

# CHAPITRE 1

## Le matériau acier

### 1.1. Généralités sur le matériau acier

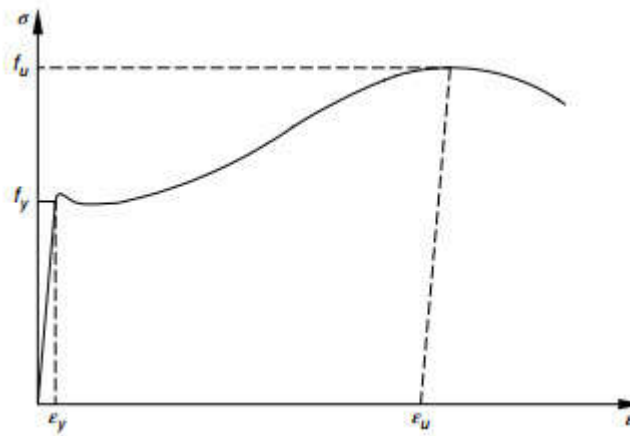
Le terme acier désigne une famille d'alliages fer-carbone caractérisée par des pourcentages bien définis des principaux composants individuels. Plus précisément, les alliages fer-carbone sont identifiés par leur teneur en carbone (C), comme suit :

- **Le fer forgé**, si la teneur en carbone est supérieure à 1,7 % (certaines références bibliographiques ont rapporté une valeur de 2 %) ;
- **L'acier**, lorsque la teneur en carbone est inférieure à la limite susmentionnée. En outre, l'acier peut être classé en matériaux extra-doux ( $C < 0,15 \%$ ), doux ( $C = 0,15 \div 0,25 \%$ ), mi-durs ( $C = 0,25 \div 0,50 \%$ ), durs ( $C = 0,50 \div 0,75 \%$ ) et extra durs ( $C > 0,75 \%$ ).

L'acier de construction, aussi appelé parfois acier de charpente, se caractérise par une teneur en carbone comprise entre 0,1 et 0,25 %. La présence de carbone augmente la résistance du matériau tout en réduisant sa ductilité et sa soudabilité ; c'est pourquoi l'acier de construction se caractérise généralement par une faible teneur en carbone. Outre le fer et le carbone, l'acier de construction contient généralement de petites quantités d'autres éléments. Certains d'entre eux sont déjà présents dans le minerai de fer et ne peuvent être entièrement éliminés au cours du processus de production, tandis que d'autres sont volontairement ajoutés à l'alliage afin d'obtenir certaines propriétés physiques ou mécaniques souhaitées.

Parmi les éléments qui ne peuvent pas être complètement éliminés au cours du processus de production, il convient de mentionner le soufre (S) et le phosphore (P), qui sont indésirables car ils diminuent la ductilité du matériau et sa soudabilité (leur teneur globale doit être limitée à environ 0,06 %). L'azote (N), l'oxygène (O) et l'hydrogène (H) sont d'autres éléments indésirables qui peuvent réduire la ductilité. Les deux premiers affectent également les propriétés de vieillissement du matériau, augmentant sa fragilité dans les régions où des déformations permanentes sont présentes.

Les éléments d'alliage les plus importants qui peuvent être ajoutés aux matériaux sont le manganèse (Mn) et la silice (Si), qui contribuent de manière significative à l'amélioration des caractéristiques de soudabilité du matériau, tout en augmentant sa résistance. Dans certains cas, du chrome (Cr) et du nickel (Ni) peuvent également être ajoutés à l'alliage ; le premier augmente la résistance du matériau et, s'il est présent en quantité suffisante, améliore la résistance à la corrosion (il est utilisé pour l'acier inoxydable), tandis que le second augmente la résistance et réduit la déformabilité du matériau.



**Figure 1.1** Loi constitutive type pour l'acier de construction.

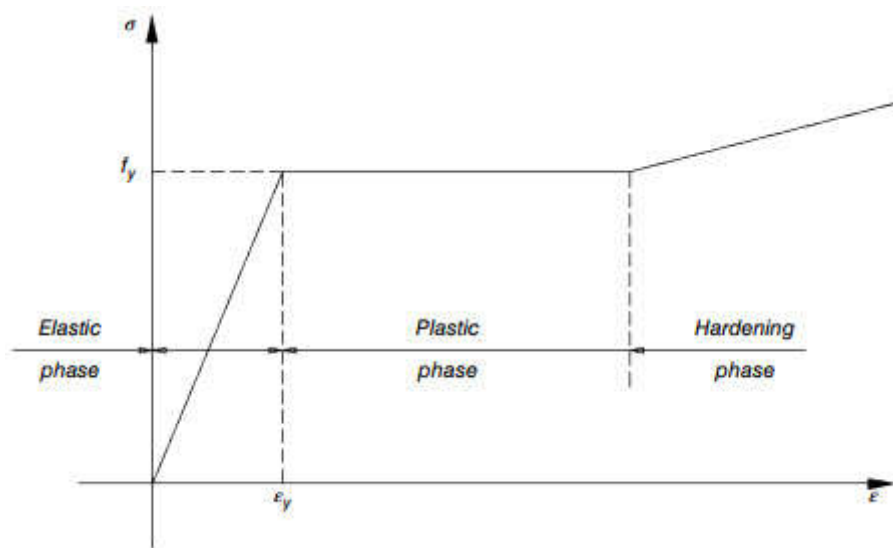
L'acier se caractérise par une loi constitutive symétrique contrainte-déformation ( $\sigma$ - $\epsilon$ ). Généralement, cette loi est déterminée expérimentalement au moyen d'un essai de traction effectué sur des éprouvettes (échantillons) usinées à partir d'un matériau en plaque obtenu à partir des sections en question. La figure 1.1 montre une réponse de contrainte-déformation typique à une force de traction uni-axiale pour une éprouvette en acier structural. En particulier, il est possible de distinguer les régions suivantes :

- ◆ Une branche initiale principalement linéaire (phase élastique), dans laquelle le matériau présente un comportement élastique linéaire jusqu'à la contrainte d'écoulement ( $f_y$ ). La déformation correspondant à  $f_y$  est généralement indiquée par  $\epsilon_y$  (déformation d'écoulement). La pente de cette branche initiale correspond au module d'élasticité du matériau (aussi appelé module d'élasticité longitudinal ou module de Young), couramment indiqué par  $E$ , avec une valeur entre 190 000 et 210 000 N/mm<sup>2</sup>, environ ;
- ◆ Une phase plastique, qui se caractérise par une pente faible voire nulle dans le système de référence  $\sigma$ - $\epsilon$  ;

- ◆ La branche suivante est la phase d'écrouissage, au cours de laquelle la pente est considérablement plus faible par rapport à la phase élastique, mais suffisante pour provoquer une augmentation de la contrainte lorsque la contrainte augmente, jusqu'à la résistance ultime  $f_u$ . Le module de durcissement a des valeurs comprises entre 4000 et 6000 N/mm<sup>2</sup>, environ.

Généralement, la loi constitutive uni-axiale pour l'acier est schématisée comme une relation multilinéaire, comme le montre la figure 1.2, et pour les besoins de la conception, on utilise généralement une approximation élastique - parfaitement plastique, c'est-à-dire que la branche de durcissement est considérée comme horizontale, limitant la résistance maximale à la limite élastique.

La limite élastique est le paramètre le plus influent pour le calcul. Sa valeur est obtenue au moyen d'un essai de traction uni-axiale, généralement effectué en laboratoire sur des éprouvettes.



**Figure 1.2** Schématisation de la loi constitutive uni-axiale

## 1.2 Procédés de fabrication

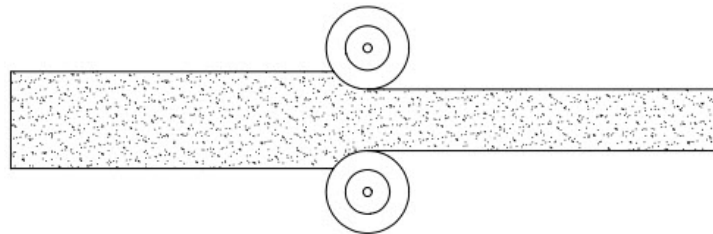
L'acier peut être obtenu par transformation du fer forgé ou directement par fusion de ferraille et de minerai de fer. Les lingots sont obtenus à partir de ces procédés, qui peuvent ensuite être soumis à des procédés mécaniques à chaud ou à froid pour devenir des produits finis (plaques, barres, profilés, tôles, tiges, boulons, etc.). Ces produits peuvent être obtenus de diverses façons qui peuvent être résumées de façon pratique dans les techniques suivantes :

- Procédé de formage par compression ou traction (par ex. forgeage, laminage, extrusion) ;
- Processus de formage par flexion et cisaillement.

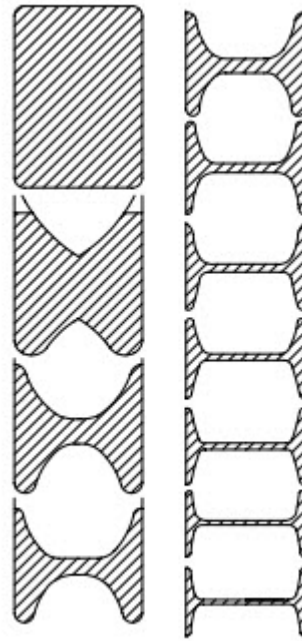
Parmi ces procédés, le plus important est le laminage, à la fois dans ses variations à chaud et à froid, qui permet d'obtenir la plupart des produits utilisés dans les applications structurelles (appelés "produits laminés"). Dans le procédé de laminage à chaud, les lingots d'acier sont amenés à une température suffisante pour ramollir le matériau (environ 1200°C ou 2192°F), ils passent d'abord par une série de rouleaux contrarotatifs juxtaposés (laminage primaire - Figure 1.3) et sont ébavurés en barres à section carrée ou rectangulaire.

Ces produits semi-ouvrés sont fabriqués sous différentes formes qui peuvent ensuite être laminés pour obtenir des tôles, des profilés de grandes ou moyennes dimensions ou des profilés, barres et ronds de petites dimensions. Ce processus supplémentaire s'appelle le laminage secondaire, qui permet d'obtenir les produits finis.

Par exemple, pour obtenir les profilés typiques en forme de **I**, les produits semi-ouvrés, à une température légèrement supérieure à 1200°C (2192°F), sont envoyés au train de laminage (laminoir) et leur section rectangulaire initiale est usinée jusqu'à obtenir la forme souhaitée. La figure 1.4 montre certaine des sections intermédiaires pendant le processus de laminage, jusqu'à l'obtention du produit final en forme de **I**.



**Figure 1.3** Processus de laminage.



**Figure 1.4** Étapes intermédiaires du processus de laminage d'un profil en I.

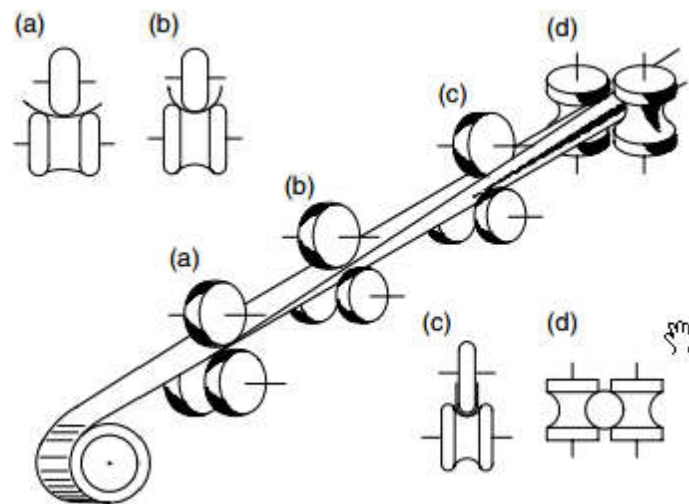
Le processus de laminage améliore les caractéristiques mécaniques du produit final, grâce aux forces de compression appliquées par les rouleaux et à l'amincissement simultané de la section transversale qui favorise l'élimination des gaz et des poches d'air qui pourraient être présents au départ. En même temps, les déformations considérables imposées par le laminage contribuent à affiner la structure granulaire du matériau, avec des avantages remarquables en termes d'homogénéité et de résistance. Dans de tels procédés, en plus de la quantité de déformations, le taux de déformations est également un facteur très important pour déterminer les caractéristiques finales du produit.

Le laminage à froid est effectué à température ambiante et il est fréquemment utilisé pour les matériaux non ferreux afin d'obtenir des résistances supérieures par durcissement au prix d'une perte de ductilité souvent non négligeable. Lorsque le laminage à froid nécessite des déformations excessives, le métal peut commencer à présenter des fissures avant d'atteindre la forme souhaitée, auquel cas des cycles supplémentaires de traitement thermique et de formage à froid sont nécessaires.

Les procédés de formage par pliage et cisaillement consistent à plier des tôles minces jusqu'à l'obtention de la forme de section transversale souhaitée. Les produits typiques obtenus par ces procédés sont les profilés formés à froid, dont l'épaisseur doit être limitée à quelques millimètres afin d'obtenir les déformations souhaitées. La figure 1.5 montre les étapes

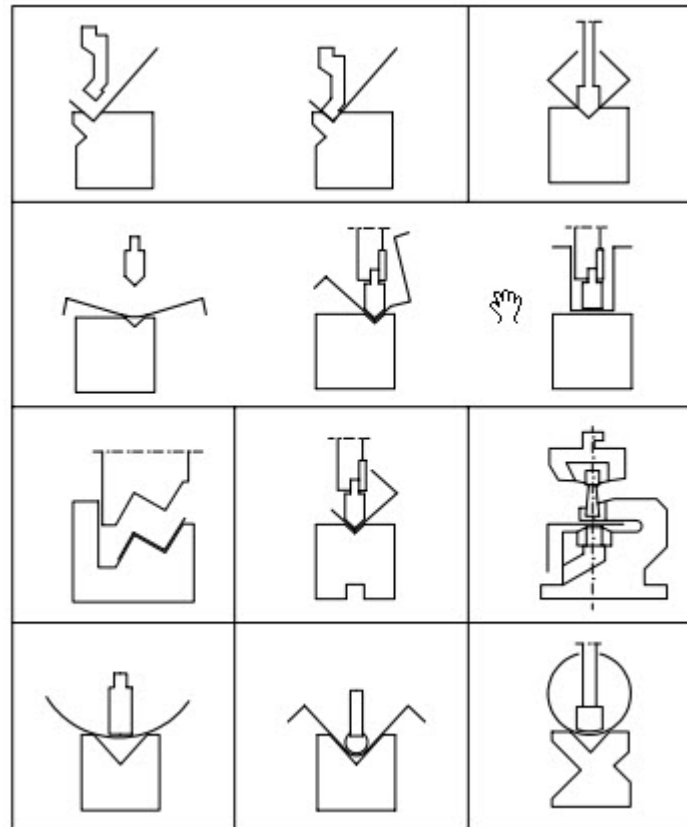
intermédiaires pour obtenir des profilés creux circulaires formés à froid au moyen de procédés de formation continue.

On peut voir que la bobine est tirée et mise en forme graduellement jusqu'à ce que le produit final désiré soit obtenu. La figure 1.6 illustre plutôt les principales étapes intermédiaires du processus de poinçonnage afin d'obtenir certains profils types actuellement utilisés dans les applications structurales. Avec cette deuxième technique de travail, des tôles plus épaisses peuvent être formées en profilés d'une épaisseur allant jusqu'à **12-15 mm**, tandis que la valeur limite de l'épaisseur des bobines pour les procédés de formation continue est d'environ **5 mm**.



**Figure 1.5** Formation continue de profilés creux circulaires creux formés à froid.

À titre d'exemple, la figure 1.7 illustre certaines étapes intermédiaires du processus de formation à froid d'un profilé de canal renforcé, avec perforations régulières, généralement utilisé pour les rayonnages de palettes et les structures d'étagères en acier.



**Figure 1.6** Processus de poinçonnage pour les profilés formés à froid.



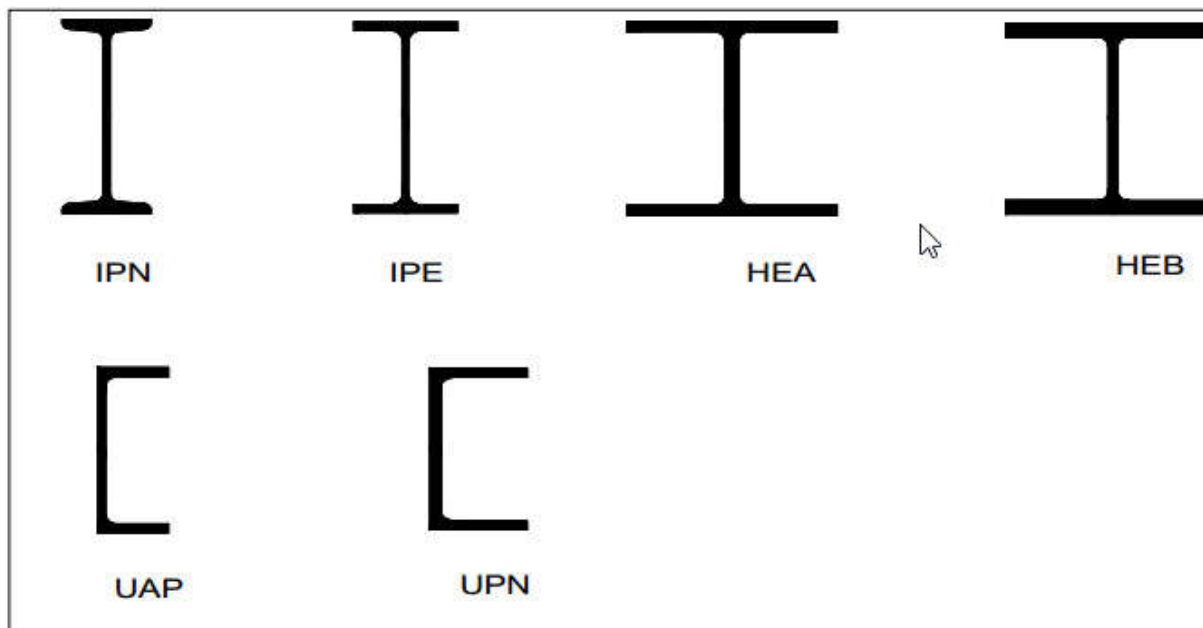
**Figure 1.7** Images de formation à froid d'un profil de canal rigidifié.

### 1.3 Les différents produits sidérurgiques

Les produits sidérurgiques en acier ferritique utilisés en construction métallique sont les aciers S235, S275, S355.

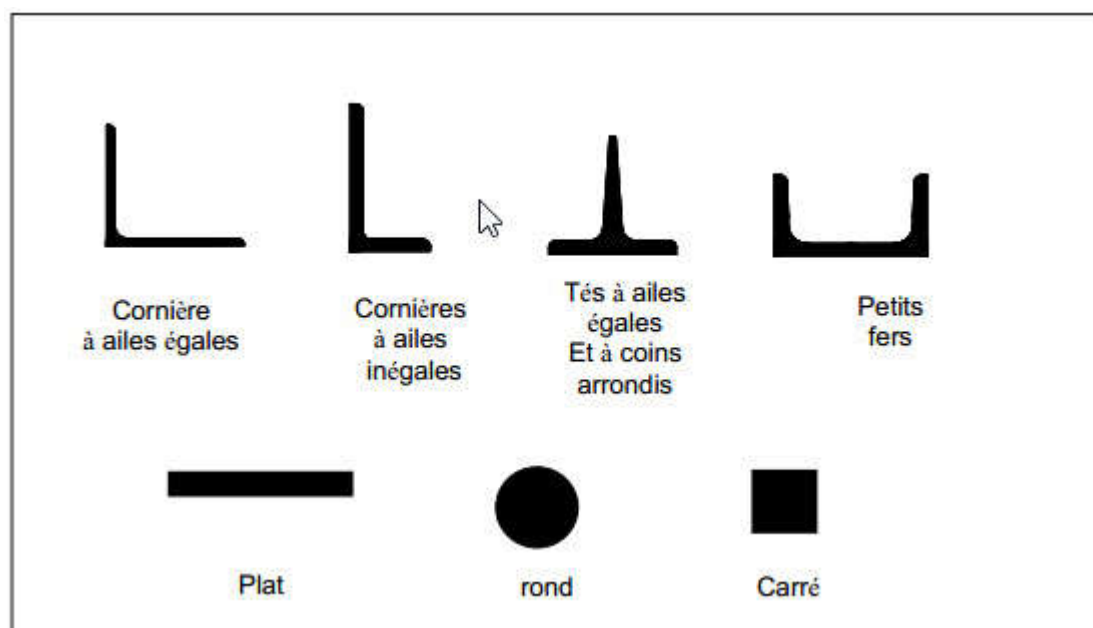
#### 1.3.1 Les profilés laminés

Les profilés normaux PN sont en forme de I, H, U, C, T



### 1.3.2 Les profilés laminés marchands

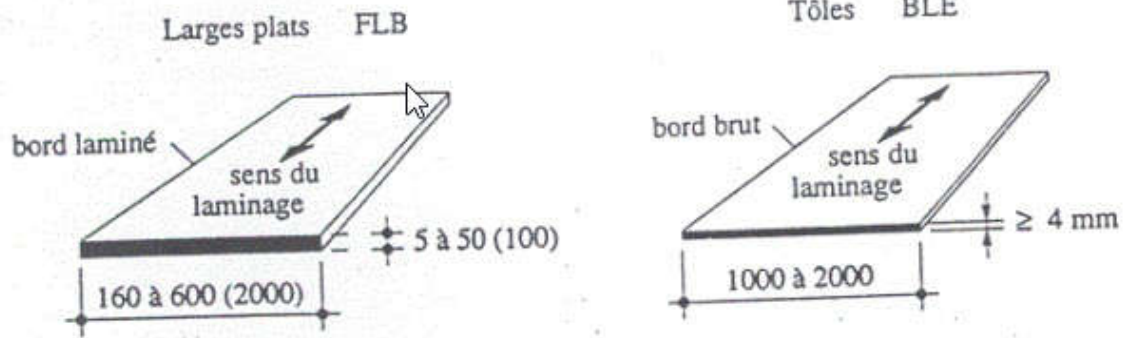
Les laminés marchands sont des cornières, des fers plats, des tés, des U et des profils pleins ou creux en tubes de différentes formes



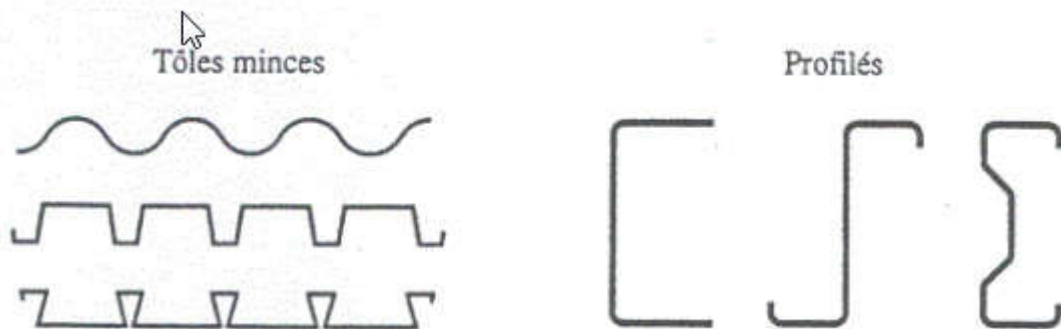
### 1.3.3 Les tôles.

On distingue les tôles en plaques de différentes épaisseurs de 4 mm à 40 mm





### 1.3.4 Les tôles nervurées



## 1.4 Les imperfections

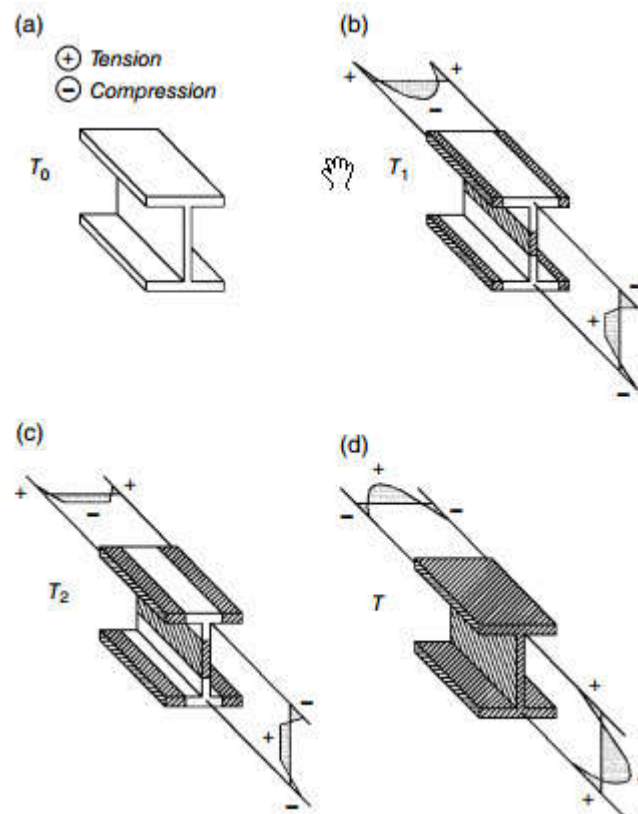
Le comportement des structures métalliques, et donc la capacité de charge de leurs éléments, dépend, parfois très significativement, de la présence d'imperfections. Selon leur nature, les imperfections peuvent être classées comme suit :

1. Des imperfections mécaniques ou structurelles ;
2. Les imperfections géométriques.

### 1.4.1 Les imperfections mécaniques

Le terme imperfections mécaniques ou structurelles indique la présence de contraintes résiduelles et/ou le manque d'homogénéité des propriétés mécaniques du matériau sur toute la section transversale de l'élément (par exemple, la résistance à la flexion ou à la rupture varie selon l'épaisseur des semelles et des âmes). Les contraintes résiduelles sont un état de contrainte auto-équilibrant qui est emprisonné dans l'élément en conséquence des processus de production, principalement en raison de déformations plastiques non uniformes et d'un refroidissement non uniforme.

Par exemple, la figure 1.8 montre la répartition des contraintes résiduelles pendant la phase de refroidissement après le laminage à chaud d'un profilé en *I* typique et en particulier, les phases vont de (a), jusqu'à la fin du laminage à chaud, à (d), l'instant auquel le profil entier est à température ambiante. L'ampleur et la répartition des contraintes résiduelles dépendent des caractéristiques géométriques de la section et, en particulier, du rapport largeur/épaisseur de ses éléments (semelles et âmes).



**Figure 1.8** Distribution des contraintes résiduelles pendant la phase de refroidissement d'une forme en *I*.

#### 1.4.2 Les imperfections géométriques

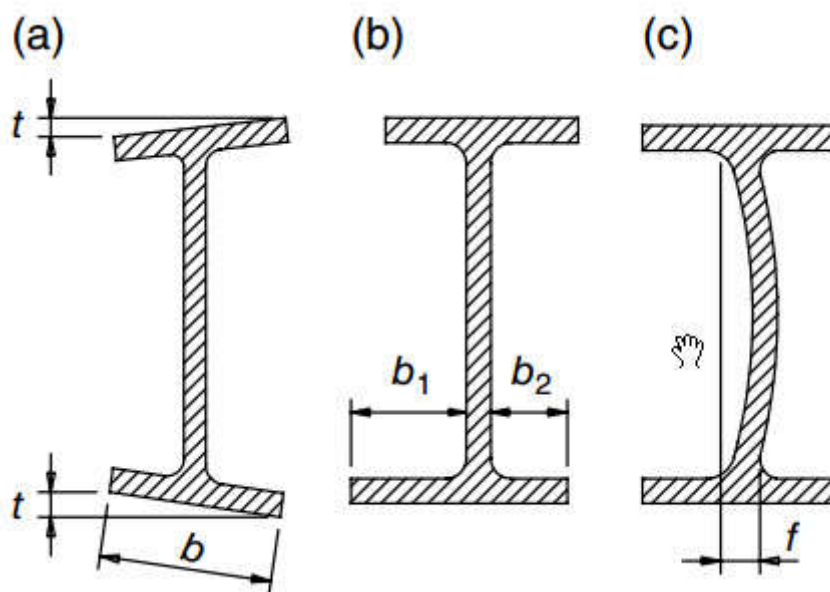
Le terme imperfections géométriques se rapporte aux différences qui peuvent être trouvées entre la forme théorique et la taille réelle des éléments, ou des systèmes structuraux dans leur ensemble, et les éléments réels ou la structure telle que construite. En particulier, les imperfections géométriques peuvent être subdivisées en :

- Les imperfections transversales ;
- Les imperfections des membres ;
- Les imperfections du système structurel.

Les imperfections de la section transversale sont liées à la variation dimensionnelle des éléments de la section transversale par rapport aux dimensions nominales et peuvent être attribuées essentiellement au processus de production. Différentes valeurs de surface, de moments d'inertie et de modules de section peuvent influencer les performances de la section (par exemple en termes de capacité de charge ou de résistance aux moments de flexion). Les tolérances sont établies par des normes pour les produits finis, non seulement en termes de différence maximale entre les dimensions linéaires réelles et nominales, mais aussi en termes de :

1. Tolérance de perpendicularité entre les éléments de la section transversale ;
2. Les tolérances par rapport aux axes de symétrie ;
3. Tolérance de rectitude.

La figure 1.9 donne quelques exemples de paramètres à mesurer pour le contrôle des tolérances d'une section en *I*.



**Figure 1.9** Contrôles de tolérance supplémentaires pour les formes en I : a) tolérance de perpendicularité, b) tolérance de symétrie et c) tolérance de rectitude.

### 1.5 Essais mécaniques pour la caractérisation du matériau

Une connaissance approfondie des caractéristiques mécaniques de l'acier, ainsi que de tout autre matériau de construction, est d'une importance capitale pour les vérifications de calcul.

Parmi les tests les plus importants pour la caractérisation de l'acier, il y a l'analyse chimique, les tests macro et micrographiques.

En particulier, l'analyse chimique est très importante pour déterminer les principales propriétés de l'acier, parmi lesquelles la soudabilité, la ductilité et la résistance à la corrosion, et pour déterminer le pourcentage de carbone et d'autres éléments d'alliage désirés et non désirés.

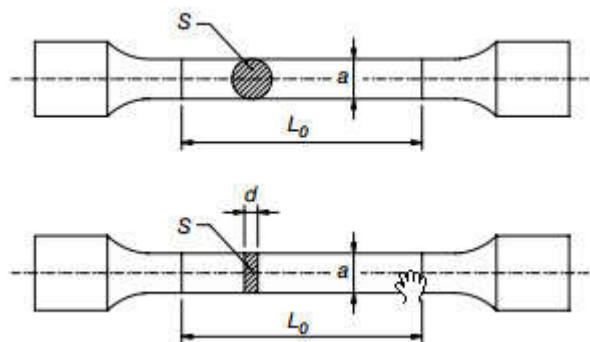
### 1.5.1 Essais de traction

L'essai mécanique le plus important et le plus connu est l'essai de traction uni-axiale. Cet essai permet de mesurer certaines caractéristiques mécaniques importantes de l'acier (limite d'élasticité, résistance ultime, pourcentage d'allongement à la rupture et courbe complète contrainte-déformation, comme indiqué dans le paragraphe 1.1). L'essai consiste en l'application d'une force axiale de traction sur un échantillon obtenu selon des normes spécifiques (EN ISO 6892-1). La force de traction est appliquée avec une intensité qui augmente avec une vitesse établie, en enregistrant l'extension ( $\Delta$ ) sur une longueur de mesure ( $L_0$ ) au milieu de l'échantillon (figure 1.10).

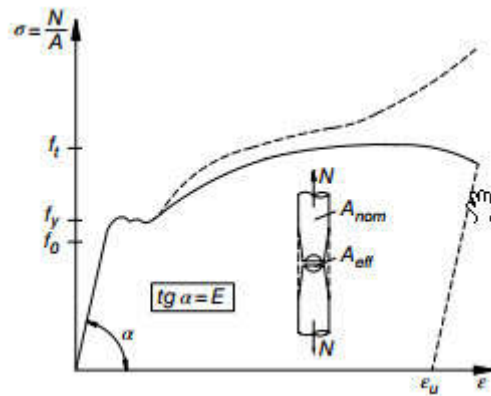
La contrainte  $\sigma$  est calculée en divisant la force appliquée mesurée par la section nominale du coupon ( $A_{nom}$ ),  $\sigma = \frac{N}{A_{nom}}$ , tandis que la déformation  $\varepsilon$  est calculée au moyen de la variation de la longueur de la jauge :

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L_0} = \frac{L_d - L_0}{L_0}$$

Dans laquelle  $L_d$  est la distance entre les marques de la jauge pendant le chargement.



**Figure 1.10** Échantillon type pour les produits laminés.



**Figure 1.11** Relation contrainte-déformation typique ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) pour les aciers de construction.

Pour les matériaux en acier ayant un pourcentage de carbone allant jusqu'à 0,25 %, c'est-à-dire les aciers de construction, la relation contrainte-déformation typique est illustrée à la figure 1.11.

A partir de la pente de la branche initiale de la courbe  $\sigma$ - $\epsilon$ , le module d'élasticité longitudinal ou module de Young, peut être calculé comme  $E = \tan(\alpha)$ . Une fois la contrainte indiquée par  $f_0$  dans la figure est atteinte, que l'on peut définir comme la limite de proportionnalité, il n'y a plus de proportionnalité directe entre contrainte et déformation, mais le matériau se comporte toujours de manière élastique. Correspondant à une contrainte  $f_y$ , l'écoulement se produit et la réponse contrainte-déformation est caractérisée par une réponse légèrement ondulée qui est sensiblement horizontale en raison des déformations plastiques initiales (figure 1.11).

Jusqu'à ce que la contrainte d'écoulement soit atteinte, les déformations transversales du coupon dues à l'effet Poisson sont très faibles. La section transversale effective du coupon ( $A_{\text{eff}}$ ) est considérée, avec une petite approximation, comme étant égale à la section transversale nominale ( $A_{\text{eff}} = A_{\text{nom}}$ ). Pour des forces plus élevées, les déformations transversales ne sont plus négligeables, mais pour des raisons pratiques, la contrainte est toujours calculée par référence à la surface nominale de la section transversale non déformée ( $A_{\text{nom}}$ ).

## 1.6 Caractéristiques des aciers de construction

### 1.6.1 Caractéristiques mécaniques des aciers

En ce qui concerne la conception de l'acier de construction, les dispositions européennes prescrivent les valeurs suivantes pour les propriétés des matériaux :

Masse volumique :  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

Coefficient de Poisson :  $\nu = 0,3$

Module d'élasticité longitudinal (module de Young) :  $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$

Module de cisaillement :  $G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 81\,000 \text{ N/mm}^2$

Coefficient de dilatation thermique linéaire :  $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ par } ^\circ\text{C}$  ( $= 6,7 \times 10^{-6} \text{ par } ^\circ\text{F}$ )

Contrainte critique élastique de cisaillement pur (critère de Von mises) :

$$\tau_e = \frac{f_y}{\sqrt{3}} = 0.58 f_y$$

On se limite en construction à trois nuances principales (**S235** :  $f_y = 235 \text{ MPa}$  est utilisée pour des constructions courantes privées, **S275** :  $f_y = 275 \text{ MPa}$  constructions publiques et **S355** :  $f_y = 355 \text{ MPa}$  ouvrages spéciaux ouvrages d'art...).

Pour les profilés on adopte les caractéristiques mécaniques suivantes :

Caractéristiques mécaniques des profilés en fonction de leur épaisseur $t$	Nuances d'Aciers		
	<b>S.235</b>	<b>S.275</b>	<b>S.355</b>
<b>Limites élastiques <math>f_y</math> (MPa)</b>			
$t \leq 16 \text{ mm}$	235	275	355
$16 \text{ mm} < t \leq 40 \text{ mm}$	225	265	345
$40 \text{ mm} < t \leq 63 \text{ mm}$	215	255	335
<b>Contrainte de rupture en traction <math>f_u</math> (MPa)</b>			
$t \leq 3 \text{ mm}$	360/510	430/580	510/680
$3 \text{ mm} < t \leq 100 \text{ mm}$	340/470	410/560	490/630
<b>Allongement minimal moyen <math>\varepsilon</math></b>			
$t \leq 3 \text{ mm}$	18 %	15 %	15 %
$3 \text{ mm} < t \leq 150 \text{ mm}$	23 %	19 %	19 %

### 1.6.2 Caractéristiques géométriques des Profiles de construction

- $A$  : aire de la section en  $\text{cm}^2$
- $M$ : masse en  $\text{Kg/m}$
- $I_y$  : moment d'inertie par rapport à l'axe  $G_y$  en  $\text{cm}^4$
- $I_z$  : moment d'inertie par rapport à l'axe  $G_z$  en  $\text{cm}^4$
- $W_{ely}$  : module d'inertie élastique en  $\text{cm}^3$ ,  $W_{ely}=I_y/v$  tel que :  $v=h/2$
- $W_{elz}$  : module d'inertie élastique en  $\text{cm}^3$ ,  $W_{elz}=I_z/w$  tel que :  $w=b/2$
- $W_{ply}$  : module d'inertie plastique en  $\text{cm}^3$ ,  $W_{ply}=2 \times$  moment statique par rapport à l'axe de flexion  $G_y$
- $W_{plz}$  : module d'inertie plastique en  $\text{cm}^3$ ,  $W_{plz}=2 \times$  moment statique par rapport à l'axe de flexion  $G_z$
- $A_{vy}$  : section soumise au cisaillement en  $\text{cm}^2$