

COURS

CHAPITRE II CALCUL DE LA RESISTANCE AU FEU DES STRUCTURES EN ACIER ET MIXTES ACIER-BETON

Présenté par :
DIMIA Mohamed Salah

Option
Charpente métallique et mixte

Plan du cours

INTRODUCTION AU PROBLEME

Caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux

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

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

Méthodes de calcul: -

VALEURS TABULÉES

MÉTHODES DE CALCUL SIMPLIFIÉES

MÉTHODES DE CALCUL AVANCÉES par logiciel

Applications

INTRODUCTION

Le présent chapitre fait un état de l'art des outils (plus ou moins sophistiqués) actuellement disponibles en ingénierie du comportement au feu pour les ouvrages à structure en acier ou mixtes acier-béton.

L'évaluation du comportement au feu des éléments de structure nécessite de connaître les propriétés des matériaux aux températures élevées, à savoir les caractéristiques thermo-physiques, les relations contrainte-déformation, le module de rigidité, la résistance et la dilatation thermique en fonction de la température.

Les propriétés données dans la suite de ce chapitre sont celles spécifiées dans les parties feu de l'Eurocode 3.

Propriétés mécaniques des matériaux à froid

Propriétés mécaniques des aciers de construction

Le diagramme contrainte-déformation de l'acier de construction appliqué dans les calculs est élastique-parfaitement plastique

Le module d'élasticité

$$E_s = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

Module de cisaillement

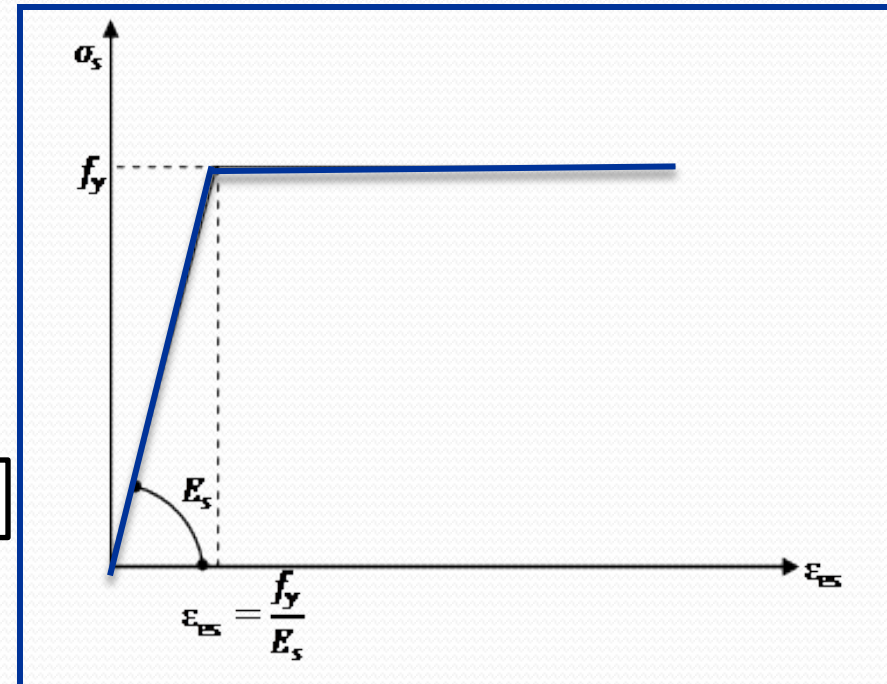
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = 81000 \text{ N/mm}^2$$

Coefficient de Poisson en phase élastique

$$\nu = 0,3$$

Coefficient de dilatation thermique
linéaire par °C (pour $T \leq 100 \text{ °C}$)

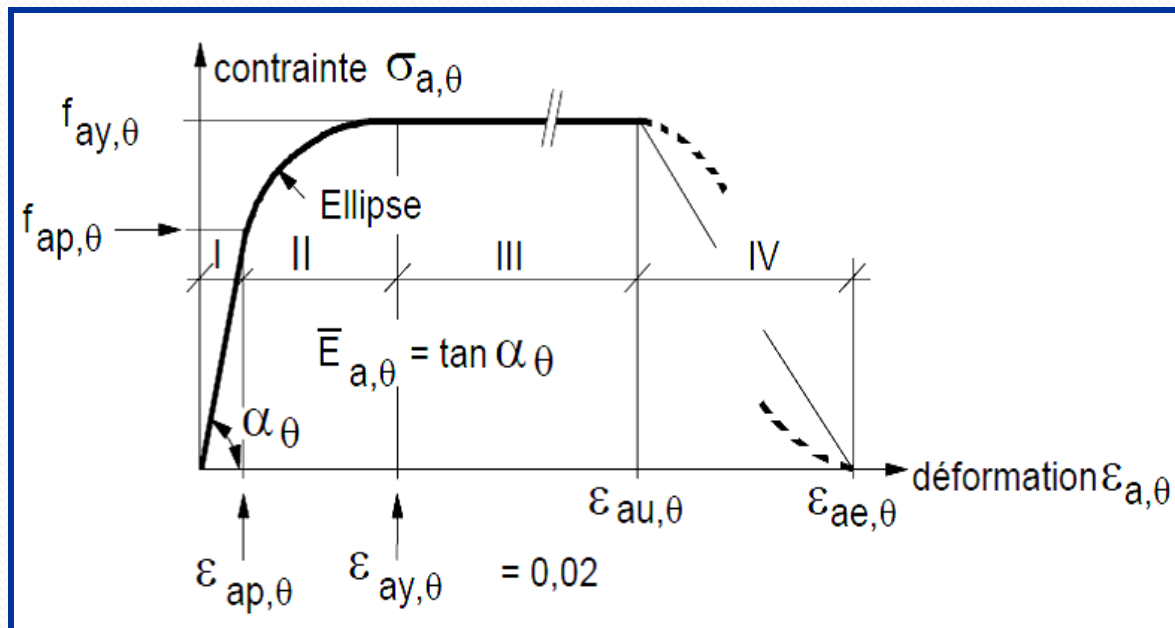
$$\alpha = 12 \times 10^{-6}$$



Propriétés mécaniques aux températures élevées pour les aciers de construction (acier de carbone)

Les relations contrainte-déformation données dans la Figure 2 et le Tableau I sont définies par trois paramètres : **EC1993-1-2**

- La pente du domaine linéaire élastique $E_{a,\theta}$;
- La limite de proportionnalité $f_{ap,\theta}$;
- Le niveau maximal de contrainte $f_{ay,\theta}$ ou la limite d'élasticité efficace.



Modèle mathématique exprimant les relations contrainte-déformation de l'acier de construction aux températures élevées. (compression et traction).

Tableau II

Relation entre les différents paramètres du modèle mathématique de la figure 2

Domaine de déformation	Contrainte σ	Module tangent
I / élastique $\varepsilon \leq \varepsilon_{ap,\theta}$	$E_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
II / transitoire elliptique $\varepsilon_{ap,\theta} \leq \varepsilon$ $\varepsilon \leq \varepsilon_{ay,\theta}$	$(f_{ap,\theta} - c) + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})^2}$ avec $a^2 = (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta})(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta} + c/E_{a,\theta})$ $b^2 = E_{a,\theta} (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta})c + c^2$ $c = \frac{(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta})^2}{E_{a,\theta} (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}) - 2(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta})}$	$\frac{b(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})}{a\sqrt{a^2 - (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})^2}}$
III / plastique $\varepsilon_{ay,\theta} \leq \varepsilon$ $\varepsilon \leq \varepsilon_{au,\theta}$	$f_{ay,\theta}$	0

Ces relations sont définies à partir des 3 principaux paramètres suivants:

- limite d'élasticité efficace, par rapport à la limite d'élasticité à 20 °C : $f_{y,\theta} = k_{y,q} f_y$
- limite de proportionnalité, par rapport à la limite d'élasticité à 20 °C : $f_{p,\theta} = k_{p,q} f_y$
- pente du domaine élastique linéaire, par rapport à la pente à 20 °C : $E_{a,\theta} = k_{E,q} E_a$

Les facteurs de réduction à appliquer en fonction de la température à ces paramètres sont présentés sur le tableau2.

Facteur de réduction pour la relation contrainte-déformation de l'acier au carbone

Température de l'acier θ_a	Facteurs de réduction à la température θ_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.

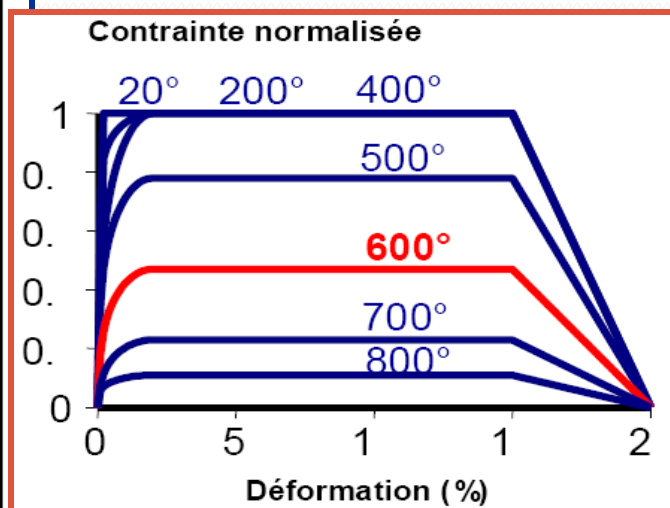
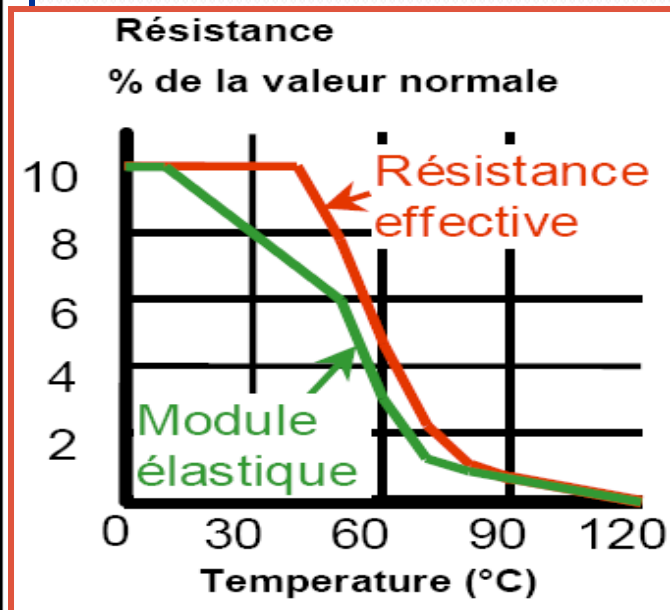
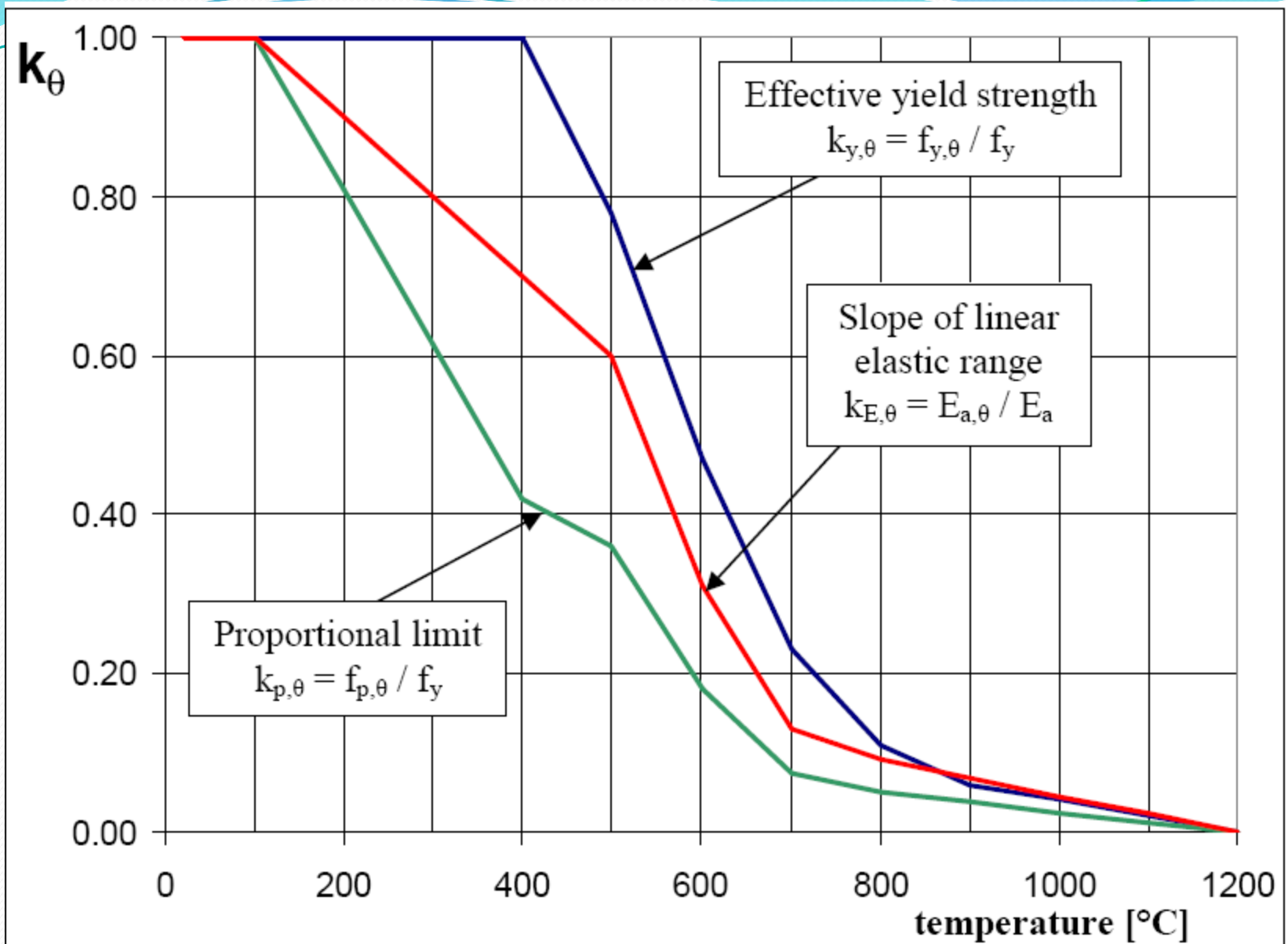


Tableau II Facteurs de réduction k_θ pour les relations contrainte-déformation de l'acier de construction aux températures élevées

Température de l'acier θ_a [°C]	$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$	$k_{p,\theta} = \frac{f_{ap,\theta}}{f_{ay}}$	$k_{y,\theta} = \frac{f_{ay,\theta}}{f_{ay}}$	$k_{u,\theta} = \frac{f_{au,\theta}}{f_{ay}}$
20	1,00	1,00	1,00	1,25
100	1,00	1,00	1,00	1,25
200	0,90	0,807	1,00	1,25
300	0,80	0,613	1,00	1,25
400	0,70	0,420	1,00	
500	0,60	0,360	0,78	
600	0,31	0,180	0,47	
700	0,13	0,075	0,23	
800	0,09	0,050	0,11	
900	0,0675	0,0375	0,06	
1000	0,0450	0,0250	0,04	
1100	0,0225	0,0125	0,02	
1200	0	0	0	

En cas d'actions thermiques au sens de l'EN 1991-1-2 (simulation sous incendie naturel), et en particulier pour la température décroissante, les valeurs spécifiées dans le tableau II pour les relations contrainte-déformation de l'acier de construction peuvent être utilisées comme approximation suffisamment précise.



Caractéristiques thermo-physiques de l'acier au carbone

D'une manière générale, les caractéristiques thermo-physiques à considérer pour les matériaux de construction sont la conductivité λ_a (aptitude à transmettre le flux de chaleur), la chaleur spécifique C_a et la dilatation thermique $(\Delta l/l)_a$.

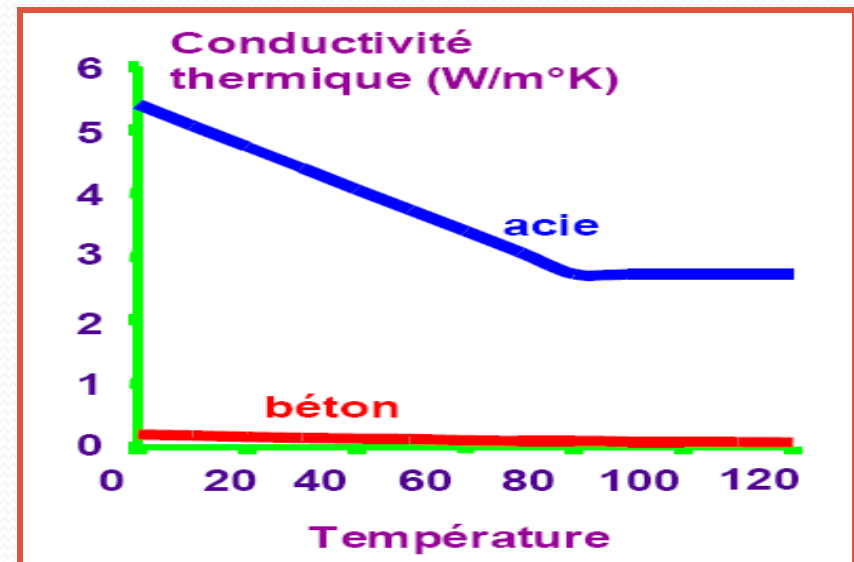
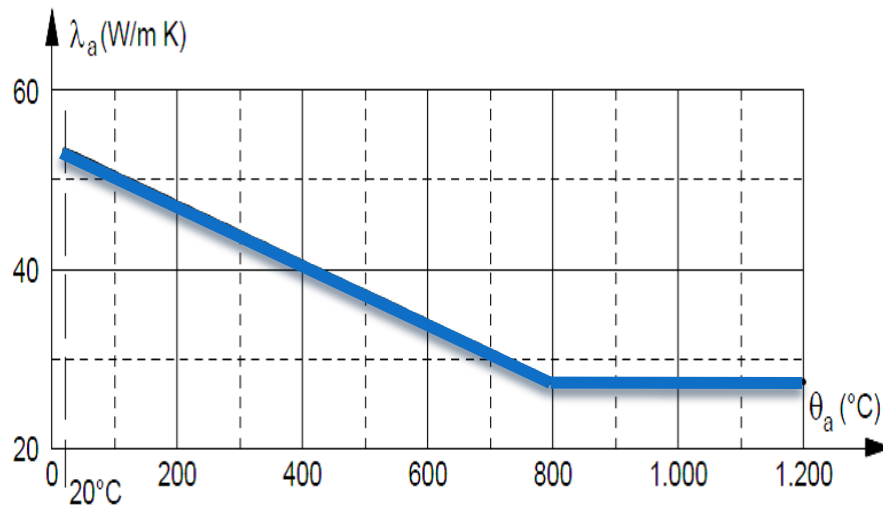
Conductivité Thermique:

La conductivité thermique de l'acier est beaucoup plus importante que celle du béton. Elle peut être définie à partir des relations suivantes (figure 3) :

- pour $20\text{ °C} \leq \theta_a < 800\text{ °C}$: $\lambda_a = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta_a$ W/mK
- pour $800\text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ °C}$: $\lambda_a = 27,3$ W/mK

Où θ_a est la température de l'acier [°C].

L'utilisation de la valeur constante de 45 W/m°K est autorisée dans des calculs simplifiés.



Chaleur spécifique

La chaleur spécifique de l'acier de construction (en J/Kg°K) a tendance à augmenter avec la température. La courbe donnant sa variation en fonction de la température peut être définie par les relations suivantes

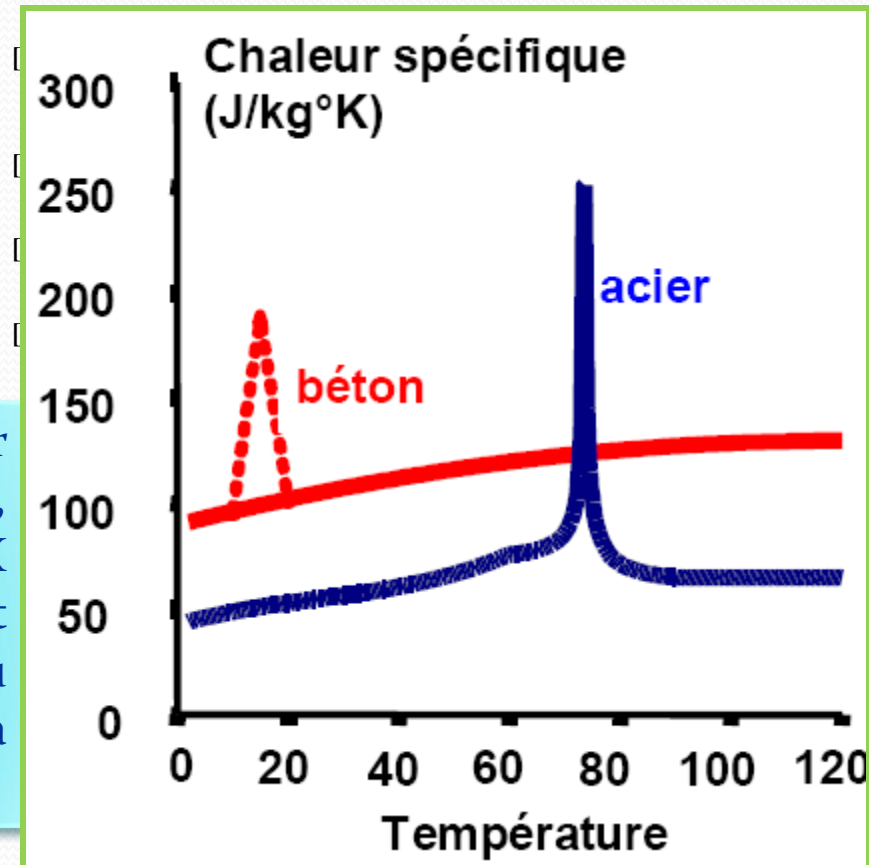
$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3$$

$$c_a = 666 - \left(\frac{13002}{\theta_a - 738} \right)$$

$$c_a = 545 - \left(\frac{17820}{\theta_a - 731} \right)$$

$$c_a = 650$$

Nous pouvons noter que la courbe donnée par l'Eurocode 4 présente un pic autour de 735°C, dont le sommet d'environ 2500 J/Kg°K n'apparaît pas sur la figure. Ce pic tient compte du caractère endothermique du changement de phase cristallographique qui a lieu vers cette température



Dans les modèles de calcul simplifiés il convient de prendre la valeur moyenne suivante :

$$c_a = 600 \quad [\text{J/kgK}]$$

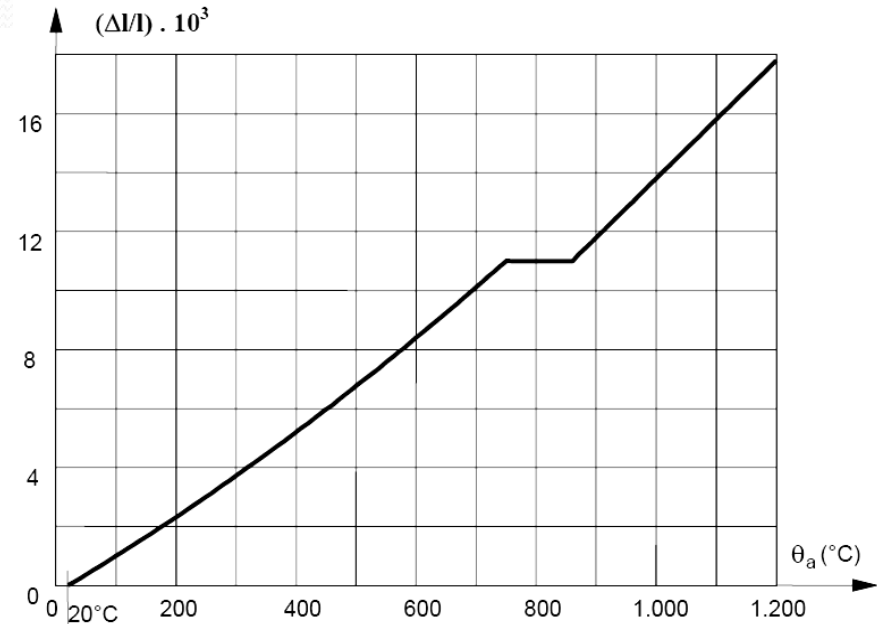
Dilatation thermique de l'acier au carbone :

Même en l'absence de toute charge appliquée, les matériaux usuels de construction se déforment sous l'action d'une variation de température, l'échauffement produisant un allongement du matériau. La variation du coefficient de dilatation thermique de l'acier en fonction de la température peut être définie par la relation suivante

- pour $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 750^{\circ}\text{C}$: $(\Delta l/l)_a = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4}$
- pour $750^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 860^{\circ}\text{C}$: $(\Delta l/l)_a = 1,1 \times 10^{-2}$
- pour $860^{\circ}\text{C} < \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$: $(\Delta l/l)_a = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3}$

Où l est la longueur à 20°C ; Δl est la dilatation induite par la température ; θ_a est la température de l'acier [$^{\circ}\text{C}$].

La courbe de dilatation montre un ralentissement, avec dans certains cas une phase passagère de contraction pour les températures dans la plage 750 à 850°C. Ce ralentissement est dû au changement de phase cristallographique (transformation allotropique). Au-delà de 800 à 900°C, la dilatation reprend plus rapidement qu'aux températures inférieures et suit une loi linéaire en fonction de la température. Toutefois, dans leur domaine de validité commun, les deux normes donnent des valeurs très proches.



Dilatation thermique de l'acier de construction

Masse volumique :

L'incendie a peu d'influence sur la masse volumique de l'acier. Une valeur de 7850 kg / m^3 est généralement adoptée pour tous les types d'acier.

Propriétés des aciers inoxydables

Caractéristiques thermo-physiques

Conductivité thermique de l'acier :

La conductivité thermique de l'acier inoxydable λ_a peut être déterminée au moyen de l'expression suivante :

- $\lambda_a = 14,6 + 1,27 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/mK}$

Où θ_a est la température de l'acier [$^{\circ}\text{C}$].

Chaleur spécifique de l'acier :

La chaleur spécifique de l'acier inoxydable c_a peut être déterminée au moyen de l'expression :

- $c_a = 450 + 0,280 \times \theta_a - 2,91 \times 10^{-4} \theta_a^2 + 1,34 \times 10^{-7} \theta_a^3 \text{ J/kgK}$

Où θ_a est la température de l'acier [$^{\circ}\text{C}$].

Dilatation thermique de l'acier :

La dilatation thermique de l'acier inoxydable austénitique $\Delta/l/l$ peut être déterminée par :

- $\Delta/l/l = (16 + 4,79 \times 10^{-3} \theta_a - 1,243 \times 10^{-6} \theta_a^2) \times (\theta_a - 20) 10^{-6}$

Où l est la longueur à 20°C ; Δ/l est la dilatation induite par la température; θ_a est la température de l'acier [$^{\circ}\text{C}$].

Masse volumique :

L'incendie a peu influence sur la masse volumique de l'acier. Une valeur de 7850 kg / m^3 est généralement adoptée pour tous les types d'acier.

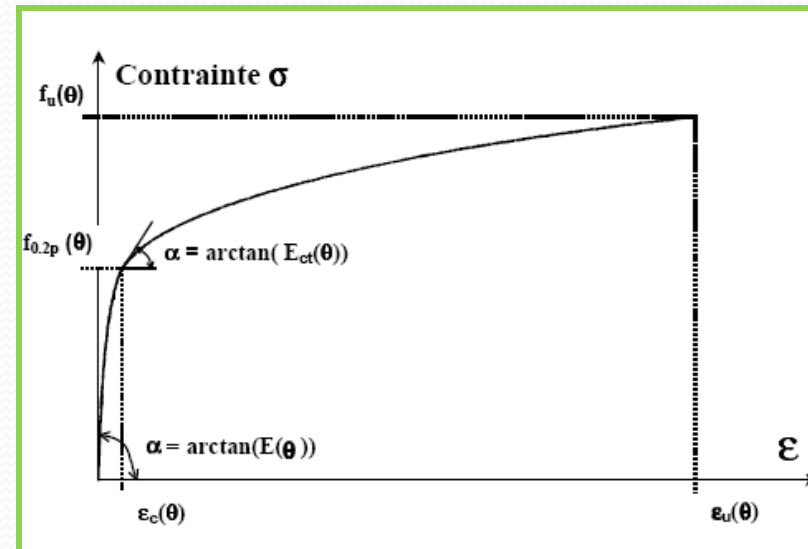
Caractéristiques mécaniques des aciers inoxydables

A température élevée, les relations “contrainte-déformation” adoptées pour l’acier inoxydable peuvent être basées sur un modèle elliptique proche de la formulation adoptée pour les aciers carbonés dans l’Eurocode 3 partie 1.2. Ce modèle est divisé en deux parties distinctes

- Une branche non-linéaire pour la première partie ;
- Une seconde partie inchangée en comparaison avec l’Eurocode 3 ;

Les relations contrainte-déformation de l’acier inoxydable sont définies par 6 paramètres (fonction de la température et de la nuance d’acier), à savoir:

- Le module d’élasticité $E(\theta)$ à l’origine ;
- Le module d’élasticité $E_{ct}(\theta)$ à la résistance d’épreuve ;
- La limite d’élasticité à 0.2% de déformation plastique notée $f_{0.2p}(\theta)$;
- La résistance maximale ou ultime $f_u(\theta)$;
- La déformation totale $\varepsilon_c(\theta)$ correspondante à $f_{0.2p}(\theta)$;
- La déformation ultime $\varepsilon_u(\theta)$ correspondante à $f_u(\theta)$.



Les facteurs de réduction à appliquer à ces paramètres en fonction de la température et de la nuance d’acier sont donnés dans l’annexe E de l’Eurocode 3 Partie 1.2.

Relations contrainte-déformation des aciers inoxydables

Plage de déformation	Contrainte σ	Module tangent E_t
$\varepsilon \leq \varepsilon_{c,\theta}$	$\frac{E \cdot \varepsilon}{1 + a \cdot \varepsilon^b}$	$\frac{E(1 + a \cdot \varepsilon^b - a \cdot b \cdot \varepsilon^b)}{(1 + a \cdot \varepsilon^b)^2}$
$\varepsilon_{c,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{0.2p,\theta} - e + (d/c) \sqrt{c^2 - (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)^2}$	$\frac{d + (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)}{c \sqrt{c^2 - (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)^2}}$
Paramètres	$\varepsilon_{c,\theta} = f_{0.2p,\theta} / E_{a,\theta} + 0.002$	
Fonctions	$a = \frac{E_{a,\theta} \varepsilon_{c,\theta} - f_{0.2p,\theta}}{f_{0.2p,\theta} \varepsilon_{c,\theta}^b}$ $b = \frac{(1 - \varepsilon_{c,\theta} E_{a,\theta} / f_{0.2p,\theta}) E_{a,\theta} \varepsilon_{c,\theta}}{(E_{a,\theta} \varepsilon_{c,\theta} / f_{0.2p,\theta} - 1) f_{0.2p,\theta}}$ $c^2 = (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta}) \left(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta} + \frac{e}{E_{c,\theta}} \right)$ $d^2 = e(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta}) E_{c,\theta} + e^2$ $e = \frac{(f_{u,\theta} - f_{0.2p,\theta})^2}{(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta}) E_{c,\theta} - 2(f_{u,\theta} - f_{0.2p,\theta})}$	

Relation contrainte-déformation pour le béton

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}$$

Pour $0 \leq |\varepsilon_c| < \varepsilon_{cu1}$

Avec :

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$$

$$\varepsilon_{c1} = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8 \times 10^{-3}$$

$$k = 1,05 E_{cm} \times |\varepsilon_{c1}| / f_{cm}$$

$$E_{cm} = 1,05 \times 22000 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$$

ε_{cu1}

$$\varepsilon_{cu1} = 3,5 \times 10^{-3} \text{ si}$$

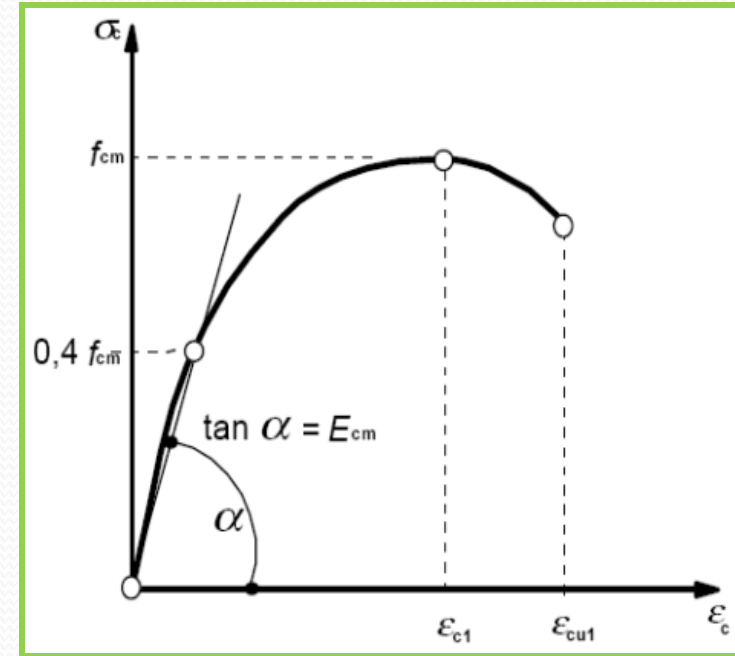
$$\varepsilon_{cu1} = \left(2,8 + 27 \left(\frac{98 - f_{cm}}{100} \right)^4 \right) \times 10^{-3}$$

est la déformation au pic de contrainte

est la valeur nominale de la déformation ultime.

Si $f_{cm} \leq 50$ [Mpa]

Si $f_{cm} > 50$ [Mpa]



Représentation schématique de la relation contrainte-déformation pour le béton

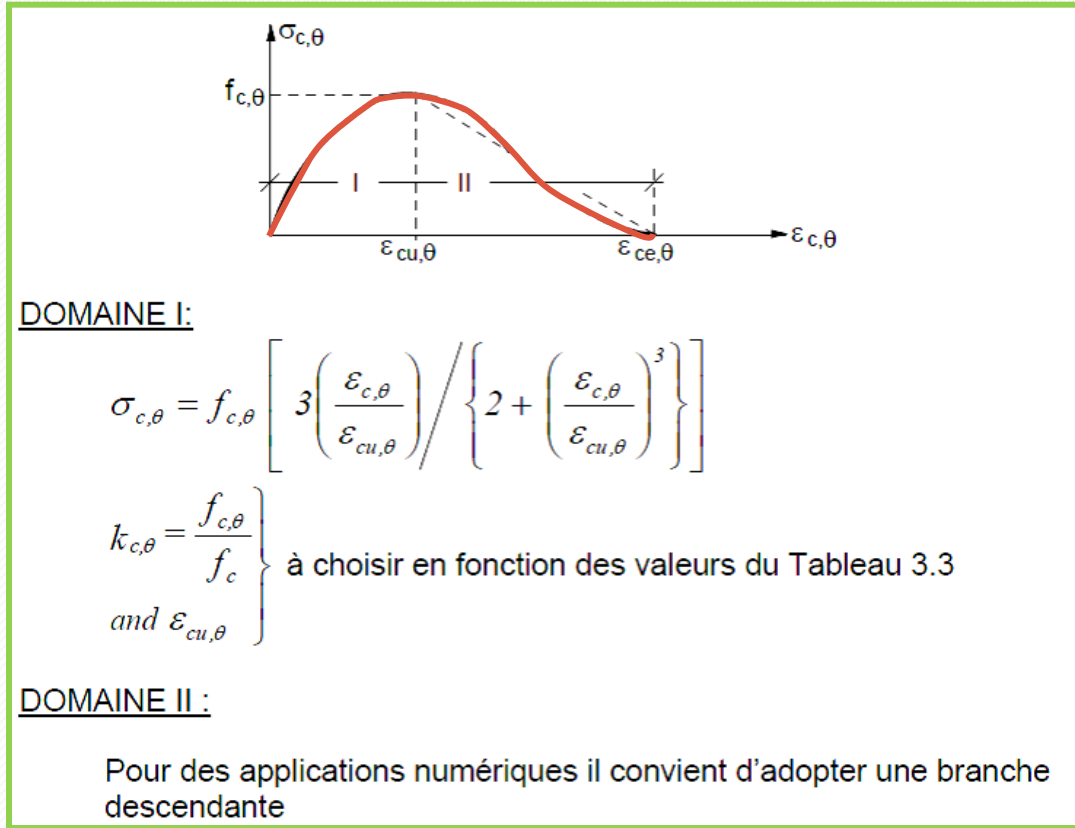
La résistance de calcul en traction

La résistance de traction est supposée nulle pour tout les calculs.

Propriétés mécaniques du béton aux températures élevées

Les relations contrainte-déformation sont définies par deux paramètres :

- la résistance à la compression $f_{c,\theta}$
- la déformation $\varepsilon_{cu,\theta}$ correspondant à $f_{c,\theta}$.



Le Tableau suivant donne, pour des températures élevées du béton θ_c , le facteur de réduction $k_{c,\theta}$ à appliquer à f_c pour déterminer $f_{c,\theta}$ et la déformation $\varepsilon_{cu,\theta}$. Pour des valeurs intermédiaires de la température, on peut interpoler linéairement.

Tableau

Valeurs des deux principaux paramètres des relations contrainte-déformation du béton de masse volumique courante (NC) et de béton léger (LC), à haute température

Température du béton	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_c$		$\varepsilon_{cu,\theta} \cdot 10^3$
	NC	LC	NC
20	1	1	2,5
100	1	1	4,0
200	0,95	1	5,5
300	0,85	1	7,0
400	0,75	0,88	10,0
500	0,60	0,76	15,0
600	0,45	0,64	25,0
700	0,30	0,52	25,0
800	0,15	0,40	25,0
900	0,08	0,28	25,0
1000	0,04	0,16	25,0
1100	0,01	0,04	25,0
1200	0	0	-