

COURS

CHAPITRE IV

Comportement Mécanique des éléments en acier et mixtes exposés au feu

Présenté par :
DIMIA Mohamed Salah

Option
Charpente métallique et mixte

Plan du cours

INTRODUCTION AU PROBLEME

Méthodes de calcul simplifiées

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

Echauffement des éléments en acier non protégé

Echauffement des éléments en acier protégé

Méthodes de calcul avancées

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

VALEURS TABULÉES

MÉTHODES DE CALCUL SIMPLIFIÉES

MÉTHODES DE CALCUL AVANCÉES par logiciel

Applications



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



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

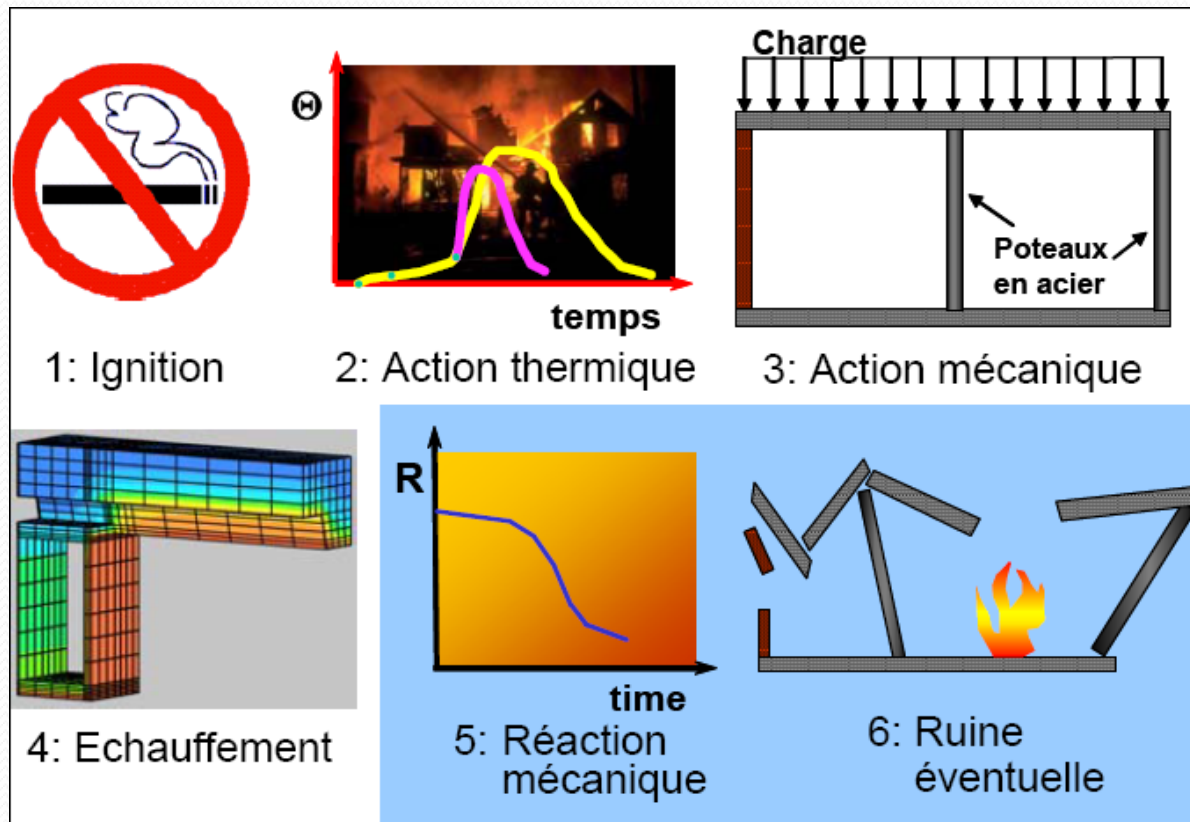


Figure 1: Résistance au feu – succession des événements

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

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

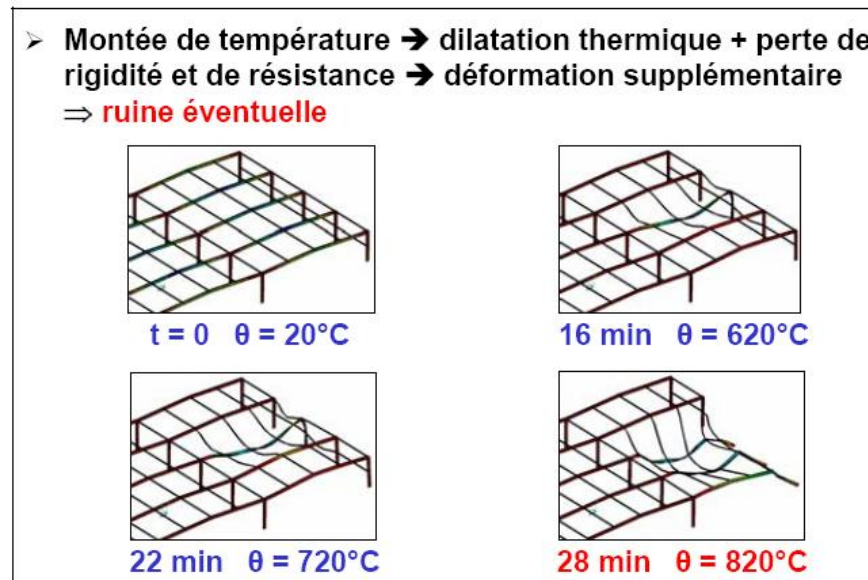


Figure 2 : Comment une structure réagit au feu

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

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

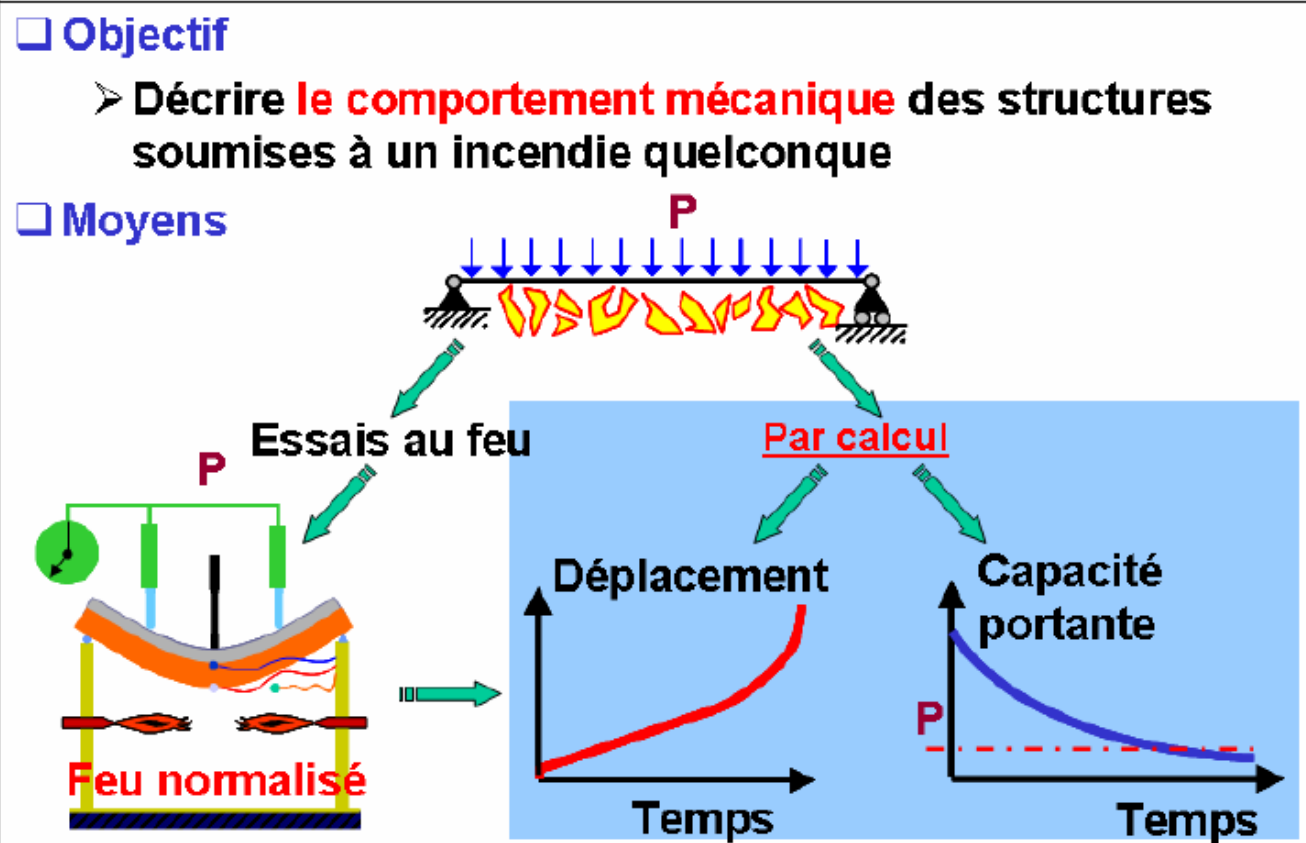


Figure 3 : Evaluation du comportement mécanique des structures en situation d'incendie

2 PRINCIPES GENERAUX D'APPLICATION DU CALCUL AU FEU DES STRUCTURES EN ACIER ET MIXTES

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

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

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

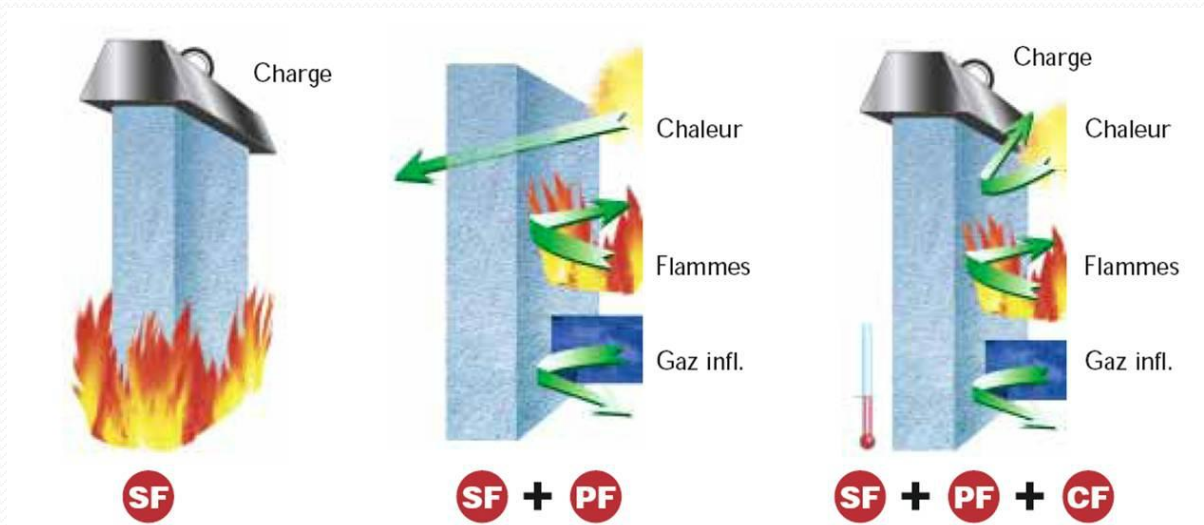
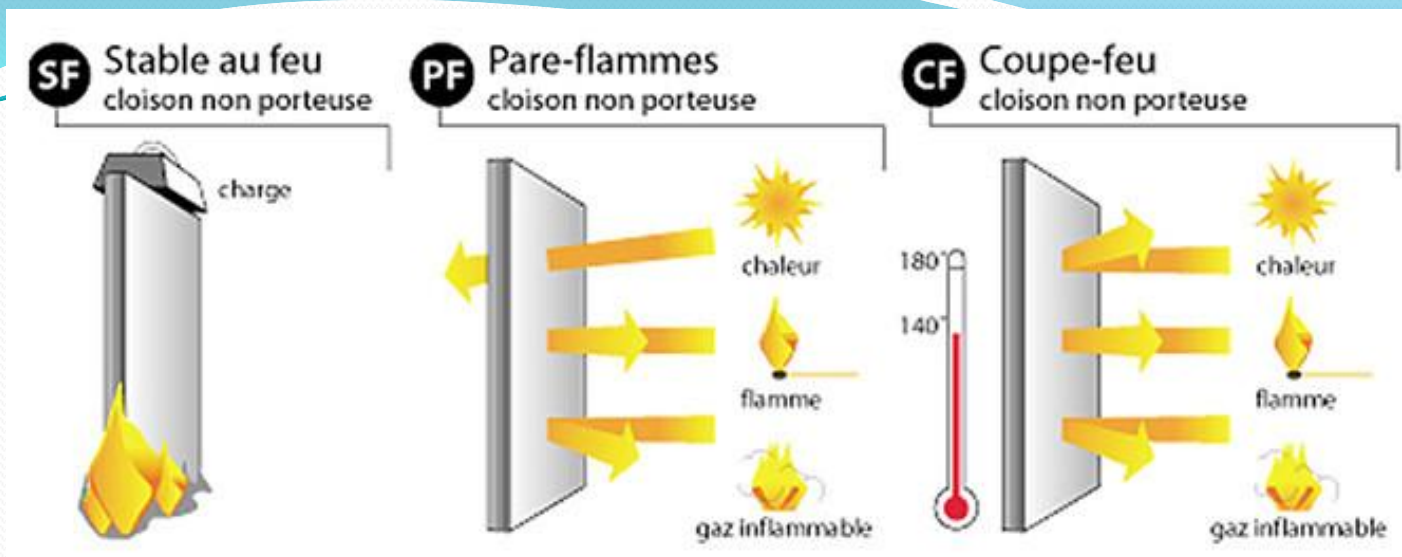


Figure 4 : Principe de fonctionnement des éléments structuraux au feu

L'analyse du comportement mécanique des structures exposées au feu peut être réalisé par les trois approches suivantes

- ❑ Analyse par élément, dans laquelle chacun des éléments de la structure sera vérifié en le considérant totalement séparé des autres éléments. Les liaisons étant remplacées par des 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 de structure globale, dans laquelle la structure totale sera utilisée dans le calcul

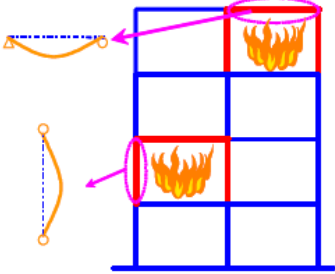
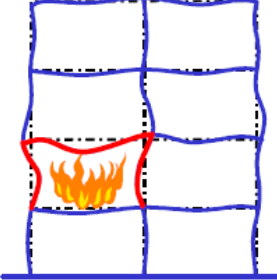
Analyse par élément	Analyse globale de structures
	
<ul style="list-style-type: none">➤ Analyse des éléments indépendants➤ simple à appliquer➤ En général, appliquée sous feu normalisé	<ul style="list-style-type: none">➤ Effet d'interaction entre différentes parties de structure➤ rôle de la compartimentation➤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

Figure 5 : types d'analyse des structures au feu

Bien que les méthodes utilisées pour les quatre matériaux soient très différentes, il existe plusieurs champs communs. Le premier de ces champs apparaît sous la forme des trois types de méthodes que l'on peut utiliser selon la précision recherchée :

Les méthodes par valeurs tabulées qui indiquent directement des résultats selon plusieurs critères. Ces méthodes sont nécessairement enveloppe pour couvrir l'ensemble de cas envisageables.

Les méthodes simplifiées qui permettent de calculer une résistance au feu à l'aide de quelques règles simples. Elles sont donc plus précises que les méthodes tabulées.

Les méthodes avancées qui, basés sur les propriétés caractéristiques des matériaux et sur la réalité des phénomènes physiques, permettent par un calcul thermomécanique d'évaluer de manière précise le comportement au feu des structures. Ces méthodes requièrent en général des outils de calcul numérique de type éléments finis.


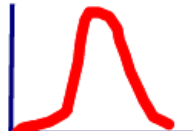
Procédure de Calcul			Valeur tabulée	Modèles de calcul simplifiés	Modèles de calcul avancés
Réglementation descriptive 	Analyse par élément	Calcul des actions mécanique et conditions aux limites	OUI	OUI	OUI
	Analyse de parties de la structure		NON	OUI, si disponible	OUI
	Analyse globale de la structure	Sélection des actions mécaniques	NON	NON	OUI
Réglementation à objectif 	Analyse par élément	Calcul des actions mécanique et conditions aux limites	NON	OUI, si disponible	OUI
	Analyse de parties de la structure		NON	NON	OUI
	Analyse globale de la structure	Sélection des actions mécaniques	NON	NON	OUI

Tableau 1 : Domaine d'application des procédures d'analyse pour le calcul des structures soumises au feu


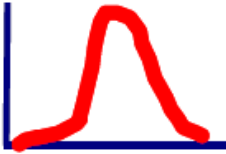
Action thermique	Approche pour la vérification du comportement au feu	Utilisation par les Bureaux d'études	Obligation d'avis sur études par un laboratoire agréé par le ministère de l'intérieur
Réglementation descriptive 	Valeurs tabulées	OUI	NON
	Méthodes simplifiées	OUI	NON
	Méthodes avancées	OUI	OUI
Réglementation à objectif 	Valeurs tabulées	Non applicable	-
	Méthodes simplifiées	OUI (si disponible)	OUI
	Méthodes avancées	OUI	OUI

Tableau 2 : Conditions d'emploi des différentes méthodes de calcul

III.4. Modèle de résistance au feu des structures en acier et mixte acier béton

La littérature fait état de différents types de logiciels (fonction de la méthode employée) utilisés pour calculer la réponse mécanique des structures en acier et mixte acier-béton exposées au feu. Trois types de méthodes de calcul peuvent être utilisés pour évaluer le comportement mécanique des structures en acier ou mixte acier-béton :

- ❖ Méthodes des valeurs tabulées prédéfinies ;
- ❖ Modèles de calcul simplifiés ;
- ❖ Modèles de calcul avancés.

Méthodes des valeurs tabulées prédéfinies

Cette méthode n'est applicable qu'aux structures mixtes acier-béton:

- poutres mixtes acier-béton en profilé métallique partiellement ou entièrement enrobé de béton,
- poteaux mixtes acier-béton en profilé métallique partiellement ou entièrement enrobé de béton et
- poteaux mixtes acier-béton en profil creux rempli de béton (circulaire ou rectangulaire).
- dalles mixtes

Elles sont basées principalement sur les résultats des essais sous feu normalisé, complétées et améliorées par la suite avec des études analytiques. Toutes ces valeurs mettent en relation le degré de résistance au feu normalisé, le niveau de chargement, les dimensions minimales de la section de l'élément, l'aire des armatures nécessaires et leur enrobage en béton dans un ou plusieurs tableaux afin d'obtenir rapidement la dimension de l'élément à utiliser pour la durée de résistance au feu requise. Cette approche est la plus simple, mais elle est limitée par un ensemble très strict de conditions géométriques et donne un résultat de calcul largement sécuritaire.

L'application de la méthode de calcul par valeur tabulée peut être réalisée dans deux situations différentes, l'une en cas de vérification où les dimensions des éléments de structure sont déjà connues et l'autre en cas de prédimensionnement où, en revanche, les actions mécaniques de calcul sont déjà définies.

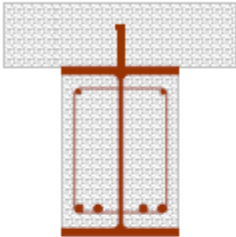
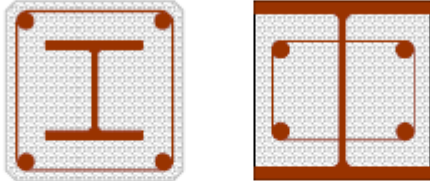
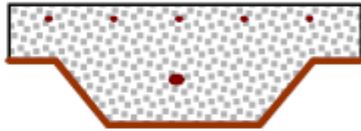
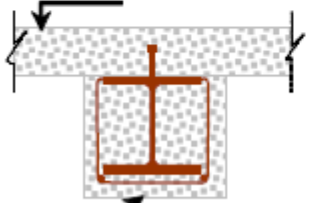
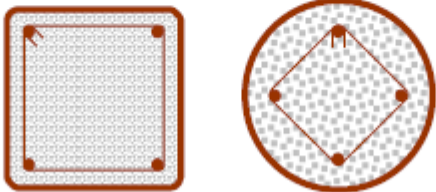
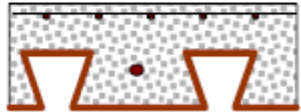
Poutres mixtes	Poteaux mixtes	Dalles (isolation thermique)
		
<p data-bbox="330 651 421 682">Dalle</p>  <p data-bbox="324 936 479 1011">Béton isolation</p>		

Tableau 3: Domaine d'application des méthodes de calcul par valeurs tabulées

En cas de vérification, de la résistance:

Les données:

les dimensions de la section de l'élément ainsi que sa capacité portante R_d vis à vis de la charge sont déjà connues. Par contre, on doit calculer l'effet des actions mécaniques en situation d'incendie $E_{fi,d}$ afin d'en déduire le niveau de chargement

$$\eta_{fi,t} = E_{fi,d} / R_d$$

A partir de la valeur du niveau de chargement, des dimensions de la section de l'élément et des conditions sur les dispositions constructives, les valeurs tabulées permettent d'obtenir le degré de résistance au feu de l'élément à vérifier par rapport à celui imposé par la réglementation.

En cas de pré-dimensionnement:

les dimensions de la section de l'élément ne sont pas encore définies. En revanche, on connaît les effets des actions E_d et $E_{fi,d}$ à partir des combinaisons de charges pour le dimensionnement à température normale et en situation d'incendie. Dans ce cas, on peut admettre de manière sécuritaire que le niveau de chargement s'exprime par:

$$\eta_{fi,t} = E_{fi,d} / E_d$$

A partir de cette valeur du niveau de chargement et du degré de résistance au feu normalisé, les dimensions minimales de la section ainsi que les dispositions constructives correspondantes de l'élément peuvent être définies. Enfin la section ainsi définie doit être vérifiée pour la condition d'utilisation à température normale, à savoir:

$$R_d \geq E_d$$

VERIFICATION

$$R_{fi,d,20} \text{ à } \theta_{20^\circ\text{C}}$$

$$E_{fi,d}$$

$$\eta_{fi,t} = E_{fi,d} / R_{fi,d,20}$$

Dimension section
Acier d'armature
Enrobage béton

Durée de résistance
au feu normalisé

DIMENSIONNEMENT

$$E_{fi,d} \text{ et } E_d$$

$$\eta_{fi,t} = E_{fi,d} / E_d$$

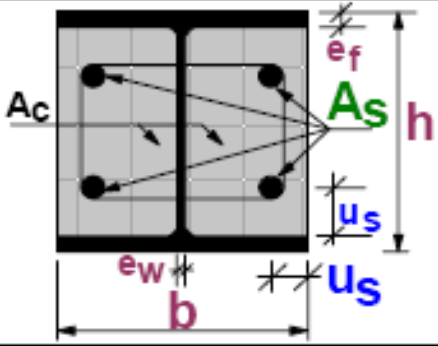
Durée de résistance au
feu normalisé

Dimension section
Acier d'armature
Enrobage béton

$$R_d \geq E_d$$

Figure 5: Deux possibilités d'application des méthodes de calcul simplifiées par valeur tabulée

Principe de fonctionnement des méthodes de calcul par valeurs tabulées (exemple des poteaux mixtes acier-béton en profilé métallique enrobé partiellement de béton)

		Résistance au feu normalisé			
		R30	R60	R90	R120
Minimum ratio of web to flange thickness e_w/e_f		0,5			
1	Minimum cross-sectional dimensions for load level	$\eta_{fi,t} \leq 0,28$			
1.1	minimum dimensions h and b [mm]	160	200	300	400
1.2	minimum axis distance of reinforcing bars u_s [mm]	-	50	50	70
1.3	minimum ratio of reinforcement $A_s/(A_c+A_s)$ in %	-	4	3	4
2	Minimum cross-sectional dimensions for load level	$\eta_{fi,t} \leq 0,47$			
2.1	minimum dimensions h and b [mm]	160	300	400	-
2.2	minimum axis distance of reinforcing bars u_s [mm]	-	50	70	-
2.3	minimum ratio of reinforcement $A_s/(A_c+A_s)$ in %	-	4	4	-
3	Minimum cross-sectional dimensions for load level	$\eta_{fi,t} \leq 0,66$			
3.1	minimum dimensions h and b [mm]	160	400	-	-
3.2	minimum axis distance of reinforcing bars u_s [mm]	40	70	-	-
3.3	minimum ratio of reinforcement $A_s/(A_c+A_s)$ in %	1	4	-	-

Résistance au feu normalisé

Niveau de chargement

Dimension de la section

Acier d'armature

Enrobage béton

Figure 6 : Principe de fonctionnement des méthodes de calcul par valeurs tabulées (exemple des poteaux mixtes acier-béton en profilé métallique enrobé partiellement de béton)

Ce type de modèles de calcul peut être divisé en deux catégories :

La première: correspond à toutes les méthodes de calcul simplifiées (vérification en résistance) établies pour l'analyse par élément et applicables soit aux structures en acier, soit aux structures mixtes acier-béton.

La deuxième: est la méthode de la température critique largement appliquée aux éléments de structure en acier et Mixtes

Domaine d'applications

· **Eléments en Acier:** Presque tous les types d'éléments en acier

éléments tendus, poutres, poteaux, éléments d'une classe de section 1, 2, 3 ou 4, avec ou sans protection passive contre l'incendie.

Conformément à l'Eurocode 3 partie 1.2, dans la détermination de la résistance à l'incendie des éléments en acier de classes 1,2 et 3, il convient d'utiliser la résistance caractéristique correspondant à une déformation de 2%. Pour les profils en acier de classe 4, il convient d'utiliser la limite conventionnelle d'élasticité à 0.2% à température élevée ;

Eléments Mixtes:

· Poutres mixtes acier-béton avec ou sans enrobage de béton du profilé métallique ;

· Poteaux mixtes partiellement enrobés de béton ; Poteaux mixtes avec profil creux rempli de béton ;

· Dalles mixtes ;

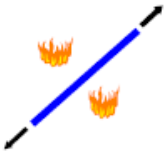
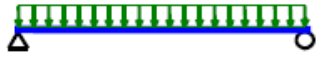


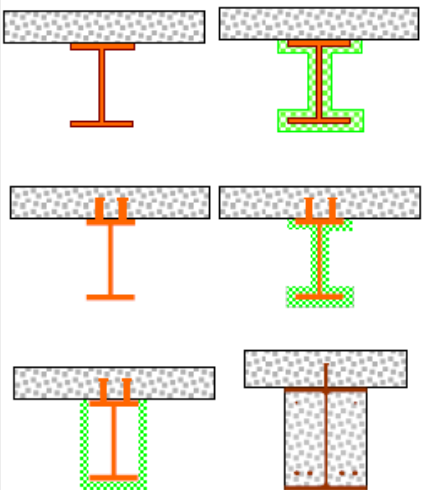
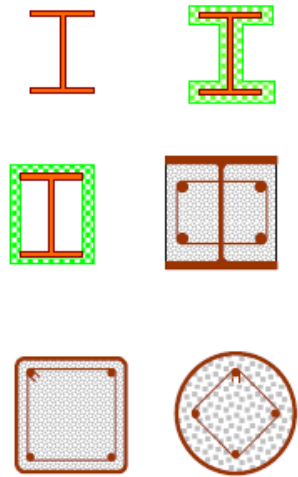
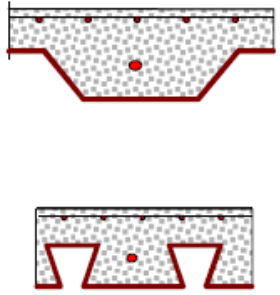
<p>Tirants</p> 	<p>Poutres (acier et mixtes)</p> 	<p>Poteaux</p> 	<p>Dalles mixtes (isolation thermique et résistance mécanique)</p>
			

Figure 7 : Domaine d'application des modèles de calcul simplifiés

Les modèles de calcul simplifiés peuvent être scindés en trois familles :

- Éléments soumis à un effort axial ou à un moment de flexion qui ne présentent aucun problème d'instabilité ; dans ce cas, le modèle de calcul simplifié est basé sur la théorie de la plasticité des sections aux températures élevées ;
- Éléments soumis à un effort de compression axiale simple, sensible, au phénomène d'instabilité (flambement global et local), comme les poteaux élancés chargés axialement ; dans ce cas, le modèle de calcul simplifié est généralement basé sur l'approche par courbe de flambement mais adaptée pour la situation d'incendie

Éléments soumis à la flexion composée, comme les poteaux élancés chargés avec une importante excentricité, les poutres avec déversement latéral, etc. ; pour ce type d'élément, le modèle de calcul simplifié prend en compte l'effet combiné des différentes sollicitations en assemblant les deux modèles de calcul ci-dessus correspondant à la condition simple de chargement en flexion ou en compression.

- Étape 1 : calcul de l'échauffement $\Rightarrow \theta_a$
- Étape 2 : évaluation de la capacité portante $\Rightarrow R_{fi,d,t}$
- Étape 3 : détermination de la charge appliquée $\Rightarrow E_{fi,d,t}$
- Étape 4 : vérification de la résistance au feu $\Rightarrow R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$

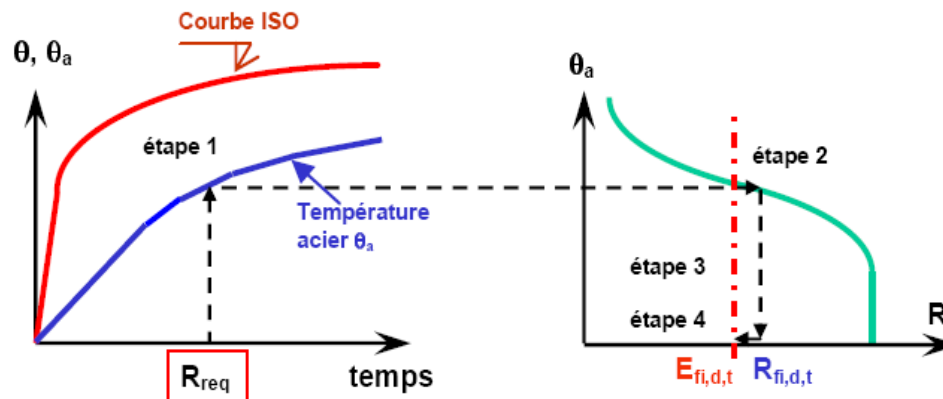


Figure 8: Principe d'application des méthodes de calcul simplifiées pour les éléments en acier

Note 1 : À l'incendie, des méthodes de calcul sont également proposées pour l'acier inoxydable. Ces méthodes sont basées sur celles relatives aux aciers au carbone. Elles s'appliquent :

- Aux éléments d'une classe de section 1, 2, 3 ou 4 (éléments présentant des risques de voilement local importants);
- Aux tirants (éléments tendus) ;
- Aux poutres sur appuis simples (éléments fléchis) ;
- Aux poteaux (éléments comprimés et éléments comprimés fléchis).

Les sections transversales en acier inoxydable sont classées de la même façon que les aciers au carbone. C'est le rapport largeur-épaisseur des parois d'une section transversale qui détermine si cette paroi a une grande capacité de rotation ou non, ou bien si elle est sensible ou non au voilement.

Note 2 : L'Eurocode 3 Partie 1.2 donnent également des méthodes permettant de vérifier la résistance au feu des boulons soumis au cisaillement, des boulons tendus (précontraint ou non précontraint) et des soudures.

Méthode de la température critique

La méthode de la température critique 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 ou mixtes acier-béton avec ou sans protection contre l'incendie et dont la section en acier est exposée sur quatre ou trois faces ;
- Poutres en acier de classe de section 1, 2 ou 3 qui ne présentent aucun risque d'instabilité ;
- Poteaux (tronçons courts) en acier avec ou sans protection passive et entièrement entourés par le feu ;
- Éléments tendus en acier exposés au feu.

Parmi les modèles de calcul simplifiés recommandés dans les Eurocodes 3 (EN1993-1-2) [3] et 4 (EN1994-1-2) [2], on peut repérer une méthode spécifique intitulée comme " méthode de température critique". 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

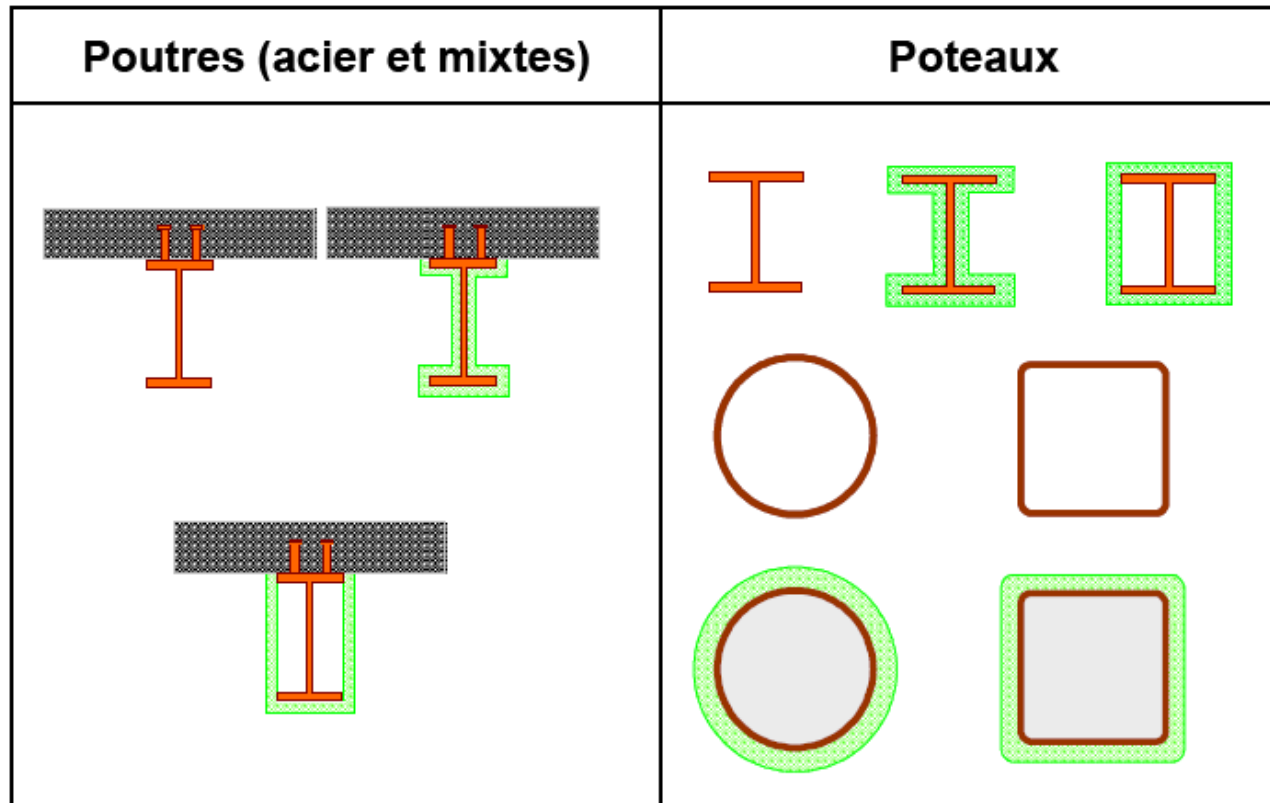
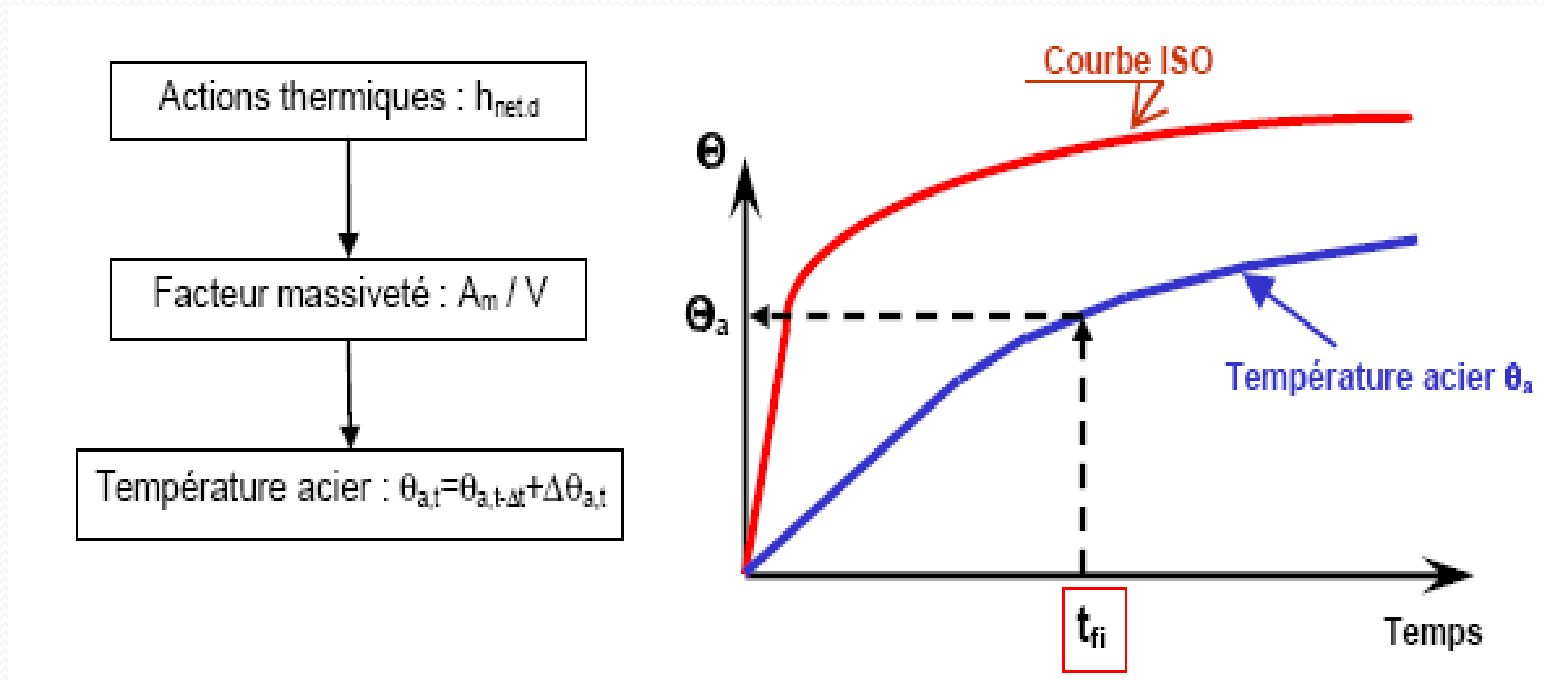
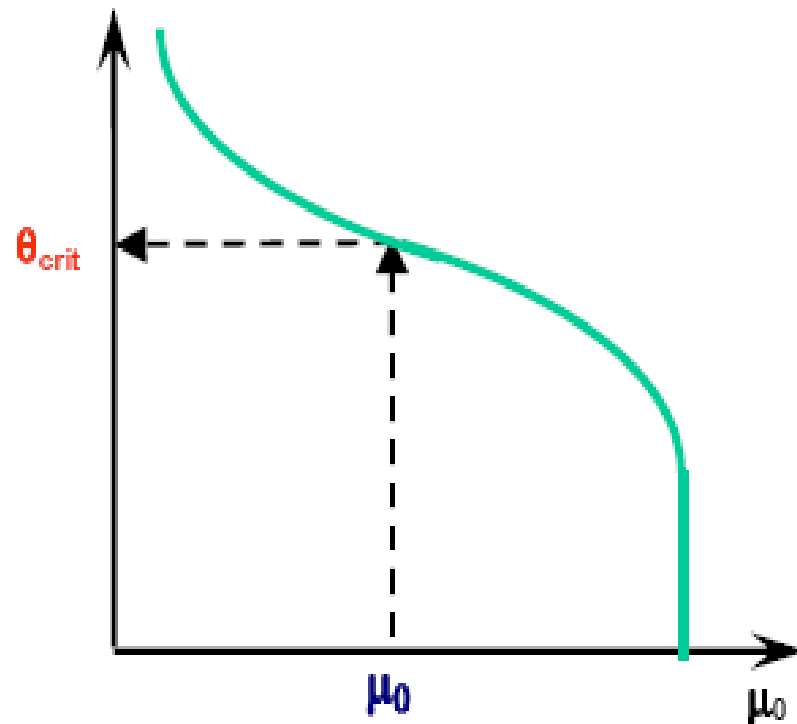
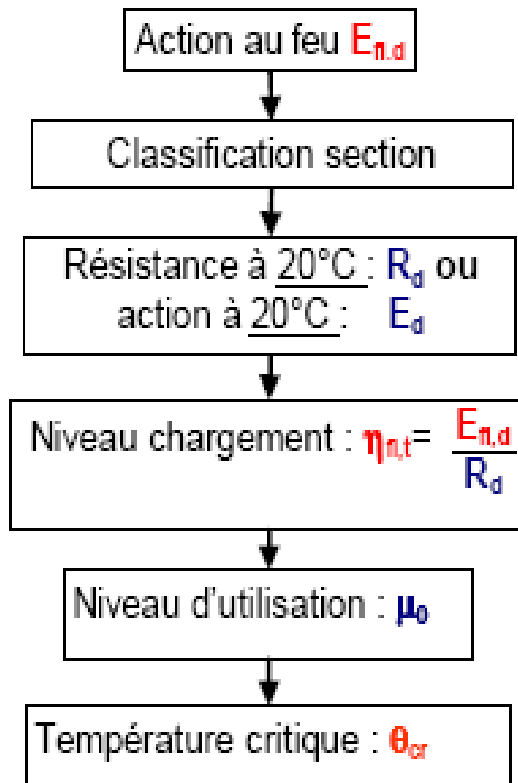


Figure 9: Domaine d'application de la méthode de la température critique

2 - Détermination de la température atteinte par l'élément après la durée de résistance au feu requise t_{fi}



1 - Détermination de la température critique de l'élément en acier



3- Vérification que la température de l'acier nu, pour la durée de stabilité au feu requise, est inférieure à la température critique : $\theta_a < \theta_{cr}$

Distribution des températures

Pour le calcul des températures dans les poutres, les facteurs d'adaptation k_1 et k_2 doivent être introduit pour tenir compte de la distribution non uniforme de la température sur la hauteur de la section et suivant la longueur aux niveaux des appuis. Les valeurs de k_1 et k_2 sont prises comme suit $k=k_1.k_2$

k_1 pour la distribution non uniforme de la température sur la section:

- pour les poutres exposées sur toutes les faces : $k_1=1.0$
- pour les poutres non protégées exposées sur 3 faces, avec une dalle mixte ou en béton armé sur la face 4: $k_1=0.70$
- pour les poutres protégées exposées sur 3 faces, avec une dalle mixte ou en béton armé sur la face 4: $k_1=0.85$

k_2 pour la distribution non uniforme de la température le long de la poutre:

- pour les poutres hyperstatiques: $k_2=0.85$
- autres cas : $k_2=1$

Hypothèses générales

La température critique est déterminée par le niveau de chargement appelé aussi le degré d'utilisation:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,t}}$$

$E_{fi,d}$: l'effort des actions calculé en situation d'incendie

$R_{fi,d,t}$: l'effort de résistance en situation d'incendie pour $t=0$ (c.a.d en température ambiante et avec $\gamma_{M,fi} = 1.0$)

Le calcul de la résistance est basé sur les hypothèses suivantes:

- **La méthode est seulement valide si le phénomène de diversement est empêché .**
- **L'augmentation de la température suit la courbe de feu nominal (ISO 834, EN1364-1)**
- **l'échauffement est uniforme pour les éléments en acier. La distribution d'échauffement non uniforme est considérée par le facteur $k = k_1 \cdot k_2$.**
- **La classe des aciers est conformément à l'EN 10025 parties 1 à 6 (S235, S355, S460)**
- **Pour les éléments non protégés l'effet d'ombre est pris en compte par $(A_m/V)_{sh}$ qui est égale à $0.9 \cdot (A_m/V)_b$ pour la section-I et $1.0 \cdot (A_m/V)_b$ pour les autres cas, avec $(A_m/V)_b$ le facteur de la section emboîtée (EN 1993-1 2§4.2.5).**
- **Pour l'analyse des éléments, les effets de la dilatation thermique de l'élément peuvent être négligés**
- **Les profilés en acier à températures élevées de classes 1, 2 ou 3 (avec $A_m/V > 10 \text{ m}^{-1}$). Pour les éléments de section de classe 4 autres que les éléments tendus, la température de l'acier à toutes les sections transversales doit être limitée à $\theta_{crit} = 350^\circ\text{C}$ si aucune instruction est donnée.**
- **Les sections transversales peuvent être classées à température élevée comme pour la température ambiante selon l'EN 1993-1-1, avec une valeur réduite du facteur $\varepsilon = 0.85 (235 / f_y)^{1/2}$**
- **les courbes d'augmentation de température pour les éléments isolés en acier calculés $\phi=0$ (facteurs de modification pour les autres valeurs voir EC3 section 6).**

Calculation procedure

- Choose the appropriate value of the adaptation factor $k = k_1 \cdot k_2$ (see section 3.1).
- Calculate the degree of utilisation in fire μ_0 .
- Define the critical temperature for the steel beam according to Figure 0-1.
- Determine the section factor including shadow effect $(A_m/V)_{sh}$ for unprotected steel members (see section 6) and A_p/V for steel members insulated by fire protection material with the thermal section factor $[(A_p/V) \cdot (\lambda_p/d_p)]$ (see section 6).
- Making use of the Nomogram to deduce, from the critical temperature, the fire resistance time, and to check whether with fulfils the requirement

Procédure de calcul

- Choisissez la valeur appropriée du facteur d'adaptation $k = k_1 \cdot k_2$.
- Calculez le degré d'utilisation en cas d'incendie μ_0 .
- Définissez la température critique de la poutre en acier conformément à la Figure ci-dessus.
- Déterminer le facteur de section, y compris l'effet d'ombre $(A_m/V)_{sh}$ pour les éléments en acier non protégés et (A_p / V) pour les éléments en acier isolés par un matériau de protection contre le feu avec le facteur de section thermique $[(A_p/V) \cdot (\lambda_p/d_p)]$.
- Utilisation du nomogramme pour déduire, à partir de la température critique, le temps de résistance au feu et vérifier si avec satisfaction de l'exigence.

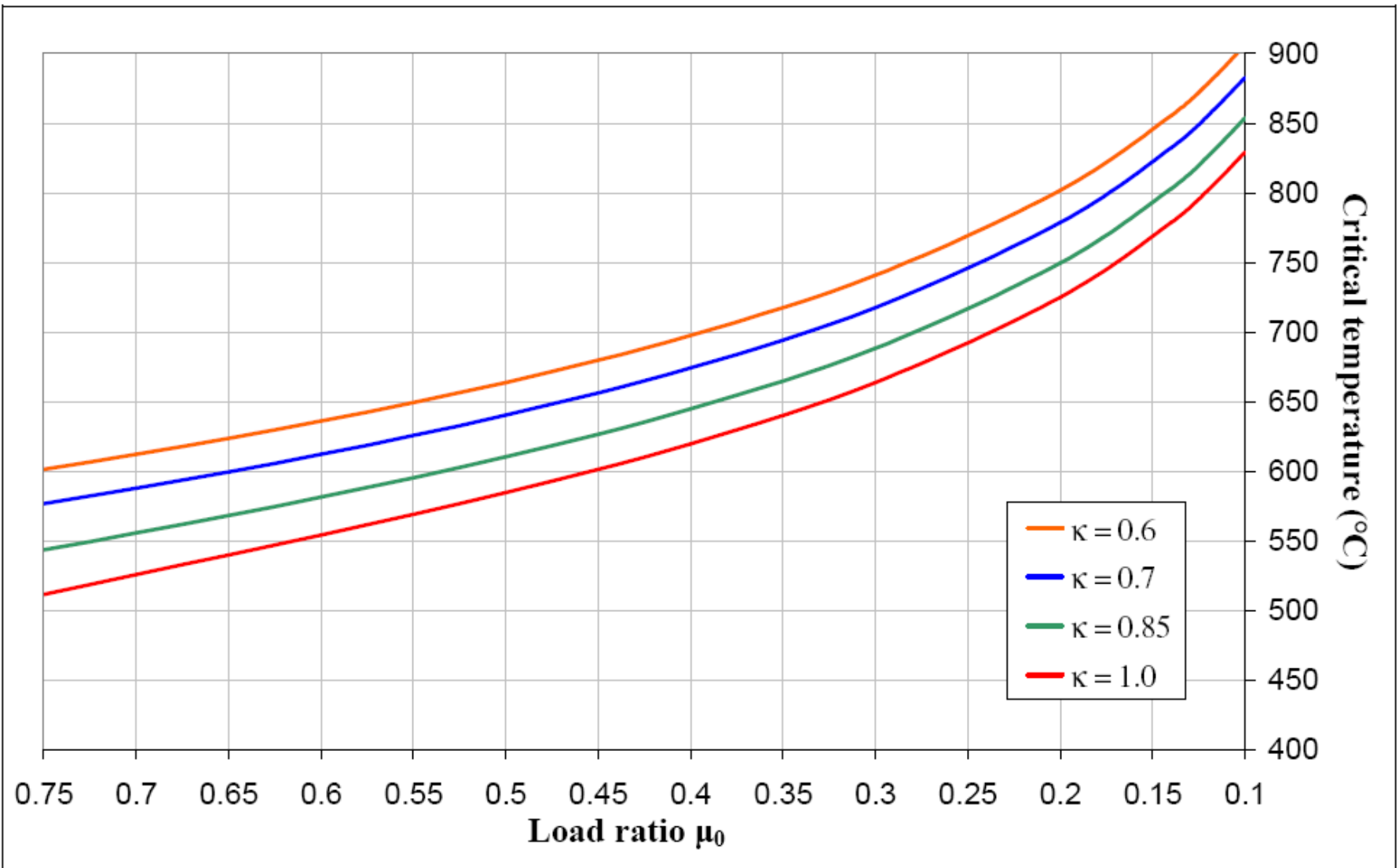


Figure 0-1 : Critical Temperature in function of the load ratio for different adaptation factors