

Généralités sur l'acier

1. QU'EST-CE QUE L'ACIER ?

L'acier est le matériau de prédilection de l'architecture durable, créative et technique. Il cumule de multiples avantages pour la construction neuve, la rénovation ou l'évolution des bâtiments.

Avec l'acier, toutes les formes, toutes les dimensions sont permises. Les constructions acier sont modulables, libèrent de vastes espaces sans poteaux intermédiaires, sont faciles à entretenir et à réhabiliter et sont évolutives.

2. LES PROPRIÉTÉS DE L'ACIER

Les propriétés d'un acier varient énormément en fonction de sa composition chimique et du traitement thermomécanique appliqué pendant le processus de fabrication. Ces deux caractéristiques déterminent sa microstructure et les traitements de surface interviennent également dans ses propriétés.

Des produits en acier aux caractéristiques mécaniques et géométriques

Les produits en acier utilisés en construction métallique *présentent deux types de caractéristiques* qui interviennent dans les calculs de résistance des matériaux. Il s'agit d'une part des caractéristiques mécaniques intrinsèques, fonction de la nuance de l'acier et d'autre part des caractéristiques géométriques et d'inertie propres au produit et qui dépendent de ses dimensions et de sa géométrie.

Les aciers, une composition chimique à l'épreuve de la résistance

Les aciers sont également caractérisés par leur composition chimique qui n'intervient pas directement en résistance des matériaux mais qui joue un rôle important notamment en matière de soudabilité et dans le comportement à la corrosion des ouvrages métalliques.

3. LA FABRICATION DE L'ACIER

Les métaux ferreux sont connus depuis la plus haute antiquité sous la dénomination de « fer ». L'âge du fer sert à désigner le tournant décisif de la civilisation humaine après l'âge de la pierre et l'âge du bronze.

Si l'on se place du point de vue de la chronologie historique, on peut dire que la production industrielle de l'acier est relativement récente puisqu'elle remonte à une centaine d'années environ.

4. LES GRANDES ÉTAPES

La fabrication des aciers se décompose schématiquement en 6 étapes regroupées en trois parties : la préparation des matières premières, le travail dans l'aciérie et la transformation au laminoir.



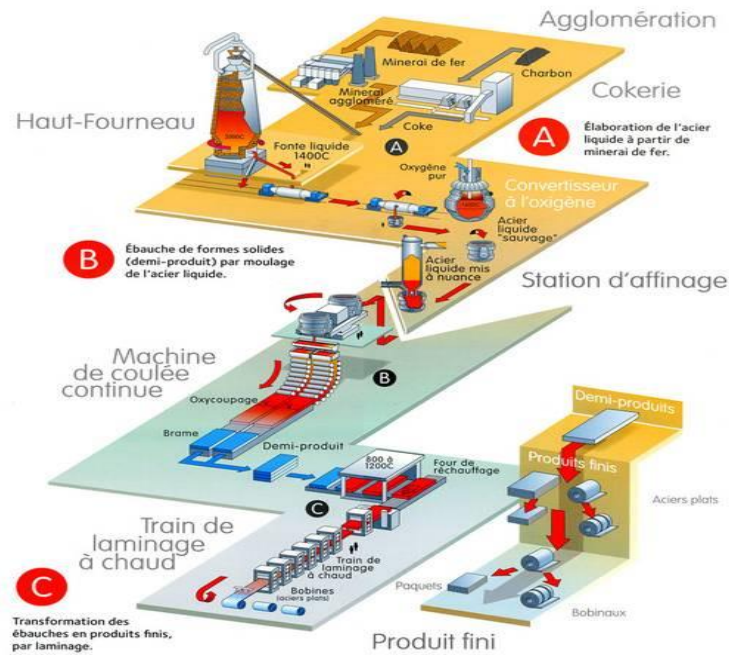
On distingue deux filières d'approvisionnement de l'aciérie : l'une dite *filière fonte*, alimentant les hauts fourneaux, et l'autre dite *filière électrique*, alimentant les fours électriques.

4.1. L'ACIER DE LA FILIÈRE FONTE

Les différences fondamentales qui caractérisent les aciers de la filière fonte par rapport à la filière électrique sont qu'ils sont créés à partir de deux matières premières principales, **le minerai de fer et le charbon**.

La production d'acier liquide, avant coulée, va se faire à partir des hauts fourneaux et de la fonte liquide à 1400°C. Pour réaliser cette fonte, il est nécessaire de préparer les matières premières dans une usine constituée d'une cokerie et d'une usine d'agglomération. La filière fonte est essentiellement mise en œuvre dans ce qu'on appelle les usines intégrées.

Le schéma suivant représente, de façon schématique, la chaîne complète de cette filière depuis l'usine d'agglomération où sont préparées les matières premières jusqu'aux produits finis.

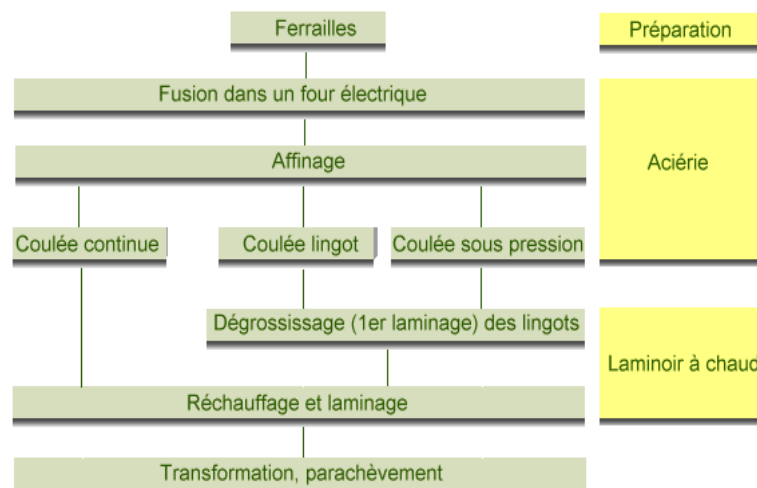


4.2. L'ACIER DE LA FILIÈRE ÉLECTRIQUE

Les aciers de la filière électrique sont essentiellement créés à partir d'une source d'aciers recyclés. Ces ferrailles sont récupérées et triées dans un parc à ferrailles qui va alimenter un four électrique à arc.

L'abondance de l'énergie électrique dans les pays modernes et l'organisation de la filière de récupération et de tri, ont permis d'élargir l'utilisation de cette filière à la production d'aciers de tout type et, de plus en plus, aux aciers de qualité.

Cette filière est en perpétuelle évolution technique et représente une part de plus en plus importante de la fabrication d'acier dans le monde (41% en Europe en 2010).



4.3. LA STATION D'AFFINAGE ET MISE À NUANCE

À la sortie du convertisseur ou du four électrique, l'acier doit encore être modifié pour avoir les qualités requises au niveau du produit final. L'acier dit « sauvage » va être mis à nuance dans la station d'affinage.

L'affinage est l'objet des opérations de métallurgie en poche ou de métallurgie secondaire. Il s'agit principalement d'ajuster la teneur des différents éléments d'alliage et d'optimiser la teneur en impuretés, ainsi que la forme sous laquelle elles sont présente dans l'acier avant solidification.

4.4. LA COULÉE

La coulée est l'opération qui fait passer le métal de l'état liquide à l'état solide et qui permet d'obtenir un demi-produit solide dont la forme est plus ou moins proche de la géométrie du produit final. Pour cela, le métal liquide est versé dans différents types de moules suivant le type de procédé de coulée (lingotières) et refroidi pour être solidifié.

4.4.1. LES PRODUITS ISSUS DE LA COULÉE

En fonction du type de coulée effectuée, on distingue deux catégories de produits : *les lingots et les demi-produits*.



a) LINGOTS

Ce sont des produits obtenus par coulée d'acier liquide dans un moule de forme appropriée aux procédés de transformation.

Suivant leur section droite, on distingue :

Les lingots dont la section droite peut être :

- ✓ carrée ou rectangulaire (la largeur étant inférieure à deux fois l'épaisseur).
- ✓ polygonale, ronde, ovale ou profilée suivant le profil à laminier.

Les lingots dits plats dont la section est rectangulaire, la largeur étant supérieure ou égale à deux fois l'épaisseur.



b) DEMI-PRODUITS

Il existe 5 grands types de demi-produit en fonction de leurs dimensions et formes géométrique.

- *Section carrée*

Source : NF EN 10079 décembre 1992. Classement AFNOR : A 40-001. Demi-produits de côté supérieur ou égal à 50 mm.

Cette limite peut être inférieure pour certains types d'aciers fortement alliés tels que les aciers rapides par exemple.



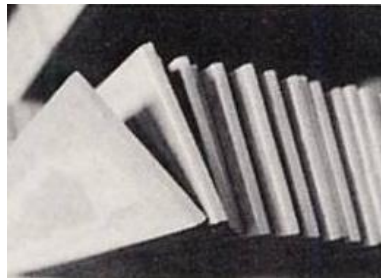
- *Section rectangulaire*

Source : NF EN 10079 décembre 1992. Classement AFNOR : A 40-001. Demi-produits de section supérieure ou égale à 2 500 mm² et dont le rapport largeur sur épaisseur est inférieur à 2.



- *Plats*

Source : NF EN 10079 décembre 1992. Classement AFNOR : A 40-001. Demi-produits dont l'épaisseur est en général supérieure ou égale à 50 mm et dont le rapport largeur sur épaisseur est supérieur ou égal à 2.



- *Ronds*

Source : NF EN 10079 décembre 1992. Classement AFNOR : A 40-001. Demi-produits de section circulaire bruts de coulée continue ou bruts de forgeage.



- Ebauches pour profilés

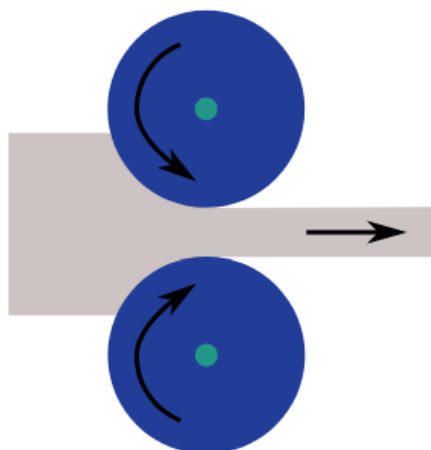
Source : NF EN 10079 décembre 1992. Classement AFNOR : A 40-001. Ces ébauches sont destinées à la fabrication de profilés ou de barres de section profilée et, de ce fait, présentent une section préformée.

La section de ces demi-produits est en général supérieure à 2 500 mm².

**4.5. LE LAMINAGE**

Le laminage est un procédé de déformation plastique continue, obtenue par les cylindres du laminoir. Cette déformation est caractérisée par un amincissement et un allongement de la plaque laminée par les passages successifs entre les cylindres. Le coefficient de corroyage est le rapport entre la section du produit avant et après laminage.

Le laminage modifie la structure cristalline primaire du lingot, affine le grain, homogénéise la composition et améliore les caractéristiques, surtout dans le sens longitudinal, en raison de l'orientation donnée aux structures cristallines.



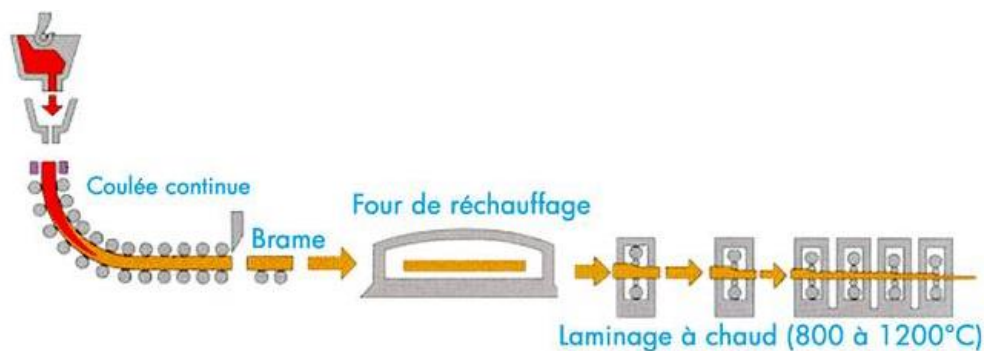
Principe du laminage : le métal subit une réduction d'épaisseur par écrasement entre les deux cylindres.

4.5.1. LE LAMINAGE À CHAUD

La sidérurgie livre aujourd'hui essentiellement des produits finis. C'est le laminage à chaud qui va donner à un demi-produit issu de la coulée, une forme géométrique donnée (largeur, épaisseur, longueur).

La forme de ce demi-produit est obtenue par son passage dans un train de laminage et constitue ainsi le produit fini.

Le laminage à chaud permet de produire toutes les grandes familles de produits comme les plaques, les bobines, les carrés, les ronds, les fils, les poutrelles, etc. On distinguera 4 étapes successives : le réchauffage, le dégrossissage, les finisseurs et le refroidissement avant les opérations de finissage voire de parachèvement ou de traitement anti corrosion.

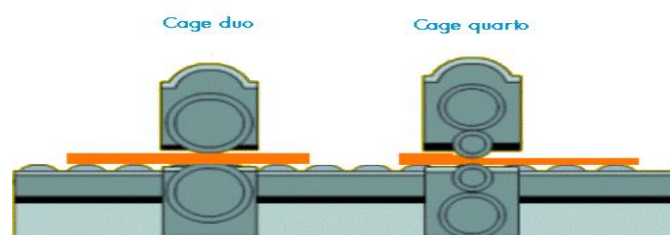


a) FOURS DE RÉCHAUFFAGE

En amont des laminoirs à chaud, on trouve toujours des fours de réchauffage dans lesquels le métal est porté à une température permettant sa transformation dans des conditions suffisantes de qualité, productivité et coût.

b) DÉGROSSISSEUR

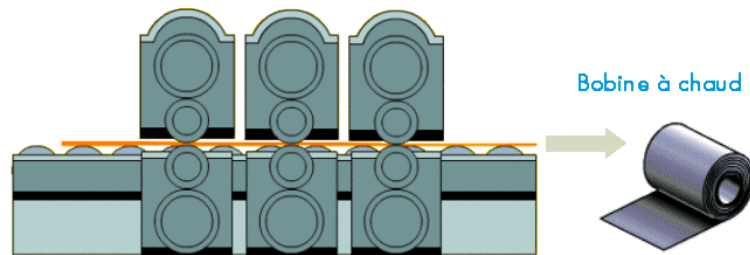
Le dégrossisseur permet de passer de la brame à une ébauche d'épaisseur et de largeur convenable.



c) FINISSEURS

Le laminoir dégrossisseur transforme le produit sorti du dégrossisseur en bobine de métal enroulée à chaud ayant une épaisseur de 2 cm maximum.

La bande est refroidie à l'eau pour atteindre la bonne température, avant d'être bobinée.



d) LE PARACHÈVEMENT

Le parachèvement consiste à travailler les produits de telle sorte qu'ils répondent au cahier des charges du client. Il peut s'agir de découpage, cintrage, grenailage, mise en peinture, etc.

4.5.2. LE LAMINAGE À FROID

Le laminage à froid permet d'apporter à une bande laminée à chaud la géométrie souhaitée, une microstructure particulière et un état de surface adapté aux futurs traitements ou recuits de l'acier.

L'usine (de laminage) à froid ne fait pas que du laminage à froid, mais met en œuvre un ensemble de procédés qui permettent de passer de la bande laminée à chaud à une large gamme de produits finis destinés à des marchés très variés (tôles fines revêtues ou non pour l'automobile, l'électroménager, le mobilier métallique, le bâtiment, l'emballage, etc.). Dans l'ordre de la fabrication, on distingue le décapage, le laminage à froid proprement dit, le recuit, les procédés de revêtement, les opérations de finissage

a) LE DÉCAPAGE

En sortie du laminoir à chaud, la bobine est recouverte d'une fine couche (quelques μm) de calamine. Il est nécessaire d'enlever cette fine pellicule qui serait source de problèmes lors de l'opération ultérieure de laminage à froid.

b) LES CAGES DE LAMINAGE

Le laminage à froid permet d'obtenir l'épaisseur finale de la bande par passage de la tôle décapée entre des cylindres en présence d'efforts élevés simultanément en pression et traction.

c) LE RECUIT

La fonction du recuit est de régénérer la structure cristalline du métal après laminage à froid.

Au cours du laminage à froid, celui-ci a produit un durcissement et une perte de ductilité du métal. Il est devenu dur et cassant, et impropre à une utilisation. Ce recuit de recristallisation a pour objet de conférer à l'acier une taille de grain permettant l'obtention des caractéristiques mécaniques finales du produit.

d) LE SKIN PASS

Pour les aciers comportant du carbone et de l'azote (éléments interstitiels), le métal après recuit présente un palier de limite d'élasticité. Le skin-pass a pour objectif d'effacer le palier de limite d'élasticité et de fixer les caractéristiques mécaniques.

e) PRODUITS REVÊTUS

En présence d'humidité, l'acier au carbone se corrode et tend à retourner à son état naturel, d'oxydes et d'hydroxydes de fer. C'est pourquoi il est nécessaire de le protéger pour assurer sa durabilité dans le temps.

5. Base de Calcul :

5.1. Exigences fondamentales :

Une structure doit être calculée et réalisée de manière à satisfaire certaines conditions de résistance et de comportement vis-à-vis des actions qui lui seront appliquées au cours de sa durée de vie. Il s'agit donc de s'assurer que :

- La structure dans son ensemble ou un de ses éléments puisse résister aux **différentes actions** avec une probabilité acceptable.

- La structure doit également résister à d'éventuelles **actions accidentelles** (séisme, explosion, choc...)
- La structure **ne doit pas subir des déformations** ou des vibrations susceptibles de gêner le bon fonctionnement de l'ouvrage.

5.2. Notion de l'état limite :

- Les états limites sont des états au-delà desquels la structure ne satisfait plus aux exigences de performance pour lesquelles elle a été conçue. Les états limites sont classés en :
- **Les états limites ultimes** sont associés à l'effondrement de la structure, ou à d'autres formes de ruine structurale qui peuvent mettre en danger la sécurité des personnes.
- **Les états limites de service** sont associés à l'esthétique de la structure (fissuration nuisible)

5.3. Les actions ou les charges :

Une action désigne aussi bien des charges appliquées à la structure. Trois types d'action sont à considérer :

- **les actions permanentes G** : poids propre de la structure, poids des équipements ;
- **les actions variables d'exploitation Q** : surcharges d'exploitation, neige, vent, effets thermiques ;
- **les actions accidentelles A** : charges d'explosions, chocs divers, séismes, feu, etc.

5.4. Les combinaisons d'actions :

Une combinaison d'actions résulte de l'application simultanée :

- des actions permanentes ;
- d'une action variable dite de base ;
- des actions variables dites d'accompagnement

a) Combinaison aux états limite ultime ELU

Combinaison fondamentale :

Elle comprend les actions permanentes G , une action variable **de base** Q_1 avec sa valeur nominale et éventuellement d'autres actions variables **d'accompagnement** Q avec leurs valeurs de combinaison $\psi_0 \cdot Q$.

$$\sum \gamma_G \cdot G + \gamma_{Q1} \cdot Q_1 + \sum \gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot Q$$

Combinaison simplifiée :

$$\sum \gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q \text{ ou } \sum \gamma_G \cdot G + 0.9 \sum \gamma_Q \cdot Q$$

b) Combinaison aux états limite service ELS

• **Combinaisons rares :**

$$\sum G + Q_1 + \sum \psi_0 \cdot Q$$

• **Combinaisons fréquentes :**

$$\sum G + \psi_1 \cdot Q_1 + \sum \psi_2 \cdot Q$$

• **Combinaisons quasi-permanentes :**

$$\sum G + \sum \psi_2 \cdot Q$$

Coefficients partiels de sécurité γ

	Actions permanentes	Actions variables
Effet défavorable	$\gamma_G = 1.35$	$\gamma_Q = 1.50$

Coefficients de combinaison ψ

		ψ_0	ψ_1	ψ_2
Charge d'exploitation Q	Habitations, résidentiels et bureaux	0.7	0.5	0.3
	Commerces et lieux de réunions	0.7	0.7	0.6
	Stockage	1.0	0.90	0.80
Neige S	$H > 1000m$	0.7	0.5	0.2
	$H < 1000m$	0.5	0.2	0
Vent W		0.6	0.2	0

6. Classification des sections transversales

6.1. Notion de classification des sections

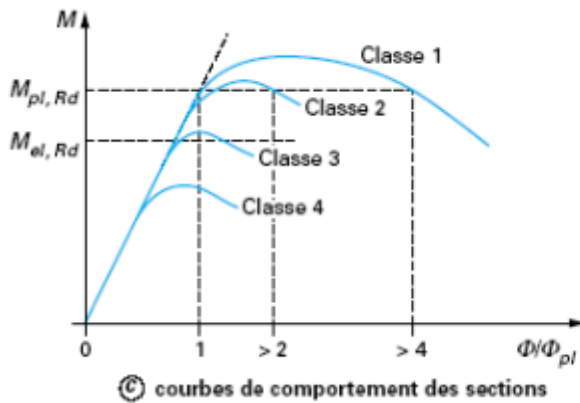
- Un élément de plaque mince comprimée peut **“voiler localement”** prématurément.
- **Ce voilement local peut limiter la résistance de la section** en empêchant l'atteinte de la limite d'élasticité.
- La **notion de classe** de section permet d'appréhender ce phénomène en limitant les rapports largeur sur épaisseur des éléments de plaque comprimée.



L'Eurocode 3 a instauré une classification des sections transversales, en fonction de critères divers :

- Elancement des parois,
- Résistance de calcul,
- Capacité de rotation plastique,
- Risque de voilement local, et

Performance croissante ↑	Classe	Capacité des sections transversales
	1	Section pouvant former une rotule plastique avec la capacité de rotation requise pour une analyse plastique
	2	Sections pouvant développer leur moment de résistance plastique, mais avec une capacité de rotation limitée
	3	Section dont la contrainte calculée sur la fibre extrême comprimée de l'élément en acier peut atteindre la limite élastique, mais dont le voilement local est susceptible d'empêcher le développement du moment de résistance plastique
	4	Sections dont la résistance au moment fléchissant ou à la compression doit être déterminée avec prise en compte explicite des effets de voilement local



6.2 Rapports largeur/épaisseur maximaux pour âmes (parois internes perpendiculaires à l'axe de flexion)

(a) Âmes : (parois internes perpendiculaires à l'axe de flexion)

Classe	Ame fléchée	Ame comprimée	Ame en flexion composée	
Distribution de contraintes dans la paroi (compression positive)				
1	$d/t_w \leq 72 \epsilon$	$d/t_w \leq 33 \epsilon$	Quand $\alpha > 0,5$: $d/t_w \leq 396 \epsilon / (13 \alpha - 1)$ Quand $\alpha < 0,5$: $d/t_w \leq 36 \epsilon / \alpha$	
2	$d/t_w \leq 83 \epsilon$	$d/t_w \leq 38 \epsilon$	Quand $\alpha > 0,5$: $d/t_w \leq 456 \epsilon / (13 \alpha - 1)$ Quand $\alpha < 0,5$: $d/t_w \leq 41,5 \epsilon / \alpha$	
Distribution de contraintes dans la paroi (compression positive)				
3	$d/t_w \leq 124 \epsilon$	$d/t_w \leq 42 \epsilon$	Quand $\psi > -1$: $d/t_w \leq 42 \epsilon / (0,67 + 0,33\psi)$ Quand $\psi \leq -1$: $d/t_w \leq 62 \epsilon (1 - \psi) / \sqrt{-\psi}$	
$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y (N/mm ²)	235	275	355
	ϵ	1	0,92	0,81

6.3. Rapports largeur/épaisseur maximaux pour parois de **semelles en console**

(b) Parois semelles en console :

Classe	Type de section	Paroi comprimée	Paroi en flexion composée		
			bord comprimé	bord tendu	
Distribution de contraintes dans la paroi (compression positive)					
1	laminées soudées	$c/t_f \leq 10 \epsilon$ $c/t_f \leq 9 \epsilon$	$c/t_f \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$ $c/t_f \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t_f \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$ $c/t_f \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
2	laminées soudées	$c/t_f \leq 11 \epsilon$ $c/t_f \leq 10 \epsilon$	$c/t_f \leq \frac{11\epsilon}{\alpha}$ $c/t_f \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t_f \leq \frac{11\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$ $c/t_f \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
Distribution de contraintes dans la paroi (compression positive)					
3	laminées soudées	$c/t_f \leq 15 \epsilon$ $c/t_f \leq 14 \epsilon$	$c/t_f \leq 23 \epsilon \sqrt{k_\sigma}$ $c/t_f \leq 21 \epsilon \sqrt{k_\sigma}$ Pour k_σ voir tableau 5.3.3		
$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$		f_y (N/mm ²)	235	275	355
		ϵ	1	0,92	0,81

6.4. Classe des sections :

La classe de la section est donnée par la valeur maximale des classes de la semelle et de l'âme

Exemple :

Classe de la semelle 1.

Classe de l'âme 3.

Classe de la section est de classe 3.

Semelle comprimée	Âme fléchie	Âme comprimé
<p>Classe de la semelle :</p> $\frac{c}{t_f} \leq 10\varepsilon : \text{classe 1.}$ $\frac{c}{t_f} \leq 11\varepsilon : \text{classe 2.}$ $\frac{c}{t_f} \leq 15\varepsilon : \text{classe 3.}$	<p>Classe de l'âme :</p> $\frac{d}{t_w} \leq 72\varepsilon : \text{classe 1.}$ $\frac{d}{t_w} \leq 83\varepsilon : \text{classe 2.}$ $\frac{d}{t_w} \leq 124\varepsilon : \text{classe 3.}$	<p>Classe de l'âme :</p> $\frac{d}{t_w} \leq 33\varepsilon : \text{classe 1.}$ $\frac{d}{t_w} \leq 38\varepsilon : \text{classe 2.}$ $\frac{d}{t_w} \leq 42\varepsilon : \text{classe 3.}$

