



EPFL
RESSLab



Ingénierie de la protection incendie

Cours d'introduction – partie 3

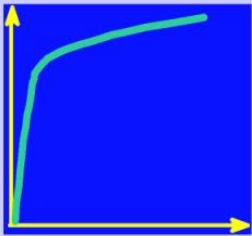
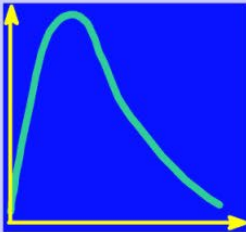

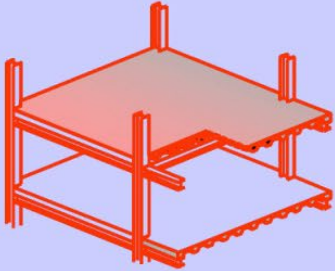
Olivier Burnier, ingénieur civil HES-UTS
Expert en protection incendie avec diplôme fédéral

Sommaire

Feu naturel

- Action thermique
 - Incendie localisé
 - Incendie généralisé
- Action mécanique
- Transfert thermique
- Analyse
- Exemples
- Conclusions
- Biographie et sources

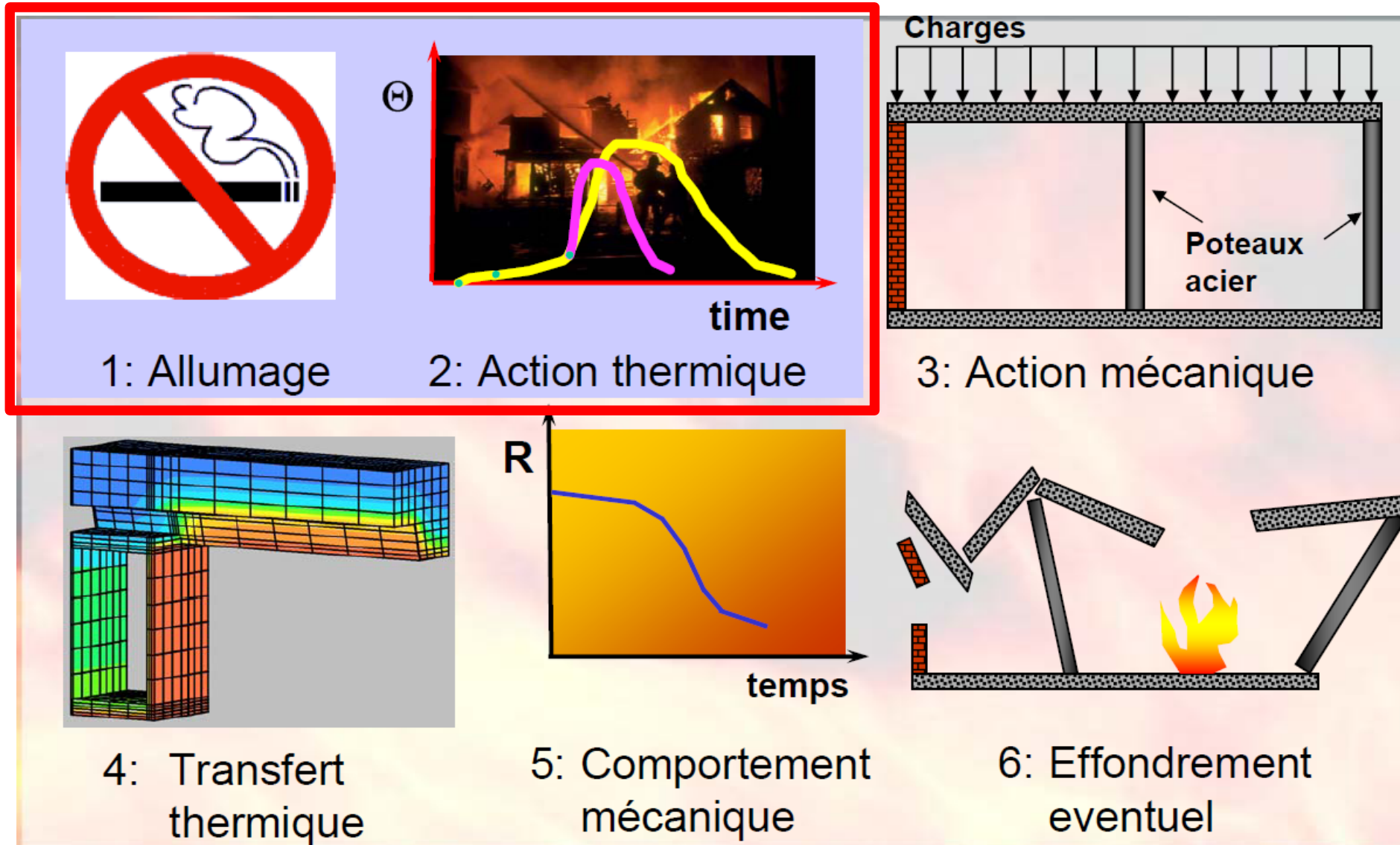
Stabilité au feu des structures

	descriptif	à objectif
	Feu conventionnel 	Feu naturel 
	classification	Ingénierie du comportement au feu
	Ingénierie du comportement au feu	Ingénierie du comportement au feu

Action thermique



Résistance au feu – déroulement



Action thermique

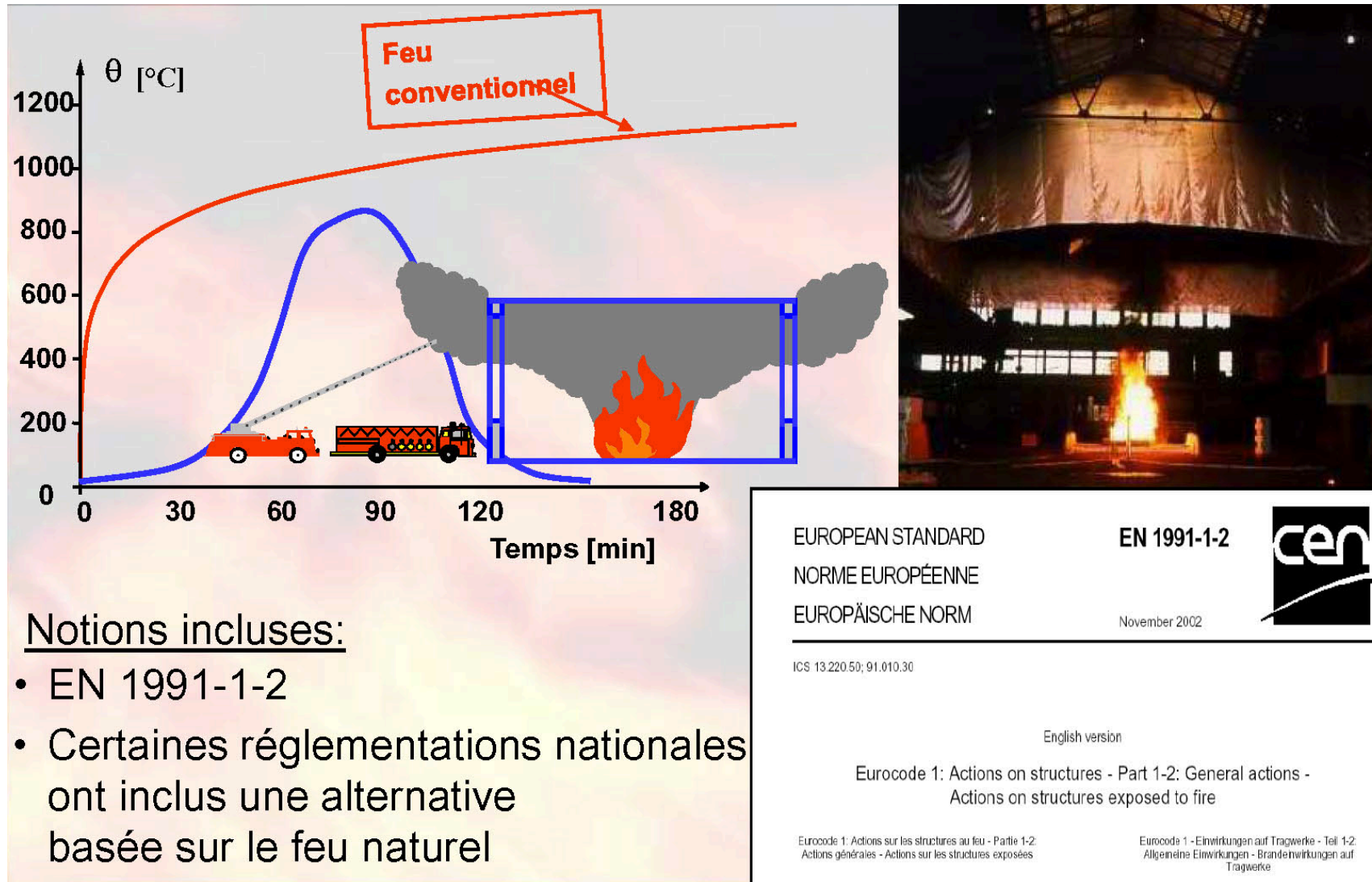
Quelle action thermique choisir ?

- Tous les feux sont-ils équivalents ?
- Existe-t-il plusieurs « feux » pour le calcul ?
- Comment choisir LE « feu » représentatif ?
- Les feux / incendies sont-ils normalisés?



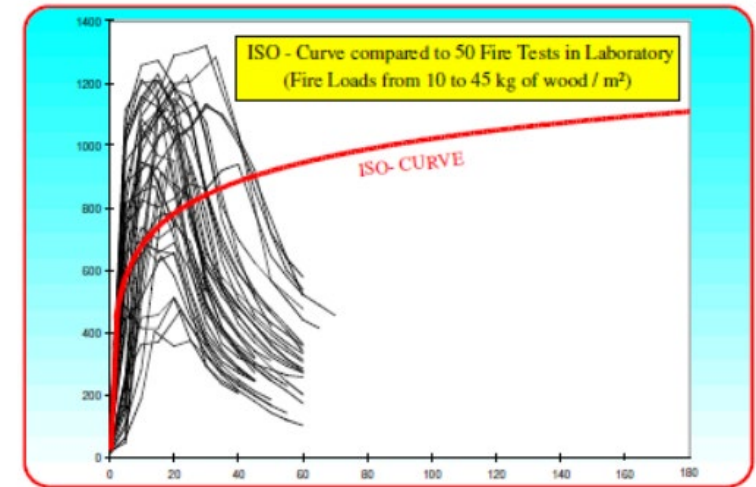
⇒ **Modèles mathématiques**

Action thermique – feu naturel

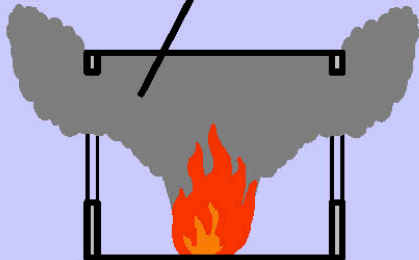
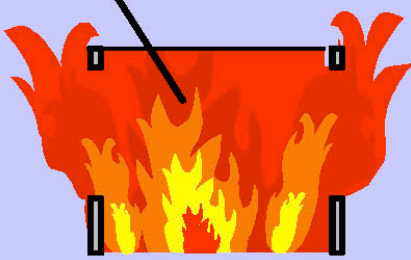


Action thermique – feu naturel

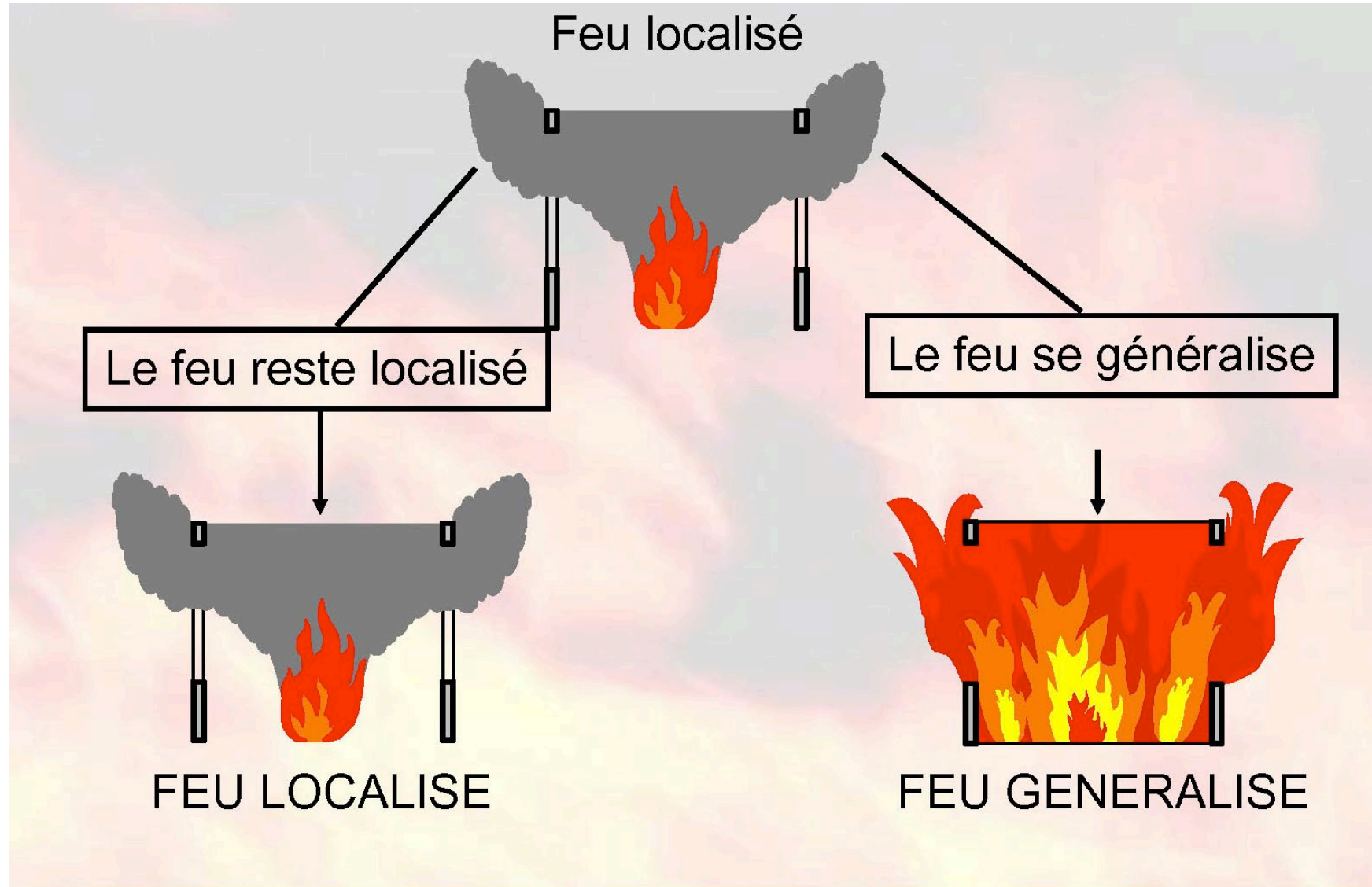
- Fruit de six années de recherches au niveau européen.
- Décrit dans la norme SN EN 1991-1-2, § 3.3 et annexe E.
- A la même probabilité de ruine que les structures calculées « à froid » selon l'Eurocode EN 1990, soit **$7,23 \cdot 10^{-5}$ durant la vie du bâtiment.**
- Tient compte de tous les paramètres listés dans les **mesures de protection.**
- Se rapproche au plus près des conditions réelles d'un **incendie de compartiment.**
- Est plus « économique » pour les faibles charges thermiques et **plus sécuritaire pour les fortes charges thermiques.**



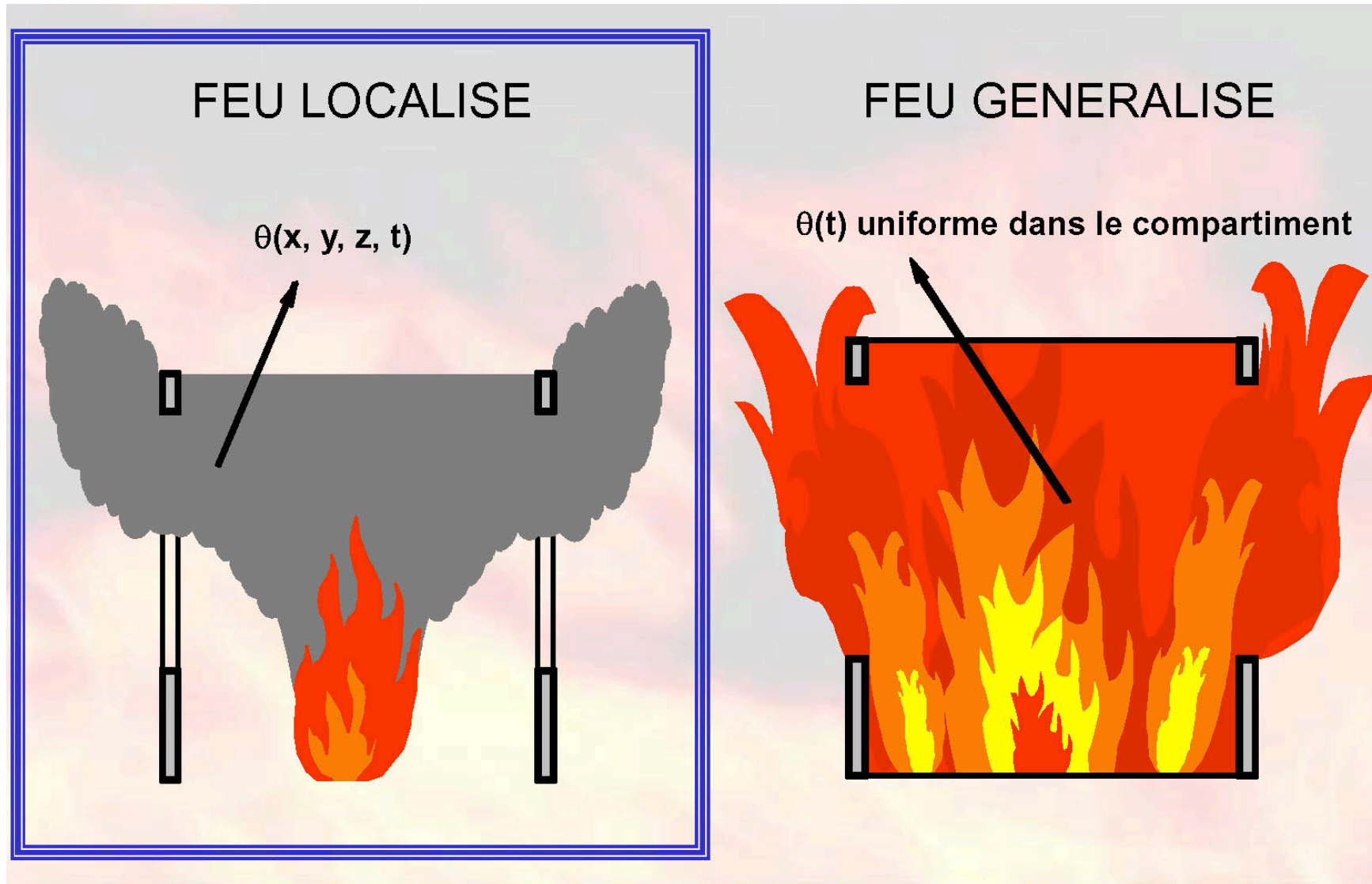
Modèles de feu naturel

*) Actions prédéterminées		Aucune autre donnée nécessaire
Courbe ISO, feu extérieur, HC, HCM		
*) modèles simplifiés		Débit calorifique Surface impliquée par le feu Parois Ouvertures Hauteur du compartiment + Géométrie
<u>Feu localisé</u> - HESKESTADT - HASEMI $\theta(x, y, z, t)$ 	<u>Feu généralisé</u> - Feu paramétrique $\theta(t)$ homogène dans le compartiment 	
*) Modèles avancés - Modèle à 2 zones - Combinaison entre modèles - Modèle de champ	*) Modèles avancés - Modèle à 1 zone	

Modèle de feu avancés



Modèle de feu simplifié – feu localisé

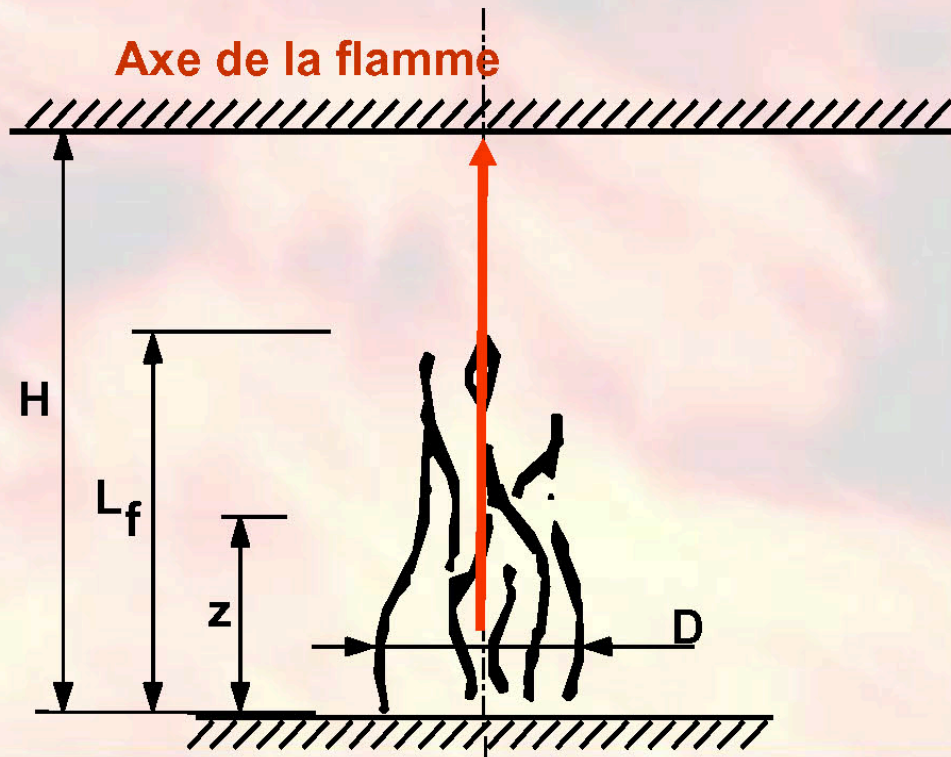


Test sur des feux localisés



Feu localisé – méthode de Heskestad

- Cas d'un feu extérieur,
- Ou si la flamme ne touche pas le plafond ($L_f < H$),
la température $\Theta_{(z)}$ dans le panache le long de l'axe vertical de la flamme est donnée par : $\Theta_{(z)} = 20 + 0,25 Q_c^{2/3} (z-z_0)^{-5/3} \leq 900^\circ\text{C}$



Longueur de la flamme L_f :

$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5}$$

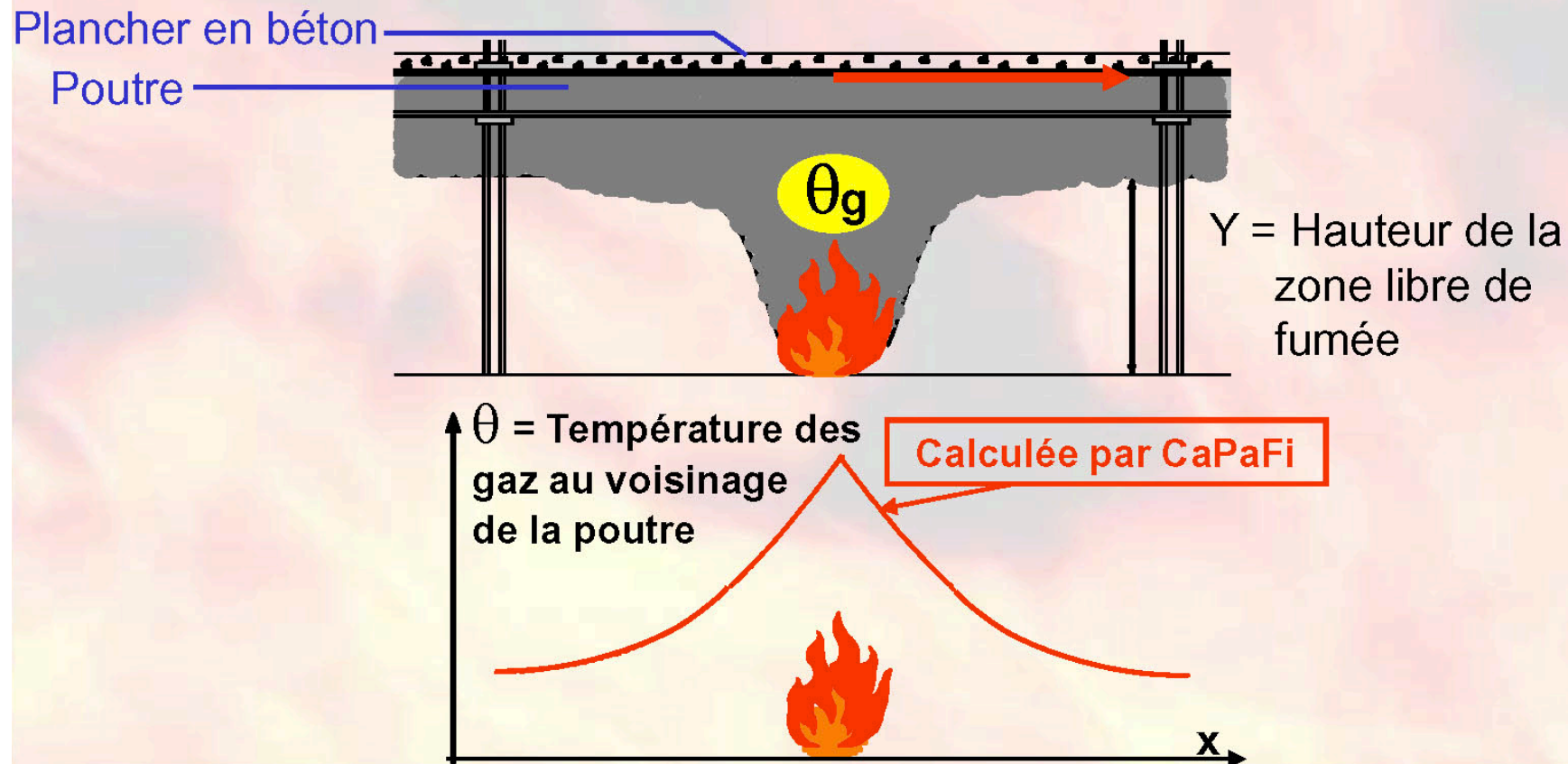
Origine virtuelle z_0 :

$$z_0 = -1,02 D + 0,00524 Q^{2/5}$$

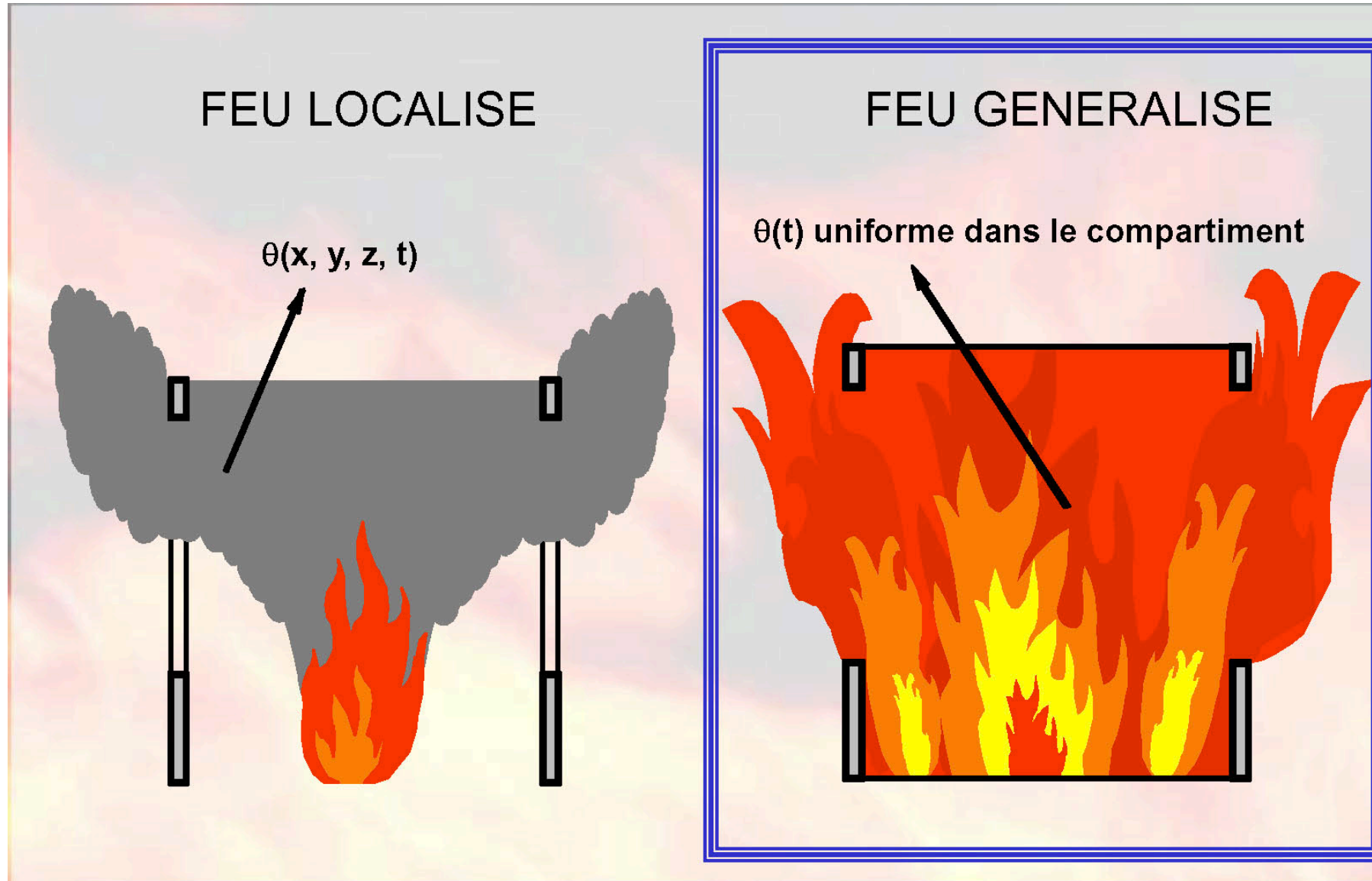
$$Q_c = 0,8 Q$$

Feu localisé – méthode de Hasemi

Lorsque la flamme atteint le plafond, ($L_f > H$), le flux de chaleur reçu par unité de surface exposée est calculée par la méthode de Hasemi



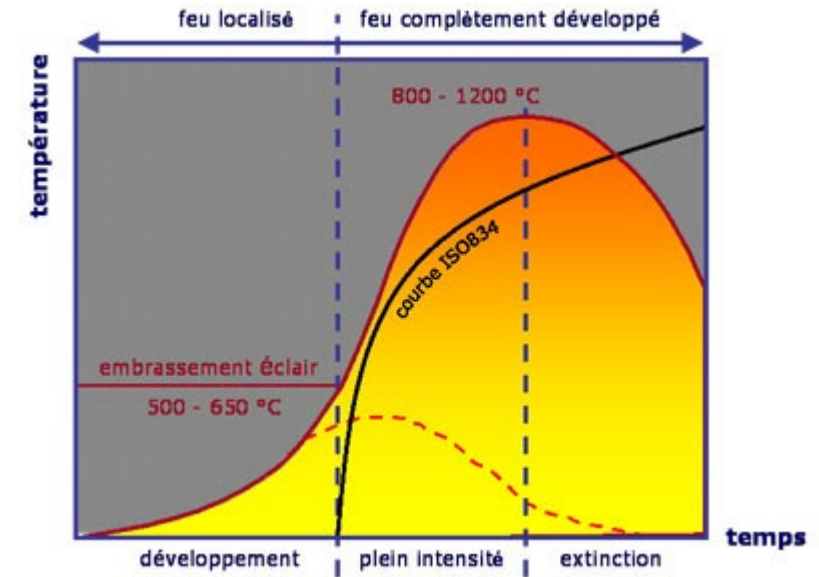
Modèle de feu simplifié – feu généralisé



Essai de feu dans un bâtiment multi-étages de bureaux



Action thermique - Flashover



Backdraft



Modèle mathématique de Ozone

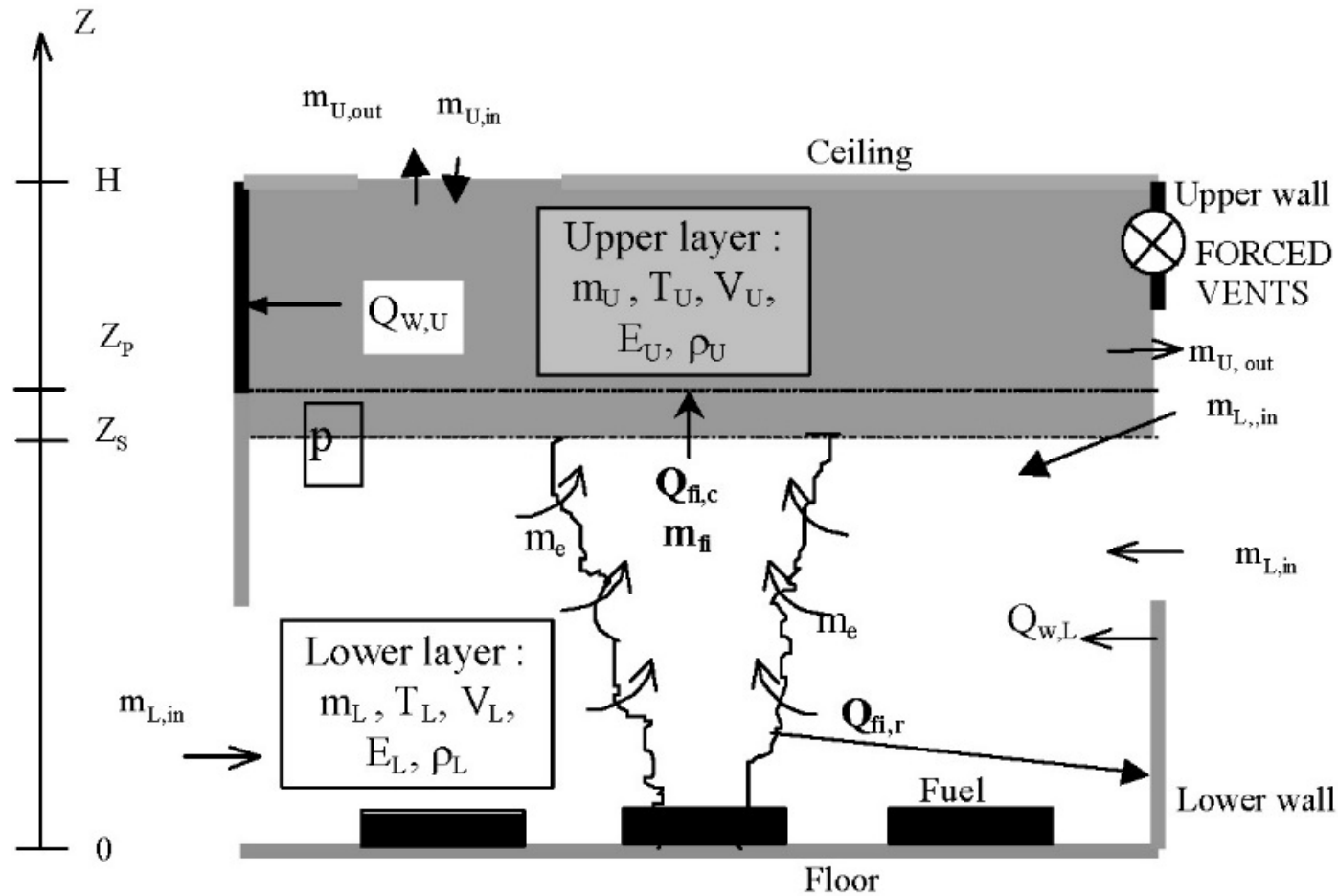


Figure 1 Schematic view of two zone model and associated submodels

Validation de Ozone

- Feu localisé – 39 tests
 - VTT: Salle (8 tests)
 - VTT: local (21 tests)
 - DSTV: local (10 tests)
- Feu généralisé – 71 tests
 - CTICM: local, bois (36 tests)
 - CTICM: local, meubles et papier (10 tests)
 - BRE: compartiment profond (9 tests)
 - CTICM: hôtel (3 tests)
 - CTICM: école (1 tests)
 - BRE: NFSC2 series (8 tests)
 - VTT: structure en bois (4 tests)

Exemple de calcul avec feu naturel

Immeuble EPFL-BI à Ecublens



Feu naturel

Description de la problématique

Suite à la transformation complète du bâtiment BI, une étude au Feu naturel - action thermique a été réalisée pour vérifier la résistance de la structure située sous le bâtiment à l'intérieur du restaurant.


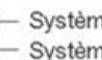
Cette vérification a été faite, suite à l'exigence d'une résistance de 60 minutes (R60) demandée par les directives AEAI de protection incendie, au vu de l'affectation de ce local (grand nombre de personnes).

Feu naturel

Tableau Porteur AEAI 2003 avec Sprinkler

Nombre de niveaux hors terre	2 jusqu'à 600 m ² cb [1] jusqu'à 1200 m ² icb	2 plus de 600 m ² cb [1] plus de 1200 m ² icb	3	4	5 – 6	7 – 8 sans les bâtiments élevés
• Bâtiments d'habitation • Bâtiments administratifs • Bâtiments scolaires	incombustible [2] combustible [2]	incombustible [2] combustible [2]	incombustible [2] combustible [2]	R 30 (icb) R 30	R 60 (icb) R 60 [4]	R 60 (icb)
• Locaux industriels/ artisans q inférieur ou égal à 1000 MJ/m ²	incombustible [2] combustible [2]	incombustible [2] combustible [2]	incombustible [2] combustible [2]	R 30 (icb) R 30	R 60 (icb) R 60 [4]	R 60 (icb)
• Locaux industriels/artisans q > 1000 MJ/m ² • Bâtiments à affectation inconnue	incombustible [2] combustible [2]	R 30 (icb) R 30	R 30 (icb) R 30	R 60 (icb)	R 60 (icb)	R 60 (icb)
• Etablissements hébergeant des personnes [a] p. ex. hôpitaux	R 60 (icb)	R 60 (icb)	R 60 (icb)	R 60 (icb)	R 60 (icb)	R 60 (icb)
• Etablissements hébergeant des personnes [b] p. ex. hôtels	R 30 (icb) [5] R 30 [5]	R 30 (icb) [5] R 30 [5]	R 30 (icb) [5] R 30 [5]	R 60 (icb)	R 60 (icb)	R 60 (icb)
• Bâtiments avec locaux prévus pour un grand nombre d'occupants • Grands magasins [c]	incombustible [2] combustible [2]	R 30 (icb) R 30	R 60 (icb)	R 60 (icb)	R 60 (icb)	R 60 (icb)
• Parkings • Garages pour véhicules à moteur	incombustible [2] combustible [2]	incombustible [2] combustible [2]	incombustible [2] combustible [2]	R 30 (icb) ou incombustible [2] R 30 [3]	R 60 (icb) ou incombustible [2] R 60 [4]	R 60 (icb) ou incombustible [2] [3]

En effet, aucune exigence de résistance au feu n'est exigée pour le reste du bâtiment, en fonction de son affectation et de la présence d'un système d'extinction automatique.


 — Système porteur en matériaux incombustibles

 — Système porteur en matériaux combustibles

Gras: Exigences réduites si installations sprinklers

Tableau 2

Feu naturel



Vue générale du restaurant.



Vue de la partie du restaurant, située sous le bâtiment B1.

Feu naturel



Détail de la façade vitrée.



Poteau HEB 240 caissonné axe CS-08.

Feu naturel



Vue de la façade vitrée donnant sur le patio.

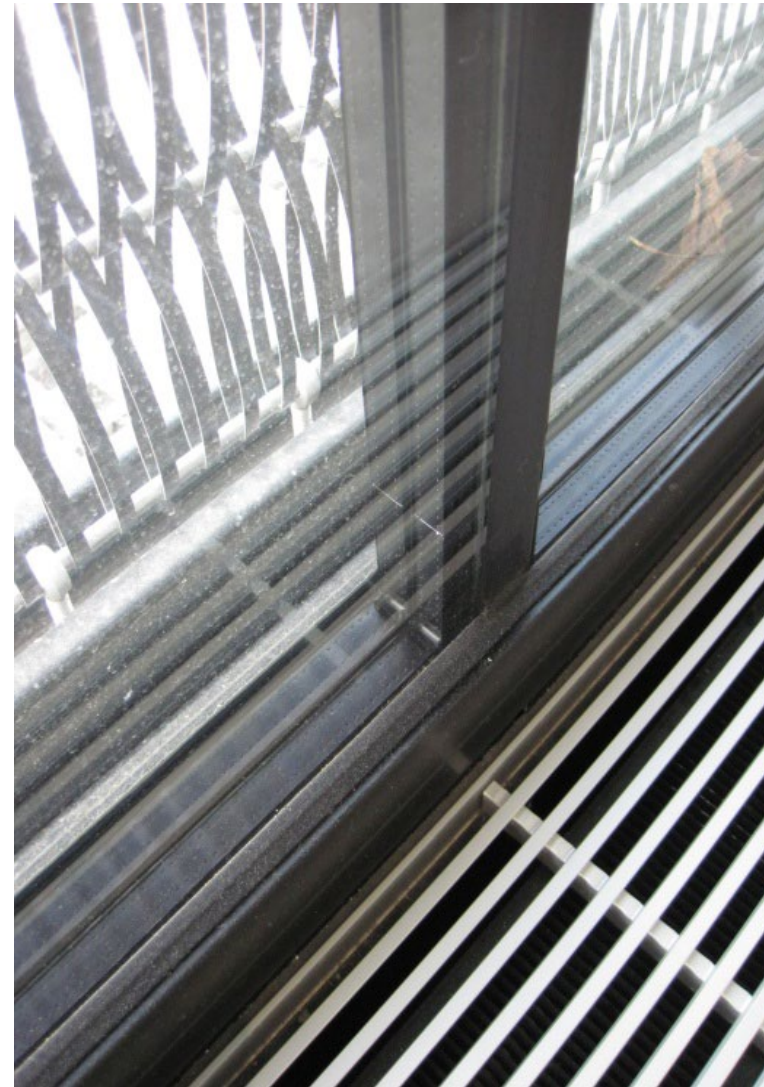


Paroi de séparation entre le restaurant, le back office et les toilettes.

Feu naturel



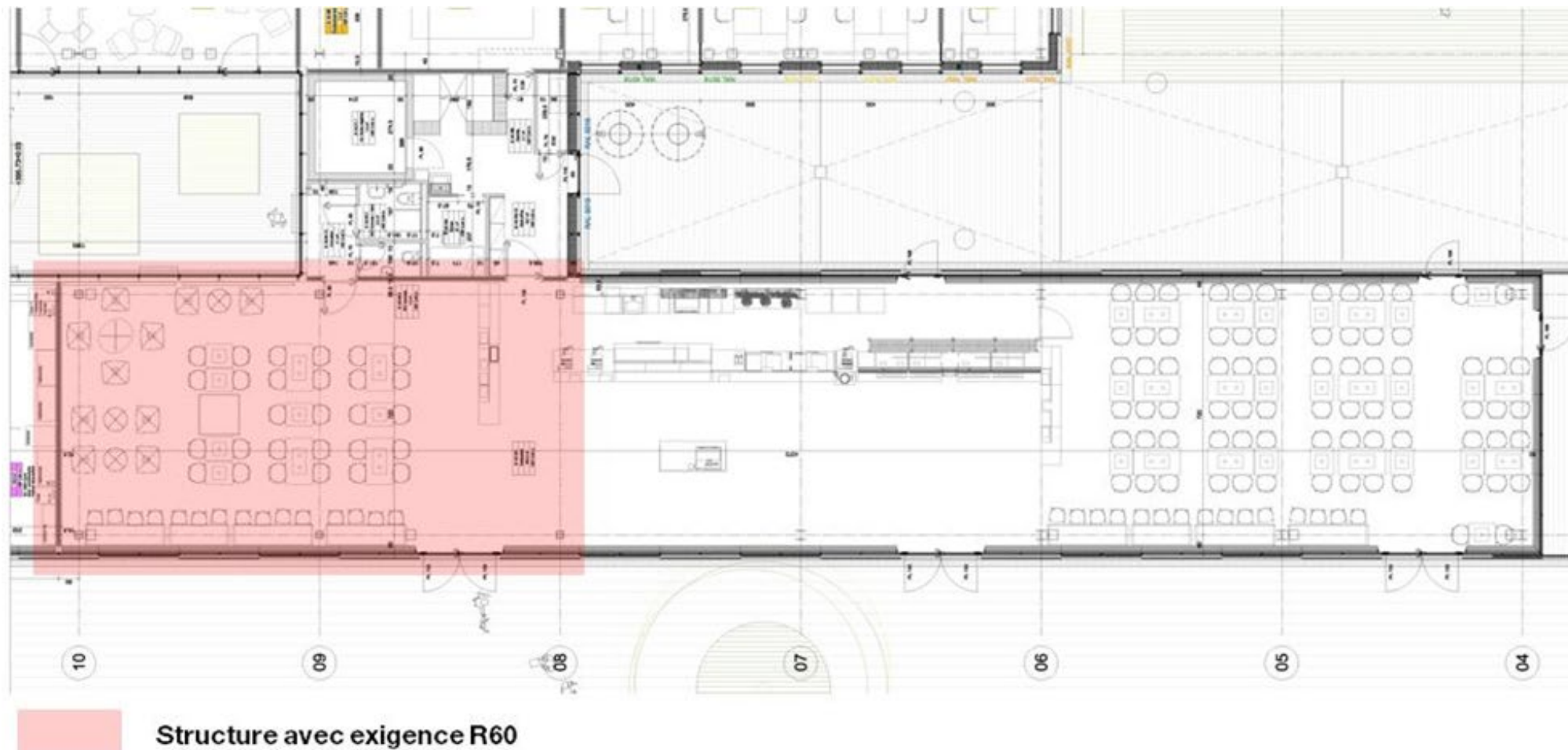
Sprinkler.



Détail du triple vitrage.

Feu naturel – périmètre de l'étude

Suite à l'exigence d'une résistance R60 de la structure du restaurant, nous avons établi en accord avec l'autorité de protection incendie, le périmètre de l'étude.



Feu naturel – périmètre de l'étude

En admettant que la structure du restaurant sur un niveau est R0, la structure à vérifier est celle située sous le bâtiment BI au niveau 0. Celle-ci est comprise entre les axes CR-CS/8-10.

La structure étudiée est composée de poteaux en acier en profilé H, caissonnés avec des plaques métalliques.

Les sommiers principaux en HEA 400 sont continus sur la longueur totale du bâtiment, avec une portée de 7.20 m'.

Les poutres IPE 360, d'une portée de 7.20 m', sont appuyées entre les sommiers.

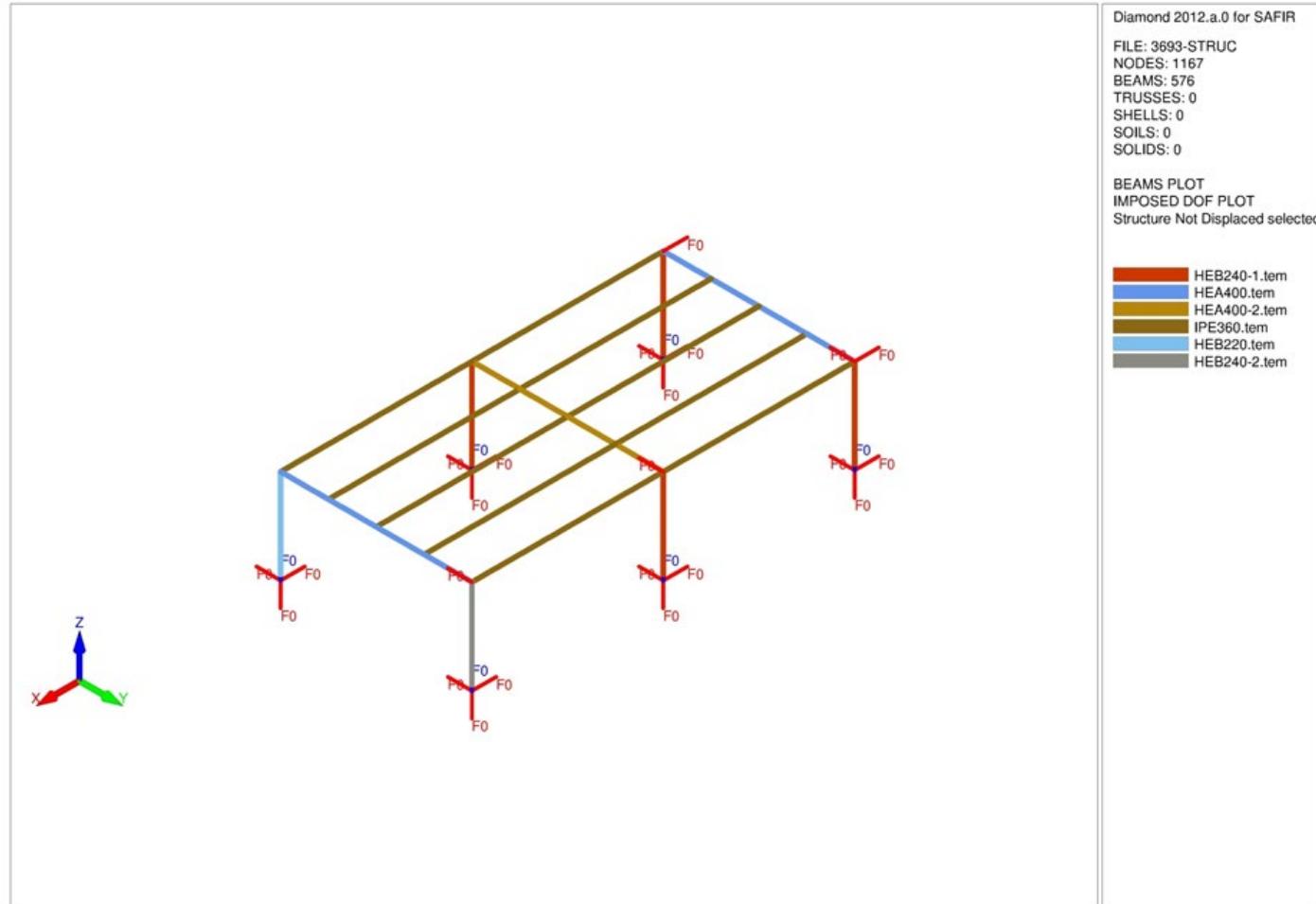
Feu naturel - matériaux

Les caractéristiques des matériaux sont les suivantes:

- Sommiers principaux HEA 400 S 235
- Poutrelles IPE 360 S 235
- Poteaux HEB 220 ou HEB 240 S 235
caissonnés par des plaques,
- ép. 10 à 12 mm S 235
- Dalle en béton sur tôle Holorib HR 51, ép. 11 cm.

Le contreventement général du bâtiment est assuré par les deux noyaux en béton situés de part et d'autre du bâtiment.

Feu naturel - structure



Comme aucune indication ne figure sur les plans, nous n'avons pas considéré que les poutres soient connectées à la dalle béton. Il n'y a donc pas d'effet membranaire.

Feu naturel - actions

Les charges suivantes ont été appliquées sur la structure étudiée.

- Poids propre HEA 400 1.25 kN/m'
 - IPE 360 0.57 kN/m
 - HEB 220 + 2 (200/12) 1.09 kN/m'
 - HEB 240 + 2 (220/10) 1.18 kN/m'
 - HEB 240 + 2 (220/15) 1.35 kN/m'
- Dalle mixte avec tôle HR 51, ép. 11 cm 2.75 kN/m²
- Isolation 2 cm + chape 7 cm 1.70 kN/m²
- Galandages 0.50 kN/m²
- Charge utile, cat. B (bureau) 3.00 kN/m²

Feu naturel - actions

Sollicitation « à froid » du plancher

$$E_{d,ELU} = 1.35 \cdot (0.66 + 2.75 + 1.70 + 0.50)kN/m^2 + 1.5 \cdot 3.0kN/m^2 = 12.1 kN/m^2$$

Sollicitation « à chaud » du plancher

En situation accidentelle, conformément à l'art. 4.4.3.5 et au tableau 2 de l'annexe A de la norme SIA 260, la valeur de $\varphi_2 = 0.3$

$$E_{d,fi} = 1.00(0.66 + 2.75 + 1.70 + 0.50)kN/m^2 + 1.0 \cdot 0.3 \cdot 3.0 kN/m^2 = 6.51 kN/m^2$$

Feu naturel - actions

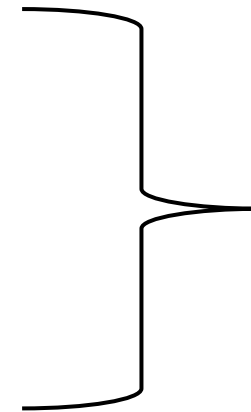
Différence de sollicitation

$$\eta_{fi} = \frac{E_{d,fi}}{E_{d,ELU}} = \frac{6.51 \text{ kN/m}^2}{12.1 \text{ kN/m}^2} = 0.54$$

Entre la situation à 20 °C et le cas accidentel, un élément correctement dimensionné « à froid » aura donc une réserve de résistance de près de 45 % en situation incendie.

Paramètres physiques nécessaires pour les modèles de feu naturel

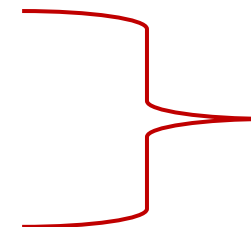
- Propriétés des parois
- Dimension en plan du compartiment
- Hauteur du plafond
- Surface des ouvertures



Géométrie



- Surface du foyer
- Débit calorifique

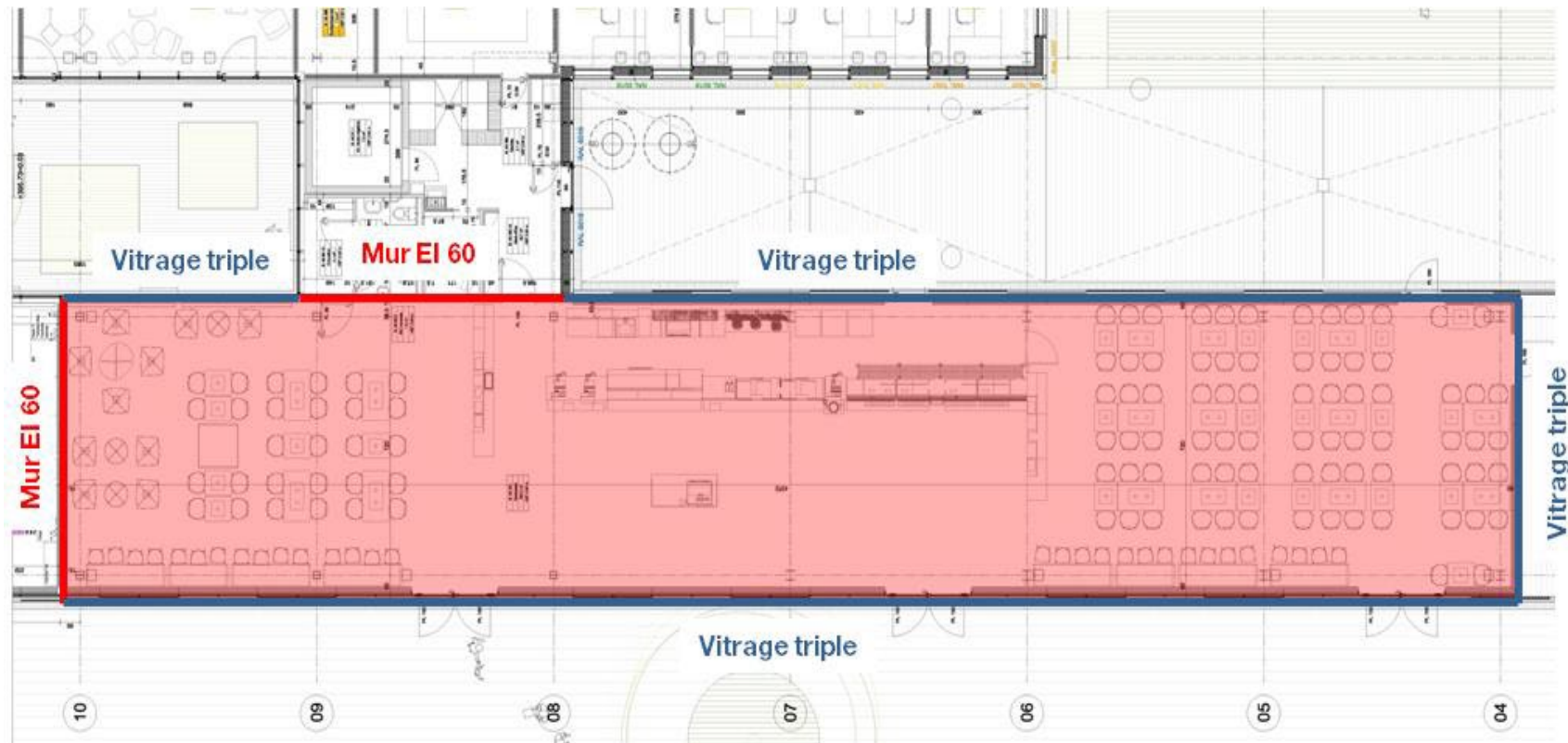


Feu



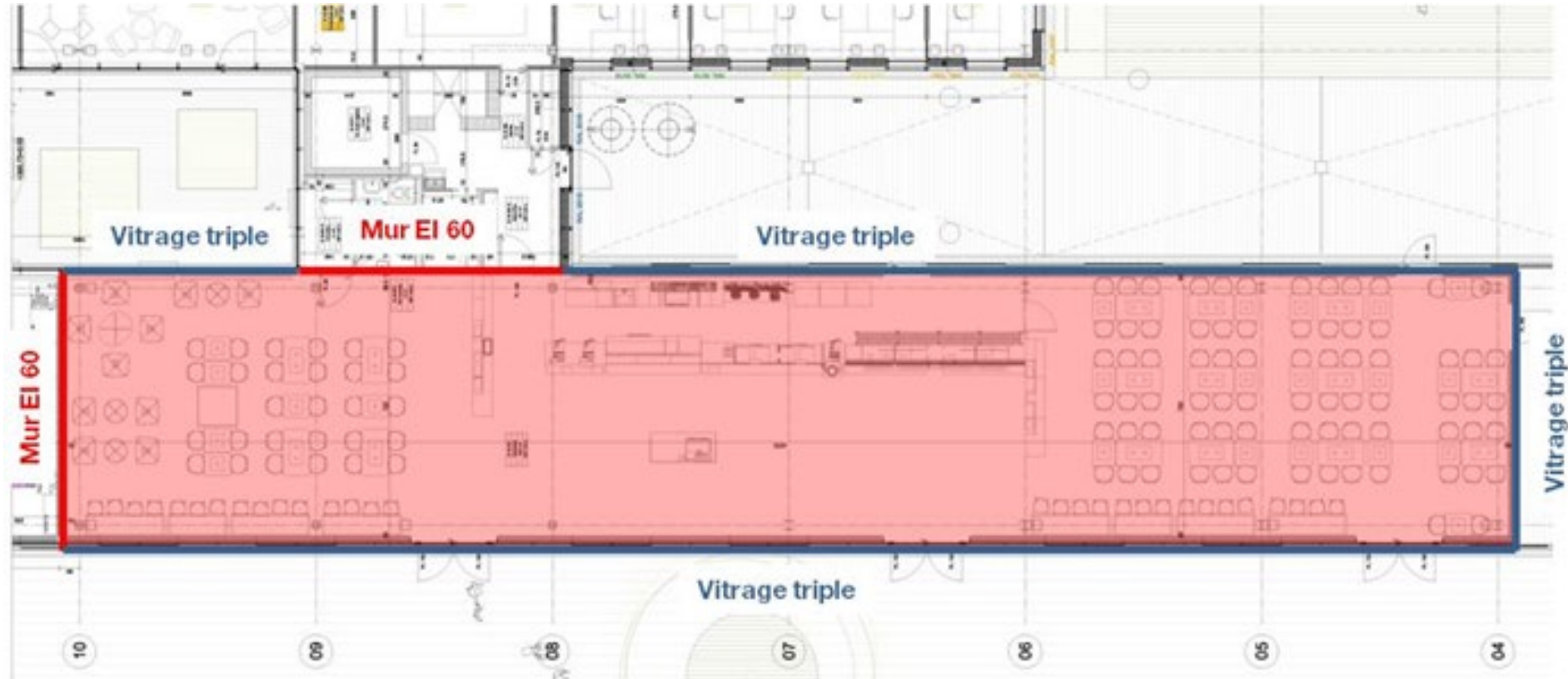
Feu naturel - compartiment

Suite à une discussion avec l'ECA, nous avons retenu deux périmètres d'étude pour calculer le Feu naturel - action thermique selon l'annexe E de l'Eurocode 1991-1-2.



Feu naturel - compartiment

Variante 1 – Compartiment réel



Largeur : 8.40 m
Longueur : 45.0 m
Hauteur : 3.70 m

Feu naturel - compartiment

Variante 2 – Compartiment fictif



Largeur : 8.40m
Longueur : 15.0 m
Hauteur : 3.70 m

Feu naturel - compartiment

Compartiment

Dans le modèle de Feu naturel - action thermique, il est admis que le feu reste confiné dans le compartiment.

Pour cela les parois doivent avoir une résistance au feu conforme aux directives de protection incendie (EI).

De part la complexité des autres méthodes et le manque de données expérimentales pour déterminer la résistance des parois sous un scénario de Feu naturel - action thermique, il est admis que la résistance EI donnée pour un feu ISO est également suffisante pour un scénario de Feu naturel - action thermique.

Feu naturel - compartiment

Caractéristiques thermiques des parois

- Les pertes de températures par transfert thermique au travers des parois sont des éléments importants.
- Elles se produisent par convection et radiation.
- Les propriétés thermique des parois doivent être connues, si possible aux hautes températures.
- Si les caractéristiques à haute température ne sont pas connues alors il faut prendre celle à 20°C.
- L'effet de l'humidité des matériaux est négligée.
- L'épaisseur des différents matériaux doit être connue.

Feu naturel - compartiment

Les ouvertures

- La sévérité d'un incendie dépend du nombre d'ouvertures. Celles-ci sont constituées des portes, des fenêtres et des lanterneaux de toiture.
- Les portes sont considérées comme fermées s'il y a d'autres ouvertures (min 10 % d'ouverture).
- Les portes sont considérées comme ouvertes s'il n'y a pas d'autres ouvertures.
- Les portes et vitrages avec une résistance EI sont considérés comme détruits après le temps de résistance (30, 60 minutes).

Feu naturel - compartiment

Définition des ouvertures pour notre cas

Cloisons

- Les cloisons EI60 sont considérées comme intactes durant l'entier de l'incendie.

Portes

- Les portes EI30, vers les locaux WC et préparation, sont considérées comme fermées tout au long de la simulation. En effet, comme le bâtiment est très vitré, ces deux ouvertures de faible taille ne modifient en rien le calcul des températures à l'intérieur du compartiment.

Feu naturel - compartiment

Fenêtres

Les fenêtres constituées de vitrage triple, dans un cadre en acier, ont été considérées selon les deux scénarios suivants :

Scénario 1

- 90 % de la surface des vitrages est considérée comme ouverte dès le début de l'incendie. Ce scénario couvre notamment le bris du vitrage volontaire causé par l'intervention des pompiers.

Scénario 2

- A 300 °C, 50 % de la surface des vitrages exposés à cette température sont supposés être des ouvertures complètes. A 500 °C, 90 % de la surface de vitrage exposés à cette température est considérée comme une ouverte.

Feu naturel - compartiment

Ventilation mécanique

Si une évacuation de chaleur et de fumée est présente, on peut en tenir compte pour les feux localisés.

Par contre, ces installations doivent être considérées comme non-opérationnelle en cas de feu entièrement développé. En effet des températures de l'ordre de 600°C sont très rapidement atteintes, ce qui est au-dessus des températures de fonctionnement prévu.

La ventilation de confort doit être éteinte en cas d'alarme incendie.

Dans notre cas, aucune installation n'est présente.

Feu naturel – action thermique

Densité de charge calorifique

- Après analyse de la charge au feu mobilière présente, nous avons admis une valeur caractéristique de :

$$q_{f,k} \text{ de } 511 \text{ MJ/m}^2$$

Débit calorifique maximal (RHRf)

- Le débit calorifique maximal est de 250 kW/m².

Vitesse de propagation

- La vitesse de propagation est moyenne, soit un t_{α} de 300 s.

Feu naturel – charge au feu

	Déviatiion stand.	Moyenne	80 % fractile	90% fractile	95 % fractile
Habitation	234	780	948	1085	1217
Hôpital	69	230	280	320	359
Hôtel (chambre)	93	310	377	431	484
Librairie	450	1500	1824	2087	2340
Bureau (standard)	126	420	511	584	655
Ecole	85,5	285	347	397	445
Centre commercial	180	600	730	835	936
Théâtre, cinéma	90	300	365	417	468
Transport (aire publique)	30	100	122	139	156

Données de charge au feu pour différentes affectations [MJ/m²] selon annexe E norme EN 1991-1-2

Charge au feu - exemple

- Exemple
- Palette en bois Euro – CFF
 - Poids moyen 25 kg
 - Pouvoir calorifique inférieur du bois $\Delta_c H^0 = 17.5 \text{ MJ/kg}$



$$Q_f = m \cdot \Delta_c H^0 = 25 \text{ kg} \cdot 17.5 \text{ MJ/kg} = 438 \text{ MJ}$$

- Surface de la palette $1.20 \text{ m} / 0.80 \text{ m} = 0.96 \text{ m}^2$

$$q_{f,k} = \frac{Q_f}{A} = \frac{438 \text{ MJ}}{0.96 \text{ m}^2} = 456 \text{ MJ/m}^2$$

Feu naturel – action thermique

Rate of Heat Release (RHR)

La charge au feu donne l'énergie disponible, mais la température des gaz dépend du RHR qui définit le taux auquel l'énergie est libérée.

La même charge au feu peut soit brûler très rapidement ou couvrir pendant longtemps, ce qui va donner des températures de gaz complètement différentes.

Le RHR est défini par la loi suivante:

$$RHR = (t/t_{\alpha})^2$$

RHR: Rate of Heat Release du feu dans sa phase de croissance [MW]

t: temps [s]

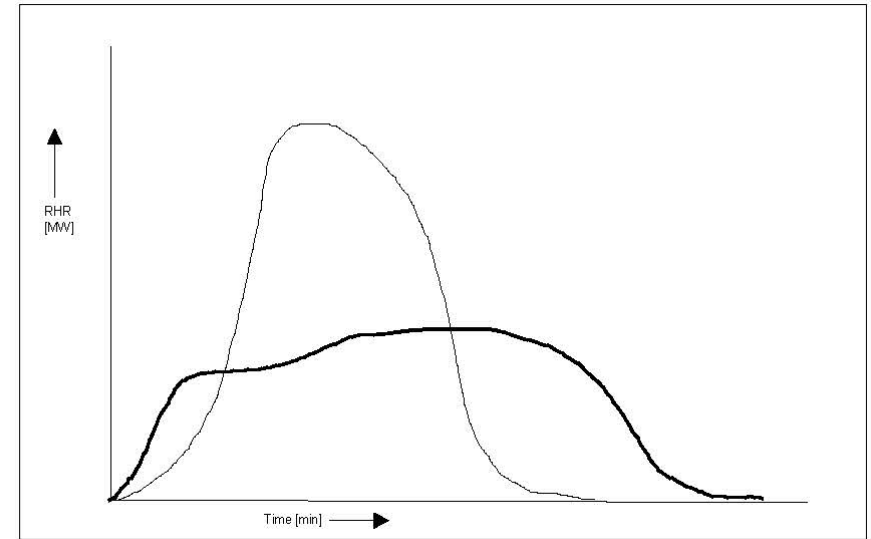
t_{α} : constante de temps dépendant du type d'affectation [s]

Feu naturel – action thermique

Deux courbes RHR correspondant à la même charge de feu.

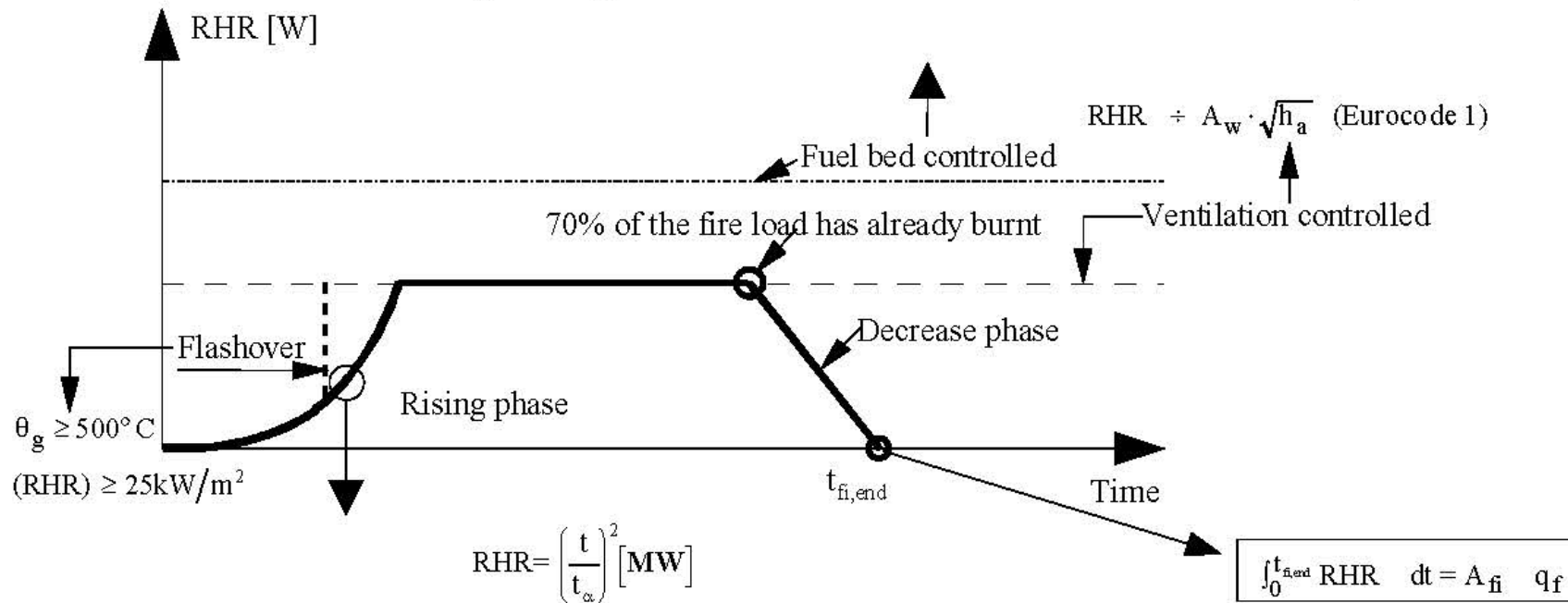
Après la phase de croissance, la courbe RHR se prolonge en un plateau horizontal avec une valeur qui est fonction de:

- La charge au feu si l'apport en oxygène est suffisant (feu contrôlé par le carburant).
- Les conditions de ventilation si les ouvertures ne sont pas suffisantes (feu contrôlé par la ventilation).
- Suite aux essais en laboratoire, la phase de décroissance démarre quand le **70%** de la charge au feu est consommée.



Feu naturel – action thermique

$RHR = A_{fi} \cdot RHR_f$	}	For stacked wood pallets of height 0.5 m	$RHR_f = 1250 \text{ kW/m}^2$
		For stacked wood pallets of height 3.0 m	$RHR_f = 6000 \text{ kW/m}^2$
		For plastic bottles in cartons, stacked of 4.6 m	$RHR_f = 4320 \text{ kW/m}^2$
		For PS insulation board, rigid foam, stacked of 4.3 m	$RHR_f = 2900 \text{ kW/m}^2$
		Building use is retail	$RHR_f = 500 \text{ kW/m}^2$
		Building use is offices	$RHR_f = 250 \text{ kW/m}^2$



Feu naturel – action thermique

Taux de croissance du feu t_α en fonction de l'affectation

Affectation / activité	Taux de croissance	Constante t_α [s]
Galerie d'exposition	Lent	600
Stockage (faible combustibilité ou peu de combustible)	Lent	600
Habitation	Moyen	300
Hôtel (chambre)	Moyen	300
Bureau	Moyen	300
Stockage (coton, matelas de saut en polyester)	Moyen	300
Magasin	Rapide	150
Stockage (sac de courrier, mousse plastique, bois empilés)	Rapide	150
Usine chimique	Très rapide	75
Stockage (alcool, meubles rembourrés)	Très rapide	75

Charge au feu de dimensionnement

Tableau E.1 — Coefficients δ_{q1} , δ_{q2}

Surface de plancher du compartiment A_f [m ²]	Risque d'activation du feu δ_{q1}	Risque d'activation du feu δ_{q2}	Exemples de types d'occupation
25	1,10	0,78	galerie d'art, musée, piscine
250	1,50	1,00	bureaux, résidence, hôtel, industrie papetière
2 500	1,90	1,22	fabrique de machines et de moteurs
5 000	2,00	1,44	laboratoire de chimie, atelier de peinture

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \prod \delta_{ni} \cdot m \cdot q_{f,k}$$

Suppression automatique du feu		Détection automatique du feu		Suppression manuelle du feu							
Système d'extinction à eau automatique	Approvisionnements en eau indépendants			Détection automatique du feu et alarme		Alarme automatique transmise aux pompiers	Pompiers sur site	Pompiers hors site	Voies d'accès libres	Équipement de lutte contre le feu	Système de désenfumage
	0	1	2	par la chaleur	par la fumée						
δ_{n1}	δ_{n2}			δ_{n3}	δ_{n4}	δ_{n5}	δ_{n6}	δ_{n7}	δ_{n8}	δ_{n9}	δ_{n10}
0,61	1,0	0,87	0,7	0,87 ou 0,73		0,87	0,61 ou 0,78		0,9 ou 1 ou 1,5	1,0 ou 1,5	1,0 ou 1,5

Feu naturel – action thermique

Modèle de feu

Le feu utilisé pour le calcul est une combinaison de deux modèles, soit :

- feu localisé selon modèle de Hasemi (pré-flashover)
- feu généralisé à une zone (post-flashover)

Le logiciel utilisé est « Ozone, 2.2.6 », développé par l'Université de Liège et Arcelor Research.

Pour la vérification des colonnes, comme les modèles de feu localisés sont encore en cours d'étude, nous avons utilisé la courbe ISO standard, qui est du côté de la sécurité dans ce cas.

Feu naturel – action thermique

Conditions aux limites

Les limites du compartiment ont été modélisées avec les matériaux des murs, soit de la brique de 15 cm avec une couche de plâtre de 1 cm.

Les parties hautes des vitrages ont été modélisés par une isolation de 16 cm placée entre deux tôles d'acier de 0.1 cm.

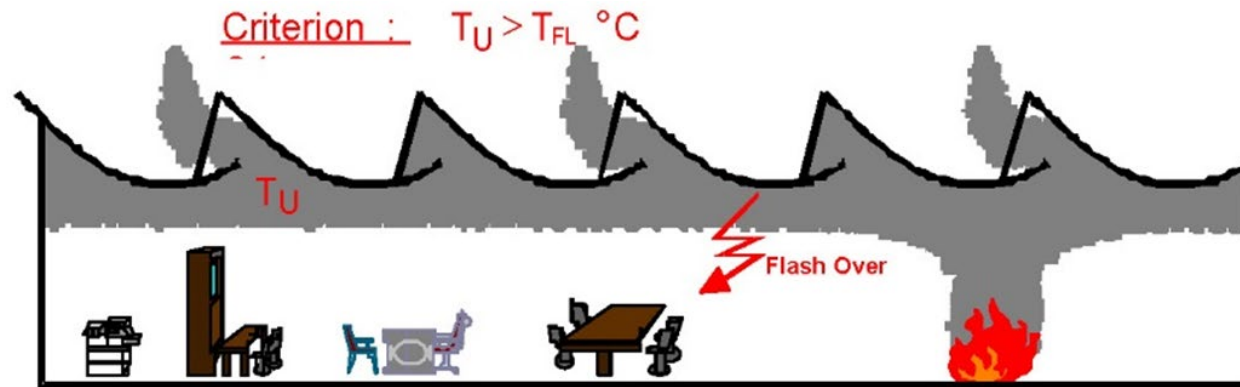
Les vitrages ont été modélisés selon les scénarii 1 et 2 définis au chapitre ouverture.

Leur ouverture se fait par palier suivant la température du local.

Au temps « $t = 0$ », une ouverture de 10 % est présente pour modéliser les fuites de l'enveloppe et favoriser l'activation du feu.

Feu naturel – action thermique

Critères d'embrasement généralisé



- 2 zones → 1 zone, si les critères suivants sont atteints
 - $T_{\text{fumée}} > 500 \text{ } ^\circ\text{C}$
 - Matière combustible dans la fumée et $T_{\text{fumée}} > 300 \text{ } ^\circ\text{C}$
 - Feu localisé > 25 % de la surface du compartiment
 - Fumée > 80 % de la hauteur du compartiment

Feu naturel – action thermique

Le bâtiment est équipé d'un dispositif de brouillard d'eau, dont l'efficacité est au moins égale à celle du Sprinkler.

Après discussion avec l'autorité de protection incendie, le facteur de réduction $\delta_{n,1} = 0.61$ est admis pour cette étude, selon la valeur proposée dans l'Eurocode.

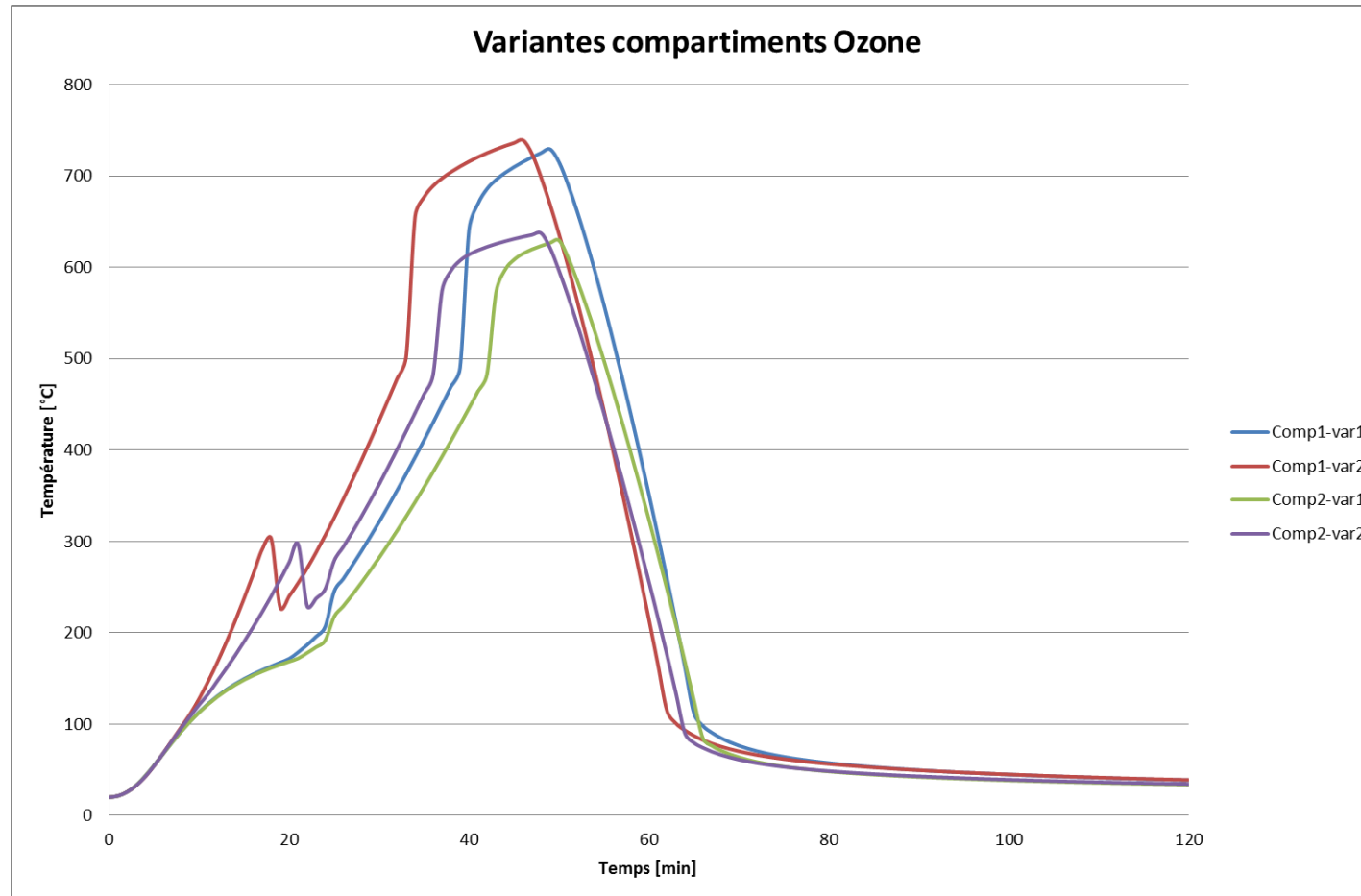
Par contre, pas de réduction pour la détection incendie, ni les pompiers d'entreprises.

La charge de dimensionnement au feu est donc pour le compartiment entier de :

$$q_{f,d} = \delta_{q,1} \cdot \delta_{q,2} \cdot \prod \delta_{n,i} \cdot m \cdot q_{fk}$$

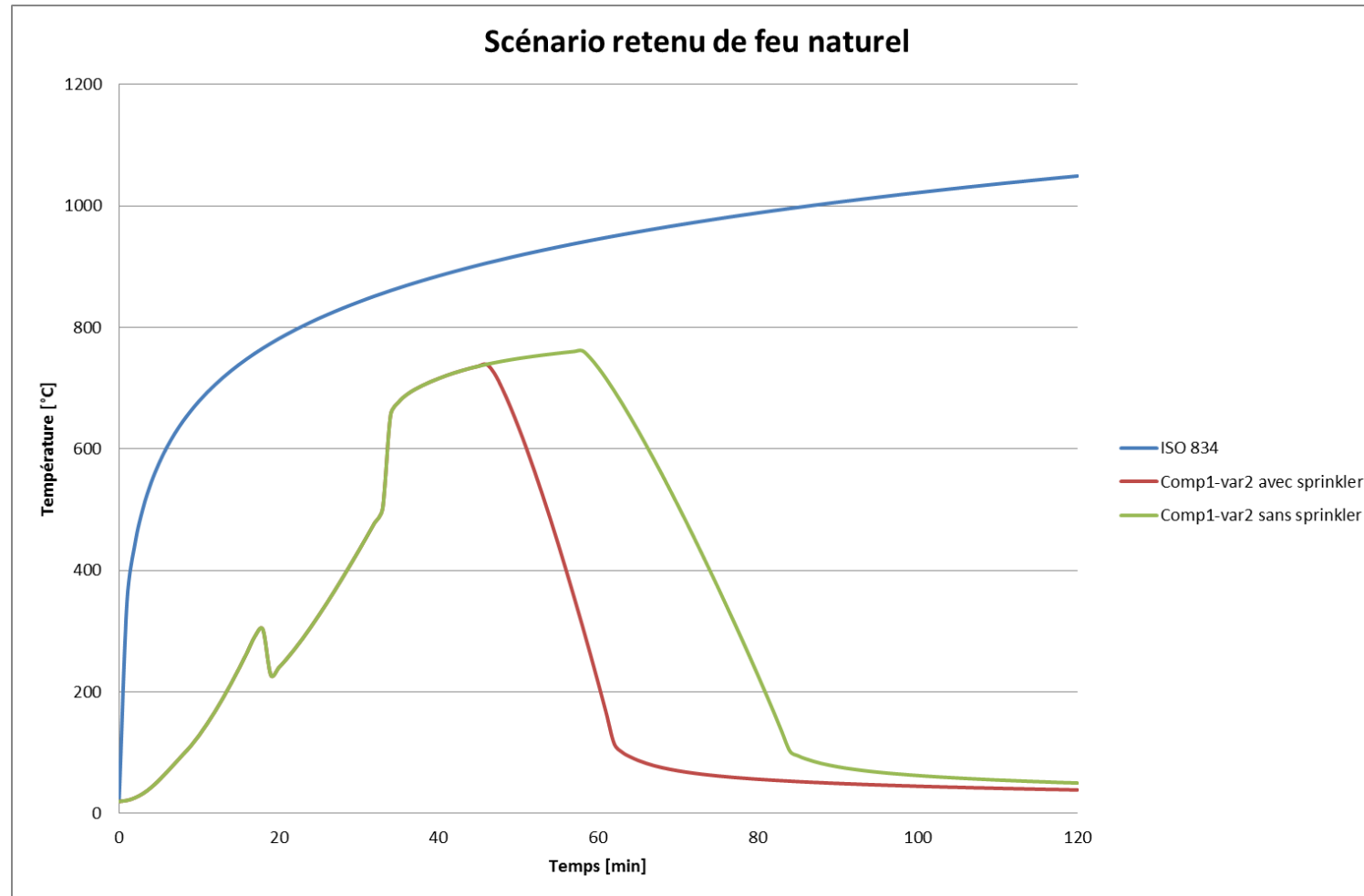
$$q_{f,d} = 1.58 \cdot 1.0 \cdot 0.61 \cdot 0.8 \cdot 511 \text{ MJ/m}^2 = 394 \text{ MJ/m}^2$$

Feu naturel – action thermique



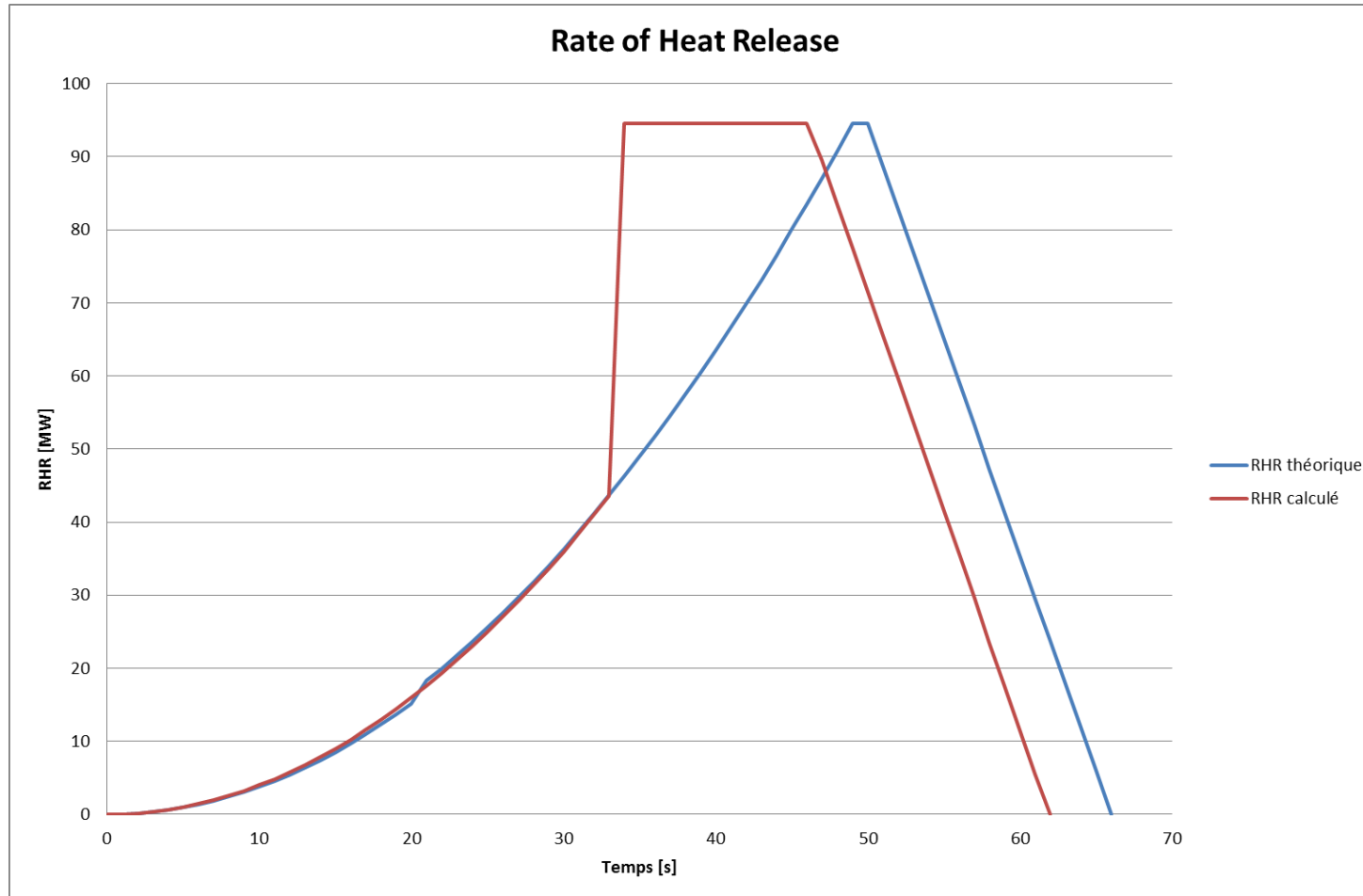
On remarque que le feu dans le compartiment 1 est plus sévère du fait que la charge de dimensionnement au feu prend en compte dans le facteur δ_{n_1} l'influence de la surface du compartiment.

Feu naturel – action thermique



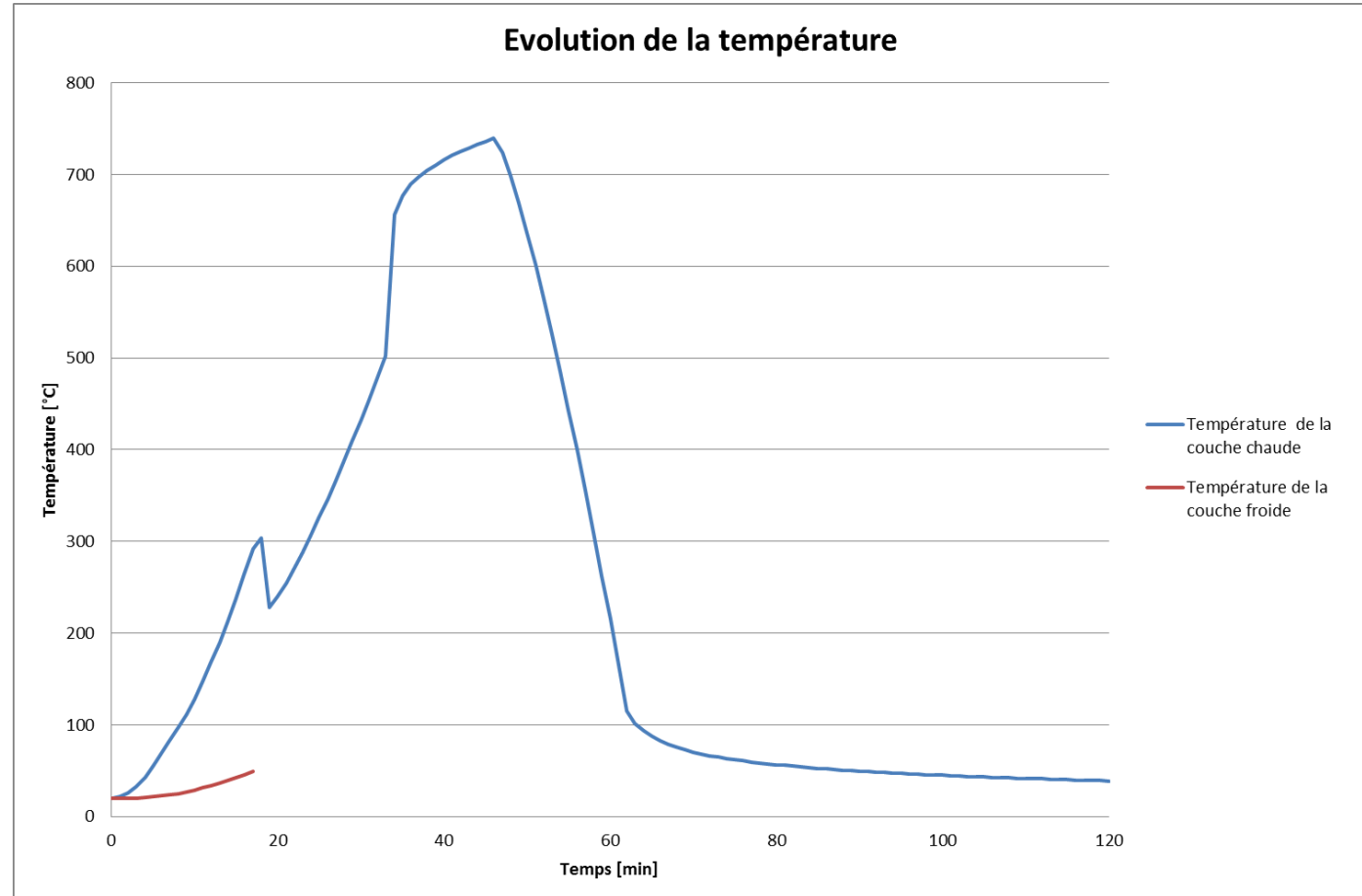
Scénario choisi, avec par comparaison la courbe ISO. On remarque aussi l'influence du Sprinkler.

Feu naturel – action thermique



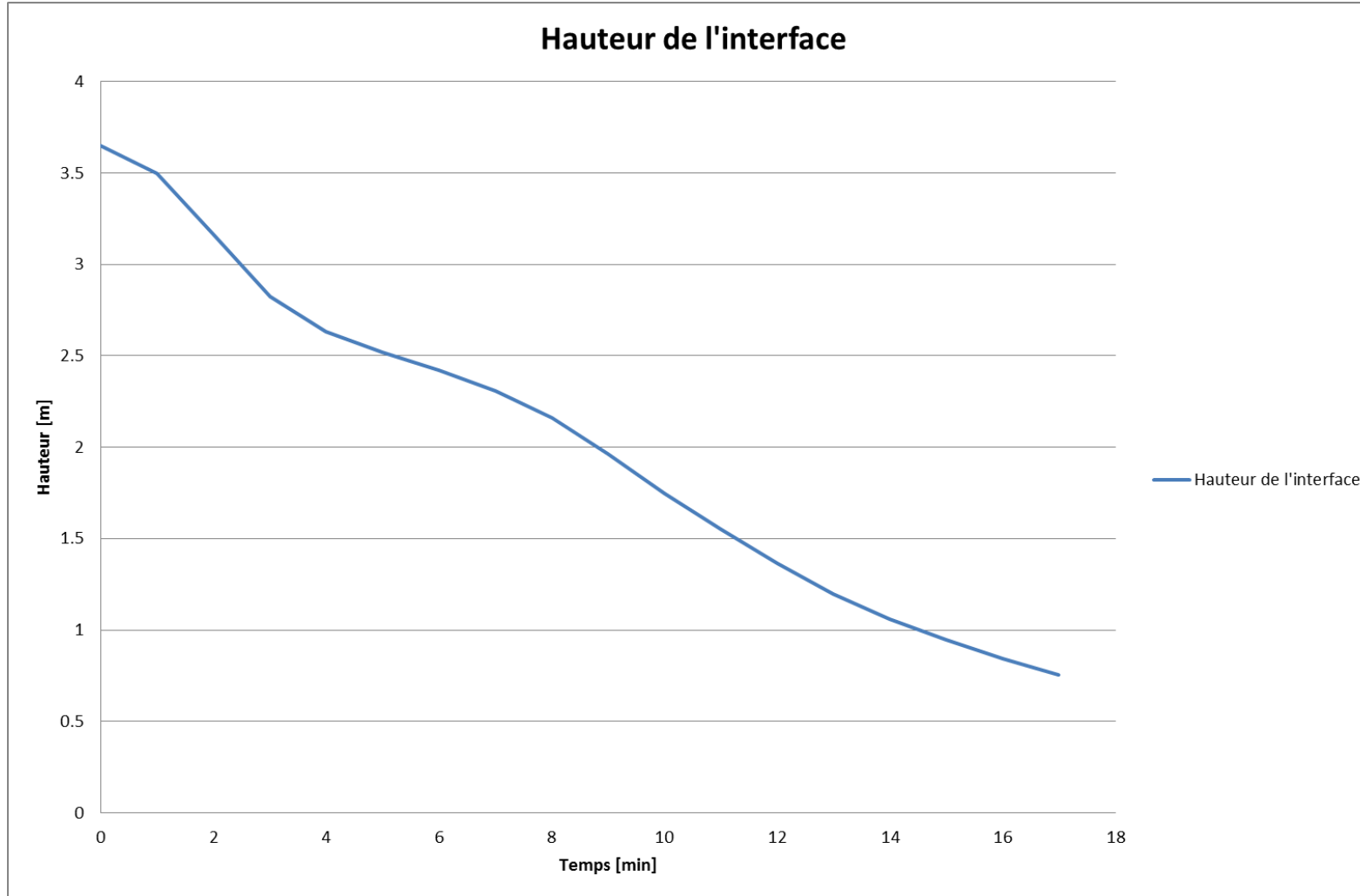
On remarque sur ces deux courbes la différence due à l'embrassement généralisé (flashover) sur la courbe RHR calculée par rapport à celle théorique. Cet embrassement survient à 33 minutes.

Feu naturel – action thermique



La température maximum de 736 °C est atteinte après 46 minutes. Le modèle passe de deux zones à une zone à 17 minutes. Ceci est dû à la couche de fumée qui atteint 0.75 m à 17 minutes, ce qui est une des conditions pour le changement de modèle.

Feu naturel – action thermique



Action mécanique

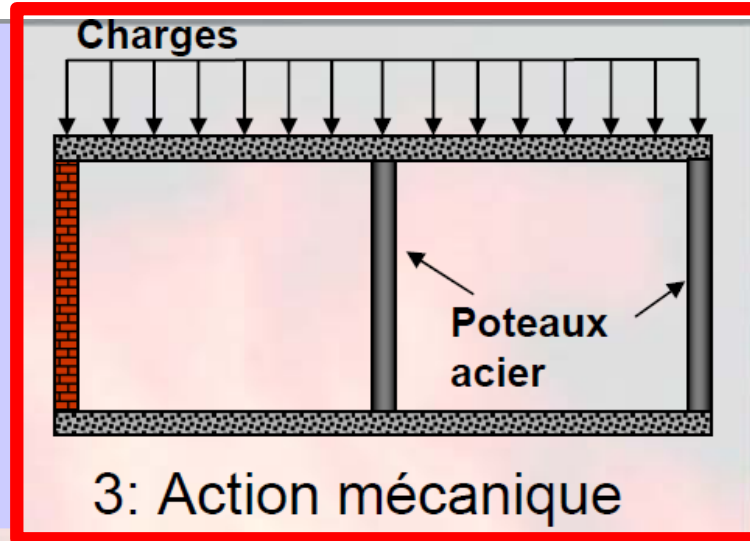
Feu naturel – action mécanique



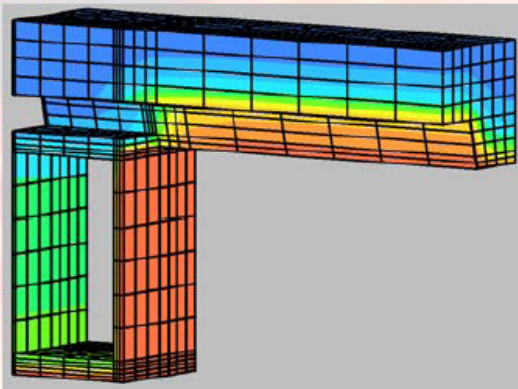
1: Allumage



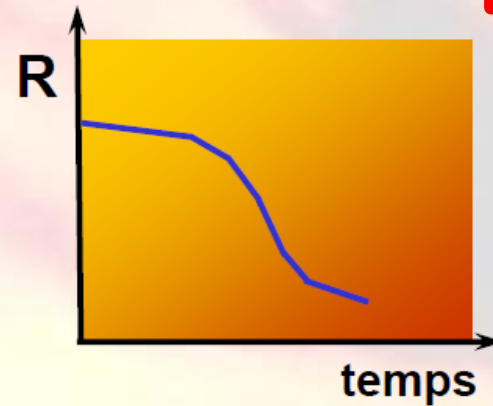
2: Action thermique



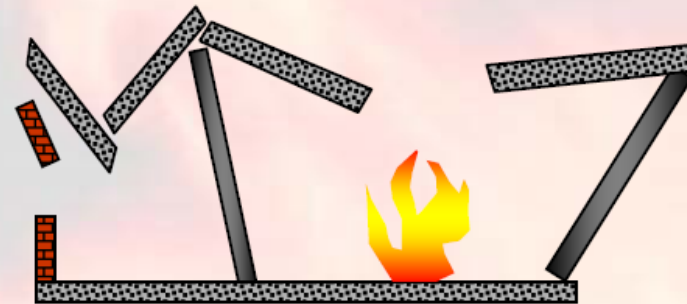
3: Action mécanique



4: Transfert thermique



5: Comportement mécanique



6: Effondrement éventuel

Feu naturel – action mécanique

L'action de dimensionnement « à froid » s'écrit selon la norme SIA 260

$$Ed_{ELU} = 1.35 \cdot g + 1.35 \cdot g' + 1.5 \cdot q$$

L'action de dimensionnement « à chaud » est considérée comme une action accidentelle selon la norme SIA 260 (idem séisme).

$$Ed_{fi} = 1.00 \cdot g + 1.00 \cdot g' + \psi_2 \cdot q$$

Le coefficient ψ_2 doit être choisi selon le tableau 2 de la norme SIA 260.

Avec un coefficient ψ_2 variant entre 0.3 et 0.8, on remarque qu'une section correctement dimensionnée à froid aura une réserve de résistance entre 30 et 50 % supérieure en situation « incendie ».

Feu naturel – action mécanique

L'action de dimensionnement « à froid » pour le profilé IPE 360 vaut dans notre cas:

$$Ed_{ELU} = 1.35 \cdot g + 1.35 \cdot g' + 1.5 \cdot q$$

L'action de dimensionnement « à chaud » est considérée comme une action accidentelle selon la norme SIA 260 (idem séisme).

$$Ed_{fi} = 1.00 \cdot g + 1.00 \cdot g' + \psi_2 \cdot q$$

Le coefficient ψ_2 doit être choisi selon le tableau 2 de la norme SIA 260.

Pour des bureaux le coefficient ψ_2 est de 0.3.

Feu naturel – action mécanique

L'action de dimensionnement « à froid » s'écrit selon la norme SIA 260

$$Ed_{,ELU} = 1.35 \cdot g + 1.35 \cdot g' + 1.5 \cdot q$$

$$\begin{aligned} Ed_{,ELU} &= 1.35 \cdot 0.57 \text{ kN/m}' + 1.35 \cdot (2.75 + 1.70 + 0.50) \text{ kN/m}^2 \cdot 1.80 \text{ m}' + 1.5 \\ &\cdot 3.00 \text{ kN/m}^2 \cdot 1.80 \text{ m}' = \mathbf{20.90 \text{ kN/m}'} \end{aligned}$$

L'action de dimensionnement « à chaud » est considérée comme une action accidentelle selon la norme SIA 260 (idem séisme).

$$Ed_{,fi} = 1.00 \cdot g + 1.00 \cdot g' + \psi_2 \cdot q$$

$$\begin{aligned} Ed_{,fi} &= 1.00 \cdot 0.57 \text{ kN/m}' + 1.00 \cdot (2.75 + 1.70 + 0.50) \text{ kN/m}^2 \cdot 1.80 \text{ m}' + 0.3 \\ &\cdot 3.00 \text{ kN/m}^2 \cdot 1.80 \text{ m}' = \mathbf{11.10 \text{ kN/m}'} \end{aligned}$$

On remarque qu'une section correctement dimensionnée à froid aura dans ce cas là, une réserve de résistance d'environ 50% en situation « incendie ».

Transfert thermique



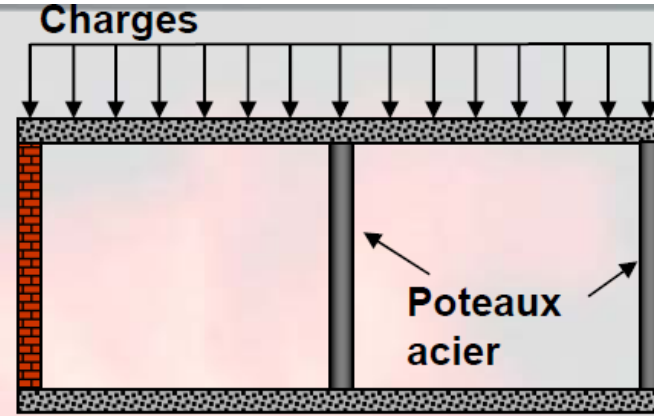
Feu naturel – transfert thermique



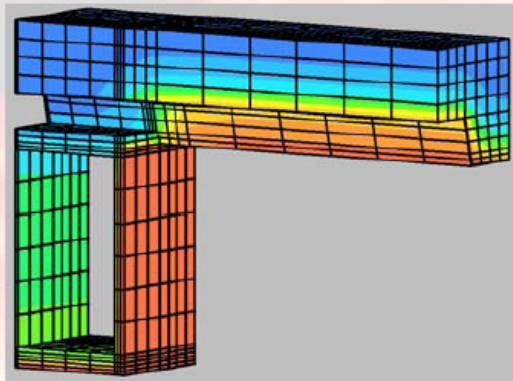
1: Allumage



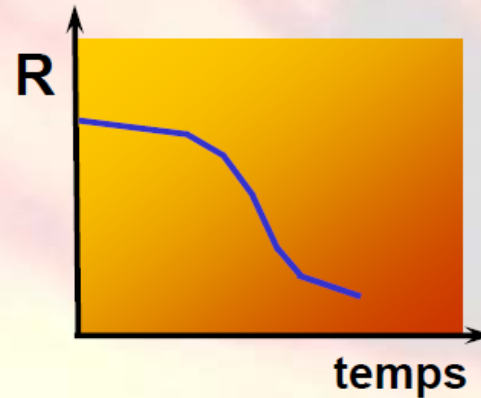
2: Action thermique



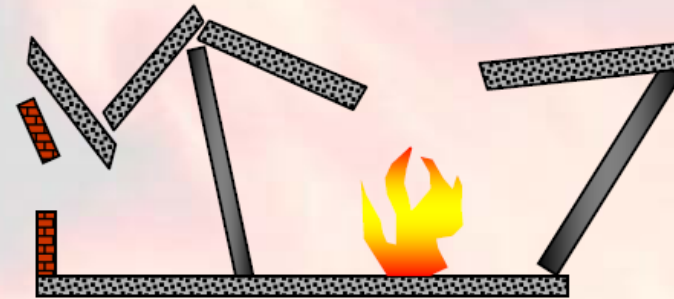
3: Action mécanique



4: Transfert thermique

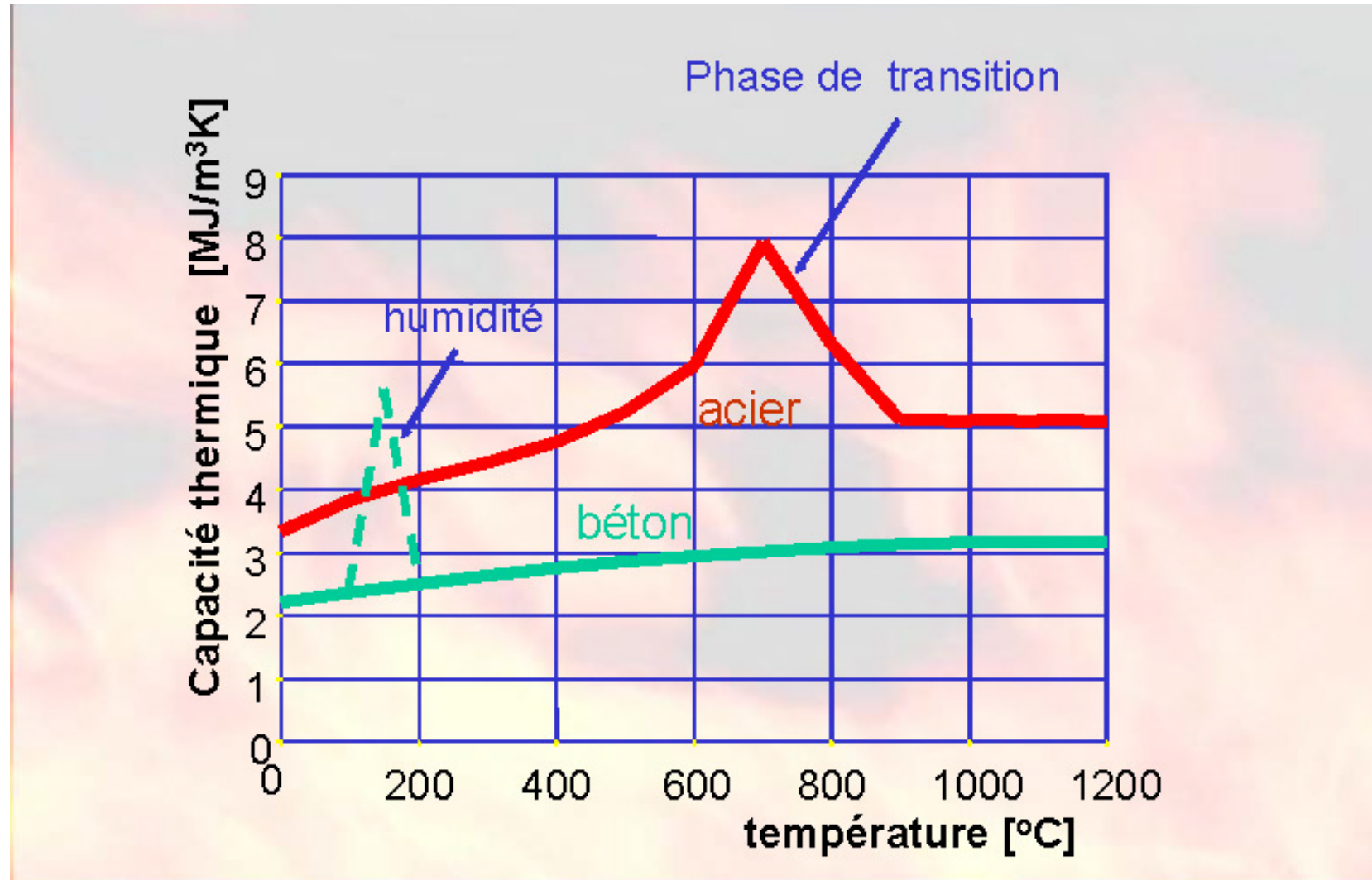


5: Comportement mécanique

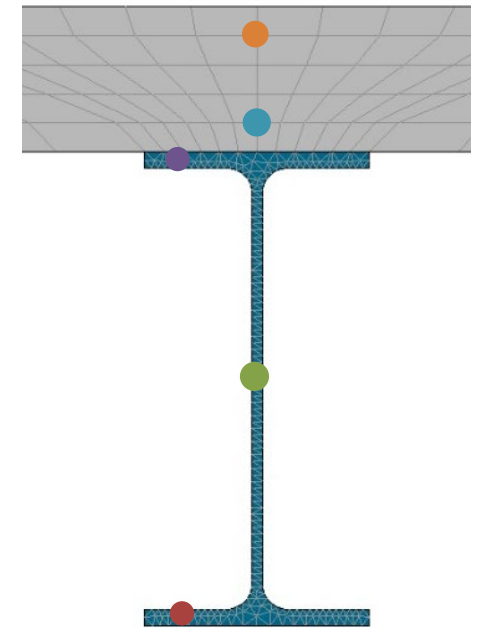
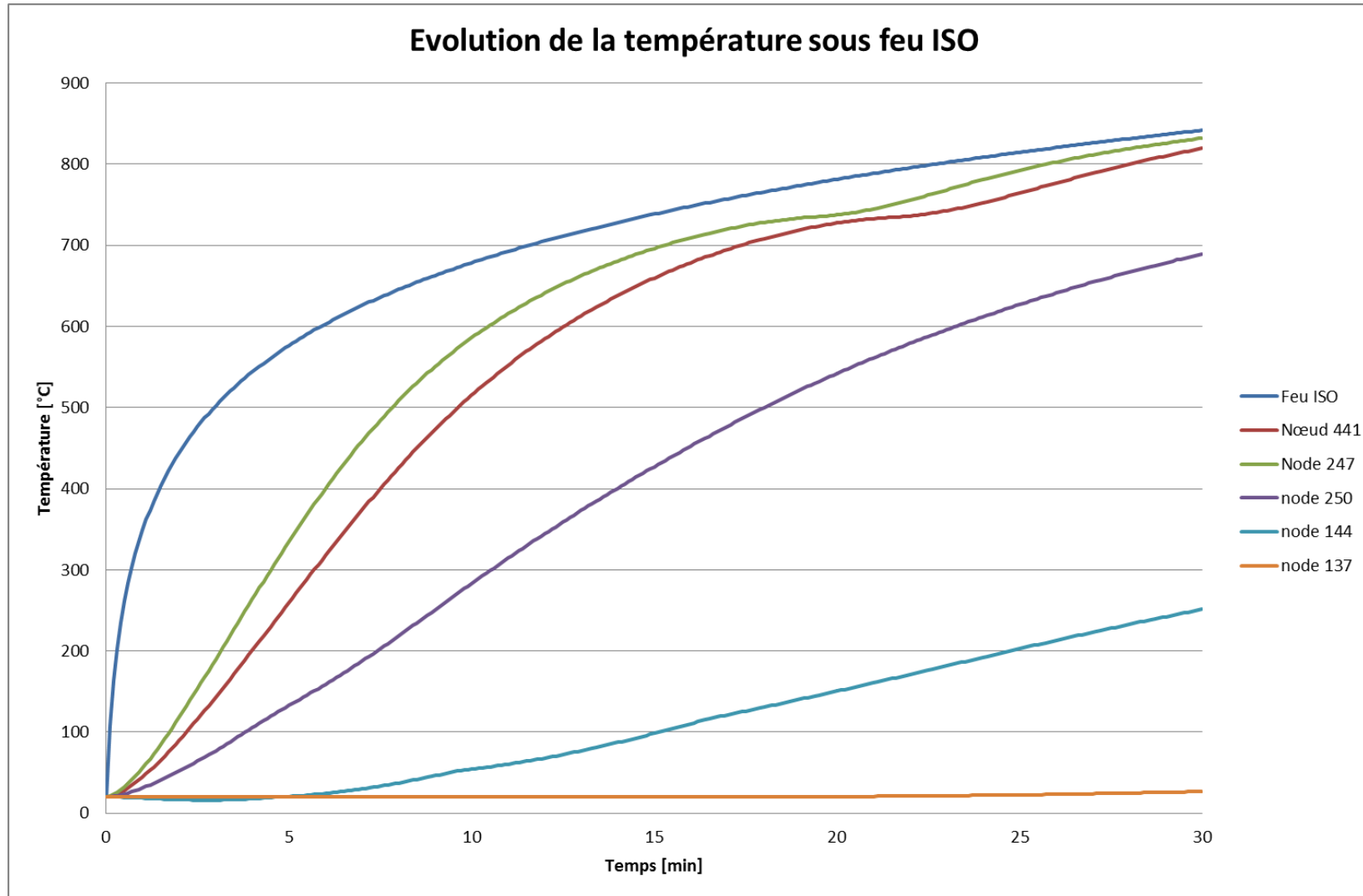


6: Effondrement éventuel

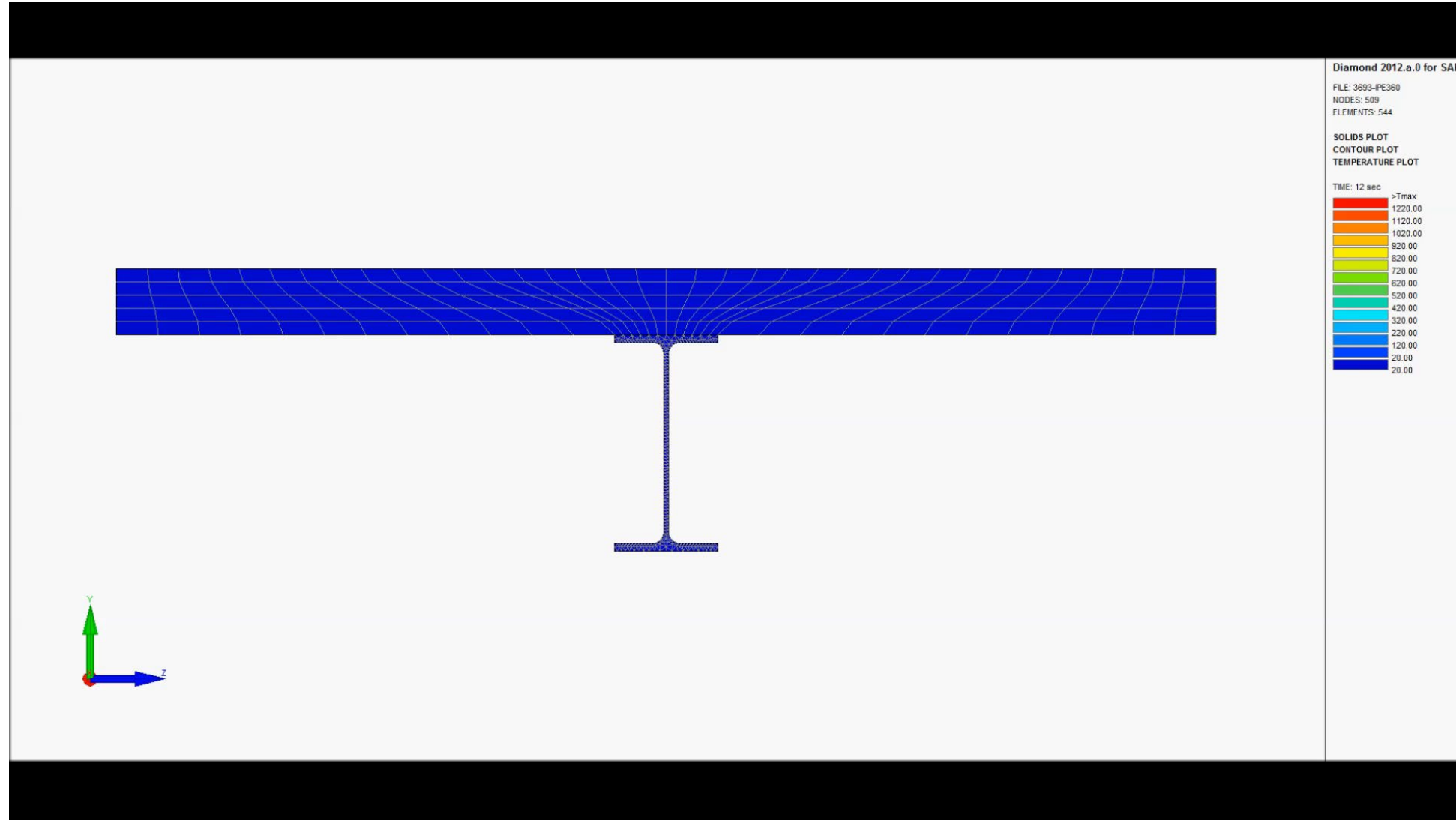
Transfert thermique



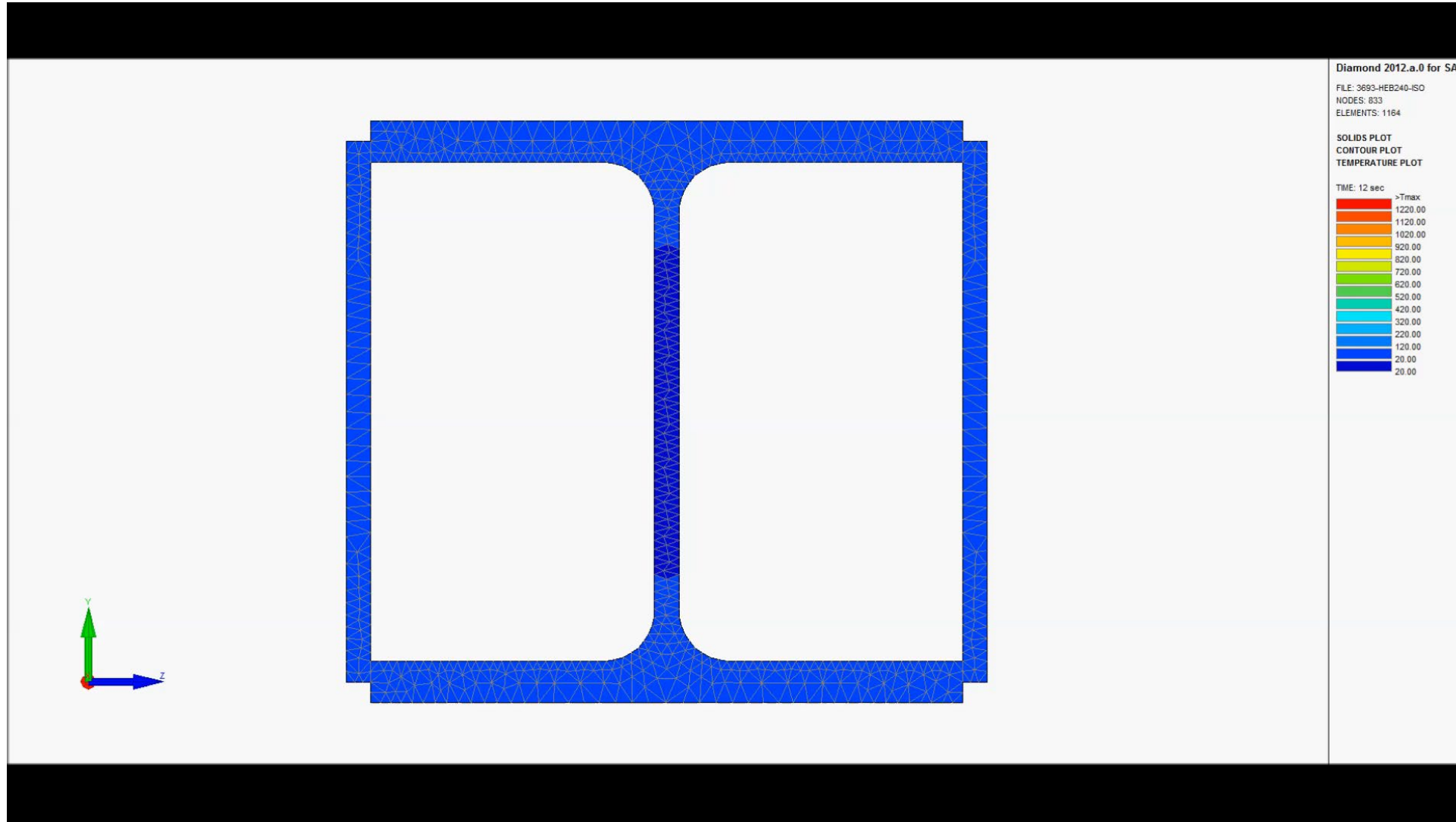
Transfert thermique



Transfert thermique

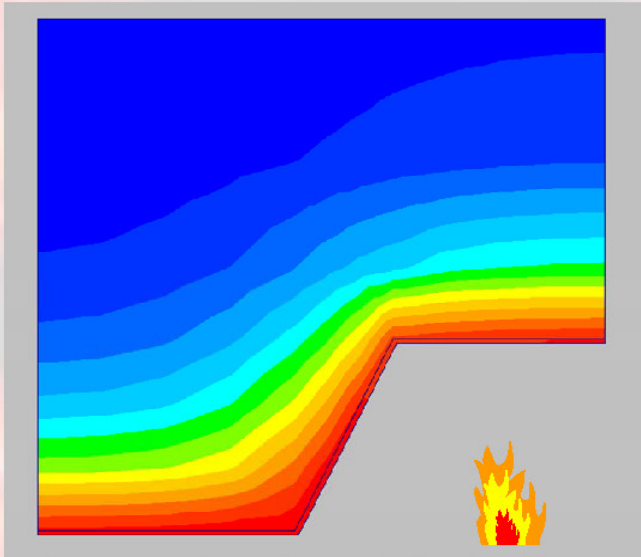


Transfert thermique

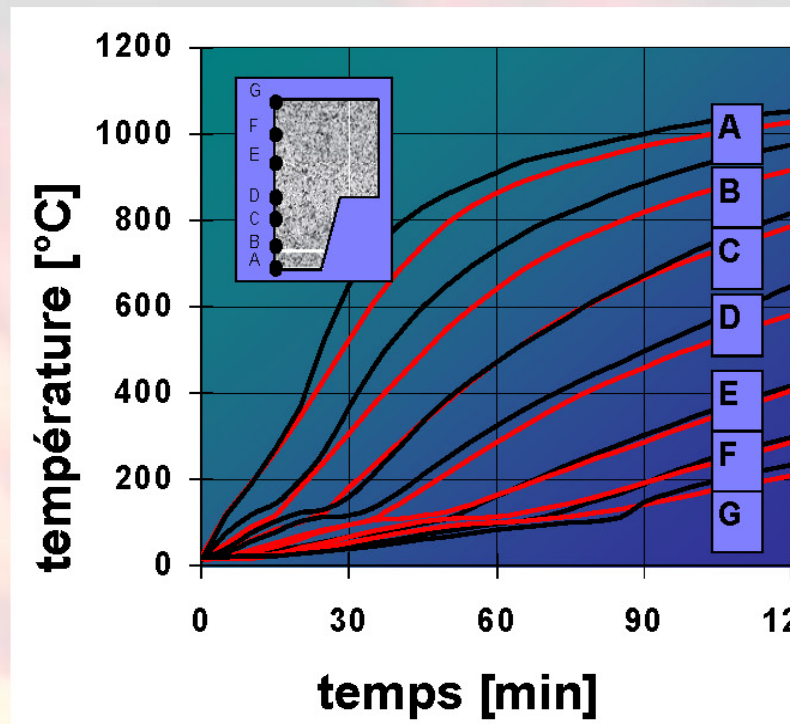


Transfert thermique

Champ de températures, plancher mixte(2D)



Simulation numérique



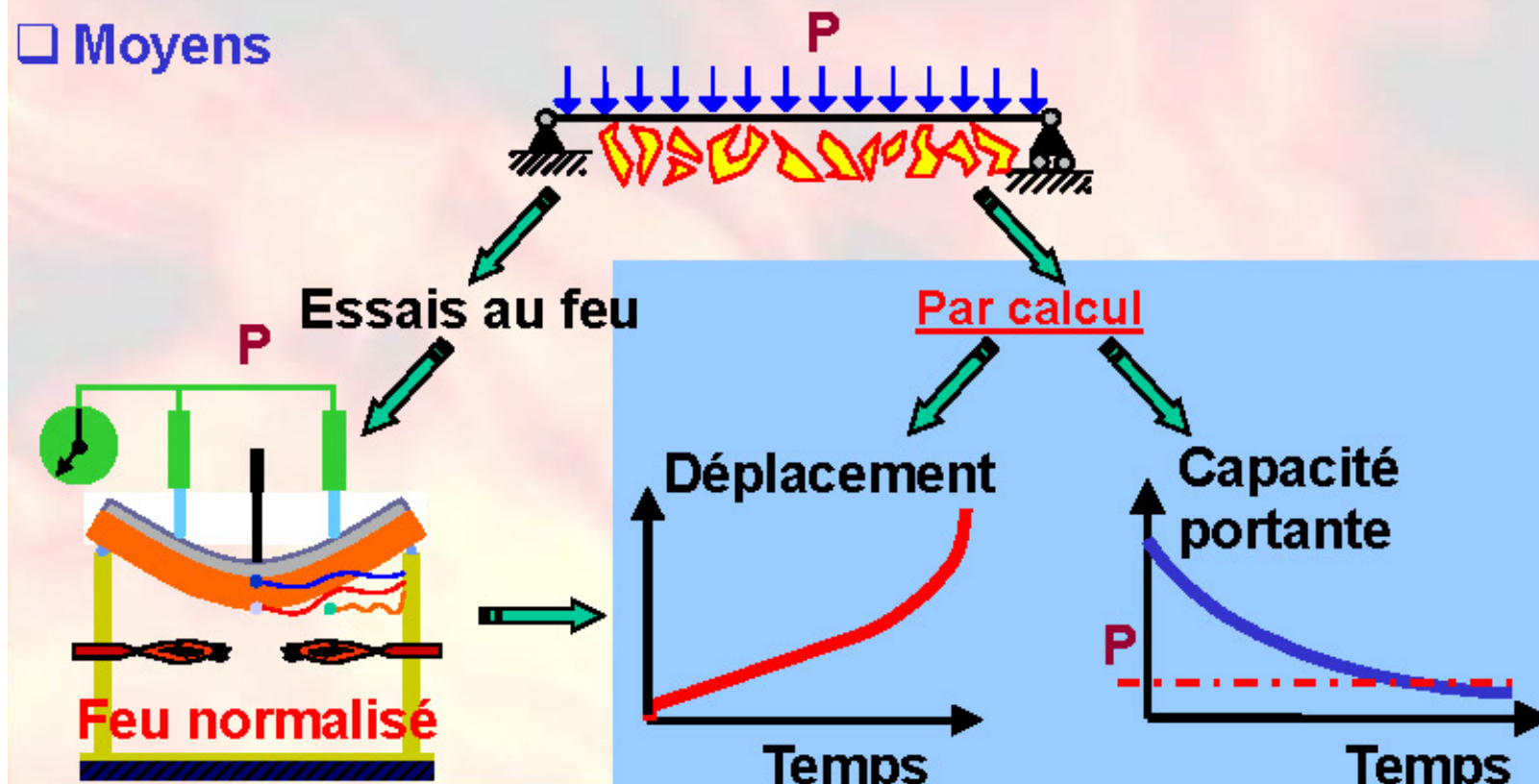
Résultats expérimental
et théorique

Evaluation du comportement mécanique des structures en situation d'incendie

□ Objectif

- Décrire **le comportement mécanique** des structures soumises à un incendie quelconque

□ Moyens



Aspect relatifs à l'analyse du comportement mécanique au feu des structures

Charges mécaniques en situation d'incendie

- Combinaison spécifique de charge

Propriétés mécaniques des matériaux aux températures élevées

- Rigidité et résistance varient avec la température

Calcul de la résistance au feu des structures

- Approches d'analyse de structures
- Méthodes de calcul
- Domaine d'application

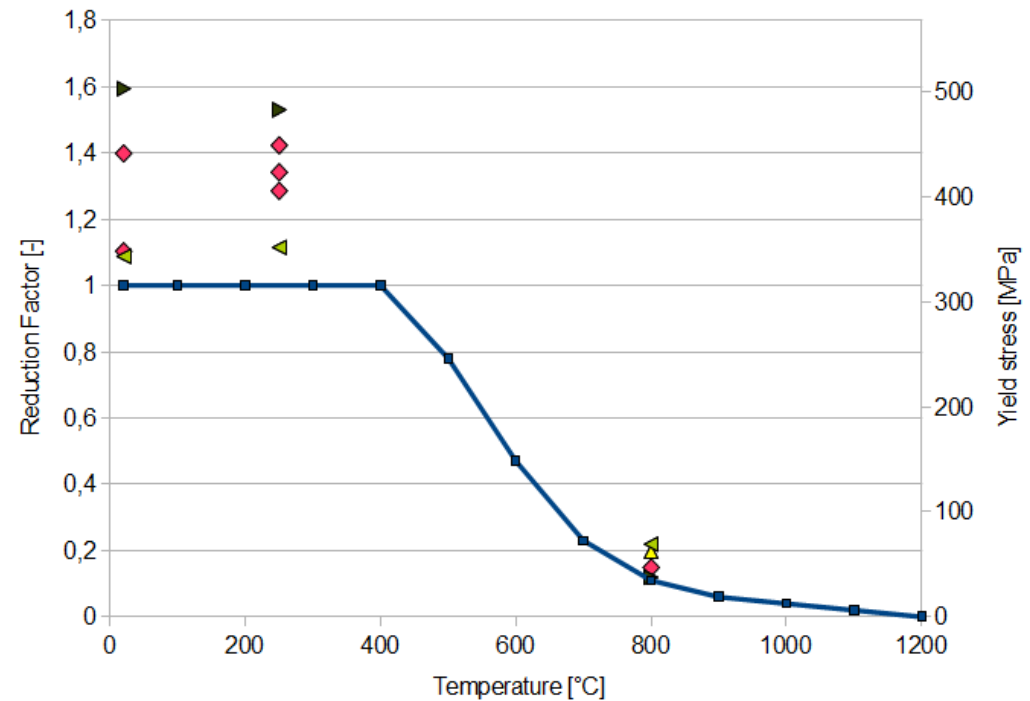
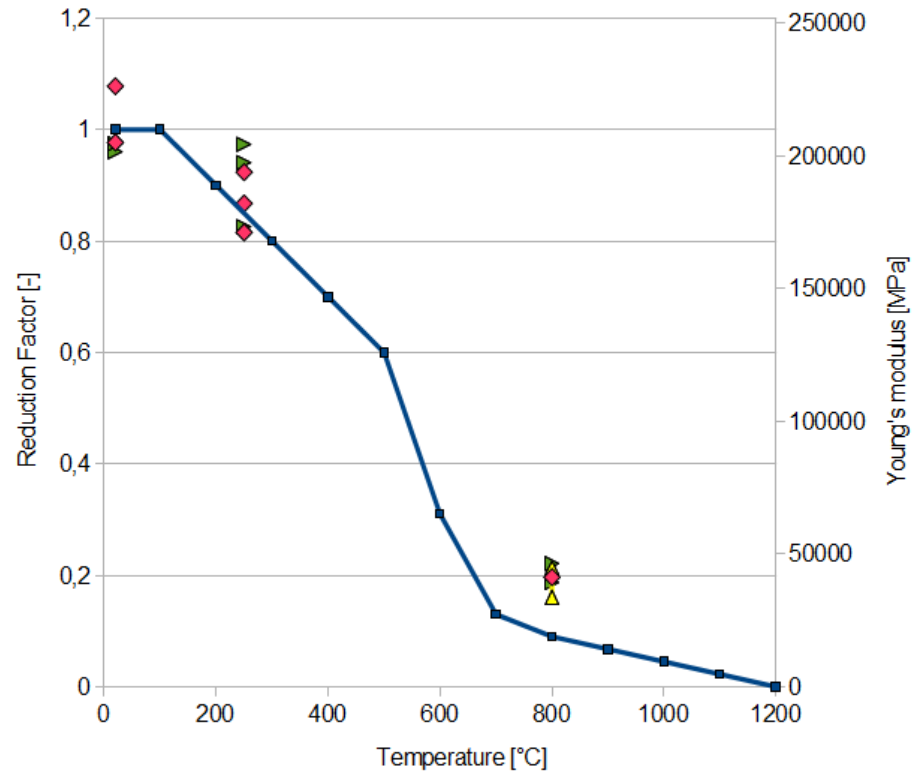
Considération spécifique de la résistance au feu des structures métalliques

- Connexions, assemblages, etc.

Comportement mécanique

Propriété mécanique de l'acier de construction à température élevées (essais)

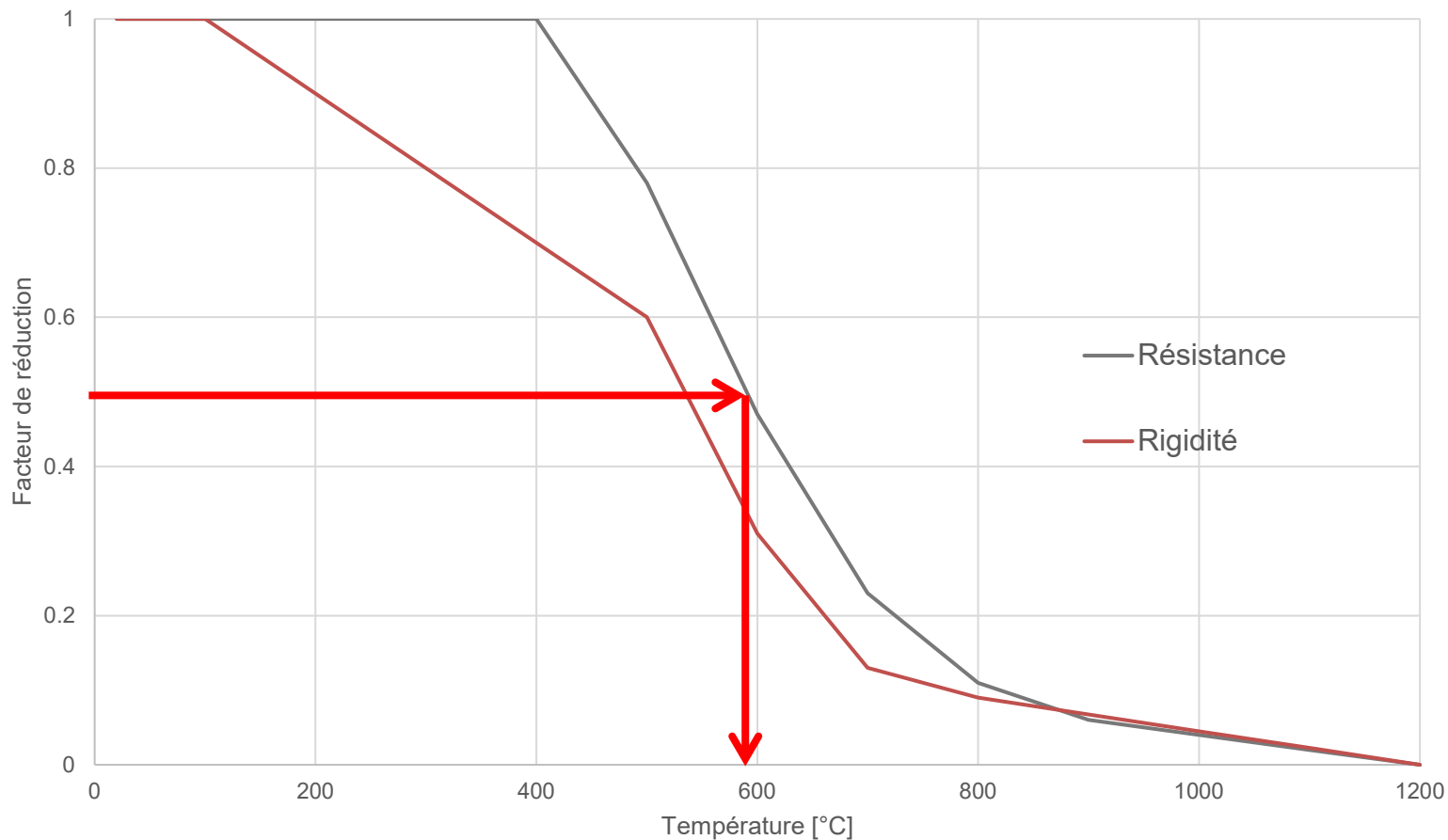
Acier de construction S 355



Comportement mécanique

Propriétés mécanique de l'acier de construction – SN EN 1993-1-2

Evolution de la résistance et de la rigidité de l'acier (EN 1993-1-2)



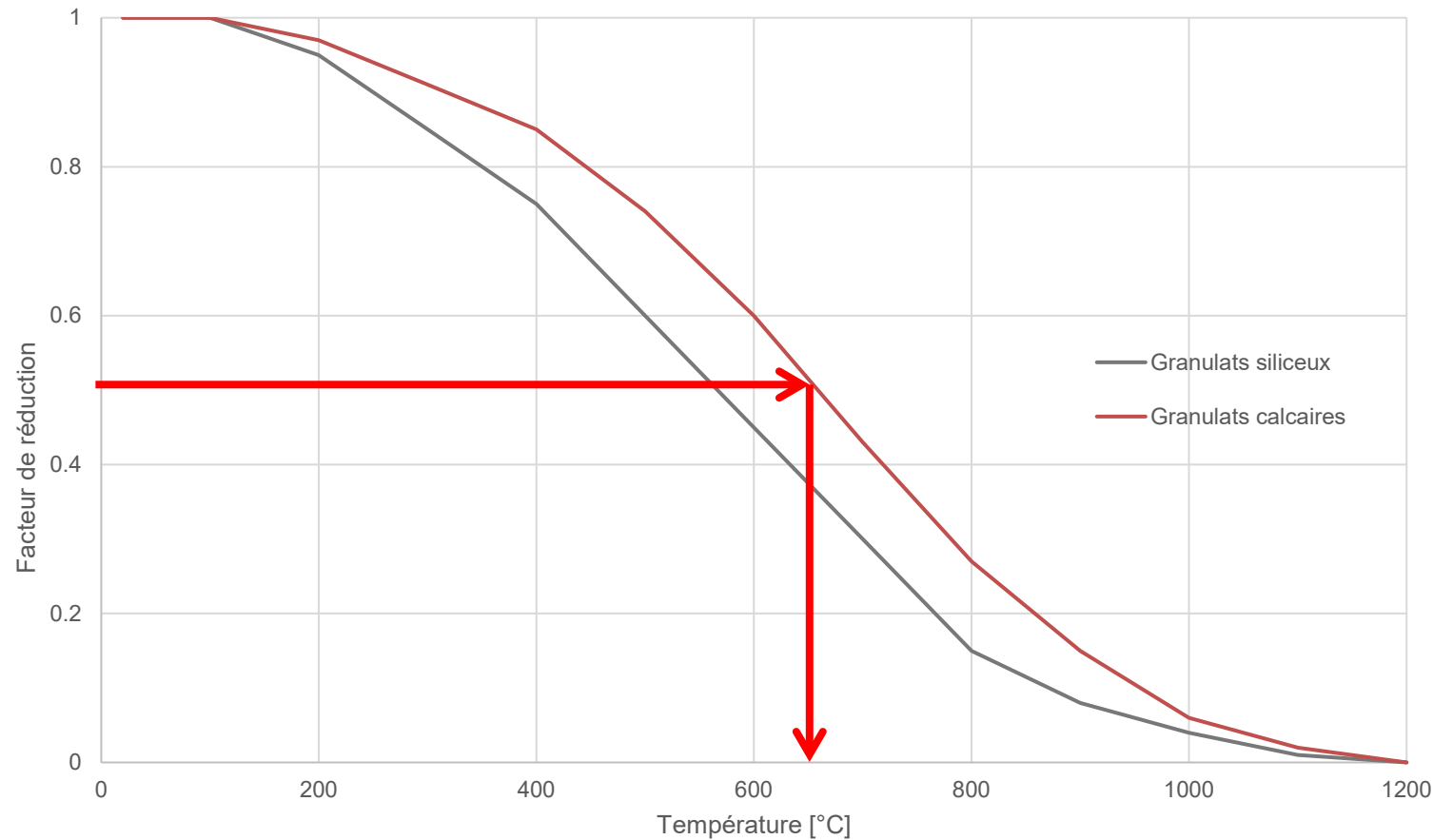
Exemple pour l'acier :

50 % de perte de
résistance à ~ 590 °C

Comportement mécanique

Propriété mécanique du béton – EN 1992-1-2

Evolution de la résistance du béton (EN 1992-1-2)



Exemple pour le béton
(granulats calcaires) :

50 % de perte de
résistance à ~ 650 °C

Analyse



Feu naturel - analyse

Descriptif des méthodes de calculs

Pour l'analyse de cette structure nous avons utilisé un modèle en 3 dimensions qui correspond à la sous-structure considérée. Cette sous-structure est identique à celle considérée pour le calcul « à froid ».

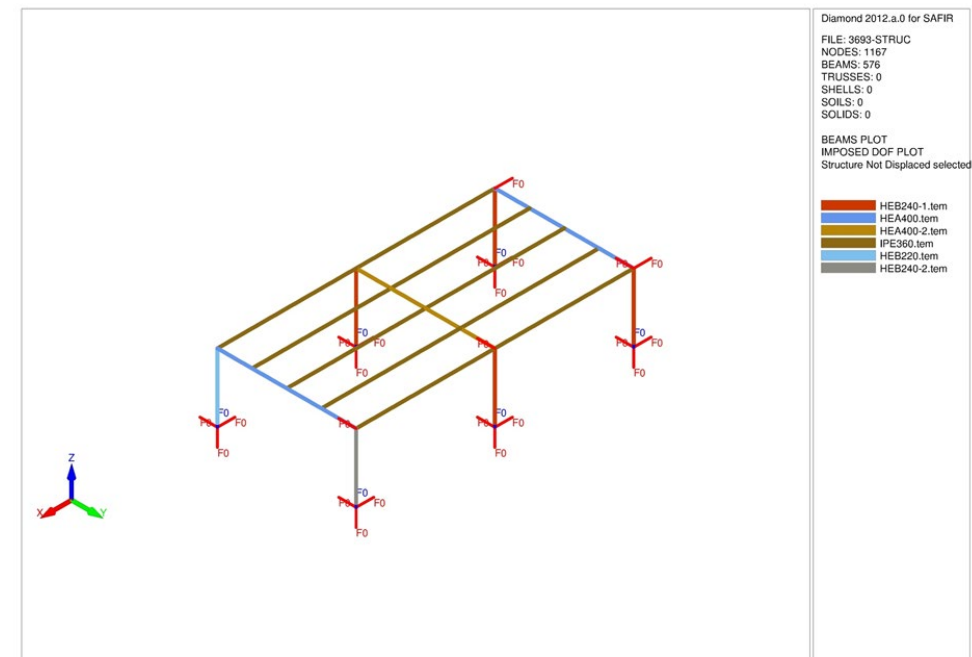
Pour prouver la résistance des éléments de structure, des calculs aux éléments finis avec le logiciel SAFIR 2013 ont été réalisés selon le scénario suivant :

Feu naturel - analyse

Descriptif des méthodes de calculs

Pour l'analyse de cette structure nous avons utilisé un modèle en 3 dimensions qui correspond à la sous-structure considérée. Cette sous-structure est identique à celle considérée pour le calcul « à froid ».

Pour prouver la résistance des éléments de structure, des calculs aux éléments finis avec le logiciel SAFIR 2013 ont été réalisés selon le scénario suivant :



Feu naturel - analyse

Chaque section droite est soumise à l'échauffement du feu (naturel ou ISO) : on détermine aussi l'échauffement des sections.

Un modèle comprenant les différentes sections sera créé et chargé avec la combinaison accidentelle : on introduit le comportement structural.

Le logiciel calcule la statique à chaque instant t et détermine si la résistance est assurée à chaque élévation de température.

Si la ruine a lieu, l'instant précis est connu, on peut ainsi déterminer sa résistance.

Si la ruine n'a pas lieu, on contrôle que les déformations des éléments sont acceptables.

Feu naturel - analyse

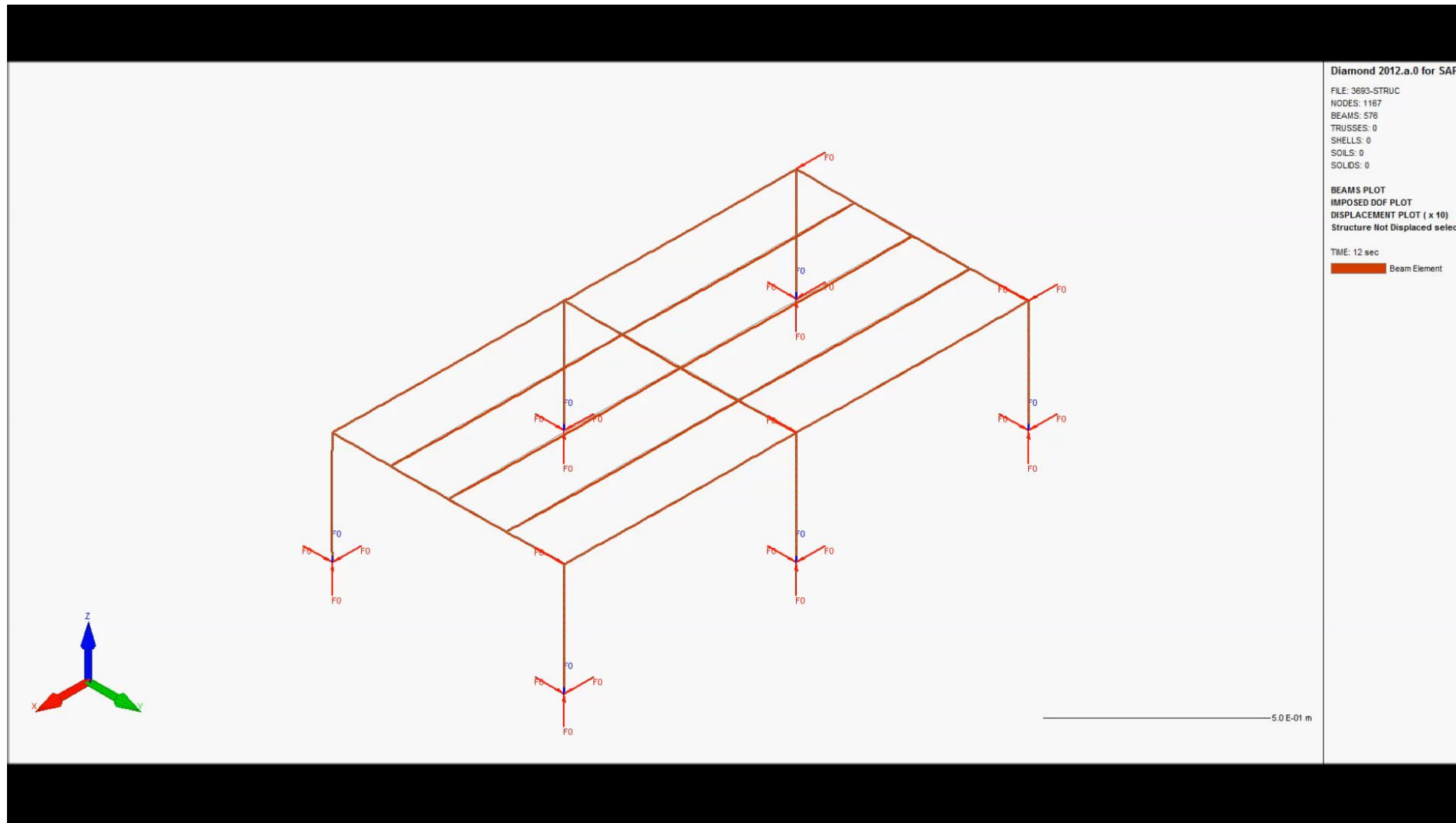
Pour tenir compte du caractère important des éléments verticaux (poteaux), qui soutiennent le reste du bâtiment BI, nous avons donc aussi vérifié ceux-ci sous un feu ISO, qui est plus sévère que le Feu naturel - action thermique dans notre cas.

En effet il n'existe pas encore de modèle général pour les feux localisés au droit d'une colonne. Des recherches sont actuellement en cours.

La publication du rapport LOCAFI sur cette méthode est intervenu en 2017. Ces recherches ont démontrés que l'action d'un feu près d'une colonne est essentiellement dû au rayonnement et à la position de la colonne par rapport au foyer.

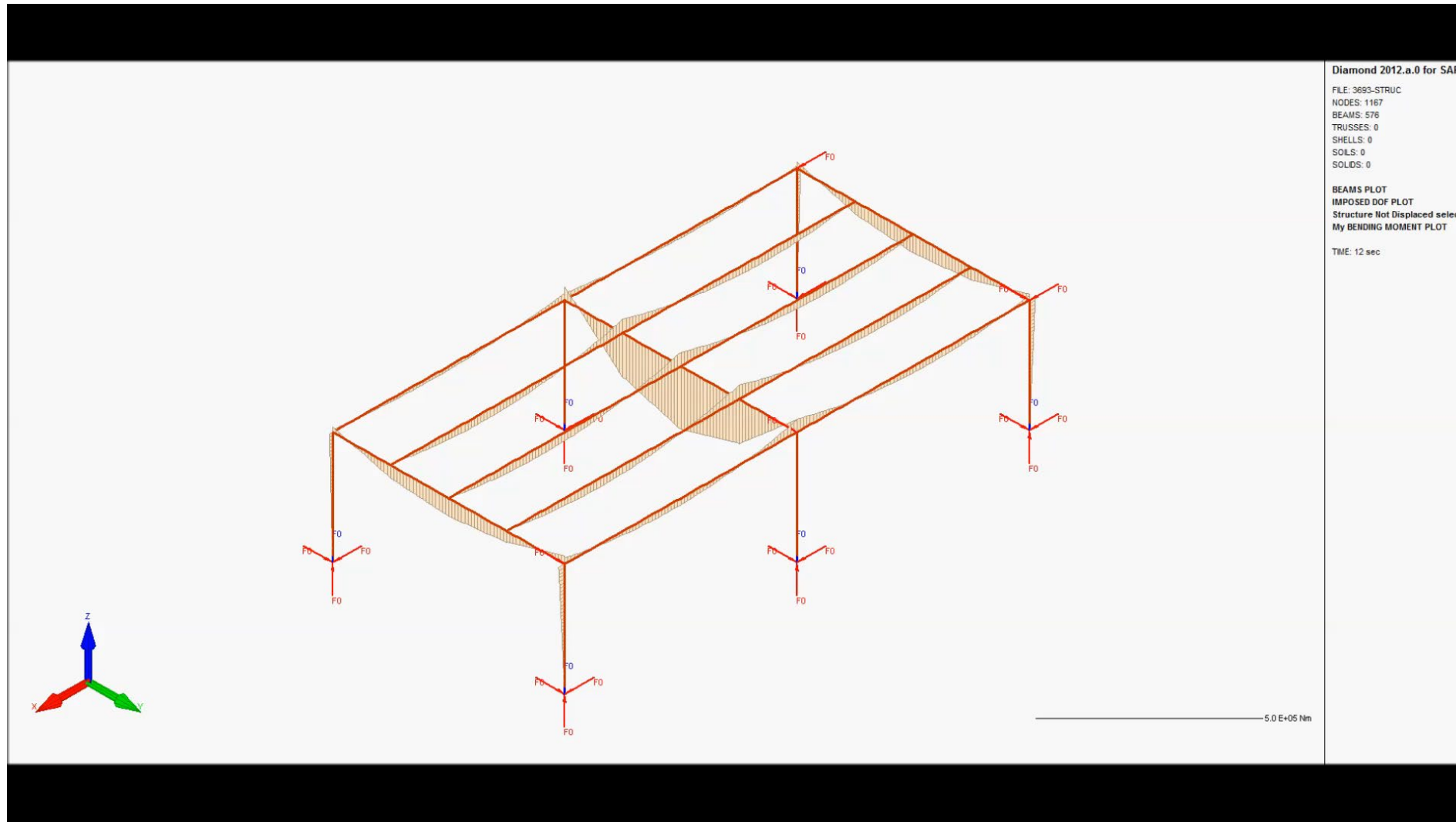
Cette méthode permet de dimensionner des colonnes en fonction de la charge thermique du compartiment.

Feu naturel - analyse



Evolution de la déformation de la structure (facteur 10x)

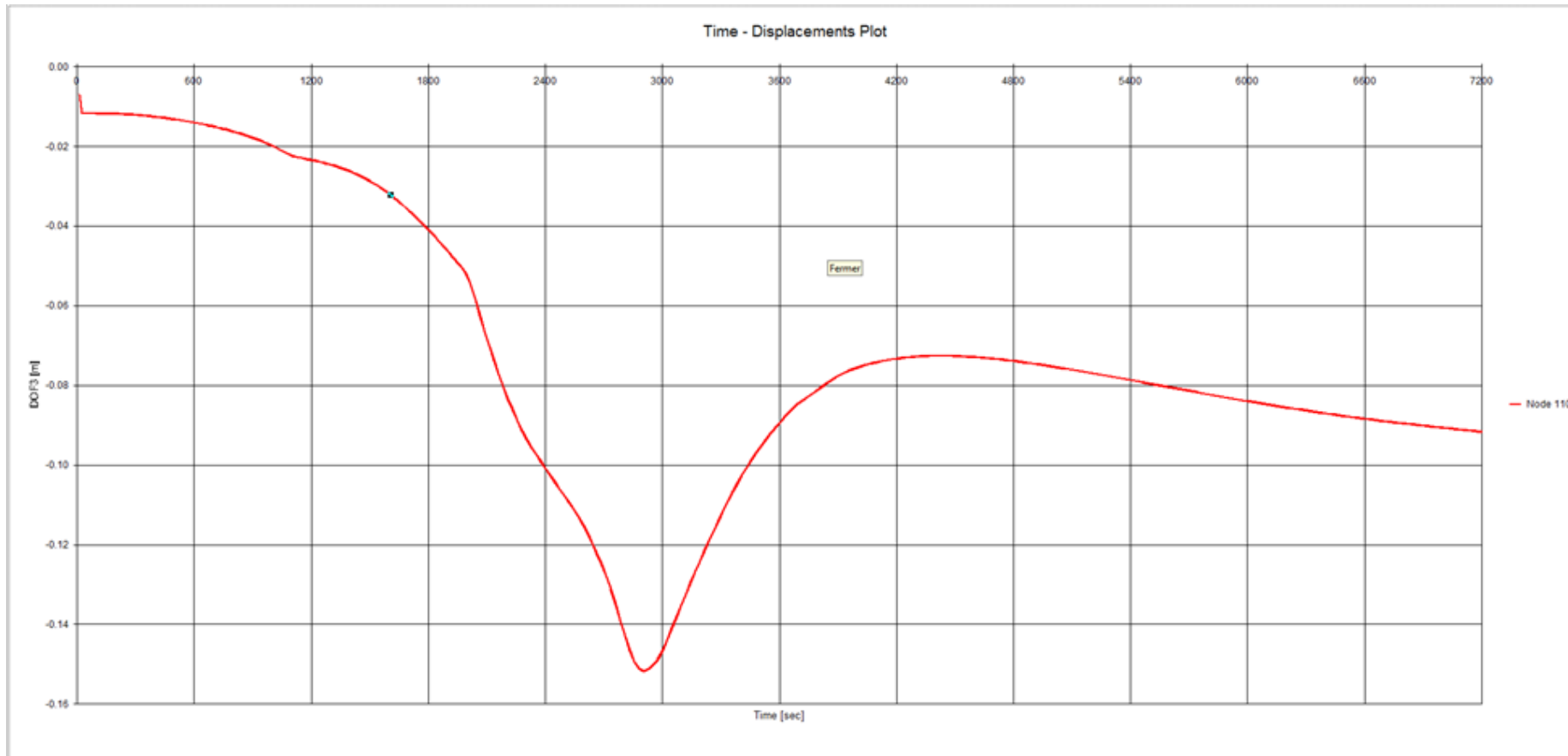
Feu naturel - analyse



Evolution des moments de flexion My (facteur 10x)

Feu naturel - analyse

On observe qu'il n'y a pas d'asymptote sur la courbe de la déformation, par exemple la déformation verticale du nœud 110 situé au milieu d'une poutre IPE 360. La valeur maximale de la déformation est de 15 cm, soit $l/48$ ce qui est acceptable car située en dessus de la limite de $l/30$ obtenue suite à différents essais effectués sur ce type de structure.



Feu ISO - analyse

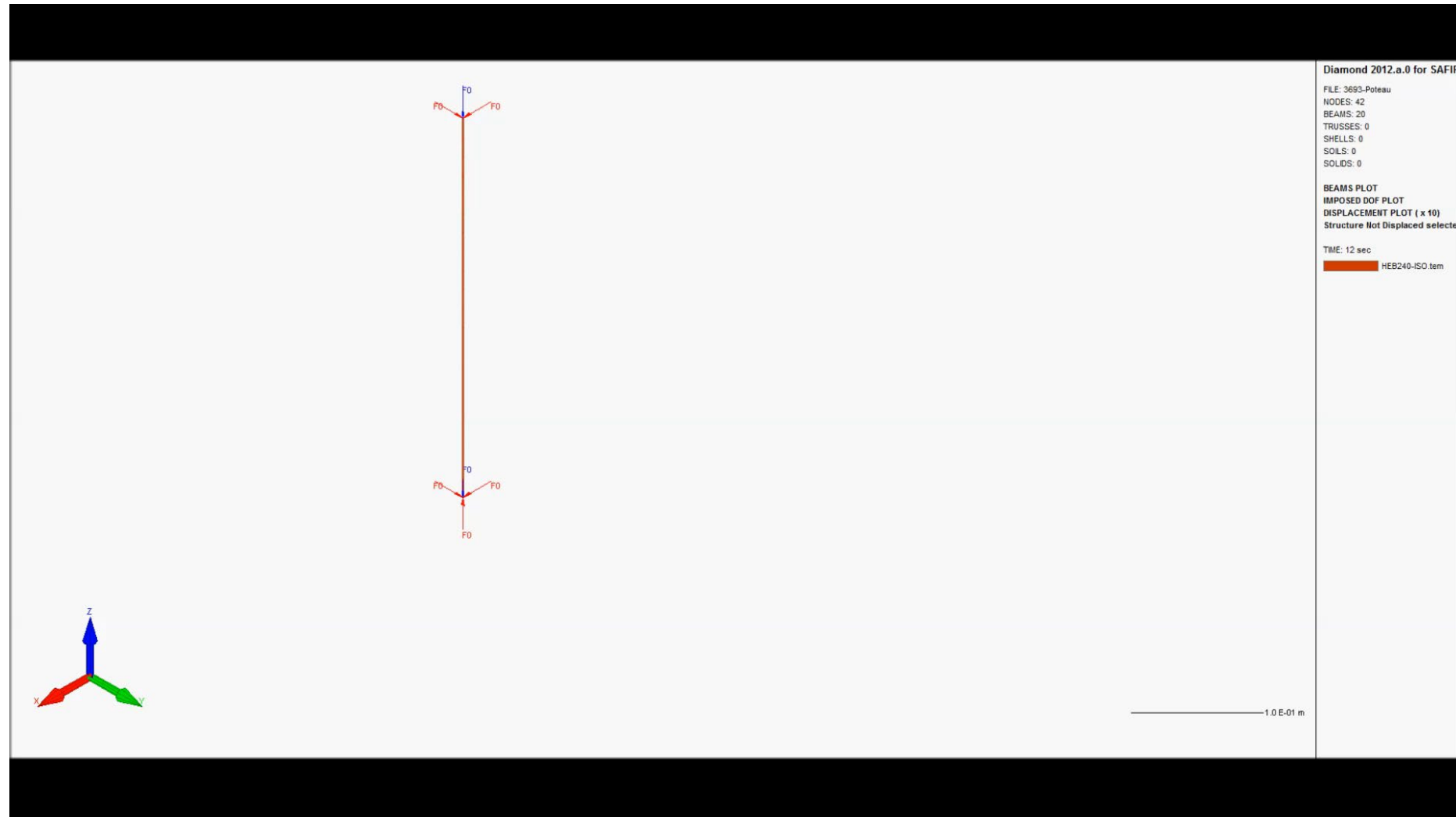
Comportement des poteaux au feu ISO

Les poteaux supportant le bâtiment BI dans le restaurant sont constitués de profilés en H caissonnés.

Nous avons étudié le poteau critique (le plus chargé) qui est composé d'HEB 240 caissonné avec deux plaques en acier de 220/10.

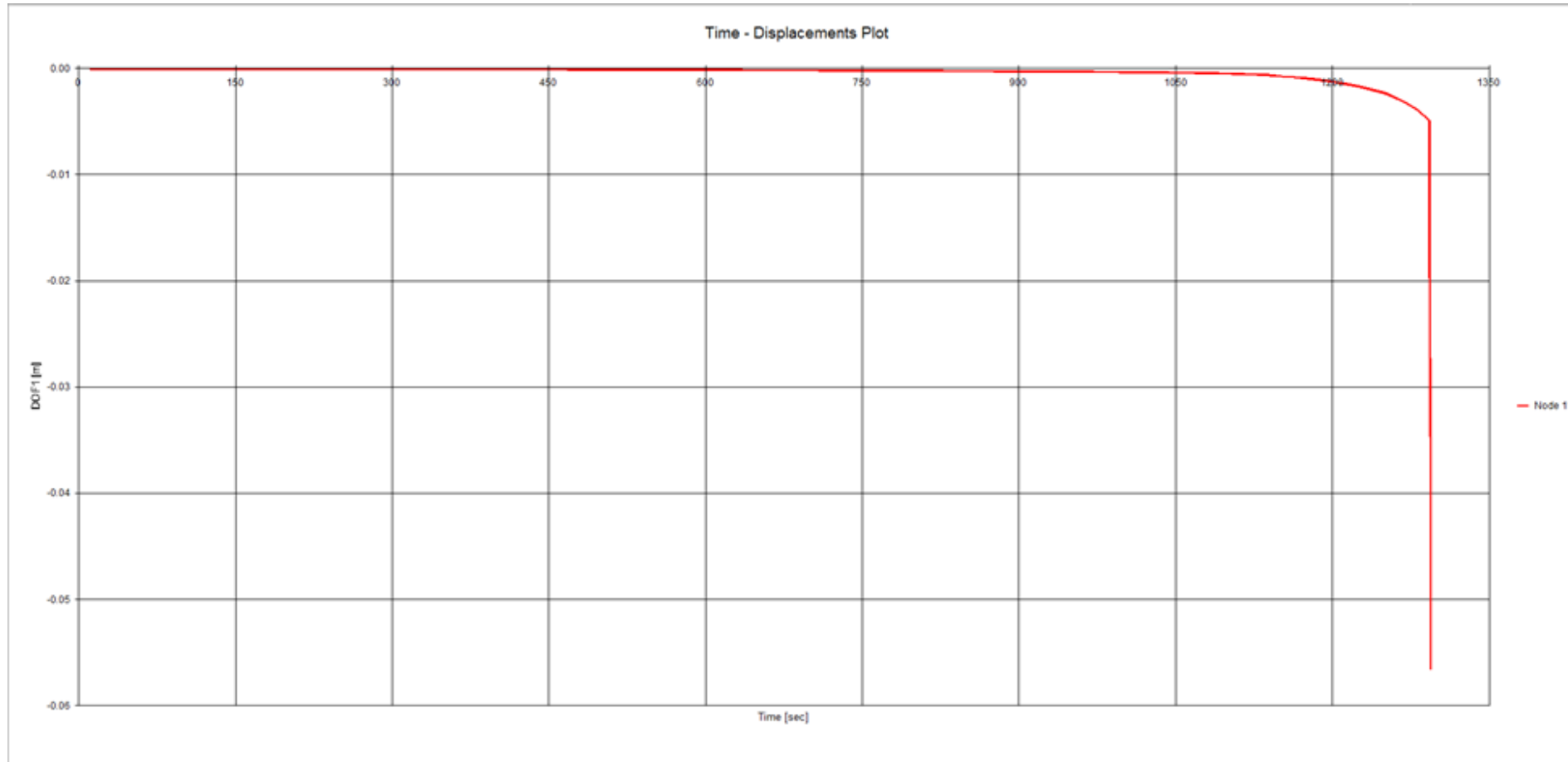


Feu ISO - analyse



Evolution de la déformation de la structure (facteur 10x)

Feu ISO - analyse

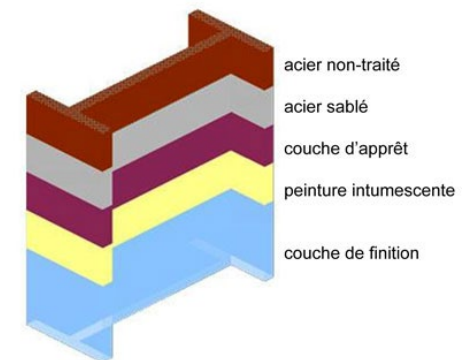


On remarque que la colonne HEB 240 atteint sa ruine à 1290 s, soit un peu plus de 21 minutes.

Feu naturel - analyse

Conclusion de notre cas

- Pas de protection sur les poutres du plancher soumise à l'action du Feu naturel - action thermique. Les déformations seront importantes, mais la stabilité du bâtiment est sauvegardée. Le maître de l'ouvrage a validé cette solution qui impliquera la reconstruction du plancher en cas de feu sévère.
- Protection des colonnes par une peinture intumescente (en ordre avec le risque de choc dans la cadre de cette affectation) car éléments essentiels pour la sécurité du bâtiment.



Examples



Exemples



Centre commercial à Collombey

Exemples



Halles multi activités à Puidoux

Exemples



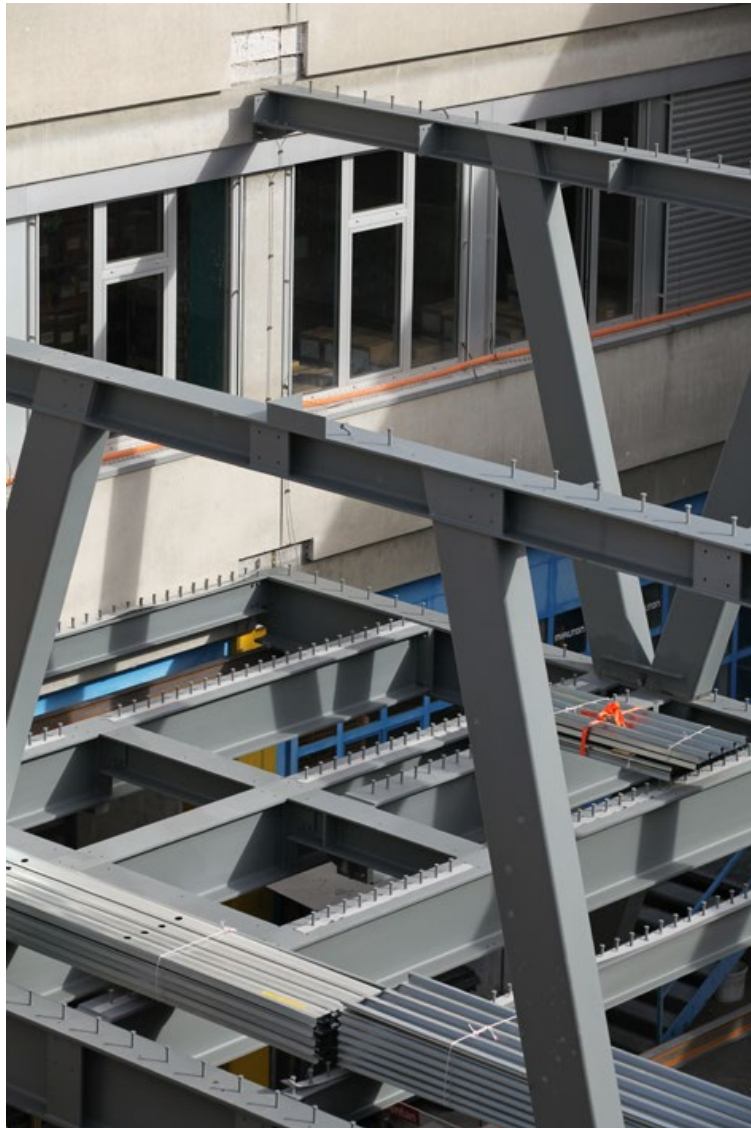
Halles multi activités à Puidoux

Exemples



Pont de liaison (23m) à Lausanne

Exemples

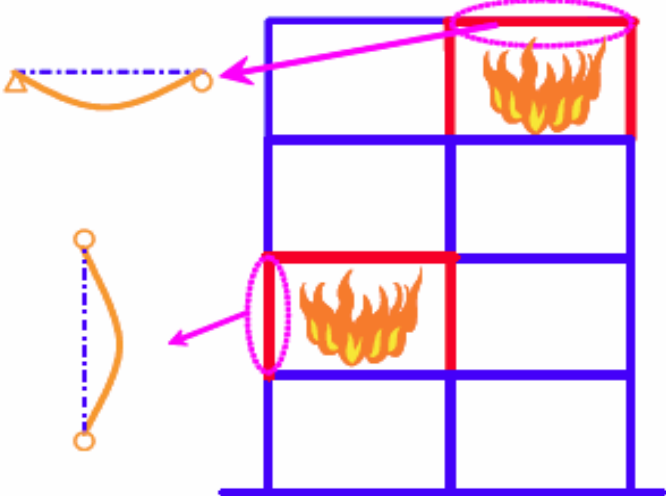
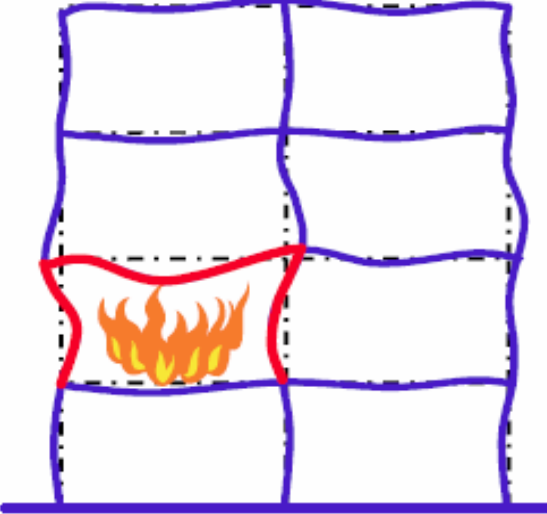


Pont de liaison (23m) à Lausanne

Conclusions




Conclusions

Analyse par élément	Analyse globale de structures
	
<ul style="list-style-type: none">➤ Analyse des éléments indépendants➤ simple à appliquer➤ En général, appliquée sous feu normalisé	<ul style="list-style-type: none">➤ Effet d'interaction entre différentes parties de structure➤ rôle de la compartimentation➤ stabilité globale

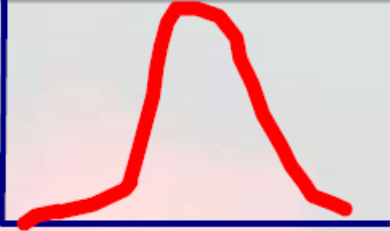
Conclusions

Action thermique définie sous feu normalisé



Type d'analyse	Valeur tabulée	Modèles de calcul simplifiés	Modèles de calcul avancés
Analyse par élément	Oui <u>Feu normalisé ISO-834</u>	Oui	Oui
Analyse de parties de la structure	Non applicable	Oui (si disponible)	Oui
Analyse globale de la structure	Non applicable	Non applicable	Oui

Conclusions

<input type="checkbox"/> Action thermique définie sous feu naturel			
Type d'analyse	Valeur tabulée	Modèles de calcul simplifiés	Modèles de calcul avancés
Analyse par élément	Non applicable	Oui (si disponible)	Oui
Analyse de parties de la structure	Non applicable	Non applicable	Oui
Analyse globale de la structure	Non applicable	Non applicable	Oui

Conclusions

Le calcul « avancé » et scénarios de feu naturel

Données

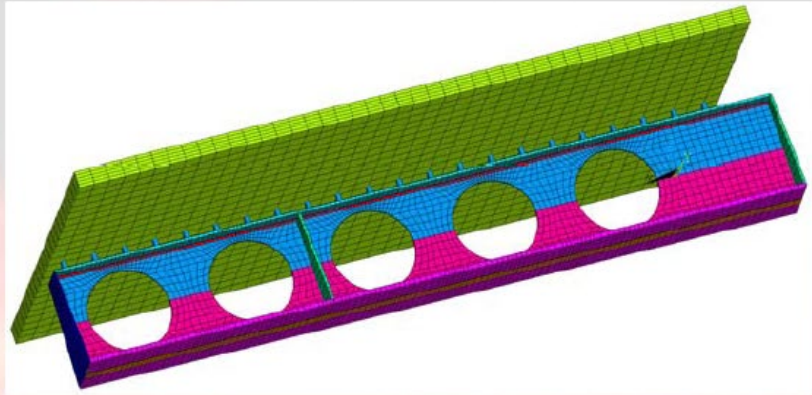
- Géométrie exacte des compartiments, y c. fenêtres
- Charges thermiques effectives des compartiments
- Mesures techniques et organisationnelles

Analyse

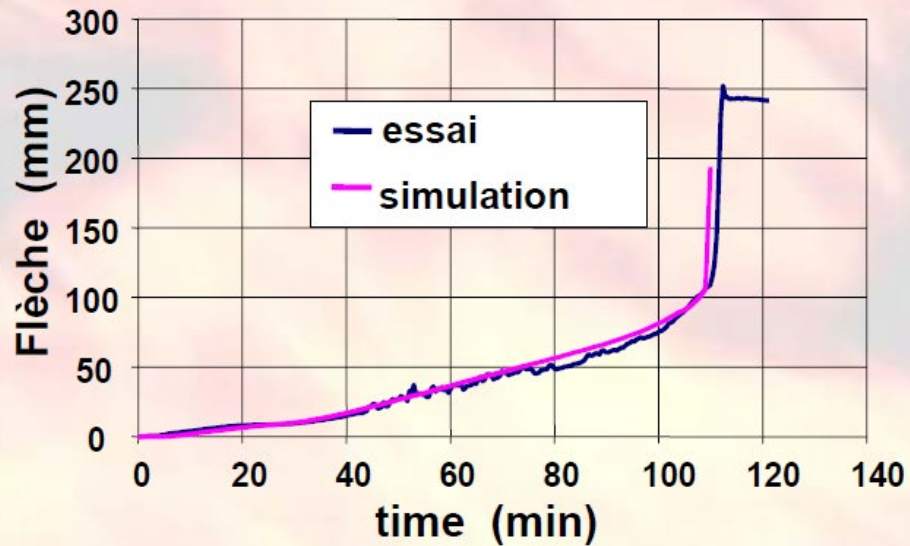
- Génération de scénarios en variant les variables (charge thermique, ouvertures, systèmes de détection)
- Réflexion sur les scénarios, en corrigeant les données
- Elimination de scénarios peu plausibles

Conclusions

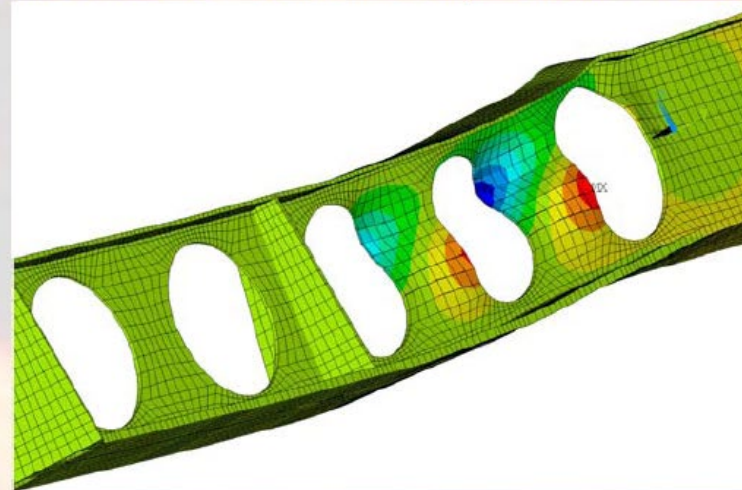
Calculs avancés – Modèles EF 3D en coques + essais



Mode de ruine expérimental



Comparaison simulation - essai



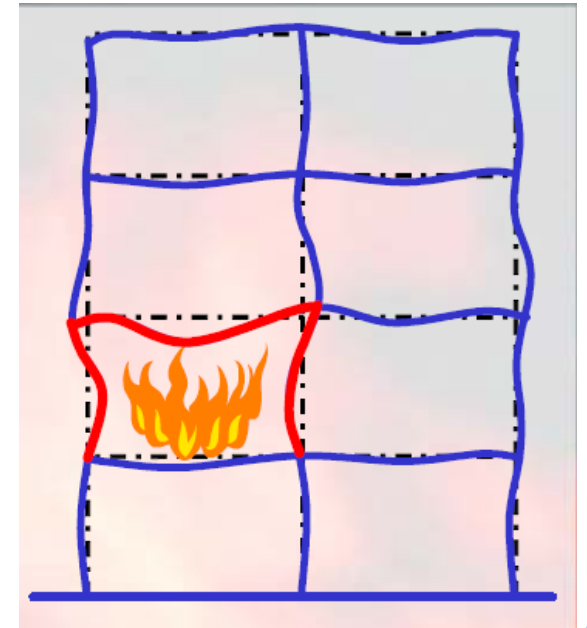
Mode de ruine simulé

Conclusions

Calcul avancés – Règles générales

- Nécessaire d'utiliser des modèles de calcul avancés
- Choix de la modélisation appropriée de la structure
- Conditions aux limites existantes
- Conditions de chargement
- Modèles de matériaux appropriés
- Conditions aux limites en relation avec la partie non modélisée de la structure

- Analyse des résultats et vérifications des critères de ruine
- Revue des aspects non traités dans l'analyse directe (consistance entre modèle numérique et détails constructifs)



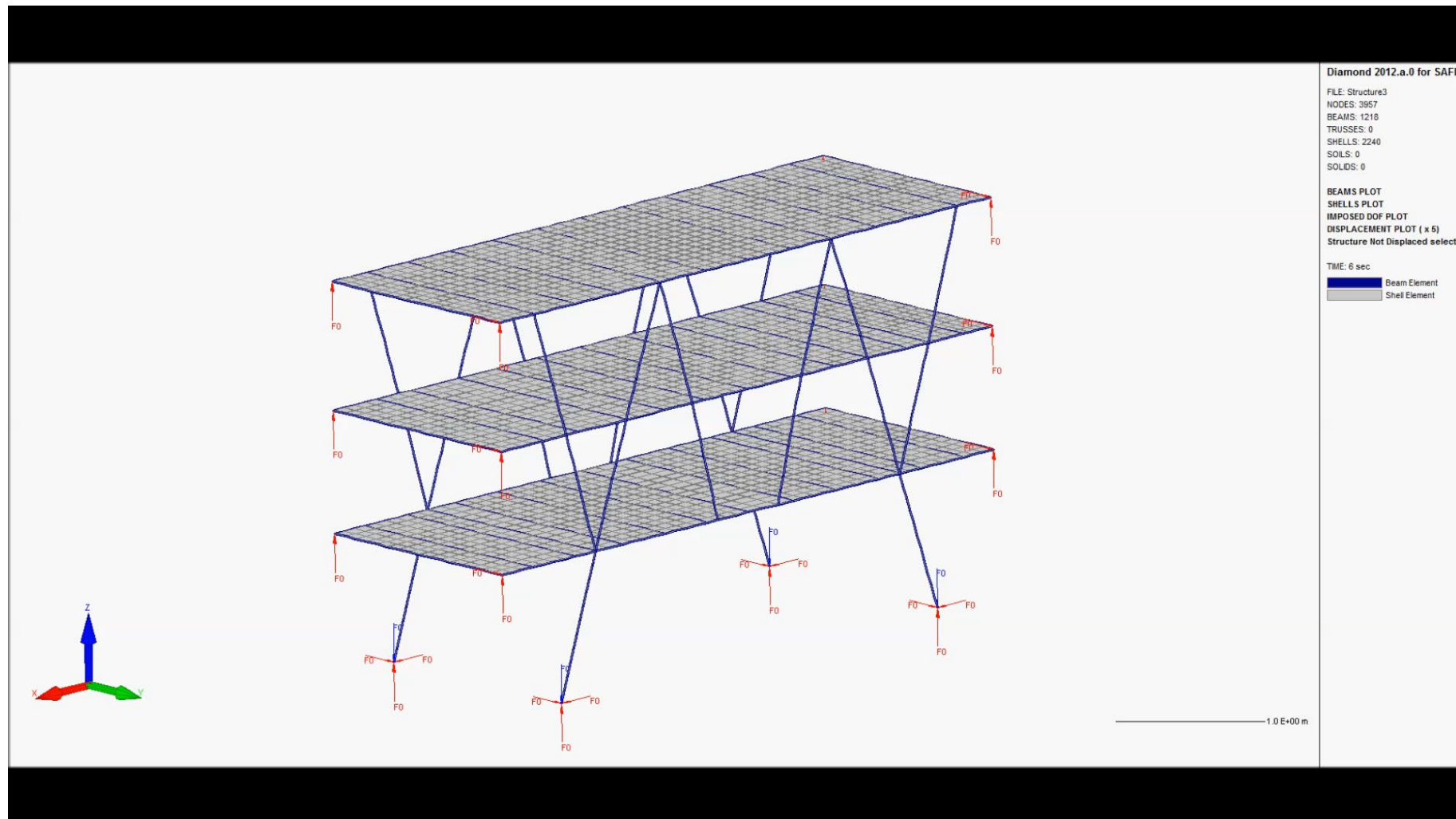
Conclusions

Modèles avancés - CFD



Conclusions

Modèles avancés - Safir



Conclusions

Sécurité incendie – Analyse économique

Calculs simplifiés Concept standard

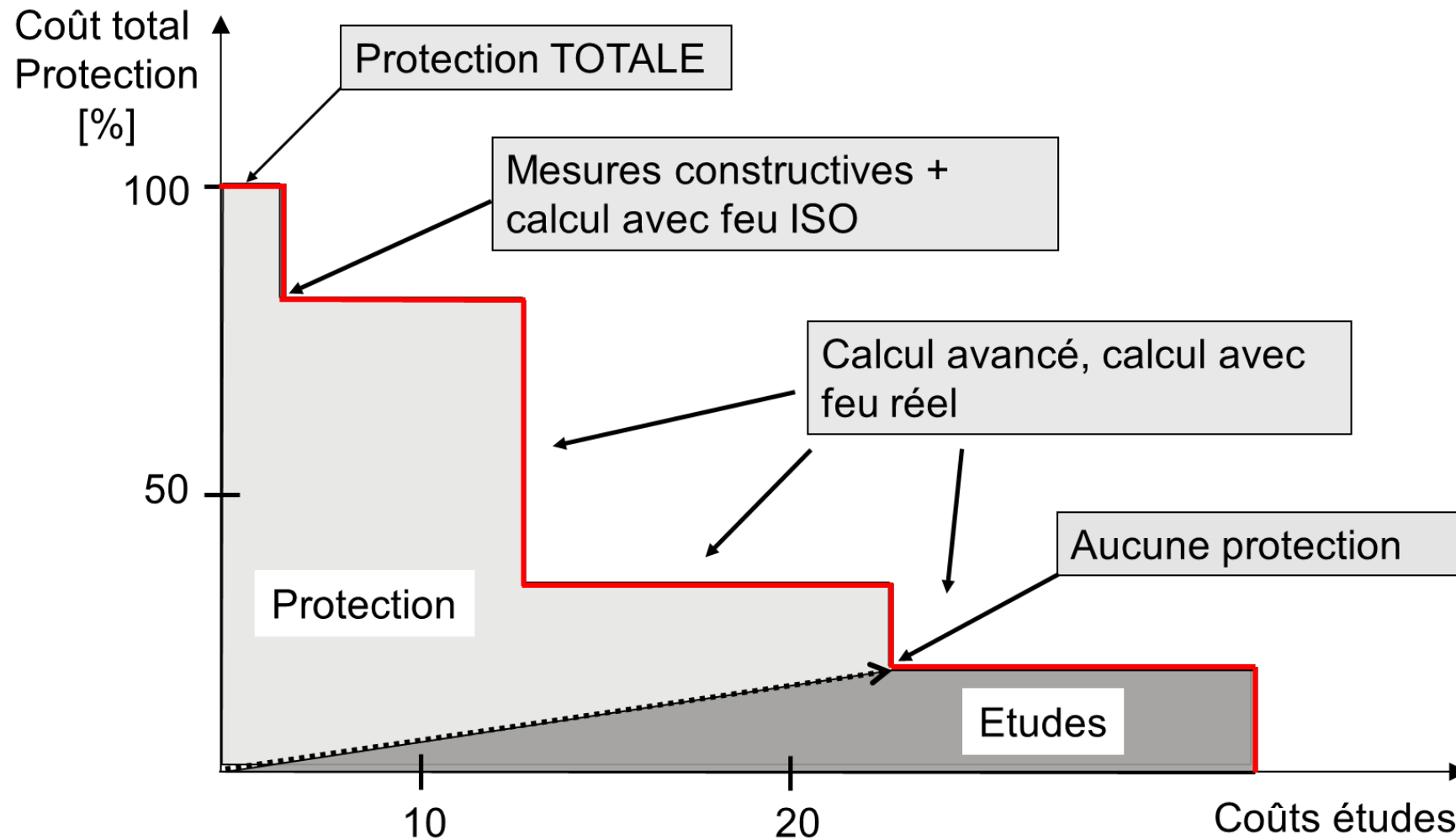
- Petits ouvrages
- Quelques éléments isolés (poutres, colonnes)
- R 30 / R 60
- Coût étude : faible
- Coût protection : jusqu'à 100 % du coût de la structure !

Calculs avancés Concept par ouvrage

- Ouvrages « importants »
- Mise en conformité
- On peut prouver R_{infini}
- Coût étude : 5 à 20 % de la protection totale
- Coût protection : 0 à 50 % de la protection totale

Conclusions

L'ingénierie incendie est-elle « rentable » ?



Conclusions

En résumé

- La résistance au feu n'est pas un obstacle à la construction en acier ou **à la rénovation !**
- Les moyens et méthodes (simples ou avancés) existent pour vérifier et/ou prouver la résistance des éléments
- Dans de nombreux cas à *charge thermique faible (habitations, bureaux)*, **la protection peut être évitée !**
- Domaine très complexe :
Ingénieur spécialisé = **ECONOMIES** pour le projet !

Bibliographie et sources

NORMES

SIA 260 Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses

SIA 261 Actions sur les structures porteuses

SIA 263 Construction en acier

SIA 264 Construction mixte acier-béton

SIA 265 Construction en bois

SN EN 1991-1-2 Eurocode 1 : Action sur les structures

Partie 1-2 : Actions générales – Actions sur les structures exposées au feu

SN EN 1993-1-2 Eurocode 3 – Calcul des structures en acier

Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu

SN EN 1993-1-8 Eurocode 3 – Assemblages

SN EN 1994-1-2 Eurocode 3 – Calcul des structures en acier

Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu

PUBLICATIONS

Protection incendie des structures – Steeldoc 02/06 – SZS

Table de dimensionnement pour la construction mixte C1/12 – SZS

AEAI – Prescription de protection incendie 2015

Bibliographie et sources

LIVRES

Fire Design of Steel Structures - Jean-Marc Franssen and Paulo Vila Real -ECCS: 2010

Membrane Action of Composite Structures in Case of Fire - Olivier Vassart and Bin Zhao - ECCS: 2013

Fluid Mechanics Aspects of Fire and Smoke Dynamics in Enclosures – Bart Merci and Tarek Beji – CRC Press: 2016

SITES INTERNET

AEAI - Association des Etablissements d'Assurance Incendie <http://www.praever.ch>

SZS : www.szs.ch

LIGNUM : www.lignum.ch

ACCESS STEEL guides et exemples de calcul <http://www.access-steel.com/>

ECCS *European Convention for Constructional Steelwork (ECCS)* <http://www.steelconstruct.com>

DIFISEK : *Dissemination of Fire Safety Engineering Knowledge*

<https://www.cticm.com/content/difisek-ingenierie-securite-incendie>

SECURE WITH STEEL

<http://sections.arcelormittal.com/network/partnerships/fire-safety-engineering.html>

NIST : *Building and Fire Research Laboratory's Fire Research Division at NIST*

<http://www.fire.nist.gov/>



DES QUESTIONS ?



Merci de votre attention