

1 Généralités

Le prix d'un ouvrage (lié à la masse de matière mise en œuvre) est fonction de «l'importance» de l'ouvrage (portée ...). Les solutions en construction métallique (CM) permettent de franchir de plus grandes portées que celles en béton armé (BA) ou précontraints (BP) (voir figure 1).

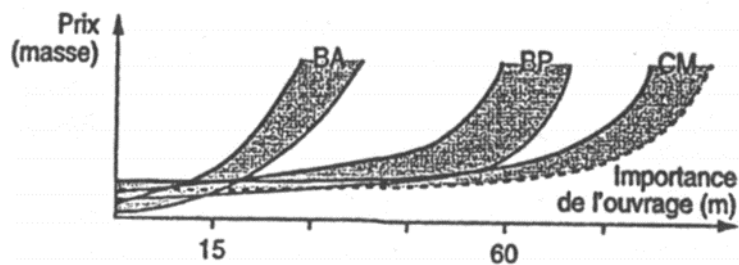


Fig. 1. Comparatif coût/portée entre différents matériaux de structure.

Le délai d'exécution d'un ouvrage en construction métallique est environ trois fois plus faible que celui du même ouvrage en béton armé du fait de la préfabrication intégrale en atelier, de la rapidité de montage et des installations de chantier réduites.

Ajoutons que l'acier est un matériau récupérable (démontage → transport → remontage (peu fréquent) ou récupération de l'acier en tant que matière première).

La conception des ouvrages en construction métallique pose deux types de problèmes :

- les instabilités élastiques (flambement, déversement et voilement),
- les assemblages (conception et calcul).

2 Le matériau acier

2.1 Définitions

Pour le métallurgiste, les aciers sont des alliages ferreux, aptes au façonnage à chaud. Comme remarque, il faut cependant distinguer qu'il y a 3 types d'alliages ferreux qui sont apparus dans l'histoire des métaux dans l'ordre suivant :

- a) **le fer** : c'est un métal mou et très malléable n'ayant pas d'application en charpente métallique. Sa teneur en carbone, élément essentiel dans la composition des alliages ferreux, est infinie.
 - b) **La fonte** : il existe plusieurs types de fontes dont les niveaux de résistances sont variables. Leur résistance à la traction est généralement faible. Dans la construction, la fonte fut
-

utilisée autrefois pour réaliser des éléments simples tels que des colonnes ou des poutres en arc. Mais actuellement, elle est rarement utilisée dans le domaine de la construction métallique. La fonte est mise en forme par moulage. Sa teneur en carbone varie approximativement entre 3 % et 6 %.

- c) **L'acier** : il y a plusieurs familles d'aciers. En fonction du domaine d'application, on distingue des aciers destinés exclusivement à la construction mécanique, des aciers destinés à la construction métallique ... etc. Les aciers sont mis en forme par moulage, par laminage ou par forgeage. Ils ont une teneur en carbone variant entre 0,05 % et 2 %.

Pour le charpentier, l'acier est certes un alliage, mais il est surtout un matériau structural présentant, par rapport aux autres matériaux structuraux tels que le béton armé, le bois ou la maçonnerie, des propriétés (homogénéité, isotropie) supérieures, des caractéristiques mécaniques (résistance, élasticité, ductilité,...) élevées et des caractéristiques géométriques (dimensions de l'ordre du mm), le rendant ainsi apte à dominer ou concurrencer les autres matériaux dans tous les domaines de la construction.

2.2 Composition

L'acier est un matériau constitué essentiellement de fer (*Fe*) et d'un peu de carbone (*C*), qui sont extraits de matières premières naturelles tirées du sous-sol (mines de fer et de charbon). Le carbone n'intervient, dans la composition, que pour une très faible part (généralement inférieure à 1 %). Le tableau 1 donne la teneur en carbone pour quelques désignations des aciers ainsi que leurs utilisations et la figure 2 le comportement de ces aciers sous une contrainte de traction jusqu'à la rupture.

Matériaux	Teneur en carbone	Utilisation
<i>Aciers doux</i>	$0,05 \% < C < 0,30 \%$	<i>Charpentes, boulons</i>
<i>Aciers mi-durs</i>	$0,30 \% < C < 0,60 \%$	<i>Rails, pièces forgées</i>
<i>Aciers durs</i>	$0,60 \% < C < 0,75 \%$	<i>Outils</i>
<i>Aciers extra-durs</i>	$0,75 \% < C < 1,20 \%$	<i>Outils, poinçons</i>
<i>Aciers sauvages</i>	$1,20 \% < C < 1,70 \%$	<i>Pièces spéciales</i>

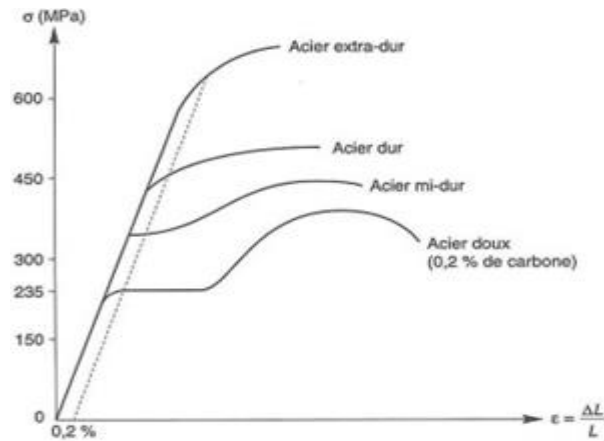


Figure 2 : diagramme contrainte-déformation des différents aciers.

Outre le fer et le carbone, l'acier peut comporter d'autres éléments qui leur sont associés :

- soit involontairement : phosphore (P), soufre (S), azote (N) ... qui sont des impuretés et qui altèrent les propriétés mécaniques et de soudabilité des aciers,
- soit volontairement et qui ont pour propriété d'améliorer les caractéristiques mécaniques des aciers (résistance à la rupture, dureté, limite d'élasticité, ductilité, résilience, soudabilité...). On parle, dans ces cas, d'aciers alliés. Ce sont notamment :
 - le silicium (Si) (pour la désoxydation),
 - le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le chrome (Cr), le tungstène (W), le vanadium (V), le molybdène (Mo), le titane (Ti)...etc. (pour augmenter les caractéristiques mécaniques),
 - le cuivre (Cu) (contre la corrosion)
 - l'aluminium (Al) (affinage du grain)

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.

2.3 Fabrication

L'acier est généralement obtenu par une opération en 2 phases :

- 1^{ère} phase : l'introduction et la combustion de minerai de fer, de coke et de castine (*Pierre calcaire que l'on mélange au minerai de fer pour faciliter la fusion*) dans un haut fourneau permet l'obtention de la fonte (matériau à plus de 1,7% de carbone) ;
 - 2^{ème} phase : il est procédé à la conversion de la fonte liquide en acier, à une température de 1500°C environ, sous insufflation d'oxygène. Cette opération s'effectue dans un
-

convertisseur et a pour objet de décarburer la fonte (*lui enlever le carbone*). L'acier obtenu ne possède plus qu'un faible pourcentage de carbone.

Par procédé de la coulée continue, l'acier est d'abord formé en demi-produits. L'acier liquide est coulé dans une lingotière (moule) en cuivre de section carrée ou rectangulaire selon le demi-produit fabriqué. Le métal commence à former une peau solide dans la lingotière violemment refroidie à l'eau. Il est tiré vers le bas par un jeu de rouleaux et achève par se solidifier. A la base de l'installation, on extrait une barre solide, rectangulaire ou carrée qui est découpée en tronçons de la longueur désirée. C'est les **brames** (futurs produits plats de 20 à 30 cm d'épaisseur) ou les **blooms** et **billetes** (qui ont jusqu'à 100 cm de côté et donnent les futurs produits longs) (voir figure 3).

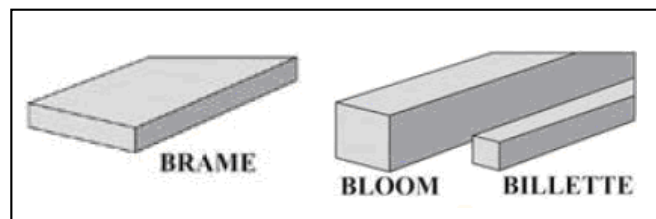


Fig. 3. Demi-produits en construction métallique

Enfin, une dernière étape consiste à laminier les demi-produits, c'est-à-dire à étirer et écraser le métal pour lui donner les dimensions et les formes souhaitées (figure 4). On fabrique ainsi des produits plats (plaques et tôles) à partir de brames et des produits longs (poutrelles, rails, barres, fils...) à partir de blooms et de billettes. Le laminage s'effectue à chauds (environ 1000 °C).

L'opération consiste à entraîner et écraser le métal chaud entre deux cylindres tournant en sens inverse l'un de l'autre. En répétant plusieurs fois l'opération, on obtient un produit de plus en plus mince et de plus en plus long, à la forme souhaitée.

Par exemple, à partir d'une brame de 10 m de long, 2 m de large et 25 cm d'épaisseur, on obtient une bobine de tôle de plus d'1 km de long et de 2 mm d'épaisseur.

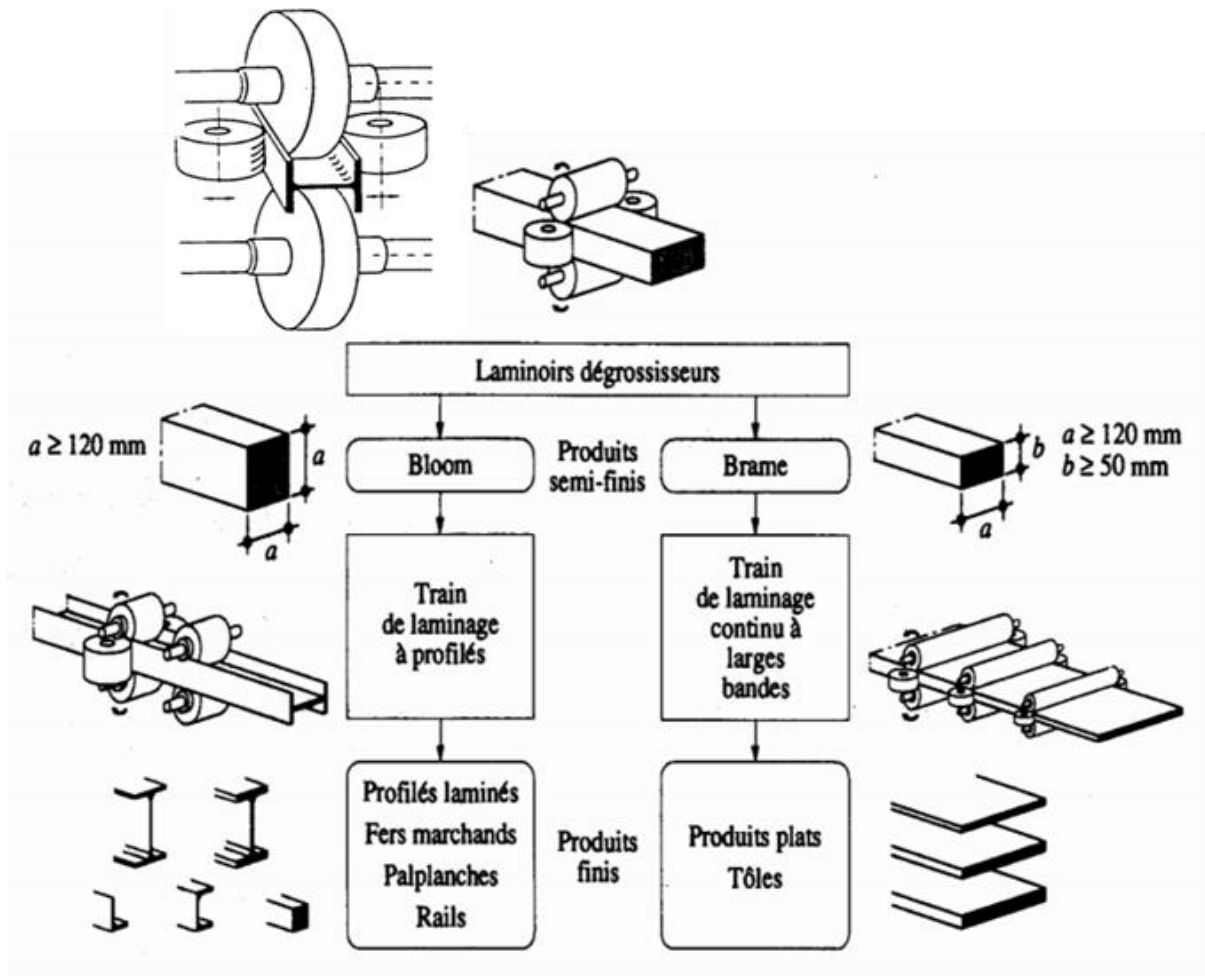


Fig. 4. Principales phases du laminage chaud.

Toutes les étapes de la fabrication de l'acier sont représentées sur la figure 5.

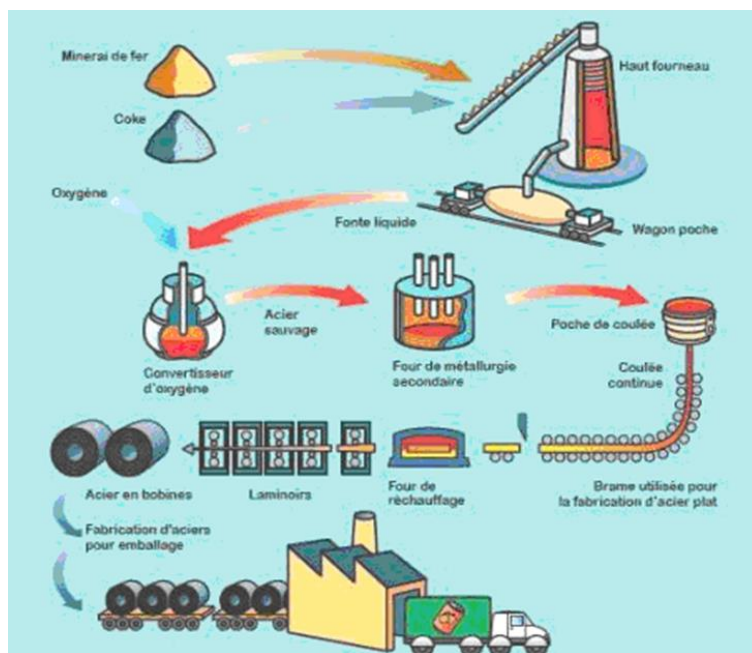


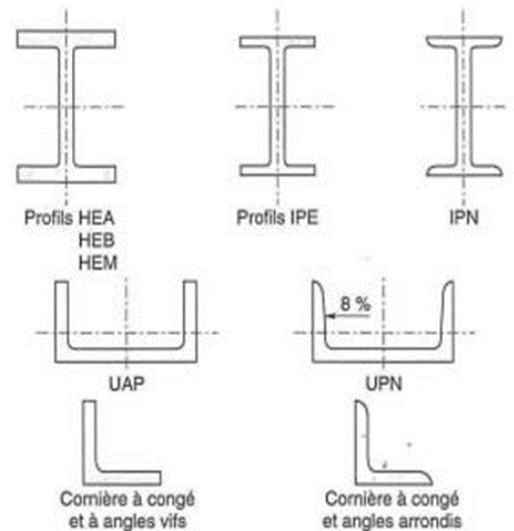
Fig. 5. Etapes de la fabrication de l'acier

2.4 Les produits sidérurgiques

Les produits sidérurgiques employés en construction métalliques sont obtenus par laminage à chaud. Leurs dimensions et caractéristiques sont normalisées et répertoriées sur catalogues.

Les produits longs ont une section transversale qui rappelle les lettres : I, H, Uetc. Le tableau 2 donne la forme géométrique de quelques profilés métalliques.

<i>Tableau 2. Forme géométriques de quelques profilés métalliques</i>	
<i>Profilés métalliques</i>	<i>Formes géométriques</i>
IPE	<i>Poutrelles de section transversale de forme I à ailes parallèles</i>
IPN	<i>Poutrelles de section transversale de forme I à ailes inclinées</i>
HE	<i>Poutrelles à ailes très larges</i>
UAP	<i>Poutrelles de section transversale de forme U à ailes parallèles</i>
UPN	<i>Poutrelles de section transversale de forme I à ailes inclinées</i>



Ces profilés sont caractérisés par :

- leur hauteur qui est supérieure ou égale 80 mm,
- leur âme qui est raccordée par des congés aux faces intérieures des ailes,
- leurs ailes sont généralement symétriques et de largeur égale,
- les faces extérieures des ailes qui sont parallèles.

3 Essais et contrôle des aciers

3.1 Introduction

Les essais normalisés de contrôle des aciers sont de deux types :

- Les essais destructifs, qui renseignent sur les qualités mécaniques des aciers. Ce sont :

Critères généraux de conception d'une charpente métallique

- l'essai de traction qui permet de mesurer le module d'élasticité longitudinal E , le coefficient de Poisson, les contraintes limites d'élasticité et de rupture, l'allongement à la rupture,
 - l'essai de dureté, qui étudie la pénétration d'une bille ou d'une pointe dans l'acier et qui définit des degrés de dureté (duretés Brinell, Rockwell, Vickers),
 - l'essai de résilience, qui permet de mesurer l'aptitude d'un acier à rompre par choc,
 - l'essai de pliage,
 - l'essai de fatigue...etc.
- Les essais non destructifs, qui renseignent sur la composition et la structure des aciers. Ce sont :
- La macrographie, c'est-à-dire l'examen visuel d'une surface polie traitée l'acide,
 - La micrographie, c'est-à-dire l'examen visuel au microscope des cristaux, qui permet de déterminer notamment la teneur en carbone,
 - La radiographie, par rayon X (en laboratoire) ou rayons γ (sur chantier, permet de déceler les défauts, cavités ou fissures internes des pièces, notamment des soudures,
 - Les ultrasons.

Nous nous contenterons d'expliquer uniquement l'essai de traction, qui est le plus classiques est le plus révélateur de données physiques.

3.2. Essai de traction

Il est pratiqué sur une éprouvette cylindrique, soumise à un effort de traction progressif, croissant de zéro à la rupture (Norme *NF A. 03101*). Un enregistrement graphique mesure l'allongement de l'éprouvette en fonction de l'effort de traction appliqué (ou de la contrainte). On obtient un diagramme effort- déformation, selon la figure ci-après. Ce diagramme se décompose en 4 phases (figure 6) :

- **Phase OA** : zone rectiligne, pour laquelle les allongements sont proportionnels aux efforts appliqués. C'est la zone élastique, qui est réversible, car si on cesse d'appliquer l'effort de traction, la barre revient à sa longueur initiale ($\Delta L/L = 0$).
 - **Phase AA'** : palier horizontal, qui traduit un allongement sous charge constante. Il y a écoulement du matériau. C'est la zone plastique. A partir de A, par exemple en M, si on supprime l'effort de traction, le retour à l'équilibre se fait selon une droite MM' , parallèle à OA, et la pièce conserve un allongement permanent OM' .
-

- **Phase A'B** : la charge croît à nouveau avec les allongements jusqu'au point B.
- **Phase BC** : l'allongement continue, bien que la charge soit décroissante, jusqu'au point C, qui correspond à la rupture. Dans cette dernière phase, la déformation plastique est localisée dans une faible portion de l'éprouvette et n'est plus homogène. Il y a striction.

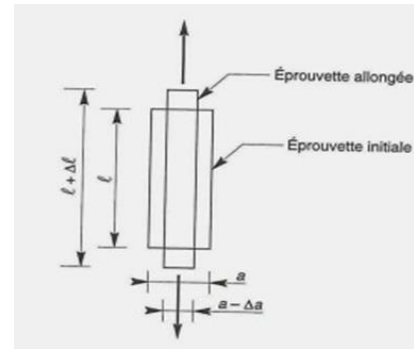
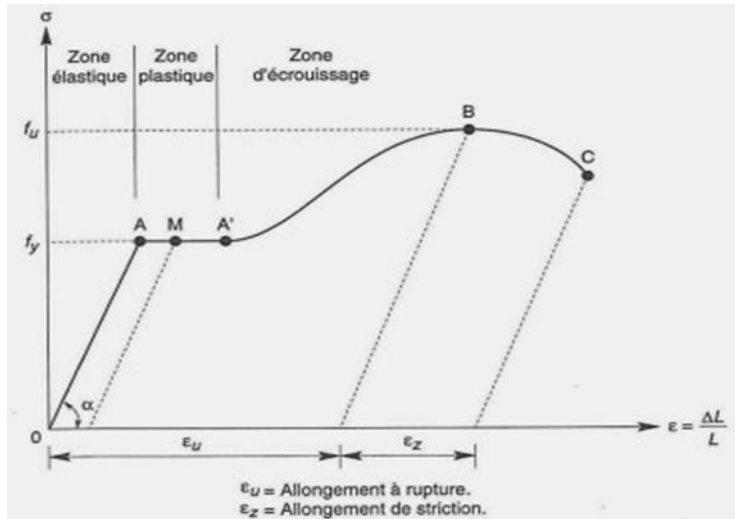


Fig. 6. Diagramme σ - ϵ de l'acier en traction

Ce diagramme permet de mesurer :

- la limite d'élasticité f_y qui est la contrainte à partir de laquelle les allongements deviennent permanents, et qui correspond sensiblement au seuil à partir duquel il n'y a plus proportionnalité entre contrainte et allongement, c'est-à-dire le point A. conventionnellement, la limite d'élasticité f_y est définie comme la contrainte correspondant à un allongement permanent de 0,2 %,
- la contrainte de rupture à la traction f_u , qui correspond au point B.
- le module d'élasticité longitudinal de l'acier E : $E = tg\alpha = \frac{\sigma}{\Delta L/L} = 210000MPa$
- l'allongement à la rupture A_R , allongement de striction A_Z et donc l'allongement total.
- le coefficient de Poisson $\mu = \frac{\Delta a}{a} = -\mu \frac{\Delta L}{L} \Rightarrow \mu = 0.30$
- Le module d'élasticité transversal de l'acier G : $G = \frac{E}{2(1+\mu)} = 81000MP$
- Le poids volumique : $\rho = 78,50 \text{ kN/m}^3$
- La contrainte limite élastique de cisaillement pur (critère de Von Mises) : $\tau_e = \frac{f_y}{\sqrt{3}}$

3.2 Propriétés des aciers normalisés

Les divers aciers de construction sont réglementés par la norme européenne EN 10025 (publié en octobre 1990). Cette norme définit les nuances d'acier, qui correspondent à leurs caractéristiques mécaniques. Elle concerne les aciers non alliés, laminés à chaud et destinés à la fabrication d'éléments de construction, soudés ou non, et qu'il s'agisse de produits plats aussi bien que de produits longs. Nous nous limitons dans la construction à trois nuances principales d'acier (S.235 dans la majorité des cas, S.275 et S.355 plus rarement : construction des ouvrages d'art ...etc.), qui correspondent aux exigences de calcul en plasticité.

3.2.1 Limite élastique et résistance à la traction

Les valeurs nominales de la limite d'élasticité f_y (correspondant à la limite supérieure d'écoulement) et de la résistance à la traction f_u (correspondant à la résistance maximale), selon le type d'acier, sont fournies dans le tableau 3 extrait des normes sur les produits évoqués 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.

3.2.2 Ductilité

Pour les aciers de structure, il est exigé une ductilité minimale (matériau ductile : Qui peut être allongé, étendu, étiré sans se rompre) exprimée en termes de limites comme suit :

- le rapport f_u/f_y (résistance à la traction minimale spécifiées f_u sur le limite d'élasticité minimale spécifiées 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) : $\geq 15\%$.
- La déformation ultime ε_u (qui correspond à la résistance à la traction f_u) $\geq 15 \varepsilon_y$ (qui est la déformation élastique = f_y / E).

Plasticité de l'acier : réserve de sécurité : Le palier de ductilité AA' (figure 6) est particulièrement important en construction métallique, car il présente une réserve de sécurité. En effet, il peut arriver que localement dans une structure, des pièces soient sollicitées au-delà de cette limite élastique. Elles disposent, dans ces cas, du palier AA' pour se décharger dans des zones avoisinantes. On dit qu'il y a adaptation plastique.

Critères généraux de conception d'une charpente métallique

Plus la teneur en carbone des aciers augmente, plus f_y augmente, plus le palier de ductilité se raccourcit et plus l'allongement rupture diminue. La sécurité est donc inversement proportionnelle aux taux de carbone. C'est pourquoi seuls les aciers doux sont autorisés en construction métallique.

Cette notion de plasticité/sécurité est très importante. En effet, lorsqu'une pièce est excessivement sollicitée, au-delà de la limite d'élasticité f_y , si elle est constituée en acier dur ou en fonte, elle va périr par rupture brutale, sans présenter au préalable de signe ou de déformation prémonitoire. En revanche, une pièce en acier doux va présenter de grandes déformations, qui vont prévenir du danger latent.

En outre, la zone surcontrainte va, en se plastifiant, se déformer, ce qui va provoquer le report des contraintes excessives sur des zones ou des pièces voisines non saturées. Les structures métalliques ont donc, grâce à la ductilité de l'acier, la faculté d'équilibrer les zones de contraintes, par ce qu'il est convenu d'appeler : *l'adaptation plastique*.

Alors que les règles CM66 ne tenaient que sommairement compte de cette possibilité pour les pièces fléchies (par l'introduction d'un coefficient d'adaptation plastique ψ), l'Eurocode, au contraire est établi sur la base de ce comportement élasto-plastique de l'acier.

<i>Tableau 3. Caractéristiques des aciers selon leurs nuances</i>				
<i>Caractéristiques mécaniques des aciers en fonction de leur épaisseur t</i>		<i>Nuances d'aciers</i>		
		S.235	S.275	S.355
Limites élastiques f_y (MPa)	$t \leq 16 \text{ mm}$	235	275	355
	$16 \text{ mm} < t \leq 40 \text{ mm}$	225	265	245
	$40 < t \leq 63 \text{ mm}$	215	255	335
Contrainte de rupture en traction f_u (MPa)	$t \leq 3 \text{ mm}$	360/510	430/580	510/690
	$3 \text{ mm} < t \leq 100 \text{ mm}$	340/470	410/560	490/630
Allongement minimal moyen ε	$t \leq 3 \text{ mm}$	18 %	15 %	15 %
	$3 \text{ mm} < t \leq 150 \text{ mm}$	23 %	19 %	19 %

4 Domaine d'utilisation

Critères généraux de conception d'une charpente métallique

Bâtiments industriels : bâtiments de grandes hauteurs et portées (avec ou sans ponts roulants).



Couvertures des bâtiments de grandes portées : constructions sportives, marchés, hangars, ateliers d'aviation, grandes surfaces ...



Ossatures des bâtiments à plusieurs étages



Critères généraux de conception d'une charpente métallique

Ponts et passerelles :



Tours et les mâts : pylônes des lignes électriques, de télécommunication ...



Constructions métalliques en tôle : réservoirs, silos, pipelines ...



Châteaux d'eau



Autres structures ...

