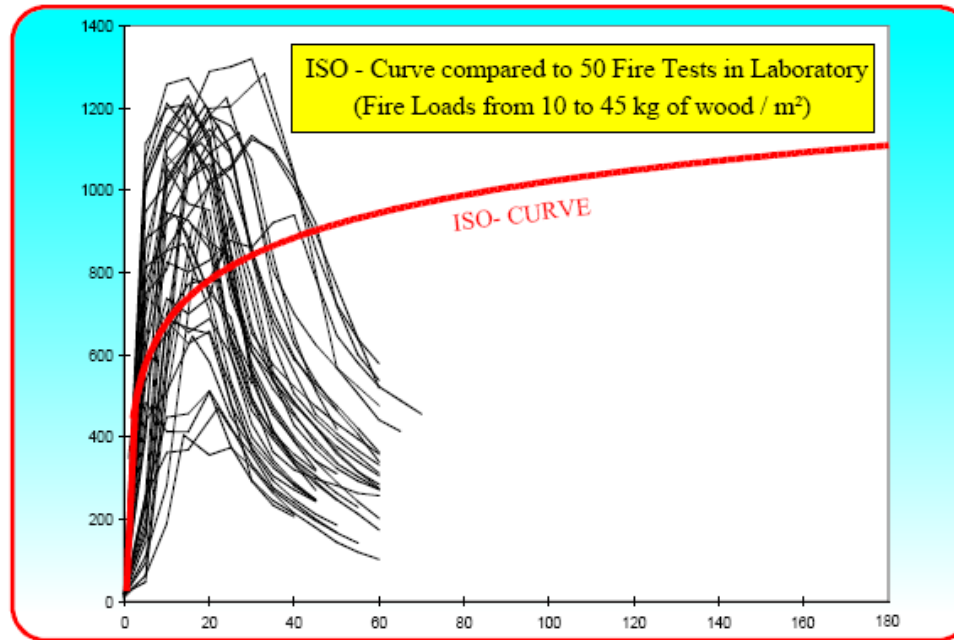
La courbe nominale d'hydrocarbure

$$T_g = T_0 + 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) \quad (3.19)$$

La courbe du feu externe

$$T_g = T_0 + 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-0,38t}) \quad (3.20)$$

Concept de feu naturel



La figure montre la comparaison entre les courbes de feu naturel pour différentes configurations (taille du compartiment, charge calorifique, isolation des murs, caractéristiques du combustible, ...) et la courbe de feu conventionnel.

Concept de sécurité incendie basé sur le Feu Naturel

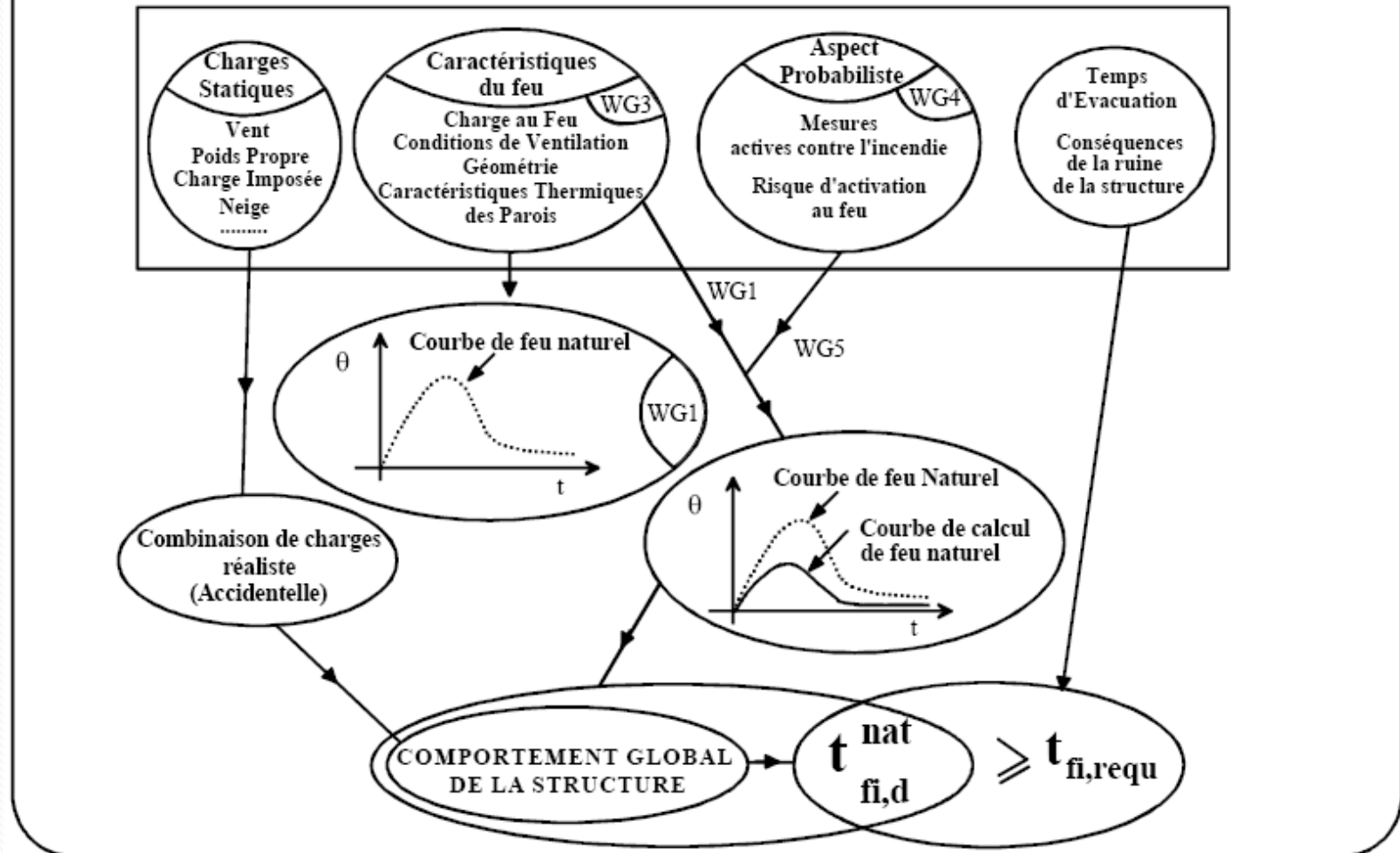


Figure A: Organigramme du rapport Natural Fire Safety Concept

Cette recherche a permis de mettre au point une procédure qui :

□ prend en compte les caractéristiques du bâtiment déterminantes pour le développement du feu : scénario d'incendie, charge au feu, taux de pyrolyse, type de compartiment, condition de ventilation

□ quantifie le risque de déclenchement d'un incendie et considère de ce fait l'influence des mesures actives et le type d'occupation du bâtiment; cette

□ analyse du risque est basée sur des probabilités déduites de base de données de feux réels venant de Suisse, France, Finlande et du Royaume-Uni

□ déduit de l'étape précédente des Valeurs de Calcul pour les paramètres principaux tels que la charge au feu

□ détermine l'action thermique en fonction de la charge au feu de calcul qui tient compte implicitement du risque d'incendie et par conséquent des mesures actives de lutte contre le feu

□ simule le comportement global de la structure sous l'effet de cette action thermique de calcul et des charges statiques en situation d'incendie;

□ en déduit la durée de résistance, . *Cette durée est très souvent égale à l'infini*, ce qui signifie que la structure est capable de soutenir les charges qui lui sont appliquées depuis le début du feu jusqu'à son extinction;

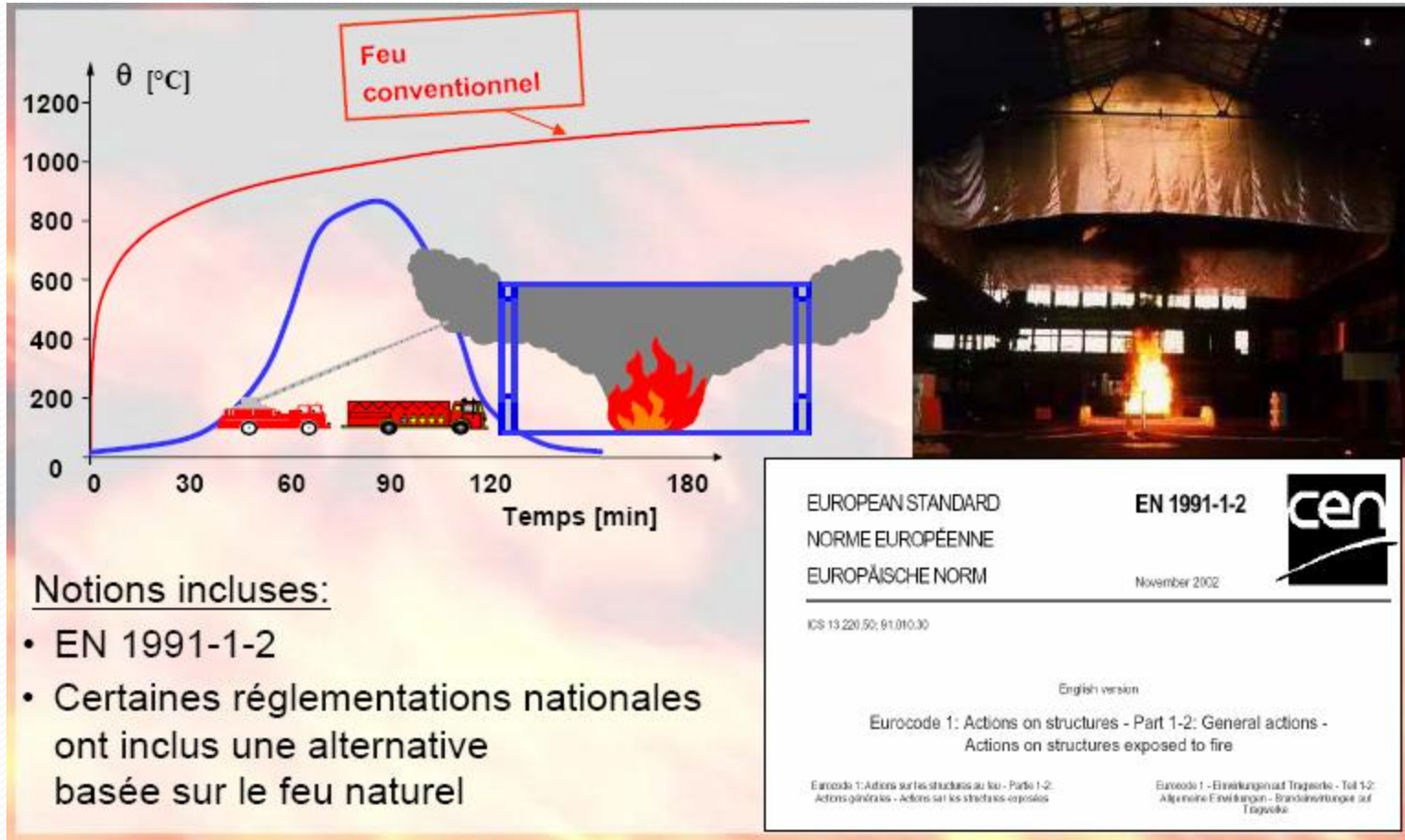
□ vérifie la sécurité de la structure en comparant la durée résistance, à l'exigence requi qui dépend du temps d'évacuation et des conséquences d'une ruine.

Ce nouveau concept a été appliqué à des projets réels de bâtiments et a permis de concevoir des bâtiments en acier sans surcroît de coût pour la sécurité au feu.

Citons les références suivantes

- ❖ **Hall de Basket-ball à Pépinster (Belgique).**
- ❖ **Aéroport de Luxembourg (Grand-Duché de Luxembourg).**
- ❖ **Palais de Justice de Nantes (France).**
- ❖ **Bâtiment: Musée et Exposition à URBINO (Italie).**
- ❖ **Immeuble de Bureaux à Bilbao (Espagne).**
- ❖ **Bâtiment de Bureaux "Langenthal" (Suisse).**
- ❖ **Complexe Scolaire « Geesseknäppchen » à Luxembourg (Grand-Duché de Luxembourg).**
- ❖ **Centre Commercial à Rotterdam (Pays-Bas)**

Concept de feu naturel



Modèle de feu naturel

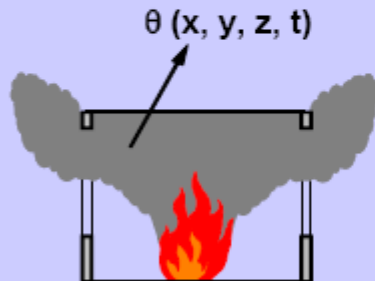
***) Actions prédéterminées**
 Courbe ISO, feu extérieur, HC, HCM

Aucune autre donnée
 nécessaire

***) modèles simplifiés**

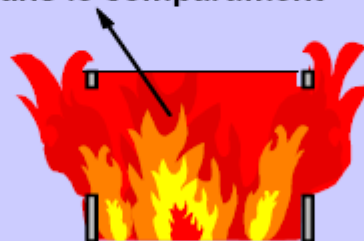
Feu localisé

- HESKESTADT
- HASEMI



Feu généralisé

- Feu paramétrique
- $\theta(t)$ homogène
- Dans le compartiment



Débit calorifique
 Surface impliquée par
 le feu

Parois
 Ouvertures
 Hauteur du
 compartiment

+

Géométrie

***) Modèles avancés**

- Modèle à 2 zones
- Modèle à 1 zone
- Combinaison entre modèles
- Modèle de champ

Modélisation du feu

CHOIX DES COURBES TEMPÉRATURES-TEMPS FEU NATUREL

Les courbes adoptées doivent être clairement représentatifs des distributions de température lors d'incendies réels:

Les paramètres considérés dans ces modèles:

- L'inertie thermique des parois
- la configuration physique du compartiment
- La taille des ouvertures horizontales et verticales
- La charge calorifique

Modèle à deux zones:

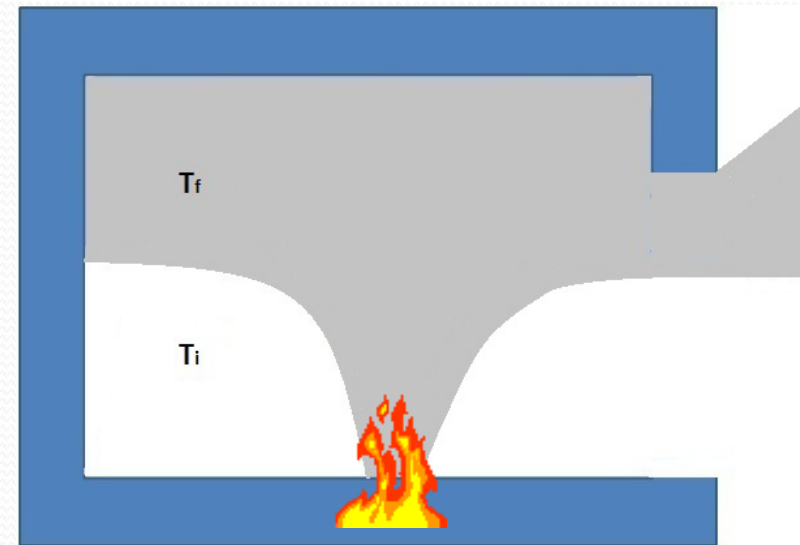
Zone supérieure T_f Constante

Zone inférieure T_i constante

La méthode de calcul est MQH

développée par:

(McCaffrey, Quintiere and Harkleroad)



Modélisation du feu

Modèle à une zone:

Wickström, en se basant sur les courbes de température qui ont été développés par Magnusson et Thelandersson, a développé le concept des feux paramétriques, décrite dans la norme EN 1991-1-2 Annexe A.

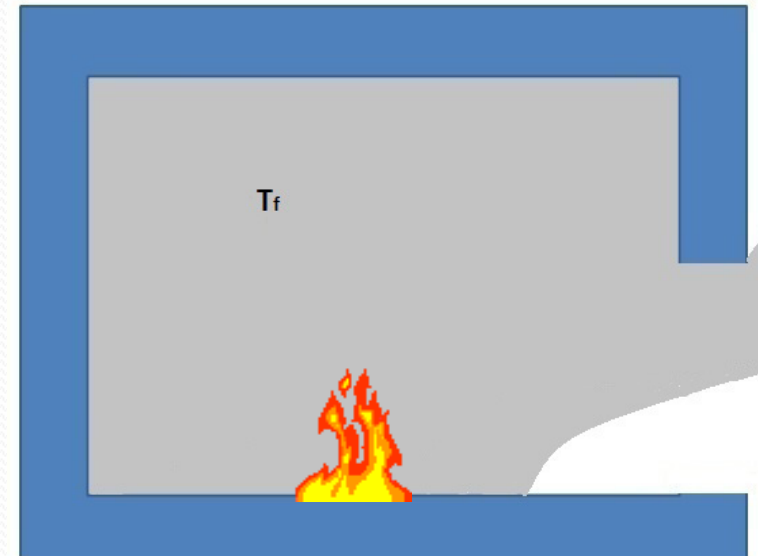
► Liste des paramètres physiques nécessaires pour le model de feu naturel

GEOMETRIE

- Les parois (caractéristiques thermique)
- La hauteur du plafond
- La surface des ouvertures

Charge calorifique

- surface du feu
- matiere brulée



COURBES TEMPÉRATURES-TEMPS FEU NATUREL

Phase d'échauffement

$$\Theta_g = 1,325 [1 - 0,324 \cdot e^{-0,2t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7t^*} - 0,472 \cdot e^{-19t^*}] + 20^\circ\text{C}$$

Avec :

$$\Gamma = (O/0,04)^2 / (b/1,160)^2$$

$$O = A_v \sqrt{h/At}$$

$$t^* = \Gamma t$$

Phase de refroidissement

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 625 (t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{pour } t_{\max}^* \leq 0,5$$

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250 (3 - t_{\max}^*) (t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{pour } 0,5 < t_{\max}^* < 2$$

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250 (t^* - t_{\max}^* \cdot x) \quad \text{pour } t_{\max}^* \geq 2$$

où t^* est donné par (A.2 a)

$$t_{\max}^* = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) \cdot \Gamma$$

Modélisation du feu

Exemple de validation du feu paramétrique

