

COURS

CHAPITRE III

Calcul de l'Echauffement des structures en acier et mixte acier béton

Présenté par :
DIMIA Mohamed Salah

Option
Charpente métallique et mixte

Plan du cours

INTRODUCTION AU PROBLEME

Méthodes de calcul simplifiées

Principaux paramètres de calcul de l'échauffement des éléments en acier

Echauffement des éléments en acier non protégé

Echauffement des éléments en acier protégé

Méthodes de calcul avancées

Modèle de résistance au feu des structures en acier et mixte acier béton

VALEURS TABULÉES

MÉTHODES DE CALCUL SIMPLIFIÉES

MÉTHODES DE CALCUL AVANCÉES par logiciel

Applications

INTRODUCTION AU PROBLEME

L'échauffement des structures métalliques peut être déterminée soit à l'aide de formules analytiques pour les cas simples : méthodes de calcul simplifiées des parties feu des Eurocodes (intégration au cours du temps d'une équation différentielle), soit sur la base de méthodes de calcul avancées, fondées sur la théorie du transfert thermique et nécessitant l'utilisation de logiciels sophistiqués basés sur la méthodes des éléments finis ou des différences finies.
Cette exact au sein d'un élément.

Pour les éléments de structure mixte, la différence de conductivité thermique entre l'acier et le béton conduit généralement à d'importants gradients de température au sein de la section des éléments. Il est donc nécessaire de faire appel à des modèles de calcul avancés, basé sur la méthode des différences approche permet de traiter des cas d'échauffement plus complexes et de déterminer le champ de températures finies ou des éléments finis, pour pouvoir déterminer les champs de température bidimensionnels ou tridimensionnels dans ces éléments .

Méthodes de calcul simplifiées

Principaux paramètres de calcul de l'échauffement des éléments en acier

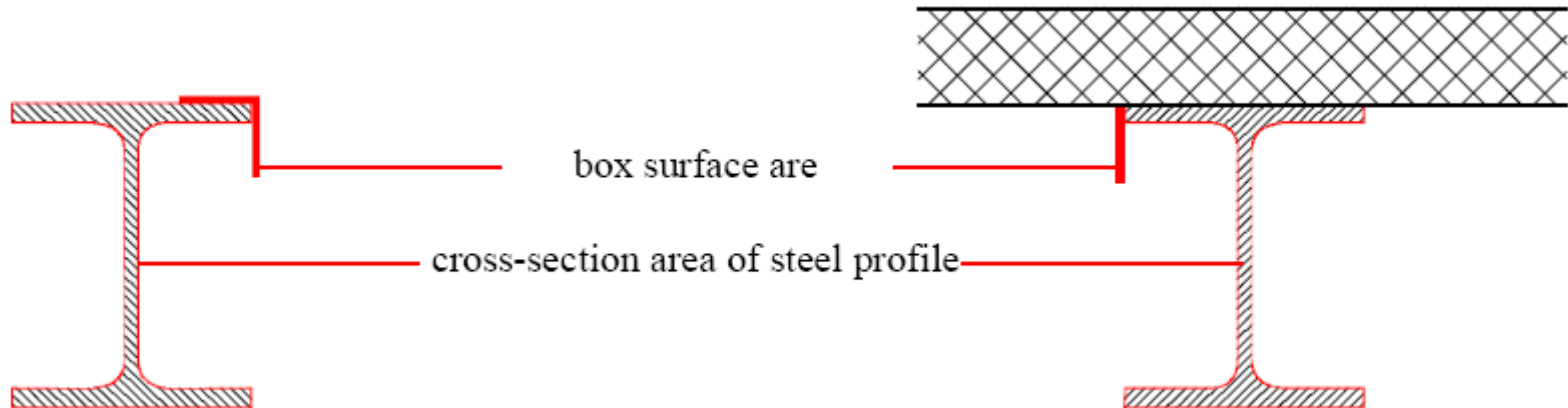
L'évolution de température dans un élément en acier dépend, pour certaines conditions de feu données, des deux paramètres de calcul suivants :

- le facteur de massivité A_m/V ou A_p/V (pour les éléments respectivement nus ou protégés) qui exprime le rapport entre la surface exposée au flux thermique et le volume de l'élément par unité de longueur (voir figures III-1 et III-2).
- Les propriétés thermiques d'une éventuelle protection, exprimées par sa conductivité thermique, λ_p , sa masse volumique ρ_p , sa chaleur spécifique c_p et son épaisseur d_p (seulement pour les éléments protégés)

Facteur de massivité A_m / V pour les éléments en acier non protégés

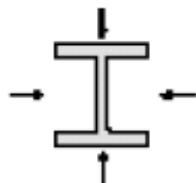
$$\left[\frac{A_m}{V} \right]_b = \frac{\text{box surface area per unit length}}{\text{volume of the member per unit length}} \quad \begin{array}{l} \text{La surface exposée au flux thermique} \\ \text{le volume de l'élément par unité de longueur} \end{array}$$

Section factor including shadow effect for I-sections: $\left[\frac{A_m}{V} \right]_{sh} = 0.9 \cdot \left[\frac{A_m}{V} \right]_b$

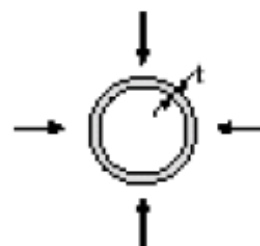


Section ouverte exposée au feu sur toutes les faces :

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{périmètre}}{\text{aire de section transversale}}$$

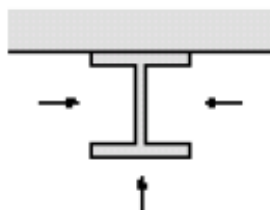


Tube exposé au feu sur toutes les faces :
 $A_m / V = 1 / t$



Section ouverte exposée au feu sur trois faces :

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{surface exposed to fire}}{\text{cross-section area}}$$



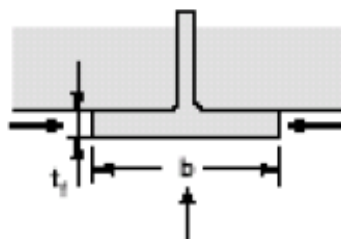
Profil creux (ou caisson soudé d'épaisseur constante) exposé au feu sur toutes les faces :
 Si $t \ll b$: $A_m / V \approx 1 / t$



Semelle de profilé en I exposée au feu sur trois faces :

$$A_m / V = (b + 2t_f) / (bt_f)$$

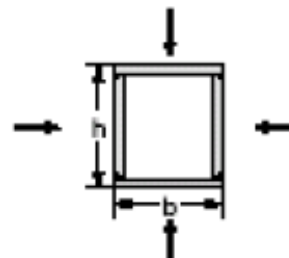
Si $t \ll b$: $A_m / V \approx 1 / t_f$



Caisson soudé exposé au feu sur toutes les faces :

$$\frac{A_m}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{aire de la section}}$$

Si $t \ll b$: $A_m / V \approx 1 / t$



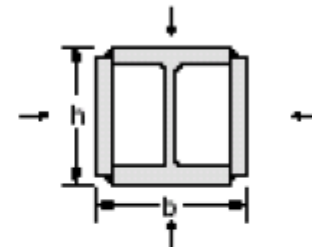
Cornière exposée au feu sur toutes les faces :

$$A_m / V = 2/t$$



Profilé en I avec renforts formant caisson, exposé au feu sur toutes les faces :

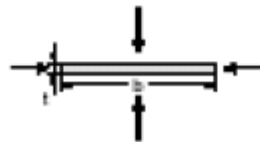
$$\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{aire de la section}}$$



Plat exposé au feu sur toutes les faces :

$$A_m / V = 2(b+t) / (bt)$$

Si $t \ll b : A_m / V \approx 2/t$




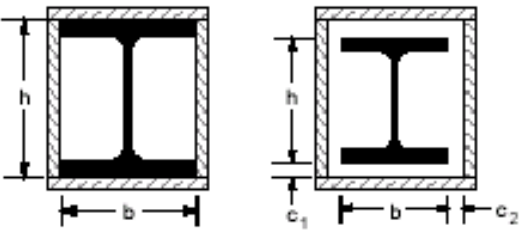
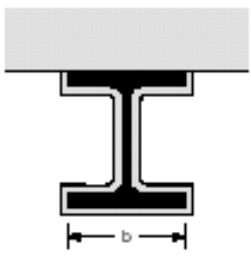
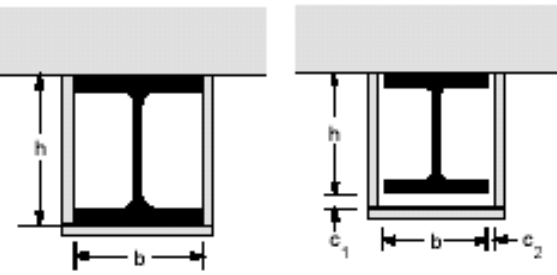
Plat exposé au feu sur trois faces :

$$A_m / V = (b+2t) / (bt)$$

Si $t \ll b : A_m / V \approx 1/t$



Facteur de massivité A_p / V pour les éléments en acier protégés

Schéma	Description	Facteur de massivité (A_p / V)
	Enrobage d'épaisseur constante	$\frac{\text{périmètre d'acier}}{\text{aire de la section d'acier}}$
	Caisson d'épaisseur constante ¹	$\frac{2(b + h)}{\text{aire de la section d'acier}}$
	Enrobage d'épaisseur constante, exposé au feu sur trois faces	$\frac{\text{périmètre d'acier} - b}{\text{aire de la section d'acier}}$
	Caisson d'épaisseur constante, exposé au feu sur trois faces ¹	$\frac{2h + b}{\text{aire de la section d'acier}}$

¹ Il convient normalement que les dimensions des espaces c_1 et c_2 ne dépassent pas $h/4$

Echauffement des éléments en acier non protégé

L'acier étant très conducteur, le champ de température au sein des éléments métalliques minces non protégés est souvent quasi-uniforme en section. L'évolution de la température dépend seulement de la sollicitation thermique (feu conventionnel, feu extérieur...) et du facteur de massivité de l'élément A_m/V et l'accroissement de température $\theta_{a,t}$ durant un intervalle de temps Dt peut être déterminé à partir de la relation suivante :

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t$$

où :

- k_{sh} est le facteur de correction pour l'effet d'ombre;
- A_m/V est le facteur de massivité du profilé métallique [m^{-1}];
- $c_a \rho_a$ est la chaleur spécifique de l'acier [J/m^3C];
- $\dot{h}_{net,d}$ est la valeur de calcul du flux thermique net [$W/m^2/K$]. Ce terme qui représente l'action thermique, dépend du modèle de feu utilisé (conditions de feu normalisé, de feu naturel) ;

Le flux thermique est exprimé à partir de la valeur de la température des gaz chauds, et est habituellement décomposé en la somme de deux flux distincts, à savoir :

une composante convective et une composante radiative.

En situation d'incendie, les deux modes de transmission de la chaleur (rayonnement et convection) sont cumulatifs. Le flux de chaleur net transmis à la surface de l'élément lors de son exposition au feu est défini par la relation :

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,r} + \dot{h}_{net,c}$$

Le flux de chaleur net radiatif, issu du bilan entre l'éclairement reçu par la surface exposée de l'élément et le flux radiatif émis par la surface de celui-ci, est défini par l'équation suivante :

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \sigma_0 \varepsilon_{rm} ((\theta_f + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4)$$

- ϕ est le facteur de forme (<1). Dans de nombreux cas pratique, le facteur de forme est pris égal à 1 ;
- ε_m est l'émissivité de paroi. Elle dépend du type de matériau appliqué à la surface. Pour l'acier, $\varepsilon_m = 1$;
- θ_f est la température du rayonnement à proximité de l'élément (°C) ;
- θ_m est la température de surface de l'élément (°C) ;
- σ_0 est la constante de BOLTZMANN ($5.68 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$) ;

Le flux de chaleur net convectif est défini par l'équation suivante :

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m)$$

où

- α_c est le coefficient de convection (W/m^2K). Il varie en pratique entre 25 (conditions de feu normalisé ISO) à 50 W/m^2K (condition de feu hydrocarbure) ;
- θ_g la température des gaz à proximité de l'élément ($^{\circ}C$) ;
- θ_m la température de surface de l'élément ($^{\circ}C$) ;

Le flux de chaleur net sur la surface exposée des éléments de structure dépend donc de deux paramètres : l'émissivité de paroi et le coefficient d'échange par convection h_c .

Pour les sections de type I sous conditions de feu nominal, l'effet d'ombre est décrit de façon raisonnable en prenant :

$$k_{sh} = [A_m/V]_{box} / [A_m/V]$$

où $[A_m/V]_{box}$ est la valeur en caisson du facteur de massivité.

Dans tous les autres cas, la valeur de k_{sh} doit être prise comme :

$$k_{sh} = [A_m/V]_{box} / [A_m/V]$$



Echauffement des éléments en acier protégé

L'équation pour évaluer l'évolution de température dans les structures en acier protégées est similaire à la relation donnée pour l'acier nu. Toutefois, dans ce cas, l'effet de la protection doit être pris en compte lors du calcul du flux thermique net.

La détermination de température atteinte par un élément métallique protégé selon l'Eurocode 3 partie 1.2 + DAN est réalisée par l'équation suivante :

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p / d_p}{c_a \rho_a} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \phi / 3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t - (e^{\phi / 10} - 1) \Delta\theta_{g,t}$$

avec

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V}$$

où

- A_p/V est le facteur de massiveté d'un élément isolé par un matériau de protection contre le feu ;
- A_p est la surface concernée de la protection par unité de longueur (m^2) ;
- V est le volume de l'élément par unité de longueur (m^3) ;
- C_a est la chaleur spécifique de l'acier ($J/kg/K$) ;
- C_p est la chaleur spécifique de la protection ($J/kg/K$) ;
- d_p est l'épaisseur de protection (m) ;
- $.t$ est l'intervalle de temps (s) ;
- $\theta_{a,t}$ est la température de l'acier au temps t ($^{\circ}C$) ;
- $\theta_{g,t}$ est la température des gaz au temps t ($^{\circ}C$) ;
- $\theta_{g,t}$ est l'augmentation de température pendant l'intervalle de temps $.t$ au temps t ($^{\circ}C$)
- λ_p est la conductivité thermique du matériau de protection ($W/m/K$) ;
- ρ_a est la masse volumique de l'acier (kg/m^3) ;
- ρ_p est la masse volumique du matériau de protection (kg/m^3) ;

Il convient de souligner que les caractéristiques des matériaux de protection sont Habituellement déterminées sous condition de feu normalisé. Elles sont donc en principe limitées à ces conditions. En effet, aucune information systématique n'est disponible pour décrire l'évolution de ces caractéristiques lorsque les conditions de feu sont considérablement différentes des conditions de feu normalisé. Aussi, l'application du concept de sécurité incendie basé sur le feu naturel pour vérifier la résistance au feu des structures en acier protégées doit être menée avec précaution.

En particulier, un tel calcul ne peut être effectué que si l'on dispose des données appropriées ou que l'on peut montrer que les conditions de feu n'ont pas d'effets significatifs sur les propriétés thermiques et sur l'intégrité des matériaux de protection. En particulier, il est important de s'assurer que les déformations d'un l'élément de structure exposé au feu ne conduiront pas à une détérioration prématurée de la protection rapportée sur cet élément

Tous les modèles numériques développés pour calculer la répartition et l'évolution de la température en tout point des éléments de structures soumis à l'incendie, font le plus souvent appel à la méthode **des différences finies** ou **la méthode des éléments finis**. Ils s'appliquent aux effets des incendies naturels et aux effets de l'incendie normalisé. Ils doivent prendre en compte les non linéarités liées à l'évolution des propriétés matérielles avec la température.

A l'intérieur des éléments homogènes tels que l'acier, la chaleur est uniquement transférée par conduction. Pour les matériaux poreux tels que le béton ou lorsqu'il existe des cavités à l'intérieur des éléments (vides), l'échange de chaleur est en principe beaucoup plus complexe : les trois phénomènes rayonnement, convection et conduction étant mis en cause simultanément, auquel s'ajoute le transferts de masse.

Sur les figures 1, 2 et 3, quelques illustrations pratiques sur la capacité des modèles de transfert thermique sont présentées.

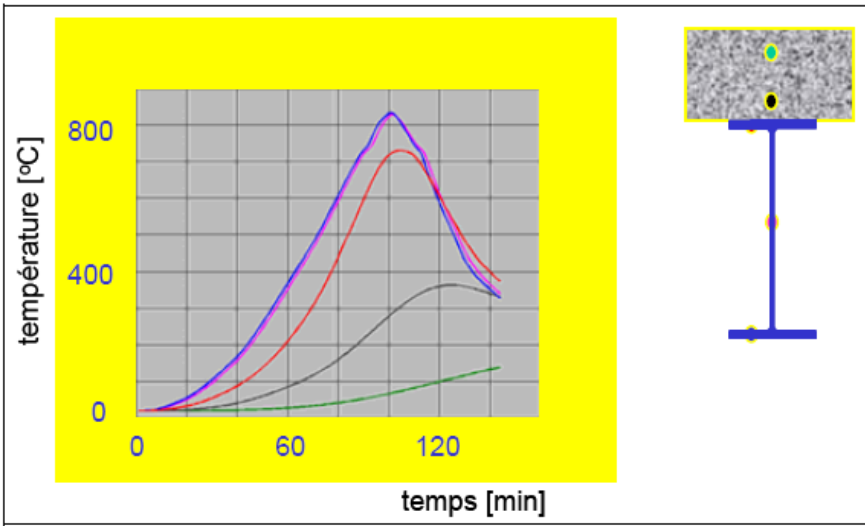


Figure 1: Transfert thermique : section mixte acier-béton

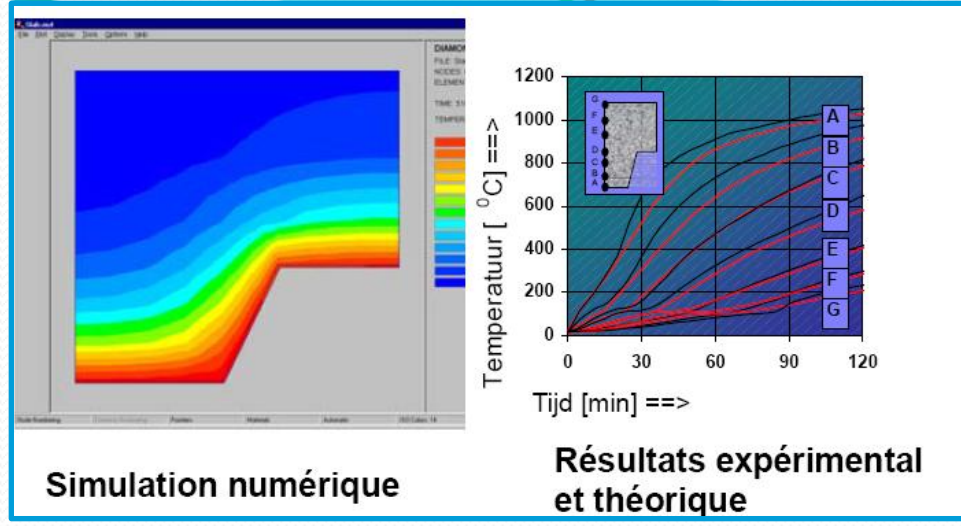


Figure 2: Transfert thermique (dalle mixte (2D))

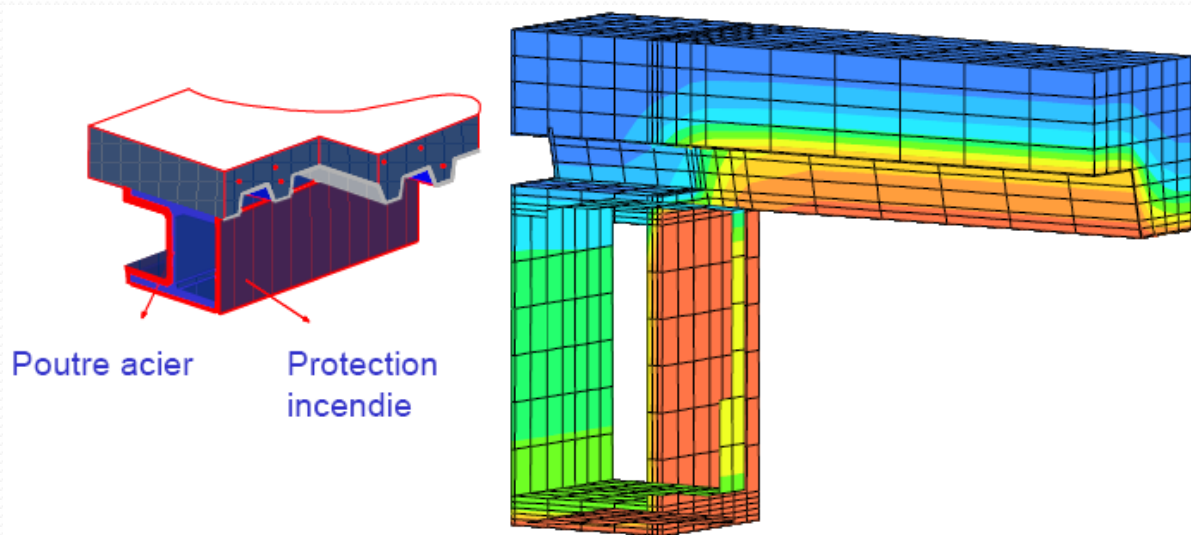
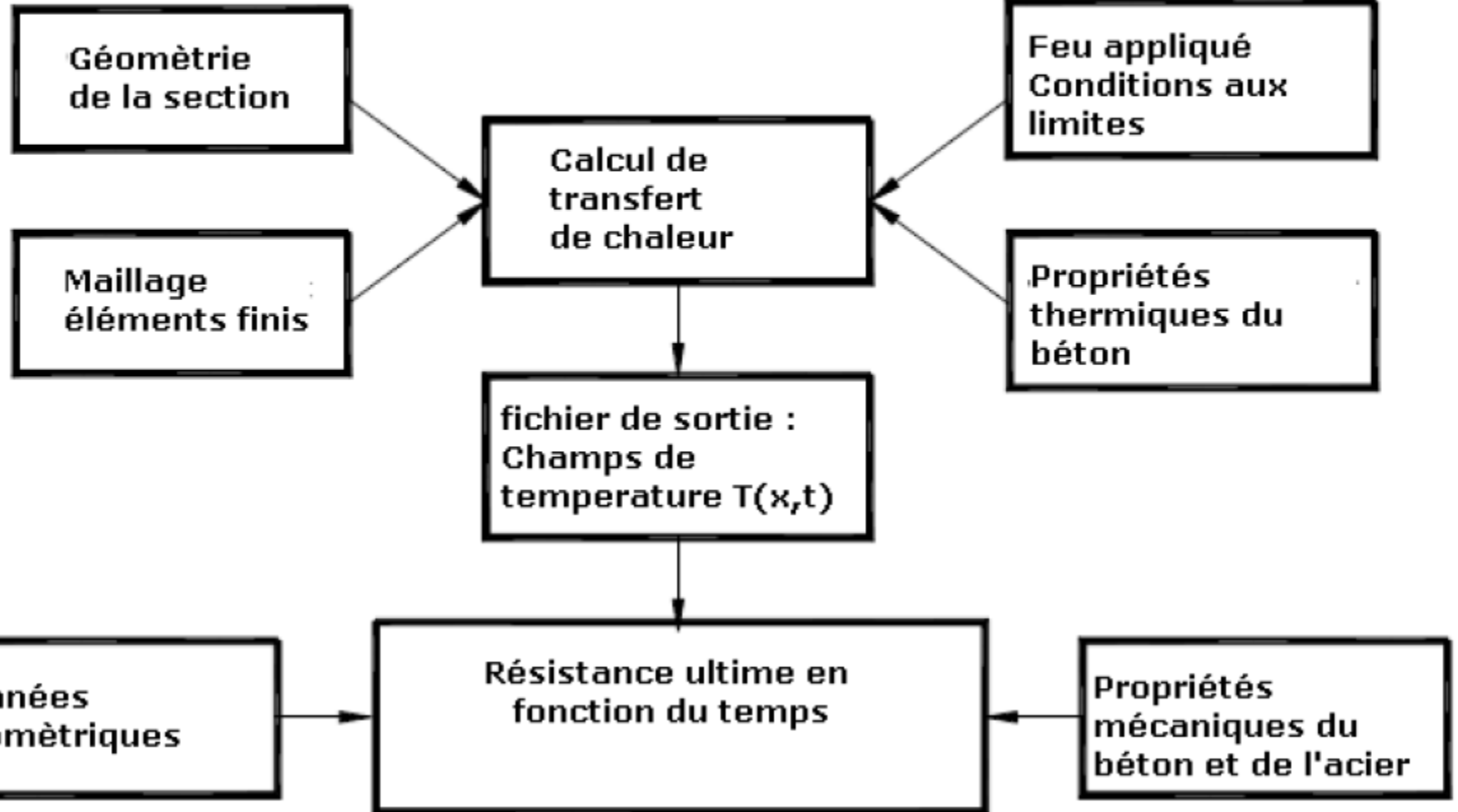


Figure 3: Transfert thermique d'une poutre mixte de rive (3D)

Entrees

Modèle numérique

Entrees





1 Introduction a l'analyse du comportement mécanique des structures en situation d'incendie



Lors d'un incendie, le comportement mécanique de la structure peut être considéré comme le dernier des différents événements successifs illustrés à la figure 1. Il constitue également un des plus importants impacts que puisse causer le feu aux structures de bâtiments.

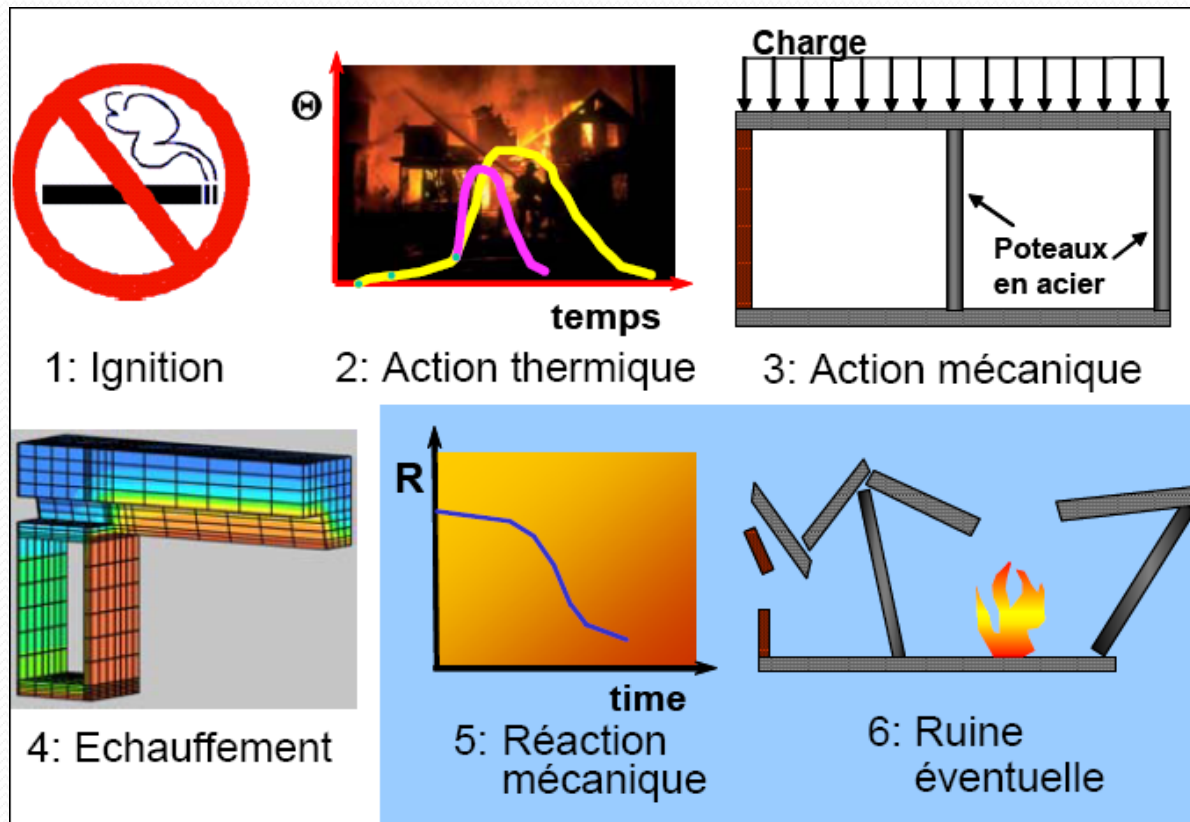


Figure 1: Résistance au feu – succession des événements

Il faut noter que le comportement mécanique d'une structure en situation d'incendie est directement lié à la manière dont elle se comporte une fois soumise au feu. En général, la réaction de la structure au feu peut être résumée comme suit (voir également figure 2) :

- ❑ montée en température induite par le transfert de chaleur provenant du feu, appelée également réponse thermique de la structure (pour plus de détail, voir partie 2) ;
- ❑ une fois la structure échauffée, elle se déforme en fonction d'un coefficient de dilatation thermique généralement positif ;
- ❑ en même temps, une montée importante en température conduira à l'adoucissement des matériaux et, par conséquent, à la perte à la fois de raideur et de résistance de la structure, créant ainsi une déformation additionnelle ;
- ❑ Lorsque la perte de raideur et de résistance devient telle que la structure n'est plus capable de supporter les charges appliquées, un effondrement d'une partie ou de l'ensemble de cette structure devient ainsi inévitable.

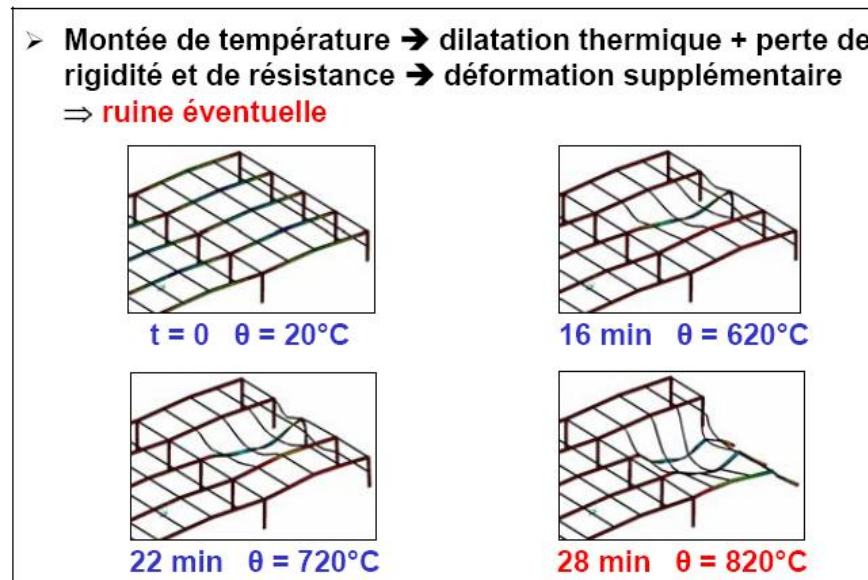


Figure 2 : Comment une structure réagit au feu

Dans l'ingénierie de la sécurité incendie actuelle, il existe deux approches majeures d'évaluation pour le comportement mécanique de la structure ou des éléments de la structure exposés au feu

- Les essais au feu sont et demeurent encore un moyen valable et parfois même incontournable pour obtenir la réponse mécanique des structures ou des éléments de structure.
- En parallèle, il est de plus en plus courant pour les ingénieurs de faire appel aux règles de calcul pour évaluer la performance mécanique des structures ou des éléments de structure soumis à l'incendie

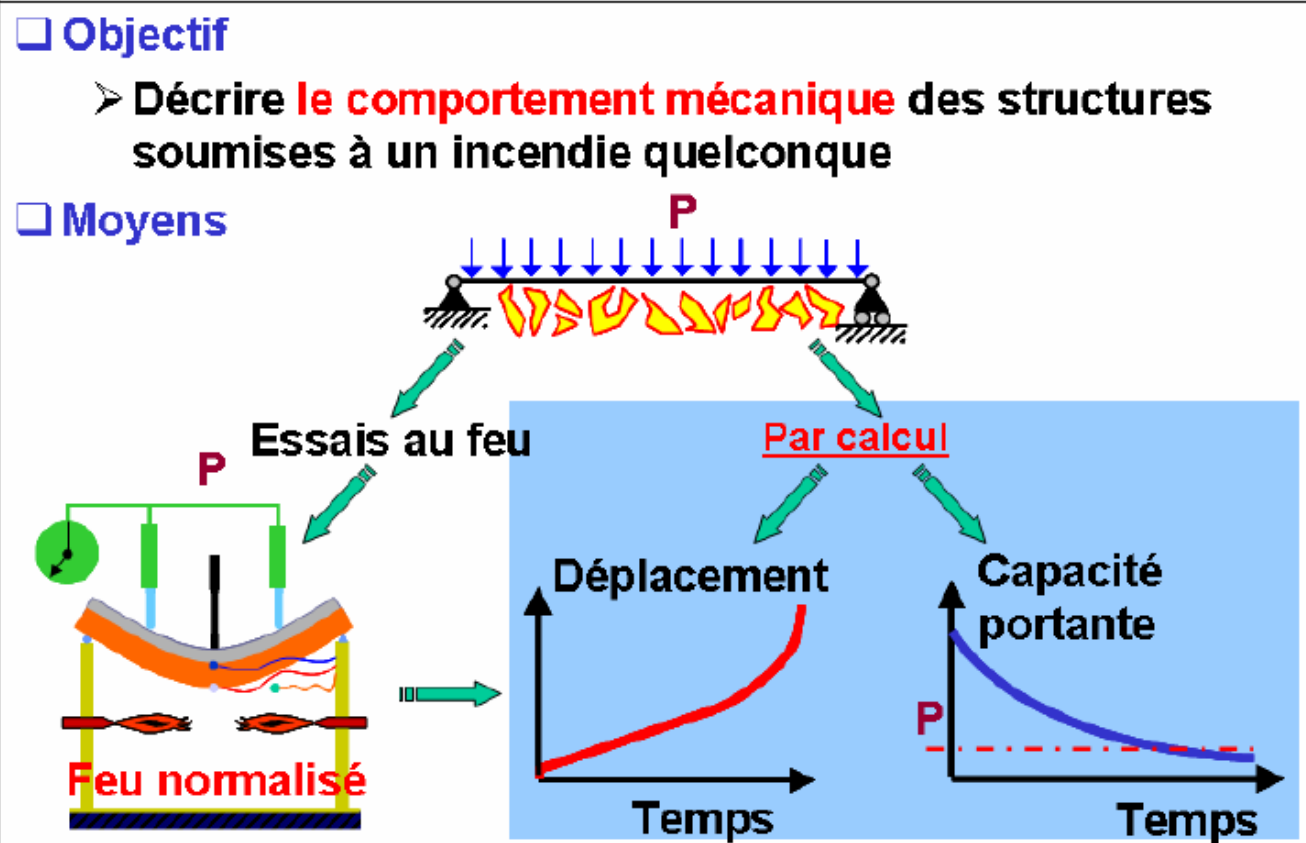


Figure 3 : Evaluation du comportement mécanique des structures en situation d'incendie

2.1 Aspects de base pour application des règles de calcul au feu vis-à-vis du comportement mécanique des structures en acier et mixtes

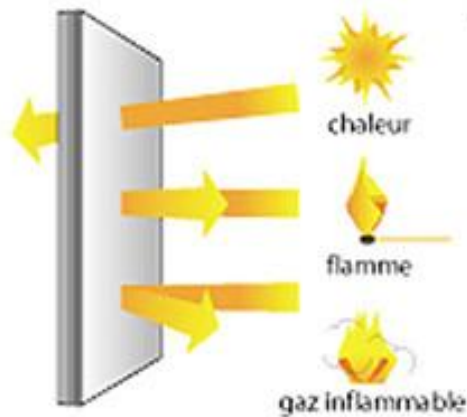
l'évaluation de leur comportement mécanique en situation d'incendie selon les règles de calcul des Eurocodes nécessite de bien maîtriser les connaissances suivantes :

- ✓ **En premier lieu, la détermination des charges mécaniques appropriées que peut subir une structure en acier ou mixte en situation d'incendie**
- ✓ **Deuxièmement, les propriétés des matériaux aux températures élevées, à savoir les relations contrainte-déformation, le module de rigidité, la résistance et la dilatation thermique en fonction de la température**
- ✓ **Troisièmement, les différentes possibilités d'analyse et leurs domaines d'application en relation avec non seulement les règles de calcul simplifiées, mais aussi avec les outils de calcul avancés**
- ✓ **Finalement, les points spécifiques, en particulier les dispositions constructives spéciales, la connexion des différents éléments de structure, etc, qui ne sont pas pris en compte directement par les règles de calcul au feu mais doivent être traités afin d'assurer un niveau suffisant de sécurité incendie**

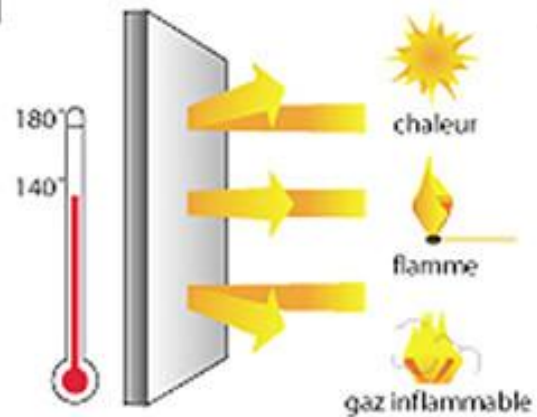
SF Stable au feu
cloison non porteuse



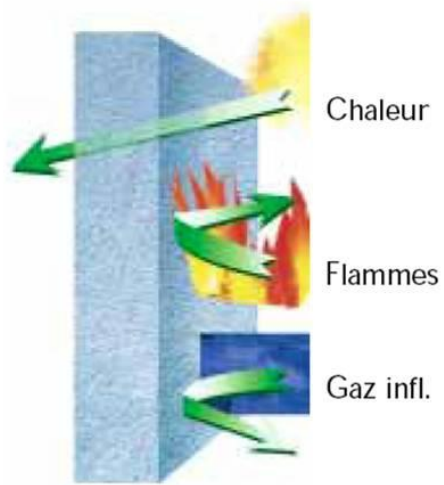
PF Pare-flammes
cloison non porteuse



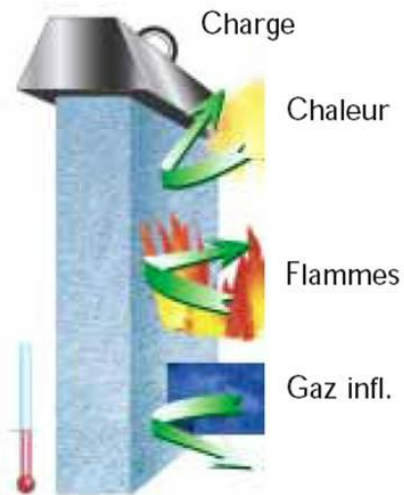
CF Coupe-feu
cloison non porteuse



SF



SF + PF



SF + PF + CF