

**MA1 – COURS DE  
CHARPENTES METALLIQUES**

**INSTITUT HEMES GRAMME**

**Ir. Jacques Dehard  
Professeur**

# **MA1 – COURS DE CHARPENTES METALLIQUES**

---

## **LES ACIERS DE STRUCTURE**

---

**INSTITUT HEMES GRAMME**

**Ir. Jacques Dehard  
Professeur**

# 1. Familles de produits

## 1.1 Les produits plats

La famille des produits plats regroupe :

- les tôles et larges plats laminés à chaud, en feuilles ou bobines, d'une épaisseur comprise entre 3 et 20mm et d'une largeur limitée à 1,8m. Elles servent à la fabrication des charpentes, des PRS (profils reconstitués par soudure), de biens d'équipement (chaudronnerie), ...et des profils creux (ou tubes). Ces derniers sont fabriqués à partir de tôles pliées dans le sens de la longueur et soudées longitudinalement, ont une longueur de 6 à 15m et un diamètre maximal de 400mm. Les tubes de sections carrée, rectangulaire, hexagonale, elliptique, sont, en général, formés au départ de tubes ronds.

- les plaques laminées à chaud, d'une épaisseur supérieure à 20 mm pouvant aller jusqu'à 400 mm, et d'une largeur maximale de 5,2m. Elles sont utilisées pour la fabrication de biens d'équipements (navires, plates-formes offshore, tubes des oléoducs), la grosse chaudronnerie, la charpente lourde (PRS) et les ouvrages d'art (ponts, passerelles).

Dans cette famille de produits plats, sont également classées les tôles d'épaisseur variable utilisées dans les ouvrages d'art (avantage : moins de joints soudés, notamment entre tôles d'épaisseurs différentes et pour l'empilage de plats renforts).

- les tôles minces laminées à froid d'une épaisseur inférieure ou égale à 3 mm, souvent galvanisées et revêtues, disponibles sous la forme de feuilles ou de bobines. Leurs utilisations sont très nombreuses, particulièrement pour la fabrication de biens de consommation (automobiles, emballages, électroménager), et pour le bâtiment sous la forme de tôles nervurées et de profilés minces.

Les tôles nervurées sont obtenues par profilage à froid (machine à galets) de tôles minces et sont utilisées pour les bardages, toitures, planchers, panneaux sandwich, ...

Les profilés minces sont obtenus par profilage ou pliage à froid de tôles d'épaisseur inférieure à 5mm et ont des sections en formes de C, U, Z, Sigma. Ils sont utilisés dans les ossatures légères : pannes, lisses, charpentes légères, stands, cloisons, faux-plafonds, ....

## 1.2 Les produits longs

La famille des produits longs laminés à chaud regroupe :

- les poutrelles de la série des « I » : IPN (h=80 à 600mm), IPE (h=80 à 750mm),  
de la série des « U » : UPN, UAP, UPE (h=80 à 400mm),  
de la série des « H » : HEA, HEB, HEM, HL, HD, HP (h=100 à 1100mm).

Leur longueur varie de 18 à 33m selon le profil.

Il existe aussi des demi-poutrelles (provenant du découpage de I ou de H) et des poutrelles dissymétriques dont la semelle inférieure, plus large, sert d'appui au plancher.

- les laminés marchands qui comprennent une large variété de produits de petites sections : barres de sections pleines (ronde, carrée, hexagonale), plats, fers « T », petits « U », cornières (à branches égales ou inégales), ....

- les rails, palplanches,  fils machine, ronds à béton. Il existe aussi des tubes extrudés sans soudure (plus fortes épaisseurs).

Les produits longs sont utilisés dans tous les secteurs industriels, mais particulièrement dans la construction métallique et dans l'industrie mécanique.

### Profilés classiques

Poutrelles IPE	Poutrelles IPN	Poutrelles H	Poutrelles U (ailes droites)	Poutrelles U (ailes inclinées)
				
IPE 80 à 600 ; 750 IPE A 80 à 600 IPE O 180 à 600 IPE R 140 à 600	IPN 80 à 500 ; 550	HEA HEB HEM HEC 300 HEAA 100 à 1100 HL 1000 & 1100 HD 260 à 400 HP 220 à 400	UAP 80 à 300 UAP-A 250 & 300	UPN 80 à 400 UPN-A 240 à 400

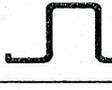
### Profils creux

	Profils creux ronds	8 × 1 à 508 × 17
	Profils creux carrés	8 × 1 à 400 × 17
	Profils creux rectangulaires	12 × 8 × 1 à 500 × 300 × 17

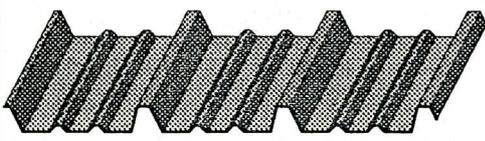
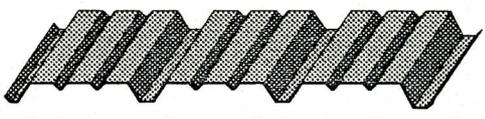
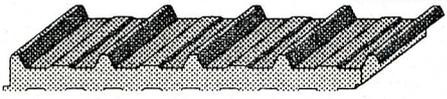
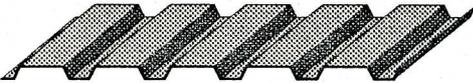
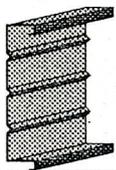
### Fers « marchands »

	Cornières à ailes égales	20 × 20 × 3 à 200 × 200 × 24
	Cornières à ailes inégales	30 × 20 × 3 à 200 × 100 × 14
	Petits fers U	30 × 15 × 3 à 70 × 40 × 6
	T égaux à congés	25 × 25 × 3 à 80 × 80 × 9
	Plats d'usage général	16 × 5 à 150 × 10
	Ronds d'usage général	Ø 12 à 250
	Carrés d'usage général	8 à 90
	Hexagones	sur plat 8 à 24

### Profils minces

	Cornières à ailes égales	15 × 1,5 à 100 × 5
	Cornières à ailes inégales	20 × 15 × 2 à 100 × 50 × 5
	Coulisses	11 × 30 à 200 × 80 épaisseurs 2 à 6
	Profilsés C	30 × 11,5 × 2 à 140 × 50 × 3
	Profilsés Omégas	17 × 25 × 12 × 1,5 à 70 × 38 × 30 × 4
	Profilsés Sigma	200 à 360 épaisseurs 1 à 3,5
	Profilsés Zed	120 à 250 épaisseurs de 1 à 5

## Tôles nervurées

	Couverture sèche
	Support d'étanchéité (étanchéité rapportée)
	Panneau isolant sandwich (couverture)
	Bardage
	Plateau (parement pour bardage double peau)
	Panneau isolant sandwich (pour bardage)

## 2. Caractéristiques des aciers de structure

### 2.1 Procédé d'élaboration de l'acier

On distingue les aciers dits « aciers au carbone » des aciers « inoxydables » (aciers rendus passifs, c'est-à-dire insensibles à la corrosion dans la masse par addition de pourcentages importants de chrome, nickel et molybdène). L'acier au carbone est fabriqué par l'une des deux grandes filières de production que sont :

- la filière « fonte et aciérie à l'oxygène »,
- la filière « ferrailles et four électrique ».

Dans les deux cas, l'acier est mis en nuance dans une station d'affinage.

L'acier inoxydable (non envisagés dans ces notes) est, quant à lui, produit uniquement à partir de la filière électrique.

L'acier effervescent n'est plus admis, et en ce qui concerne la désoxydation, certaines nuances exigent que l'acier soit complètement « calmé » par addition d'éléments de désoxydation tels que silicium et manganèse.

### 2.2 Composition chimique des aciers

Les aciers de construction contiennent de 0,1 à 1% de carbone en fonction des propriétés recherchées, et, selon les cas, des éléments d'addition tels que manganèse, nickel, chrome, molybdène, titane, tungstène (augmentation des caractéristiques mécaniques), cuivre (contre la corrosion), silicium (désoxydation), aluminium (affinage du grain) ...

Ils contiennent également une faible proportion d'azote résiduel, du soufre et du phosphore (impuretés résiduelles défavorables aux caractéristiques mécaniques et à la soudabilité).

En fonction de ses composants lors de la mise en nuance et des traitements thermiques subis par les alliages lors de leur élaboration, l'acier aura des propriétés mécaniques et technologiques variables.

D'une manière générale, on peut dire qu'en augmentant la teneur en carbone ou la teneur en éléments d'alliages, on augmente les caractéristiques de résistance des aciers, mais on nuit à leur soudabilité (par effet de trempe plus ou moins actif en fonction des produits) !

## 2.3 Etats de livraison des aciers

On distingue :

- l'acier à l'état brut de laminage (AR);
- l'acier à l'état normalisé (N), qui a subi, après laminage et retour à la température ambiante, un traitement thermique complet de normalisation, ou, qui a subi une procédure de laminage normalisant.  
La normalisation consiste en un chauffage jusqu'au domaine austénitique et un refroidissement à l'air libre (d'autant plus lent que le produit est épais) afin d'obtenir un acier à structure « ferrito-perlitique » plus fine. L'affinage du grain augmente, en effet, la soudabilité des aciers.  
Le laminage normalisant est une procédure de laminage à chaud, dans laquelle, la variation de la température et de la déformation dans le temps, est contrôlée. La déformation finale est effectuée dans une gamme de températures telle que l'austénite se recristallise complètement, conduisant lors du refroidissement à un matériau de structure « perlite fine » (condition équivalente à celle obtenue après normalisation) ;
- l'acier thermomécanique (M), qui a subi une procédure de laminage et de refroidissement à des températures et des conditions bien précises. La déformation finale est effectuée dans une gamme de températures qui permet un affinage des grains d'austénite (avant transformation) par écrouissage et recristallisation. Le laminage est suivi, en fonction de l'épaisseur et de la forme des produits, d'un refroidissement à l'air calme, d'un refroidissement accéléré ou d'une trempe superficielle suivie d'un auto-revenu, dont les transformations structurales conduisent à une « ferrite-perlite fine ». Les propriétés d'un acier thermomécanique ne peuvent être obtenues ni conservées par un traitement thermique seul.
- l'acier à l'état trempe et revenu (Q) qui, après laminage et retour à la température ambiante, a été réchauffé à une température légèrement supérieure à la température de normalisation, et ensuite, a subi un traitement complet de trempe et de revenu, ou qui, après un laminage adapté, a subi une trempe directe suivi d'un revenu. On obtient ainsi des aciers à hautes résistances.

Ces différents procédés de fabrication ne mettent pas en jeu les mêmes mécanismes de durcissement (qui confèrent à l'acier ses performances de résistance) et, de ce fait, n'exploitent pas la présence du carbone et des éléments d'alliages avec la même efficacité. Ainsi, à performances mécaniques identiques, les aciers N sont les plus riches en carbone, les aciers Q sont les plus pauvres en carbone et les aciers M ont, en général, des teneurs en carbone intermédiaires.

A analyse donnée, les aciers M ont des caractéristiques mécaniques plus élevées que les aciers N ainsi qu'une composition chimique moins chargée (moins d'éléments d'alliage) à caractéristiques mécaniques données.

Les aciers M, contrairement aux matériaux N, ne sont pas aptes à des traitements thermiques ultérieurs (sauf détensionnement) ou à des déformations à chaud (1100°). Le traitement à haute température des aciers M conduit à un abaissement de leur résistance.

## 2.4 Références normatives

Les normes de référence, générales et pour les aciers de structure, suivantes, sont d'application :

EN 1090 Exécution des structures en acier ;

EN ISO 12944 Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture ;

EN 1461 Revêtements par galvanisation à chaud sur produits finis ferreux ;

EN 10025 Produits laminés à chaud en acier de construction (non allié, soudable à grains fins, résistant à la corrosion, trempé-revenu (haute limite élastique) ;

EN 10164 Aciers de construction à caractéristiques de déformation améliorées dans le sens perpendiculaire à la surface du produit ;

EN 10210 Profils creux pour la construction finis à chaud ;

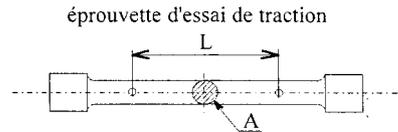
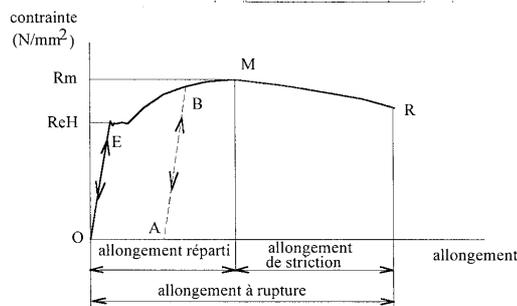
EN 10219 Profils creux pour la construction formés à froid.

## 2.5 Propriétés mécaniques des aciers de structure

### 2.5.1 Limite élastique et Résistance à la traction

Les valeurs nominales de la limite d'élasticité  $f_y$  (correspondant à la limite supérieure d'écoulement  $R_{eH}$ ) et de la résistance à la traction  $f_u$  (correspondant à la résistance maximale  $R_m$ ), selon le type d'acier, sont fournies plus loin dans des tableaux extraits des normes sur les produits évoquées ci-avant.

Il est important de noter que les valeurs requises dépendent de l'épaisseur du matériau. En fait, la limite élastique  $f_y$  et la résistance à la traction  $f_u$  décroissent quand l'épaisseur augmente, ce qui peut être expliqué par le fait que, pour un matériau plus épais, l'affinage du grain durant le laminage est moindre (nombre de passes de laminage moindre et conditions de refroidissement différentes).



## 2.5.2 Ductilité

Pour les aciers de structure, il est exigé une **ductilité minimale** exprimée en termes de limites comme suit :

- le **rapport  $f_u/f_y$**  (résistance à la traction minimale spécifiée  $f_u$  sur la limite d'élasticité minimale spécifiée  $f_y$ ) :  $\geq 1,10$  ;
  - l'**allongement à la rupture** sur une longueur calibrée de l'éprouvette de  $5,65\sqrt{A_0}$  (où  $A_0$  est l'aire de section transversale initiale) : **supérieur ou égal à 15%** ;
  - la **déformation ultime  $\epsilon_u$**  (correspond à la résistance à la traction  $f_u$ ) :  $\geq 15\epsilon_y$ , où  $\epsilon_y$  est la déformation élastique =  $f_y/E$ ;
- En règle générale, les aciers conformes à l'une des nuances d'acier données dans les tableaux satisfont ces exigences.

## 2.5.3 Ténacité

La **ténacité** peut se définir comme étant la **mesure de la résistance d'un acier vis à vis de la propagation brutale d'une fissure appelée rupture fragile**. Ce type de rupture se produit sans (ou après une très faible) déformation plastique. La rupture fragile peut être la conséquence, soit d'une fissure à froid de soudage dans une structure soumise à des charges statiques, soit d'une fissure de fatigue, c'est-à-dire d'une micro ou macro-fissure préexistante qui se propage sous une sollicitation de fatigue.

La **ténacité d'un acier est caractérisée de manière conventionnelle par sa résilience**, c'est-à-dire la **valeur de l'énergie de rupture par choc d'une éprouvette entaillée** (essai de résilience ou de flexion par choc sur éprouvette Charpy). C'est donc cette mesure conventionnelle d'énergie (en Joules) qui servira à apprécier le niveau de résistance d'un acier à la rupture fragile. La **température de l'essai** est une donnée importante car la **résilience diminue lorsque la température descend**, au travers d'une **zone de transition** de températures s'étendant entre un domaine où la rupture est ductile (valeur importante de l'énergie de rupture) et un domaine de rupture fragile (valeur très faible de l'énergie de rupture). Les niveaux de résilience donnés à une température déterminée qui figurent dans les normes sur les aciers, sont des valeurs repères, permettant de vérifier que la zone de transition évoquée ci-dessus se situe, par rapport aux températures, en deçà des limites imposées. Ces températures dites **de transition** sont des repères, plus elles sont basses, plus l'acier sera résistant à la rupture fragile.

**Tout acier doit donc posséder une ténacité à la rupture suffisante pour éviter la rupture fragile des éléments en traction à la température de service la plus basse** attendue au cours de la durée de vie prévue de la structure ( $-20^\circ$  en Belgique).

Aucune vérification supplémentaire de la rupture fragile n'est nécessaire si les conditions données dans l'EN 1993-1-10 (choix des qualités d'acier) sont satisfaites pour la température la plus basse. Pour les composants de bâtiments en **compression**, il est recommandé de choisir une ténacité minimale appropriée selon cette même norme.

## 2.5.4 Résistance à la fatigue

Le **comportement mécanique d'un acier 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 »**. Pour estimer la résistance à la fatigue d'un acier, on détermine, en l'absence de contraintes résiduelles, sa **limite d'endurance  $\sigma_D$**  qui, pour un type de sollicitation donné et pour une contrainte moyenne  $\sigma_m$  fixée, est la valeur limite vers laquelle tend l'amplitude de contrainte  $\sigma_a$  lorsque le nombre de cycles à la rupture devient très grand (pour les aciers souvent  $2.10^8$  cycles). Pratiquement on peut estimer que ce sont les conditions (type de sollicitation,  $\sigma_m$ ,  $\sigma_a$ ) 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 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, le mode de sollicitation (type et fréquence), les contraintes résiduelles, l'environnement (température et corrosion), ...

En charpente métallique, ce sont les **assemblages soudés qui conditionnent généralement la tenue à la fatigue de la construction**. Ceci est dû à la géométrie du joint soudé (concentration de contraintes) et relève de l'effet d'entaille associé au cordon. Dès lors, la tenue à la fatigue des assemblages doit être vérifiée dans les conditions imposées par des codes et règles spécifiques. Cependant il faut noter qu'elle peut être grandement améliorée par le choix de dispositions constructives adaptées (changement progressif d'épaisseurs), si le soudage est réalisé dans des conditions optimales et si, de plus, des opérations de parachèvement sont effectuées (meulage des pieds de cordons).

## 2.5.5 Influence de la température

A l'exception de la résilience qui diminue, les caractéristiques de résistance des aciers (limite élastique et module d'élasticité notamment) augmentent légèrement lorsque la température descend en-dessous de la température ambiante.

Par contre, au-dessus de la température ambiante, la plasticité augmente et les caractéristiques de résistance diminuent ! On distingue un seuil important d'environ 500°C, en-dessous duquel les variations restent faibles, et au-dessus duquel l'acier commence à perdre sensiblement ses propriétés de résistance (à 400°C par exemple, la limite élastique diminue de 38% et le module d'élasticité de 13%). En cas d'incendie notamment, il faudra limiter l'échauffement des éléments porteurs en acier à des températures inférieures à 500°, par exemple en les protégeant par des matériaux isolant.

## 2.6 Caractéristiques technologiques

### 2.6.1 Soudabilité

La soudabilité des aciers, c'est-à-dire l'aptitude à l'assemblage par soudure, est influencée par la composition chimique et par la structure métallographique de l'acier. En augmentant la teneur des éléments d'alliage, on diminue la soudabilité. Par contre, une amélioration de la soudabilité est obtenue par l'affinage du grain. Les aciers de construction sont généralement aptes à être soudés. La soudabilité est jugée sur base du risque de ruine par fissuration et rupture à partir de défauts. Les plus dangereux peuvent être géométriques (ces défauts relèvent de la conception et de la pratique du soudage) et métallurgiques (il s'agit des fissures à chaud, des fissures par arrachement lamellaire et des fissures à froid).

- **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 de construction satisfont pratiquement.

- **arrachement lamellaire** : les fissures par arrachement lamellaire se produisent parallèlement à la surface d'un produit laminé, au droit d'un assemblage soudé 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. Outre une bonne conception du joint et une bonne pratique de la soudure, c'est surtout le choix d'un acier possédant un niveau garanti de ductilité dans le sens de l'épaisseur qui va permettre d'éviter le risque d'une telle fissuration. Ces exigences sont relatives à la striction mesurée sur une éprouvette prélevée dans le sens de l'épaisseur. L'Eurocode EN 1993-1-10 propose une méthode de choix entre trois qualités d'acier (Z15, Z25 et Z35) relatives à la valeur minimale de cette striction (15%, 25%, 35%), en fonction de la géométrie et des conditions de sollicitation du joint soudé, pour éviter le risque d'arrachement lamellaire.

- **fissuration à froid** : la fissuration à froid est, en fait, le défait essentiel de soudabilité 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 avec formation de martensite fragile dans la ZAT (zone affectée thermiquement par la chaleur) ; l'existence de contraintes résiduelles importantes au niveau de la soudure (retrait et bridage). Il s'en suit une **formation de criques ou fissures qui sont des amorces de ruptures fragiles**.

Minimiser les contraintes peut se faire par une bonne conception de l'assemblage et le choix des séquences de soudage. Limiter la teneur en hydrogène du métal fondu peut se faire par 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 peut se faire en agissant sur les conditions opératoires et notamment sur l'énergie de soudage et, éventuellement en réalisant un préchauffage si une énergie de soudage assez élevée ne suffit pas.

Pour ce qui est de limiter la fragilité de la martensite formée dans la ZAT et conférer à cette zone une ténacité suffisante, il s'agit essentiellement de réduire la teneur en carbone et affiner le grain de l'acier lors de son élaboration (par laminage thermomécanique notamment).

Le carbone, de même que certains éléments d'alliages, contribuent à la trempabilité de l'acier lors du soudage. Il est habituel d'apprécier l'aptitude d'un acier de construction qui contient ces éléments, à résister à la fissuration à froid, à l'aide de ce que l'on dénomme la « teneur de carbone équivalent ». Ce facteur CE est calculé à l'aide de la formule suivante, à partir de la composition chimique du métal (massique) et exprimé en % :  $CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$ . Des abaques permettent, à partir de la valeur du carbone équivalent d'un acier de construction, de proposer des conditions de soudage qui, pour une teneur donnée en hydrogène, permettront d'éviter le risque de fissuration à froid.

Avantages des aciers (M) sur les (N) : à CE équivalent, les aciers (M) ont des limites élastiques plus élevées que les aciers (N) ; avant soudure, les températures de préchauffage (qui augmentent avec l'épaisseur) sont plus faibles pour les aciers (M) ; on observe des niveaux plus élevés de résilience de la ZAT en cas de soudage pour les aciers (M).

## 2.6.2 Aptitude au formage et au découpage

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 de normalisation qui permet de redonner à l'acier ses propriétés mécaniques d'origine. Une telle opération n'est possible qu'avec les aciers des normes EN 10025-2 et EN 10025-3.

Les aciers « thermomécaniques » et « trempés-revenus » ne doivent pas être formés à chaud, c'est à dire à l'état austénitique, car ils perdraient définitivement leurs propriétés mécaniques !

Le formage à froid (pliage, bordage, roulage, cintrage, profilage sur galets...) 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) ; l'aptitude au formage à froid est évaluée par des essais de pliage (les rayons de pliage croissent avec l'épaisseur et la résistance à la traction). Dans tous les cas, il est nécessaire de prendre en compte l'effet de l'écrouissage. Après écrouissage, un acier peut durcir et simultanément perdre de sa ductilité et de sa résistance à la rupture fragile par vieillissement.

Les aciers de construction métallique peuvent subir un découpage par : cisailage, 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). Ces aciers peuvent aussi subir un coupage thermique (oxycoupage, torche à plasma ou faisceau laser).

## 2.6.3 Résistance à la corrosion

Afin de satisfaire aux conditions de durée de vie et de durabilité des structures mentionnées dans l'EN1990, les aciers de construction courants peuvent être protégés contre l'agression de la corrosion atmosphérique par des revêtements de types divers et adaptés aux conditions d'emploi. On trouve :

- les revêtements métalliques par galvanisation (zinc) ou aluminage (aluminium) au trempé ou en continu (tôles), par métallisation au pistolet (zinc ou aluminium), par électrozingage. La galvanisation à chaud exige l'utilisation d'aciers avec des teneurs en silicium précises ; pour le choix de tels aciers à galvaniser, voir l'EN 1064.
- les peintures (plusieurs couches dont des « primaires » à pouvoir inhibiteur) ; dans ce cas, l'acier doit être décapé au préalable par sablage ou grenailage. Il existe quatre niveaux de sablage : léger (SA1), soigné (SA2), très soigné (SA2.5), et à blanc (SA3). Moyennant une préparation des supports, les revêtements métalliques peuvent recevoir une ou plusieurs couches de peintures compatibles.
- les tôles minces prélaquées et plastifiées (après galvanisation préalable).

Les produits de construction peuvent aussi être fournis 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.

Il existe aussi des aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique. Il s'agit d'aciers au carbone avec ajout d'alliages tels Cu, Cr, Ni, P appelés « auto-patinables » ; ils ne nécessitent aucune protection car ils développent une couche de protection propre après exposition aux intempéries.

# 3. NUANCES DES ACIERS DE STRUCTURE

## 3.1 Désignation normalisée

La désignation des aciers de construction consiste en une succession de lettres et de chiffres qui commencent toujours par la lettre **S**, suivie d'un **nombre** égal à la valeur minimale spécifiée de la limite élastique 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 de livraison de l'acier : **N** pour normalisé ou laminage normalisant, **M** pour laminage thermomécanique, **Q** pour trempé et revenu ;
- deux lettres ou une lettre et un chiffre précisant les exigences relatives à la température de transition de la résilience (**J** pour 27 Joules, **K** pour 40 J, **L** pour 60 J ; **R** pour 20°, **0** pour 0° et **2 à 6** pour -20 à -60°). Ces dernières sont simplifiées pour les aciers à grains fins : **L** pour 27 J à une T° minimale de -50° pour les aciers **N** et **M** ; **L** pour 27 J à une T° minimale de -40° et **L1** pour 27 J à -60° pour les aciers **Q** ;
- éventuellement la lettre **G** suivie d'un chiffre : **G2** pour acier calmé, **G3** pour recuit de normalisation, **G4** pour état de livraison libre, ...
- éventuellement une indication pour une spécification complémentaire : **D** pour aptitude à la galvanisation, **W** pour résistance améliorée à la corrosion atmosphérique, **H** pour tubes, **Z15, 25 ou 35** pour la résistance à l'arrachement lamellaire, **C** pour écrouissage à froid, **CR** pour laminage à chaud et écrouissage à froid, ...

### 3.2 Produits laminés à chaud en acier de construction non allié

Les exigences et qualités d'acier pour les produits laminés à chaud longs et plats en acier non allié sont spécifiées dans la norme EN 10025-2. Ces éléments, d'usage général, sont utilisés pour les structures classiques soudées, boulonnées ou rivées soumises en service à la température ambiante.

Ces aciers sont désignés par :

- la lettre S ;
- la valeur minimale de la limite élastique (pour une épaisseur  $\leq 16\text{mm}$ ) en  $\text{N/mm}^2$  : 235, 275, 355, 450 ;
- la qualité vis-à-vis de la soudabilité et la résistance à la rupture fragile, par un symbole désignant l'énergie minimale de rupture : JR (27 Joules à  $20^\circ$ ), JO (27 Joules à  $0^\circ$ ), J2 (27 Joules à  $-20^\circ$ ), K2 (40 Joules à  $-20^\circ$ ) ;
- éventuellement : C, pour un acier apte au formage à froid ;  
Z, pour des propriétés améliorées perpendiculairement à la surface.

Steel grade Designation	Minimum yield strength $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )									Minimum tensile strength $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )				
	Nominal thickness t (mm)									Nominal thickness t (mm)				
	$\leq 16$	$>16$ $\leq 40$	$>40$ $\leq 63$	$>63$ $\leq 80$	$>80$ $\leq 100$	$>100$ $\leq 150$	$>150$ $\leq 200$	$>200$ $\leq 250$	$>250$ $\leq 400$ e	$<3$	$\geq 3$ $\leq 100$	$>100$ $\leq 150$	$>150$ $\leq 250$	$>250$ $\leq 400$ e
S235JR	235	225	215	215	215	195	185	175	-	360	360	350	320	-
S235J0	235	225	215	215	215	195	185	175	-	360	360	350	320	-
S235J2	235	225	215	215	215	195	185	175	165	360	360	350	320	320
S275JR	275	265	255	245	235	225	215	205	-	430	410	400	380	-
S275J0	275	265	255	245	235	225	215	205	-	430	410	400	380	-
S275J2	275	265	255	245	235	225	215	205	195	430	410	400	380	380
S355JR	355	345	335	325	315	295	285	275	-	510	470	450	450	-
S355J0	355	345	335	325	315	295	285	275	-	510	470	450	450	-
S355J2	355	345	335	325	315	295	285	275	265	510	470	450	450	450
S355K2	355	345	335	325	315	295	285	275	265	510	470	450	450	450
S450J0 <sup>d</sup>	450	430	410	390	380	380	-	-	-	-	550	530	-	-

<sup>c</sup> The values apply to flat products

<sup>d</sup> For long products only

### 3.3 Produits laminés à chaud en acier de construction soudables à grains fins

Les exigences et qualités d'acier pour les produits laminés à chaud longs et plats en acier soudable à grains fins sont spécifiées dans la norme EN 10025-3. Ces éléments sont utilisés pour les structures soudées très sollicitées tels que les ponts, portes d'écluses, réservoirs, ...soumises en service à température ambiante ou basse température.

Les aciers de ces éléments ont une composition chimique leur assurant une très bonne soudabilité, sont complètement calmés et ont une structure à grains fins. Ils sont obtenus par traitement thermique de normalisation ou laminage normalisant (N), ou par laminage thermomécanique (M).

Ces aciers sont désignés par :

- la lettre S ;
- la valeur minimale de la limite élastique (pour une épaisseur  $\leq 16\text{mm}$ ) en  $\text{N/mm}^2$  : 275, 355, 420, 460 ;
- le symbole d'état de livraison : N ou M ;
- la lettre L pour la qualité avec valeur minimale spécifiée de l'énergie de rupture à des températures non inférieures à  $-50^\circ$ , sinon, cela concerne des températures supérieures à  $-20^\circ$  ;
- éventuellement : Z, pour des propriétés améliorées perpendiculairement à la surface.

Steel grade Designation	Minimum yield strength $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )								Minimum tensile strength $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )		
	Nominal thickness t (mm)								Nominal thickness t (mm)		
	$\leq 16$	$>16$ $\leq 40$	$>40$ $\leq 63$	$>63$ $\leq 80$	$>80$ $\leq 100$	$>100$ $\leq 150$	$>150$ $\leq 200$	$>200$ $\leq 250$	$\leq 100$	$>100$ $\leq 200$	$>200$ $\leq 250$
S275N S275NL	275	265	255	245	235	225	215	205	370	350	350
S355N S355NL	355	345	335	325	315	295	285	275	470	450	450
S420N S420NL	420	400	390	370	360	340	330	320	520	500	500
S460N S460NL	460	440	430	410	400	380	370	-	550	530	-

Steel grade	Minimum yield strength $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )						Minimum tensile strength $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )			
	Nominal thickness t (mm)						Nominal thickness t (mm)			
	≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤120 <sup>d</sup>	≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤120 <sup>d</sup>
S275M S275ML	275	265	255	245	245	240	360	350	350	350
S355M S355ML	355	345	335	325	325	320	450	440	440	430
S420M S420ML	420	400	390	380	370	365	500	480	470	460
S460M S460ML	460	440	430	400	390	385	530	510	500	490

<sup>d</sup> For long products a thickness ≤ 150 mm applies

### 3.4 Produits laminés à chaud en acier de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique

Les exigences et qualités d'acier pour les produits laminés à chaud longs et plats en acier à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique sont spécifiées dans la norme EN 10025-5. Ces éléments sont utilisés pour les structures classiques soudées, boulonnées ou rivées soumises en service à la température ambiante, lorsqu'une résistance à la corrosion atmosphérique est nécessaire. Ces éléments ne peuvent subir de traitement à chaud.

Ces aciers sont désignés par :

- la lettre S ;
- la valeur minimale de la limite élastique (pour une épaisseur ≤ 16mm) en N/mm<sup>2</sup> : 235, 275, 355 ;
- la qualité, quant à la soudabilité et à la résistance à la rupture fragile, par un symbole : JO, J2, K2 ;
- le symbole W désignant la résistance à la corrosion atmosphérique ;
- éventuellement : P, pour une teneur en phosphore plus importante (pour S355 uniquement) ;  
Z, pour des propriétés améliorées perpendiculairement à la surface.

Steel grade	Minimum yield strength $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )						Minimum tensile strength $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )		
	Nominal thickness t (mm)						Nominal thickness t (mm)		
	≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤150	<3	≥3 ≤100	>100 ≤150
S235J0W S235J2W	235	225	215	215	215	195	360	360	350
S355J0WP S355J2WP	355	345 <sup>c</sup>	-	-	-	-	510	470 <sup>d</sup>	-
S355J0W S355J2W S355K2W	355	345	335	325	315	295	510	470	450

<sup>c</sup> This value applies only in respect to shapes and sections.  
<sup>d</sup> The maximum thickness for these steel grades is 40 mm.

### 3.5 Produits laminés à chaud en acier de construction à haute limite d'élasticité

Les exigences et qualités d'acier pour les produits plats en acier à haute limite élastique sont spécifiées dans la norme EN 10025-6. Les aciers de ces éléments ont des limites élastiques variant de 460 à 960 N/mm<sup>2</sup>. Il s'agit d'acier trempé et revenu.

Ces aciers sont désignés par :

- la lettre S ;
- la valeur minimale de la limite élastique (pour une ép. ≤ 50mm) en N/mm<sup>2</sup> : 460, 500, 550, 620, 690, 890, 960 ;
- le symbole Q désignant l'état de livraison « trempé et revenu » ;
- éventuellement la lettre L (ou L1) pour la qualité avec valeur minimale spécifiée d'énergie de rupture en flexion par choc à des températures non inférieures à -40° (ou -60°), sinon, cela concerne des températures > à -20° ;
- éventuellement : Z, pour des propriétés améliorées perpendiculairement à la surface.

Designation		Minimum yield strength $R_{eH}$ MPa <sup>a</sup> Nominal thickness mm			Tensile strength $R_m$ MPa <sup>a</sup> Nominal thickness mm			Minimum percentage elongation at fracture % $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$
		$\geq 3$ $\leq 50$	$> 50$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 150$	$\geq 3$ $\leq 50$	$> 50$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 150$	
According EN 10027-1 and CR 10260	According EN 10027-2							
S460Q S460QL S460QL1	1.8908 1.8906 1.8916	460	440	400	550 to 720		500 to 670	17
S500Q S500QL S500QL1	1.8924 1.8909 1.8984	500	480	440	590 to 770		540 to 720	17
S550Q S550QL S550QL1	1.8904 1.8926 1.8986	550	530	490	640 to 820		590 to 770	16
S620Q S620QL S620QL1	1.8914 1.8927 1.8987	620	580	560	700 to 890		650 to 830	15
S690Q S690QL S690QL1	1.8931 1.8928 1.8988	690	650	630	770 to 940	760 to 930	710 to 900	14
S890Q S890QL S890QL1	1.8940 1.8983 1.8925	890	830	-	940 to 1100	880 to 1100	-	11
S960Q S960QL	1.8941 1.8933	960	--	-	980 to 1150	-	-	10

### 3.6 Tubes (H) finis à chaud en acier de construction non allié

Référence : EN 10210-1.

Steel grade	Minimum yield strength $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> ) Nominal thickness t (mm)			Minimum tensile strength $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) Nominal thickness t (mm)		
	Designation	$\leq 16$	$> 16$ $\leq 40$	$> 40$ $\leq 65$	$< 3$	$\geq 3$ $\leq 65$
S235JRH		235	225	215	360	340
S275J0H S275J2H		275	265	255	430	410
S355J0H S355J2H		355	345	335	510	490

### 3.7 Tubes (H) finis à chaud en acier de construction à grains fins

Référence : EN 10210-1.

Steel grade	Minimum yield strength $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> ) Nominal thickness t (mm)			Minimum tensile strength $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) Nominal thickness t (mm)	
	Designation	$\leq 16$	$> 16$ $\leq 40$	$> 40$ $\leq 65$	$\leq 65$
S275NH S275NLH		275	265	255	370
S355NH S355NLH		355	345	335	470
S460NH S460NLH		460	440	430	550

### 3.8 Tubes (H) soudés formés à froid en acier de construction non allié

Référence : EN 10219-1.

Steel grade Designation	Minimum yield strength $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> ) Nominal thickness t (mm)		Minimum tensile strength $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) Nominal thickness t (mm)	
	$\leq 10$	$> 16$ $\leq 40$	$\leq 3$	$> 3$ $\leq 40$
	S235JRH	235	225	360
S275J0H S275J2H	275	265	430	410
S355J0H S355J2H	355	345	510	490

### 3.9 Tubes (H) soudés formés à froid en acier de construction à grains fins

Référence : EN 10219-1.

Steel grade Designation	Minimum yield strength $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> ) Nominal thickness t (mm)		Minimum tensile strength $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) Nominal thickness t (mm)
	$\leq 16$	$> 16$ $\leq 40$	$\leq 40$
	S275NH S275NLH	275	265
S355NH S355NLH	355	345	470
S460NH S460NLH	460	440	550

Steel grade Designation	Minimum yield strength $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> ) Nominal thickness t (mm)		Minimum tensile strength $f_u$ (N/mm <sup>2</sup> ) Nominal thickness t (mm)
	$\leq 16$	$> 16$ $\leq 40$	$\leq 40$
	S275MH S275MLH	275	265
S355MH S355MLH	355	345	450
S420MH S420MLH	420	400	500
S460MH S460MLH	460	440	550

## 4. Caractéristiques communes des aciers de construction

Quels que soient leurs compositions chimiques et modes d'élaboration, on peut, pour la très grande majorité des aciers de construction, utiliser les valeurs conventionnelles suivantes :

$$E = 210.000 \text{ N/mm}^2 ; G = 80.770 \text{ N/mm}^2 ; \nu = 0,3 ; \alpha = 12.10^{-6} / ^\circ\text{C} ; \gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$$

## 5. Choix de la qualité d'acier d'une structure

Si la structure 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 une valeur de résilience minimale de 27J (énergie de rupture en flexion par choc sur éprouvette à entaille en V) à une température imposée (T° de transition de la résilience). Pour choisir la qualité et donc pour définir ce que doit être cette température dite « de référence », il faut la déduire de l'indication de la température minimale de service.

Pour ce faire, le concepteur a à sa disposition la 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.

Cette méthode prend en compte les paramètres suivants : l'épaisseur, la limite d'élasticité, les sollicitations, la vitesse d'application des charges, un écrouissage éventuel (déformation à froid).

La norme EN 1993-1-10 propose un tableau (reproduit ci-dessous), pour les nuances d'acier 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 (contrainte  $\sigma_{Ed}$  à la température de référence  $T_{Ed}$  exprimée comme une fraction de la limite élastique  $f_y$ , elle-même dépendant de l'épaisseur).

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

La température de référence  $T_{Ed}$ , à l'endroit de la fracture potentielle, est la température la plus basse spécifiée dans la EN 1991-1-5 (actions thermiques), corrigée par plusieurs ajustements qui prennent en compte : les pertes par rayonnement, la vitesse de sollicitation, un degré de déformation à froid éventuel de l'acier, une diminution de la température éventuelle pour augmenter la fiabilité de la structure.

Il convient de combiner les actions de la manière suivante : 
$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A(T_{Ed}) + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

où l'action accidentelle dominante  $A$  est la température de référence  $T_{Ed}$  qui conditionne la ténacité du matériau de l'élément considéré, et peut également générer des contraintes dues aux déplacements empêchés.  $\sum G_{k,j}$  sont les actions permanentes,  $\psi_{1,1} Q_{k,1}$  est la valeur fréquente de la charge variable principale, et  $\sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$  sont les valeurs quasi-permanentes des charges variables d'accompagnement, qui déterminent le niveau des contraintes dans le matériau.

Il convient de déterminer  $\sigma_{Ed}$  comme à l'état limite de service en tenant compte de toutes les combinaisons d'actions permanentes et variables telles que définies dans la partie appropriée de l'EN 1991.

Il est précisé que ce tableau n'est utilisable 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.