

Aciers de construction métallique

par **Guy MURRY**
*Ingénieur de l'École nationale supérieure d'électrochimie
et d'électrometallurgie de Grenoble (ENSEEG)
Docteur-ingénieur
Ingénieur-Conseil
Ancien directeur de l'Office technique pour l'utilisation de l'acier (OTUA)*

avec la collaboration de
Jean-Pierre PESCATORE
*Direction du Bureau de normalisation de la construction métallique (BNCM)
Centre technique industriel de la construction métallique (CTICM)*

1. Définitions.....	C 2 501 - 2
2. Désignation normalisée des aciers de construction métallique	— 3
2.1 Désignation symbolique normalisée	— 3
2.2 Numérotation normalisée.....	— 3
3. Performances d'usage des aciers de construction métallique...	— 5
3.1 Performances mécaniques à température ambiante	— 5
3.2 Performances mécaniques à des températures inférieures à l'ambiante	— 7
3.3 Performances mécaniques à des températures supérieures à l'ambiante	— 8
3.4 Résistance à la fatigue.....	— 9
3.5 Résistance à la corrosion atmosphérique	— 9
4. Aciers de construction métallique définis par la normalisation	— 11
4.1 Aciers définis par la norme NF EN 10025-2.....	— 11
4.2 Aciers définis par la norme NF EN 10025-3.....	— 13
4.3 Aciers définis par la norme NF EN 10025-4.....	— 14
4.4 Aciers définis par la norme NF EN 10025-6.....	— 16
4.5 Aciers définis par la norme NF EN 10225.....	— 16
4.6 Aciers définis par la norme NF EN 10210.....	— 17
4.7 Aciers définis par la norme NF EN 10219.....	— 17
5. Possibilités de mise en œuvre.....	— 18
5.1 Formage à chaud	— 18
5.2 Formage à froid	— 18
5.3 Découpage	— 18
5.4 Usinage.....	— 19
5.5 Soudage	— 19
6. Choix d'un acier de construction métallique.....	— 22
Pour en savoir plus.....	Doc. C 2 501

L'acier entre dans la réalisation de nombreux ouvrages (ponts, immeubles...). Les aciers de construction métalliques utilisés se présentent sous diverses formes et nuances. Pour effectuer un choix éclairé, le concepteur doit donc connaître les propriétés mécaniques des diverses nuances normalisées, leurs propriétés de mise en œuvre, leurs garanties...

Nota : la norme NF EN 10025 parties 1 à 6 est en cours de publication à la date de parution de cet article.

1. Définitions

L'expression « aciers de construction métallique » ne fait l'objet d'aucune définition normalisée. Le lecteur devra donc conserver présentes à l'esprit les indications données ci-après ainsi que les précisions quant aux aciers auxquels peut être appliquée cette désignation.

■ Si l'on se réfère aux **domaines d'emploi** de ces aciers, on peut dire que ce sont les **aciers utilisés dans le cadre de la plus grande partie des activités groupées sous la rubrique « Construction Métallique »** par Qualibat, organisme chargé de la qualification et de la certification des entreprises du bâtiment pour la réalisation notamment :

- de charpentes métalliques ;
- de charpentes pour appareils métalliques de levage et de manutention ;
- d'ouvrages d'art ;
- de ponts métalliques ;
- de plates-formes marines ;
- de pylônes métalliques ;
- de structures dans l'automobile ;
- de structures dans le matériel ferroviaire roulant ;
- de structures mobiles dans le machinisme agricole ;
- de trémies et silos métalliques ;
- de gazomètres ;
- de réservoirs métalliques sans pression et non soumis à l'action de la flamme ;
- d'organes de retenue d'eau ;
- de renforcement d'ouvrages d'art métalliques ;
- de travaux en sous-œuvre.

■ Si l'on se réfère à l'**aspect métallurgique**, on peut alors dire que les aciers de construction métallique sont des **aciers de qualité** (quelques-uns sont des aciers spéciaux) **généralement non alliés** (parfois faiblement alliés) **livrés prêts à l'emploi** c'est-à-dire qu'ils possèdent déjà les caractéristiques mécaniques attendues et qu'il n'est donc pas nécessaire de leur faire subir un traitement thermique à l'exclusion du traitement de détensionnement (visant à réduire les contraintes résiduelles) après soudage et, parfois d'un traitement de restauration ou d'une normalisation.

● Ces aciers dont la teneur en **carbone** varie avec les propriétés recherchées, contiennent (pour différentes raisons) quelques **éléments autres que le carbone**, à savoir :

— du **silicium** nécessaire à la désoxydation en cours d'élaboration. De ce fait une certaine proportion est fixée sous forme d'oxyde dans les inclusions, la part non oxydée participe au durcissement par effet de solution solide ;

— du **manganèse** : participant aussi à la désoxydation, il fixe en outre le soufre sous forme de sulfures (ce qui permet le forgeage et le laminage du métal à chaud). La proportion de manganèse qui subsiste en solution solide joue deux rôles : durcissement par effet de solution solide et affinement de la structure lors du durcissement ;

— de l'**azote** : les aciers de construction métallique étant généralement élaborés en présence d'air contiennent une faible proportion d'azote résiduel, actuellement celle-ci peut varier de 0,008 à 0,012 % environ. En présence d'aluminium en solution solide, l'azote forme des précipités très fins de nitrure d'aluminium. Ces précipités permettent de freiner le grossissement des grains au cours d'un réchauffage (à température inférieure à 1 000 °C) et facilitent donc l'obtention finale de grains fins. Par ailleurs, en solution solide (d'insertion), l'azote durcit la ferrite, diminue sa résistance à la rupture fragile et engendre la plus grande part du processus de vieillissement après écrouissage ;

— du **soufre** : impureté résiduelle, cet élément est fixé sous forme de sulfure de manganèse. Les progrès des procédés sidérurgiques ont permis d'abaisser très sensiblement les proportions présentes dans les aciers ;

— du **phosphore** : impureté résiduelle, cet élément est présent en solution solide de substitution, il durcit la ferrite et dégrade sa résistance à la rupture fragile ;

— parfois du **nickel** : cet élément est utile pour affiner la structure et améliorer la résistance à la rupture fragile (dans les aciers pour emplois à basses températures) ;

— parfois du **niobium** et du **vanadium**, voire du **titane** et du **zirconium** : ces éléments participent à la formation de carbures et carbonitrures. Ces précipités très fins et bien dispersés dans la ferrite engendrent un durcissement important qui est mis en œuvre pour la fabrication des aciers à haute limite d'élasticité (à teneur en carbone identique, le durcissement obtenu est alors plus important ; de ce fait, à caractéristiques de résistance identiques, il est possible de diminuer la teneur en carbone). Les conditions particulières de mise en solution dans l'austénite (nécessité de porter le métal à haute température, ce qui engendre un grossissement des grains indésirable) et de précipitation (au cours de la transformation de l'austénite en ferrite) imposent le contrôle de la taille des grains qui est généralement réalisé à travers les opérations de laminage (dit alors « thermomécanique ») et de refroidissement en sortie de laminoir. Ces procédures conduisent à un produit prêt à l'emploi qui ne doit plus être soumis à une transformation fer $\alpha \leftrightarrow$ fer γ qui lui ferait perdre ses propriétés sans espoir de récupération. Néanmoins, cela ne compromet pas la mise en œuvre par soudage (cf. § 5.5) ;

— assez rarement du **cuivre** qui participe au durcissement par effet de solution solide et diminue la sensibilité des aciers non alliés à la corrosion atmosphérique (probablement en neutralisant les effets nocifs du soufre).

Ces rappels montrent à l'évidence que l'on ne traitera pas des aciers inoxydables qui, de par leurs particularités, exigeraient d'être traités dans un article spécifique.

■ Les aciers de construction métallique étant **livrés prêts à l'emploi**, ils le sont donc sous des **formes (géométriques) correspondant aux besoins des utilisateurs** et qui sont identifiées comme suit par la norme NF EN 10079.

● Les **produits plats** dont la section droite est pratiquement rectangulaire, la largeur ℓ étant très supérieure à l'épaisseur e . Parmi eux, on distingue :

— les **produits plats laminés à chaud non revêtus** qui comprennent :

- les tôles minces ($e < 3$ mm),
- les tôles fortes ($e \geq 3$ mm),
- les larges plats ($e > 4$ mm, $150 \text{ mm} < \ell \leq 1\,250$ mm, livrés à plat),
- les bandes livrées en bobines (large bande à chaud $\ell \geq 600$ mm, feuillard à chaud si $\ell < 600$ mm) ;

— les tôles à épaisseur variable : tôles dont l'épaisseur varie de manière continue dans le sens de la longueur. Elles permettent un gain de poids ainsi qu'une réduction des travaux de soudage là où, en raison de la variation du moment fléchissant, il serait nécessaire d'utiliser des tôles de différentes épaisseurs. Les possibilités de fabrication de ces produits varient suivant les aciéries (le plus souvent la garantie de limite d'élasticité minimale ne dépasse pas 460 N/mm²) et l'utilisateur doit s'informer avant de formaliser son choix ;

— les **produits plats laminés à froid non revêtus** (obtenus par une réduction de section supérieure ou égale à 25 % réalisée par laminage à froid de produits préalablement laminés à chaud) qui comprennent :

- les tôles ($\ell \geq 600$ mm),
- les bandes livrées en bobines (large bande à froid si $\ell \geq 600$ mm, feuillard à froid si $\ell < 600$ mm) ;

— les **produits plats laminés à chaud ou à froid revêtus** parmi lesquels on distingue :

- les produits plats à revêtement métallique : par trempe à chaud (revêtements de Pb, Zn, Al, Al + Si, Al + Zn) ; par électrolyse (revêtements de Pb, Zn, Zn + Ni),
- les produits plats à revêtement organique : par peinture ; par dépôt d'un film,
- les produits plats à revêtement non organique (email) ;

**Tableau 1 – Normes concernant les aciers pour construction métallique :
produits laminés en acier non alliés ou faiblement alliés**

Produits	Exigences techniques de livraison (1)	Dimensions	Tolérances
Poutrelles I et H	NF EN 10025 (2)	NF A 45-201 NF A 45-205	NF EN 10034
Poutrelles IPN		NF A 45-209	NF EN 10024
Profilés en U		NF A 45-202 NF A 45-255	NF EN 10279
Cornières à ailes égales et inégales		NF EN 10056-1	NF EN 10056-2
Fers T		NF EN 10055	NF EN 10055
Tôles		Sans objet	NF EN 10029 NF EN 10051
Plats et larges plats		Sans objet	EU 91 (3)
Profilés creux finis à chaud	NF EN 10210-1	NF EN 10210-2	NF EN 10210-2
Profilés creux finis à froid	NF EN 10219-1	NF EN 10219-2	NF EN 10219-2
Acier possédant des caractéristiques de déformation améliorées	NF EN 10164	Sans objet	Sans objet

- (1) La norme NF EN 10021 spécifie les exigences générales techniques de livraison (terminologie, modalités d'application des prescriptions techniques, modalités générales de contrôle, tri, remaniement, marquage et réclamations) et les conditions générales d'état de surface sont précisées dans la norme NF EN 10163. Les différents types de documents de contrôle sont définis dans la norme NF EN 10204.
- (2) La norme NF EN 10025 couvre à la fois les aciers de construction non alliés (partie 2) ou à grains fins (parties 3 et 4), les aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique (partie 5) et les produits plats en aciers à haute limite d'élasticité (partie 6).
- (3) L'EU 91 est une « Euronorm » qui n'a pas encore été convertie en norme européenne.

— les **tôles profilées ondulées** ou **profilées** (généralement revêtues) ;

— les **produits plats composites** :

- tôles et bandes plaquées,
- tôles et panneaux « sandwich ».

● Les **produits longs laminés à chaud** comprennent :

- les **profilés** : poutrelles, pieux, palplanches, profilés spéciaux ;
- les **laminés marchands** : barres (ronds, carrés, hexagones, octogones, plats) ;
- les **cornières**, les **U**, les **T**, les **plats à boudin** ;
- les **produits tubulaires** (sans soudure ou soudés) ;
- les **profilés formés à froid** ;
- les **fils machine** ;
- les **fils**.

Pour les produits laminés usuels de construction métallique, le tableau 1 précise les normes de dimensions auxquelles il y a lieu de se référer ainsi que celles concernant leurs tolérances.

2. Désignation normalisée des aciers de construction métallique

Tous les aciers de construction métallique sont :

- **désignés symboliquement** à partir de leur emploi et de leurs caractéristiques mécaniques selon les principes définis par la norme NF EN 10027-1 ;
- **numérotés** selon le système décrit par la norme NF EN 10027-2.

2.1 Désignation symbolique normalisée

La **désignation symbolique** commence par la lettre S suivie d'un nombre entier égal à la valeur minimale de la limite d'élasticité

garantie pour la gamme d'épaisseur la plus faible. Cet ensemble peut être suivi de symboles additionnels qui peuvent être successivement :

— une lettre définissant l'état structural pour les aciers à grains fins :

- N pour normalisé ou laminage normalisant,
- M pour laminage thermomécanique,
- Q pour trempé et revenu,
- A pour durcissement par précipitation ;

— deux lettres ou une lettre et un chiffre précisant les exigences relatives à la température de transition de la résilience ; le tableau 2 explicite les différentes notations. Ces dernières sont simplifiées pour les aciers à grains fins (voir la norme de produit) ;

— éventuellement la lettre G (signalant qu'une autre caractéristique est prise en compte) suivie d'un chiffre (qui peut être lui-même suivi d'une lettre) précisant cette dernière (voir sa signification dans la norme de produit) ;

— éventuellement une lettre indiquant une spécificité complémentaire (exemples : D pour l'aptitude à la galvanisation, W pour la résistance améliorée à la corrosion atmosphérique...).

La figure 1 synthétise cette désignation des aciers de construction métallique sous forme d'un tableau synoptique.

2.2 Numérotation normalisée

La **désignation numérique** est constituée par **cinq chiffres** :

— les trois premiers chiffres à gauche ont une signification définie par la norme NF EN 10027-2 ;

— les deux derniers chiffres à droite sont arbitraires ; la signification de l'ensemble doit donc être recherchée dans la norme de produit. Ce mode de **désignation est très peu usité dans les documents contractuels et autres spécifications de projet qui préfèrent se référer à la désignation symbolique normalisée.**

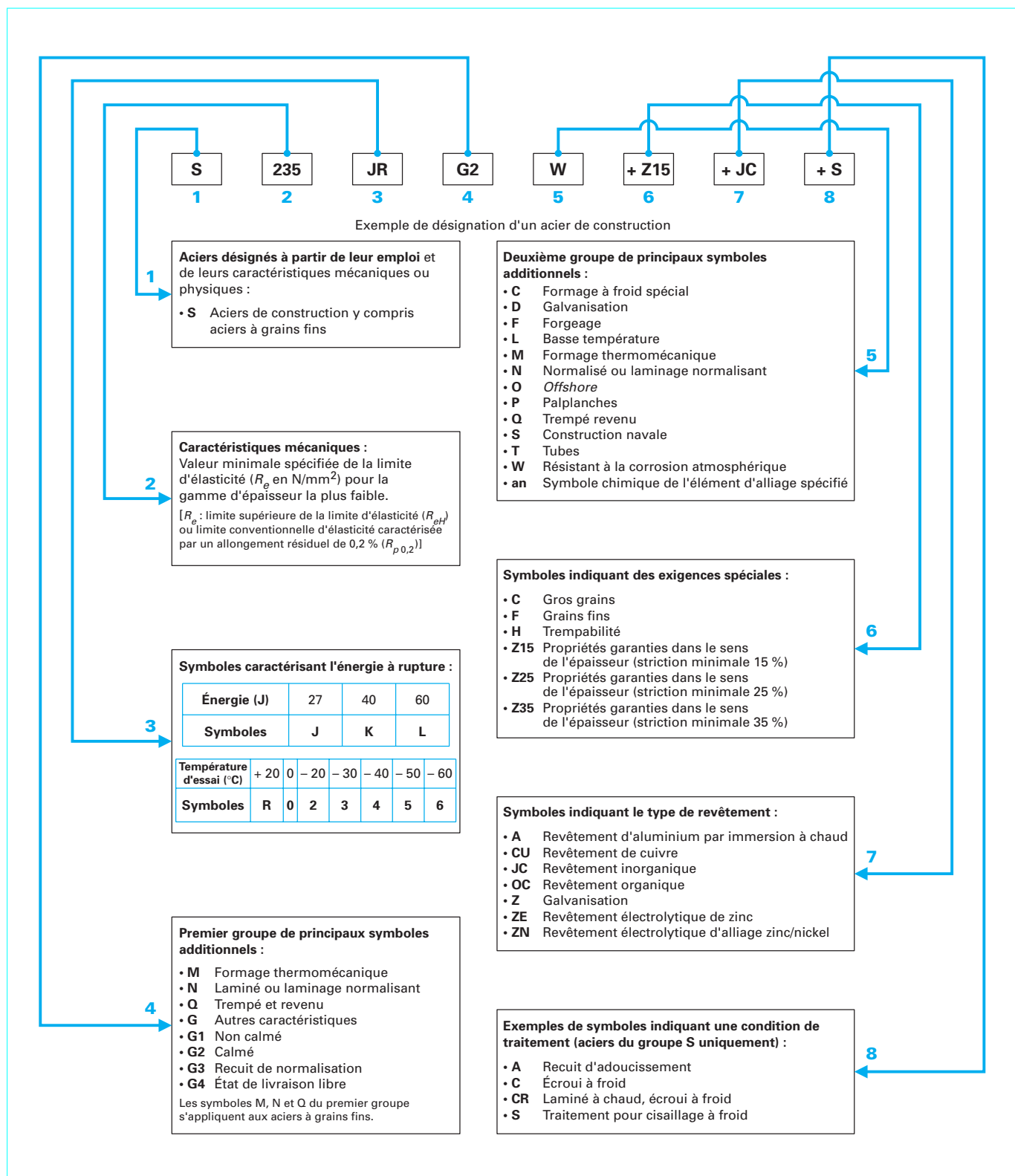


Figure 1 – Désignation symbolique des aciers de construction métallique

Tableau 2 – Désignation symbolique des aciers de construction : symboles précisant les exigences relatives à la température de transition de la résilience

Symbole	Température d'essai (°C)	Énergie minimale (J)	Symbole	Température d'essai (°C)	Énergie minimale (J)	Symbole	Température d'essai (°C)	Énergie minimale (J)
JR	20	27	KR	20	40	LR	20	60
J0	0	27	K0	0	40	L0	0	60
J2	- 20	27	K2	- 20	40	L2	- 20	60
J3	- 30	27	K3	- 30	40	L3	- 30	60
J4	- 40	27	K4	- 40	40	L4	- 40	60
J5	- 50	27	K5	- 50	40	L5	- 50	60
J6	- 60	27	K6	- 60	40	L6	- 60	60

3. Performances d'usage des aciers de construction métallique

Les aciers de construction métallique sont essentiellement définis à travers leurs propriétés d'usage.

Ces propriétés d'usage font l'objet de **garanties**. Ce sont :

- la **limite d'élasticité à 20 °C**, R_{eH} exprimée en N/mm² ;
- la **résistance à la traction à 20 °C**, R_m exprimée en N/mm² ;
- l'**allongement à rupture à 20 °C**, A exprimé en % ;
- l'**énergie de rupture en flexion par choc KV** exprimée en Joule (dite aussi, d'une manière plus abrégée, **résilience** sans que la valeur soit rapportée au cm²) sur éprouvette Charpy V à température ambiante et, éventuellement, à basse température.

Remarque : la normalisation en vigueur admet comme limite d'élasticité la limite supérieure d'écoulement. En l'absence de phénomène d'écoulement on doit prendre en compte la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % d'allongement rémanent.

Les mesures de ces propriétés sont effectuées sur des éprouvettes de différentes géométries normalisées prélevées dans les produits à tester. Les conditions de prélèvement sont définies par les normes et il ne faut jamais oublier que les résultats obtenus correspondent à la localisation ainsi imposée. Le niveau des propriétés peut varier d'un point à un autre du produit et suivant l'orientation considérée ; **l'utilisateur doit être attentif à ces risques afin de ne pas généraliser outre mesure les résultats obtenus.**

Mais, en pratique, **le constructeur exige que**, dans différentes situations **les aciers puissent** :

- **assurer leur service à la température ambiante** ;
- **résister à basse température** (température inférieure à l'ambiante) ;
- **assurer leur service à chaud** (température supérieure à l'ambiante) ;
- **résister à d'éventuelles sollicitations en fatigue** ;
- éventuellement **résister à la corrosion atmosphérique**.

C'est dans le cadre de ces exigences que nous allons replacer la définition, la mesure et la signification des caractéristiques garanties.

3.1 Performances mécaniques à température ambiante

Les performances mécaniques d'un acier à la température ambiante sont appréciées fondamentalement à travers les valeurs que prennent sa **limite d'élasticité** (R_{eH}) et sa **résistance à la rupture en traction** (R_m) à 20 °C. Ces deux caractéristiques sont déterminées au cours d'un **essai de traction** dont les modalités sont définies par la norme NF EN 10002-1 (cf. article *Essais mécaniques des métaux. Détermination des lois de comportement* [M 120] dans le traité Matériaux Métalliques). Cet essai permet de tracer la « courbe de traction » du métal (figure 2), qui représente les variations de la charge unitaire (effort de traction F rapporté à la section initiale S_0 de l'éprouvette) en fonction de l'allongement relatif (allongement $\Delta \ell_\ell$ de la base de mesure rapporté à la longueur initiale ℓ_{ℓ_0} de cette base et exprimé en %) imposé à l'éprouvette. Cette courbe met en évidence deux comportements intéressants du métal :

— la première **partie OA** (figures 2a et 2b) correspond au domaine dans lequel le métal est **élastique**, c'est-à-dire que, soumis à un effort, il se déforme mais reprend sa géométrie initiale lorsque l'on supprime l'effort (la déformation disparaît, elle est réversible). C'est le domaine normal de travail d'un métal ; son comportement est alors régi par la **loi de Hooke** :

$$F/S_0 = E \cdot \Delta \ell_\ell / \ell_0$$

qui introduit le **module d'élasticité** E dit aussi **module de Young**. Mais cet allongement dans la direction de l'effort uniaxial de traction s'accompagne d'une contraction $\Delta \ell_t$ dans le plan perpendiculaire à cet effort (de longueur initiale ℓ_{t_0}). Ce retrait est proportionnel à l'allongement longitudinal mais de signe opposé ; cette dépendance est traduite par le **coefficient ou nombre de Poisson** ν :

$$\Delta \ell_t / \ell_{t_0} = \nu \cdot \Delta \ell_\ell / \ell_0 \quad \text{ou} \quad \varepsilon_t = -\nu \cdot \varepsilon_\ell$$

Ainsi, pour une éprouvette à section circulaire de diamètre initial d_0 on écrit :

$$\Delta d = -\nu \cdot d_0 \cdot \varepsilon_\ell$$

Pour la très grande majorité des aciers de construction métallique, on peut admettre que E et ν ne dépendent pratiquement pas de la composition chimique et, à 20 °C, on peut adopter les valeurs suivantes :

$$210\,000 \text{ N/mm}^2 \leq E \leq 215\,000 \text{ N/mm}^2 \quad \nu = 0,28$$

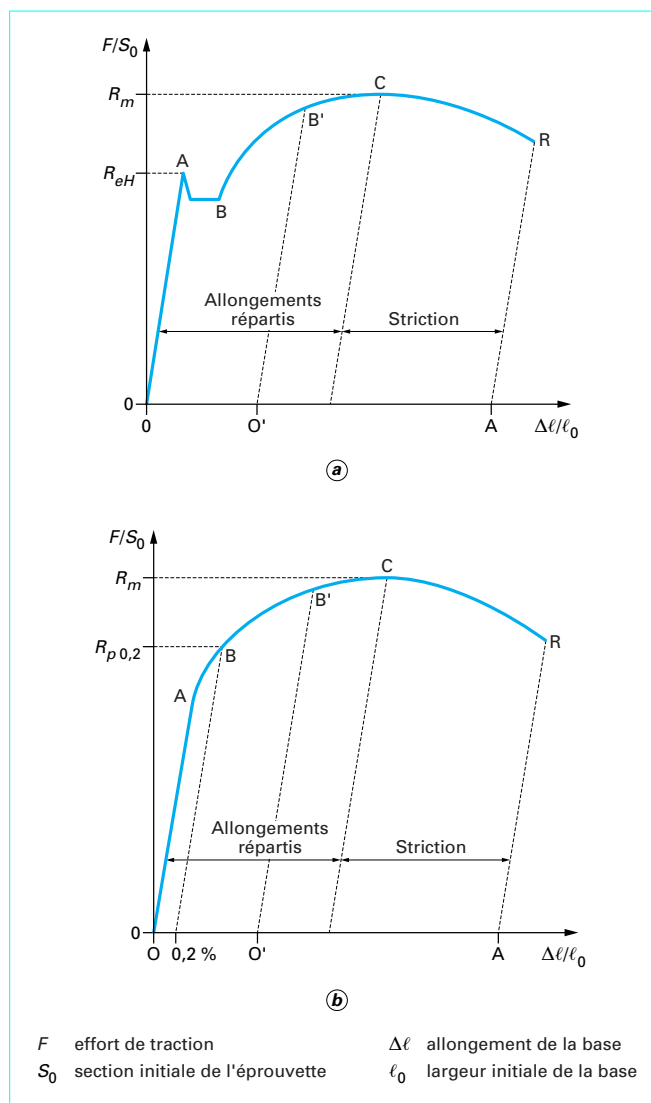
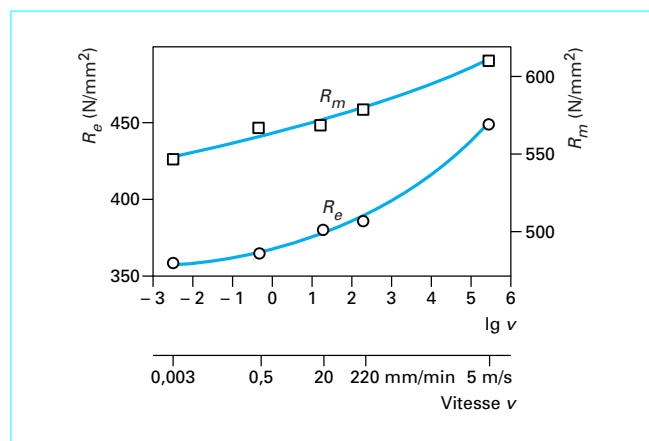


Figure 2 - Courbes de traction

Cependant les codes de calcul (Eurocode 3) retiennent les valeurs conventionnelles suivantes :

$$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2 \quad \nu = 0,3$$

— la deuxième **partie AC** correspond au domaine dans lequel le métal est **plastique**, c'est-à-dire que, soumis à un effort, il se déforme mais ne reprend pas sa géométrie initiale lorsque l'on supprime l'effort (une partie de la déformation subsiste, elle est irréversible et dite « plastique »). Dans ce domaine, il est important de noter qu'au cours de la déformation plastique (de B à C pour la figure 2a et de A à C pour la figure 2b) la limite d'élasticité de l'acier augmente. Si, par exemple, on supprime l'effort appliqué en B', le métal revient au point O' (la déformation plastique est égale à OO') et son nouveau domaine élastique s'étend ensuite de O' à B'. O'B' est ainsi plus grand que OA. Cette augmentation est dite **consolidation** ou, encore, **écrouissage** (et parfois **raffermissement**). Sa conséquence pratique intéressante est qu'elle provoque une **adaptation du métal face à une surcharge accidentelle** ; c'est donc un **facteur de sécurité en service**.

Figure 3 - Influence de la vitesse de traction sur R_m et R_e

La limite d'élasticité et la résistance à la traction sont déterminées dans des conditions qui leur confèrent un caractère conventionnel :

- la **limite d'élasticité** est la **limite supérieure d'écoulement** R_{eH} (figure 2a) dont le niveau est celui de la charge unitaire au moment où l'on observe la première chute de l'effort. En l'absence de phénomène d'écoulement on se réfère à la **limite conventionnelle d'élasticité** $R_{p0,2}$ (figure 2b), qui est la charge unitaire pour laquelle un allongement plastique de 0,2 % est atteint ;
- la **résistance à la traction** correspond à la charge unitaire maximale (R_m) que peut supporter le métal, en traction pure, avant de subir le phénomène d'instabilité (dans le domaine CR des figures 2a et 2b) qui conduit à la formation de la striction et à la rupture (cette définition est conventionnelle puisqu'elle fait référence à la section initiale de l'éprouvette ; elle ne correspond donc pas à une contrainte vraie).

Ces deux caractéristiques dépendent des divers **paramètres de l'essai** :

- dimensions de l'éprouvette (surtout pour R_m) ;
- qualité de l'extensomètre (pour R_e) ;
- vitesse de mise en charge (figure 3) ;
- température de l'essai (cf. § 3.2 et 3.3).

La norme d'essai précise les plages de variation admises pour ces paramètres.

L'importance de la plasticité du métal pour la sécurité d'emploi fait qu'à travers l'essai de traction on tente aussi d'apprécier la **réserve de plasticité** (ou **ductilité**) sur laquelle peut compter l'utilisateur. Pour ce faire, on mesure l'**allongement à rupture A** de l'éprouvette qui est actuellement la caractéristique de ductilité qui fait l'objet d'une garantie. **Rapporté à la longueur initiale de la base de mesure (A/ℓ_0)**, il traduit le résultat de **deux déformations successives** :

- l'**allongement uniforme (ou réparti)** qui commence dès la sortie du domaine élastique et s'étend sur toute la période de consolidation jusqu'à ce que la charge unitaire atteigne le niveau de la résistance à la traction (point haut de la courbe de traction). Durant toute cette période, la partie calibrée de l'éprouvette se déforme uniformément (d'où l'appellation d'allongement réparti) ;
- l'**allongement localisé dans la zone de striction** qui représente la déformation de la partie dans laquelle apparaît la striction, c'est-à-dire la diminution localisée de la section S de l'éprouvette avec, bien entendu, une augmentation de la contrainte vraie locale mais, compte tenu des performances des machines d'essai, une diminution de l'effort total appliqué à l'éprouvette dont la zone hors striction cesse de se déformer et subit un retrait élastique. Cette déformation localisée dépend de la géométrie de l'éprouvette et surtout de sa section.

Tableau 3 – Évolution des performances mécaniques quand on abaisse la température de l'acier

Quand on abaisse la température depuis 20 °C jusqu'à	La limite d'élasticité augmente de (1)	Le module d'élasticité augmente de (1)	La longueur de base diminue de (1)
0 °C	8 N/mm ²	+ 0,6 %	– 0,02 %
– 20 °C	19 N/mm ²	+ 1,1 %	– 0,04 %
– 40 °C	31 N/mm ²	+ 1,7 %	– 0,06 %
– 60 °C	46 N/mm ²	+ 2,3 %	– 0,08 %
– 80 °C	63 N/mm ²	+ 2,8 %	– 0,10 %

(1) Par rapport à sa valeur à 20 °C.

Cumulant les deux déformations, l'allongement à la rupture dépend ainsi de la géométrie de l'éprouvette. C'est la raison pour laquelle sa valeur n'est significative que si l'éprouvette est proportionnelle, c'est-à-dire si ses dimensions obéissent à la relation :

$$\ell_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$$

Pour compléter cette mesure (et pallier la difficulté créée par la double origine de l'allongement à la rupture), on prend parfois en compte la valeur du rapport R_e/R_m en lui fixant une **valeur maximale à ne pas dépasser**. Cette procédure peut donner à penser qu'en exigeant que la différence entre R_e et R_m soit assez grande, on s'assure que l'allongement réparti est grand et donc que la consolidation peut être importante et permette d'accepter un taux de travail provisoirement trop élevé (concentration de contrainte ou surcharge accidentelle). Cette préconisation est assez illusoire car elle ne prend pas en compte les particularités de la déformation plastique des métaux. Il serait préférable de se référer à la valeur de l'allongement plastique réparti (allongement plastique correspondant à la charge unitaire égale à R_m). La norme NF EN 10002-1 définit les modalités de sa mesure (en le dénommant « **allongement total pour-cent sous charge maximale** ») mais cette grandeur ne fait pas l'objet d'une garantie dans les normes de produits. À titre indicatif, la figure 4 (construite à partir des courbes de traction publiées par (H.E.) BOYER [1]) donne un ordre de grandeur des variations, en fonction de R_{eH} , des allongements répartis des aciers de construction métallique d'emplois habituels. Ce graphique montre que ces allongements répartis conservent des valeurs élevées susceptibles d'assurer, dans bien des cas, la sécurité en service de la construction.

3.2 Performances mécaniques à des températures inférieures à l'ambiante

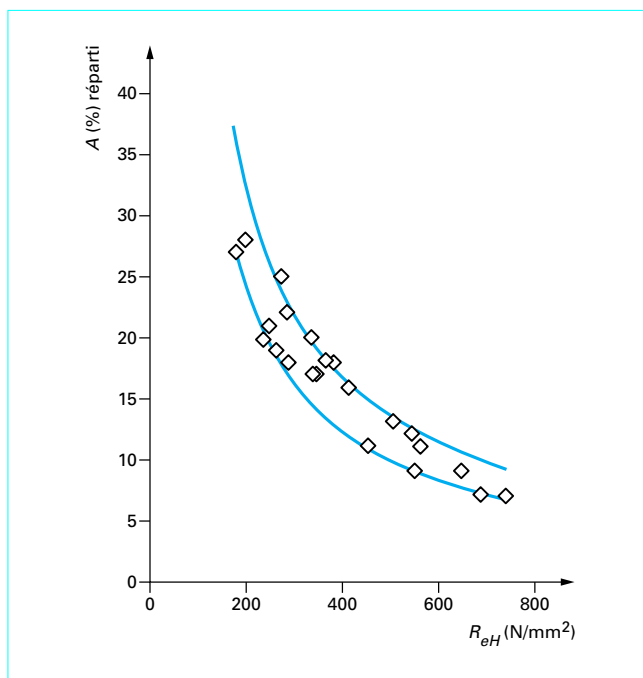
■ Les **caractéristiques mécaniques** des aciers de construction évoluent lorsque la température varie. Au-dessous de la température ambiante, les caractéristiques de résistance augmentent. Le tableau 3 donne des ordres de grandeur de cette augmentation, pour les aciers non alliés dont la limite d'élasticité nominale n'est pas supérieure à 500 N/mm².

De même, le module d'élasticité E croît légèrement quand la température s'abaisse ; le tableau 3 donne des ordres de grandeur de cette évolution.

Le refroidissement au-dessous de la température ambiante provoque un raccourcissement réversible.

Le tableau 3 donne des ordres de grandeur de la contraction totale ($\Delta\ell/\ell$ en %).

■ Mais le problème que pose l'emploi des aciers de construction à températures inférieures à 20 °C est celui du **risque de déclenchement d'une rupture fragile**. Ce type de rupture se produit sans

**Figure 4 – Évolutions moyennes de l'allongement réparti en fonction de R_{eH}** (d'après [1] et [2])

(ou après une très faible) déformation plastique ; dans ces conditions l'acier n'assure pas la sécurité de comportement qui est normalement due à la plasticité ; il est propre aux aciers dans lesquels le fer est à l'état cubique centré (il n'apparaît pas avec les aciers dans lesquels le fer est à l'état cubique à faces centrées – aciers dits « austénitiques »). Le comportement d'un acier face à ce risque de rupture fragile est caractérisé, d'une manière totalement conventionnelle, à l'aide de la valeur de son **énergie de rupture par choc (dite aussi résilience)** déterminée à des températures de référence. En fait cette procédure a pour objet de traduire pratiquement l'évolution de la résilience de l'acier en fonction de la température d'essai (laquelle peut varier de quelques dizaines de degrés Celsius au-dessus de la température ambiante jusqu'à des niveaux pouvant atteindre – 196 °C) et ceci à l'aide de la « **courbe de transition de la résilience** » (figure 5). On constate que la résilience du métal diminue lorsque la température s'abaisse et que, à travers une transition s'étendant sur un certain domaine de température, elle passe des niveaux relativement élevés correspondant aux cas où la rupture est ductile (avec développement préalable d'une déformation plastique

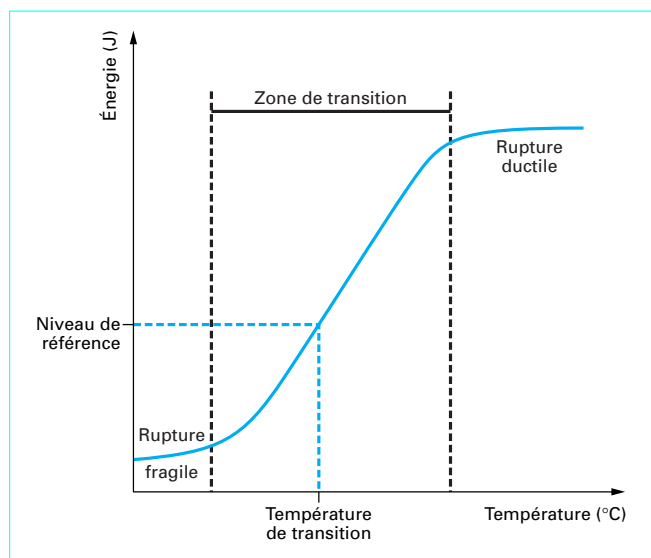


Figure 5 – Schéma d'une courbe de transition de la résilience

importante) à des niveaux extrêmement faibles qui traduisent le fait que l'acier subit alors une rupture fragile, c'est-à-dire sans déformation plastique (le passage se fait par l'intermédiaire de conditions mixtes avec une rupture partiellement fragile et partiellement ductile).

- La procédure de l'**essai de résilience** dit « *Essai de flexion par choc sur éprouvette Charpy* » est décrite par la norme NF EN 10045-1. Il s'agit d'un essai de rupture par flexion d'une éprouvette bi-appuyée, l'application de l'effort se faisant à mi-distance des appuis au droit de l'entaille, il permet de mesurer l'énergie (désignée par le symbole KV et exprimée en Joule) absorbée par la rupture sur mouton-pendule de l'éprouvette entaillée (cette énergie n'est désormais plus rapportée à l'unité de surface de la section utile de l'éprouvette).

- Le **résultat d'un tel essai dépend** (en dehors de l'effet de la température évoqué plus haut) :

- de la **présence et de la géométrie de l'entaille** qui engendre une concentration de contrainte et qui modifie le comportement du matériau en générant des contraintes triaxiales de traction qui vont faire qu'il sera nécessaire d'exercer des contraintes plus élevées (que R_e) pour provoquer une déformation plastique, au risque de voir apparaître la rupture sans passer par un stade plastique, c'est-à-dire d'arriver à la rupture fragile. Cet effet d'entaille croît quand le rayon à fond d'entaille diminue (cas du passage de l'éprouvette en U à l'éprouvette en V) ;

- de la **vitesse de déformation de l'éprouvette** avant sa rupture et donc de la **vitesse d'impact du mouton-pendule**. On a vu qu'une augmentation de la vitesse de déformation engendre à la fois une augmentation de R_e et de R_m et une diminution de l'écart entre ces deux caractéristiques, ce qui traduit une diminution de l'amplitude de la déformation plastique avant rupture.

- Les niveaux de résilience donnés à une température déterminée qui apparaissent dans les normes de produits ont essentiellement le rôle de valeurs repères permettant de vérifier que la courbe de transition de l'acier considéré se situe, par rapport à l'échelle des températures, en deçà des limites imposées. C'est ainsi que l'on en vient à parler (conventionnellement) de **température de transition à une valeur donnée (en joules) de la résilience KV**. Souvent il est fait référence à une résilience de 27 J (correspondant à une température de transition représentée par le symbole T_{27J}) et à 40 J (T_{40J}) voire 50 J (T_{50J}) pour certains aciers à haute limite d'élasticité, ce qui est une façon de prendre en compte un point de la courbe de transition de

la résilience. C'est ce point qui fait l'objet d'une garantie dans les normes de produit.

Il faut signaler que certaines normes, dans certains cas, proposent à titre indicatif, une description plus complète de la courbe de transition de la résilience (cas, par exemple, des normes NF EN 10025 parties 3 et 4).

Ces températures de transition sont des repères conventionnels. Plus elles sont basses, plus l'acier est résistant à la rupture fragile. Mais **elles doivent être utilisées avec discernement** car la loi qui les relie aux températures minimales de service des constructions est fort complexe ; elle fait intervenir de nombreux paramètres tels que :

- les caractéristiques mécaniques de l'acier ;
- son épaisseur ;
- ses conditions de mise en œuvre (écrouissage éventuel, soudage) ;
- les sollicitations auxquelles il est soumis et leurs conditions d'application.

Cet aspect du problème est traité dans le cadre du document NF A 36-010 « *Choix des qualités d'acier pour construction métallique ou chaudronnée vis-à-vis du risque de rupture fragile* » ; il fera l'objet de la norme européenne NF EN 1993-1-10 « *Choix des qualités d'acier* » dans le cadre de l'Eurocode 3 « *Calcul des structures en acier* ». Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe 6.

3.3 Performances mécaniques à des températures supérieures à l'ambiante

Avant d'entrer plus en détail dans ce domaine, il est nécessaire de noter d'une manière formelle que, pour réaliser une construction qui doit travailler à température supérieure à la température ambiante, **il est judicieux d'utiliser des aciers dont les propriétés « à chaud »** (essentiellement le niveau de la limite d'élasticité à chaud et les caractéristiques de résistance au fluage) **font l'objet de garanties** (les aciers de construction métallique ne font l'objet d'aucune garantie relative à leurs propriétés à des températures supérieures à la température ambiante). Les aciers de base qui répondent à de telles exigences sont définis par les normes NF EN 10028, NF EN 10216-2, NF EN 10217-2, NF EN 10217-5.

Cependant, on peut admettre que, pour des réalisations ne travaillant pas à des températures supérieures à 300 voire 400 °C, c'est-à-dire dans des situations où le fluage sera nul ou négligeable, les aciers de construction traditionnels sont utilisables.

Les caractéristiques mécaniques prises en compte dans les calculs sont alors au premier chef :

- la **limite d'élasticité à chaud** ;
- la **résistance à la traction à chaud** ;
- le **module d'élasticité à chaud**.

Au-dessus de la température ambiante les caractéristiques de résistance diminuent. Le tableau 4 donne un ordre de grandeur de l'évolution des caractéristiques d'élasticité avec l'élévation de température.

Les variations, en fonction de la température, de la résistance à la traction d'un acier de construction métallique sont plus complexes. En effet, au cours d'un essai de traction à chaud, dès que la charge unitaire correspondant à la limite d'élasticité est dépassée, l'acier s'écrouit et devient susceptible de subir un phénomène de vieillissement qui induit un durcissement dont la première conséquence est une augmentation de la résistance à la traction. Cette augmentation, qui se fait le plus sentir vers 200 à 300 °C, est d'autant plus importante que l'acier est plus « vieillissant », c'est-à-dire qu'il est au premier chef, plus riche en azote libre (c'est-à-dire non fixé par de l'aluminium, du titane ou du niobium).

Tableau 4 – Évolution des performances mécaniques quand on élève la température de l'acier

Quand on élève la température au-dessus de 20 °C jusqu'à	La limite d'élasticité diminue de (1)	Le module d'élasticité diminue de (1)	La longueur de base augmente (1)
100 °C	7 %	3,5 %	0,10 %
200 °C	16 %	6 %	0,21 %
300 °C	26 %	9 %	0,36 %
400 °C	38 %	13 %	0,51 %

(1) Par rapport à sa valeur à 20 °C.

Le module d'élasticité E diminue légèrement quand la température s'élève comme l'indique le tableau 4.

Le chauffage au-dessus de la température ambiante provoque une dilatation réversible. Le tableau 4 en donne des ordres de grandeur ($\Delta\ell/\ell$ exprimé en %).

3.4 Résistance à la fatigue

Le comportement mécanique d'un métal peut être affecté par des sollicitations inférieures à sa limite d'élasticité mais appliquées un très grand nombre de fois sous forme plus ou moins cyclique. On peut ainsi aboutir à une **rupture dite de « fatigue »** et l'on demande donc au métal de résister à cette fatigue. Pour estimer son comportement on détermine, en l'absence de contraintes résiduelles, sa **limite d'endurance** σ_D qui, pour un type de sollicitation donné et pour une contrainte moyenne σ_m fixée, est la valeur limite vers laquelle tend l'amplitude de contrainte σ_a lorsque le nombre de cycles à la rupture devient très grand (pour les aciers souvent $2 \cdot 10^8$ cycles). Pratiquement on peut estimer que ce sont les conditions (type de sollicitation, σ_m , σ_a) en deçà desquelles le risque de rupture par fatigue disparaît. Mais cette limite d'endurance ($\sigma_D = \sigma_m + \sigma_a$) dépend de très nombreux facteurs :

- la géométrie (macrogéométrie) de la pièce à travers l'effet d'échelle et surtout l'influence des effets d'entaille ;
- l'état de surface et les défauts superficiels (paramètres qui sont liés aux effets microgéométriques) ;
- le mode de sollicitation (type et fréquence) ;
- les contraintes résiduelles (celles susceptibles de s'ajouter algébriquement aux contraintes de service). On démontre qu'en présence de contraintes résiduelles élevées, σ_D n'est plus fonction de σ_m et de σ_a ;
- l'environnement (température et corrosion) ;
- le nombre limite de cycles retenu.

En ce qui concerne le métal de base, sa limite d'endurance ne peut être définie que dans un contexte qui inclut tous les paramètres extérieurs aux propriétés mêmes du métal. Toutefois, dans des conditions comparables, on peut admettre qu'elle est liée à la résistance à la traction R_m . Ainsi, pour le type d'acier qui nous intéresse ici, la limite d'endurance, a été estimée (sur éprouvettes lisses, rectifiées et sans contraintes résiduelles) en flexion rotative à [3] :

$$\sigma_D = R_m (0,56 - 1,4 \cdot 10^{-4} R_m)$$

sachant que le niveau de cette caractéristique peut encore être modifié par :

- des changements d'état structural ;
- des variations de l'état inclusionnaire ;
- des évolutions de la géométrie des inclusions ;
- la mise en œuvre d'un autre mode de sollicitation. Dans ce domaine on admet souvent que par rapport à la limite d'endurance en flexion rotative σ_D , la limite d'endurance :
 - en traction-compression est égale à 90 % de σ_D ,
 - en flexion plane est égale à 105 % de σ_D ,
 - en torsion est égale à 60 % de σ_D .

On notera que, les limites d'endurance déterminées expérimentalement sont affectées par une dispersion qui peut être due aux hétérogénéités de structure de l'acier, à la complexité des processus d'endommagement, à la préparation des éprouvettes, aux conditions d'essais... La dispersion doit donc être appréciée et l'on définit alors la probabilité de non rupture associée à chaque niveau de la limite d'endurance (par exemple niveau de sollicitation conduisant à une probabilité de 50 % de non-rupture ou à une probabilité de 90 % de non-rupture).

En construction métallique, on sait que **ce sont les assemblages soudés qui conditionnent généralement la tenue à la fatigue de la construction** ; ce fait est dû à la géométrie du joint soudé et relève de l'effet d'entaille (macro et microgéométrique) associé au cordon. Dès lors, la tenue à la fatigue des assemblages doit être vérifiée dans les conditions imposées par les codes et règles de construction. Cependant il faut noter qu'elle peut être grandement améliorée par le choix de dispositions constructives adaptées si le soudage est réalisé dans des conditions convenables et si, de plus, des opérations de parachèvement sont effectuées (cf. § 5.5.4).

3.5 Résistance à la corrosion atmosphérique

Les aciers considérés ici ne présentent pas une résistance particulière à la corrosion dans la mesure où ils ne comportent pas d'addition d'élément d'alliage susceptible de leur en conférer une. Face à la corrosion atmosphérique, ils ont des comportements variables avec les conditions climatiques et environnementales et, en général, leur aspect de surface se dégrade plus vite que leur tenue mécanique, sauf pour les produits minces.

Il est évident que le maître d'ouvrage qui souhaite que sa réalisation conserve un bel aspect métallique devra recourir à l'emploi d'**aciers inoxydables** correctement choisis. Il en sera de même s'il est souhaité que la tenue mécanique soit totalement préservée dans le temps sans que soit mise en œuvre une protection de l'acier. Mais **les aciers courants peuvent être protégés contre l'agression de la corrosion atmosphérique** par des **revêtements** de types divers et adaptés aux conditions d'emploi (cf. article *Protection des constructions en acier contre la corrosion* [C 2 505] dans ce traité). Il est aussi possible d'utiliser des **aciers de construction métallique à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique**.

■ Revêtements anticorrosion

Parmi ceux-ci on peut citer :

- les **revêtements non métalliques** :
 - peintures, vernis, laques,
 - matières plastiques : polyéthylène, rilsan,
 - émail vitreux cuit au four ;
- les **revêtements organométalliques** : peintures pigmentées de métaux en poudre (zinc, aluminium, plomb, acier inoxydable) ;
- les **revêtements métalliques**, le métal protecteur étant :
 - électrodéposé (Zn, Ni, Sn, Cr...),
 - déposé par immersion dans un bain fondu (Zn, Sn, Pb, Al),

Tableau 5 – Principaux éléments de la composition chimique des aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique

Nuance	Teneur (en %)						Cu
	C maximal	Mn maximal	P maximal	S maximal	N maximal	Cr	
S235... W	0,16	0,15 à 0,70	0,045	0,040 à 0,035	0,010	0,35 à 0,85	0,20 à 0,60
S355... WP	0,15	1,10	0,05 à 0,16	0,040 à 0,035	0,010	0,25 à 1,35	0,20 à 0,60
S355... W	0,19	0,45 à 1,60	0,040 à 0,035	0,040 à 0,035	0,010	0,35 à 0,85	0,20 à 0,60

• déposé par voie chimique (Ni),
 • plaqué (acier inoxydable, Ni, Ti...);
 — les revêtements obtenus par conversion chimique de la surface :

- phosphatation,
- chromatisation,
- oxydation.

Il est intéressant de noter que des produits sidérurgiques peuvent être livrés :

- déjà dotés de revêtements divers tels que :
 - les produits galvanisés (une ou deux faces, faiblement alliés ou alliés),
 - aluminisés (purs ou alliés),
 - électrozingués (purs ou alliés),
 - prélaqués (direct ou sur revêtements en sous-couche) ;
- mais aussi à l'état grenailé et peint de façon automatique pour faciliter les opérations de chantier et la préparation de surface préalable à la mise en peinture. Cette procédure permet de disposer de produits décalaminés très soigneusement et protégés provisoirement contre la corrosion atmosphérique par application d'un primaire assurant une protection temporaire et l'accrochage ultérieur du système de peinture (ces produits sont définis par la norme NF EN 10238 et leurs conditions de mise en œuvre et d'emploi sont précisées dans le fascicule de documentations FD A 35-512).

■ Aciers de construction métallique à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique

Une solution partielle au problème posé par la corrosion atmosphérique peut être trouvée dans l'emploi des aciers de construction métallique définis par la norme NF EN 10025-5 (qui remplacera la norme NF EN 10155) et qui sont dits « à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique ». Elle spécifie les exigences pour les produits longs et plats laminés à chaud en acier à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique. Elle décrit deux nuances utilisables en construction métallique.

Les éléments principaux de leurs compositions chimiques (sur produits) sont rappelés dans le tableau 5.

● Caractéristiques de limite d'élasticité des nuances

Le projet de norme PR NF EN 10025-5 a retenu deux niveaux de limite d'élasticité garantie qui se classent comme suit :

- $R_{eH} \geq 235 \text{ N/mm}^2$ pour la nuance S235 W sur épaisseur $\leq 16 \text{ mm}$;
- $R_{eH} \geq 355 \text{ N/mm}^2$ pour les nuances S355 WP et S355 W sur épaisseur $\leq 16 \text{ mm}$.

Ici encore et pour les mêmes raisons que celles évoquées au paragraphe 4.1.1 au-delà de 16 mm d'épaisseur la limite d'élasticité décroît quand l'épaisseur du produit augmente. Le tableau 6 donne le détail de ces variations.

Tableau 6 – Évolution de la limite d'élasticité avec l'épaisseur du produit

Épaisseur <i>e</i> (mm)	Nuance		
	S235 W	S355 WP (1)	S355 W
	$R_{eH} \text{ min}$ (N/mm ²)	$R_{eH} \text{ min}$ (N/mm ²)	$R_{eH} \text{ min}$ (N/mm ²)
≤ 16	235	355	355
$16 < e \leq 40$	225	345	345
$40 < e \leq 63$	215	–	335
$63 < e \leq 80$	215	–	325
$80 < e \leq 100$	215	–	315
$100 < e \leq 150$	195	–	295

(1) Les variantes au chrome et phosphore sont limitées à 40 mm.

● Caractéristiques des qualités

Pour assurer la résistance à la rupture fragile, la norme définit un certain nombre d'exigences qui concernent :

- certains éléments de la composition chimique du métal, en particulier les teneurs maximales en impuretés (soufre et phosphore) ;
- les conditions de désoxydation du métal. Ainsi, la plus basse qualité est réalisée, dans la nuance S235 W en excluant l'acier effervescent, avec des limitations de la teneur en azote. Les qualités supérieures subissent en outre une addition suffisante d'éléments piégeant complètement l'azote présent (par exemple une teneur minimale en aluminium de 0,020 %) et pouvant leur conférer une structure à grain fin ;
- les états métallurgiques dans lesquels les aciers peuvent être livrés (la commande doit préciser le choix), les produits plats issus de laminage quarto peuvent être livrés à l'état brut de laminage ou à l'état normalisé ou après laminage normalisant (laminage conférant au produit les caractéristiques mécaniques correspondant à celles de l'état normalisé ; ces caractéristiques sont maintenues après un traitement de normalisation ultérieur).

Les garanties de résistance à la rupture fragile sont exprimées dans la norme sous forme de valeurs de résilience minimales (ou « niveaux d'énergie ») à une température d'essai imposée. Plusieurs niveaux de qualité sont ainsi définis pour chaque nuance. Le tableau 7 présente la liste récapitulative des nuances et qualités reprises dans cette norme, avec l'indication des épaisseurs maximales fournies et celle des conditions de garantie.

Tableau 7 – Qualités requises pour différentes nuances par la norme NF EN 10025-5

Nuance	Qualité	Épaisseur max (mm)	Température (°C)	Énergie de rupture (1) (J)
S235	J0W	100	0	27
	J2W	100	- 20	27
S355	J0WP	40	0	27
	J2WP	40	- 20	27
	J0W	100	0	27
	J2W	100	- 20	27
	K2W	100	- 20	40 (2)

(1) Sur éprouvette KV en flexion par choc.

(2) Équivalent à une énergie de 27 J à une température de - 30 °C.

● Correspondances avec les anciennes normes

La norme NF EN 10025-5 donne les équivalences présentées au tableau 8 par rapport aux anciennes nuances définies par la norme NF EN 10155 et antérieurement par la norme NF A 35-502.

Tableau 8 – Équivalences des nuances entre la norme NF EN 10025-5 et l'ancienne norme NF A 35-502

Nuance selon NF EN 10025-5	Nuance selon NF A 35-502
S235J0W	E 24-W3
S235J2W	E 24-W4
S355J0WP	E 36-WA3
S355J2WP	E 36-WA4
S355J0W	E 36-WB3
S355K2W	E 36-WB4

Mais avant d'utiliser de tels aciers il faut noter que la future norme précise (en son annexe informative C) :

« L'amélioration de la résistance à la corrosion atmosphérique dépend de conditions atmosphériques présentant une succession de périodes sèches et humides pour permettre la formation de la couche auto-protectrice d'oxyde du métal de base. La protection apportée dépend des conditions environnementales et autres relevant sur le site de la construction.

Lors de la conception et de l'assemblage de la structure, il convient de prévoir des dispositions susceptibles de permettre à la couche autoprotectrice d'oxyde de se former et de se régénérer sans entrave. Il incombe au concepteur de tenir compte de la corrosion des aciers non protégés dans ses calculs et, autant que possible, de compenser celle-ci en accroissant l'épaisseur du produit.

Il est recommandé d'appliquer une protection conventionnelle des surfaces lorsque l'air présente une teneur significative en substances chimiques particulières, et une telle protection est absolument nécessaire lorsque la structure se trouve en contact avec l'eau pendant des périodes prolongées, est exposée en permanence à l'humidité, ou est utilisée en atmosphère marine. Les produits doivent être décapés avant l'application de peinture. Dans des conditions comparables, la susceptibilité à la corrosion de l'acier à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique revêtu de peinture est moindre que celle des aciers de construction conventionnels.

Les surfaces de structures qui ne sont pas exposées aux intempéries mais sont sujettes à l'accumulation de condensation doivent être convenablement ventilées. Sinon, une protection de surface appropriée s'impose. La mesure dans laquelle ces facteurs dépendent des conditions climatiques dominantes au sens large et des détails de la construction ne permet pas de formuler des conclusions universellement valables sur le processus de corrosion. Il convient, par conséquent, que l'utilisateur consulte le producteur de l'acier pour ce qui concerne l'adéquation du produit à chaque application particulière. »

Pour l'utilisation d'aciers à résistance améliorée à la corrosion dans la réalisation d'ouvrages d'art, le fascicule n° 66 du CCTG « Exécution des ouvrages de génie civil à ossature en acier » précise leurs conditions d'emploi et renvoie également d'une façon plus générale à l'annexe de la circulaire (ministère de l'Équipement - Direction des routes) du 26 septembre 1985 sur l'utilisation d'aciers dits *autopatinables* pour les limitations d'emploi et la nécessité de dispositions techniques particulières.

Pour l'utilisation d'aciers à résistance améliorée à la corrosion dans la réalisation d'ouvrages d'art, le fascicule n° 66 du CCTG « Exécution des ouvrages de génie civil à ossature en acier » précise leurs conditions d'emploi et renvoie également d'une façon plus générale à l'annexe de la circulaire (ministère de l'Équipement - Direction des routes) du 26 septembre 1985 sur l'utilisation d'aciers dits *autopatinables* pour les limitations d'emploi et la nécessité de dispositions techniques particulières.

4. Aciers de construction métallique définis par la normalisation

La norme de base des aciers de construction métallique est la norme NF EN 10025 (en projet), en 6 parties, qui va remplacer les normes NF EN 10025 (version 1993), NF EN 10113 (les 3 parties) et NF EN 10137 (parties 1 et 2 ; la partie 3 étant annulée) et NF EN 10155. On distingue ainsi :

- la **partie 1** qui définit les conditions générales techniques de livraison des produits laminés à chaud en aciers de construction ;
- la **partie 2** qui définit les conditions techniques de livraison des produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés ;
- la **partie 3** qui définit les conditions techniques de livraison des produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins livrés à l'état normalisé ou après laminage normalisant ;
- la **partie 4** qui définit les conditions techniques de livraison des produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins livrés après laminage thermomécanique ;
- la **partie 5** qui définit les conditions techniques de livraison des produits laminés à chaud en aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique. Cette norme a déjà été présentée au § 3.5 ;
- la **partie 6** qui définit les conditions techniques de livraison des produits plats laminés à chaud en aciers de construction à haute limite d'élasticité livrés à l'état trempé et revenu.

Par ailleurs, on doit évoquer ici aussi les **normes** suivantes :

- la norme NF EN 10225 - « Aciers de construction soudables destinés à la fabrication de structures marines fixes » ;
- la norme NF EN 10210 - « Profils creux pour la construction fins à chaud en aciers de construction non alliés et à grains fins » ;
- la norme NF EN 10219 - « Profils creux pour la construction formés à froid en aciers de construction non alliés et à grains fins ».

4.1 Aciers définis par la norme NF EN 10025-2

Cette norme spécifie les exigences pour les **produits longs et plats laminés à chaud d'épaisseur comprise entre 3 et 250 mm** (150 mm maximum pour la nuance S450). Elle décrit **quatre nuances** utilisables en construction métallique (quatre autres nuances sont proposées sans garantie de résilience) qui doivent

satisfaire à une série complète de garanties correspondant à leurs emplois. Trois de ces nuances correspondent pratiquement aux anciennes nuances de base utilisées en construction métallique.

Les éléments principaux de leurs compositions chimiques sur produits sont rappelés dans le tableau 9.

4.1.1 Caractéristiques de limite d'élasticité des nuances

La norme NF EN 10025-2 a retenu, pour la construction métallique proprement dite, **quatre niveaux de limite d'élasticité garantie** qui se classent comme suit :

- $R_{eH} \geq 235 \text{ N/mm}^2$ pour la nuance S235 sur épaisseur $\leq 16 \text{ mm}$;
- $R_{eH} \geq 275 \text{ N/mm}^2$ pour la nuance S275 sur épaisseur $\leq 16 \text{ mm}$;
- $R_{eH} \geq 355 \text{ N/mm}^2$ pour la nuance S355 sur épaisseur $\leq 16 \text{ mm}$;
- $R_{eH} \geq 450 \text{ N/mm}^2$ pour la nuance S450 sur épaisseur $\leq 16 \text{ mm}$.

Nota : on rappelle que la normalisation en vigueur admet comme limite d'élasticité la limite supérieure d'écoulement. En l'absence de phénomène d'écoulement on doit prendre en compte la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 %.

Au-delà de 16 mm d'épaisseur, dans les mêmes conditions générales de forme des produits, la limite d'élasticité décroît quand

l'épaisseur du produit augmente. En effet, pour les fortes épaisseurs, les températures de fin de laminage sont plus élevées et les vitesses de refroidissement plus lentes. Cet effet pourrait être compensé par une augmentation des teneurs en carbone quand l'épaisseur croît mais les difficultés de soudage et la tendance à la rupture fragile augmentent simultanément avec l'épaisseur et la teneur en carbone. En pratique et pour répondre aux besoins de la construction, un compromis a été admis qui consiste à augmenter légèrement la teneur en carbone tout en admettant une légère baisse du niveau garanti pour la limite d'élasticité. Le tableau 10 donne le détail de ces variations.

Ces nuances offrent à l'utilisateur quatre « niveaux de résistance » dont le choix permet de résoudre un premier problème qui est d'assurer la stabilité de la construction.

4.1.2 Caractéristiques des qualités

Pour assurer la résistance à la rupture fragile, la norme définit un certain nombre d'exigences qui concernent :

— certains éléments de la composition chimique du métal, en particulier les teneurs maximales en carbone et en impuretés (soufre et phosphore) ;

Tableau 9 – Principaux éléments de la composition chimique des aciers définis par la norme NF EN 10025-2

Nuance	Teneur massique maximale				
	C (1) (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	N (%)
S235	0,23 à 0,19	1,50	0,045 à 0,035	0,045 à 0,035	0 à 0,014
S275	0,25 à 0,21	1,60	0,045 à 0,035	0,045 à 0,035	0 à 0,014
S355	0,27 à 0,23	1,70	0,035 à 0,025	0,035 à 0,025	0 à 0,014
S450	0,23 à 0,24	1,80	0,030	0,030	0,027 (2)

(1) Selon épaisseur et qualité.

(2) Pas de spécification si la teneur en Al est supérieure ou égale à 0,015 % ou si d'autres éléments fixant l'azote sont présents.

Tableau 10 – Évolution de la limite d'élasticité garantie en fonction de l'épaisseur et de la teneur en carbone des produits

Épaisseur e (mm)	S235 (1)		S275		S355		S450	
	C max (%)	R_{eH} min (N/mm ²)	C max (%)	R_{eH} min (N/mm ²)	C max (%)	R_{eH} min (N/mm ²)	C max (%)	R_{eH} min (N/mm ²)
$e \leq 16$	0,19	235	0,21 à 0,24	275	0,23 à 0,27	355	0,23	450
$16 < e \leq 40$	0,19	225	0,21 à 0,24	265	0,20 à 0,24	345	0,23	430
$40 < e \leq 63$	0,19 à 0,23	215	0,21 à 0,25	255	0,24 à 0,27	335	0,24	410
$63 < e \leq 80$	0,19 à 0,23	215	0,21 à 0,25	245	0,24 à 0,27	325	0,24	390
$80 < e \leq 100$	0,19 à 0,23	215	0,21 à 0,25	235	0,24 à 0,27	315	0,24	380
$100 < e \leq 150$	0,19 à 0,23	195	0,21 à 0,25	225	0,24 à 0,27	295	0,24	380
$150 < e \leq 200$	0,19 à 0,23	185	0,21 à 0,25	215	0,24 à 0,27	285	(1)	–
$200 < e \leq 250$	0,19 à 0,23	175	0,21 à 0,25	205	0,24 à 0,27	275	(1)	–

(1) Épaisseurs limitées à 150 mm.

Tableau 11 – Nuances et qualités reprises des aciers de la norme NF EN 10025-2

Nuance	Qualité	Épaisseur maximale (mm)	Température (°C)	Énergie de rupture (1) (J)	
				12 < e ≤ 150 mm	150 < e ≤ 250 mm
S235	JR	250	20	27	27
	J0	250	0	27	27
	J2	250	-20	27	27
S275	JR	250	20	27	27
	J0	250	0	27	27
	J2	250	-20	27	27
S355	JR	250	20	27	27
	J0	250	0	27	27
	J2	250	-20	27	27
	K2	250	-20	40	33
S450	J0	150	0	27	

(1) Selon épaisseur *e* exprimée en mm.

— les conditions de désoxydation du métal. Ainsi les plus basses qualités excluent l'acier effervescent tandis que les meilleures exigent un calmage total avec une addition suffisante d'éléments piégeant complètement l'azote présent (par exemple une teneur minimale en aluminium de 0,020 %) et pouvant leur conférer une structure à grain fin.

Les **garanties de résistance à la rupture fragile** sont exprimées dans la norme sous forme de **valeurs de résilience minimales** (ou « **niveaux d'énergie** ») à une température d'essai imposée. Plusieurs niveaux de qualité sont ainsi définis pour chaque nuance. Le tableau 11 présente la liste récapitulative des nuances et qualités reprises dans cette norme, avec l'indication des épaisseurs maximales fournies et celle des conditions de garantie.

4.1.3 Correspondances avec les anciennes normes

La norme NF EN 10025-2 donne les équivalences suivantes par rapport aux anciennes nuances définies par les anciennes normes NF EN 10025 et NF A 35-501 (tableau 12).

Tableau 12 – Équivalences des nuances entre les normes NF EN 10025-2, NF 10025 et NF A 35-501

Nuance selon NF EN 10025-2	Nuance selon l'ancienne norme NF EN 10025	Nuance selon l'ancienne norme NF A 35-501
S235JR	S235JR	E 24-2
S235J0	S235J0	E 24-3
S235J2	S235JRG3	E 24-4
S275JR	S275JR	E 28-2
S275J0	S275J0	E 28-3
S275J2	S275J2G3	E 28-4
S355JR	S355JR	E 36-2
S355J0	S355J0	E 36-3
S355K2	S355K2G3	E 36-4

4.2 Aciers définis par la norme NF EN 10025-3

Cette norme spécifie les exigences pour les **produits longs et plats laminés à chaud d'épaisseur comprise entre 3 et 250 mm** (200 mm au maximum pour la nuance S460) **en aciers de construction soudables à grains fins livrés à l'état normalisé ou après laminage normalisant**. Elle décrit **quatre nuances** utilisables en construction métallique.

Les éléments principaux de leurs compositions chimiques sur produits sont rappelés dans le tableau 13.

Tableau 13 – Principaux éléments de la composition chimique des aciers définis par la norme NF EN 10025-3

Teneur massique maximale	Nuance (1)			
	S275N	S355N	S420N	S460N
C (%)	0,20 ou 0,18	0,22 ou 0,20	0,22	0,22
Mn (%)	0,45 à 1,60	0,85 à 1,75	0,95 à 1,80	0,95 à 1,80
Nb (%)	0,06	0,06	0,06	0,06
V (%)	0,07	0,14	0,22	0,22
Ni (%)	0,35	0,55	0,85	0,85
Cu (%)	0,60	0,60	0,60	0,60
N (%)	0,017	0,017	0,027	0,027

(1) Pour toutes les nuances :
 P ≤ 0,040 ou 0,035 % S ≤ 0,035 ou 0,030 %
 Al total ≥ 0,015 % (sauf si présence d'éléments fixant N)
 Ti ≤ 0,04 % Cr ≤ 0,35 % Mo ≤ 0,13 %

Tableau 14 – Limite d'élasticité garantie pour les aciers décrits par la norme NF EN 10025-3

Épaisseur e (mm)	S275N	S355N	S420N	S460N
	R_{eH} minimale (N/mm ²)	R_{eH} minimale (N/mm ²)	R_{eH} minimale (N/mm ²)	R_{eH} minimale (N/mm ²)
$e \leq 16$	275	355	420	460
$16 < e \leq 40$	265	345	400	440
$40 < e \leq 63$	255	335	390	430
$63 < e \leq 80$	245	325	370	410
$80 < e \leq 100$	235	315	360	400
$100 < e \leq 150$	225	295	340	380
$150 < e \leq 200$	215	285	330	370
$200 < e \leq 250$	205	275	320	(1)

(1) Épaisseur limitée à 200 mm pour l'application de la norme.

4.2.1 Caractéristiques de limite d'élasticité des nuances

La norme NF EN 10025-3 a retenu **quatre niveaux de limite d'élasticité garantie** qui se classent comme suit :

- $R_{eH} \geq 275$ N/mm² pour la nuance S275N sur $e \leq 16$ mm ;
- $R_{eH} \geq 355$ N/mm² pour la nuance S355N sur $e \leq 16$ mm ;
- $R_{eH} \geq 420$ N/mm² pour la nuance S420N sur $e \leq 16$ mm ;
- $R_{eH} \geq 460$ N/mm² pour la nuance S460N sur $e \leq 16$ mm.

Ici encore et pour les mêmes raisons que celles évoquées au paragraphe 4.1.1, au delà de 16 mm d'épaisseur la limite d'élasticité décroît quand l'épaisseur du produit augmente. Le tableau 14 donne le détail de ces variations.

4.2.2 Caractéristiques des qualités

Pour assurer la résistance à la rupture fragile, la norme définit un certain nombre d'exigences qui concernent :

— certains éléments de la composition chimique du métal, en particulier les teneurs maximales en impuretés (soufre et phosphore) ;

— les conditions de désoxydation du métal. Les nuances sont calmées et subissent en outre une addition suffisante d'éléments piégeant complètement l'azote présent (par exemple une teneur

minimale en aluminium de 0,020 %) et leur conférant une structure à grain fin ;

— l'état métallurgique dans lequel les aciers doivent être livrés : les produits sont obligatoirement livrés à l'état normalisé ou après laminage normalisant (laminage conférant au produit les caractéristiques mécaniques correspondant à celles de l'état normalisé ; ces caractéristiques sont maintenues après un traitement de normalisation ultérieur).

Les **garanties de résistance à la rupture fragile** sont exprimées dans la norme sous forme de **valeurs de résilience minimales (ou « niveaux d'énergie »)** correspondant à différentes températures d'essai ; l'ensemble des garanties reconstitue une **courbe « minimale » de transition** et ceci à la fois pour des éprouvettes prélevées dans le sens long et pour des éprouvettes prélevées dans le sens travers. Deux niveaux de qualité sont ainsi définis pour chaque nuance. Le tableau 15 présente la liste récapitulative des nuances et qualités reprises dans cette norme, avec l'indication des conditions de garantie.

4.2.3 Correspondances avec les anciennes normes

La norme NF EN 10025-3 donne les équivalences suivantes par rapport aux anciennes nuances définies par les normes NF A 35-504 et 36-201 (tableau 16).

4.3 Aciers définis par la norme NF EN 10025-4

Cette norme spécifie les exigences pour les **produits longs** (d'épaisseur inférieure ou égale à 150 mm) et **plats** (épaisseur inférieure ou égale à 120 mm) **laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins livrés après laminage thermomécanique**. Elle décrit **quatre nuances** utilisables en construction métallique.

Les éléments principaux de leurs compositions chimiques sur produits sont rappelés dans le tableau 17.

4.3.1 Caractéristiques de limite d'élasticité des nuances

La norme NF EN 10025-4 a retenu **quatre niveaux de limite d'élasticité garantie** qui se classent comme suit sur une épaisseur inférieure ou égale à 16 mm :

- $R_{eH} \geq 275$ N/mm² pour la nuance S275M ;
- $R_{eH} \geq 355$ N/mm² pour la nuance S355M ;
- $R_{eH} \geq 420$ N/mm² pour la nuance S420M ;
- $R_{eH} \geq 460$ N/mm² pour la nuance S460M.

Tableau 15 – Nuances, qualités et conditions de garantie de la norme NF EN 10025-3

Nuance	Sens	Énergie minimale (J) à la température de						
		+ 20 °C	0 °C	- 10 °C	- 20 °C	- 30 °C	- 40 °C	- 50 °C
S275N, S355N, S420N, S460N	long	55	47	43	40	—	—	—
	travers	31	27	24	20	—	—	—
S275NL, S355NL, S420NL, S460NL	long	63	55	51	47	40	31	27
	travers	40	34	30	27	23	20	16

Tableau 16 – Équivalences entre les nuances des normes NF EN 10025-3 et NF A 35-504 ou 36-201

Nuance selon NF EN 10025-3	Nuance selon NF A 35-504 ou 36-201
S355N	E355R
S355NL	E355FP
S420N	E420R
S420NL	E420FP
S460N	E460R
S460NL	E460FP

Tableau 17 – Principaux éléments entrant dans la composition chimique des aciers définis par la norme NF EN 10025-4

Teneur massique maximale	Nuances (1)			
	S275M	S355M	S420M	S460M
C (%)	0,15 ou 0,17	0,16 ou 0,18	0,18 ou 0,20	0,18 ou 0,20
Mn (%)	1,60	1,70	1,80	1,80
Mo (%)	0,13	0,13	0,23	0,23
V (%)	0,10	0,12	0,14	0,14
Ni (%)	0,35	0,55	0,85	0,85
N (%)	0,017	0,017	0,027	0,027

(1) Pour toutes les nuances :

P ≤ 0,040 ou 0,035 %

S ≤ 0,035 ou 0,030 %

Al total ≥ 0,015 % (sauf si présence d'éléments fixant N)

Ti ≤ 0,06 %

Nb ≤ 0,060 %

Ici encore et pour les mêmes raisons que celles évoquées au paragraphe 4.1.1, au delà de 16 mm d'épaisseur la limite d'élasticité décroît quand l'épaisseur e du produit augmente. Le tableau **18** donne le détail de ces variations.

4.3.2 Caractéristiques des qualités

Pour assurer la résistance à la rupture fragile, la norme définit un certain nombre d'exigences qui concernent :

Tableau 18 – Variation de la limite d'élasticité avec l'épaisseur e pour les nuances de la norme NF EN 10025-4

Épaisseur e (mm)	Nuance			
	S275M	S355M	S420M	S460M
	R_{eH} minimale (N/mm ²)	R_{eH} minimale (N/mm ²)	R_{eH} minimale (N/mm ²)	R_{eH} minimale (N/mm ²)
$e \leq 16$	275	355	420	460
$16 < e \leq 40$	265	345	400	440
$40 < e \leq 63$	255	335	390	430
$63 < e \leq 80$	245	325	380	410
$80 < e \leq 100$	245	325	370	400
$100 < e \leq 120$	240	320	365	385
pour les produits longs seulement $120 < e \leq 150$	240	320	365	385

— certains éléments de la composition chimique du métal, en particulier les teneurs maximales en impuretés (soufre et phosphore) ;

— les conditions de désoxydation du métal. Les nuances sont calmées et subissent en outre une addition suffisante d'éléments piégeant complètement l'azote présent (par exemple : une teneur minimale en aluminium de 0,020 %) et leur conférant une structure à grain fin ;

— l'état métallurgique dans lequel les aciers doivent être livrés : les produits sont obligatoirement livrés après laminage thermomécanique (laminage conférant au produit les caractéristiques mécaniques améliorées ; ces caractéristiques ne seraient pas maintenues après un traitement de normalisation ultérieur).

Les **garanties de résistance à la rupture fragile** sont exprimées dans la norme sous forme de **valeurs de résilience minimales (ou « niveaux d'énergie »)** correspondant à différentes températures d'essai ; l'ensemble des garanties reconstitue une **courbe « minimale » de transition** et ceci à la fois pour des éprouvettes prélevées dans le sens long et pour des éprouvettes prélevées dans le sens travers. **Deux niveaux de qualité** sont ainsi définis **pour chaque nuance**. Le tableau **19** présente la liste récapitulative des nuances et qualités reprises dans cette norme, avec l'indication des conditions de garantie.

Tableau 19 – Nuances, qualités et conditions de garantie de la norme NF EN 10025-4

Nuance	Sens	Énergie minimale (J) à la température de						
		+ 20 °C	0 °C	- 10 °C	- 20 °C	- 30 °C	- 40 °C	- 50 °C
S275M, S355M, S420M, S460M	long	55	47	43	40	—	—	—
	travers	31	27	24	20	—	—	—
S275ML, S355ML, S420ML, S460ML	long	63	55	51	47	40	31	27
	travers	40	34	30	27	23	20	16

4.3.3 Correspondances avec les anciennes normes

La norme NF EN 10025-4 conserve les mêmes nuances que celles définies dans la norme NF EN 10113-3 ; il n'y a pas de correspondance avec une norme antérieure, ces aciers n'étaient pas normalisés à l'échelle nationale.

4.4 Aciers définis par la norme NF EN 10025-6

Cette norme spécifie les exigences pour les **tôles et larges plats** (épaisseur maximale de 150 à 50 mm suivant la nuance) **en acier de construction à haute limite d'élasticité livrés à l'état trempé et revenu**.

Elle décrit **sept nuances** utilisables en construction métallique.

La définition de leurs compositions chimiques sur produits satisfait aux mêmes exigences dont les principales sont rappelées au tableau 20.

Tableau 20 – Principaux éléments entrant dans la composition chimique des aciers définis par la norme NF EN 10025-6

Élément	Teneur massique (%)	Élément	Teneur massique (%)
C	≤ 0,22	Cr	≤ 1,60
Mn	≤ 1,80	Cu	≤ 0,55
Si	≤ 0,86	Mo	≤ 0,74
P	≤ 0,030 ou 0,025	Nb	≤ 0,07
S	≤ 0,017 ou 0,012	Ni	≤ 2,1
N	≤ 0,016	Ti	≤ 0,07
Al (1)	≥ 0,013	V	≤ 0,14
B	≤ 0,006 0	Zr	≤ 0,17

(1) Peut être remplacé par d'autres éléments d'affinage du grain.

4.4.1 Caractéristiques de limite d'élasticité des nuances

La norme NF EN 10025-6 a retenu **sept niveaux de limite d'élasticité garantie** qui se classent comme suit sur épaisseur inférieure ou égale à 50 mm :

- $R_{eH} \geq 460 \text{ N/mm}^2$ pour la nuance S460Q ;
- $R_{eH} \geq 500 \text{ N/mm}^2$ pour la nuance S500Q ;
- $R_{eH} \geq 550 \text{ N/mm}^2$ pour la nuance S550Q ;
- $R_{eH} \geq 620 \text{ N/mm}^2$ pour la nuance S620Q ;
- $R_{eH} \geq 690 \text{ N/mm}^2$ pour la nuance S690Q ;
- $R_{eH} \geq 890 \text{ N/mm}^2$ pour la nuance S890Q ;
- $R_{eH} \geq 960 \text{ N/mm}^2$ pour la nuance S960Q.

Ici encore et pour les mêmes raisons que celles évoquées au paragraphe 4.1.1, au delà de 50 mm d'épaisseur la limite d'élasticité décroît quand l'épaisseur du produit augmente. Le tableau 21 donne le détail de ces variations.

4.4.2 Caractéristiques des qualités

Pour assurer la résistance à la rupture fragile, la norme définit un certain nombre d'exigences qui concernent :

Tableau 21 – Variation de la limite d'élasticité avec l'épaisseur e pour les nuances de la norme NF EN 10025-6

Nuance	R_{eH} minimale (N/mm ²)		
	$3 \text{ mm} \leq e \leq 50 \text{ mm}$	$50 \text{ mm} < e \leq 100 \text{ mm}$	$100 \text{ mm} < e \leq 150 \text{ mm}$
S460Q	460	440	400
S500Q	500	480	440
S550Q	550	530	490
S620Q	620	580	560
S690Q	690	650	630
S890Q	890	830	(1)
S960Q	960	(2)	(2)

(1) e limitée à 100 mm.

(2) e limitée à 50 mm.

— certains éléments de la composition chimique du métal, en particulier les teneurs maximales en impuretés (soufre et phosphore) ;

— les conditions de désoxydation du métal. Les nuances sont calmées et subissent en outre une addition suffisante d'éléments piégeant complètement l'azote présent (par exemple une teneur minimale en aluminium de 0,013 %) et leur conférant une structure à grain fin ;

— l'état métallurgique dans lequel les aciers doivent être livrés : les produits sont obligatoirement livrés après trempe et revenu (les performances mécaniques ne sont pas maintenues après un chauffage à une température égale ou supérieure à la température de revenu).

Les **garanties de résistance à la rupture fragile** sont exprimées dans la norme sous forme de **valeurs de résilience minimales (ou « niveaux d'énergie »)** correspondant à différentes températures d'essai ; l'ensemble des garanties reconstitue une courbe « minimale » de transition et ceci à la fois pour des éprouvettes prélevées dans le sens long et pour des éprouvettes prélevées dans le sens travers. **Trois niveaux de qualité** sont ainsi définis **pour chaque nuance**. Le tableau 22 présente la liste récapitulative des nuances et qualités reprises dans cette norme, avec l'indication des conditions de garantie.

4.4.3 Correspondances avec les anciennes normes

La norme NF EN 10025-6 conserve les mêmes nuances que celles définies dans la norme NF EN 10137-2 qui donnait les équivalences par rapport aux anciennes nuances définies par la norme NF A 36-204 (tableau 23).

4.5 Aciers définis par la norme NF EN 10225

Cette norme intitulée « **Aciers de construction soudables destinés à la fabrication de structures marines fixes** » remplace la norme NF A 36-212 et définit, principalement pour des **tôles**, un certain nombre de nuances fondamentalement proches de certaines nuances décrites par la norme NF EN 10025 mais soumises à des exigences complémentaires imposées par la sévérité du service attendu des **constructions marines fixes**. C'est ainsi que l'on trouve dans cette norme des nuances des « classes » S355, S420 et S460 qui sont désignées comme suit :

Tableau 22 – Nuances, qualités et conditions de garantie pour les nuances de la norme NF EN 10025-6

Nuance	Sens	Énergie minimale (J) à la température de			
		0 °C	- 20 °C	- 40 °C	- 60 °C
S460Q, S500Q, S550Q, S620Q S690Q, S890Q, S960Q	long	40	27	–	–
	travers	30	27	–	–
S460QL, S500QL, S550QL, S620QL S690QL, S890QL, S960QL	long	50	40	27	–
	travers	35	30	27	–
S460QL1, S500QL1, S550QL1, S620QL1 S690QL1, S890QL1, S960QL1	long	60	50	40	27
	travers	40	35	30	27

Tableau 23 – Équivalences entre les nuances des normes NF EN 10025-6 et NF A 36-204

Nuance selon NF EN 10025-6	Nuance selon NF A 36-204
S460QL	E460T
S500QL	E500T
S550QL	E550T
S620QL	E620T
S690QL	E690T
S960QL	E960T

• S355G2 + N, S355G3 + N, S355G7 + N, S355G8 + N, S355G9 + N, S355G10 + N ; ces nuances s'apparentant aux nuances S355 définies par la norme NF EN 10025-3 (cf. § 4.2) ;

• S355G5 + M, S355G6 + M, S355G7 + M, S355G8 + M, S355G9 + M, S355G10 + M ; ces nuances s'apparentant aux nuances S355 définies par la norme NF EN 10025-4 (cf. § 4.3) ;

• S420G1 + M, S420G2 + M ; ces nuances s'apparentant aux nuances S420 définies par la norme NF EN 10025-4 (cf. § 4.3) ;

• S420G1 + Q, S420G2 + Q ; ces nuances s'apparentant aux nuances S420 définies par la norme NF EN 10025-6 (cf. § 4.4) ;

• S460G1 + M, S460G2 + M ; ces nuances s'apparentant aux nuances S460 définies par la norme NF EN 10025-4 (cf. § 4.3) ;

• S460G1 + Q, S460G2 + Q ; ces nuances s'apparentant aux nuances S460 définies par la norme NF EN 10025-6 (cf. § 4.4).

Les **garanties supplémentaires** concernent :

- les limites d'épaisseur selon les nuances et les produits ;
- les limites des fourchettes de composition chimique ;
- les limites d'élasticité selon les épaisseurs ;
- les énergies de rupture en flexion par choc ;
- les résultats d'essais spécifiques (écartement à fond de fissure – *crack tip opening displacement* CTOD –, soudabilité notamment).

Cette norme remplace la norme NF A 36-212.

4.6 Aciers définis par la norme NF EN 10210

Les aciers définis par cette norme intitulée « **Profils creux pour la construction finis à chaud en aciers de construction non alliés et à grains fins** », sont comparables à certains de ceux décrits par la norme NF EN 10025, les performances tenant compte des spécificités de la fabrication des profils creux et de leurs dimensions. On trouve ainsi (cf. § 4.1, § 4.2) :

- une nuance S235JRH voisine de la nuance S235JR de la norme NF EN 10025-2 ;
- une nuance S275J0H voisine de la nuance S275J0 de la norme NF EN 10025-2 ;
- une nuance S275J2H voisine de la nuance S275J2 de la norme NF EN 10025-2 ;
- une nuance S355J0H voisine de la nuance S355J0 de la norme NF EN 10025-2 ;
- une nuance S355J2H voisine de la nuance S355J2 de la norme NF EN 10025-2 ;
- une nuance S275NH voisine de la nuance S275N de la norme NF EN 10025-3 ;
- une nuance S275NLH voisine de la nuance S275NL de la norme NF EN 10025-3 ;
- une nuance S355NH voisine de la nuance S355N de la norme NF EN 10025-3 ;
- une nuance S355NLH voisine de la nuance S355NL de la norme NF EN 10025-3 ;
- une nuance S460NH voisine de la nuance S460N de la norme NF EN 10025-3 ;
- une nuance S460NLH voisine de la nuance S460NL de la norme NF EN 10025-3.

4.7 Aciers définis par la norme NF EN 10219

Les aciers définis par cette norme intitulée « **Profils creux pour la construction formés à froid en aciers de construction non alliés et à grains fins** », sont comparables à certains de ceux décrits par la norme NF EN 10025, les performances tenant compte des spécificités de la fabrication des profils creux et de leurs dimensions. On trouve ainsi (cf § 4.1, § 4.2, § 4.3) :

- une nuance S235JRH voisine de la nuance S235JR de la norme NF EN 10025-2 ;
- une nuance S275J0H voisine de la nuance S275J0 de la norme NF EN 10025-2 ;
- une nuance S275J2H voisine de la nuance S275J2 de la norme NF EN 10025-2 ;
- une nuance S355J0H voisine de la nuance S355J0 de la norme NF EN 10025-2 ;
- une nuance S355J2H voisine de la nuance S355J2 de la norme NF EN 10025-2 ;
- une nuance S275NH voisine de la nuance S275N de la norme NF EN 10025-3 ;
- une nuance S275NLH voisine de la nuance S275NL de la norme NF EN 10025-3 ;
- une nuance S355NH voisine de la nuance S355N de la norme NF EN 10025-3 ;
- une nuance S355NLH voisine de la nuance S355NL de la norme NF EN 10025-3 ;

- une nuance S460NH voisine de la nuance S460N de la norme NF EN 10025-3 ;
- une nuance S460NLH voisine de la nuance S460NL de la norme NF EN 10025-3 ;
- une nuance S275MH voisine de la nuance S275M de la norme NF EN 10025-4 ;
- une nuance S275MLH voisine de la nuance S275ML de la norme NF EN 10025-4 ;
- une nuance S355MH voisine de la nuance S355M de la norme NF EN 10025-4 ;
- une nuance S355MLH voisine de la nuance S355ML de la norme NF EN 10025-4 ;
- une nuance S460MH voisine de la nuance S460M de la norme NF EN 10025-4 ;
- une nuance S460MLH voisine de la nuance S460ML de la norme NF EN 10025-4.

5. Possibilités de mise en œuvre

On exige généralement que les aciers de construction métallique se prêtent aux opérations de mise en œuvre suivantes :

- formage à chaud ;
- formage à froid ;
- découpage ;
- usinage ;
- soudage.

L'utilisateur aura toujours intérêt à discuter des conditions de mise en œuvre avec son fournisseur qui pourra lui donner des indications précieuses tirées de son expérience. Lorsqu'il mettra en œuvre des produits revêtus, il devra limiter ses interventions à celles que le produit utilisé pourra tolérer ; les informations en ce domaine sont fournies par les producteurs (cf. [Doc. C2501]).

5.1 Formage à chaud

Le formage à chaud débute le plus souvent par un chauffage à haute température qui engendre une transformation structurale et modifie donc fondamentalement les propriétés mécaniques de l'acier. Si la température est trop élevée, il peut aussi provoquer un grossissement du grain néfaste pour la résistance à la rupture fragile. Une telle opération doit être suivie par un traitement thermique qui permet de redonner à l'acier ses propriétés mécaniques d'origine. Seul le traitement dit de normalisation peut être envisagé ici ; il consiste à reporter l'acier à une température peu supérieure à Ac3 (limite du domaine de stabilité de la ferrite) pour l'austénitiser en lui conférant un grain fin et à le refroidir à l'air (pour des raisons économiques on peut réaliser le refroidissement à l'air directement après formage à la condition de former l'acier à une température qui ne provoque pas un grossissement des grains d'austénite).

Une telle opération n'est possible qu'avec les aciers pour lesquels il est certain que le traitement de normalisation (ou les conditions de refroidissement après formage) permettent de retrouver leurs propriétés d'emploi et dans la mesure où la géométrie de l'élément formé à chaud le permet. Elle sera donc **limitée aux aciers livrés à l'état normalisé** soit :

- les **aciers de la norme NF EN 10025-2** : S235, S275 et S355 ;
- les **aciers de la norme NF EN 10025-3** : S275N, S355N, S420N et S460N.

Les autres nuances, à savoir :

- les aciers de la norme NF EN 10025-4 : S275M, S355M, S420M et S460M dont les propriétés ont été obtenues par laminage thermomécanique ;

- les aciers de la norme NF EN 10025-6 : S460Q, S500Q, S550Q, S620Q, S690Q, S890Q et S960Q dont les propriétés ont été obtenues par trempe et revenu ;

- les aciers de la norme NF EN 10137-3 (ces aciers étant rarement produits, la norme a été annulée) : S500A, S550A, S620A, S690A dont les propriétés ont été obtenues par précipitation ;

ne doivent pas être formés à chaud, c'est-à-dire à l'état austénitique, **car elles perdraient définitivement leurs propriétés mécaniques**. On pourra éventuellement envisager la possibilité de réaliser un formage à mi-chaud ou à tiède dans la mesure où les épaisseurs et les amplitudes de déformation le permettront.

5.2 Formage à froid

En général, le formage à froid (pliage, roulage, cintrage, filage...) des aciers de construction met en jeu des déformations relativement réduites. Les produits proposés sont généralement aptes à supporter ce mode de mise en forme (cette aptitude diminue avec l'augmentation des performances mécaniques, mais les aciers à haute limite d'élasticité restent capables de subir certaines déformations plus limitées) ; certaines normes de produits définissent leur aptitude à subir de telles déformations.

Dans tous les cas, **il est nécessaire de prendre en compte l'effet de l'écrouissage**. Après écrouissage, un acier peut durcir (à température ambiante ou mieux, à température légèrement supérieure à l'ambiante, jusqu'à 300 °C environ) et simultanément perdre de sa ductilité et de sa résistance à la rupture fragile par vieillissement. Une grande part du vieillissement est éliminée si l'azote est fixé par précipitation de nitrures stables, comme par exemple le nitrure d'aluminium (d'où l'introduction d'aluminium sous l'appellation de calmage spécial à l'aluminium). Néanmoins, la part due au carbone subsiste et doit être prise en compte. Il pourra être nécessaire (si, approximativement, l'épaisseur est supérieure à 30 mm et la déformation dépasse 5 %) de régénérer les propriétés par un traitement de restauration dont il faudra vérifier qu'il conduit bien aux propriétés d'emploi désirées sans affecter les performances du métal de base non déformé.

5.3 Découpage

Les aciers de construction métallique peuvent être découpés par :

- **cisaillage** ;
- **grignotage** ;
- **poinçonnage** ;
- **tronçonnage**.

Ces procédés provoquent des irrégularités de surface et un écrouissage localisé des bords. Souvent, si ces défauts posent problème, on procède au parachèvement des coupes par meulage (ou alésage pour les trous poinçonnés).

Mais ces aciers peuvent aussi subir un **coupage thermique**. Celui-ci peut être réalisé dans deux conditions différentes :

- avec combustion localisée du fer préalablement porté à haute température ; le préchauffage est assuré par une flamme de chauffe alimentée avec un combustible qui peut être de l'acétylène, du propane ou des gaz de synthèse, mais le comburant est toujours de l'oxygène. La combustion du fer se fait dans un jet d'oxygène pur. L'opération est réalisée en continu avec un chalumeau coupeur positionné manuellement ou avec des équipements plus ou moins automatisés. Il peut être nécessaire (surtout en présence de sollicitations de fatigue) de procéder, après **oxycoupage**, à une finition des bords (meulage, usinage) ;

- par simple fusion du métal à l'aide d'une source d'énergie localisée qui peut être une torche à **plasma** (d'arc), un **faisceau laser**. Un courant gazeux chasse alors le métal fondu.

5.4 Usinage

Les aciers de construction métallique sont généralement usinables par les procédés traditionnels : rabotage, meulage, fraisage, perçage... Il faut simplement noter que l'**usinabilité de ces aciers varie** :

- **beaucoup avec leur teneur en soufre** ; plus la teneur en soufre est élevée, plus l'acier est facile à usiner ;
- **sensiblement avec le niveau de leurs performances mécaniques**, l'usinabilité décroît quand la résistance à la traction et la dureté augmentent.

5.5 Soudage

Nota : le lecteur consultera utilement les références [4] [5] [6] et [7] sur ce sujet.

Les aciers de construction métallique sont généralement aptes à être mis en œuvre par soudage.

La définition de la soudabilité de ces aciers est complexe car c'est une propriété qualitative appréciée à l'aide de critères différents selon les réalisations envisagées ; elle met en jeu de nombreux paramètres, l'acier n'étant que l'un d'entre eux. **La soudabilité ne fait donc pas l'objet de garanties spécifiques**, mais les producteurs mettent à la disposition des utilisateurs les informations nécessaires à la bonne réalisation des opérations de soudage, afin d'assurer l'intégrité de l'assemblage, intégrité indispensable pour éviter tout risque de ruine par fissuration et rupture à partir de défauts. Les plus nocifs parmi ceux-ci peuvent être :

- géométriques et ils relèvent alors des règles de conception et de la pratique opératoire et du respect de ce qu'il est habituel d'appeler le « code de bonne pratique » ;
- métallurgiques et l'on distingue alors les fissures à chaud, les fissures par arrachement lamellaire et les fissures à froid.

5.5.1 Fissuration à chaud

Les fissures à chaud sont des fissures longitudinales du cordon de soudure qui apparaissent le plus souvent dans le métal fondu et dont la présence est liée à la composition chimique de celui-ci. En général on recommande d'avoir les compositions (en masse) suivantes :

- $S < 0,04 \%$;
- $P < 0,04 \%$;
- $Mn/S > 20 \%$,

conditions auxquelles les aciers décrits ici satisfont pratiquement. Par ailleurs, il est conseillé de conserver au rapport largeur sur profondeur de gorge du cordon une valeur assez élevée (supérieure à 0,7 par exemple en soudage sous flux solide).

5.5.2 Arrachement lamellaire

Les fissures par arrachement lamellaire se produisent parallèlement à la peau d'un produit laminé, au droit d'un assemblage sollicitant le matériau dans le sens de son épaisseur. Leur présence est liée à l'existence, dans le métal de base, de ségrégations et d'inclusions de sulfures déformées par le laminage. Ce processus de fissuration est donc une conséquence directe de l'état (structural et inclusionnaire) de l'acier ; ce n'est pas un défaut de soudage, lequel n'intervient que pour solidariser des pièces dont l'assemblage va conduire à solliciter l'acier dans le sens de son travers court.

Le choix judicieux du tracé des joints, de leur préparation, du métal d'apport, des séquences de soudage et la maîtrise du bridage peuvent aider à limiter les risques d'arrachement lamellaire mais c'est surtout le choix d'un acier possédant un niveau garanti de duc-

tilité dans le sens de l'épaisseur qui va permettre d'éviter le risque d'une telle fissuration.

La norme NF EN 10164 « *Aciers de construction à caractéristiques de déformation améliorées dans le sens perpendiculaire à la surface du produit* » (qui a remplacé la norme NF A 36-202) définit les caractéristiques complémentaires que doivent posséder les produits en acier pour mieux résister à l'arrachement lamellaire ; ces exigences sont relatives à la striction mesurée sur une éprouvette prélevée dans le sens de l'épaisseur. Elle s'applique aux tôles, plats, larges-plats et profilés d'épaisseur comprise entre 15 et 250 mm, en aciers de construction métallique dont la limite d'élasticité garantie n'est pas supérieure à 500 N/mm² (soit ici les nuances S235, S275, S355, S275N, S355N, S420N, S460N, S275M, S355M, S420N, S460N, S460Q, S500Q et S500A).

Cette norme NF EN 10164 propose trois classes de qualité (qualité qui n'a rien à voir avec la qualité qui assure la résistance à la rupture fragile) caractérisées par des niveaux minima de striction sur éprouvettes prélevées dans le sens de l'épaisseur (tableau 24).

Tableau 24 – Définitions des qualités de la norme NF EN 10164

Qualité	Striction en sens travers court	
	Moyenne maximale de trois essais	Valeur maximale individuelle
Z15	15 %	10 %
Z25	25 %	15 %
Z35	35 %	25 %

Cette norme définit toutes les conditions de prélèvement des éprouvettes et les conditions d'essai. Elle précise aussi que :

« le risque d'arrachement lamellaire diminue quand la striction selon le travers court augmente mais il n'existe aucune relation entre les valeurs de striction selon le travers court et l'intégrité des structures car le risque de déchirement lamellaire dépend aussi de façon fondamentale du type de construction, de la conception de la soudure et de la méthode de soudage. Les valeurs minimales de striction indiquées ne sont pas à elles seules une garantie de sécurité contre le déchirement lamellaire ».

La norme européenne NF EN 1993-1-10 « *Choix des qualités d'acier* » (en cours de publication), dans le cadre de l'Eurocode 3 « *Calcul des structures en acier* », propose toutefois une méthode de choix de l'exigence relative à la valeur minimale de cette striction permettant d'éviter le risque d'arrachement lamellaire. Cette méthode définit une striction minimale Z_{Ed} caractérisant le niveau de striction nécessaire pour tenir compte des conditions de sollicitation de la zone critique où peut apparaître l'arrachement lamellaire. Cette valeur est estimée à partir de la somme de cinq facteurs :

- a_{eff} caractérisant la hauteur du cordon ;
- Z_b pour la forme et la position du cordon (essentiellement pour des cordons d'angle) ;
- Z_c relatif à l'épaisseur du produit soudé et modulable en présence de sollicitations statiques et de compression ;
- Z_d caractérisant les effets d'un bridage ;
- Z_e prenant en compte les effets d'un préchauffage au-dessus de 100 °C.

Il est posé que l'exigence de striction Z_{Rd} relative au métal de base exprimée selon la norme NF EN 10164 doit être supérieure à la valeur estimée pour Z_{Ed} (si $Z_{Ed} \leq 10 \%$ le recours à la NF EN 10164 n'est pas nécessaire). La norme NF EN 1993-1-10 donne les indications suivantes :

Valeur de Z_{Ed}	Exigence selon NF EN 10164
$\leq 10 \%$	–
11 à 20 %	Z15
21 à 30 %	Z25
$> 30 \%$	Z35

et réserve la possibilité d'introduire des adaptations nationales. Le concepteur confronté au problème de l'arrachement lamellaire doit alors vérifier si le texte national correspondant comporte de tels aménagements.

5.5.3 Fissuration à froid

La fissuration à froid est, en fait, le **défaut essentiel de soudabilité métallurgique** contre lesquels le soudeur doit se prémunir, les renseignements fournis par le producteur ont pour objet de l'aider à éviter le risque d'une telle fissuration dont les trois causes sont :

- l'introduction d'hydrogène dans le métal fondu lors du soudage ;
- la transformation de la structure métallographique du métal solide au voisinage de la ligne de fusion (ZAT : zone affectée thermiquement, ou ZAC : zone affectée par la chaleur) avec formation de martensite fragile ;
- l'existence de contraintes importantes au niveau de la soudure (retrait et bridage).

Si le soudeur ne peut qu'espérer minimiser les contraintes en intervenant sur la **conception de l'assemblage** et sur le **choix des séquences de soudage**, il doit agir sur les deux autres paramètres, c'est-à-dire :

- **limiter la teneur en hydrogène du métal fondu** à travers le choix des conditions de soudage (procédé, produit d'apport, flux et gaz éventuellement) et les précautions prises lors des opérations (préparation, propreté, faible humidité ambiante...) ;

- **limiter la quantité de martensite formée dans la ZAT** en agissant sur les conditions opératoires et notamment sur l'énergie de soudage et, éventuellement en réalisant un préchauffage. Pour aider à ce faire, les producteurs ont proposé des abaques (voir NA 36-000 [Doc. C 2 501]) du type de celui représenté sur la figure 6 qui définissent la soudabilité métallurgique d'un acier donné. Ils permettent éventuellement le choix des conditions de préchauffage si l'adoption d'une énergie de soudage assez élevée ne suffit pas à résorber le risque de fissuration à froid. Mais, dans ce cas, le soudeur doit préalablement tout faire pour réduire la teneur en hydrogène du métal fondu, mesure beaucoup plus efficace et plus facile à mettre en œuvre ;

- **limiter la fragilité de la martensite formée dans la ZAT.** Ici il s'agit essentiellement de réduire la teneur en carbone de l'acier ; les sidérurgistes ont œuvré dans ce sens en mettant au point les traitements thermomécaniques réalisés lors du laminage, évolution qui a permis de proposer les aciers S275M, S355M, S420M et S460M. Ainsi, par exemple, à limite d'élasticité garantie égale, la teneur maximale en carbone d'un acier S355K2 (état normalisé ou équivalent) est de 0,20 %, voire 0,22 %, alors que celle d'un acier S355M (état obtenu par laminage thermomécanique) est de 0,14 % (cf. article *Aciers de construction non alliés ou faiblement alliés* [M 308] dans le traité Matériaux métalliques).

Ces considérations relatives à la quantité de martensite formée en ZAT et à sa fragilité expliquent l'importance que prend, lors de la mise au point du mode opératoire de soudage, la mesure de la dureté maximale sous cordon (c'est-à-dire la dureté maximale dans la ZAT, au voisinage de la ligne de fusion). En effet cette dureté doit être confrontée à la dureté du métal de base à l'état martensitique et aux duretés prises par ce dernier dans des états martensito-bainitiques (avec plus ou moins de bainite), duretés qui, dépendent essentiellement de sa teneur en carbone (figure 7). On peut alors apprécier l'état de la partie la plus dure de la ZAT et

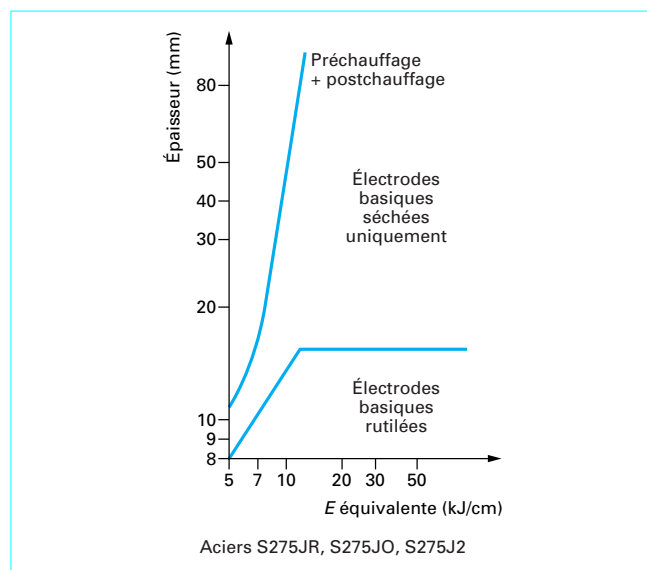


Figure 6 – Domaine de soudage

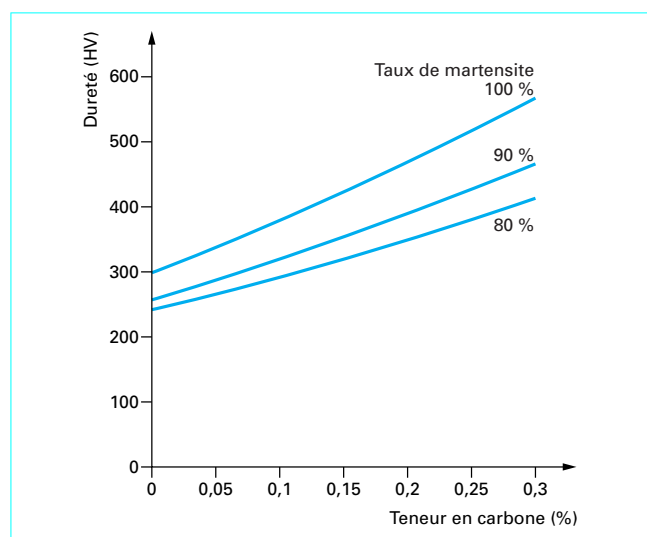


Figure 7 – Dureté des martensites et des structures martensito-bainitiques

vérifier ainsi si les objectifs relatifs à la teneur en martensite sont atteints et si les conditions de soudage ont été respectées.

Bien que la signification de ce paramètre soit très discutable, il est habituel d'apprécier l'aptitude d'un acier de construction métallique à résister à la fissuration à froid à l'aide de ce que l'on dénomme le **carbone équivalent**. Ce facteur **CEV** (anciennement désigné dans les normes par C_{eq}) calculé à l'aide de la formule préconisée par l'Institut International de la soudure (IIS) à partir de la composition chimique du métal (massique) et exprimé en % :

$$CEV = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

avec X teneur massique de l'élément X exprimée en %

fait l'objet de valeurs garanties explicitées dans les normes de produits (valeur maximale limite). Les niveaux garantis sont rappelés au tableau 25.

Tableau 25 – Niveaux de CEV garantis

Nuance	Partie de la norme NF EN 10025	CEV maximum (sur analyse de coulée) pour épaisseur e (mm)								
		$e \leq 16$	$16 < e \leq 30$	$30 < e \leq 40$	$40 < e \leq 50$	$50 < e \leq 63$	$63 < e \leq 100$	$100 < e \leq 120$	$120 < e \leq 150$	$150 < e \leq 250$
S235	2	$\leq 0,35 \%$	$\leq 0,35 \%$	$\leq 0,35 \%$	$\leq 0,38 \%$	$\leq 0,38 \%$	$\leq 0,38 \%$	$\leq 0,38 \%$	$\leq 0,38 \%$	$\leq 0,40 \%$
S275	2	$\leq 0,40 \%$	$\leq 0,40 \%$	$\leq 0,40 \%$	$\leq 0,42 \%$	$\leq 0,42 \%$	$\leq 0,42 \%$	$\leq 0,42 \%$	$\leq 0,42 \%$	$\leq 0,44 \%$
S275N	3	$\leq 0,40 \%$	$\leq 0,40 \%$	$\leq 0,40 \%$	$\leq 0,40 \%$	$\leq 0,40 \%$	$\leq 0,40 \%$	$\leq 0,42 \%$	$\leq 0,42 \%$	$\leq 0,42 \%$
S275M	4	$\leq 0,34 \%$	$\leq 0,34 \%$	$\leq 0,34 \%$	$\leq 0,35 \%$	$\leq 0,35 \%$	$\leq 0,38 \%$	$\leq 0,38 \%$	$\leq 0,38 \%$	–
S355	2	$\leq 0,45 \%$	$\leq 0,45 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,49 \%$
S355N	3	$\leq 0,43 \%$	$\leq 0,43 \%$	$\leq 0,43 \%$	$\leq 0,43 \%$	$\leq 0,43 \%$	$\leq 0,45 \%$	$\leq 0,45 \%$	$\leq 0,45 \%$	$\leq 0,45 \%$
S355M	4	$\leq 0,39 \%$	$\leq 0,39 \%$	$\leq 0,39 \%$	$\leq 0,40 \%$	$\leq 0,40 \%$	$\leq 0,45 \%$	$\leq 0,45 \%$	$\leq 0,45 \%$	–
S420N	3	$\leq 0,48 \%$	$\leq 0,48 \%$	$\leq 0,48 \%$	$\leq 0,48 \%$	$\leq 0,48 \%$	$\leq 0,50 \%$	$\leq 0,52 \%$	$\leq 0,52 \%$	$\leq 0,52 \%$
S420M	4	$\leq 0,43 \%$	$\leq 0,45 \%$	$\leq 0,45 \%$	$\leq 0,46 \%$	$\leq 0,46 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	–
S450	2	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,49 \%$	$\leq 0,49 \%$	$\leq 0,49 \%$	$\leq 0,49 \%$	$\leq 0,49 \%$	$\leq 0,49 \%$	–
S460N	3	$\leq 0,53 \%$	$\leq 0,53 \%$	$\leq 0,53 \%$	$\leq 0,53 \%$	$\leq 0,53 \%$	$\leq 0,54 \%$	$\leq 0,55 \%$	$\leq 0,55 \%$	$\leq 0,55 \%$
S460M	4	$\leq 0,45 \%$	$\leq 0,46 \%$	$\leq 0,46 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,48 \%$	$\leq 0,48 \%$	$\leq 0,48 \%$	–
S460Q	6	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,48 \%$	$\leq 0,48 \%$	$\leq 0,50 \%$	$\leq 0,50 \%$	–
S500Q	6	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,47 \%$	$\leq 0,70 \%$	$\leq 0,70 \%$	$\leq 0,70 \%$	$\leq 0,70 \%$	–
S550Q	6	$\leq 0,65 \%$	$\leq 0,65 \%$	$\leq 0,65 \%$	$\leq 0,65 \%$	$\leq 0,77 \%$	$\leq 0,77 \%$	$\leq 0,83 \%$	$\leq 0,83 \%$	–
S620Q	6	$\leq 0,65 \%$	$\leq 0,65 \%$	$\leq 0,65 \%$	$\leq 0,65 \%$	$\leq 0,77 \%$	$\leq 0,77 \%$	$\leq 0,83 \%$	$\leq 0,83 \%$	–
S690Q	6	$\leq 0,65 \%$	$\leq 0,65 \%$	$\leq 0,65 \%$	$\leq 0,65 \%$	$\leq 0,77 \%$	$\leq 0,77 \%$	$\leq 0,83 \%$	$\leq 0,83 \%$	–
S890Q	6	$\leq 0,72 \%$	$\leq 0,72 \%$	$\leq 0,72 \%$	$\leq 0,72 \%$	$\leq 0,82 \%$	$\leq 0,82 \%$	–	–	–
S960Q	6	$\leq 0,82 \%$	$\leq 0,82 \%$	$\leq 0,82 \%$	$\leq 0,82 \%$	–	–	–	–	–

Des informations publiées par l'Institut de soudure (IS) [4] et par l'Institut de recherches de la sidérurgie (IRSID) [5] permettent, à partir de la valeur du carbone équivalent d'un acier de construction métallique, de proposer des conditions de soudage qui, pour une teneur donnée en hydrogène, permettront d'éviter le risque de fissuration à froid. À titre d'exemples, le lecteur trouvera ci-joints deux abaques (figures **8a** et **b**) tirés de ces publications et relatifs à des aciers du type générique S355 (supposés avoir une limite d'élasticité de 380 N/mm²) soudés (bout à bout - chanfrein en X 90°) avec électrodes enrobées basiques étuvées ou sous flux étuvé (hydrogène diffusible 3 cm³ pour 100 g de métal fondu) ; l'un correspond à une énergie de soudage nominale de 20 kJ/cm, l'autre à 50 kJ/cm. Les traits pleins définissent les limites (en termes de valeurs maximales admissibles pour l'épaisseur et le CEV réel) au delà desquelles (vers la droite et vers le haut) divers préchauffages sont nécessaires. Les traits pointillés rappellent les valeurs limites admissible du CEV selon les normes de produits. Ces deux abaques mettent en évidence les grandes différences de soudabilité qui existent entre l'acier normalisé et l'acier qui a subi un laminage thermomécanique. Mais le constructeur ne doit pas oublier que la mesure la plus efficace et la plus pratique pour lutter contre la fissuration à froid consiste à maîtriser la teneur en hydrogène, teneur qui est le facteur prépondérant comme le montre la figure 9 relative à des aciers du type générique S355 (supposés avoir une limite d'élasticité de 380 N/mm²) soudés (bout à bout - chanfrein en X 90°) avec électrodes enrobées (EE) basiques étuvées (hydrogène diffusible 3 cm³ pour 100 g de métal fondu) ou en MAG (*Metal active gas*)

(hydrogène diffusible 1,8 cm³ pour 100 g de métal fondu) avec une énergie de soudage nominale de 20 kJ/cm. Ici encore les traits définissent les limites au-delà (vers la droite et vers le haut) desquelles un préchauffage est nécessaire et les pointillés rappellent ce que deviennent ces limites après préchauffage à 100 °C.

5.5.4 Précautions particulières si des joints soudés sont soumis à fatigue

Ce point particulier doit être pris en compte si la construction soudée doit être soumise à des sollicitations en fatigue, car sa résistance va dépendre alors essentiellement des concentrations de contraintes engendrées par la géométrie du cordon de soudure (macro et microgéométrie). Cette influence très importante impose de réaliser l'assemblage avec [6] :

- un cordon présentant un angle de raccordement faible ;
- des défauts petits et en faible nombre ;
- des contraintes résiduelles faibles.

Pour obtenir le meilleur comportement il sera, par ailleurs, judicieux de mettre en œuvre :

- des **procédures d'amélioration de la géométrie du joint** (parachèvement du joint) par :
 - meulage du pied de cordon,
 - refusion TIG (*tungsten inert-gas*) du pied de cordon,
 - refusion plasma du pied de cordon ;

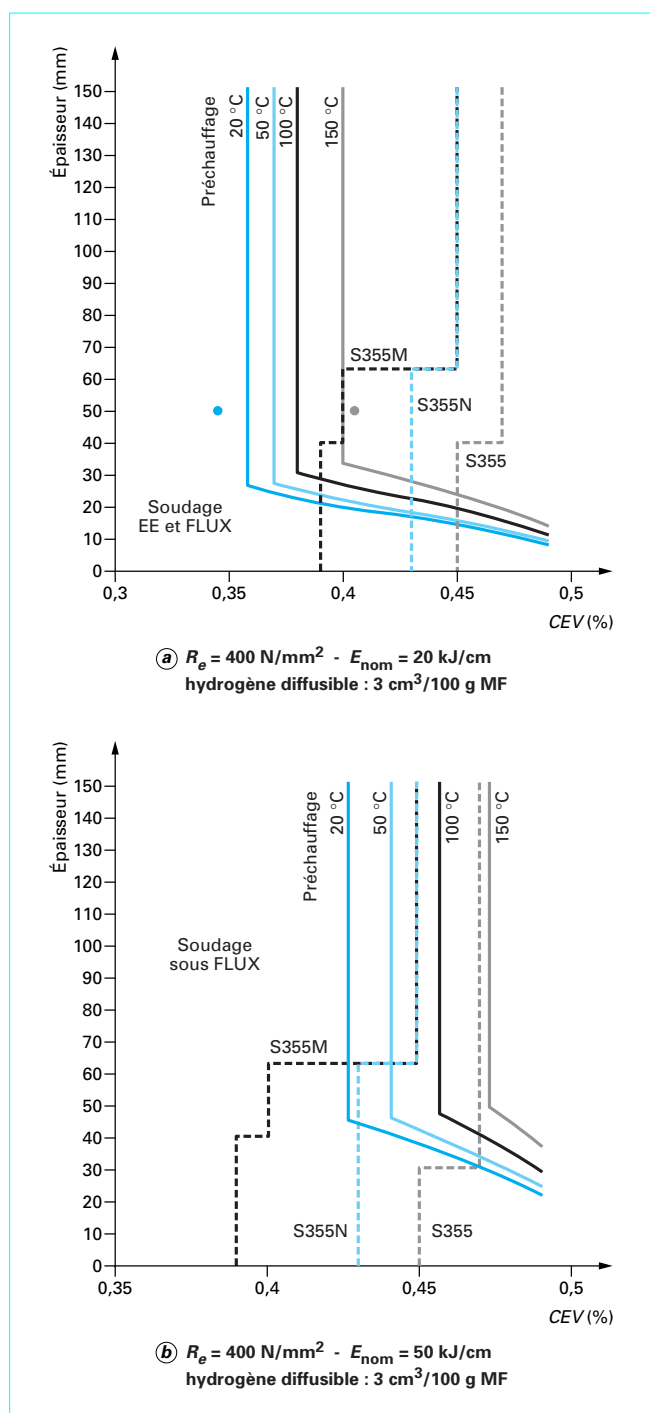


Figure 8 – Domaine de soudage des aciers de type S355 ($R_e = 400 \text{ N/mm}^2$) avec un hydrogène diffusible de $3 \text{ cm}^3/100 \text{ g MF}$

— ou des procédures d'introduction de contraintes résiduelles de compression (qui sont alors favorables) par :

- grenaillage de précontrainte,
- martelage.

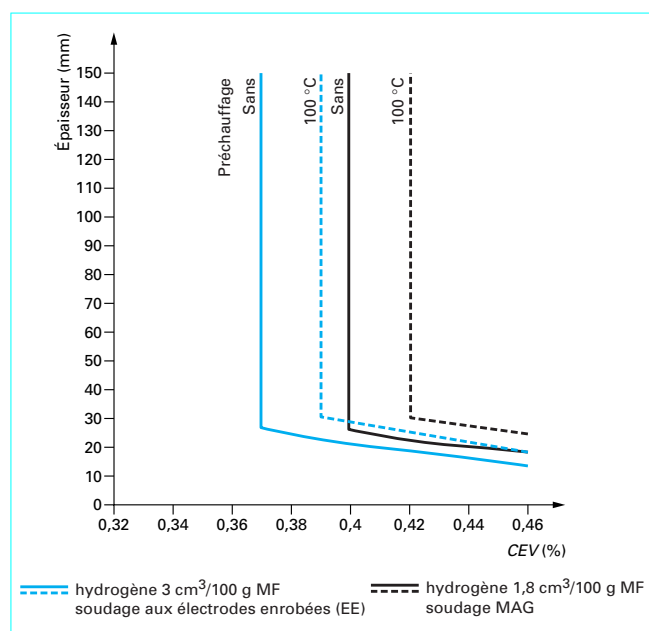


Figure 9 – Domaine de soudage d'un acier S355 ($R_e = 380 \text{ N/mm}^2$, $E_{\text{nom}} = 20 \text{ kJ/cm}$) avec deux teneurs en hydrogène diffusible

6. Choix d'un acier de construction métallique

■ Choix de la nuance

La nuance caractérise les performances de résistance. Suivant les conditions de calcul des sections, on cherchera à obtenir le meilleur rapport qualité/prix en retenant la section dont le coût CP (avec C coût au kilogramme et P masse linéique, en kilogramme) est le plus bas. Les nuances plus performantes ont un coût au kilogramme plus élevé, mais nécessitent un poids au mètre moindre. Ainsi, les nuances à haute résistance (S420 par exemple) seront souvent plus avantageuses tant que n'interviendra que la condition de résistance imposant que la contrainte ne dépasse pas le niveau de la limite d'élasticité, le coût au kilogramme augmentant moins vite que la limite d'élasticité.

Dans le cadre des possibilités de fourniture d'un produit, le choix de la nuance d'acier se fait essentiellement en fonction du taux de travail (sans oublier des sollicitations éventuelles de fatigue) qui, affecté par le coefficient de sécurité, détermine le niveau que doit atteindre la limite d'élasticité (ou parfois la résistance à la traction). Il peut être intéressant d'examiner si l'adoption d'un taux de travail plus élevé peut permettre d'alléger la construction en utilisant un acier à plus haute limite d'élasticité dans la mesure où certains points tels l'amplitude des déformations élastiques (sachant que le module d'élasticité qui détermine les déformations dans le domaine élastique reste identique – $210\,000 \text{ N/mm}^2$ – pour tous les aciers de construction métallique) ou la stabilité élastique (flambement...) ne deviennent pas critiques. Le choix se fera donc, tout d'abord, en fonction du niveau de limite d'élasticité visé et ceci entre les aciers définis par les normes déjà décrites (voir § 4). L'utilisation d'aciers à haute limite d'élasticité ne pose pas toujours un problème de soudabilité car ces aciers, lorsqu'ils sont microalliés (Nb, V) ou trempés et revenus, ont (voir § 4) des soudabilités meilleures que celles d'aciers au carbone manganèse de même limite d'élasticité (c'est le cas par exemple de l'acier S355ML par rapport à l'acier S355K2).

Il faudra, ensuite, prendre en compte la **résistance à la rupture fragile**, si la construction doit travailler à des températures inférieures à la température ambiante. On en vient alors au problème dit du « **choix de la qualité** ».

Éventuellement, il sera nécessaire de prendre en compte :

- un risque d'arrachement lamellaire (si la forme des assemblages et les conditions de sollicitation peuvent l'engendrer) (voir § 5.5.2) ;
- la tenue à des températures supérieures à l'ambiante ;
- la tenue à la corrosion atmosphérique ; il sera possible d'utiliser les aciers définis par la norme NF EN 10025-5 si les conditions satisfont aux recommandations de la norme, mais il faudra surtout envisager l'application d'une protection adaptée (voir § 3.5) et, en ultime recours ou si se pose un problème d'aspect, on pourra recourir aux aciers inoxydables après consultation d'un spécialiste (cf. [Doc. C 2 501]) ;
- la résistance à la fatigue, mais alors on devra surtout examiner la tenue des assemblages.

D'autres conditions doivent aussi intervenir dans ce **calcul économique** :

- les moyens d'assemblage disponibles et le coût des assemblages ;
- les liaisons avec d'autres composants du bâtiment, qui peuvent mieux s'accommoder de sections plus importantes ;
- les gains sur les encombrements, qui peuvent conduire à des économies sur le coût global de la construction (par exemple, gain de surface de façades coûteuses par une réduction de hauteur des planchers) ou produire des gains sur l'exploitation (augmentation des surfaces utiles et des volumes libres) ;
- les conditions d'aspect, qui peuvent inciter l'architecte à préférer des sections ou des hauteurs de profils réduites, ou au contraire plus grandes dans un bâtiment à étages ; on pourra trouver intérêt à utiliser l'acier S355 aux étages inférieurs, puis S235 au-dessus, en conservant une même hauteur de profil ;
- l'intérêt d'un allègement du poids propre, mais celui de l'ossature métallique intervient peu en général ;
- la massivité (rapport de la surface exposée aux flammes dans un incendie au volume d'acier d'une pièce d'ossature) a une influence importante sur la stabilité au feu (cf. article *Sécurité contre l'incendie dans la construction métallique* [C 2 506] dans ce traité) ; une massivité plus grande peut conduire à des économies sur les protections.

On trouve parfois intérêt à utiliser dans un même composant des parties constituées d'aciers de nuances différentes (**composants hybrides**) : par exemple, poutres à semelles en acier S355 et âmes en S235 (on admet alors une plastification possible de l'âme au voisinage de la semelle, pour certains cas de charges extrêmes pondérées). Cette possibilité de combiner plusieurs nuances ne doit pas être exclue ; les soudabilités le permettent.

Enfin, certaines pièces soumises à la traction (tirants, suspentes) ou à une pression superficielle élevée (grains ou axes d'appareils d'appui...) pourront être réalisées avantageusement dans des aciers de construction mécanique capables de performances plus élevées que les aciers de construction métalliques. Le constructeur devra alors respecter les particularités de mise en œuvre de ces aciers.

■ Choix de la qualité

Si la construction doit travailler à des températures inférieures à la température ambiante, le choix de la nuance doit être complété par celui de la « **qualité** » qui tient compte du risque de rupture fragile. Le critère habituellement retenu pour caractériser le degré de résistance à la rupture fragile d'un acier est la **température de transition de la résilience**, c'est-à-dire, généralement, la température à laquelle l'énergie de rupture KV en flexion par choc (sur éprouvette à entaille en V) est garantie être au moins égale à 27 J. Pour choisir la qualité et donc pour définir ce que doit être cette température, il faut la déduire de l'indication de la température minimale de service. Pour ce faire, le concepteur a à sa disposition deux documents :

— dans le cadre de l'Eurocode 3 « *Calcul des structures en acier* », la norme NF EN 1993-1-10 « *Choix des qualités d'acier* » qui propose une méthode de sélection du matériau susceptible de résister à la rupture fragile dans les conditions de service prévues ;

— le fascicule de documentation FD A 36-010 « *Choix des qualités d'aciers pour construction métallique ou chaudronnée vis-à-vis du risque de rupture fragile* ».

Les deux méthodes prennent en compte les paramètres importants que sont :

- l'épaisseur ;
- la limite d'élasticité ;
- les sollicitations ;
- la vitesse d'application des charges ;
- un écrouissage éventuel.

● Informations sur la méthode proposée par la norme NF EN 1993-1-10

En 2003, le projet de norme est adopté ; les versions nationales qui lui seront conformes devront comporter des annexes nationales qui définiront certains paramètres. Dans ces conditions, le concepteur confronté au problème du choix de la qualité devra alors prendre en compte ces compléments (la norme propose des valeurs pratiques permettant son utilisation en l'absence de ces annexes nationales).

La norme propose (tableau 2-1), pour les nuances les plus courantes (S235, S275, S355, S420, S460 et S690), des valeurs maximales admissibles pour l'épaisseur des produits travaillant dans des conditions standards à des températures comprises entre 10 °C et -50 °C et, ceci, en fonction de la nuance et de la qualité des aciers ainsi que du niveau de sollicitation. Il est précisé que ces données ne sont utilisables que pour :

- la réalisation d'une construction neuve ;
- les produits plats, les profils creux, les tubes soudés et les produits minces laminés à froid ;
- les éléments soudés ;
- les éléments soumis à des sollicitations de traction ;
- les éléments soumis à des cycles de fatigue comportant un temps de mise en traction.

La figure 10 reprend, à titre d'information, certaines données contenues dans le tableau 2-1 et relatives à la nuance S355.

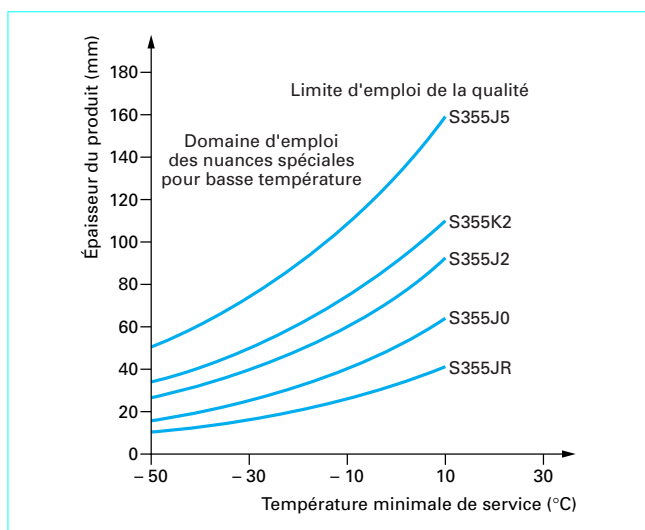


Figure 10 – Épaisseurs maximales admissibles selon les différentes qualités de la nuance S355 employée à basses températures sous une contrainte égale à 75 % de R_{eH}

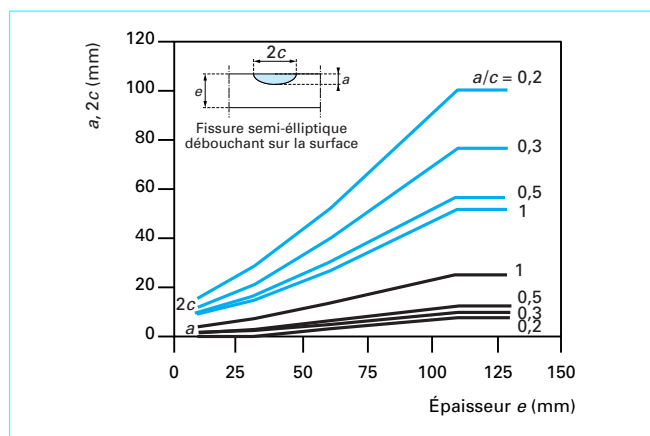


Figure 11 – Variation avec l'épaisseur du produit de la profondeur a et de la longueur $2c$ des défauts superficiels semi-elliptiques admissibles pour différentes formes de ceux-ci
(d'après Courrier technique OTUA n° 50)

● Rappel de la méthode sur le choix des qualités d'aciers

Cette méthode (fascicule de documentation A 36-010) établie à partir d'études réalisées à l'IRSID et mise au point avec la collaboration d'experts de la sidérurgie française, du Bureau Veritas et du Bureau de normalisation de la sidérurgie est décrite dans le document FD A 36-010 publié en mai 1980. Elle s'applique aux aciers destinés à la construction métallique dont la limite d'élasticité minimale garantie est comprise entre 235 et 690 N/mm².

Le document est établi en postulant la présence de défauts (toujours susceptibles d'être présents dans une construction) ; les dimensions maximales de ces défauts sont rappelées dans les figures suivantes qui concernent, d'une part le métal de base (figure 11) et, d'autre part, le joint soudé (figures 12 et 13), cas dans lequel ces dimensions maximales sont réduites pour tenir compte de l'altération des propriétés du métal de base dans la zone affectée par la chaleur.

Dans ces conditions le document propose une relation entre la température minimale de service T (en °C) et les différents paramètres du risque de rupture fragile :

- la température de transition T_{28J} (en °C) (température la plus basse à laquelle l'énergie de rupture par choc d'une éprouvette entaillée en V n'est pas inférieure à 28 J) ;
- la limite d'élasticité minimale garantie R_e (en N/mm²) (dans la suite de ce texte il a été tenu compte de ce que le fascicule de documentation FD A 36-010 désigne par R_e la limite d'élasticité garantie majorée de 50 N/mm²) ;
- l'épaisseur e (en mm) ;
- le type de sollicitation (ϵ' = vitesse de déformation rationnelle dans le domaine élastique) : statiques ($\epsilon' = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), lentes ($\epsilon' = 10^{-1} \text{ s}^{-1}$), dynamiques ($\epsilon' = 10 \text{ s}^{-1}$) ;
- le niveau de sollicitation par rapport à la limite d'élasticité exprimé par la valeur du rapport r_s = sollicitation / R_{eH} ;
- éventuellement l'état d'écrouissage du métal à travers son taux d'écrouissage n (réduction relative de la section du produit exprimée en pourcentage) supposé ne pas dépasser 10.

Pour utiliser cette relation, on doit préalablement calculer les quatre termes suivants (par rapport au texte du FD A 36-010 l'écriture des formules a été modifiée pour simplifier la tâche du calculateur) :

- $f(R_{eH}) = 70 \ln [(R_{eH} - 50)/360]$;
- T_e défini par :
 $T_e = 0$ pour $e \geq 110$ mm,

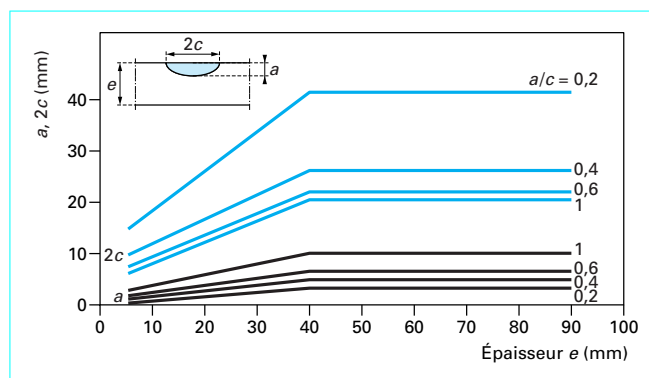


Figure 12 – Dimensions maximales du défaut superficiel semi-elliptique dans le joint soudé en fonction de l'épaisseur
(d'après Courrier technique OTUA n° 50)

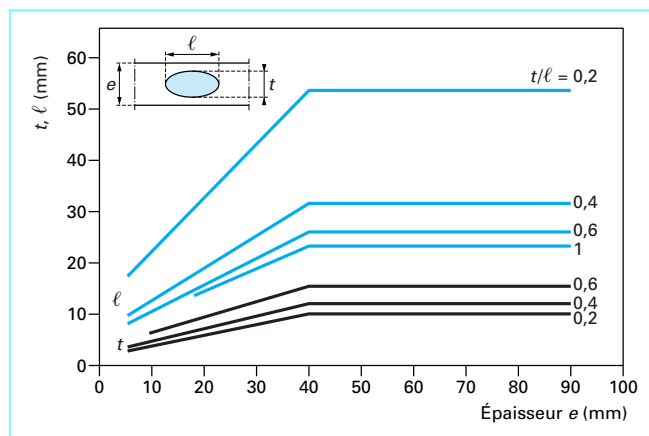


Figure 13 – Dimensions maximales du défaut interne elliptique centré à mi-épaisseur acceptable dans le joint en fonction de l'épaisseur (d'après Courrier technique OTUA n° 50)

$$T_e = 59 - 0,53 e \text{ pour } 60 \text{ mm} \leq e \leq 110 \text{ mm},$$

$$T_e = 85 - 0,97 e \text{ pour } 30 \text{ mm} \leq e \leq 60 \text{ mm},$$

$$T_e = 110 - 1,8 e \text{ pour } 10 \text{ mm} \leq e \leq 30 \text{ mm} ;$$

• T_v :

$$T_v = 17 - (0,017 R_e) \text{ si les sollicitations sont statiques,}$$

$$T_v = 53 - (0,054 R_e) \text{ si les sollicitations sont lentes,}$$

$$T_v = 117 - (0,118 R_e) \text{ si les sollicitations sont dynamiques ;}$$

• T_c défini par :

$$T_c = 0 \text{ pour } 0,85 \leq r_s < 1,$$

$$T_c = 10 \text{ pour } 0,70 \leq r_s < 0,85 ; T_c = 20 \text{ pour } 0,60 \leq r_s < 0,70,$$

$$T_c = 30 \text{ pour } 0,50 \leq r_s < 0,60 ; T_c = 40 \text{ pour } 0,40 \leq r_s < 0,50,$$

$$T_c = 50 \text{ pour } 0,35 \leq r_s < 0,40 ; T_c = 60 \text{ pour } 0,30 \leq r_s < 0,35 ;$$

• éventuellement : $T_{ecr} = 7 n$ avec n taux d'écrouissage (en %).

Ensuite on peut alors écrire, pour un acier :

— si l'on souhaite déterminer la température minimale de service T_s (en °C) : $T_s = 25 + 1,4 T_{28J} + f(R_{eH}) - T_e + T_v - T_c + T_{ecr}$;

— si l'on souhaite déterminer ce que doit être la température de transition TK_{28} (en °C) maximale au niveau 28 J sur éprouvette à entaille en V : $TK_{28J} = [T_s - 25 - f(R_{eH}) + T_e - T_v + T_c - T_{ecr}]/1,4$.