

République Algérienne Démocratique et Populaire  
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



**Ecole Nationale Supérieure des  
Travaux Publics**

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Code : .....

# Projet de Fin d'Études

Pour l'Obtention du Diplôme  
Master des Travaux Publics  
Option Matériaux et Structures

## Thème

Comportement au feu des structures  
métalliques selon l'Eurocode 3

Proposé par :

ENSTP

Encadreur :

BOUKEZZI Yamina

Présenté par :

Rebai Mohamed Amine

**Promotion 2015**

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# DEDICACE

احمدك ربي حمدا يليق بجلال وجهك و عظيم سلطانك.

الى التي سئل عنها رسول الله صلى الله عليه وسلم فقيل له: يا رسول الله، من احق الناس بحسن صحابتي؟ قال (امك)، قال: ثم من؟ قال: (ثم امك)، قال: ثم من؟ قال: (ثم امك)، قال: ثم من؟ قال: (ثم ابوك). و سئل رجل عبد الله بن عمر رضي الله عنهما عنها فقال: حملت امي على رقبتني من خرسان حتى قضيت بها المناسك. اتراني جزيتها قال: (لا، ولا طلاقة من طلقاتها) الوالدة العزيزة الغالية.

الى الذي قال عنه رسول الله صلى الله عليه وسلم: (انت و مالك لا بيك) . و قال عنه ايضا: (لا يجزي ولدَ والدا الى ان يجده مملوكا فيشتريه فيعتقه) الوالد الغالي .

*je dédie ce modeste travail :*

*À ceux que j'aime et que j'adore :*

*À Mes chères parents*

*À Ma chère sœur Bato*

*À toute la famille REBAI*


*À tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la  
réalisation de cette mémoire.*

*À vous... Enfin, à tous ceux qui m'aiment de près et de loin.*

MERCI

Med Amine

## Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier dieu de  me avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Comme guise de reconnaissance, j'adresse mes sincères remerciements, à ma promotrice Madame BOUKÉZZI Yamina, pour son aide, ses encouragements et à l'aide précieuse qu'il m'a apporté en faisant profiter largement des ses connaissances. Je ne serais oublier sa constante disponibilité.

J'E cite nommément :

- A tout le personnel de l'ENSTP, qui m'ai aidé et enrichi mes connaissances.
- J'E tiens également à remercier l'ensemble des étudiants de l'ENSTP pour toutes les informations qu'ils ont apporté à mon travail. Durant les cinq ans de notre formation.
- Aux personnes de la bibliothèque.
- mes remerciements s'adressent, également, aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Enfin, mes plus vifs remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui m'ai aidé, encourager et m'ai soutenu.

Amine

# Table de matière

	Pages
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	1
Introduction Générale	1
<b>CHAPITRE I GENERALITE SUR LE FEU</b>	4
Introduction	4
I.1 Terminologie feu et incendie	4
I.2 Déroulement d'un incendie	5
I.2.1 Le triangle du feu	5
I.2.2 Le développement d'un incendie	6
I.3 Modélisation d'un incendie	8
I.3.1 Courbes nominales	8
I.3.1.1 Courbe feu normalisé ISO 834	8
I.3.1.2 Courbe de feu hydrocarbure	10
I.3.1.3 Courbe de feu extérieur	11
I.3.2 Courbes de feu paramétrique	11
I.3.3 Modèles de zone	13
I.3.4 Modèles CFD	15
I.4 Principaux facteurs influençant l'évolution des températures dans un local	15
I.4.1 Influence de la charge combustible et de la Ventilation	15
I.4.2. Caractéristiques thermiques des parois	17
I.5 Prévention et protection	17
I.5.1 Prévention active	18
I.5.2 Prévention passive	18
I.6 Les Eurocodes feu	22
Conclusion	24
<b>CHAPITRE II COMPORTEMENT MECANIQUE ET THERMIQUE AU FEU DE L'ACIER</b>	25
Introduction	25
II.1 Introduction à l'analyse du comportement mécanique des structures en situation d'incendie	25
II.2 Principes généraux d'application du calcul au feu des structures en acier	27
II.2.1 Aspects de base pour application des règles de calcul au feu vis-à-vis du comportement mécanique des structures en acier	29
II.2.2 Actions pour l'analyse mécanique – combinaison	27
II.3 Actions pour l'analyse thermique	30
II.3.1 Règles générales	30

II.3.2	Échauffement de l'acier	32
II.3.2.1	Structures intérieures en acier non protégées	32
II.3.2.2	Structures intérieures en acier isolées avec un matériau de protection contre le feu	34
II.3.3	Courbes nominales température/temps	35
II.4	Caractéristiques mécaniques et thermiques de l'acier	36
II.4.1	Caractéristiques mécaniques de l'acier	36
II.4.1.1	Résistance et propriétés de déformation	36
II.4.1.2	Masse volumique	38
II.4.2	Caractéristiques thermiques de l'acier	38
II.4.2.1	Dilatation thermique de l'acier	38
II.4.2.2	Chaleur spécifique de l'acier	39
II.4.2.3	Conductivité thermique de l'acier	40
	Conclusion	41
<b>CHAPITRE III</b>	<b>METHODES ET OUTILS DE CALCUL DES STRUCTURES EN SITUATION D'INCENDIE</b>	<b>42</b>
	Introduction	42
III.1	Analyse de la résistance au feu	42
III.2	Sollicitations thermiques	42
III.3	La réponse thermique	43
III.3.1	Structures en acier nus	43
III.3.1.	Structure en acier protégée	43
III.4	Le comportement mécanique	44
III.5	Approches d'analyse pour le comportement mécanique	45
III.6	Méthodes de calcul pour les éléments en acier en acier en situation d'incendie	46
III.6.1	Modèles de calcul simplifiés	49
III.6.1.1	Méthode de la température critique	49
III.6.1.2	Méthode simplifiée	52
III.6.2	Modèles de calcul avancé	55
III.7	Les outils de calcul	56
III.7.1	Modèles Thermiques d'Incendie	57
III 7.1.1	Modèles simplifiés	57
III 7.1.2	Modèles avancés	58
III 7.2	Modèle de résistance au feu des structures	58
III 7.2.1	Modèles simplifiés de résistance au feu des structures	58
III 7.2.2	Modèles avancés de résistance au feu	59
	Conclusion	60

<b>CHAPITRE IV</b>	<b>ETUDE PARAMETRIQUE</b>	<b>61</b>
	Introduction	61
	IV.1 Logiciel de calcul	61
	IV.1.1 Logiciel Ozone	61
	IV.1.2 Logiciel A3C	63
	IV.2 Etude paramétrique	67
	IV.2.1 Evolution de la température de deux éléments non protégé utilisant la courbe standard ISO 834	67
	IV.2.2 Evolution de la température en fonction de «Am/v » pour les différentes résistances R5, R15, R30	68
	IV.2.3 Influence de la position des colonnes dans une structure sur la température critique de l'acier	69
	IV.2.4 Influence du matériau de protection et les côtés exposés au feu sur la température de l'acier	70
	IV.2.5 Influence de l'épaisseur du produit de protection sur la stabilité au feu de l'élément en acier	72
	IV.2.6 Influence de la longueur de flambement sur la résistance ultime au feu ( $N_{b,fi,t,rd}$ )	74
	IV.2.7 Influence de la nuance d'acier sur la résistance ultime au feu	75
	IV.2.8 Influence du taux de chargement sur la température critique	76
	Conclusion	77
	<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>78</b>

# Liste Des Tableaux

	Pages
Tableau I.1 valeurs température – temps pour la courbe ISO834	9
Tableau I.2 Charges calorifiques d'activités types	15
Tableau II.1 Valeurs recommandées des facteurs $\psi$ pour les bâtiments	28
Tableau II.2 Facteur de massivité $A_m/V$ pour des éléments en acier non protégés	33
Tableau II.3 Facteur de massivité d'éléments en acier isolés par un matériau de protection contre le feu	35
Tableau II.4 Facteurs de réduction pour les relations contrainte-déformation de l'acier au carbone aux températures élevées	37
Tableau II.5 Expressions mathématiques pour la dilatation thermique relative à l'acier	39
Tableau II.6 les valeurs de Chaleur spécifique de l'acier en fonction de température	40
Tableau II.7 les valeurs de Conductivité thermique de l'acier en fonction de température	41
Tableau III.1 Domaine d'application des différentes méthodes de calcul en situation de feu nominal (normalisé)[	48
Tableau III.2 Domaine d'application des différentes méthodes de calcul sous condition de feu naturel	49
Tableau III.3 Exemple des logiciels des modèles simplifiés	57
Tableau III.4 Exemple des logiciels des modèles avancés	58
Tableau III.5 Exemple des logiciels des modèles simplifiés	58
Tableau III.6 Exemple des logiciels des modèles avancés	59

# Liste Des Figures

	Pages
Figure I.1 triangle du feu	6
Figure I.2 phases de développement d'un incendie	7
Figure I.3 courbe nominale du feu conventionnel ISO834	9
Figure I.4 Feu naturel et feu conventionnel	10
Figure I.5 Courbes d'incendies nominaux	12
Figure I.6 Compartiment dans un modèle une zone	13
Figure I.7 Compartiment dans un modèle à deux zones	14
Figure I.8 Influence des conditions de ventilation du local sur le développement de l'incendie	16
Figure I.9 Influence de la charge combustible sur le développement de l'incendie	16
Figure I.10 Acier protégé par des peintures intumescentes	19
Figure I.11 Exemple d'un poteau intégré dans des cloisons	20
Figure I.12 Exemple d'un plafond suspendu	20
Figure I.13 Exemple d'un poteau intégré à la maçonnerie	20
Figure I.14 Exemple d'un poteau partiellement protégé par de la maçonnerie	21
Figure I.15 Exemple d'une protection à l'aide de produits en plaques	21
Figure I.16 Exemple d'un Produit projeté	22
Figure II.1 Réaction au feu d'une structure	26
Figure II.2 Evaluation du comportement mécanique des structures en situation	26
Figure II.3 Variation du coefficient de réduction $\eta_{fi}$ avec le rapport de charges	29
Figure II.4 Relations contrainte-déformation pour l'acier au carbone aux températures élevées	36
Figure II.5 Facteurs de réduction pour la relation contrainte-déformation de l'acier à des températures élevées	37
Figure II.6 Dilatation thermique de l'acier	39
Figure II.7 Chaleur spécifique de l'acier au carbone, en fonction de la température	40
Figure II.8 Conductivité thermique de l'acier au carbone en fonction de la température	41
Figure III.1 Différentes approches d'analyse pour le comportement mécanique des structures en situation d'incendie	45
Figure III.2 Comparaison de différentes approches d'analyse pour le comportement mécanique des structures en situation d'incendie	46
Figure III.3 diagramme de la méthode simplifiée	47
Figure III.4 Principe d'application de la méthode de la température critique	51
Figure III.5 Longueurs de flambement $l_{fi}$ de poteaux d'ossatures contreventées	55

Figure IV.1 l'interface d'OZone	62
Figure IV.2 l'interface de A3C	66
Figure IV.3 Évolution de la température de deux éléments non protégés en fonction de temps	67
Figure IV.4 Evolution de la température en fonction de Am/v pour 5, 15 et 30 min	68
Figure IV.5 évolution de la température critique en fonction du positionnement des colonnes.	69
Figure IV.6 élément exposé sur 4 et 3 cotés	70
Figure IV.7 Influence du produit de protection et le nombre de faces exposées au feu sur l'évolution de la température	71
Figure IV.8 Influence de l'épaisseur de protection sur la température de l'acier	73
Figure IV.9 Influence de la longueur de flambement sur la résistance au feu ( $N_{b,fi,t,rd}$ )	74
Figure IV.10 Influence de la nuance d'acier sur la résistance ultime au feu ( $N_{b,fi,t,rd}$ )	75
Figure IV.11 Influence du taux de chargement sur la température critique	76

# Liste Des Symboles

$\theta_g$	température des gaz dans le compartiment en °C au temps t
t	temps en minutes
A	surface de l'ouverture (m <sup>2</sup> )
F <sub>v</sub>	Facteur de ventilation
h	hauteur de l'ouverture de ventilation (m)
A <sub>t</sub>	surface totale des parois du local (m <sup>2</sup> )
<b>G</b> <sub>k,j</sub>	valeur caractéristique de l'action permanente
<b>Q</b> <sub>k,1</sub>	valeur caractéristique de l'action variable principale
<b>Q</b> <sub>k,i</sub>	valeur caractéristique de l'action d'accompagnement
ψ <sub>1,1</sub>	coefficient de combinaison pour la valeur fréquente d'une action variable
ψ <sub>2,i</sub>	coefficient de combinaison pour la valeur quasi-permanente d'une action variable
η <sub>fi,t</sub>	Niveau de chargement
<b>E</b> <sub>d</sub>	l'effet de calcul des actions pour le dimensionnement à froid
<b>E</b> <sub>fi,d</sub>	l'effet de calcul des actions pour la situation d'incendie.
γ <sub>Q,1</sub>	est le coefficient partiel pour l'action variable dominante
γ <sub>G</sub>	le coefficient partiel pour l'action permanente égale en général à la valeur de 1
<b>R</b> <sub>d</sub>	est la résistance de calcul pour le dimensionnement à température normale
<i>h</i> <sub>net</sub>	Le flux de chaleur net [W/m <sup>2</sup> ]
Φ	est le facteur de forme
ε <sub>res</sub>	est l'émissivité résultante
Θ <sub>r</sub>	est la température du rayonnement à proximité de l'élément [°C]
Θ <sub>m</sub>	est la température de la surface de l'élément [°C]
ε <sub>f</sub>	est l'émissivité correspondant au compartiment de feu, généralement égale à 0,8
ε <sub>m</sub>	est l'émissivité concernant la surface du matériau, il convient de la prendre égale à 0.7
α <sub>c</sub>	est le coefficient de transfert thermique par convection [W/m <sup>2</sup> K]
Θ <sub>g</sub>	est la température des gaz à proximité de l'élément selon l'exposition au feu [°C]
Θ <sub>m</sub>	est la température de surface de l'élément [°C]
A <sub>m/v</sub>	Facteur de massiveté pour l'élément non protégé
A <sub>m</sub>	est la surface exposée de l'élément par unité de longueur
V	est le volume de l'élément par unité de longueur
C <sub>a</sub>	est la chaleur spécifique de l'acier, [J/kgK]
<i>h</i> <sub>net,d</sub>	est la valeur de calcul du flux thermique net par unité de surface [W/m <sup>2</sup> ]
Δt	est l'intervalle de temps [s]
ρ <sub>a</sub>	est la masse volumique de l'acier [kg/m <sup>3</sup> ]
A <sub>p/V</sub>	est le facteur de massivité pour l'élément en acier isolé par un matériau de protection contre le feu
A <sub>p</sub>	est la surface concernée de la protection contre le feu par unité de longueur d'élément.
C <sub>p</sub>	est la chaleur spécifique du matériau de protection contre le feu [J/kgK].
d <sub>p</sub>	est l'épaisseur du matériau de protection contre le feu [m].
θ <sub>a,t</sub>	est la température de l'acier au temps t.

$\theta_{g,t}$	est la température ambiante des gaz au temps $t$
$\Delta\theta_{g,t}$	est l'augmentation de la température ambiante des gaz pendant l'intervalle temps $\Delta t$ .
$\lambda_p$	est la conductivité thermique du matériau de protection contre le feu [W/mK].
$\rho_a$	est la masse volumique de l'acier [kg/m <sup>3</sup> ].
$\rho_p$	est la masse volumique du matériau de protection contre l'incendie [kg/m <sup>3</sup> ].
$k_{y,0}$	limite d'élasticité efficace
$k_{p,0}$	limite de proportionnalité
$k_{E,0}$	pente du domaine linéaire élastique
$f_{y,0}$	limite d'élasticité efficace
$f_{p,0}$	limite de proportionnalité
$E_{a,0}$	pente du domaine élastique linéaire
$\epsilon_{p,0}$	déformation à la limite de proportionnalité
$\epsilon_{y,0}$	déformation plastique
$\epsilon_{t,0}$	déformation limite en élasticité
$\epsilon_{u,0}$	déformation ultime
$l$	est la longueur de l'élément à 20°C
$\Delta l$	est l'allongement de l'élément dû à la température
$\theta_a$	est la température de l'acier °C
$c$	La chaleur spécifique
$\lambda$	conductivité thermique
$R_{fi,d,0}$	La résistance de calcul en cas d'incendie au temps $t = 0$ .
$\chi_{fi}$	est le facteur de réduction pour le flambement par flexion en situation d'incendie de calcul
$k_{y,0,max}$	est le facteur de réduction donné en 3.2.1 pour la limite d'élasticité de l'acier, à la température maximale de l'acier $\theta_{a,max}$ atteinte au temps $t$
$l_{fi}$	la longueur de flambement
$\lambda_{0,max}$	l'élancement réduit
$k_{E,0,max}$	est le facteur de réduction donné en 3.2.1 [EC3 1-2] pour la pente du domaine élastique linéaire, à la température maximale de l'acier $\theta_{a,max}$ atteinte au temps
$N_{fi,Ed}$	effort axial sollicitant de calcul en situation d'incendie
$N_{fi,0,rd}$	résistance au feu de calcul à la température $\theta$
$V_{fi,Ed}$	effort tranchant sollicitant de calcul en situation d'incendie
$M_{fi,0,Rd}$	moment résistant de calcul à la température $\theta$
$\chi_{fi}$	facteur de réduction pour le flambement par flexion dans le calcul à l'incendie
$k_{y,0}$	facteur de réduction de la limite d'élasticité $f_y$ de l'acier à la température $\theta$
$k_{p0,2,0}$	est le facteur de réduction de la limite d'élasticité $f_y$ de l'acier à la température $\theta$
$A$	aire de la section transversale
$A_{eff}$	aire efficace de la section transversale
$\gamma_{M,fi}$	coefficient partiel de sécurité en situation incendie
$M_{cr}$	Le moment critique de déversement élastique
$\mu_0$	taux d'utilisation au temps $t = 0$
$\eta_{fi}$	facteur de réduction du niveau de chargement de calcul en situation d'incendie

## Définitions

**Convection  $\alpha_c$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]:** Coefficient relatif au flux thermique entrant par convection dans l'élément en fonction de la différence entre la température des gaz entourant la surface concernée de l'élément et la température de cette surface.

**Emissivité  $\epsilon_{\text{res}}$ [-]:** Rapport entre le flux thermique rayonnant effectif sur l'élément et le flux thermique net qui se produirait si l'élément et son environnement rayonnant étaient considérés comme des corps noirs.

**Flux thermique  $h_{\text{net}}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]:** Énergie absorbée par les éléments par unité de temps et de surface.

**Réponse mécanique :** Les méthodes de calcul avancées pour la réponse mécanique doivent être fondées sur les principes reconnus et les hypothèses de la théorie de la mécanique des structures, prenant en compte les variations des propriétés mécaniques avec la température.

Les effets des contraintes et déformations thermiques, dues tant à l'accroissement de température qu'aux gradients de température, doivent être pris en compte.

Lorsqu'il y a lieu, le modèle de réponse mécanique doit également tenir compte des points suivants

- effets combinés des actions mécaniques, des imperfections géométriques et des actions thermiques
- propriétés mécaniques du matériau dépendant de la température
- effets de non linéarité géométrique
- effets de non linéarité des propriétés des matériaux, incluant les effets bénéfiques du chargement et du déchargement sur la raideur des structures.

### **Réponse thermique :**

Les méthodes de calcul avancées pour la réponse thermique doivent être fondées sur les principes reconnus et les hypothèses de la théorie du transfert thermique.

Le modèle de réponse thermique doit prendre en considération :

- les actions thermiques concernées spécifiées dans l'ENV 1991-2-2 ;
- la variation avec la température des propriétés thermiques des matériaux

Les effets d'une exposition non uniforme à la chaleur et du transfert thermique vers des composants adjacents du bâtiment, peuvent être pris en compte quand il y a lieu.

L'influence de l'humidité et de la migration de l'eau dans le matériau de protection contre le feu peut être négligée, ce qui place du côté de la sécurité.

## RESUME

L'incendie est une des actions auxquelles une construction doit résister. En prenant en compte l'incendie dès le début du projet il est possible de trouver des solutions qui assurent à la construction une sécurité incendie suffisante à un coût minimum.

A travers ce mémoire, nous avons rappelé certaines généralités sur les notions de sécurité incendie, présenté les principales étapes du déroulement et du développement d'un incendie ainsi que la modélisation de ce dernier. Une étude du comportement au feu de l'acier a été entamée, nous avons montré aussi l'évolution des caractéristiques thermo-physiques et mécaniques à hautes températures selon l'Eurocode 3 partie1-2. Ensuite nous avons présenté les différentes méthodes de calcul en situation d'incendie qui se divisent en méthodes simplifiée et avancée. Enfin, nous avons réalisé une étude paramétrique, en exploitant deux logiciels Ozone et A3C, pour le calcul des réponses thermique et mécanique respectivement tout en analysant l'influence de certains paramètres tels que le facteur de massivité  $A_m/V$ , le nombre de faces exposées au feu, l'épaisseur de la protection, la position des colonnes dans un bâtiment, la longueur de flambement  $l_f$ , la nuance d'acier, le taux d'utilisation  $\mu_0$  sur la résistance au feu d'éléments en acier par la méthode simplifiée sous feu conventionnel ISO834.

**Mots clés :** Incendie, sécurité incendie, résistance au feu, méthode de calcul, réponse thermique, réponse mécanique, protection passive, protection active, feu nominal, Eurocode feu.

## Abstract

The fire is one of the actions to which a construction must resist. By taking account, the fire from the very start of the project it is possible to find solutions, which ensure construction a sufficient fire protection at a minimum cost. With through this memory, we recalled certain general information on the concepts of fire protection, presented the principal stages of the unfolding and the development of a fire as well as the modeling of this last. A study of the behavior in fire of steel was started, we also showed the evolution of the thermo-physical and mechanical characteristics at high temperatures according to Eurocode 3 partie1-2. Then

we presented the various methods of calculation in situation of fire which divide of methods simplified and advanced. Lastly, we carried out a parametric study, by exploiting two software Ozone and A3C, for the calculation of the answers thermal and mechanical respectively while analyzing the influence of certain parameters such as the factor of massiveté  $A_m/V$ , the number of faces exposed to fire, the thickness of protection, the position of the columns in a building, the length of buckling  $l_f$ , the nuance of steel, the load level  $\mu_0$  on the fire resistance of steel elements by the method simplified under conventional fire ISO834.

**Key words:** fire, fire protection, fire resistance, method of calculation, thermal answer, mechanical answer, passive protection, active protection, nominal fire, Eurocode fire.

## ملخص

الحريق هو واحد من الحوادث التي يجب على البناء أن يقاومها. بمراعاة الحريق في بداية المشروع من الممكن إيجاد الحلول التي تكفل سلامة البناء من النار بأدنى تكلفة ممكنة.

من خلال هذه الذاكرة, أشرنا إلى بعض العموميات على مفاهيم السلامة من الحرائق, وعرض المراحل الرئيسية لسير وتطور الحريق وكذلك وضع نماذج لهذا الأخير. وتم الشروع في دراسة لسلوك النار, وقد أظهرنا أيضا تطور الخصائص الحرارية-الميكانيكية في درجة حرارة عالية ووفقا للكود الأوربي 3 جزء 1-2. ثم قدمنا الأساليب المختلفة للحساب في حالة الحرائق التي تنقسم إلى أساليب مبسطة ومتقدمة. وأخيراً, قمنا بدراسة بارامترية, وذلك عن طريق برنامجين

Ozone و A3C

وذلك لحساب الاستجابات الحرارية والميكانيكية على التوالي و تحليل تأثير العوامل مثل: عدد الوجوه المعرضة للنار, عامل  $A_m/v$ , سمك طبقة الحماية عامل  $\mu_0$ , الخ

**الكلمات الرئيسية:** الحريق, السلامة من الحريق, مقاومة النار, طريقة الحساب, الاستجابة الحرارية, الاستجابة الميكانيكية, الحماية السلبية, الحماية النشطة, الكود الأوربي ضد النار

## INTRODUCTION GENERALE

Le feu provoque chaque année le décès de millions de personnes dans le monde et des dégâts matériels considérables. Le véritable risque lié à l'incendie est d'abord, pour les personnes, le dégagement de fumées toxiques. Celles-ci provoquent 98 % des décès, par asphyxie, dans les premiers instants de l'incendie [1]. L'incendie reste un risque permanent qui doit être pris en compte lors de la construction.

La sécurité incendie des constructions est un sujet que de nombreux ingénieurs de stabilité ne comptent pas dans leur domaine d'activité. L'incendie est une des actions auxquelles une construction doit résister comme c'est le cas, par exemple, du poids propre, des charges variables et du vent. En prenant en compte l'incendie dès le début du projet il est possible de trouver des solutions qui assurent à la construction une sécurité incendie suffisante à un coût minimum [2]. Aussi, depuis de nombreuses années, des règlements de conception des structures soit en béton, acier ou mixte sont proposés aux concepteurs afin de limiter autant que possible ce risque.

Lorsqu'une structure est soumise à l'incendie, du fait que les propriétés de résistance et de rigidité des matériaux habituels de constructions se détériorent de manière significative avec l'élévation des températures, sa capacité portante diminue au fur et à mesure que sa température augmente. Si la durée et l'intensité de cet incendie sont trop importantes, la capacité portante de la structure peut décroître jusqu'au niveau des charges appliquées ; il peut alors en résulter une ruine complète ou partielle, ce qui peut se produire en un temps relativement court lorsque la montée en température est rapide par la présence de matériels combustibles et d'oxygène [3].

Le concepteur se trouve ainsi face à deux problématiques : la réduction de la charge calorifique – limitation de l'usage de produits inflammables et très combustibles- laquelle contribue à limiter la chaleur et le volume des fumées; la protection des éléments de construction, afin de garantir la stabilité de l'ouvrage malgré le feu.

Deux voies combinables se présentent :

- **la protection active**, qui consiste à mettre en place des dispositifs qui se déclenchent lorsque la température s'élève et contribuent soit à éteindre l'incendie, soit à alerter les personnes présentes, tels que systèmes d'arrosage automatique, diffusion de gaz spécifique, alarmes en tout genre, etc. ;
- **la protection passive**, par un revêtement approprié appliqué sur ou contre les structures à

protéger tels que le béton, le plâtre, les peintures intumescents, le mortier de perlite ou la vermiculite, etc. et des dispositions constructives (compartimentage, paroi coupe-feu, etc.).

La combinaison de plusieurs de ces dispositions permet de réduire les risques et de satisfaire les trois exigences auxquelles doit répondre tout bâtiment en cas d'incendie : évacuation des occupants, intervention des secours et limitation de la propagation du feu [1].

Le comportement au feu des constructions est régi par des textes réglementaires (Eurocodes feu). Ces textes précisent notamment les éléments suivants [4] :

- D'une part, les exigences auxquelles doivent satisfaire les matériaux et les éléments de construction afin de limiter le risque lié à l'incendie à un niveau acceptable ;
- D'autre part, les méthodes permettant de justifier que ces matériaux et ces éléments de construction présentent effectivement le niveau de performance requis.

Dans ce contexte général, notre travail a pour principal objet d'étudier le comportement des éléments en acier (poutres et poteaux) en situations d'incendie et les facteurs qui influencent ce dernier. Pour cela on exploitera deux logiciels :

- **OZONE** : pour le calcul de la résistance thermique des éléments en aciers,
- **A3C** : pour le calcul de la résistance ultime au feu (résistance mécanique)

Les calculs sont faits selon l'Eurocode 3 partie 1.2 [5] en utilisant l'analyse élément par élément par la méthode simplifiée sous feu conventionnel ISO 834.

Le contenu de notre travail se présente de la manière suivante :

- Dans le premier chapitre nous avons abordé tout d'abord les différentes généralités sur le feu à savoir :
  - Le déroulement de l'incendie basé sur le triangle de feu dont les trois principaux acteurs sont: combustible, carburant, source d'inflammation.
  - Développement de l'incendie qui est essentiellement caractérisé par une 1<sup>ère</sup> phase de Naissance, une 2<sup>ème</sup> phase de Embrassement général (flash over), une phase de période stationnaire et la dernière phase d'Extinction du feu.
  - Modélisation d'un incendie, elle a été spécifiée par l'Eurocode. Les modèles les plus utilisés sont : Courbes nominales, Courbes paramétriques, Modèles de zone, Modèles CFD.

- Principaux facteurs influençant l'évolution des températures dans un local, tels que la charge incendie, la ventilation, la nature de parois et l'interaction entre ces paramètres.
  - Prévention et protection : Le risque d'incendie existera toujours puisqu'il est impossible de ne pas utiliser que des produits incombustibles dans les bâtiments, aussi le respect et la mise en place d'un ensemble de mesures de prévention adéquates et leur prise en compte dans la conception du bâtiment sont essentiels pour limiter et maîtriser le risque incendie.
  - La prévention contre l'incendie est divisée en deux types de protection :
    - ✓ Prévention active
    - ✓ Prévention passive
  - Les Eurocodes feu, Dans notre cas on utilisera l'Eurocode 3, partie 1-2
- Le deuxième chapitre consacré à l'étude du comportement au feu de l'acier, nous avons montré les Principes généraux d'application du calcul au feu des structures en acier, nous avons montré aussi l'évolution des caractéristiques thermo-physiques et mécaniques à hautes températures selon l'Eurocode 3 partie 1-2 et selon des études de recherche.
- Dans le troisième chapitre, consacrée à la conception et à la description des différentes approches d'analyse et différents modèles de calcul à l'incendie, ainsi qu'à la présentation de la méthode analytique, dite méthode de calcul simplifié et la méthode avancé.
- Le chapitre quatre, nous avons réalisé une étude paramétrique mécanique et thermique. L'analyse à été concrétisée par deux Logiciels Ozone et A3C. Tout d'abord nous avons présenté les deux logiciels, ensuite nous avons réalisé des applications thermiques et mécaniques. L'analyse paramétrique a été réalisé pour identifier les paramètres les plus influents sur le comportement de l'acier sous l'influence du feu, ces paramètres sont : le facteur de massivité, la position des colonnes dans une structure, matériau de protection et les côtés exposés au feu, l'épaisseur du produit de protection, longueur de flambement, la nuance d'acier et le taux de chargement.
- Nous terminons, en guise du dernier chapitre, par une conclusion générale qui débouche sur un certain nombre d'observations sur l'influence des différents paramètres sur le comportement des éléments en acier sous influence du feu, et des recommandations futurs.

## Introduction

Chaque année des millions de personnes décèdent à cause du feu ; ainsi que des dégâts matériels considérables sont enregistrés.

Les objectifs de la sécurité incendie sont la protection efficace contre les risques d'incendie des personnes et des biens, et plus précisément ils concernent :

- La sauvegarde des vies des occupants de.
- La protection des vies des services d'intervention.
- La protection de l'intégrité du bâtiment.
- La sauvegarde des bâtiments adjacents.

Les exigences de base de la protection incendie consistent à :

- Réduire le développement de l'incendie.
- Eviter la propagation du feu.
- Assurer l'évacuation rapide des occupants avec une relative sécurité.
- Faciliter l'intervention du corps des sapeurs-pompiers.

### I.1 Terminologie feu et incendie

Un feu est une combustion. On le trouve dans des fours, des chaudières sous forme de combustion contrôlée. Dans le domaine de l'incendie il devient une combustion incontrôlée. Il prend alors une dimension telle qu'il peut provoquer un incendie [6].

L'incendie est un phénomène où il est essentiellement question d'une réaction chimique rapide (oxydation) entre un matériau combustible (par exemple du papier ou de l'essence) et de l'oxygène. Pour qu'un incendie puisse démarrer, il faut qu'il y ait en un point une température suffisamment élevée comme, par exemple, celle d'un mégot de cigarette, celle d'un court-circuit dans un appareil électrique ou celle d'un incendie volontaire. [7]

## I.2 Déroulement d'un incendie

### I.2.1 Le triangle du feu

Pour qu'un feu (une combustion) prenne naissance, trois conditions doivent être réunies Simultanément :

- Présence d'un combustible : matière inflammable solide: (bois, charbon, papier..). Liquide: ( essence, alcools...) ; gazeuse: (butane, propane...). C'est le produit qui va subir l'oxydation. Tous les corps susceptibles de s'unir avec l'oxygène sont dits 'combustibles'. De nombreux corps ont cette propriété mais tous ne brûlent pas aussi facilement et aussi vite les uns par rapport aux autres. Cela tient à leur structure et à leur état de division. Ainsi, une bûche de bois sera plus difficile à enflammer et brûlera moins vite que la même masse de copeaux de bois qui elle brûlera très rapidement en dégageant une forte chaleur. Généralement, une combustion est accompagnée d'un changement d'état. Des matériaux combustibles existent dans presque tous les bâtiments.
- Présence d'un carburant (comburant): En pratique, il n'existe qu'un seul comburant : c'est l'oxygène. Mais cet oxygène peut se trouver soit à l'état pur, soit en mélange avec d'autres gaz, soit provenir de la décomposition de certains corps. Dans la plus grande partie des cas que nous rencontrons dans la vie courante, l'oxygène qui alimente la combustion se trouve dans l'air en mélange avec l'azote et d'autres gaz rares.
- source d'inflammation : source d'énergie nécessaire au démarrage de la combustion (flamme, étincelle, décharge électrique...). Ainsi que le rappelle le triangle du feu, la seule présence d'un combustible et d'un comburant n'est pas suffisante pour provoquer le phénomène de la combustion. Un apport d'énergie calorifique dit 'énergie d'activation' est nécessaire pour démarrer ce phénomène, qui s'entretiendra de lui-même par la suite. Le combustible et le comburant étant naturellement présents dans les bâtiments, c'est donc la présence d'une source de chaleur qui est la cause même de la naissance d'un incendie [8].

Ces trois composantes sont souvent représentées graphiquement sous forme d'un triangle appelé triangle du feu.

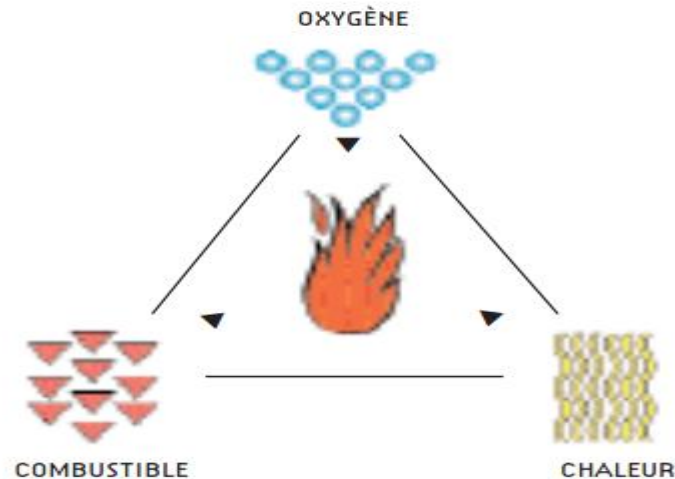


Figure II.1 : triangle du feu [9]

### I.2.2 Le développement d'un incendie

L'évolution d'un incendie est un phénomène difficile à prévoir. Le développement de celui-ci et de sa propagation dépendent, comme nous le verrons plus en détail un peu plus loin, de nombreux facteurs : la charge d'incendie, la forme sous laquelle elle se présente, la ventilation et les caractéristiques des parois.

Le déroulement d'un incendie réel, si on exclut les cas particuliers tels que l'explosion, peut être décomposé en quatre étapes ou phases comme schématisé sur la figure (I.2).

- **Phase 1 : Naissance**

Une source de flammes, d'intensité limitée, communique le début d'incendie. Pendant cette phase les objets individuels brûlent. Le comportement au feu, la facilité d'inflammation, la vitesse de propagation en surface des flammes et le dégagement de la chaleur de combustion jouent ici un rôle prépondérant. Le risque pour les personnes et les biens n'est pas très élevé. Cette phase cependant est d'une importance vitale puisqu'elle permet une détection et une maîtrise précoces.

- **Phase 2 : Embrasement général (flash over)**

Le point dangereux est l'embrasement généralisé qui marque la transition entre l'incendie localisé et l'incendie entièrement développé. Lorsque l'échauffement régulier des matériaux combustibles donne des températures entre 200°C et 300°C, les matériaux commencent à se consumer. Une telle température ambiante provoque l'éclatement des vitres des fenêtres, créant un apport d'air important qui se mélange aux gaz de combustion. La température passe de 200°C à 1000°C en quelques minutes avec le risque de la ruine de la structure.

Combattre l'incendie dans le compartiment est alors totalement impossible. Les pompiers ne peuvent que protéger le voisinage.

- **Phase 3 : Période stationnaire**

Dans le cas où aucune intervention n'a eu lieu, on se trouve en présence d'un incendie complètement développé. Pendant cette période stationnaire les températures et la production de la chaleur restent plus au moins constantes. C'est ici que va intervenir la résistance au feu des éléments de construction. Ils doivent en effet éviter la propagation du feu vers d'autres locaux du bâtiment de manière à permettre le déroulement normal des opérations d'extinction, sans que les pompiers ne courent des dangers excessifs. On distingue une fonction séparante, dont le rôle est d'éviter l'extension de l'incendie vers d'autres locaux et une fonction portante, qui doit éviter l'effondrement.

- **Phase 4 : Extinction du feu**

S'il n'y a toujours pas eu d'intervention, le feu s'éteint lentement par défaut de combustible, c'est la phase de décroissance. S'il y a eu intervention, le refroidissement dû à l'extinction est global et les risques d'effondrement persistent à cause des phénomènes de dilatation et de contraction des matériaux [8].

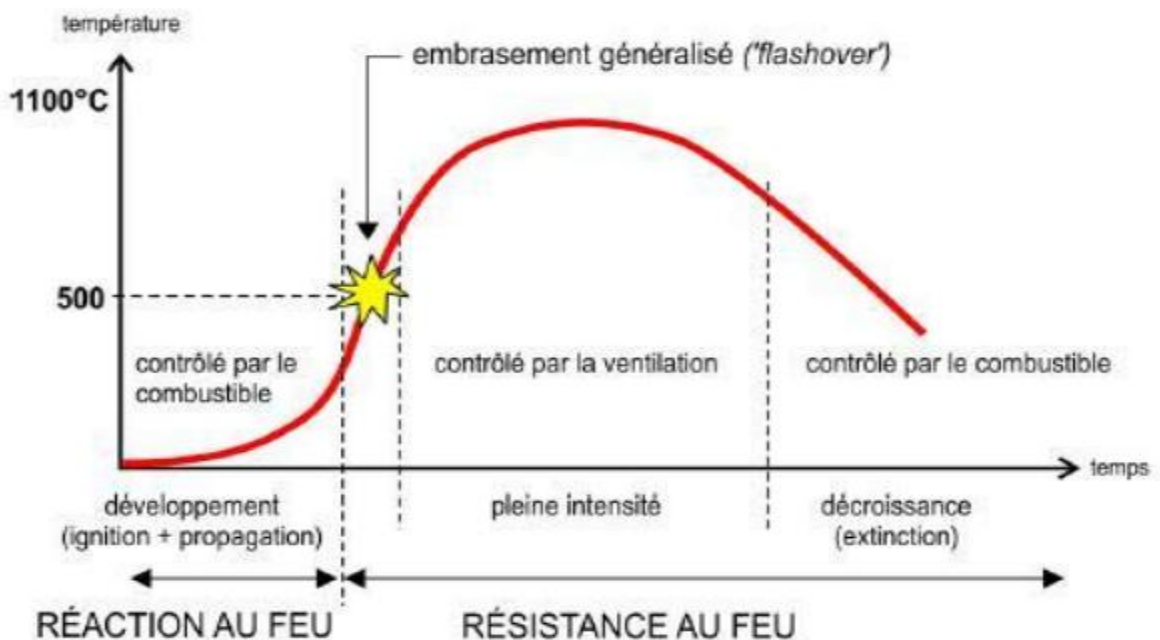


Figure I.2 Phases de développement d'un incendie [6]

### I.3 Modélisation d'un incendie

Il y a plusieurs façons de modéliser l'incendie dans un bâtiment. Les modèles utilisés plus couramment sont revus ci-après, dans un ordre de complexité croissant, soient [8] :

- Courbes nominales
- Courbes paramétriques
- Modèles de zone
- Modèles CFD

#### I.3.1 Courbes nominales

La façon la plus simple de représenter un incendie est d'utiliser des courbes nominales, soit une relation donnant l'évolution de la température des gaz à proximité de l'élément en fonction du temps [6]. Les plus fréquemment utilisées sont :

##### I.3.1.1 Courbe feu normalisé ISO 834

Dans un souci de faciliter l'analyse de la résistance au feu des structures, aussi bien pour les essais que pour les calculs numériques, un programme thermique conventionnel, matérialisant l'action des incendies dans un bâtiment, a été adopté au niveau international (norme ISO834).

Dans ce cas, l'élévation de température à laquelle est soumis un élément est conforme à la relation suivante :

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8t+1) \dots (I.1)$$

Avec :

- \*  $\theta_g$  : température des gaz dans le compartiment en °C au temps t.
- \* t : temps en minutes.

C'est une courbe (figure 1.3) logarithmique utilisée en laboratoire pour modéliser le feu. La valeur de durée de résistance au feu n'indique pas la durée réelle pendant laquelle une composante résiste dans un incendie de bâtiment, elle constitue une comparaison indiquant la sévérité d'un incendie auquel la composante peut résister. [1]

De manière simplifiée, il peut être retenu que cette courbe atteint environ 500 °C après seulement 3 minutes et plus de 1000 °C après 90 minutes (tableau I.1). Par ailleurs, il convient de signaler que la

courbe ISO est assez différente de celle adoptée pour l'incendie réel. Cette courbe, souvent considérée comme une courbe enveloppe des incendies réels, présente un aspect plus défavorable, d'une part par un échauffement très rapide lors des premières minutes, et d'autre part par l'absence de phase de refroidissement (température sans cesse croissante).

temps (min)	température (C°)
0	20
5	576
10	678
15	739
30	842
60	945
90	1006
120	1049
180	1110
240	1153
300	1186
360	1214

Tableau I.1 valeurs température – temps pour la courbe ISO834 [9]

La courbe représentative de la fonction ci-dessus est dite 'courbe température-temps normalisée' ou 'courbe ISO' (figure I.3).

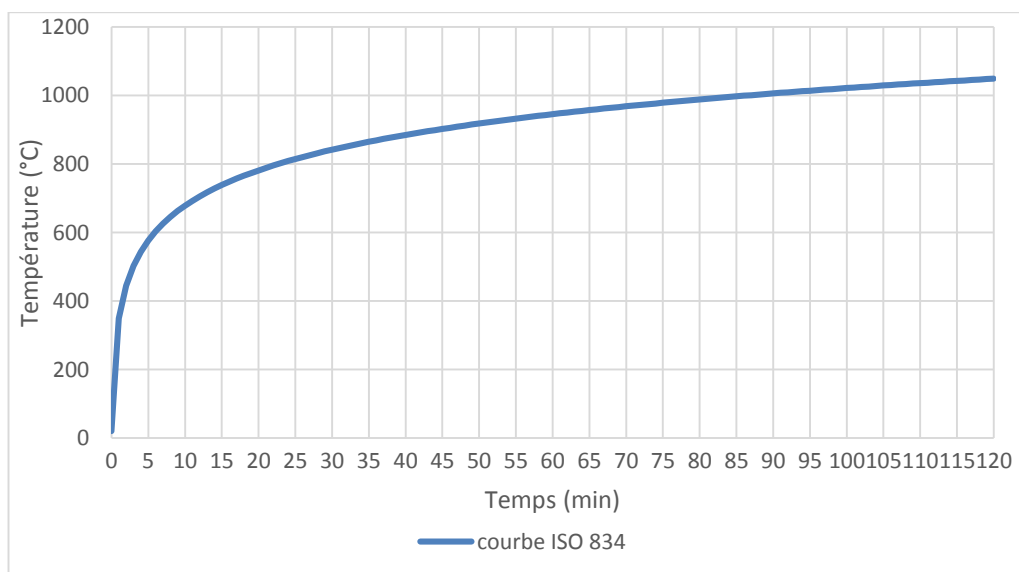


Figure I.3 Courbe nominale du feu conventionnel ISO834

Le développement d'un feu réel n'est jamais identique à celui de l'incendie conventionnel défini par la courbe ISO 834, où la température augmente indéfiniment dans le temps.

En effet, lors d'un incendie réel, la température finit par décroître lorsque le combustible est consommé à environ 70 %. En outre, les mesures actives et l'intervention des services de secours réduiront les violences du feu tandis que les mesures passives en limiteront la propagation.

La courbe ISO, dont l'avantage pratique est certain, présente des écarts par rapport à un incendie naturel dans des bâtiments [10].

En considérant d'une part, la courbe ISO et d'autre part, les enregistrements obtenus lors d'essais dits d'incendies naturels, l'évolution temporelle de la température est illustrée sur la (figure I.4)

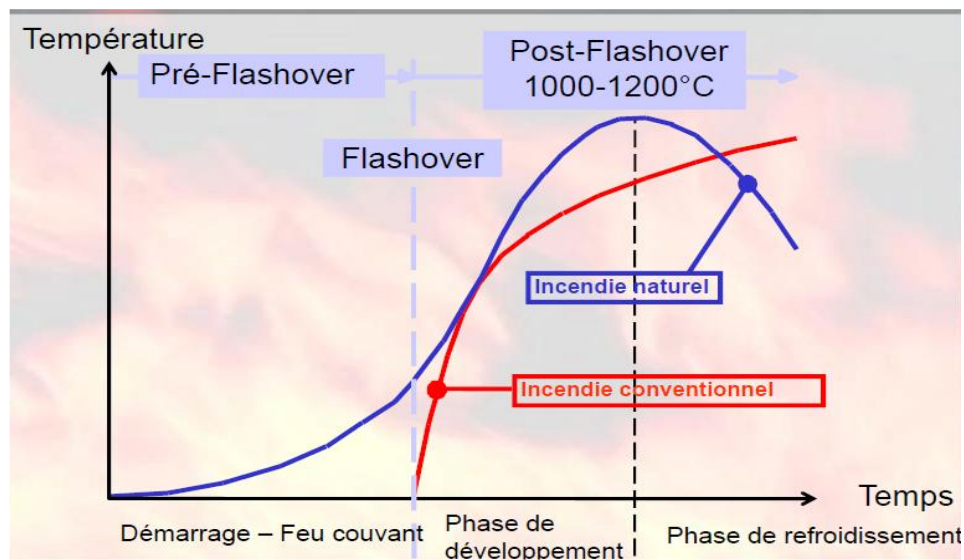


Figure I.4 Feu naturel et feu conventionnel

### I.3.1.2 Courbe de feu hydrocarbure

Développée dans les années 70 par la compagnie pétrolière Mobil, elle présente une montée en température très rapide avec une température de 900 °C dans les 5 premières minutes et un plafond de 1100 °C. Cette recherche avait été initiée pour mettre au point une procédure de test pour évaluer les matériaux de protection contre le feu pour les plates-formes de forage en mer et les complexes pétroliers. [6]

Cette courbe est utilisée pour représenter les effets de feu engendrés par les hydrocarbures dans les structures servant de stockage des produits pétroliers et dérivés qui rendent les incendies extrêmement sévères.

La courbe des hydrocarbures température/temps est donnée par [EC1 2.2] :

$$\theta_g = 20 + 1080.(1-0.325.e^{-0.167t}-0.675. e^{-2.5t}).....(I.2)$$

Où :

- ✓  $\theta_g$  : température des gaz dans le compartiment en °C.
- ✓ t : temps en minutes.

### I.3.1.3 Courbe de feu extérieur

La courbe de feu extérieur s'applique à la face externe des murs extérieurs à fonction séparative, susceptibles d'être exposés au feu à partir de différentes parties de la façade, c'est-à-dire directement de l'intérieur du compartiment en feu concerné ou d'un compartiment se trouvant au-dessous ou à côté du mur concerné.

La courbe de feu extérieur est une courbe plafonnée à une élévation de la température égale à  $20+ 660\text{ C}^\circ$ , une température nettement inférieure à la courbe standard.

La courbe de feu extérieur température/temps est donnée par [EC1 2.2]

$$\theta_g = 20 + 660.(1-0.687.e^{-0.32t}-0.313. e^{-3.8t})....(I.3)$$

Où :

- ✓  $\theta_g$  : température des gaz dans le compartiment en °C
- ✓ t : temps en minutes

Ces courbes nominales ont toutes les caractéristiques suivantes :

- la température est uniforme dans le compartiment ;
- le seul paramètre dont elle dépend est le temps ;
- il n'y a pas de refroidissement ou de branche descendante.

### I.3.2 Courbes de feu paramétrique

Les feux paramétriques constituent un moyen simple pour tenir compte d'importants phénomènes physiques pouvant influencer le développement d'un feu dans un bâtiment particulier. Comme les feux nominaux, ils consistent en la détermination d'une courbe

température-temps, mais ces courbes tiennent compte de certains paramètres physiques destinés à idéaliser certains aspects de la réalité.

Pour presque tous les feux paramétriques mentionnés dans la littérature, les paramètres physiques pris en compte sont, d'une manière ou d'une autre :

- la géométrie du compartiment,
- la charge calorifique présente dans le compartiment,
- les ouvertures dans les murs et/ou dans le toit et
- le type et la nature des différents éléments de construction constituant les limites du compartiment.

Les feux paramétriques sont basés sur l'hypothèse que la température est uniforme dans le compartiment. Ils constituent néanmoins un pas significatif vers la considération de la nature réelle d'un feu particulier par rapport aux feux nominaux [10].

Ces courbes nominales et la courbe paramétrique typique sont illustrées à la (figure I.5).

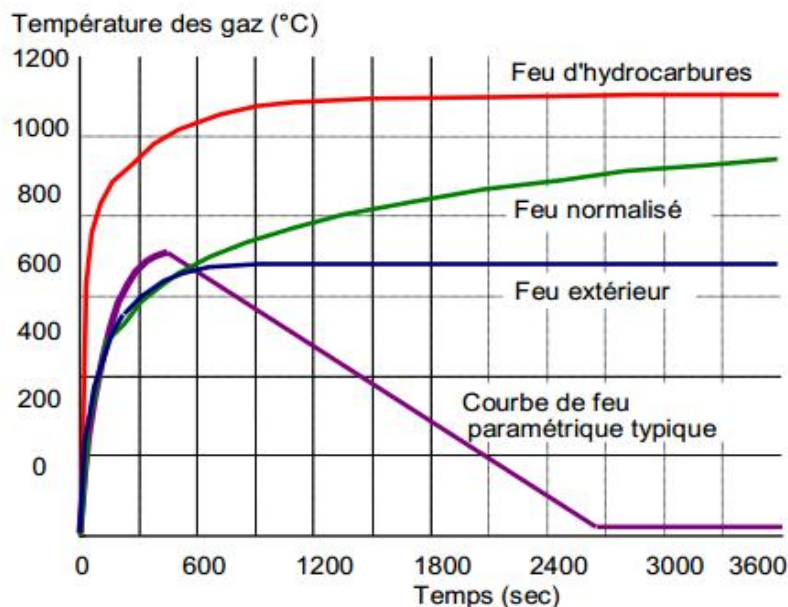


Figure I.5 Courbes d'incendies nominaux [12].

I.3.3 Modèles de zone

Le modèle à une zone (one-zone model) est basé sur l'hypothèse fondamentale que, pendant le feu, la température des gaz chauds est uniforme dans le compartiment (figure I.6) Les modèles à une zone sont adaptés pour des conditions de post-flashover.

Les données nécessaires (paramètres physiques) doivent être plus précises que pour les courbes paramétriques.

L'hypothèse de couche ou zone (supérieure et inférieure) constitue la base des modèles de zone. L'épaisseur de la couche inférieure, qui reste à température assez basse et ne contient pas de produits de combustion, est très importante pour apprécier les conditions de survie des occupants dans le compartiment.

C'est par exemple le cas si l'épaisseur de la couche supérieure s'accroît tellement que celle-ci remplit à peu près tout le compartiment. Un autre cas est celui pour lequel la température de la couche supérieure est suffisamment élevée pour conduire au flashover dans l'ensemble du compartiment [8].

La (Figure I.6) montre comment un feu de compartiment est modélisé, et représente différents termes d'échanges d'énergie et de masse.

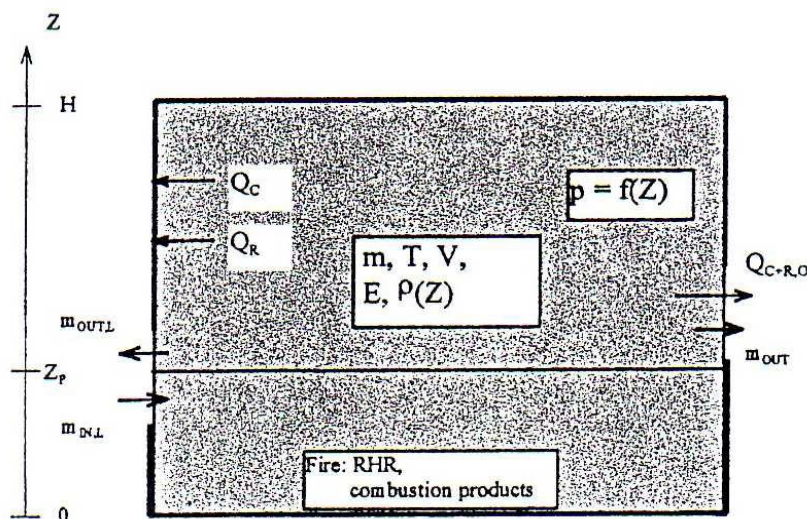


Figure I.6 Compartiment dans un modèle une zone [8]

Dans un feu localisé, il y a accumulation de produits combustibles dans une couche en dessous du plafond (couche supérieure), avec une interface horizontale entre cette couche chaude et la couche inférieure où la température des gaz demeure beaucoup plus basse.

Cette situation est bien représentée par un modèle à deux zones (two zone model) (figure I.7), utilisé dans toutes les situations de pré-flashover. En plus du calcul de l'évolution de la température des gaz, ces modèles sont utilisés pour connaître la propagation des fumées dans les bâtiments et pour estimer la sécurité des personnes en fonction de la hauteur de la couche de fumée.

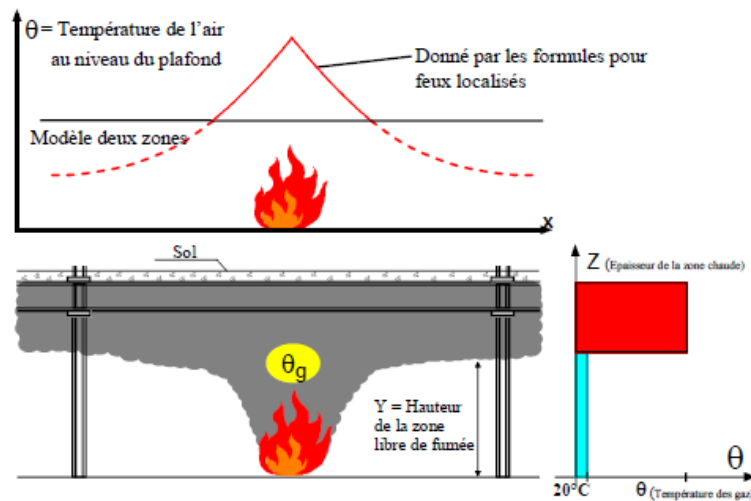


Figure I.7 Compartiment dans un modèle à deux zones [10]

Dans les modèles à deux zones, la température des gaz est calculée avec l'hypothèse qu'elle est uniforme dans chaque couche. Cette température moyenne dans la zone chaude est généralement suffisamment précise tant que des phénomènes globaux sont considérés : quantité de fumée à extraire du bâtiment, probabilité de flashover, écroulement total du toit ou du plafond, etc.

Pour l'évaluation du comportement local d'un élément de structure situé au-dessus du feu, l'hypothèse d'une température uniforme peut être insuffisante et le modèle à deux zones doit être combiné avec des modèles spécifiques qui donnent l'évaluation de l'effet local sur ces éléments en fonction de leur distance par rapport au foyer (Méthode d'Heskestad ou d'Hasemi) [8].

### I.3.4 Modèles CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD)- Méthodes Avancées en Dynamique des fluides, analysent les systèmes incluant l'écoulement des fluides, les transferts de chaleur et les phénomènes associés en résolvant les équations fondamentales de la mécanique des fluides. Ces équations constituent une représentation mathématique des lois de conservation de la physique.

Dans ces modèles, les équations différentielles de la thermodynamique et de l'aérodynamique sont résolues en un très grand nombre de points du compartiment.

### I.4 Principaux facteurs influençant l'évolution des températures dans un local

Les principaux facteurs qui influencent l'évolution des températures dans un local incendié caractérisant la sévérité de l'incendie résultent de la charge d'incendie, de la ventilation, de la nature de parois et de l'interaction entre ces paramètres.

#### I.4.1 Influence de la charge combustible et de la ventilation

Le développement d'un incendie est lié à deux paramètres principaux : l'importance de la charge combustible contenue dans le local en feu et la surface des ouvertures du local sur l'extérieur. L'augmentation des surfaces d'ouverture permet une meilleure ventilation et se traduit donc par des pics de température moins élevés et par une phase de décroissance plus rapide (figure I.8).

Si l'alimentation en air est suffisante, ce qui entraîne un feu contrôlé par le combustible, ce sont l'importance et la disposition de la charge incendie qui exercent une influence décisive sur la sévérité du feu.

Le tableau (I.2) donne les charges calorifiques d'activités types.

Destination du compartiment	Charge incendie (MJ/m <sup>2</sup> )	Charge incendie (kg de bois/m <sup>2</sup> )
Habitation	780	45
Hôpital (chambre)	230	13
Hôtel (chambre)	310	18
Bibliothèque	1 500	86
Bureaux	420	24
École (classes)	285	16
Centre commercial	600	34
Théâtre-cinéma	300	17
Transport (espace public)	100	6

Tableaux I.2 Charges calorifiques d'activités types (1 kg de bois/m<sup>2</sup>= 17,5 MJ/m<sup>2</sup>)[9]

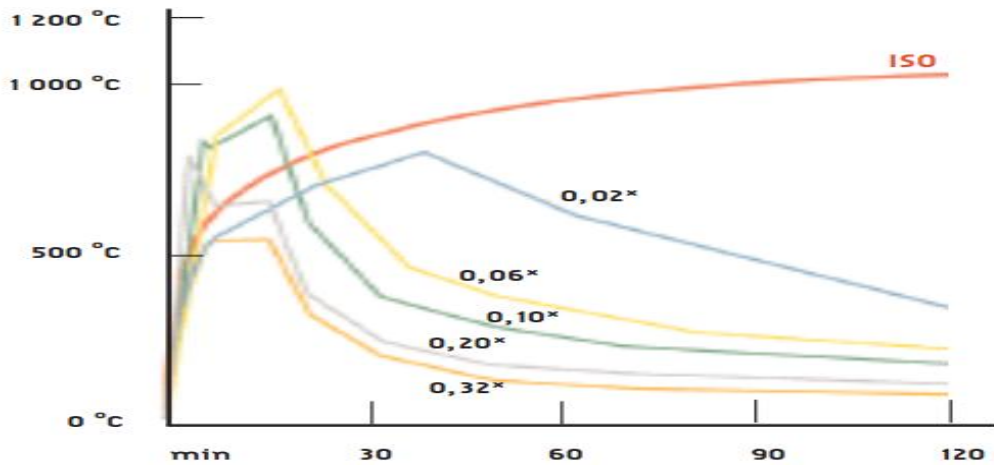


Figure I.8 Influence des conditions de ventilation du local sur le développement de l'incendie [9].

Les courbes représentent le profil de l'incendie, en fonction du pourcentage de surface d'ouverture de ventilation dans le local concerné.

\* **Facteur de ventilation**

- $F_v = A\sqrt{h}/A_t$
- A = surface de l'ouverture (m<sup>2</sup>)
- h = hauteur de l'ouverture de ventilation (m)
- A<sub>t</sub> = surface totale des parois du local (m<sup>2</sup>)

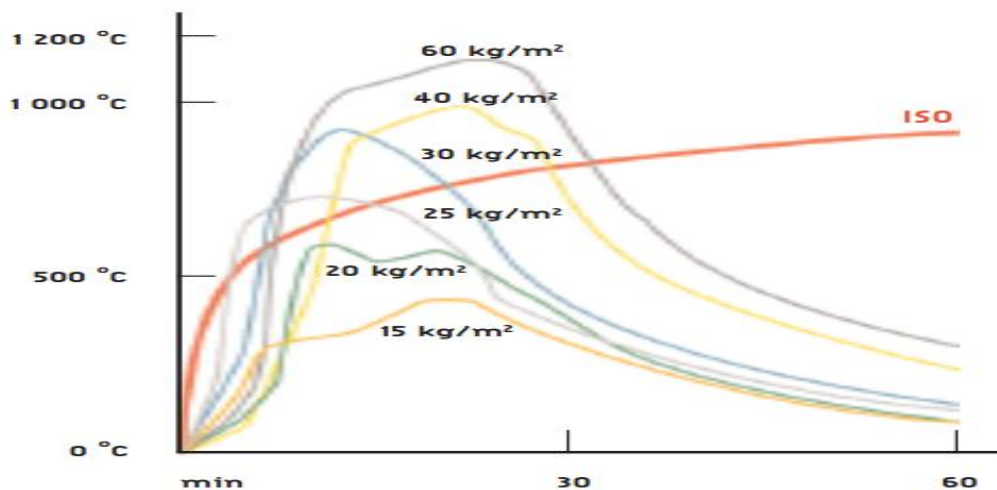


Figure I.9 Influence de la charge combustible (en kg de bois/m<sup>2</sup>) sur le développement de l'incendie [9].

Le développement de l'incendie et l'élévation de la température sont liés à la charge combustible dans les locaux concernés.

Le graphique permet de mesurer la différence entre un feu réel et la courbe normalisée ISO, sous un même facteur de ventilation  $F_v = 0,091 \text{ m}^{1/2}$  [9].

#### I.4.2. Caractéristiques thermiques des parois

Les caractéristiques thermiques des parois influencent le développement de l'incendie, mais dans une moindre mesure que la charge incendie et la ventilation. La chaleur qui est produite au début de l'incendie est en partie transportée vers l'extérieur par la ventilation et en partie absorbée par les planchers, les parois et le plafond.

La température dans le local est déterminée par le bilan thermique entre production et transport de chaleur. Le paramètre déterminant est  $\lambda, \rho, c$ , (voir chapitre II) généralement appelé perméance thermique [8].

La quantité d'énergie qui s'écoule vers les parois s'accroît lorsque les paramètres  $\lambda, \rho, c$  augmentent. Pour les parois et les murs isolants ( $\lambda$  petit,  $\rho$  petit), ceci signifie que les températures de surface dans le compartiment s'élèvent plus rapidement, et que moins de chaleur s'écoule vers les parois [8].

### I.5 Prévention et protection

#### ➤ Qu'est-ce que la sécurité incendie ?

La sécurité incendie concerne les mesures prises pour prévenir autant que possible le déclenchement d'un incendie et pour limiter les risques et les conséquences de l'incendie. Ce paragraphe traite des buts de la sécurité incendie en général et donne un aperçu des possibilités dont dispose le projeteur pour assurer la sécurité incendie d'un bâtiment [7].

Le risque d'incendie existera toujours puisqu'il est impossible de n'utiliser que des produits incombustibles dans les bâtiments, aussi le respect et la mise en place d'un ensemble de mesures de prévention adéquates et leur prise en compte dans la conception du bâtiment sont essentiels pour limiter et maîtriser le risque incendie.

La prévention contre l'incendie est divisée en deux types de protection :

### I.5.1 Prévention active

Les protections initiales sont dites « actives » lorsqu'elles mettent en œuvre des dispositifs dynamiques (détection, alarmes, désenfumage, sprinklers) ou font intervenir l'action humaine pour éteindre le début d'incendie (robinet d'incendie armé ou RIA). Elles ont pour objectif premier de permettre l'évacuation des personnes dans les meilleurs délais et de faciliter l'intervention rapide des secours.

Le feu doit être détecté au plus tôt pour être combattu efficacement. L'ensemble des protections actives doit être efficace dans les deux premières phases de développement du sinistre. [9]

Nous présentons quelques dispositifs de protection active :

- Les détecteurs réagissant à la fumée de la chaleur, ou aux flammes déclenchent une alarme sonore et la mise en œuvre de certains équipements.
- Les consignes de sécurité et le balisage favorisent l'évacuation des occupants.
- Le système de désenfumage évacue les fumées toxiques, facilitant l'évacuation des occupants sans dommages et l'intervention des secours.
- Les moyens de lutte, extincteurs ou RIA, permettent l'attaque immédiate du feu.
- Les sprinklers, réseau d'extinction automatique, attaquent sans délai le feu naissant.

### I.5.2 Prévention passive

La protection passive signifie que la structure porteuse est revêtue d'un matériau isolant ou enrobée de béton pour éviter l'effondrement du bâtiment sous l'effet de l'incendie . Cette forme de protection passive est généralement utilisée pour des structures en acier ou en bois, mais parfois aussi pour des éléments en béton.

Les revêtements protecteurs, les produits ignifuges, les conceptions de façade ne permette pas le passage des flammes, l'ininflammabilité des matériaux et le choix de l'emplacement des matières inflammables dans des locaux prévus sont pour autant des moyens entrants dans la classe de la prévision passive [8].

Il existe principalement quatre types de protection pour les structures en acier. L'épaisseur à mettre en œuvre dépend du facteur de massivité de l'acier et de la température critique calculée ou

forfaitaire. Chaque fabricant de produits de protection ayant fait des essais dispose de tableaux ou d'abaques définissant les épaisseurs à mettre en œuvre. [9]

### ➤ Peintures intumescentes

S'agissant des structures visibles (intérieures comme extérieures), il est possible d'appliquer une protection à l'aide d'une peinture intumescente. Sous l'effet du feu, ces peintures gonflent et constituent une isolation contre les effets du feu. Elles permettent à la construction de supporter ses charges durant toute la période de résistance au feu exigée. L'épaisseur de peinture dépend du facteur de massiveté, de la résistance au feu requise et de la température critique. Elles s'appliquent rapidement et facilement et autorisent le traitement de détails constructifs complexes.

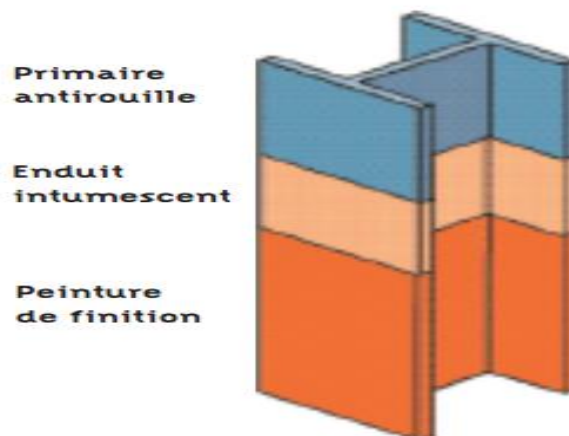


Figure I.10 Acier protégé par des peintures intumescentes [9]

### ➤ Protection par écran

Un élément de structure métallique protégé par d'autres éléments du bâtiment voit sa résistance au feu augmentée de façon sensible.

Plusieurs choix constructifs s'offrent au concepteur :

- Les poteaux intégrés dans des cloisons. Ils sont intégrés dans les parois légères, ou entre deux murs. Selon la nature et l'épaisseur des matériaux des parois, la protection des poteaux peut être suffisante. Cette solution est souvent utilisée avec une cloison en plaques de plâtre qui assure en même temps une fonction phonique

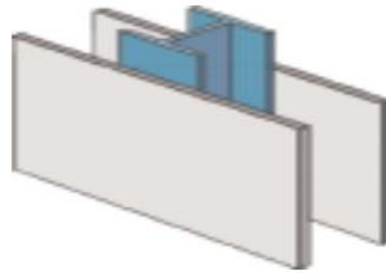


Figure I.11 exemple d'un poteau intégré dans des cloisons [9]

- Les plafonds suspendus résistant au feu. De nombreuses constructions comportent des plafonds suspendus. Le plénum (espace entre plafond et plancher) est utilisé comme gaine technique. En fonction des performances incendie des éléments du plafond, il est possible d'y inclure les structures à protéger. La température dans le plénum, au terme de l'exigence de stabilité requise (une demi-heure, une heure...) ne doit pas atteindre la température critique de l'acier (500°C).

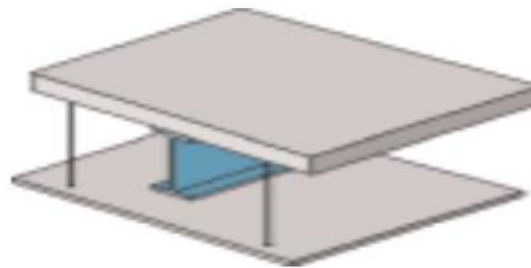


Figure I.12 exemple d'un plafond suspendu [9]

- Les poteaux intégrés à la maçonnerie. Ils sont protégés des attaques du feu et exigent rarement une protection supplémentaire. Cela vaut également pour les poteaux intégrés aux trumeaux de fenêtres .

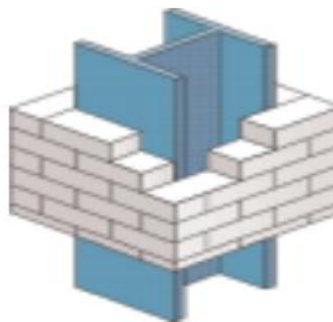


Figure I.13 exemple d'un poteau intégré à la maçonnerie [9]

- Les poteaux partiellement protégés par de la maçonnerie. Lorsque seul l'espace formé par les ailes et l'âme du profil est garni de briques ou de maçonnerie, le poteau aura une résistance au feu d'une demi-heure.



Figure I.14 exemple d'un poteau partiellement protégé par de la maçonnerie [9]

#### ➤ Produits en plaques

La protection à l'aide de produits en plaques s'applique aux poteaux et poutres. Les plaques de faible densité sont le plus souvent utilisées pour des poutres non visibles. Certains produits peuvent être utilisés à l'extérieur.

Les plaques ont une épaisseur garantie. Elles isolent thermiquement la structure des effets du feu, permettant à celle-ci de supporter ses charges pendant la durée requise.

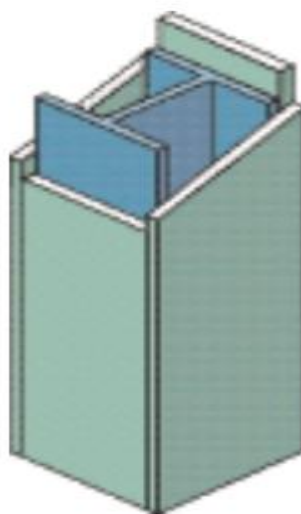


Figure I.15 exemple d'une protection à l'aide de produits en plaques [9]

### ➤ Produits projetés

Le procédé est peu onéreux, d'une mise en œuvre rapide, et il se prête à la protection de détails constructifs complexes. Il peut toutefois générer poussières et salissures lors de la projection et exiger l'isolement des parties d'ouvrage voisines. Pour être efficace, il demande un contrôle de l'épaisseur de la couche.

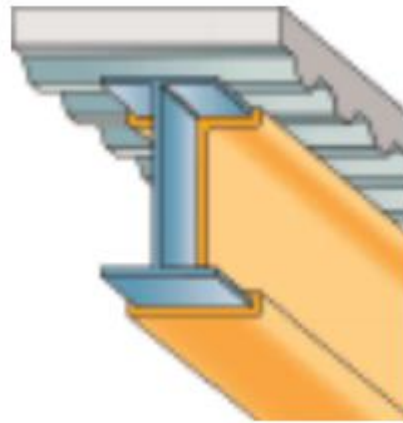


Figure I.16 exemple d'un Produit projeté [9]

### I.6 Les Eurocodes feu

Les parties des eurocodes relatives au comportement au feu des structures en situation d'incendie, communément appelées « Eurocodes Feu », sont les suivantes :

- Eurocode 1, partie 2-2 : Actions sur les structures exposées au feu.
- Eurocode 2, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures en béton.
- Eurocode 3, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures en acier.
- Eurocode 4, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures mixtes (acier + béton).
- Eurocode 5, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures en bois.
- Eurocode 6, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures en Maçonnerie.
- Eurocode 9, partie 1-2 : Calcul du comportement au feu des structures en aluminium.

L'Eurocode 1, partie 2-2, définit les actions à prendre en compte, en particulier l'action thermique et les combinaisons d'actions mécaniques dans le cas de la situation accidentelle d'incendie. Cette partie est destinée à être utilisée en liaison avec les parties relatives au calcul de la résistance au feu des Eurocodes 2 à 6 et 9 qui fixent des règles de calcul de comportement au feu des structures. Les actions thermiques mentionnées dans le corps du document sont principalement limitées aux actions thermiques nominales (courbes nominales). Des annexes informatives jointes à ces Eurocodes présentent des données et des modèles pour des actions thermiques ayant une base physique (courbes paramétriques,...).

De plus, pour ce qui concerne les structures en béton, en acier et en bois, il peut être noté que la partie 1-2 de l'Eurocode 2 traite du calcul des structures en béton en situation accidentelle d'incendie. Elle apporte des compléments et identifie les différences par rapport au calcul des structures aux températures normales.

Pour les structures métalliques, l'Eurocode 3, partie 1-2, décrit les propriétés de l'acier à température élevée, et les différentes méthodes qui permettent d'analyser son comportement au feu. Il présente notamment les méthodes de vérification de la résistance au feu conventionnel (normalisé) d'éléments tels que les tirants, les poutres et les poteaux. Ces méthodes prennent en compte l'échauffement des éléments soumis à un incendie et la diminution concomitante des caractéristiques mécaniques. Une annexe décrit une méthode pour les éléments de structure situés à l'extérieur des bâtiments. La possibilité d'utilisation de méthodes de calculs avancés est présentée (voir chapitre3).

L'Eurocode 4, partie 1-2, décrit les méthodes de vérification de la résistance au feu conventionnel des éléments mixtes acier-béton tels que les planchers, les poutres et les poteaux. Des valeurs tabulées et des méthodes simplifiées permettent le dimensionnement des éléments pour répondre à des exigences de résistance au feu. La possibilité d'utilisation de méthodes de calculs avancés est présentée.

De manière plus générale, il peut être noté que les Eurocodes structuraux traitent d'aspects spécifiques de protection passive au feu en termes de calcul des structures ou de parties de celles-ci en vue d'obtenir une résistance suffisante et une limitation de la propagation du feu s'il y a lieu.

Il peut être également noté que les Eurocodes, dans leur ensemble, sont basés sur une

approche semi-probabiliste de la sécurité. Cette approche, décrite dans l'annexe A de l'Eurocode 1, permet de quantifier la sécurité d'une structure. Elle fait appel à des facteurs de sécurité  $\gamma$  pour les actions et les propriétés des matériaux. Les actions caractéristiques sont majorées et les résistances caractéristiques diminuées afin de dimensionner avec une sécurité suffisante [10].

Dans notre cas on utilisera l'Eurocode 3, partie 1-2.

## Conclusion

Dans le chapitre I, Nous avons présenté premièrement la terminologie feu et incendie, ensuite nous avons présenté le déroulement d'un incendie, les différentes phases de développement de l'incendie et on a traité la modélisation d'un incendie. Nous avons terminé ce chapitre en présentant les eurocodes feu et les types de préventions.

## **Introduction**

En cas d'exposition au feu, un bâtiment est soumis aux actions à la fois mécaniques et thermiques (venant du feu). Les actions mécaniques correspondent aux charges permanentes et aux charges d'exploitation, s'exerçant sur les structures au moment du départ de l'incendie. Les actions thermiques correspondent à la montée de température des gaz chauds au sein du local et sont dominées par les conditions de transfert de chaleur à la surface des éléments de construction. Sous l'impact des actions thermiques, les températures des structures augmentent. Ce phénomène est appelé « transfert thermique » et conduit potentiellement à la dilatation thermique et la détérioration des propriétés mécaniques dans les parties échauffées de la construction. En combinaison avec les actions thermiques, des déformations significatives peuvent se produire et – dans certains cas – le bâtiment, ou une partie, peut éventuellement s'effondrer. Cet événement est appelé « comportement mécanique » [13].

### **II.1 Introduction à 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 II.1). Il constitue également un des plus importants impacts que puisse causer le feu aux structures de bâtiments. En général, la réaction de la structure au feu peut être résumée comme suit (figure II.1) :

- montée en température induite par le transfert de chaleur provenant du feu, appelée également réponse thermique de la structure ;
- 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.

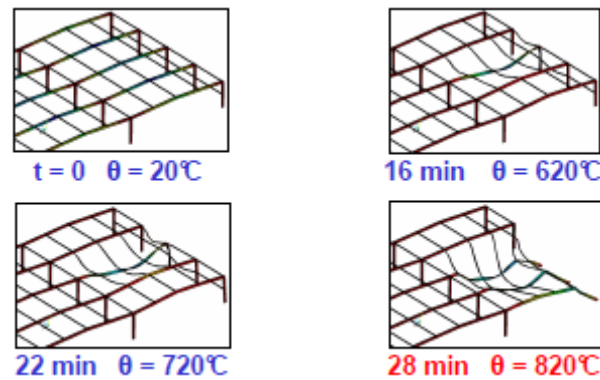


Figure II.1 Réaction au feu d'une structure[14]

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 (figure II.2) :

- 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. Quel que soit leur coût, ils restent toujours un moyen efficace pour étudier le comportement mécanique des structures exposées au feu.
- 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. [14]

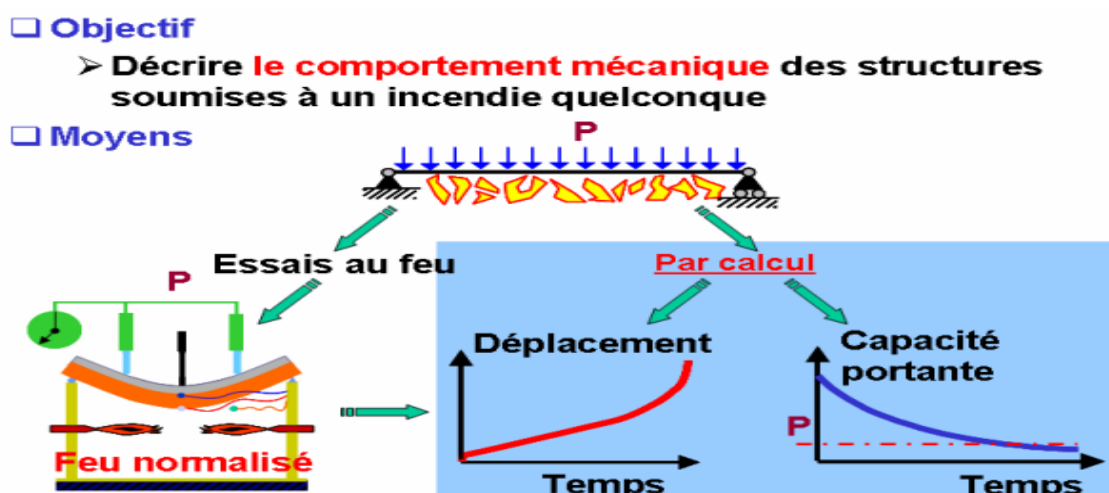


Figure II.2 : Evaluation du comportement mécanique des structures en situation d'incendie [14]

## II.2 Principes généraux d'application du calcul au feu des structures en acier

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

En ce qui concerne les structures en acier, 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 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 (chapitre III) 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 .

### II.2.2 Actions pour l'analyse mécanique – combinaison selon les eurocodes

En situation d'incendie, les charges appliquées aux structures peuvent être obtenues en appliquant la formule suivante [3] :

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,j} + (\Psi_{1,1} \text{ ou } \Psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad \dots\dots\dots(II.1)$$

où :

- ✓  $G_{k,j}$  : valeur caractéristique de l'action permanente
- ✓  $Q_{k,1}$  : valeur caractéristique de l'action variable principale
- ✓  $Q_{k,i}$  : valeur caractéristique de l'action d'accompagnement

- ✓  $\psi_{1,i}$  : coefficient de combinaison pour la valeur fréquente d'une action variable
- ✓  $\psi_{2,i}$  : coefficient de combinaison pour la valeur quasi-permanente d'une action variable

Les valeurs recommandées de  $\psi_1$  et  $\psi_2$  sont données dans le tableau 1

Action	$\Psi_0$	$\psi_1$	$\Psi_2$
<b>Charges imposées dans les bâtiments catégories</b>			
Catégorie A : domestique ; zones résidentielles	0,7	0,5	0,3
Catégorie B : zones de bureaux	0,7	0,5	0,3
Catégorie C : zones de congrégation	0,7	0,7	0,6
Catégorie D : zones de commerces	0,7	0,7	0,6
Catégorie E : zones de stockage	1,0	0,7	0,8
Catégorie F : zones de trafic routier poids du Véhicule $\leq 3\text{KN}$	0,7	0,9	0,6
Catégorie G : zones de trafic routier $30\text{ KN} < \text{poids du véhicule} \leq 160\text{ KN}$	0,7	0,5	0,3
Catégorie H : toits	0	0	0
<b>charge de neige sur les bâtiments</b>			
Finlande ; Islande, Norvège, Suède	0,7	0,5	0,2
Autre Pays membre du comité européen, pour les lieux situés a une altitude $H > 1000\text{ m a.s.l.}$	0,7	0,5	0,2
Autre Pays membre du comité européen, pour les lieux situés a une altitude $H \leq 1000\text{ m a.s.l.}$	0,5	0,2	0
<b>Charges de vent sur les bâtiments</b>	0,6	0,2	0
<b>Température (sans incendie) dans les bâtiments</b>	0,6	0,5	0

**Tableau II.1 Valeurs recommandées des facteurs  $\psi$  pour les bâtiments [11]**

Une autre notion largement utilisée dans les méthodes de calcul des Eurocodes est le niveau de chargement pour la situation d'incendie  $\eta_{fi,t}$  qui est définie comme :

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{d,fi}}{E_d} \quad \dots\dots\dots(II.2)$$

Avec :

- ✓  $E_d$  et  $E_{fi,d}$  respectivement l'effet de calcul des actions pour le dimensionnement à froid et l'effet de calcul des actions pour la situation d'incendie.

Il peut être déterminé en alternative par :

$$\eta_{fi,t} = \frac{G_k + \psi_{fi,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad \dots\dots\dots(II.3)$$

où  $\gamma_{Q,1}$  est le coefficient partiel pour l'action variable dominante et  $\gamma_G$  le coefficient partiel pour l'action permanente égale en général à la valeur de 1. En fait, le niveau de chargement  $\eta_{fi,t}$  dépend fortement du coefficient de combinaison  $\psi_{1,1}$  qui varie en fonction de la catégorie du bâtiment. Dans l'EC3-1-2, la figure suivante (figure II.3) est donnée pour illustrer clairement l'influence du ratio des charges  $Q_{k,1} / G_k$  et du coefficient de combinaison  $\psi_{1,1}$  sur le niveau de chargement en situation d'incendie

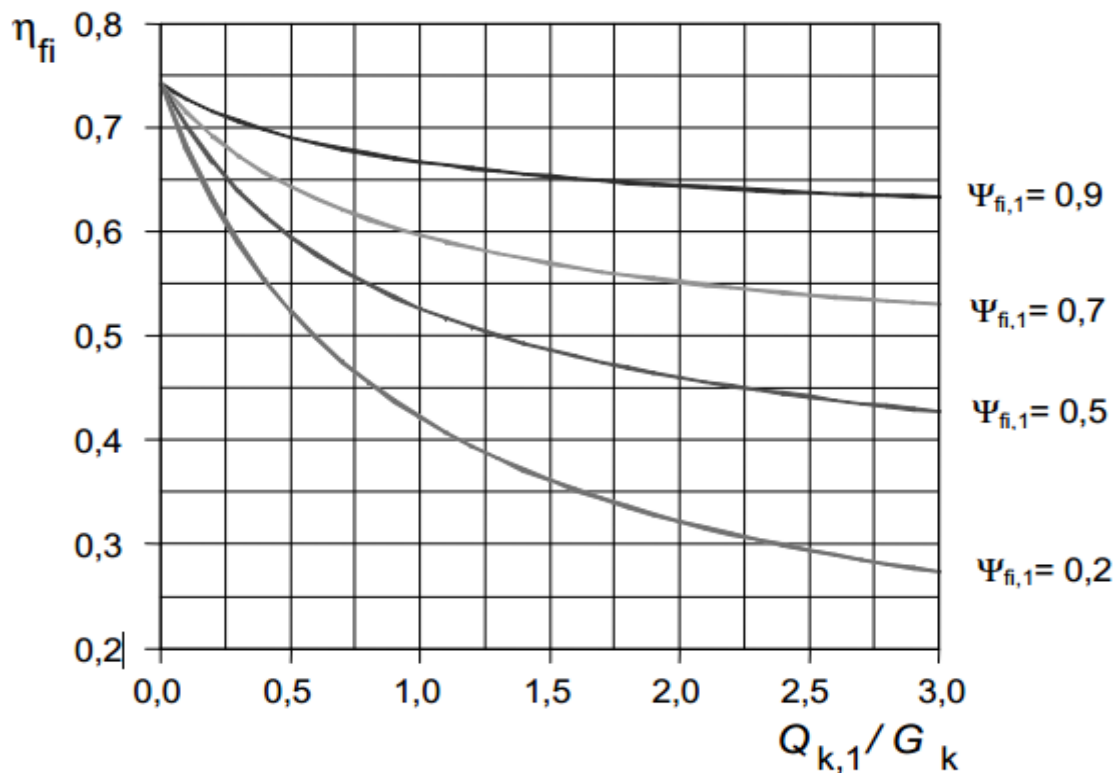


Figure II.3 Variation du coefficient de réduction  $\eta_{fi}$  avec le rapport de charges  $Q_{k,1} / G_k$ [12]

En plus de la méthode précédente pour calculer le niveau de chargement  $\eta_{fi,t}$ , une autre manière plus réaliste et plus pratique de déterminer le niveau de chargement en situation d'incendie est :

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{d,fi}}{R_d} \quad \dots\dots\dots(II.4)$$

où  $R_d$  est la résistance de calcul pour le dimensionnement à température normale ; il y a nécessairement  $E_d \leq R_d$ .

Le niveau de chargement obtenu à partir de la relation précédente est en général moins important que celui déterminé avec l'effet de calcul des actions pour le dimensionnement à température normale, donnant lieu par conséquent à un dimensionnement plus économique en situation d'incendie.

## II.3 Actions pour l'analyse thermique

### II.3.1 Règles générales

Le flux de chaleur net  $\dot{h}_{net}$  [W/m<sup>2</sup>] à la surface de l'élément permet de calculer les actions thermiques.

Le flux de chaleur net  $\dot{h}_{net}$  doit être déterminé en tenant compte du rayonnement thermique et de la convection de et sur l'environnement du feu.

La composante de rayonnement du flux de chaleur par unité de surface est déterminée par [EC1 2.2] :

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \epsilon_{res} \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left[ (\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4 \right] \left[ W/m^2 \right] \quad \dots\dots(II.5)$$

Où :

- ✓  $\Phi$  est le facteur de forme [-]
- ✓  $\epsilon_{res}$  est l'émissivité résultante [-]
- ✓  $\Theta_r$  est la température du rayonnement à proximité de l'élément [°C]
- ✓  $\Theta_m$  est la température de la surface de l'élément [°C]
- ✓  $5,67 \cdot 10^{-8}$  est la constante de Stefan Boltzmann [W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>]

**Recommandations** [11] :

- Il convient de prendre le facteur de forme  $\Phi = 1$  (valeur sécuritaire).
- La température de rayonnement  $\Theta_r$  peut être représentée par la température des gaz  $\Theta_g$ .
- La température de surface de l'élément  $\Theta_m$  résulte de l'analyse thermique.
- L'émissivité résultante  $\epsilon_{res}$  est donnée par la relation suivante :

$$\epsilon_{res} = \epsilon_f \cdot \epsilon_m \quad [-]$$

- ✓  $\epsilon_f$  est l'émissivité correspondant au compartiment de feu, généralement égale à 0,8
- ✓  $\epsilon_m$  est l'émissivité concernant la surface du matériau, il convient de la prendre égale à 0.7

La composante de convection du flux de chaleur par unité de surface selon [EC1 2.2] :

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\Theta_g - \Theta_m) \left[ W/m^2 \right] \quad \dots\dots(II.6)$$

Où :

- ✓  $\alpha_c$  est le coefficient de transfert thermique par convection [W/m<sup>2</sup> K]
- ✓  $\Theta_g$  est la température des gaz à proximité de l'élément selon l'exposition au feu [°C]
- ✓  $\Theta_m$  est la température de surface de l'élément [°C]

Le coefficient  $\alpha_c$  dépend de la courbe nominale température/temps (chapitre 1) adoptée. Dans notre cas nous utiliserons la courbe normalisée ISO 834, le coefficient  $\alpha_c$  vaut 25 W/m<sup>2</sup>K.

## II.3.2 Échauffement de l'acier

### II.3.2.1 Structures intérieures en acier non protégées

Pour une distribution de température supposée uniforme dans la section, l'augmentation de température  $\Delta\theta_{a,t}$  dans un élément en acier non protégé, pendant un intervalle de temps  $\Delta t$ , peut être déterminée par [EC3 1.2] :

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad \dots\dots(II.7)$$

Où :

- ✓  $A_m/V$  est le facteur de massivité pour l'élément non protégé
- ✓  $A_m$  est la surface exposée de l'élément par unité de longueur
- ✓  $V$  est le volume de l'élément par unité de longueur
- ✓  $C_a$  est la chaleur spécifique de l'acier, [J/kgK]
- ✓  $h_{net,d}$  est la valeur de calcul du flux thermique net par unité de surface [W/m<sup>2</sup>]
- ✓  $\Delta t$  est l'intervalle de temps [s]
- ✓  $\rho_a$  est la masse volumique de l'acier [kg/m<sup>3</sup>]

Le flux thermique net par unité de surface est le flux de chaleur net dû à la convection et au rayonnement, il est donné par la relation suivante [12] :

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad [W /m^2] \dots\dots(II.8)$$

- Notons que le facteur de massivité  $A_m/V$  est le rapport entre la surface exposée au flux thermique  $A_m$  (m<sup>2</sup>) et le volume de l'élément par unité de longueur  $V$  (m<sup>3</sup>). Le tableau (II.2) présente les relations donnant le facteur de massivité pour des éléments en acier non protégés.

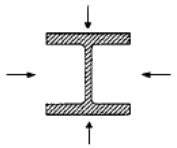
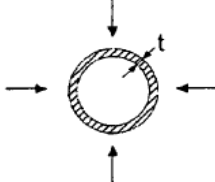
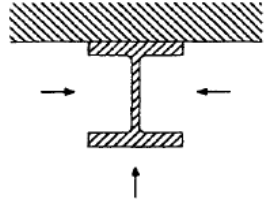
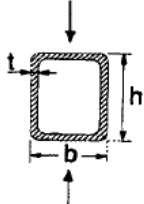
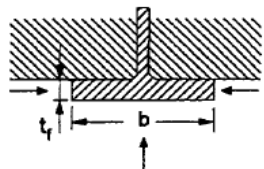
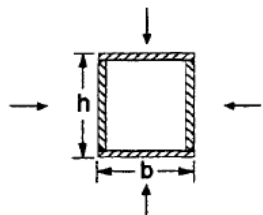
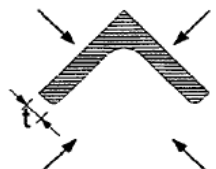
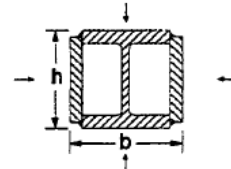
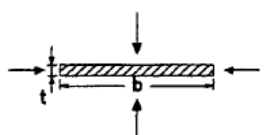
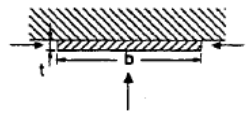
<p><b>Profilé exposé au feu sur tous les côtés :</b>  <math>\frac{A_m}{V} = \frac{\text{périmètre}}{\text{aire de la section}}</math></p> 	<p><b>Profil creux circulaire exposé au feu sur tout le pourtour :</b> <math>A_m/V = 1/t</math></p> 
<p><b>Profilé exposé au feu sur trois côtés :</b>  <math>\frac{A_m}{V} = \frac{\text{périmètre exposé au feu}}{\text{aire de la section d'acier}}</math></p> 	<p><b>Profil creux (ou caisson reconstitué soudé d'épaisseur constante) exposé au feu sur tous les côtés :</b>              si <math>t \ll b</math> : <math>A_m/V = 1/t</math></p> 
<p><b>Semelle de profilé I exposée au feu sur trois côtés :</b>  <math>A_m/V = (b + 2t_f) / (bt_f)</math>              si <math>t \ll b</math> : <math>A_m/V = 1/t_f</math></p> 	<p><b>Caisson reconstitué soudé exposé au feu sur tous les côtés :</b>  <math>\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{aire de la section d'acier}}</math></p> 
<p><b>Cornière (ou tout profilé ouvert d'épaisseur constante) exposée au feu sur tous les côtés :</b>  <math>A_m/V = 2/t</math></p> 	<p><b>Profilé I avec renforts formant caisson, exposé au feu sur tous les côtés :</b>  <math>\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{aire de la section d'acier}}</math></p> 
<p><b>Plat exposé au feu sur tous les côtés :</b>  <math>A_m/V = 2(b + t) / (b \cdot t)</math>              si <math>t \ll b</math> : <math>A_m/V = 2/t</math></p> 	<p><b>Plat exposé au feu sur trois côtés :</b>  <math>A_m/V = (b + 2t) / (b \cdot t)</math>              si <math>t \ll b</math> : <math>A_m/V = 1/t</math></p> 

Tableau II.2 Facteur de massivité  $A_m/V$  pour des éléments en acier non protégés [5]

### II.3.2.2 Structures intérieures en acier isolées avec un matériau de protection contre le feu

Pour une distribution uniforme de température dans la section, l'augmentation de température  $\Delta\theta_{a,t}$  dans un élément en acier protégé, pendant un intervalle de temps  $\Delta t$ , [1] peut être déterminée par:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p C_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad \dots\dots(II.9)$$

Avec :

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V \quad \dots\dots(II.10)$$

Où :

- ✓  $A_p/V$  est le facteur de massivité pour l'élément en acier isolé par un matériau de protection contre le feu.
- ✓  $A_p$  est la surface concernée de la protection contre le feu par unité de longueur d'élément.
- ✓  $V$  est le volume de l'élément par unité de longueur.
- ✓  $C_a$  est la chaleur spécifique de l'acier [J/kgK].
- ✓  $c_p$  est la chaleur spécifique du matériau de protection contre le feu [J/kgK].
- ✓  $d_p$  est l'épaisseur du matériau de protection contre le feu [m].
- ✓  $\Delta t$  est l'intervalle de temps [s].
- ✓  $\theta_{a,t}$  est la température de l'acier au temps t.
- ✓  $\theta_{g,t}$  est la température ambiante des gaz au temps t.
- ✓  $\Delta\theta_{g,t}$  est l'augmentation de la température ambiante des gaz pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$ .
- ✓  $\lambda_p$  est la conductivité thermique du matériau de protection contre le feu [W/mK].
- ✓  $\rho_a$  est la masse volumique de l'acier [kg/m<sup>3</sup>].
- ✓  $\rho_p$  est la masse volumique du matériau de protection contre l'incendie [kg/m<sup>3</sup>].

Le tableau (II.3 ) fournit les relations donnant le facteur de massivité pour des éléments en acier isolés par un matériau de protection contre le feu :

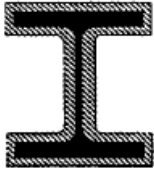
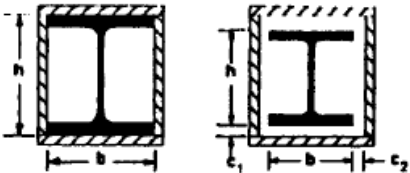
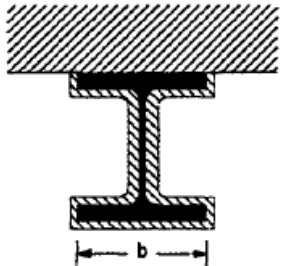
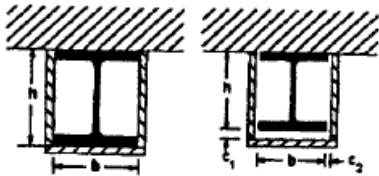
Cas	Description	Facteur de massivité ( $A_p/V$ )
	Application d'épaisseur constante suivant le contour	$\frac{\text{périmètre de l'acier}}{\text{aire de la section d'acier}}$
	Caissons d'épaisseur constante <sup>1)</sup>	$\frac{2(b + h)}{\text{aire de la section d'acier}}$
	Application d'épaisseur constante suivant le contour exposé au feu sur trois côtés	$\frac{\text{périmètre de l'acier} - b}{\text{aire de section d'acier}}$
	Caissons d'épaisseur constante exposés au feu sur trois côtés <sup>1)</sup>	$\frac{2h + b}{\text{aire de la section d'acier}}$
1) Il convient que les dimensions des espaces $c_1$ et $c_2$ ne dépassent pas normalement $h/4$ .		

Tableau II.3 Facteur de massivité d'éléments en acier isolés par un matériau de protection contre le feu [5].

### II.3.3 Courbes nominales température/temps

Il y a plusieurs façons de modéliser l'incendie et mettre en évidence les actions thermiques à l'intérieur d'un bâtiment (chapitre 1).

- courbe température/temps nominalisée.
- courbe de feu extérieur.
- courbe de feu hydrocarbure.

## II. 4. Caractéristiques mécaniques et thermiques de l'acier

### II.4.1 Caractéristiques mécaniques de l'acier

#### II.4.1.1 Résistance et propriétés de déformation

Les caractéristiques mécaniques d'un acier de construction que sont la contrainte limite de l'élasticité et le module d'élasticité diminuent lorsque la température augmente.

Il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance sur les propriétés mécaniques aux températures élevées de l'acier. En fait, des informations détaillées relatives à ce matériau ont été fournies dans l'PEC3 1.2.

Les propriétés mécaniques relatives à l'acier de construction aux températures élevées peuvent être obtenues de manière détaillée en utilisant les données fournies dans le (tableau II.4) et les (figures II.4 et II.5).

La figure II.4 fournit des informations sur la résistance et les propriétés de déformation de l'acier aux températures élevées obtenues par la relation contrainte-déformation.

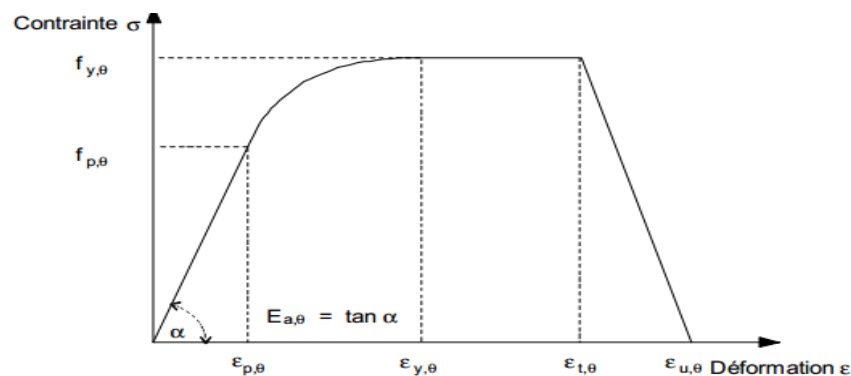


Fig II.4 Relations contrainte-déformation pour l'acier au carbone aux températures élevées [5]

Le (tableau II.4) et la (figure II.4) donnent les facteurs de réduction, par rapport aux valeurs appropriées à 20 °C, pour la relation contrainte-déformation de l'acier à températures élevées indiquées par la (figure II.5), comme suit :

- limite d'élasticité efficace, rapportée à la limite d'élasticité à 20 °C :  $k_{y,0} = f_{y,0}/f_y$  ;
- limite de proportionnalité, rapportée à la limite d'élasticité à 20 °C :  $k_{p,0} = f_{p,0}/f_y$  ;
- pente du domaine linéaire élastique, rapportée à la pente à 20 °C :  $k_{E,0} = E_{a,0}/E_a$ .

Température de l'acier $\theta_a$	Facteurs de réduction à la température $\theta_a$ par rapport à la valeur de $f_y$ ou $E_a$ à 20°C		
	Facteur de réduction (par rapport à $f_y$ ) pour la limite d'élasticité efficace $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Facteur de réduction (par rapport à $f_y$ ) pour la limite de proportionnalité $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Facteur de réduction (par rapport à $E_a$ ) pour la pente du domaine élastique linéaire $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000

**NOTE :** Pour des valeurs intermédiaires de la température de l'acier, une interpolation linéaire peut être utilisée.

Tableau II.4 Facteurs de réduction pour les relations contrainte-déformation de l'acier au carbone aux températures élevées [5]

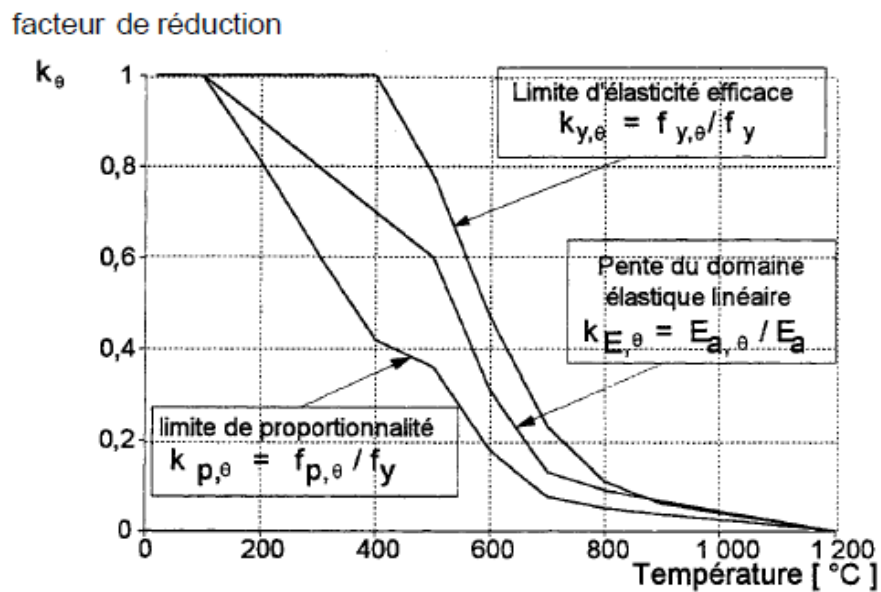


Figure II.5 Facteurs de réduction pour la relation contrainte-déformation de l'acier à des températures élevées [5]

Où :

- ✓  $f_{y,0}$  limite d'élasticité efficace ;
- ✓  $f_{p,0}$  limite de proportionnalité ;
- ✓  $E_{a,0}$  pente du domaine élastique linéaire ;
- ✓  $\epsilon_{p,0}$  déformation à la limite de proportionnalité ;
- ✓  $\epsilon_{y,0}$  déformation plastique ;
- ✓  $\epsilon_{t,0}$  déformation limite en élasticité ;
- ✓  $\epsilon_{u,0}$  déformation ultime.

### II.4.1.2 Masse volumique

La masse volumique de l'acier,  $\rho_a$ , peut être considérée comme indépendante de la température de l'acier. La valeur suivante peut être adoptée [5] :

$$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3 \dots\dots(\text{II.11})$$

### II.4.2 Caractéristiques thermiques de l'acier

#### II.4.2.1 Dilatation thermique de l'acier

En même temps que les propriétés mécaniques, le comportement relatif à la dilatation thermique a besoin d'être pris en compte dans de nombreux calculs spécifiques en ingénierie de la sécurité incendie, en particulier avec les moyens de calcul avancés. Concernant cet aspect, l'EC3 recommande d'utiliser les courbes de dilatation thermique données sur la figure II.3. Les expressions mathématiques de ces courbes sont données sur la figure II.4.[14]

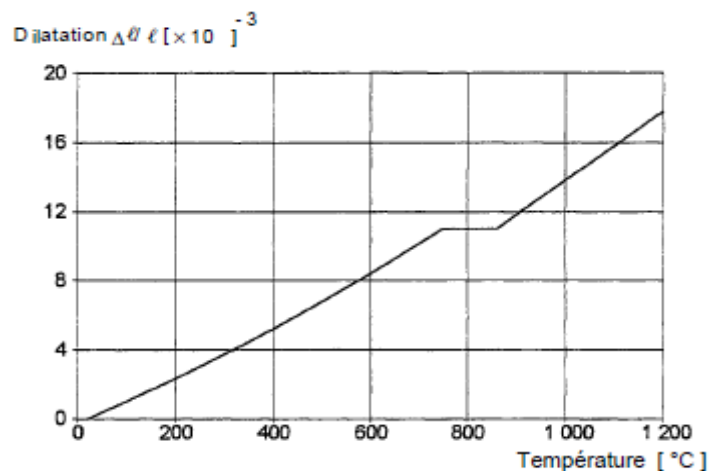


Figure II.6 Dilatation thermique de l'acier [5]

<b>Acier</b>	$\Delta l / l = -2,416 \cdot 10^{-4} + 1,2 \cdot 10^{-5} \theta_a + 0,4 \cdot 10^{-8} \theta_a^2$	pour $20^\circ\text{C} < \theta_a \leq 750^\circ\text{C}$
	$\Delta l / l = 11 \cdot 10^{-3}$	pour $750^\circ\text{C} < \theta_a \leq 860^\circ\text{C}$
	$\Delta l / l = -6,2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5} \theta_a$	pour $860^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

**Tableau II.5 Expressions mathématiques pour la dilatation thermique relative à l'acier [5]**

Où :

- ✓  $l$  est la longueur de l'élément à  $20^\circ\text{C}$
- ✓  $\Delta l$  est l'allongement de l'élément dû à la température
- ✓  $\theta_a$  est la température de l'acier  $^\circ\text{C}$

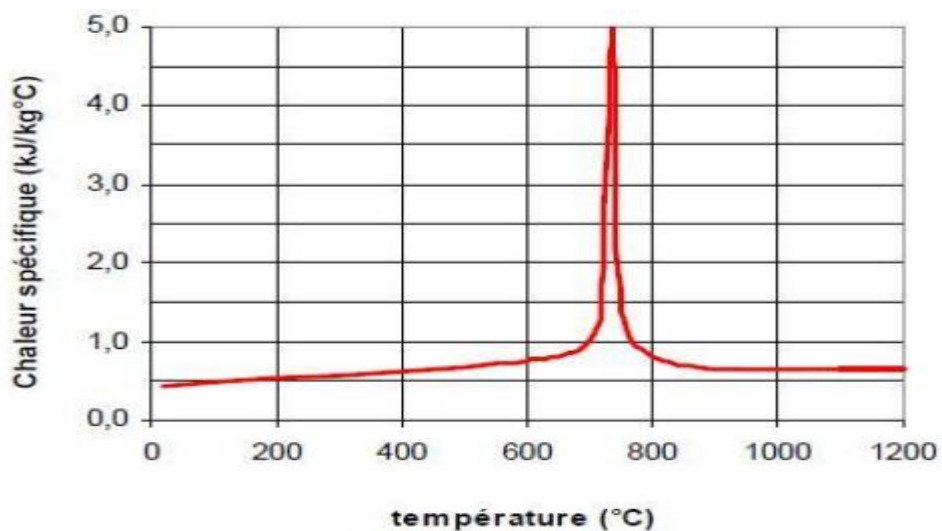
Dans les modèles de calcul simplifiés (voir chapitre 4), la relation entre la dilatation thermique relative et la température de l'acier peut être considérée comme constante. Dans ce cas, la dilatation relative peut être déterminée par EC3 1.2 :

$$\Delta l / l = 14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20) \dots (\text{II.12})$$

#### II.4.2.2 Chaleur spécifique de l'acier

La chaleur spécifique, notée  $C$ , étant la quantité de chaleur nécessaire pour élever (ou baisser) de  $1^\circ\text{C}$  la température d'une masse d'un corps, solide ou liquide, égale à l'unité. Elle s'exprime en  $\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$  [15].

La variation de la chaleur spécifique avec la température est illustrée par la figure II.7.



**Figure II.7 Chaleur spécifique de l'acier au carbone, en fonction de la température. [6]**

Elle peut être déterminée mathématiquement par (tableau II.6) :

$\theta_a$ (°C)	$C_a$ (J/kg.K)
$20\text{ °C} \leq \theta_a < 600\text{ °C}$	$425 + 7.73 \times 10^{-10}\theta_a - 1,69 \times 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6}\theta_a^3$
$600\text{ °C} \leq \theta_a < 735\text{ °C}$	$721 + (5371 / (738 - \theta_a))$
$735\text{ °C} \leq \theta_a < 900\text{ °C}$	$605 + (7624 / (\theta_a - 731))$
$900\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1\ 200\text{ °C}$	650

Tableau II.6 les valeurs de Chaleur spécifique de l'acier en fonction de température [5]

Dans les modèles de calcul simplifiés (chapitre III), la chaleur spécifique peut être considérée comme indépendante de la température de l'acier. Dans ce cas, la valeur suivante peut être prise [Ec3]:

$$C_a = 600 \text{ J/kgK}$$

### II.4.2.3 Conductivité thermique de l'acier

C'est la propriété physique d'un matériau qui caractérise sa capacité à conduire plus ou moins facilement la chaleur. Plus un matériau est conducteur de la chaleur, plus sa conductivité thermique est élevée. Elle est notée  $\lambda$ . L'unité dans le système internationale est le W/m°C. Les corps dont la conductivité thermique à la température ambiante est de l'ordre de 0.1W/m°C ; ou inférieure à cette valeur, peuvent être considérés comme des isolants thermiques (mauvais conducteurs de la chaleur)[15] .

La variation de la conductivité thermique  $\lambda_a$  de l'acier en fonction de la température est illustrée à la figure II.8 :

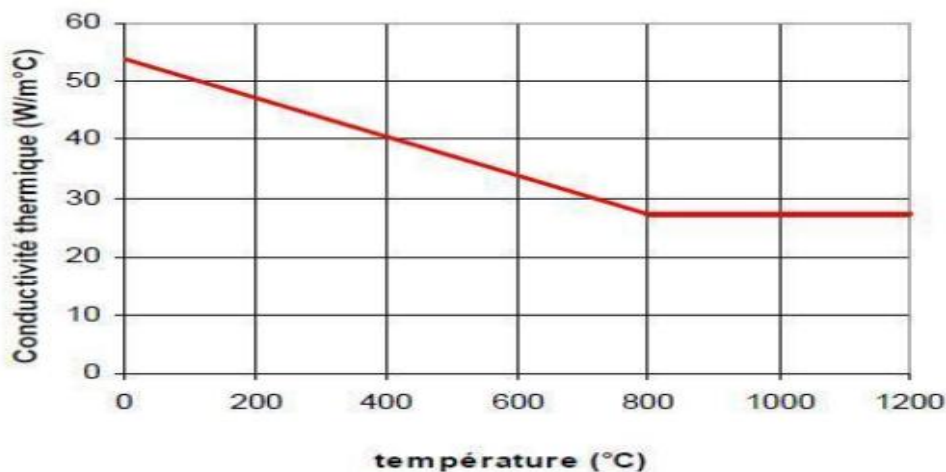


Figure II.8 Conductivité thermique de l'acier au carbone en fonction de la température [6]

La conductivité thermique de l'acier la peut être déterminée mathématiquement comme suit :

$\theta_a$ (°C)	$\lambda_a$ (W/m°C)
$20\text{ °C} \leq \theta_a < 800\text{ °C}$	$54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a$
$800\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1\ 200\text{ °C}$	$\lambda_a = 27,3$

**Tableau II.7 les valeurs de Conductivité thermique de l'acier en fonction de température [5]**

où :

✓  $\theta_a$  est la température de l'acier [°C].

Dans les modèles de calcul simplifiés (chapitre4), la conductivité thermique peut être considérée comme indépendante de la température de l'acier. Dans ce cas, la valeur suivante peut être prise [5]:

$$\lambda_a = 45\text{ W/m.°C}$$

### Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le comportement mécanique et thermique des structures en situation d'incendie. Nous avons détaillé et d'une manière explicite les différentes actions sollicitant les éléments de structure et les Principes généraux d'application du calcul au feu des structures en acier à la condition d'incendie, ensuite nous avons détaillé les Caractéristiques mécaniques et thermiques de l'acier par des figures et des tableaux.

## **Introduction**

A travers ce chapitre, nous présentons les différentes méthodes et outils de calculs qu'on a pu trouver dans le domaine du dimensionnement au feu des structures en acier tout en progressant des méthodes simples aux méthodes les plus complexes et précisant les limites et le domaine d'applicabilité.

Alors que la norme Eurocode1 partie 2-2 présente les charges liées au feu et les combinaisons de charges accidentelles s'y rapportant, les autres parties des Eurocodes feu (voir chapitre I) sont plus orientées vers les règles spécifiques d'analyse relatives aux matériaux de construction spécifiques. Dans notre cas le matériau utilisé est l'acier, nous utiliserons pour cela l'Eurocode3 partie 1-2.

### **III.1 Analyse de la résistance au feu**

La résistance au feu d'un bâtiment peut s'obtenir soit expérimentalement, soit numériquement. L'approche numérique de ce problème est développée dans les parties 1-2 « Analyse des bâtiments soumises au feu » dans les Eurocodes feu relatifs au matériau de construction utilisé (voir chapitre I)

### **III.2 Sollicitations thermiques**

La première étape, lorsque l'on exécute une analyse de résistance au feu, est de choisir ou de définir une courbe de feu. Nous pouvons choisir entre 3 courbes nominales prédéfinies (feu standard, feu externe, feu d'hydrocarbure), ou nous définissons nous même une courbe de température de feu paramétré voir un modèle de feu avancé qui se rapproche d'un feu naturel. Dans notre cas, nous utiliserons la courbe de feu standard ISO 834. La résistance au feu souhaitée doit aussi être spécifiée. Autrement dit, il faut définir le temps durant lequel la structure est capable de résister à l'incendie.

Sur base de ces données, la variation de température, dans un espace déterminé durant un temps imposé, est connue.

Bien qu'avec un certain délai, la température de la structure suit l'augmentation de la température des gaz ambiants. C'est pourquoi l'étape suivante consiste à déterminer les températures dans les éléments structuraux, soumis à un incendie, pendant une période donnée. En d'autres mots, on doit calculer la réponse thermique de la structure c'est-à-dire la variation de température dans les sections et éventuellement les efforts engendrés par la hausse de température [16].

### III.3 La réponse thermique

Avec l'accroissement de température  $\theta_g$  des gaz, la température de la structure augmente aussi. On observe bien sûr un délai entre la variation de température des gaz et celle de la structure. Etant donné que les sections en acier sont caractérisées par une grande conductivité thermique (facteur  $\lambda$ ) et qu'elles possèdent des parois relativement minces, ce type de section se réchauffe de façon assez uniforme. C'est pourquoi on admet dès le départ l'hypothèse de considérer une température identique en tout point de la section métallique.

#### III.3.1 Structures en acier nus :

Les règles de calcul pour l'évolution de la température d'une structure en acier nue (c'est-à-dire non-protégée) recommandées dans la version Eurocode3 partie 1-2 sont basées sur les valeurs conventionnelles pour les coefficients du transfert thermique à la fois par rayonnement et par convection (chapitre 2). Ces valeurs sont choisies de sorte à obtenir des résultats de calcul qui s'accordent raisonnablement avec les résultats expérimentaux [16].

L'accroissement de température  $\Delta\theta_{a,t}$  pour un élément en acier non-protégé durant un intervalle de temps  $\Delta t$  peut être ainsi déterminé à partir de l'équation (II.7) (voir chapitre II) :

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad \dots\dots(II.7)$$

#### III.3.2 Structure en acier protégée

L'équation pour évaluer l'évolution de température dans les structures en acier protégées est similaire à l'équation (II.7). Toutefois, dans ce cas, l'effet de la protection doit être pris en compte lors du calcul du flux thermique net  $\dot{h}_{net,d}$ . Ce dernier dépend donc de l'épaisseur de la couche de protection ( $d_p$ ) et des propriétés du matériau de protection ( $\lambda_p, \rho_p, c_p$ ) (voir chapitre II) d'une section en acier protégée. Ces propriétés sont introduites dans l'équation (II.10) au travers du facteur  $\Phi$ .

$$\Phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V} \quad \dots\dots(II.10)$$

✓  $\Phi$  est appelé le facteur de participation de la couche de protection

En situation pratique, la chute de température au travers de la protection est relativement importante. Par conséquent, la température de surface de la protection est proche de celle des gaz chauds [16].

L'accroissement de température  $\Delta\theta_{a,t}$  pour un élément en acier protégé durant un intervalle de temps  $\Delta t$  peut être ainsi déterminé à partir de l'équation (II.9) (voir chapitre II) :

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p C_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad \dots\dots(II.9)$$

### III.4 Le comportement mécanique

Le comportement mécanique d'une structure exposée à un incendie, couvre un ensemble d'actions mécaniques qui se produisent sur le bâtiment pendant toute la durée de l'incendie.

Suite à une augmentation de la température, on constate :

- Une dilatation de la structure
- La résistance et la rigidité des matériaux de construction se détérioreront impliquant des déformations plus importantes ;
- La résistance et la rigidité des matériaux de construction se détérioreront de sorte que la structure ne sera plus capable de supporter les efforts auxquels elle est soumise.

Comme cela a déjà été dit, les propriétés mécaniques se détériorent avec une augmentation de la température. C'est particulièrement vrai pour la contrainte élastique maximale et pour le module d'élasticité de l'acier au carbone dont les valeurs diminuent fortement avec l'augmentation de température. Cette diminution est matérialisée par les facteurs de réduction  $k_y, \theta$  et  $k_E, \theta$ . appliqués respectivement à la contrainte d'élasticité et le module d'élasticité longitudinale (voir chapitre II).

Pour les méthodes avancées de calcul, outre les propriétés mécaniques, il faut aussi connaître les propriétés de dilatation. Dans notre cas nous optons pour le calcul simplifié comme il sera explicité dans la suite de ce chapitre, par conséquent la propriété de dilatation ne sera pas utilisée.

### III.5 Approches d'analyse pour le comportement mécanique

Pour calculer la réponse mécanique des structures en acier exposées au feu, trois approches d'analyse peuvent être utilisées (voir figure III.1) :

- Analyse par élément, dans laquelle chacun des éléments de la structure sera vérifié en les considérant totalement séparés des autres éléments et la liaison avec d'autres éléments sera remplacée par les conditions aux limites appropriées.
- Analyse de parties de la structure, dans laquelle une partie de la structure sera directement prise en compte en utilisant des conditions aux limites appropriées pour représenter sa liaison avec le reste de la structure .
- Analyse globale de structure, dans laquelle la structure totale sera utilisée dans le calcul.

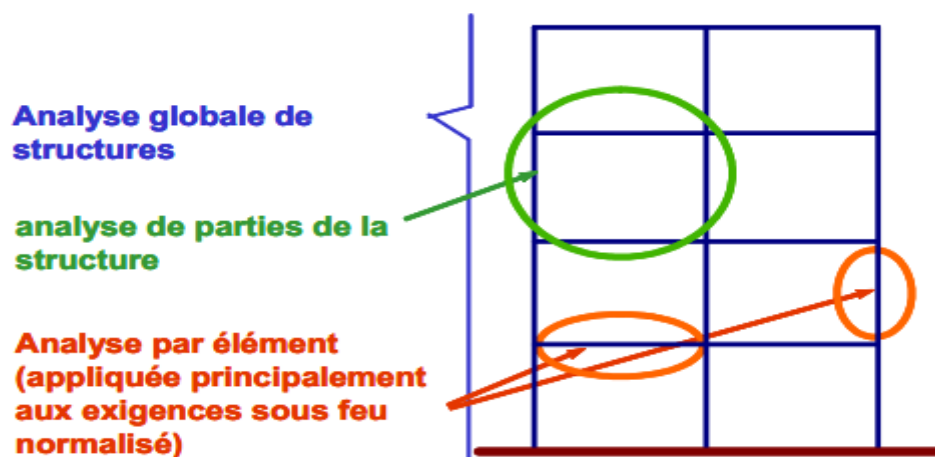


Figure III.1 Différentes approches d'analyse pour le comportement mécanique des structures en situation d'incendie [14]

Par rapport à ces procédures d'analyse relatives au comportement mécanique des structures en situation d'incendie, les remarques suivantes peuvent être faites :

- L'analyse par élément s'applique aux éléments de structure isolés (élément par élément), donc facile à utiliser, en particulier avec les méthodes de calcul simplifiées et par conséquent largement utilisée sous condition d'incendie normalisé (par exemple : feu ISO-834)

- L'analyse de parties de la structure ou l'analyse de structure globale considèrent au moins plusieurs éléments de la structure, si bien que l'effet d'interaction entre eux ainsi que la redistribution de charge des parties échauffées (parties affaiblies à l'intérieur du compartiment du feu) aux parties froides (parties plus résistantes en dehors du compartiment du feu) peuvent être pris en compte directement et de manière exacte. Par conséquent, l'analyse de la structure globale permet ainsi d'obtenir une situation plus réaliste du comportement au feu de la structure [14].

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

Figure II.2 Comparaison de différentes approches d'analyse pour le comportement mécanique des structures en situation d'incendie [14]

### III.6 Méthodes de calcul pour les éléments en acier en situation d'incendie

Lorsqu'en cas d'incendie, une résistance mécanique est exigée, les structures en acier doivent être dimensionnées et réalisées de manière à assurer leur fonction porteuse pendant l'exposition au feu appropriée.

Selon les Eurocodes feu, deux types de méthodes de calcul peuvent être utilisés pour évaluer le comportement mécanique des structures en situation d'incendie en relation avec les différentes approches d'analyse expliquées ci-dessus. On repère notamment :

- Modèles de calcul simplifiés ; ce type de méthode de calcul peut être scindé en deux différentes familles, la première est la fameuse méthode de température critique largement appliquée aux éléments de structure en acier et la deuxième correspond à toutes les méthodes de calcul simplifiées établies pour l'analyse par élément pour les structures en acier.

La figure suivante synthétise les différentes étapes de la méthode simplifiées.

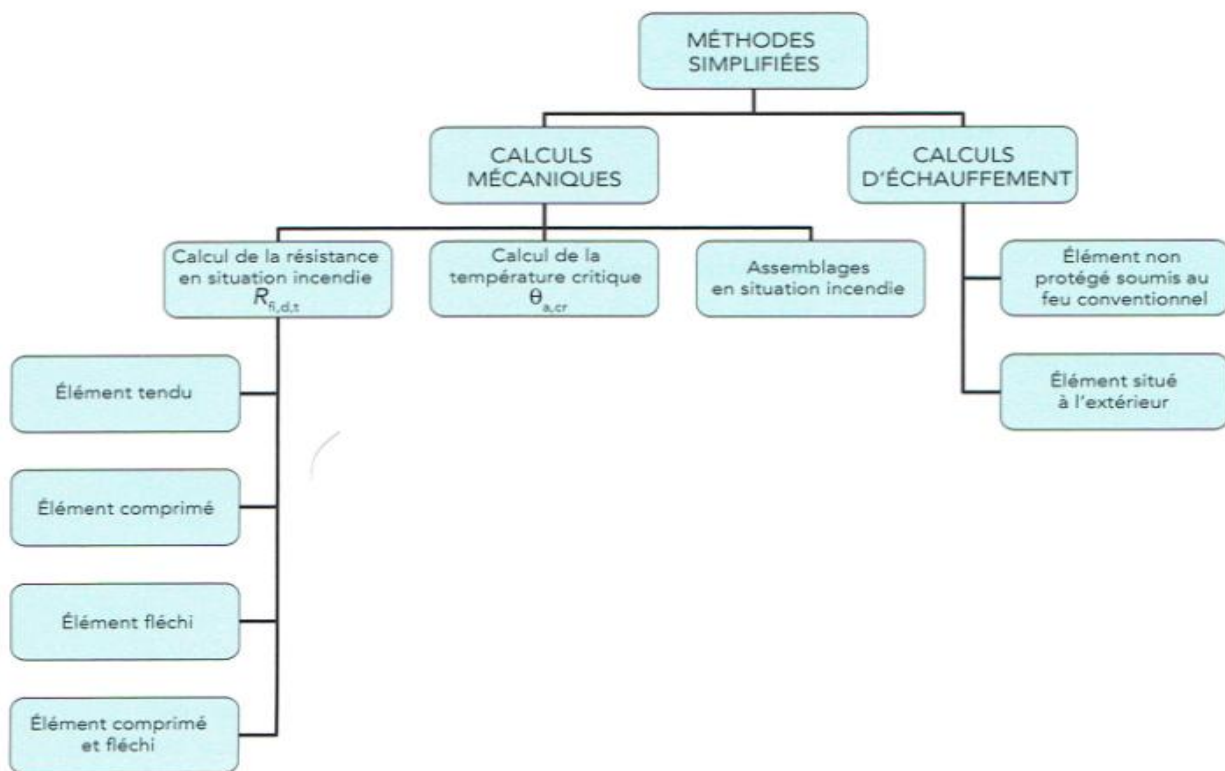


Figure III.3 diagramme de la méthode simplifiée [17].

- Modèles de calcul avancés ; cet outil d'analyse peut être appliqué en principe sur tout type de structure et il est en général basé soit sur la méthode des éléments finis, soit sur la méthode des différences finies. Dans l'ingénierie de la sécurité incendie moderne, il devient le moyen de calcul de plus en plus utilisé grâce aux nombreux avantages qu'il offre.

Avant d'entrer dans l'application détaillée de toutes les méthodes de calcul ci-dessus, il est important d'avoir une bonne idée du domaine d'application de ces méthodes de calcul.

Le tableau ( III.1) illustre clairement les différentes possibilités d'application des deux méthodes de calcul sous condition de feu nominal (normalisé). On peut facilement constater que pour l'analyse par élément, toutes les méthodes peuvent être appliquées. Dans certains cas rares, la méthode de calcul peut être également appliquée à l'analyse de la résistance mécanique d'une partie de la structure soumise au feu, par exemple les portiques métalliques simples. Par conséquent, les méthodes de calcul simplifiées sont pratiquement limitées uniquement à l'analyse par élément. Et même en situation de feu nominal (normalisé), l'analyse au feu pour des structures peu compliquées doit généralement être réalisée au moyen des modèles de calcul avancés.

**□ Action thermique définie sous feu normalisé**

Type d'analyse	Modèles de calcul simplifiés	Modèles de calcul avancés
Analyse par élément	Oui	Oui
Analyse de parties de la structure	Oui (si disponible)	Oui
Analyse globale de la structure	Non applicable	Oui

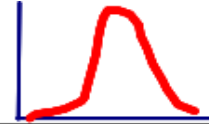
Tableau III.1 Domaine d'application des différentes méthodes de calcul en situation de feu nominal (normalisé)[14]

Sous condition de feu naturel, l'application des méthodes de calcul simplifiées est largement limitée par le fait que la condition d'échauffement des éléments est totalement différente de celles sous condition de feu normalisé. C'est la raison pour laquelle le tableau (III.2) montre une majorité négative des situations d'application pour les méthodes de calcul simplifiées. Le seul exemple pour lequel elles peuvent être utilisées concerne les éléments en acier avec ou sans protection passive contre l'incendie et entièrement entourés par le feu.

Toutefois, l'application du modèle de calcul avancé en cas du feu naturel n'est pas limitée du fait qu'ils peuvent être utilisés pour analyser de manière précise à la fois la réponse thermique de tous les éléments de structure soumis à différentes actions thermiques variables et le comportement mécanique des éléments de structure, les parties de la structure ou la structure totale, par prise en

compte des résistances et des raideurs réelles des matériaux aux températures élevées, de l'effet de dilatation thermique, du gradient de température, [14] etc.

□ Action thermique définie sous feu naturel



Type d'analyse	Modèles de calcul simplifiés	Modèles de calcul avancés
Analyse par élément	Oui (si disponible)	Oui
Analyse de parties de la structure	Notn applicable	Oui
Analyse globale de la structure	Non applicable	Oui

Tableau III.2 Domaine d'application des différentes méthodes de calcul sous condition de feu naturel [14]

### III.6.1 Modèles de calcul simplifiés

#### III.6.1.1 Méthode de la température critique

La stabilité au feu d'un élément de structure cesse d'être assurée lorsque, sous l'effet de l'élévation de température, la résistance mécanique de cet élément devient inférieure aux sollicitations auxquelles il est soumis. La température atteinte à cet instant par l'élément de structure est appelée température critique, c'est la température de ruine de la structure en acier. Celle ci dépend du taux d'utilisation  $\mu_0$  [18].

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0} \quad \dots\dots(III.1)$$

- ✓  $E_{fi,d}$  L'effet d'actions de calcul en cas d'incendie
- ✓  $R_{fi,d,0}$  La résistance de calcul en cas d'incendie au temps  $t = 0$ .

La température critique de l'acier  $\theta_{a,cr}$  au temps  $t$ , pour une distribution de température uniforme, peut être déterminée pour un taux d'utilisation  $\mu_0$  en prenant [4] :

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[ \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad \dots\dots(III.2)$$

La température critique se calcule comme suit :

- Tout d'abord, il est nécessaire de déterminer l'effet des actions en situation d'incendie  $E_{fi,d}$ .
- Deuxièmement, il convient de calculer la résistance de calcul  $R_d$  ou l'effet des actions à température normale  $E_d$ .
- Troisièmement, le niveau de chargement correspondant  $\eta_{fi,t}$  peut être obtenu en utilisant  $\eta_{fi,t} = E_{fi,d} / R_d$
- Ensuite, le taux d'utilisation  $\mu_0$  peut être facilement déterminé avec  $\mu_0 = \eta_{fi,t} \gamma_{M,fi} / \gamma_M$  avec :  $\gamma_M$  coefficient partiel de sécurité à température ambiante et  $\gamma_{M,fi}$  coefficient partiel de sécurité en situation d'incendie.
- Finalement la température critique est évaluée selon l'équation (III.2).

Selon l'hypothèse d'une distribution de température uniforme de l'acier, le calcul de la résistance au feu par la méthode de température critique doit suivre les trois étapes suivantes :

- étape 1 : détermination de la température critique de l'élément (à savoir la température à laquelle la ruine de l'élément se produit) ; cette température dépend du ratio entre la charge appliquée et la capacité portante mécanique à température normale de l'élément pris en considération.
- étape 2 : détermination de l'évolution de la température dans la section en acier ; c'est le résultat du calcul de transfert thermique de l'élément en acier (chapitre2).
- étape 3 : détermination de la résistance au feu de l'élément en acier ; c'est la combinaison des étapes 1 et 2 ci-dessus [13].

Ces étapes peuvent être schématisées comme l'indique la figure (III.4).

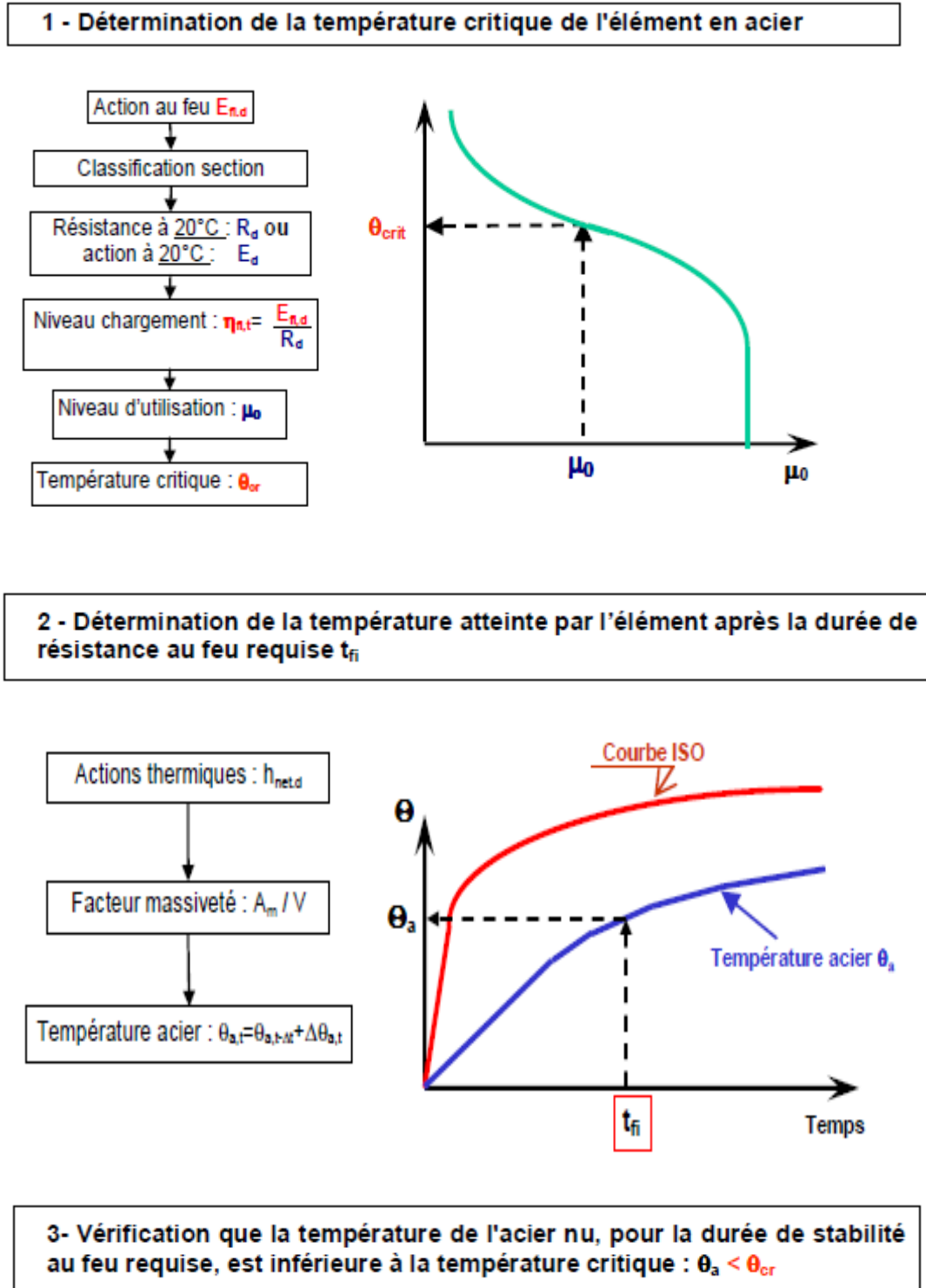


Figure III.4 Principe d'application de la méthode de la température critique [19]

En principe, cette méthode n'est applicable qu'aux éléments de structure comprenant une section en acier échauffée de façon uniforme ou avec un léger gradient de température. Cette méthode peut ainsi être utilisée pour les éléments de structure suivants:

- Poutres en acier avec ou sans protection contre l'incendie et dont la section en acier est exposée sur quatre ou trois faces.
- Poteaux en acier avec ou sans protection passive et entièrement entourés par le feu
- Eléments tendus en acier exposés au feu.

**III.6.1.2 Méthode simplifiée**

La méthode simplifiée correspond à toutes les méthodes de calcul simplifiées établies pour l'analyse par élément des structures en acier.

La fonction porteuse d'un élément en acier est supposée assurée après un temps t d'exposition à un feu donné, si :

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \dots\dots(II.3)$$

- ✓  $E_{fi,d}$  est la valeur de calcul de l'effet des actions pour la situation d'incendie de calcul.
- ✓  $R_{fi,d,t}$  est la résistance de calcul correspondante de l'élément en acier, pour la situation d'incendie de calcul, au temps t.[1]

La résistance de calcul  $R_{fi,d,t}$  au temps t est déterminée pour la distribution de température dans la section, en modifiant la détermination de la résistance de calcul à température normale  $R_{fi,d,0}$  selon l'ENV 1993-1-1, par la prise en compte des propriétés mécaniques de l'acier aux températures élevées, à savoir :  $R_{fi,d,t} = k_{y,0} R_{fi,d,0}$ . avec  $k_{y,0}$  facteur de réduction (voir chapitre II)

**❖ Exemple de calcul de la résistance au flambement par la méthode simplifiée**

Concernant la méthode simplifiée, le calcul est en fonction :

- Du type de sollicitation (traction, compression, flexion simple, flexion composée) [5]
- De la classification de la section [20]

Nous prendrons l'exemple d'un élément comprimé de classe 1, 2 ou 3 :

- Il convient de déterminer la résistance de calcul au flambement  $N_{b,fi,t,Rd}$  au temps  $t$  d'un élément comprimé dont la section est de Classe 1, Classe 2 ou Classe 3, par :

$$N_{b,fi,t,Rd} = [\chi_{fi}/1,2] A k_{y,\theta,max} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \dots\dots(III.4)$$

Où :

- ✓  $\chi_{fi}$  est le facteur de réduction pour le flambement par flexion en situation d'incendie de calcul ;
- ✓  $k_{y,\theta,max}$  est le facteur de réduction donné en 3.2.1 pour la limite d'élasticité de l'acier, à la température maximale de l'acier  $\theta_{a,max}$  atteinte au temps  $t$ .

La constante 1,2 de cette expression est un facteur de correction qui prend en compte un certain nombre d'effets. La valeur est empirique.

Il convient de prendre pour la valeur de  $\chi_{fi}$  la plus petite des valeurs de  $\chi_{y,fi}$  et de  $\chi_{z,fi}$ , déterminées comme indiqué en 5.5.1 de l'ENV 1993-1-1, mais en utilisant :

- la courbe de flambement  $c$ , indépendamment du type de section ou de l'axe de flambement.
- la longueur de flambement  $l_{fi}$  pour la situation d'incendie de calcul au lieu de  $l$ .
- l'élanement réduit  $\lambda_{\theta,max}$  pour la température  $\lambda_{a,max}$  donné par :

$$\bar{\lambda}_{\theta,max} = \bar{\lambda} [k_{y,\theta,max} / k_{E,\theta,max}]^{0,5} \quad \dots\dots(III.5)$$

où :

- ✓  $k_{y,\theta,max}$  est le facteur de réduction donné en 3.2.1 [EC3 1-2] pour la limite d'élasticité de l'acier à sa température maximale  $\theta_{a,max}$  atteinte au temps  $t$ .
- ✓  $k_{E,\theta,max}$  est le facteur de réduction donné en 3.2.1 [EC3 1-2] pour la pente du domaine élastique linéaire, à la température maximale de l'acier  $\theta_{a,max}$  atteinte au temps  $t$ .

Les valeurs de  $\chi_{y,f}$  et de  $\chi_{z,fi}$  peuvent également être déterminées comme suit :

- pour  $\theta \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$  :

$\chi$  est calculé conformément à l'ENV 1993-1-1 (température normale) ;

- pour  $100 \text{ }^\circ\text{C} < \theta < 400 \text{ }^\circ\text{C}$  :

$\chi$  est interpolé linéairement en fonction de la température, entre les valeurs obtenues pour 100 °C et 400 °C ;

- pour  $\theta \geq 400 \text{ }^\circ\text{C}$  :

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad \text{.....(III.6)}$$

avec :

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2] \quad \text{.....(III.7)}$$

Et

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235 / f_y} \quad \text{.....(III.8)}$$

Dans ce cas, la constante 1,2 de la formule (III.4) n'a pas à être utilisée.

Les calculs peuvent être simplifiés en prenant, quelle que soit la température,  $\bar{\lambda}_{\theta, \max} = 1,3 \cdot \bar{\lambda}$

avec  $\bar{\lambda}$  valeur selon la norme expérimentale P 22-311. [Eurocode 3 partie 1-2]

- Il convient de déterminer généralement la longueur de flambement  $l_{fi}$ , d'un poteau en situation d'incendie de calcul, comme dans le calcul à température normale. Cependant, dans une ossature contreventée, la longueur de flambement  $l_{fi}$  d'un poteau d'étage peut être déterminée en le considérant comme maintenu en translation au droit de ses assemblages rigides ou semi-rigides avec les poteaux des compartiments d'incendie inférieur et supérieur ; cela à condition que la résistance au feu des éléments de construction qui séparent ces compartiments ne soit pas inférieure à celle du poteau.

- Dans le cas d'une ossature en acier où chaque niveau constitue un compartiment d'incendie séparé de résistance au feu suffisante, la longueur de flambement d'un poteau est  $l_{fi} = 0,5L$  dans un étage intermédiaire et  $l_{fi} = 0,7L$  au dernier étage ;  $L$  est la longueur d'épure pour l'étage correspondant, voir figure III.5.

Cette clause ne s'applique qu'aux ossatures contreventées.

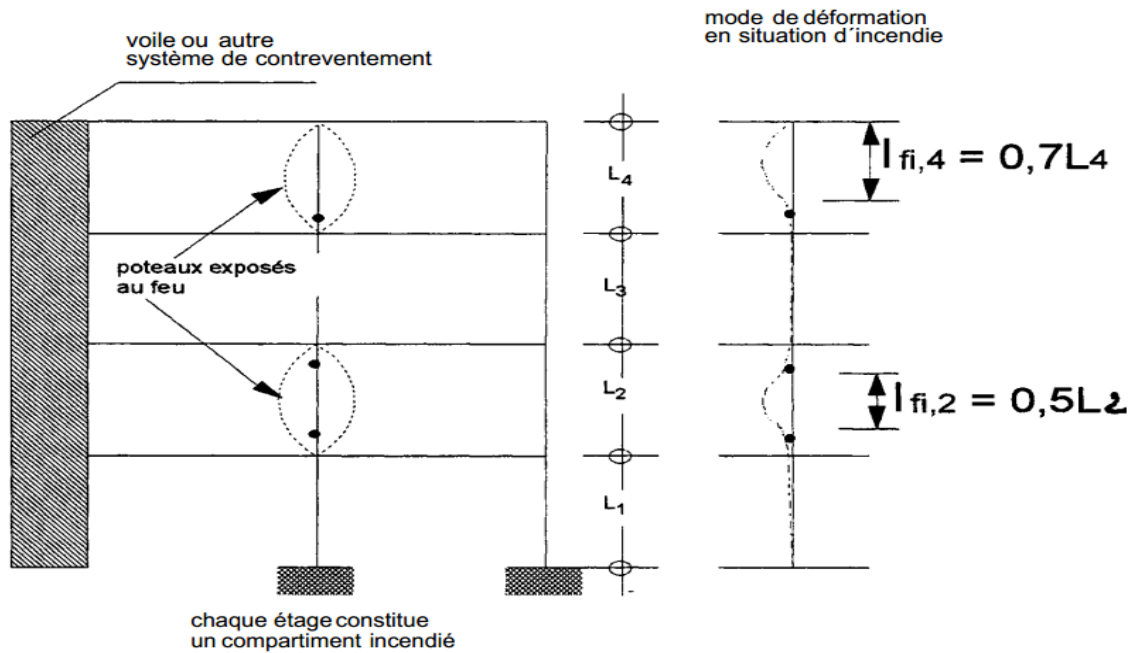


Figure III.5 Longueurs de flambement  $l_{fi}$  de poteaux d'ossatures contreventées [5]

### III.6.2 Modèles de calcul avancés

En ce qui concerne les modèles de calcul avancés, ils peuvent, en principe, être appliqués pour analyser un élément quelconque, une partie de structure ou de structure globale dans la vérification au feu. Toutefois, les aspects suivants doivent être pris en compte :

Les modèles de calcul avancés pour le comportement mécanique devraient être fondés sur les principes reconnus et les hypothèses de la théorie de la mécanique des structures, prenant en compte les effets de la température.

Tous les modes de ruine qui ne sont pas couverts par le modèle de calcul avancé (y compris le voilement local, une insuffisance de capacité de rotation ou la ruine par cisaillement) doivent être écartés par des moyens appropriés, par exemple des dispositions constructives.

Les modèles de calcul avancés peuvent être utilisés avec toute courbe d'échauffement à condition que les propriétés des matériaux soient connues dans les domaines de température concernés.

Les effets des contraintes et des déformations induites à la fois par l'accroissement de température et par des différences de température, doivent être pris en compte.

Le modèle de réponse mécanique doit également prendre en compte :

- les effets combinés des actions mécaniques, des imperfections géométriques et des actions thermiques
- les variations des propriétés mécaniques des matériaux avec la température
- les effets de non-linéarité géométrique
- les effets des propriétés non linéaires des matériaux, comprenant les effets de déchargement sur la rigidité de la structure [14].

### **III.7 Les outils de calcul**

Dans ce paragraphe, nous voulons non seulement faire une revue des logiciels d'incendie, mais aussi fournir des informations qui permettent à l'utilisateur de choisir le logiciel d'incendie qui convient à ses besoins. Pour choisir le plus approprié, il est très important de savoir ce qu'est un modèle d'incendie, ce qu'est un logiciel de simulation d'incendie et quel est le domaine d'application de ces modèles.

Un modèle numérique d'incendie est un outil qui simule les événements liés au feu, de la combustion à l'évacuation des personnes en passant par l'effondrement des structures (il ne s'agit pas seulement d'évaluer la propagation du feu et des fumées). Ces modèles peuvent être déterminés soit d'après un modèle expérimental, soit d'après un modèle mathématique employant une série d'équations qui décrivent les phénomènes liés à l'incendie [20].

Au vu de la complexité de ces équations et du grand nombre d'itérations que leurs résolutions impliquent, l'ordinateur est indispensable. Le logiciel de modélisation n'est qu'un outil permettant de résoudre ces équations.

**III.7.1 Modèles Thermiques d'Incendie**

Pour ce domaine d'application, les logiciels que l'on peut trouver se différencient selon leur méthode de résolution des réponses thermiques associées au feu.

La classification des modèles thermiques d'incendie est la suivante (voir chapitre I) :

- Modèles de développement de feu simplifiés
- Modèles de développement de feu avancés

**III 7.1.1 Modèles simplifiés**

Le tableau (III.3) regroupe certains logiciels qui utilisent les modèles simplifiés.

logiciel	pays	Description
<b>ODIFISEK-CaPaFi</b>	Luxembourg	Calcul de la température dans un élément métallique exposé au maximum à 5 sources locales de feu. Basé sur l'EN 1991 -1-2, EN 1993-1-2 et le projet ECSC « Large Compartiments » et « Closed Car Parks »
<b>DIFISEK-EN 1991-1-2 Annexe A</b>	Luxembourg	Calcul paramétrique de la température dans un compartiment, ainsi que de la température des éléments métalliques protégés ou non
<b>DIFISEK-TEFINAF</b>	Luxembourg	Calcul du champ de température dans une section transversale de profilé métallique en fonction du temps. Le profilé est situé sous le plafond à une distance radiale du foyer. Ce modèle est basé sur le rapport EUR 18868 : « Développement des règles de calculs pour les structures métalliques soumises aux incendies naturels dans les compartiments de grandes dimensions ».

Tableau III.3 Exemple des logiciels des modèles simplifiés [20]

### III 7.1.2 Modèles avancés

Le tableau (III.4) regroupe des logiciels qui utilisent les modèles avancés

logiciel	pays	Description
Ozone v2.2.5	Belgique	Modèle de zone. one zone model et two zones model
ASET/ASET-B	USA	Modèle de zones mono compartiment sans aération
Cfire-X	Allemagne/ Norvège	Modèle de zones adapté au feu de nappe (i.e. de liquide inflammable)
CiFi	France	Modèle de zones multi compartiments
MRFC	Allemagne	Modèle de zones multi compartiments, mouvement des fumées et action thermique sur les structures

Tableau III.4 Exemple des logiciels des modèles avancés [20]

### III 7.2 Modèle de résistance au feu des structures

Ces modèles simulent la réponse mécanique des éléments de structure d'un bâtiment.

De même que pour les modèles thermiques d'incendie, nous pouvons trouver différents types de logiciels en fonction de la méthode utilisée pour calculer la réponse mécanique associée à un feu.

De cette manière, la classification des modèles de résistance au feu des structures est divisée en deux :

- logiciel de calcul simplifié
- logiciel de calcul avancé.

#### III 7.2.1 Modèles simplifiés de résistance au feu des structures

Ces modèles permettent de calculer le comportement structurel des éléments de manière individuelle, c'est à dire que chaque élément est isolé du reste de la structure. Ce calcul est basé sur les méthodes simplifiées.

Le tableau (III.5) regroupe certains logiciels correspondant à ces modèles simplifiés.

logiciel	pays	Description
<b>AFCB</b>	Luxembourg	Comportement au feu de poutre mixte selon Eurocode 4
<b>Elefir</b>	Belgique	Résistance au feu des éléments structurels en acier selon l'Eurocode 3
<b>H-Fire</b>	Allemagne	Calcul des valeurs de résistance des éléments mixtes exposés au feu par les méthodes simplifiées de l'EN 1994-1-2
<b>POTFIRE</b>	France	Résistance au feu des poteaux creux remplis de béton basé sur l'annexe G de l'Eurocode 4
<b>WSHAPS</b>	Canada	Résistance au feu des poteaux métalliques en W protégés.

**Tableau III.5 Exemple des logiciels des modelés simplifiés [20]**

### III 7.2.2 Modèles avancés de résistance au feu

Ces modèles permettent de simuler les modes statiques ou/et dynamiques d'une partie ou de l'ensemble d'une structure. Ces logiciels sont principalement des codes par éléments finis et certains sont utilisés dans d'autres branches de l'industrie.

Le tableau (III.6) regroupe quelques logiciels correspondant à ces modèles avancés.

logiciel	pays	Description
<b>ANSYS</b>	USA	Code éléments finis - Généraliste
<b>BoFire</b>	Allemagne	Code éléments finis – gère le transitoire, la non linéarité, l'incrémentation. Les propriétés mécaniques et thermiques des matériaux de l'ENV 1994-1-2 y sont implémentées. Structure acier et structure mixte peuvent être traitées.
<b>SAFIR</b>	Belgique	Analyse des états mécaniques et transitoires d'une structure soumise au feu.
<b>LENAS</b>	France	Comportement mécanique des structures acier au feu
<b>VULCAN</b>	UK	Logiciel d'analyse 3D - charpentes métalliques ou mixtes en situation d'incendie.

**Tableau III.6 Exemple des logiciels des modelés avancés [20]**

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes approches de calcul du comportement mécanique des structures exposées au feu, la vérification de la résistance au feu ainsi que les deux méthodes de calcul de l'incendie. Nous avons détaillé et d'une manière explicite les différentes étapes de la méthode simplifiée, nous avons aussi donné un exemple de calcul de la résistance au flambement par la méthode simplifiée. Ensuite, nous avons donné quelques exemples de logiciels de calcul d'incendie.

## Introduction

Ce chapitre est consacré à l'élaboration de simulations permettant d'étudier les comportements thermique et mécanique des éléments en profils métalliques à l'aide de logiciels de calcul fondés sur les règles d'Eurocodes feu, avec un nombre important de paramètres. L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus par ce traitement numérique ont permis de constater l'influence positive ou négative de certains paramètres sur la résistance au feu de profils métalliques. Pour cela on a proposé deux logiciels de calcul : Ozone et A3C, le premier pour le calcul de la réponse thermiques et l'autre pour le calcul de la réponse mécanique.

### IV.1 Logiciels de calcul

Pour notre projet de MASTER et pour nos calculs, on a choisi d'utiliser les deux logiciels **Ozone** v2.2.5, et **A3C** v2.31.

#### IV.1.1 Logiciel Ozone :

##### ➤ Description

Le logiciel OZone est un outil développé par l'Université de Liège en 2002. Ce logiciel a été développé pour aider les ingénieurs à concevoir des éléments de structure soumis au feu de compartiment. Ce logiciel est basé sur de nombreux développements récents relatifs à la modélisation du feu de compartiment d'une part, et à l'effet des feux localisés sur les structures d'autre part. Le logiciel permet de modéliser un simple feu de compartiment en combinant un modèle « deux zones » avec un modèle « une zone ». Il prend aussi en compte l'effet de foyer localisé grâce à la méthode Hasemi [20]. Par conséquent, le logiciel est prévu pour décrire au mieux toutes les phases du développement du feu dans un compartiment. Il permet également de calculer la température dans une section transversale d'un élément de structure soumis au feu de compartiment et, enfin, il permet d'évaluer la résistance d'éléments simples en acier.

Cette présentation du logiciel concerne le calcul thermique avancé (voir chapitre I) couvrant le modèle 1 zone et le modèle 2 zones, qui est la vocation principale de ce code de calcul. Cependant, il réalise, aussi, le calcul thermique simple en utilisant les courbes nominales température/temps, en l'occurrence, la courbe de feu conventionnel ISO 834. C'est cette dernière qui nous a servi de base pour entamer ce travail de recherche.

➤ **Formules utilisées**

Les formules utilisées sont conformes à l'EC3 1-2 pour l'échauffement des barres en acier données comme suit :

- Pour les barres en acier non protégées

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} h_{net,d} \Delta t \dots\dots(II.7)$$

- Pour les barres en acier protégées

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{gt} \dots\dots(II.9)$$

Pour les critères de résistance ultime au feu, ils sont conformes au calcul simplifié de l'EC3 1-2 et sont donnés plus loin dans le paragraphe (IV.1.2).

➤ **Limitations**

Concernant le calcul simplifié selon la courbe de feu ISO 834, le logiciel se limite :

- Aux profilés métalliques seulement
- Aux profilés de classe 1, 2,3. Les profilés de classe 4 ne sont pas considérés

➤ **L'interface du logiciel**

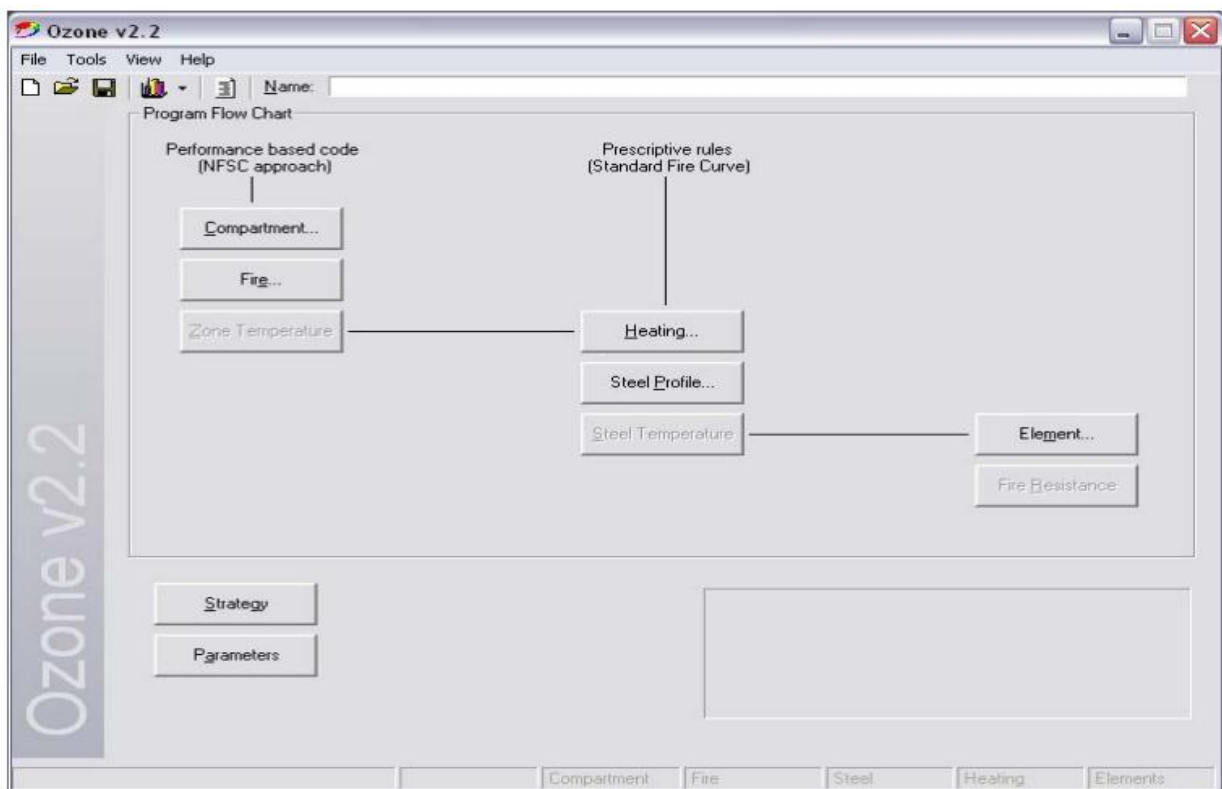


Figure IV.1 l'interface d'OZone

## IV.1.2 Logiciel A3C

### ➤ Description

Le logiciel A3C permet à l'utilisateur d'effectuer une vérification détaillée d'une simple barre en acier ou d'un poteau mixte (partiellement enrobé ou totalement enrobé de béton) selon les règles des Eurocodes. Les calculs sont effectués pour les Etats Limites Ultimes (ELU), les Etats Limites de Service (ELS) et, selon le choix de l'utilisateur, les Etats Limites Ultimes en situation d'incendie (FEU). A3C a été conçu et développé par le CTICM (Centre Technique Industriel de la Construction Métallique - France).

### ➤ Formules utilisées

#### Vérifications aux états limites ultimes en situation d'incendie (Feu) d'une barre en acier

La section transversale d'une barre en acier en situation d'incendie peut être soumise à :

- Un effort axial  $N_{fi,Ed}$
- Un effort tranchant  $V_{fi,Ed}$
- Un moment fléchissant  $M_{fi,Ed}$ .

Pour chaque combinaison FEU, le logiciel effectue les vérifications suivantes :

- Résistance des sections transversales.
- Résistance de la barre aux instabilités (flambement, déversement).

Les combinaisons FEU peuvent être générées automatiquement selon le jeu de combinaisons caractéristiques Eurocode0 [21]. Huit combinaisons Etats Limites Ultimes en situation d'incendie seraient générées automatiquement :

- FEU01 =  $G + \psi_{1,1} Q_1$
- FEU02 =  $G + \psi_{2,1} Q_1$
- FEU03 =  $G + \psi_{1,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$
- FEU04 =  $G + \psi_{2,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$
- FEU05 =  $G + \psi_{1,2} Q_2$
- FEU06 =  $G + \psi_{2,2} Q_2$
- FEU07 =  $G + \psi_{1,2} Q_2 + \psi_{2,1} Q_1$
- FEU08 =  $G + \psi_{2,2} Q_2 + \psi_{2,1} Q_1$

Où :

- ✓  $G$  valeur caractéristique de l'action permanente
- ✓  $Q_1, Q_2$  valeurs caractéristiques des actions variables 1 et 2
- ✓  $\psi_{1,i}$  coefficient de réduction qui ramène l'action variable caractéristique à une valeur fréquente.
- ✓  $\psi_{2,i}$  coefficient de réduction qui ramène l'action variable caractéristique à une valeur quasi permanente

• **Résistance des sections transversales**

Les critères de résistance en section suivants sont calculés, conformément à la norme EC3 partie1-2 § 4.2.3 :

$$\begin{aligned} \Gamma_{fi,N} &= N_{fi,Ed} / N_{fi,\theta,Rd} && \leq 1 \\ \Gamma_{fi,V} &= V_{fi,Ed} / V_{fi,\theta,Rd} && \leq 1 \\ \Gamma_{fi,M} &= M_{fi,Ed} / M_{fi,\theta,Rd} && \leq 1 \\ \Gamma_{fi,MV} &= M_{fi,Ed} / M_{fi,V,\theta,Rd} && \leq 1 \end{aligned}$$

Où :

- ✓  $N_{fi,Ed}$  effort axial sollicitant de calcul en situation d'incendie
- ✓  $N_{fi,\theta,rd}$  résistance au feu de calcul à la température  $\theta$
- ✓  $V_{fi,Ed}$  effort tranchant sollicitant de calcul en situation d'incendie
- ✓  $V_{fi,\theta,Rd}$  résistance de calcul au cisaillement à la température  $\theta$
- ✓  $M_{fi,Ed}$  moment fléchissant sollicitant de calcul en situation d'incendie
- ✓  $M_{fi,\theta,Rd}$  moment résistant de calcul à la température  $\theta$ .

• **Résistance de la barre aux instabilités (flambement, déversement)**

La vérification couvre :

- Flambement par flexion dans le plan
- Flambement par flexion hors plan
- Déversement.

• **Résistance au flambement**

La longueur de flambement dans le plan est prise égale à la longueur d'épure pour les barres sur appuis simples, et deux fois la longueur pour une barre en console.

Dans le cas d'un poteau d'ossature contreventée, la longueur de flambement est multipliée par le coefficient de réduction lié à la position du poteau dans la structure :

- Etage supérieur                      ○  $L_{fi} = 0,7 L$
- Etage intermédiaire                  ○  $L_{fi} = 0,5 L$

Les critères de résistance au flambement en compression simple sont calculés par les formules suivantes :

$$I_{fi,b,y} = N_{fi,Ed} / N_{by,fi,\theta,Rd} \leq 1$$

$$I_{fi,b,z} = N_{fi,Ed} / N_{bz,fi,\theta,Rd} \leq 1$$

avec :

$$N_{b,fi,\theta,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{pour les sections de Classe 1, 2 ou 3}$$

$$N_{b,fi,\theta,Rd} = \chi_{fi} A_{eff} k_{p0,2,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{pour les sections de Classe 4[5]}$$

où :

- ✓  $\chi_{fi}$       facteur de réduction pour le flambement par flexion dans le calcul à l'incendie
- ✓  $k_{y,\theta}$       facteur de réduction de la limite d'élasticité  $f_y$  de l'acier à la température  $\theta$
- ✓  $k_{p0,2,\theta}$     est le facteur de réduction de la limite d'élasticité  $f_y$  de l'acier à la température  $\theta$
- ✓  $A$ - aire      de la section transversale
- ✓  $A_{eff}$       aire efficace de la section transversale
- ✓  $\gamma_{M,fi}$       coefficient partiel de sécurité en situation incendie

• **Déversement**

La vérification de la résistance au déversement ne s'applique qu'aux barres fléchies par rapport à l'axe de forte inertie de la section.

Le moment critique de déversement élastique  $M_{cr}$  est calculé en utilisant la formule de la NF EN 1993-1-1 avec les hypothèses suivantes :

- Rotation libre dans le plan parallèle aux semelles, aux extrémités du tronçon étudié ( $k_z = 1,0$ )
- Gauchissement libre aux extrémités du tronçon ( $k_w = 1,0$ )
- Les charges transversales sont supposées être appliquées au niveau de la semelle supérieure ( $z_g = +h/2$ )

Le critère de résistance au déversement est :

$$I_{fi,LT} = M_{y,fi,Ed} / M_{b,fi,\theta,Rd} \leq 1$$

$M_{b,fi,\theta,Rd}$  est calculé conformément à la norme NF EN 1993-1-2 §4.2.3 :

- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| $M_{b,fi,\theta,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{pl} k_{y,\theta,com} f_y / \gamma_{M,fi}$ | pour les sections de Classe 1 ou 2 |
| $M_{b,fi,\theta,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{el} k_{y,\theta,com} f_y / \gamma_{M,fi}$ | pour les sections de Classe 3      |
| $M_{b,fi,\theta,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{eff} k_{p0,2,\theta} f_y / \gamma_{M,fi}$ | pour les sections de Classe 4      |

➤ **Limitations**

Ce logiciel couvre seulement :

- Les éléments uniformes, sur appuis simples ou en console (uniquement pour les barres en acier),
- Les poteaux mixtes bi-articulés,
- Les sections transversales doublement symétriques.
- Deux actions variables.
- Les charges transversales appliquées au niveau de la semelle supérieure.

➤ **L'interface du logiciel**

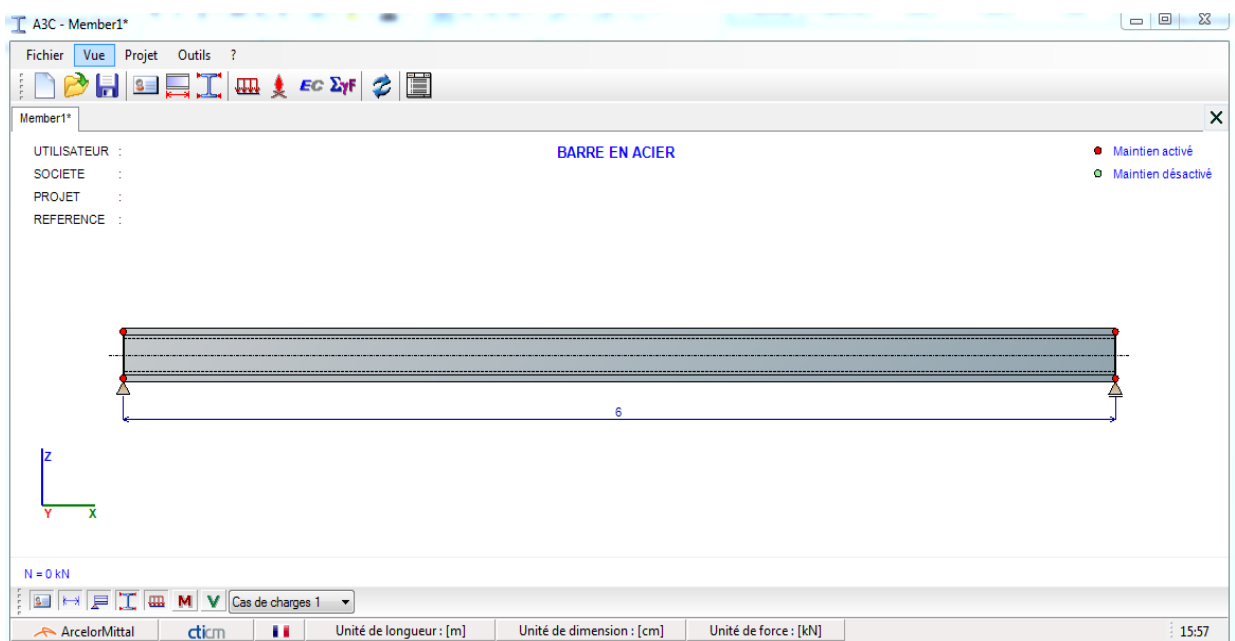


Figure IV.2 L'interface de A3C

## IV.2 Etude paramétrique

Dans cette partie, nous allons estimer l'influence de quelques paramètres pouvant influencer le comportement de l'acier sous l'incendie tels que : le facteur de massivité, la position des colonnes dans une structure, le matériau de protection et les côtés exposés au feu, l'épaisseur du produit de protection, la longueur de flambement, la nuance et le taux de chargement utilisant les deux logiciels Ozone et A3C.

### IV.2.1 Evolution de la température de deux éléments non protégé utilisant la courbe standard ISO 834

La (figure IV.3) présente L'évolution de la température en fonction du temps de deux éléments métalliques non protégé soumis au feu standard ISO 834 est présentée en fonction de leur facteur de massivité, Le premier élément, IPE 140, possède un facteur de massivité élevé ( $335 \text{ m}^{-1}$ ) tandis que le deuxième, HEM 140, possède un facteur de massivité faible ( $106 \text{ m}^{-1}$ ).

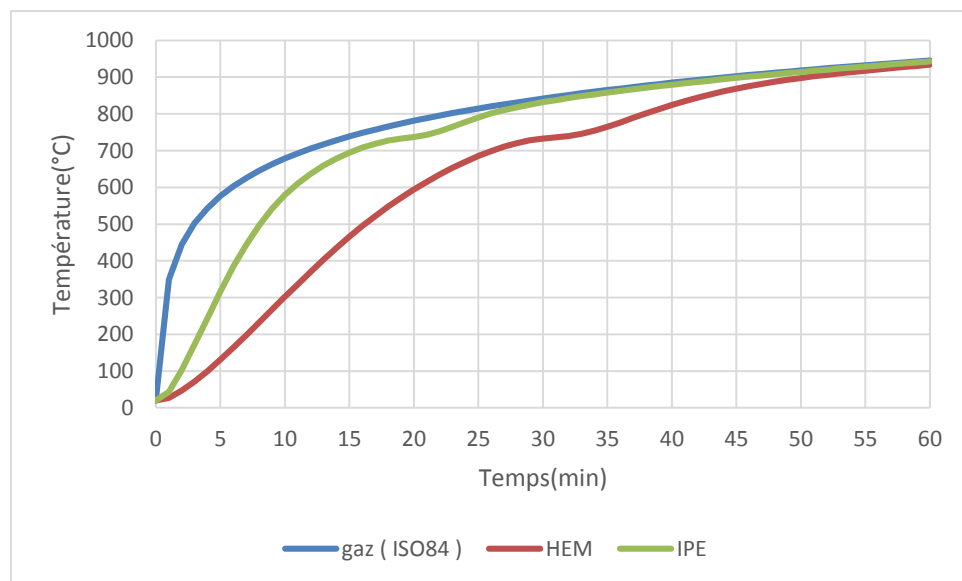


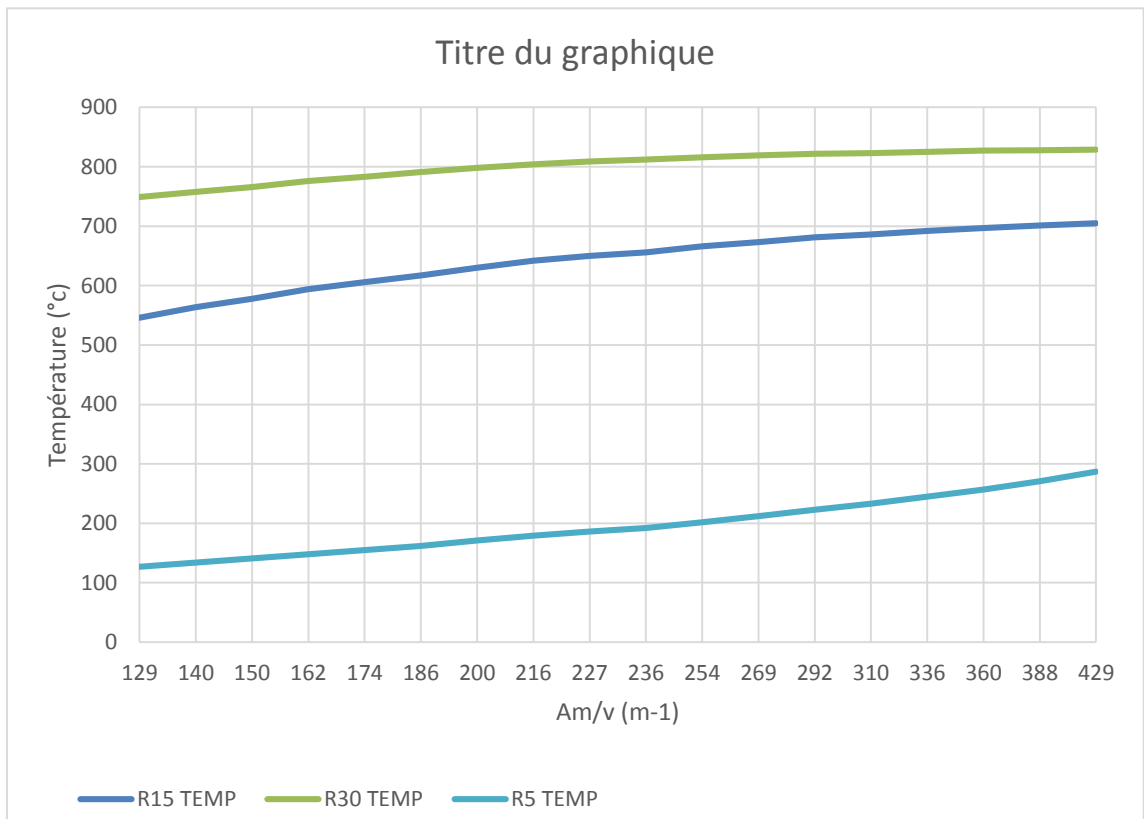
Figure IV.3 Évolution de la température de deux éléments non protégés en fonction de temps

La courbe gaz, souvent considérée comme une courbe enveloppe des incendies réels, présente un aspect plus défavorable par un échauffement très rapide lors des premières minutes. D'après la figure 1, l'élément en IPE atteint la température 600 °C en 10 minutes tandis que l'élément en HEM atteint la même température en 20 minutes, ce qui nous permet de dire que le 1<sup>er</sup> chauffe plus rapidement

que le 2<sup>ème</sup>. On conclue que le profilé HEM possède une meilleure résistance au feu par rapport au profilé IPE car il possède un facteur de massivité plus faible.

**IV.2.2 Evolution de la température en fonction de «  $A_m/v$  » pour les différentes résistances R5, R15, R30**

La figure IV.4 montre l'évolution de la température d'éléments métalliques, non protégés, soumis au feu standard ISO 834 est présentée fonction de leur facteur de massivité  $A_m/v$ .



**Figure IV.4 Evolution de la température en fonction de  $A_m/v$  pour 5, 15 et 30 min**

La figure IV.4 indique la température atteinte par des sections d'acier de massivités différentes après 5, 15 et 30 minutes d'incendie normalisé. La température est une fonction de la résistance au feu et du facteur de massivité, si on prend une température de 600 °C et une durée de feu égale à 15 minutes, le facteur de massivité maximal sera égal à 162 m-1 autrement dit, un élément qui possède un facteur de massivité égale à 162 m-1 atteindra une température de 600°C sous une stabilité au feu de 15 mn. La figure IV.4, permet donc de déterminer la température d'un élément en fonction de son facteur de massivité et du temps de stabilité requis.

Particulièrement, pour une résistance au feu donnée, la température augmente en fonction du facteur de massivité. On conclue qu'un élément lourd avec un rapport  $A_m/V$  faible (faible valeur du facteur de massivité) sera échauffé plus lentement qu'un élément léger avec un rapport  $A_m/V$  fort (forte valeur du facteur de massivité).

**IV.2 3 : Influence de la position des colonnes dans une structure sur la température critique de l'acier**

Pour étudier l'influence du positionnement des colonnes dans une structure sur la température critique de l'acier, on introduit le coefficient de réduction de la longueur de flambement en cas d'incendie ( $\alpha$ ) qui prend les valeurs suivantes :

- 0,5 pour les colonnes situées à l'étage intermédiaire
- 0.7 pour les colonnes situées à l'étage supérieur
- 1 pour tous les autres cas

La longueur de flambement ( $l_f$ ) en cas d'incendie s'obtient par la relation suivante :

$$l_f = \alpha l$$

Avec :  $l$  : longueur d'épure pour l'étage correspondant

On présente sur la (figure IV.5) l'évolution de la température de la section d'un élément métallique en fonction du facteur  $\alpha$ .

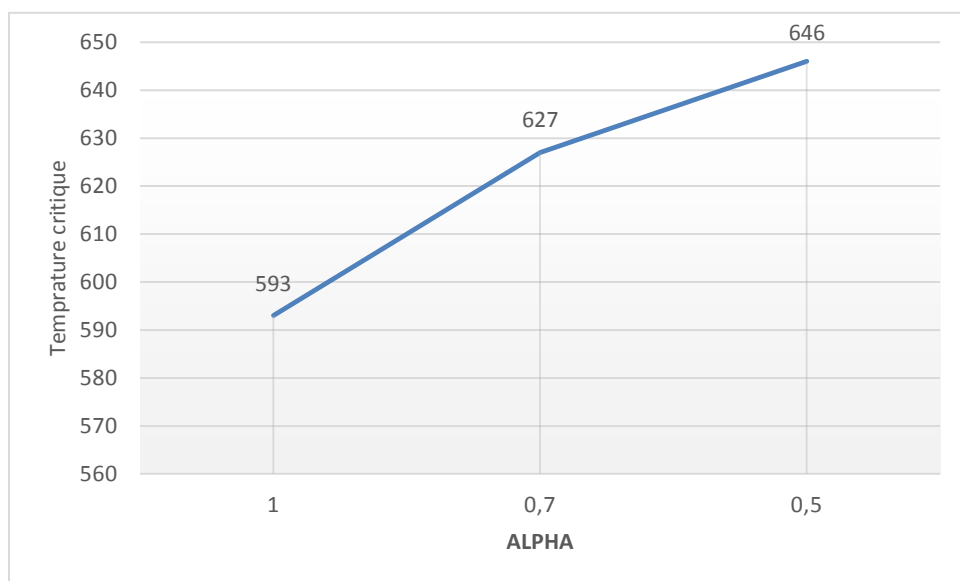


Figure IV.5 Evolution de la température critique en fonction du positionnement des colonnes.

A partir de la (figure IV.5), on peut constater facilement que la température critique change en fonction des conditions d'appuis, lorsque  $\alpha = 1$  en a une température critique 593 °C et à  $\alpha=0,7$  la température critique vaut 627 °C et à  $\alpha=0,5$  vaut 646 °C. On conclure que les colonnes situées à un étage intermédiaire ( $\alpha=0,5$ ) ayant une température de ruine plus élevé que les autres, donc sont les dernières a s'effondreront lors d'un incendie, alors elles possèdent une meilleure résistance à la ruine par rapport aux autres.

**IV.2. 4 Influence du matériau de protection et les côtés exposés au feu sur la température de l'acier**

La barre peut être considérée comme exposée au feu sur 3 ou 4 faces.

Une exposition au feu « 4 faces » correspond au cas d'un élément échauffé sur toutes ses faces. C'est par exemple le cas d'un poteau situé à l'intérieur d'un local.

Une exposition au feu « 3 faces » correspond au cas d'un élément échauffé sur 3 faces uniquement. Le cas type est celui d'une poutre supportant un plancher béton, et dont la face supérieure n'est pas exposée directement à l'incendie.

La figure suivante illustre ces deux situations.

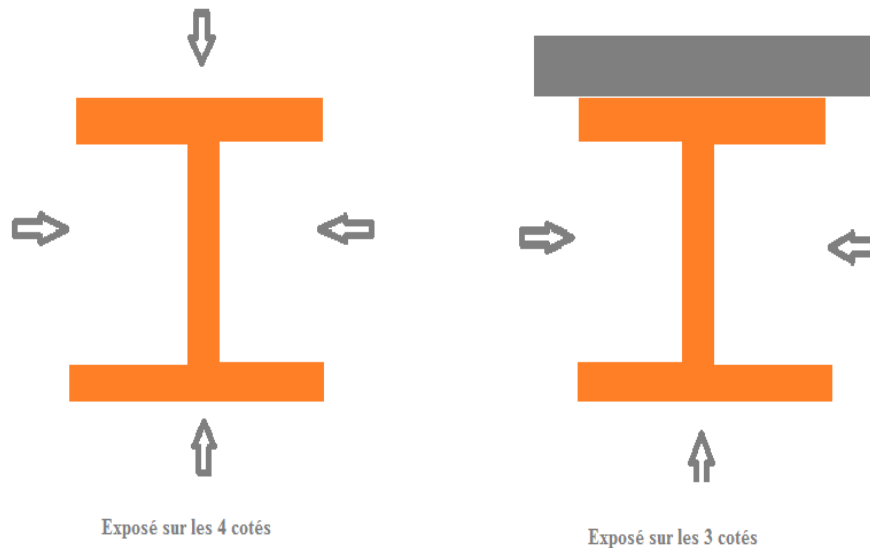
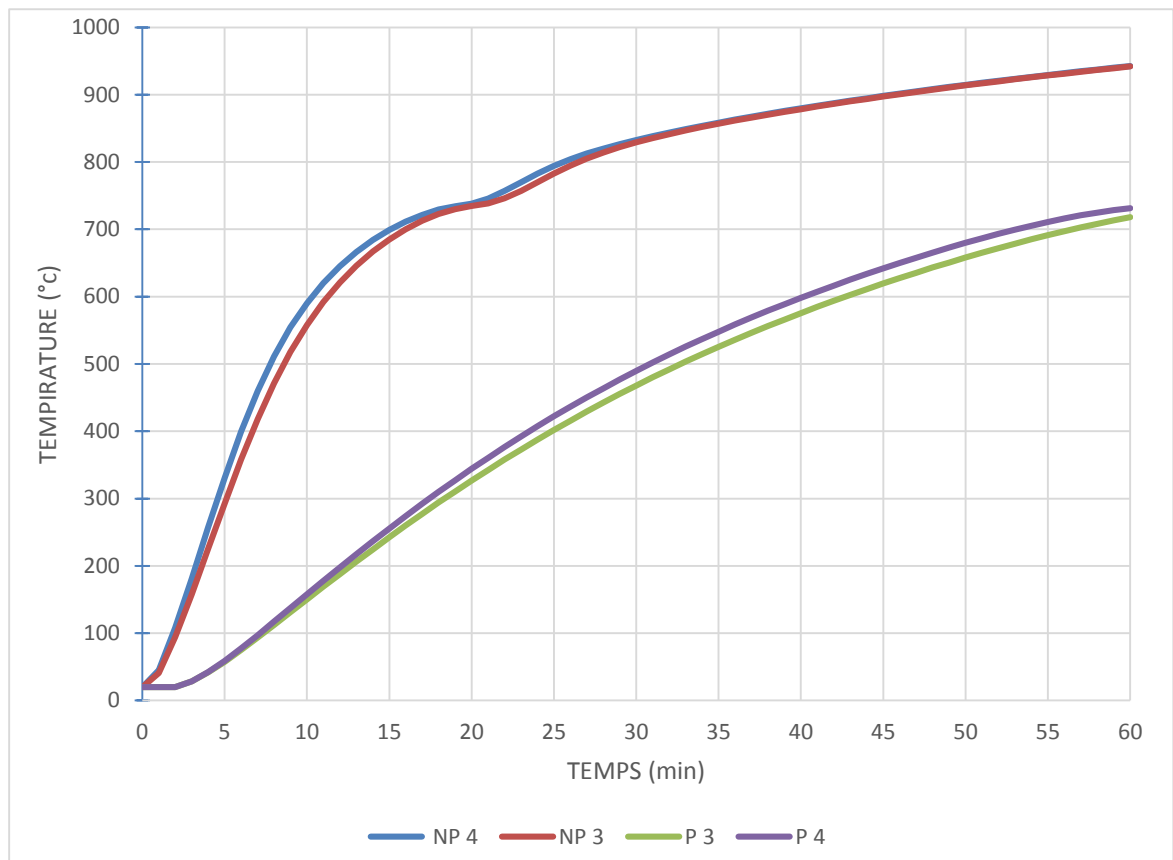


Figure IV.6 élément exposé sur 4 et 3 cotés

La figure IV.7 montre l'effet du matériau de protection et les côtés exposés au feu sur l'évolution du temps d'incendie d'éléments en acier.



**Figure IV.7 Influence du produit de protection et le nombre de faces exposées au feu sur l'évolution de la température.**

La température de l'acier augmente en fonction de temps selon la figure [4].

Cette augmentation varie selon la protection (acier avec ou sans protection) et à la manière la quel l'élément de l'acier exposé au feu (3 coté ou 4 coté)

- ✓ Courbe 1 : acier non protégé exposé au feu sur 4 faces (NP4).
- ✓ Courbe 2 : acier non protégé exposé au feu sur 3 faces (NP3).
- ✓ Courbe 3 : acier protégé exposé au feu sur 3 faces (P3).
- ✓ Courbe 4 : acier protégé exposé au feu sur 4 faces (P4).

Nous remarquons particulièrement que l'écart de température entre les courbes 1 et 2 ou entre 3 et 4 est très faible, par exemple à  $t=30$  min on a :

$$\begin{cases} \text{La courbe 1 : } T = 832 \text{ C}^\circ \\ \text{La courbe 2 : } T = 829 \text{ C}^\circ \end{cases}$$

Et

$$\begin{cases} \text{La courbe 3 : } T = 467 \text{ C}^\circ \\ \text{La courbe 4 : } T = 489 \text{ C}^\circ \end{cases}$$

Donc on peut dire que l'acier exposé au feu sur 3 faces a une influence modérée sur la température d'échauffement de l'acier non protégé.

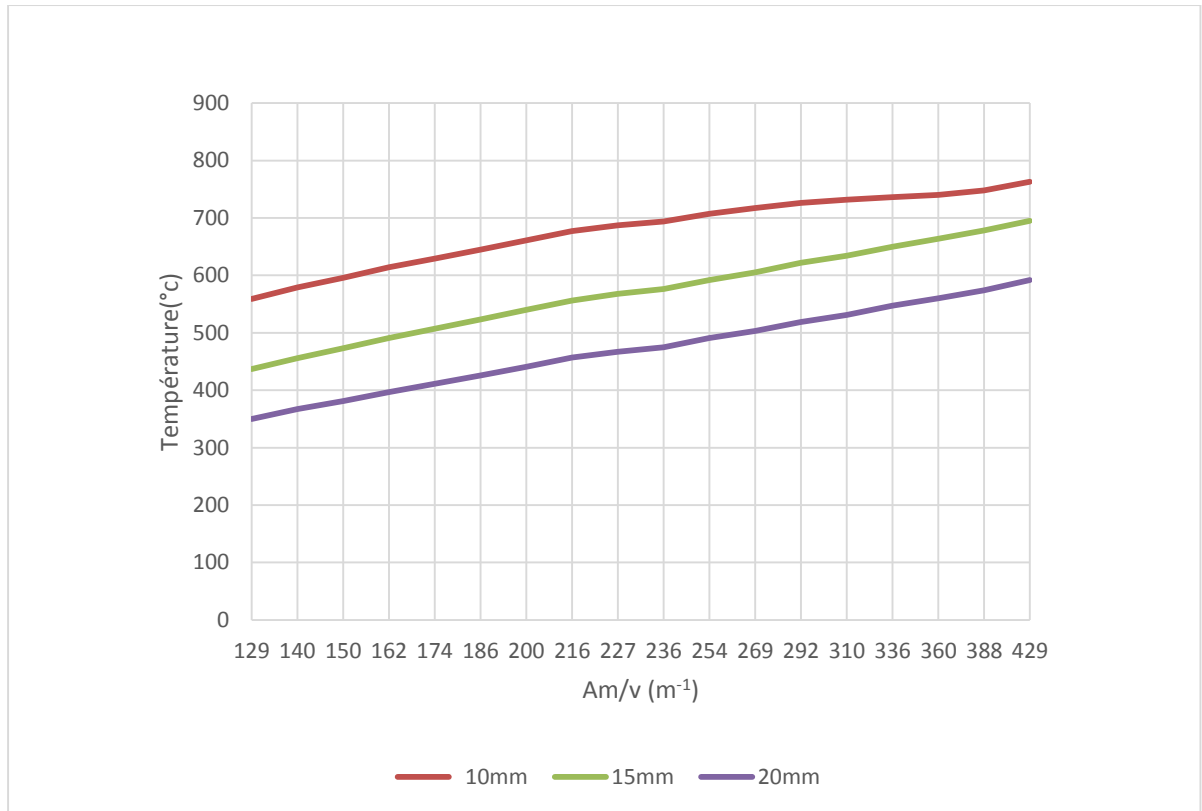
Par ailleurs, on constate que l'écart de température entre les courbes 1 et 4 (NP4, P4) ou 2 et 3 (NP3, P3) est très important.

Ainsi, on montre que d'une part lorsque le profilé est au contact avec une dalle, ceci entraînera une diminution de la surface exposée au feu et par conséquent une diminution du facteur de massivité. Ceci augmentera le temps de résistance de l'élément au feu. D'autre part la protection de l'acier joue un rôle très important dans la stabilité au feu de l'élément.

#### **IV.2. 5 : Influence de l'épaisseur du produit de protection sur la stabilité au feu de l'élément en acier.**

Pour cela, on utilise des plaques en plâtre de différentes épaisseurs (10 mm, 15 mm et 20 mm) comme produit de protection. Ces dernières ont une densité égale à  $800 \text{ kg/m}^3$ , une chaleur spécifique égale à  $1700 \text{ J/kg K}$  et une conductivité thermique égale à  $0.2 \text{ W/m K}$ . L'élément en acier est exposé au feu standard (ISO 834) pendant une durée de 60 mn.

La figure IV.8 indique l'effet de l'épaisseur du produit de protection (10 mm, 15 mm et 20 mm) sur la température atteinte par des sections d'acier de massivités différentes.

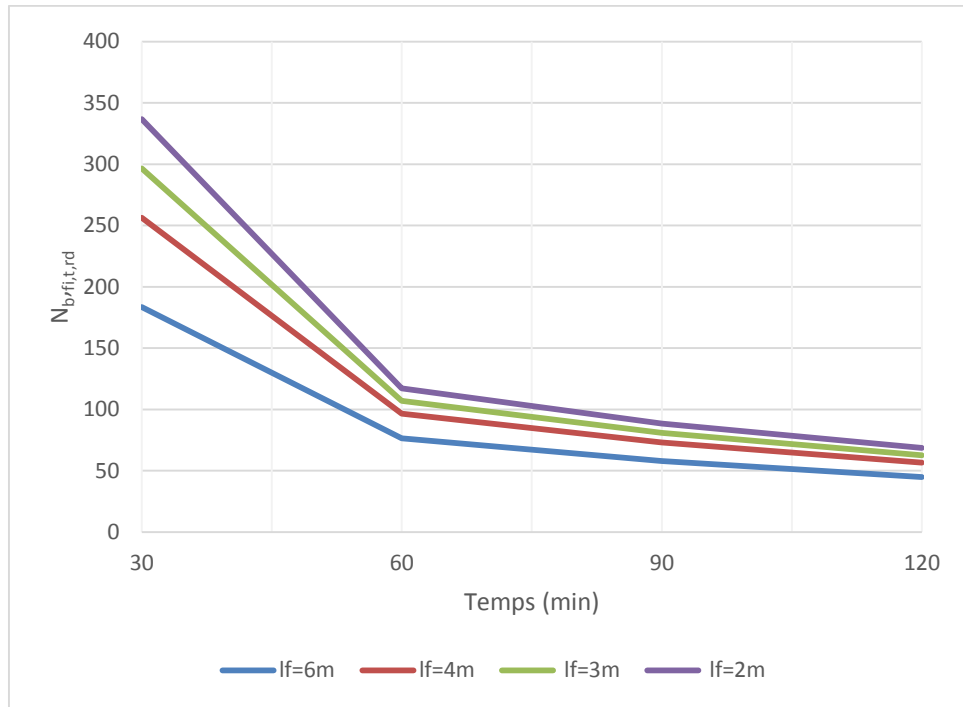


**Figure IV.8 Influence de l'épaisseur de protection sur la température de l'acier**

La figure IV.8 peut être utilisée pour déterminer l'épaisseur de protection à appliquer de telle manière que la température de l'acier ne dépasse pas la température critique de l'élément. De ce fait, lorsque la température critique est connue, il est nécessaire de connaître l'épaisseur de protection à appliquer qui permet à la température de l'élément d'être inférieure à la température critique. Entre deux courbes, l'épaisseur à appliquer est déterminée par interpolation linéaire. Par exemple considérant un élément de massivité de 254 m<sup>-1</sup> et de température critique de 600 °C, il faut une épaisseur de 15 mm avec le produit de protection qui a donné lieu à l'abaque (ou courbes) de la figure 5 pour que l'élément soit stable pendant 60 min. Avec un élément ayant un facteur de massivité de 150 m<sup>-1</sup> et la même température critique (600°C), il faut 10 mm de produit. On conclue que l'épaisseur de protection, qui est fortement dépendante du facteur de massivité et du temps de stabilité au feu, a un grand effet sur la résistance au feu de l'élément en acier.

**IV.2.6 Influence de la longueur de flambement sur la résistance ultime au feu ( $N_{b,fi,t,rd}$ )**

la figure suivante montrent la variation de la résistance au feu des poteaux en aciers ( $N_{b,fi,t,rd}$ ), en fonction des différentes longueurs de flambements ( $L_f$ ). Nous avons varié la longueur de flambement quatre fois, on a commencé par 6m ensuite on a diminué la longueur de flambement à 4m, à 3m, et en fin à 2m.



**Figure IV.9 Influence de la longueur de flambement sur la résistance au feu ( $N_{b,fi,t,rd}$ )**

A partir de la figure IV.9, on peut constater que la résistance ultime au feu diminue en fonction du temps, et cela avec différentes longueurs de flambement. La résistance ultime au feu diminue quand la durée de feu croît par détérioration des caractéristiques mécaniques de l'acier (limite élastique  $f_y$ , module d'YOUNG  $E$ ) sous feu prolongé.

En comparant entre les différentes courbes, en passant de  $l_f = 1\text{ m}$  jusqu'à  $l_f = 6\text{ m}$ , on constate que la résistance ultime au feu décroît, plus le poteau est élancé ( $l_f$  grand) plus sa résistance ultime au feu diminue. On en conclue que cette dernière est influencée par la longueur de flambement de l'élément métallique.

### IV.2.7 Influence de la nuance d'acier sur la résistance ultime au feu

Dans la figure suivante nous avons montré la variation de la résistance au feu des poteaux en aciers ( $N_{b,fi,t,rd}$ ), en fonction des différentes nuances d'aciers. Nous avons étudié quatre nuances d'acier S235, S275, S355 et S460

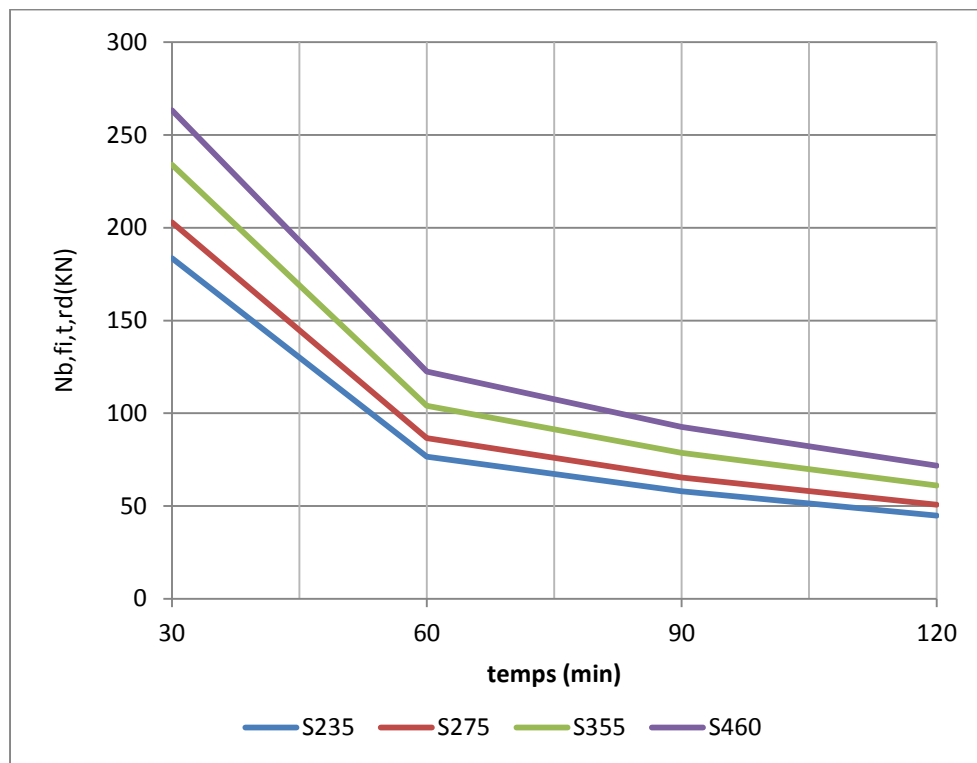


Figure IV.10 Influence de la nuance d'acier sur la résistance ultime au feu ( $N_{b,fi,t,rd}$ )

Selon la figure IV.10, on peut constater que la résistance ultime au feu change en fonction du temps, et cela aux différentes nuances d'acier. Par exemple à  $t = 60$  min la résistance ultime au feu diminue de 41%, par rapport à la valeur précédente, pour la nuance S235, de 45% si la nuance est S275, de 45% si la nuance est S355 et de 45% si la nuance est S460. On en conclue que la perte de résistance ultime au feu en fonction du temps se fait pratiquement dans les mêmes proportions pour les différentes nuances d'acier. De surcroit, en comparant les résistances ultimes au feu des différentes nuances d'acier pour chaque pas de temps (30 min, 60 min, 90 min, et 120 min), on réalise que les valeurs se rapprochent. Par exemple, à  $t = 30$  min, et en passant de l'élément en acier de nuance S235 à celui de nuance S460, l'accroissement de résistance varie entre 10.63 % à 17,5 %. La nuance d'acier a, donc, une influence modérée sur la résistance ultime au feu.

**IV.2.8 Influence du taux de chargement sur la température critique**

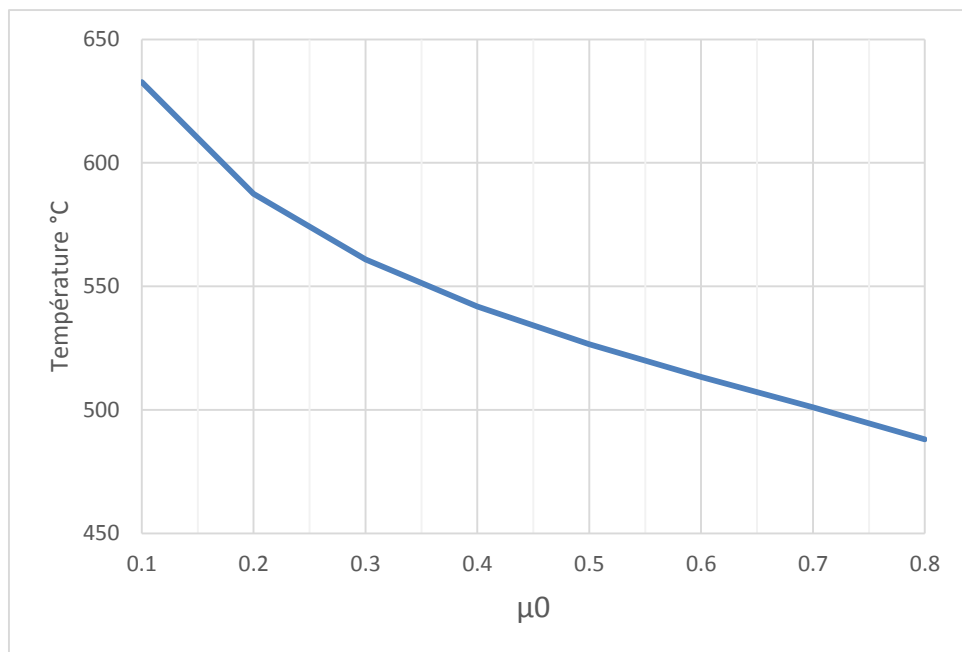
Le taux de chargement est défini par la formule suivante :

$$\mu_0 = E_{f_i,d} / R_{f_i,d,0} \dots\dots(IV.1)$$

Ou

- ✓  $E_{f_i,d}$  L'effet d'actions de calcul en cas d'incendie
- ✓  $R_{f_i,d,0}$  La résistance de calcul en cas d'incendie au temps  $t=0$

Sur la figure suivante nous avons montré la variation du taux de chargement en fonction de la température critique.



**Figure IV.11 Influence du taux de chargement sur la température critique**

Il relève de La (figure IV.11) que le taux de chargement a une influence sur la température critique de l'acier qui s'exprime par une différence d'environ 150 °C entre les températures critiques minimale et maximale pour  $\mu_0$  variant de 0.1 à 0.8. Le taux de chargement a, donc, une influence significative sur la température critique de l'acier. Plus faible est le taux de chargement, plus grande est la résistance au feu de l'acier.

## Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons présenté les deux logiciels utilisés dans le calcul de réponse mécanique et thermique au premier temps, ensuite nous avons fait une étude paramétrique qui nous a permis de montrer l'influence de certains paramètres sur la résistance au feu des éléments en charpente métallique. La mise au point du deux logiciels a donné plusieurs observations permis elles nous avons trouvé que

- $\Delta m/V$  est un paramètre important pour déterminer l'accroissement de température de la section métallique.
- D'autre part la protection de l'acier joue un rôle très important dans la stabilité au feu de l'élément.
- D'autre part la protection de l'acier joue un rôle très important dans la stabilité au feu de l'élément.
- La nuance d'acier  $\sigma_s$ , donc, une influence modérée sur la résistance ultime au feu.
- Le taux de chargement  $\alpha$ , donc, une influence importante sur la température critique de l'acier

## CONCLUSION GENERALE

L'étude présentée dans ce mémoire a été consacrée à l'étude de la sécurité incendie des structures en charpente métallique, avec comme objectif l'élaboration d'une recherche bibliographique et une étude paramétrique pour la mise en évidence des différents paramètres influençant le comportement de l'acier sous conditions de feu normalisé (ISO834).

Dans ce mémoire nous avons divisé le travail en deux parties, une première partie a été consacrée à la recherche bibliographique, et une deuxième partie consacrée à une étude paramétrique. Concernant la recherche bibliographique nous avons tout d'abord abordé les différentes généralités sur la sécurité incendie, ensuite nous avons présenté le comportement mécanique et thermique de l'acier au feu, enfin nous avons terminé cette partie par les méthodes et outils de calcul au feu.

Dans la deuxième partie nous avons fait une analyse paramétrique utilisant deux logiciels **Ozone** et **A3C**, ceci nous a permis de mettre en évidence l'influence des différents paramètres sur les réponses thermique et mécanique.

Les résultats de l'étude paramétrique nous a permis de faire les observations suivantes :

- Le taux d'échauffement est quantifié par le facteur de massivité connu sous le rapport  $A_m/V$ . Par conséquent, un élément lourd avec un rapport  $A_m/V$  faible sera échauffé plus lentement qu'un élément léger avec une forte valeur du facteur de massivité. Plus l'acier est épais, plus lent sera le taux d'échauffement et ainsi plus grand sera le temps de résistance au feu. Il ressort, ainsi, que  $A_m/V$  est un paramètre important pour déterminer l'accroissement de température de la section métallique.
- Les colonnes situées à un étage intermédiaire ( $\alpha=0,5$ ) ont une température de ruine (température critique  $\theta_{cr}$ ) plus élevée que celles situées à un étage supérieur ou autre, donc sont les dernières à s'effondrer lors d'un incendie. Elles possèdent une meilleure résistance à la ruine par rapport aux autres cas.

- L'acier exposé au feu sur 3 faces est un élément partiellement exposé à l'incendie parce qu'il est encastré dans des murs, des planchers ou dans d'autres éléments de structure, atteint une résistance au feu notable en raison de la redistribution de contraintes des régions exposées à la chaleur vers des régions plus froides (non exposées) de la section.
- L'épaisseur de protection, qui est fortement dépendante du facteur de massivité et du temps de stabilité au feu, a un grand effet sur la résistance au feu de l'élément en acier. Pour de courtes périodes de résistance au feu, des éléments en acier non protégés peuvent être stables. Cependant pour des longues périodes de résistance au feu, la structure doit être protégée en appliquant un matériau de protection. Il est important d'appliquer l'épaisseur de protection spécifiée afin d'atteindre le degré de résistance au feu requis.
- La résistance ultime au feu est influencée par la longueur de flambement de l'élément métallique. Plus le poteau est élancé ( $l_f$  grand) plus sa résistance ultime ( $N_{b,fi,rd}$ ), au feu diminue.
- La nuance d'acier a une influence modérée sur la résistance ultime au feu.
- Le taux d'utilisation  $\mu_0$  a une influence significative sur la température critique de l'acier.

### **Recommandations :**

Après notre analyse par élément de structure sous influence du feu nous pouvons émettre les perspectives suivantes dans l'optique de la continuité et d'approfondissement de ce travail :

- Analyse par parties des structures sous feu
- Analyse globale des structures sous feu
- Analyse par les méthodes avancées pour le calcul des réponses thermique et mécanique.

## REFERENCE

- [1] Sekkiou, S. Etude de comportement des poteaux mixte (acier-béton) compte tenu d'une exigence au feu. Mémoire de Magister, Département de Génie Civil, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [2] Cajot, L. Debruyckere, R. Franssen, J. Sécurité incendie et calcul de la résistance au feu des bâtiments en acier selon l'Eurocode 3, Bruxelles, Infosteel 2012.
- [3] Belkada, S. Mise au point d'une méthode simplifier de calcule au feu des colonnes mixtes acier-béton partiellement enrobées en considérant le problème de l'excentricité. Mémoire de Magister, Département de Génie Civil, Université Mouloud Maamri Tizi-Ouzou
- [4] Frédéric Masson. Comportement de structures soumises à un incendie. Premières réflexions. MAI 2001
- [5] Eurocode 3. Calcul des structures en acier et document d'application nationale - Partie 1-2 : Règles générales -Calcul du comportement au feu, XP ENV 1993-1-2, 1997, ISSN 0335-3931
- [6] Denoël, J-F. Sécurité incendie et constructions en béton Choix du béton, FEBELCEM, 2007.
- [7] Cours de protection contre l'incendie destiné aux préventionnistes incendie, <http://www.aresu.be/>, Helid Aresu de Seui.
- [8] Hocine, S. Calcul dans la phase de refroidissement d'évolution de température dans les milieux aussi hétérogènes que le béton soumis à des conditions de température élevées, Mémoire de Magister, Département de Génie Civil, Université de Tizi-Ouzou
- [9] Thomas, L. Archambault, G. sécurité incendie Collection Mémentos acier, édition 2005.
- [10] Cajot, L-G. Haller, M. Pierre, P. Projet DIFISEK Partie 1: Actions thermiques et mécaniques PROFILARBED S.A, Esch/Alzette, Luxembourg
- [11] Eurocode 1. Bases du calcul et actions sur les structures Partie 2-2 : Actions sur les structures — Actions sur les structures exposées au feu. Décembre 1997.
- [12] Eurocode 4. Calcul des structures mixtes acier-béton Partie 1-2 : Règles générales, Calcul du comportement au feu Février 2006..
- [13] ZHAO, B. Projet DIFISEK Partie 3: Comportement mécanique au feu. CTICM – Centre Technique de la Construction Métallique, France
- [14] Twilt, L. Projet DIFISEK .Partie 2 : Transfert thermique. TNO Bouw – Centre for Fire Research, The Netherlands.
- [15] Cours thermique de bâtiment. ENSTP, 2014, Algérie

- [16] BuildSoft s.a, Analyse de la résistance au feu : Les bases théoriques et technologiques principales, 2007
- [17] Ayme, N. Action de feu sur les structures en aciers « guide Eurocode », CTICM France. CSTB 2009, ISBN 978-2-86891-425-2
- [18] S.T.S. C.M. Lycée Faÿs. Protection des structures contre l'incendie
- [19] Action N°12 du PNISI, Comportement au feu des structures, Évaluation des outils disponibles et domaines d'application, Octobre 2012
- [20] Rey, F . Chica, J-A. Projet DIFISEK .Partie 4 : Outils de calcul informatiques. LABEIN Technological Centre, Bilbao, Spain
- [21] Manuel d'utilisation du logiciel de calcul A3C (CTICM)