

SOMMAIRE

Chapitre 1 : Aciers de construction	1
Chapitre 2 : Produits sidérurgiques	11
Chapitre 3: Bases de calcul des charpentes en acier	24
Chapitre 4 : Barres tendues	30
Chapitre 5 : Barres comprimées – Flambement simple	35
Chapitre 6 : Poutres fléchies : flexion simple ou déviée	45
Chapitre 7 : Poutres fléchies : Déversement en flexion simple	
Chapitre 8 : Voilement des parois des poutres	
Chapitre 9 : Composants en flexion composée : Poteaux	
Chapitre 10 : Conception et calcul des assemblages	

Chapitre 1

ACIERS DE CONSTRUCTION**I. GENERALITES****11. Introduction**

L'acier entre dans la réalisation de nombreux ouvrages de travaux publics (ponts métalliques, passerelles métalliques, trémies, ...) et de bâtiments (immeubles à ossature métallique, gratte-ciel, ...) et forme ainsi un mode de construction particulier: la charpente métallique.

En tant que matériaux, les aciers de construction se présentent sous plusieurs catégories, couvrant chacune plusieurs nuances, ces dernières chacune couvrant plusieurs qualités. En tant que produits, ils sont disponibles sous diverses formes et profils.

Par comparaison aux autres matériaux de construction, tels que le béton armé, le bois ou la maçonnerie, les aciers de construction ont des propriétés physiques (homogénéité, isotropie) meilleures, des caractéristiques mécaniques (résistance, élasticité, ductilité...) plus élevées et les produits en acier ont des caractéristiques géométriques (dimensions de l'ordre du mm) plus fines.

Les problèmes que posent les aciers au charpentier, quant à leur emploi, sont essentiellement les problèmes de choix et de confirmation du choix effectué (essais mécaniques). Le choix porte principalement sur la catégorie, sur la nuance et sur la qualité d'acier qui, en fonction des données du projet, conviennent le mieux à une pièce ou un ensemble de pièces de la structure métallique d'un ouvrage. Il s'agit donc d'effectuer, parmi la grande diversité des aciers de construction, un choix raisonné, sinon éclairé, des matériaux à employer. Une fois le choix effectué, il s'agira pour le charpentier de confirmer, par le truchement des essais et tests, que l'acier utilisé possède effectivement les caractéristiques de l'acier choisi. Par ailleurs, il faut veiller et, le cas échéant, prendre toutes les mesures nécessaires, pour que toutes caractéristiques et propriétés initiales de l'acier choisi et utilisé ne soient pas altérées en cours de fabrication (par les effets thermiques du soudage par exemple) ou en cours d'exploitation.

En phase de dimensionnement des composants d'une structure, le choix porte sur le profil et la taille du produit sidérurgique qui, en fonction des sollicitations, convient comme section transversale de ces composants.

12. Définitions

Les aciers sont des alliages ferreux, obtenus par fusion d'un aggloméré de minerai de fer et de charbon et combinant aux 2 éléments chimiques essentiels que sont le fer et le carbone, des éléments liés et des éléments d'alliage ou d'addition.

Le terme alliage est un terme appartenant au lexique de la métallurgie (ou chimie des métaux). Il existe 3 types d'alliages ferreux :

Le fer: C'est un métal mou, n'ayant pas d'application en charpente métallique. En toute rigueur, le terme fer désigne un élément chimique pur et non un alliage. La teneur en carbone de ce métal est infime. Elle est souvent inférieure à 0.05 %.

La fonte: C'est un métal dur et cassant. Il existe plusieurs types de fontes. Leur résistance en traction est relativement faible. Dans le domaine de la construction, la fonte fut utilisée autrefois sous forme de composants simples et isolés tels que colonnes

ou poutres en arc, travaillant en compression. Actuellement, elle est rarement utilisée. La fonte est mise en forme par moulage. Sa teneur en carbone varie approximativement entre 3% et 6%.

L'acier: Le terme acier est, en fait, un terme générique: il existe plusieurs variétés d'acier ayant des usages et domaines d'application différents et qui ne sont donc pas interchangeables. En pratique, le terme est toujours couplé à un mot ou une expression qui précise l'usage. Par exemple, les aciers utilisés dans le domaine des constructions civiles ou industrielles sont dits : **aciers de construction (charpentes)**, aciers d'armature (béton armé), aciers de précontrainte (béton précontraint).

Les aciers sont mis en forme par laminage ou par forgeage. Ils ont une teneur en carbone variant entre 0.05% et 2%.

Dans ce qui suit, seuls les aciers de construction seront considérés.

13. Composition chimique des aciers de construction

La composition chimique des aciers de construction alliés et non alliés comprend des

- éléments essentiels

- le fer Fe (# 95 %)
- le carbone C (# 0.15 % ~ 0.30 %)

La teneur en carbone a une grande influence sur les caractéristiques mécaniques des aciers. Une variation de celle-ci, même faible, modifie sensiblement ces caractéristiques. Quand la teneur en carbone est relativement élevée, la résistance, et corrélativement la dureté, augmentent par contre la résilience et la ductilité diminuent.

- éléments liés, présents sous forme d'impuretés

- le soufre S (# 0.03 %)
- le phosphore P (# 0.03 %)

Ces éléments proviennent du minerai de fer qui a servi à la production des aciers. Ils altèrent les propriétés du matériau. Un acier ayant une teneur en soufre élevée peut être source de désordres graves (arrachement lamellaire, fragilisation à chaud) s'il venait à être malencontreusement utilisé dans une charpente. Le phosphore en proportion importante accroît la fragilité à froid des aciers et les rend très cassant à basse température. Leur teneur est réduite lors du processus de fabrication et ramenée à des proportions aussi faibles que la qualité d'acier désirée l'exige.

- des éléments d'addition

- le manganèse Mn ($0.50\% < \text{Mn} < 1.65\%$)
- le silicium Si (# 0.60 %)
- le chrome Cr, le molybdène, le niobium, le titane,...

Ces éléments sont volontairement rajoutés par le sidérurgiste pour améliorer telle ou telle propriété mécanique (résistance, soudabilité, ductilité, résilience...) compte tenu des exigences des constructeurs.

Le manganèse a une influence similaire à celle du carbone sauf que si la teneur en Mn est augmentée, la résilience de l'acier augmente. Lors de la production de l'acier le couple (C, Mn) est dosé de façon optimale car de ce dosage dépend l'obtention des caractéristiques de résistance, dureté, ductilité et résilience désirées.

Il est souvent très utile de connaître la composition chimique de l'acier employé dans une charpente. Elle permet d'apprécier la soudabilité de cet acier. A cet effet, une formule empirique, dite 'formule du carbone équivalent' et un critère d'appréciation de la soudabilité de l'acier ont été élaborés (voir § soudabilité).

II. ELABORATION DES ACIERS

21. Principes

Les principes qui régissent les processus d'élaboration des aciers et de fabrication des produits en acier sont du domaine de la métallurgie et de la sidérurgie.

L'acier est fabriqué à partir de matières premières (minerai ou ferrailles) dans de vastes complexes sidérurgiques (hauts fourneaux, aciéries, laminaires) et est livré sous formes de produits de formes et de tailles diverses. La sidérurgie fournit plusieurs gammes de produits. On distingue les produits plats, en feuilles ou en bobines, revêtus ou non et les produits longs (barres, profilés, tubes, fils,...).

Les produits peuvent être forgés, moulés ou fabriqués à partir de poudres d'alliages. Mais c'est surtout le laminage qui est le procédé de mise en forme commun à de nombreux produits et en particulier ceux employés en charpentes.

22. Processus d'élaboration

La fabrication se fait suivant un processus de transformation en trois étapes, comme l'indique la figure 1. On passe successivement des matières premières à l'acier liquide, puis de l'acier liquide aux demi-produits, et enfin des demi-produits aux produits finis.

Etape 1: Des matières premières à l'acier liquide ou métallurgie d'élaboration

Par une succession d'opérations, la première étape sert à purifier, doser et combiner les éléments chimiques qui feront les catégories, nuances et qualités de l'acier et donc à la mise à la composition chimique. Deux procédés sont possibles.

1. Filière fonte (ou haut fourneau)

Préparation du minerai aggloméré à partir du minerai brut (broyage, criblage), homogénéisation puis chargement, avec de la chaux et du coke, sur la chaîne d'agglomération.

Élimination des impuretés du minerai pour libérer le fer pur : on obtient de la fonte et un sous-produit, le laitier de haut fourneau.

Élimination des éléments indésirables de la fonte.

Ajustage de la composition chimique de l'acier.

2. Filière ferrailles (ou four électrique)

Préparation (tri, calibrage, broyage) et stockage des ferrailles provenant de la récupération.

Fusion de la matière première.

Ajustage de la composition chimique de l'acier.

La filière ferrailles fait l'économie des équipements lourds de la filière fonte tels que les hauts fourneaux et demande donc moins d'investissements. Elle est également moins consommatrice d'énergie.

Etape 2: De l'acier liquide aux demi-produits ou de transformation

Une fois élaboré, l'acier est recueilli à l'état liquide puis transporté jusqu'au lieu de coulée. Cette étape assure la solidification de l'acier et l'ébauche des formes. Là aussi, deux procédés existent :

1. La coulée en lingots

Coulage de l'acier dans des moules en fonte pour solidification.

Démoulage des lingots après solidification puis réchauffage.

Transformation par écrasement au laminoir.

Obtention de brames (produits plats) et/ou de blooms (produits longs).

2. La coulée continue

Coulage de l'acier dans une lingotière de section carrée ou rectangulaire.

Début de solidification par refroidissement brutal puis extraction vers le bas de la lingotière permettant l'achèvement de la solidification.

Récupération d'une barre solide puis découpage en tronçons à la longueur désirée.

La coulée en lingots est de moins en moins utilisée et cède le pas à la coulée continue.

Etape 3: Des demi-produits aux produits finis

Cette dernière étape consiste principalement à étirer et écraser le métal chauffé pour lui donner les formes et dimensions souhaitées : c'est le laminage à chaud. A l'issue de cette opération, on obtient les produits finis qui peuvent être livrés et utilisés en l'état ou bien faire l'objet d'un parachèvement. Pour une grande partie des produits plats, l'opération est complétée par un laminage à froid, réduisant davantage l'épaisseur pour obtenir d'autres gammes de produits.

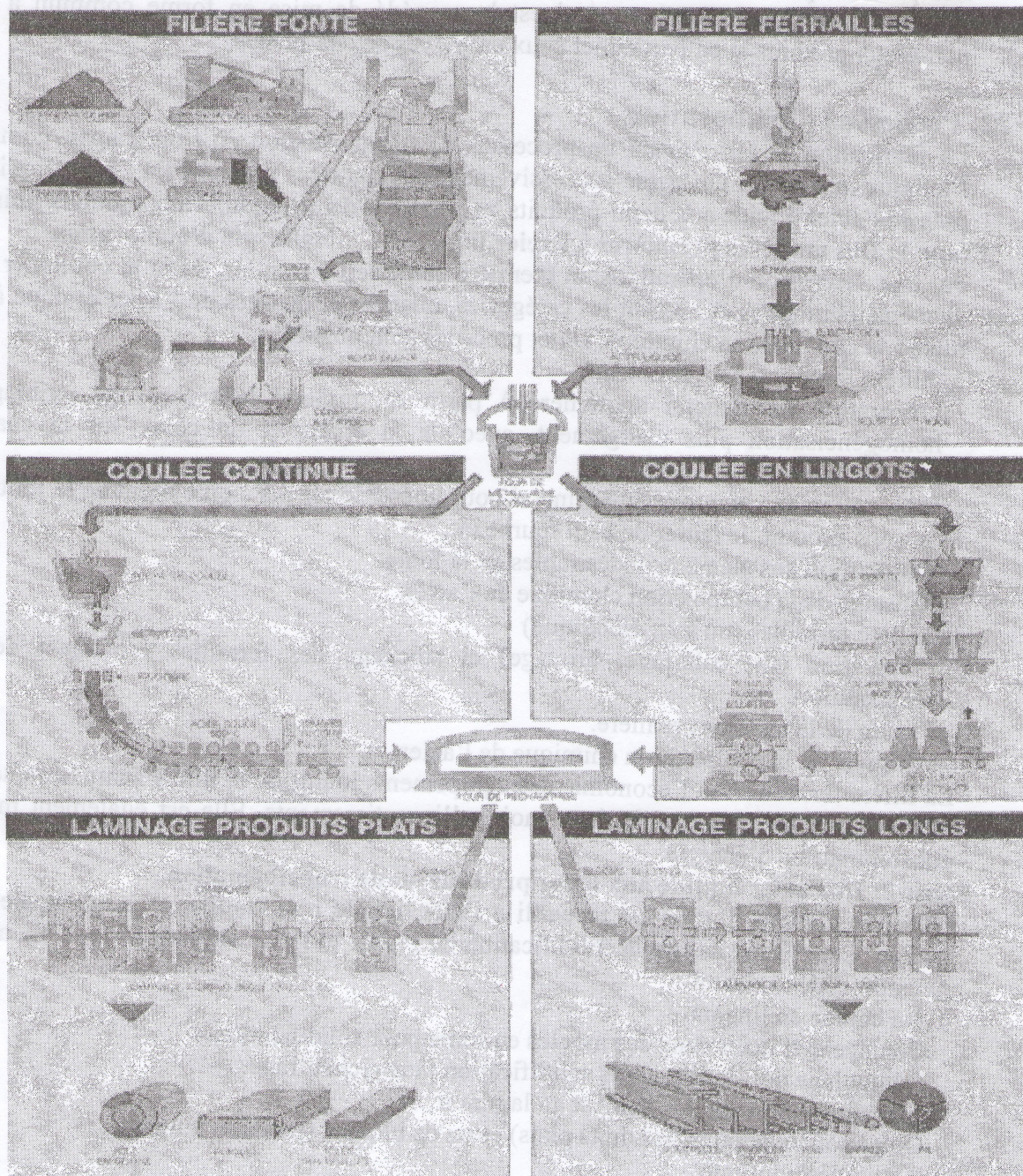


Fig.1: Procédés généraux d'élaboration

III. ACIERS DE CONSTRUCTION

La sidérurgie produit une très grande variété d'aciers pour couvrir l'ensemble des exigences des différents domaines utilisateurs de l'acier. Ceux destinés à la construction métallique, appelés communément **aciers de construction**, sont nombreux et se subdivisent en plusieurs catégories ayant chacune de nombreuses nuances correspondant à différents niveaux de caractéristiques mécaniques et en plusieurs qualités correspondant à différents niveaux de performance. Pour les distinguer, il leur est attribué une désignation, une classification et une caractérisation normalisées.

31. Désignation des aciers de construction

La désignation des nuances et des qualités des aciers de construction est normalisée et définie depuis 1992 par la norme européenne EN10 027 : Système de désignation; désignation symbolique.

Cette nouvelle désignation, pour les aciers d'usage général se compose comme suit :

- une lettre majuscule S comme steel (ou E pour certaines nuances)
- suivi d'un nombre exprimant la résistance limite d'élasticité minimale en N/mm^2
- et enfin des caractères alphanumériques exprimant la qualité (ou la qualité et le mode de désoxydation).

Exemple: S 235 JR

32. Classification

La classification des aciers de construction destinés à la charpente métallique est définie par la norme européenne EN10 020. On y distingue les 4 catégories suivantes :

321. Catégories d'acier

a. Aciers non alliés:

Ils étaient, et sont parfois encore, appelés **aciers de construction d'usage général**. Depuis 1990, ces aciers sont définis par la norme européenne EN10 025, norme équivalente à la norme française NFA35.501, encore utilisée en Algérie.

Dans cette catégorie, on distingue 7 nuances dont les 3 nuances, S235, S275 et S355, sont couramment utilisées en charpente et sont disponibles dans tous les produits sidérurgiques (tôles, profilés, ...).

Les aciers de cette catégorie sont couramment utilisés pour réaliser des structures de bâtiments, de ponts et d'autres ouvrages métalliques.

b. Aciers à grains fins:

Ils sont également appelés aciers alliés et sont définis par la norme EN10 113.

Ce sont des aciers pour lesquels des éléments chimiques d'addition ont été rajoutés dans leur composition chimique. Les éléments d'addition, variables en nombre et en teneur, sont le silicium Si, le manganèse Mn, le chrome Cr, le molybdène Mo....

Dans cette catégorie, on distingue 4 nuances (S275, S355, S420 et S460) chacune disponible en 2 qualités (qualité N et qualité NL). Les 2 dernières nuances ont des caractéristiques mécaniques très élevées et sont dites aciers à haute résistance. Pour le moment, les règlements de calcul tels que le CM66 ou le EC3 ne couvrent pas les charpentes utilisant ces 2 nuances à cause du niveau bas de leur ductilité. Les aciers à grains fins sont surtout utilisés dans la construction des ponts métalliques importants.

La frontière entre acier allié et acier non allié varie en fonction de l'élément d'addition (ex: un acier ayant une teneur en Si $> 0.50\%$ est considéré comme un acier allié, par contre si $\text{Si} \leq 0.50\%$ il est alors non allié.).

c. Aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique

Ils sont parfois appelés aciers auto patinables. Ces aciers doivent être conformes à la norme EN10155. Placés dans une ambiance corrosive, leur couche extérieure (faible épaisseur) réagit et devient progressivement, avec l'âge, résistante à la corrosion. Au bout de quelques années d'exposition (1 à 5 ans), cette couche aura achevée sa transformation, appelée alors patine, devient entièrement résistante et servira alors de barrière (protection) à toute progression ultérieure de la corrosion vers l'intérieur du matériau.

Dans cette catégorie, on distingue 2 nuances (S235, S355) disponibles en 2 qualités W et WP. Ces aciers sont peu utilisés dans le domaine du bâtiment.

Quand de plus, ces aciers ont à subir des opérations de soudage, leur CEV ne doit pas excéder 0,54%.

Les produits en acier de cette catégorie, peuvent nécessiter un léger sablage avant leur utilisation, de sorte à obtenir une base uniforme pour la formation de la patine et le vieillissement.

d. Aciers à caractéristiques de déformation améliorées dans le sens travers court.

Ces aciers, appelés aciers Z, ont des caractéristiques de déformation très élevées dans le sens travers court. L'acier étant anisotrope à l'échelle microscopique, les produits sidérurgiques courants présentent des caractéristiques de déformation dans la direction perpendiculaire au laminage ou travers court plus faibles que celles dans la direction du laminage. Cette différence des caractéristiques directionnelles peut donner naissance dans certaines constructions soudées au phénomène d'arrachement lamellaire. Ce dernier peut être la cause de graves désordres. Les aciers Z sont employés pour y remédier.

Ces aciers doivent être conformes à la norme EN10164.

33. Nuances et qualités des aciers de construction d'usage général

Les aciers de construction d'usage général sont définis par la norme EN10 025 qui précise leur composition chimique limite, leurs nuances et leurs qualités.

331 Nuances

La norme EN10 025 a retenu pour la construction métallique 7 nuances suivantes:

S185	S235	S275	S355	E295	E355	E360
------	------	------	------	------	------	------

Les nuances sont définies par la limite d'élasticité minimale f_y (variable en fonction de l'épaisseur), la résistance à la traction f_u (variable également en fonction de l'épaisseur) et l'allongement à la rupture.

La limite d'élasticité minimale f_y est la caractéristique mécanique sur laquelle est fondée le critère de vérification de la résistance des sections et des éléments des structures.

Le choix d'une nuance permet de résoudre un premier problème qui est celui de d'assurer la capacité portante (résistance et stabilité) de calcul de la structure.

Il faut noter que les nuances S235, S275 et S355 sont celles couramment utilisées pour les bâtiments et pour les ponts.

332 Qualités

La résistance mécanique de l'acier, donnée par sa nuance, ne garantit pas à elle seule la sécurité des ouvrages, il faut en plus s'assurer que cet acier possède une bonne résistance vis-à-vis de la rupture fragile compte tenu des conditions dans lesquelles il est utilisé. En pratique, cela revient à choisir, dans la nuance retenue, une qualité d'acier convenable compte tenu des conditions d'utilisation de l'acier et pouvant occasionner une rupture fragile. La norme citée plus haut propose 4 qualités:

JR : qualité convenable pour les constructions courantes.

JO : qualité utilisée quand une résistance à la rupture fragile et une résistance à l'effet d'entaille modérées sont exigées.

J2 : qualité requise quand une résistance à la rupture fragile et une résistance à l'effet d'entaille grandes sont exigées.

K2 : qualité utilisée quand une résistance à la rupture fragile et une résistance à l'effet d'entaille très grandes sont exigées.

IV. EXIGENCES RELATIVES AUX ACIERS DE CHARPENTE

Les aciers de construction pouvant être employé pour la réalisation des charpentes doivent avoir les propriétés suivantes:

Résistance

Les aciers doivent avoir des niveaux de résistance mécanique (résistance élastique et résistance à la traction) suffisant, au regard de l'intensité des charges appliquées.

La résistance est la grandeur mécanique exprimant la capacité (puissance passive) que le matériau oppose aux contraintes (puissances actives) générées par les charges appliquées. Parmi tous les matériaux de construction, l'acier possède la plus grande résistance pour la plus petite section.

Soudabilité

Le soudage est une technique d'assemblage très employée en charpente et qui consiste à réaliser des assemblages en faisant fondre les bords des pièces au droit du joint d'assemblage, assurant ainsi, la continuité des pièces à assembler. Aussi, est-il nécessaire que le matériau utilisé soit soudable c'est à dire se prêtant au soudage facilement, sans précautions spéciales et permettant d'obtenir, à l'endroit des soudures, des caractéristiques et un comportement (pas de zones dures) mécaniques au moins équivalentes à ceux de l'acier de base.

Dans des constructions soudées, la composition chimique de l'acier employé doit être contrôlée quant à sa compatibilité avec la méthode de soudage employée. La valeur de Carbone Equivalent (CEV) doit être calculée à partir de l'analyse de coulée selon la formule donnée dans la norme ISO10025 :

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

Pour les aciers ayant un CEV inférieur ou égal 0,45%, l'acier est soudable sans précautions spéciales, les précautions générales devant être systématiquement respectées.

Pour les aciers ayant un CEV compris entre 0,46 et 0,60 des précautions spéciales doivent être respectées : préchauffage de l'acier à 300° avant soudage, refroidissement à vitesse contrôlée après soudage.

Pour un CEV supérieur à 0,60, l'acier n'est pas soudable.

Ductilité

C'est la capacité du matériau à subir, sans perte de résistance, de grandes déformations inélastiques avant la rupture. Cette propriété est essentielle pour

- garantir l'adaptation plastique des sections et des éléments de structure.
- réduire les effets du phénomène de concentration de contraintes dans les sections.
- absorber et dissiper l'énergie introduite dans les structures par certaines actions (ex: énergie du mouvement sismique).

Globalement, en plus de la ductilité, l'acier doit posséder une bonne plasticité. Cette condition est satisfaite si les critères suivants sont respectés:

- le rapport (f_u/f_y) de la résistance à la traction minimale spécifiée f_u sur la résistance limite d'élasticité minimale spécifiée f_y doit être supérieur à 1,2.
- le diagramme contrainte déformation doit montrer que la déformation ultime ϵ_u correspondant à f_u représente au moins 20 fois la déformation élastique ϵ_y correspondant à f_y .
- l'allongement à la rupture sur une longueur entre repères de $5,65 \sqrt{A_0}$ doit être supérieur à 15%, A_0 étant l'aire initiale de la section transversale.

Énergie de rupture

Les aciers utilisés en charpente doivent avoir une énergie de rupture suffisante pour éviter la rupture fragile à la plus basse température de service susceptible de se produire au cours de la durée de vie prévue de la structure.

Résistance à l'arrachement lamellaire

L'arrachement lamellaire est dû à l'anisotropie de certains aciers se traduisant par une chute des caractéristiques mécaniques dans le sens de l'épaisseur. Il se manifeste surtout pour les pièces à parois épaisses et comportant des soudures d'angle. L'arrachement lamellaire doit être prévenu soit par

- l'adoption de dispositions constructives adaptées (voir figure 2)
- le choix d'un acier Z

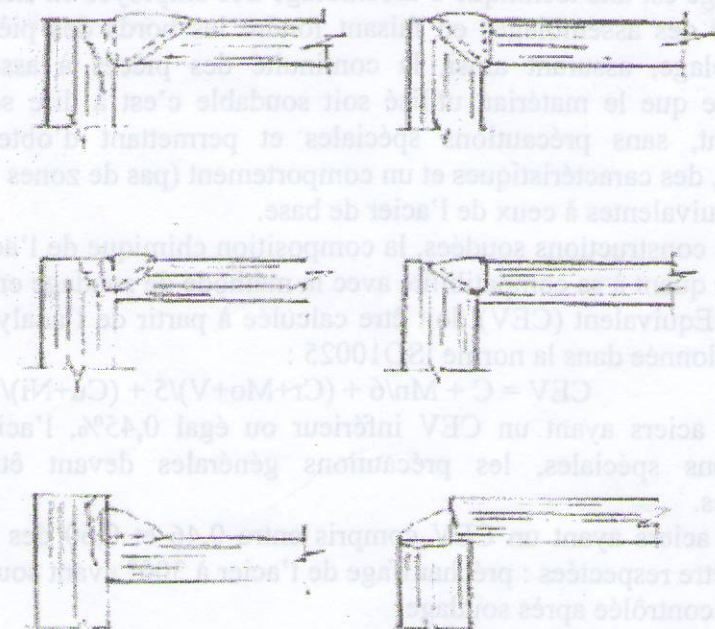


Fig.2: Arrachement lamellaire.

V. CARACTERISTIQUES DES ACIERS DE CONSTRUCTION

51. Valeurs des caractéristiques mécaniques des aciers

Le tableau 1 ci-après, résume les caractéristiques mécaniques des 3 nuances courantes des aciers de construction d'usage général.

Nuance	Limite d'élasticité minimale (N/mm ²)						Résistance mini à la traction (N/mm ²)	
	Epaisseur nominale (mm)							
Epaisseur du produit	≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤150	≤3	>3 ≤100
S235JR	235	225	215	215	215	195	360	340
S235JO	235	225	215	215	215	195	360	340
S235J2G3	235	225	215	215	215	195	360	340
S275JR	275	265	255	245	235	225	430	410
S275JO	275	265	255	245	235	225	430	410
S275J2G3	275	265	255	245	235	225	430	410
S355JR	355	345	335	325	315	295	510	490
S355JO	355	345	335	325	315	295	510	490
S355J2G3	355	345	335	325	315	295	510	490

Tableau 1: Caractéristiques des aciers de construction

Le tableau 2 donne les désignations équivalentes entre la nouvelle norme et les anciennes normes européenne et française.

Désignation EN10 027	Désignation européenne ancienne	Désignation française
S235JR	Fe 360 B	E 24-2
S235JO	Fe 360 C	E 24-3
S235J2G3	Fe 360 D	E 24-4
S275JR	Fe 430 B	E 28-2
S275JO	Fe 430 C	E 28-3
S275J2G3	Fe 430 D	E 28-4
S355JR	Fe 510 B	E 36-2
S355JO	Fe 510 C	E 36-3
S355J2G3	Fe 510 D	E 36-4

Tableau 2: Equivalence des désignations

VI. COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE

61. Comportement des aciers

Un essai de traction/compression sur une éprouvette en acier permet de construire une courbe contrainte déformation comme celle illustrée sur la figure 3 ci dessous représentative du comportement de l'acier.

Si au cours de l'essai de traction on charge fortement jusqu'à atteindre un état représenté sur la courbe par le point B dépassant largement la limite élastique f_y puis on décharge lentement pour ensuite rétablir le chargement progressivement, on observe alors que la courbe suit le même parcours sauf que tout se passe comme si la limite d'élasticité de l'acier a été augmenté. Sa nouvelle valeur est mesurée par l'ordonnée du point B: ce phénomène s'appelle l'écrouissage.

Si l'on transforme l'essai de traction en essai de compression et, en chargeant puis en déchargeant comme précédemment, on observe cette fois-ci une diminution de la limite élastique de compression: c'est l'effet Bauschinger.

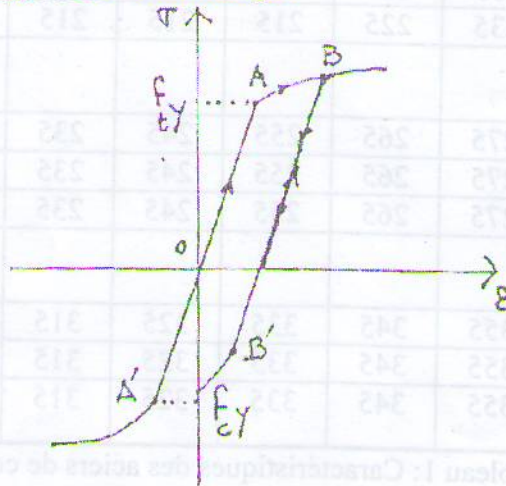


Fig. 3: Courbe représentative du comportement des aciers de construction.

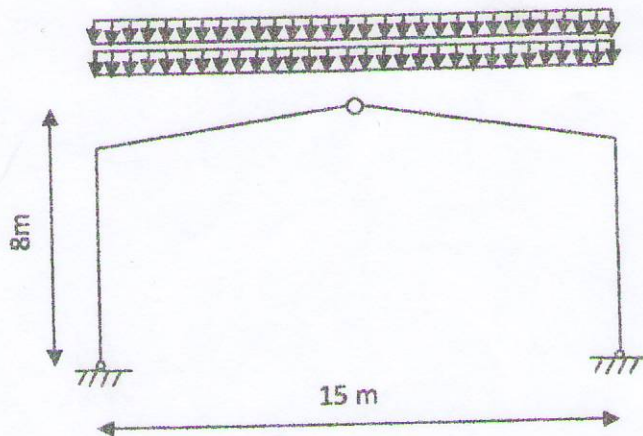
Dans les méthodes d'analyse, au lieu de conserver d'introduire le comportement réel du matériau, on procède habituellement à des modélisations. Les règles CM66 adopte pour le comportement des aciers de construction, un modèle du type élastique linéaire.

VII. CARACTERISTIQUES COMMUNES A TOUS LES ACIERS

Les aciers d'utilisation courante en construction métallique présentent les caractéristiques constantes suivantes:

- masse volumique : $7,8 \text{ kg/m}^3$.
- coefficient de dilatation linéaire: $1.15 \cdot 10^{-6} / \text{m}^\circ$.
- module d'élasticité longitudinale: $210\,000 \text{ N/mm}^2$
- module d'élasticité transversale: $80\,000 \text{ N/mm}^2$

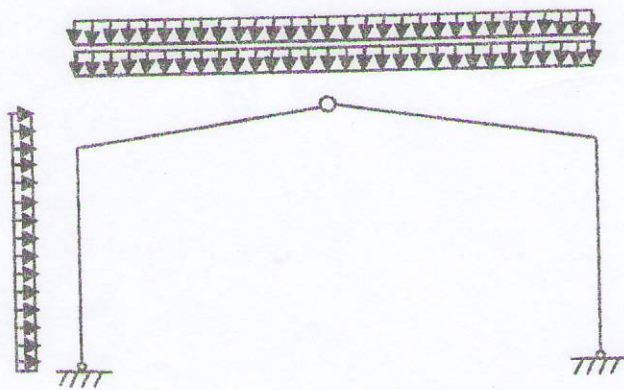
Exercice 1



Calculer les réactions maximales pour le cas de charge suivant :

$$C_p = 3 \text{ kN/m et } S = 4 \text{ kN/m.}$$

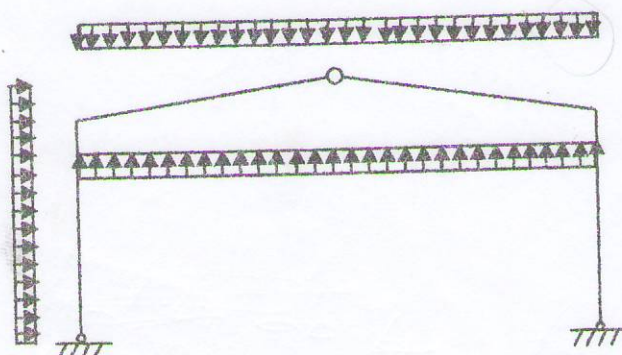
Exercice 2



Même question que l'exercice 1 avec :

$$C_p = 2 \text{ kN/m, } S = 3 \text{ kN/m et un vent horizontal } V_h = 3 \text{ kN/m}$$

Exercice 3



Même question que précédemment avec une charge verticale du vent

$$V_v = 2.5 \text{ kN/m et horizontale } V_h = 3 \text{ kN/m. } C_p = 3 \text{ kN/m.}$$