

Choix du matériau acier vis-à-vis de la rupture fragile – 2^e partie

Cet article en trois parties explique la prise en compte de la rupture fragile selon la norme NF EN 1993-1-10 et selon le rapport JRC-CECM EUR 23510 servant de son document d'information.

Cette partie présente de manière synthétique les règles pour le choix des aciers vis-à-vis de la rupture fragile selon la norme NF EN 1993-1-10.

Introduction

Dans la [1^{re} partie de cet article](#), il a été montré que le but de la méthodologie générale proposée dans la norme NF EN 1993-1-10 et détaillée dans le rapport JRC-CECM de Sedlacek et al (EUR 23510) est de se prononcer sur l'adéquation du choix de la qualité d'un acier donné, vis-à-vis de sa ductilité, par une des deux approches.

La première des deux approches, couvrant la plupart de situations rencontrées dans la pratique, est détaillée dans cette 2^e partie de ce texte, tandis que la seconde, limitée à un nombre de situations plutôt rarement rencontrées, le sera dans la 3^e.

Approche 1 – Justification en utilisant les valeurs tabulées

Généralités

Cette approche offre à l'ingénieur la possibilité de choisir la qualité de l'acier sans procéder à des calculs justificatifs. Il s'agit donc d'une approche enveloppe qui place en sécurité.

Le Tableau 2.1 de la NF EN 1993-1-10, présenté à la Figure 1, donne l'épaisseur maximale admissible en fonction des quatre paramètres suivants :

- la nuance d'acier,
- la qualité d'acier (à laquelle est associée une résilience),
- la température de référence T_{Ed} et
- le niveau de contraintes de référence σ_{Ed} par rapport à la limite d'élasticité f_y .

Nuance	Qualité	Energie Charpy K _v à T [°C]		Température de référence T _{Ed} [°C]																							
		J _{min}	J _{max}	σ _{Ed} = 0,75 f _y (t)								σ _{Ed} = 0,50 f _y (t)								σ _{Ed} = 0,25 f _y (t)							
				10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50			
S235	JR	20	27	60	50	40	35	30	25	20	90	75	65	55	45	40	35	135	115	100	85	75	65	60			
	J0	0	27	90	75	60	50	40	35	30	125	105	90	75	65	55	45	175	155	135	115	100	85	75			
	J2	-20	27	125	105	90	75	60	50	40	170	145	125	105	90	75	65	200	200	175	155	135	115	100			
S275	JR	20	27	55	45	35	30	25	20	15	80	70	55	50	40	35	30	125	110	95	80	70	60	55			
	J0	0	27	75	65	55	45	35	30	25	115	95	80	70	55	50	40	165	145	125	110	95	80	70			
	J2	-20	27	110	95	75	65	55	45	35	155	130	115	95	80	70	55	200	190	165	145	125	110	95			
	M,N	-20	40	135	110	95	75	65	55	45	180	155	130	115	95	80	70	200	200	190	165	145	125	110			
	ML,NL	-50	27	185	160	135	110	95	75	65	200	200	180	155	130	115	95	230	200	200	200	190	165	145			
S355	JR	20	27	40	35	25	20	15	10	10	65	55	45	40	30	25	25	110	95	80	70	60	55	45			
	J0	0	27	60	50	40	35	25	20	15	95	80	65	55	45	40	30	150	130	110	95	80	70	60			
	J2	-20	27	90	75	60	50	40	35	25	135	110	95	80	65	55	45	200	175	150	130	110	95	80			
	K2,M,N	-20	40	110	90	75	60	50	40	35	155	135	110	95	80	65	55	200	200	175	150	130	110	95			
	ML,NL	-50	27	155	130	110	90	75	60	50	200	180	155	135	110	95	80	210	200	200	200	175	150	130			
S420	M,N	-20	40	95	80	65	55	45	35	30	140	120	100	85	70	60	50	200	185	160	140	120	100	85			
	ML,NL	-50	27	135	115	95	80	65	55	45	190	165	140	120	100	85	70	200	200	200	185	160	140	120			
S460	Q	-20	30	70	60	50	40	30	25	20	110	95	75	65	55	45	35	175	155	130	115	95	80	70			
	M,N	-20	40	90	70	60	50	40	30	25	130	110	95	75	65	55	45	200	175	155	130	115	95	80			
	QL	-40	30	105	90	70	60	50	40	30	155	130	110	95	75	65	55	200	200	175	155	130	115	95			
	ML,NL	-50	27	125	105	90	70	60	50	40	180	155	130	110	95	75	65	200	200	200	175	155	130	115			
	QL1	-60	30	150	125	105	90	70	60	50	200	180	155	130	110	95	75	215	200	200	200	175	155	130			
S690	Q	0	40	40	30	25	20	15	10	10	65	55	45	35	30	20	20	120	100	85	75	60	50	45			
	Q	-20	30	50	40	30	25	20	15	10	80	65	55	45	35	30	20	140	120	100	85	75	60	50			
	QL	-20	40	60	50	40	30	25	20	15	95	80	65	55	45	35	30	165	140	120	100	85	75	60			
	QL	-40	30	75	60	50	40	30	25	20	115	95	80	65	55	45	35	190	165	140	120	100	85	75			
	QL1	-40	40	90	75	60	50	40	30	25	135	115	95	80	65	55	45	200	190	165	140	120	100	85			
	QL1	-60	30	110	90	75	60	50	40	30	160	135	115	95	80	65	55	200	200	190	165	140	120	100			

Figure 1 : Tableau 2.1 de la NF EN 1993-1-10

Ces quatre paramètres sont détaillés ci-après.

Paramètres permettant la détermination de l'épaisseur maximale

Les **nuances d'acier** traitées dans le Tableau 2.1 sont celles couvertes par les normes Eurocodes pour la construction en acier (principalement la NF EN 1993-1-1 et la NF EN 1993-1-12, à savoir S235, S275, S355, S420, S460 et S690).

Les **qualités d'acier**, fonction de leur résilience, traitées dans le Tableau 2.1 sont principalement JR, J0, J2, pour les nuances d'acier les plus utilisées, mais aussi M, N, ML, NL, K2, Q, QL et QL1 pour les nuances plus élevées.

Dans l'immense majorité des cas, la température de référence s'exprime comme suit :

$$T_{Ed} = T_{md} + \Delta T_r$$

avec :

T_{md} : température minimale de service. S'il s'agit de la température atmosphérique, elle dépend de la position géographique de l'ouvrage : elle est donnée en fonction de cette position dans l'Annexe Nationale à la NF EN 1991-1-5, paragraphe 6.1.3.2(1). S'il s'agit d'une température ambiante autre qu'atmosphérique, elle doit être précisée dans le CCTP.

ΔT_r : terme de correction pour les pertes de rayonnement. Même si la norme NF EN 1993-1-10 renvoie à la NF EN 1991-1-5, cette dernière ne précise pas clairement de quelle température il s'agit. Classiquement, elle est prise égale à -5°C (voir le document de référence EUR 23510).

Note : dans les cas impliquant un choc et/ou le formage à froid, deux termes supplémentaires sont à prendre en considération et la formule pour la température de référence devient :

$$T_{Ed} = T_{md} + \Delta T_r + \Delta T_e + \Delta T_{e,cf}$$

avec :

$\Delta T_{\dot{\varepsilon}}$: terme de correction pour la vitesse de déformation, dérivée par rapport au temps de la déformation ε . Il est exprimé par la formule suivante :

$$\Delta T_{\dot{\varepsilon}} [^{\circ}\text{C}] = \frac{1440 - f_y(t) [\text{MPa}]}{550} \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{1,5}$$

avec $f_y(t) [\text{MPa}] = f_{y,\text{nom}} [\text{MPa}] - 0,25t [\text{mm}]$ et $\dot{\varepsilon}_0 = 4 \times 10^{-4} [1/\text{s}]$.

Pour les cas n' impliquant pas un choc (chargement statique ou quasi-statique), $\Delta T_{\dot{\varepsilon}} = 0^{\circ}\text{C}$.

$\Delta T_{\varepsilon,\text{cf}}$: terme de correction pour le formage à froid. Il est exprimé par la formule suivante :

$$\Delta T_{\varepsilon,\text{cf}} [^{\circ}\text{C}] = -3\varepsilon_{\text{cf}} \geq -45^{\circ}\text{C}$$

où ε_{cf} est la déformation due au formage à froid, dont la détermination est détaillée dans le rapport JRC de Feldmann et al (EUR 23510). Pour les cas sans formage à froid, $\Delta T_{\varepsilon,\text{cf}} = 0^{\circ}\text{C}$.

En guise de conclusion, contrairement à une idée reçue, **la température de référence ne correspond pas à la température ambiante**. Il s'agit d'une température fictive qui traduit, en termes de température, les pertes de ductilité causées par différents facteurs, incluant l'influence de la température ambiante.

Le niveau des **contraintes de référence** est obtenu à partir d'une combinaison accidentelle d'actions dans laquelle l'action accidentelle dominante A est la température de référence T_{Ed} qui conditionne la ténacité du matériau de l'élément considéré (elle peut également générer des contraintes dues à la déformation empêchée) :

$$E_d = E \left\{ A [T_{\text{Ed}}] + \sum G_k + \psi_1 Q_{k1} + \sum \psi_{2i} Q_{ki} \right\}$$

Dans cette formule, $\sum G_k$ est la somme des actions permanentes, $\psi_1 Q_{k1}$ est la valeur fréquente des actions variables et $\sum \psi_{2i} Q_{ki}$ sont les valeurs quasi-permanentes des actions variables d'accompagnement.

Note : Il s'agit exclusivement des **contraintes de traction**.

Lecture du Tableau 2.1

Le sens des valeurs des épaisseurs maximales, données dans le Tableau 2.1, est illustré à la Figure 2, où l'épaisseur maximale est fonction de la température de référence et de la qualité de l'acier (JR, J0, J2, M, N, ML et NL), pour la nuance S275 et pour une contrainte de référence égale à 75 % de la limite d'élasticité.

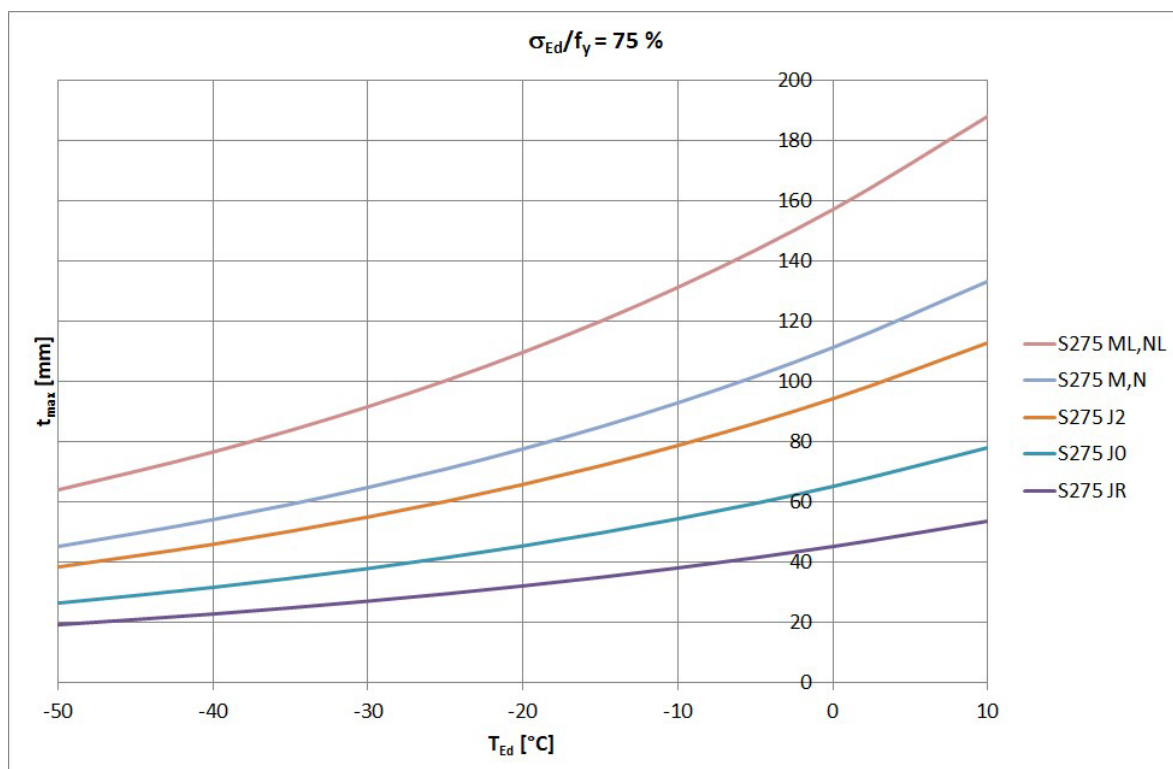


Figure 2 : Epaisseurs maximales pour différentes qualités de l'acier S275 avec la contrainte de référence égale à 75 % de la limite d'élasticité

L'épaisseur maximale autorisée croît avec la température de référence (traduisant une ténacité à la rupture plus élevée). Il est aussi visible qu'une qualité d'acier élevée (traduisant également une ténacité à la rupture intrinsèque élevée) a une influence favorable sur l'épaisseur maximale autorisée.

L'influence de la contrainte de référence (pour les trois valeurs tabulées dans le Tableau 2.1, à savoir 25 %, 50 % et 75 % de la limite d'élasticité) est montrée à la Figure 3.

Note : une interpolation entre les valeurs données dans le Tableau 2.1 est possible, mais il n'est pas permis d'extrapoler :

- Si la contrainte de référence est inférieure à 25 % de la limite d'élasticité, aucune vérification vis-à-vis du choix de la qualité d'acier n'est nécessaire ;
- En revanche, si la contrainte de référence est supérieure à 75 % de la limite d'élasticité, c'est vers le rapport EUR 23510 qu'il faut s'orienter (3^e partie de cet article à venir).

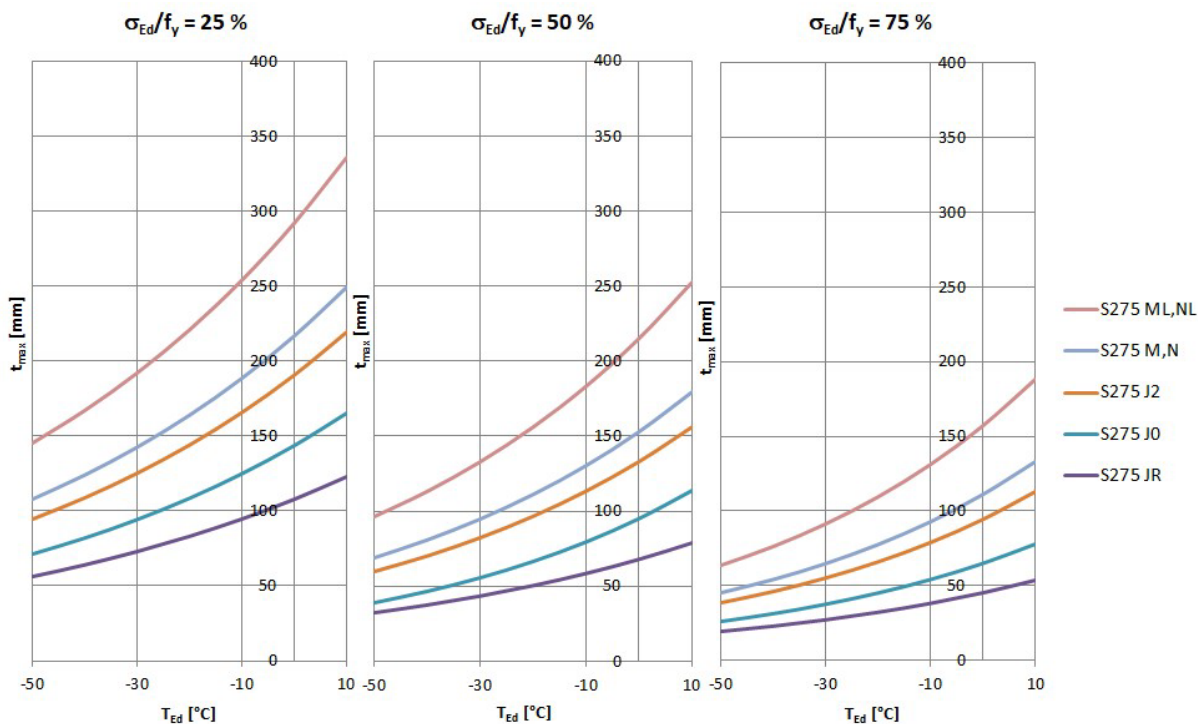


Figure 3 : Epaisseurs maximales pour différentes qualités de l'acier S275 pour trois niveaux de contrainte de référence

La lecture de la Figure 3 permet de comprendre que plus le taux de travail, c'est-à-dire la proportion de la limite d'élasticité mobilisée dans la combinaison accidentelle des actions, est élevée, plus faible est l'épaisseur maximale autorisée pour une température de référence donnée.

Exemple numérique

L'utilisation du Tableau 2.1 de la NF EN 1993-1-10 est illustrée dans cet exemple, sans entrer dans les détails de la détermination ni de la température de référence, ni de la contrainte de référence.

Les qualités de deux nuances d'acier (S235 et S355) nécessaires pour différentes valeurs de l'épaisseur de paroi d'une section reconstituée soudée en \perp , pour un cas de traction uniforme et un autre de flexion simple (moment positif et moment négatif), sont déterminées à partir des valeurs suivantes des paramètres utilisés dans le tableau :

- température de référence $T_{Ed} = -20^\circ\text{C}$;
- contrainte de référence : $\sigma_{Ed} = 0,75 f_y$ (traction)

Les résultats sont présentés dans la Figure 4 (extrait du Tableau 2.1).

Nuance	Qualité	Energie Charpy K _v à T [°C]		$\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$							
		J _{min}		10	0	-10	-20	-30	-40	-50	
S235	JR	20	27	60	50	40	35	30	25	20	
	J0	0	27	90	75	60	50	40	35	30	
	J2	-20	27	125	105	90	75	60	50	40	
S275	JR	20	27	55	45	35	30	25	20	15	
	J0	0	27	75	65	55	45	35	30	25	
	J2	-20	27	110	95	75	65	55	45	35	
	M,N	-20	40	135	110	95	75	65	55	45	
	ML,NL	-50	27	185	160	135	110	95	75	65	
S355	JR	20	27	40	35	25	20	15	15	10	
	J0	0	27	60	50	40	35	25	20	15	
	J2	-20	27	90	75	60	50	40	35	25	
	K2,M,N	-20	40	110	90	75	60	50	40	35	
	ML,NL	-50	27	155	130	110	90	75	60	50	

Figure 4 : Extrait du Tableau 2.1 pour les paramètres analysés

Tableau 1 : Qualités nécessaires en fonction de l'épaisseurs

Pari	Epaisseur [mm]	Traction uniforme		Flexion simple			
		S235	S355	Moment positif		Moment négatif	
				S235	S355	S235	S355
Semelle supérieure	40	J0	J2	-*)	-*)	J0	J2
Âme	15	JR	JR	JR	JR	JR	JR
Semelle inférieure	30	JR	J0	JR	J0	-*)	-*)

*) Ces parois étant en compression, il n'y a pas d'exigences vis-à-vis de la qualité d'acier à atteindre.

Le Tableau 1 montre que les parois en compression ne sont pas à considérer vis-à-vis de la rupture fragile.

Références

NF EN 1993-1-10 : Eurocode 3 – Calcul des structures en acier – Partie 1-10 : Choix des qualités d'acier ; AFNOR, 2005.

NF EN 1991-1-5 : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-5 : Actions générales – Actions thermiques ; AFNOR, 2004.

Feldmann M. et al : Choice of Steel Material to Avoid Brittle Fracture for Hollow Section Structures ; JRC, EUR 25400, 2012.

Sedlacek G. et al : Commentary and worked examples to EN 1993-1-10 "Material toughness and through thickness properties" and other toughness oriented rules in EN 1993 ; JRC-ECCS, EUR 23510 EN, 2008.