

2 LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE L'ACIER

Toute structure subit des sollicitations ou actions extérieures qui provoquent des déformations, mais aussi des efforts internes, à savoir les contraintes. Les contraintes sont principalement de cinq natures différentes :

- la traction ;
- la flexion ;
- la compression et le flambement ;
- le cisaillement ;
- la torsion.

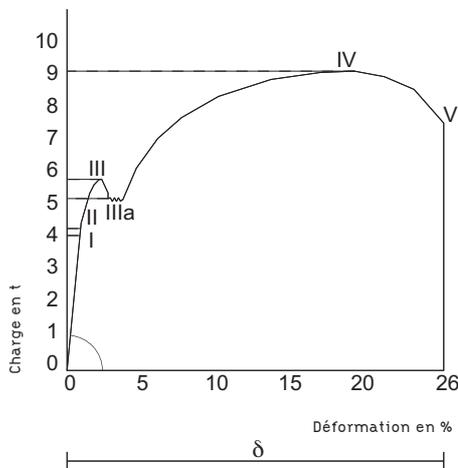
Il reste par ailleurs d'autres phénomènes mécaniques ou efforts extérieurs à prendre en compte :

- la résistance à la « rupture fragile » (résilience) ;
- la fatigue.

Enfin, certaines sollicitations particulières sont à prendre en compte :

- les variations de température ;
- les sollicitations dynamiques.

Diagramme charge-déformation de l'acier montrant le comportement réel de l'acier (Schaper, 1994). Cf. Bibliographie [10, p.11].



E = module d'élasticité

- I : limite de proportionnalité
- II : limite d'élasticité
- III et IIIa : limite supérieure et inférieure d'écoulement
- IV : charge ultime
- V : charge à la rupture
- δ : allongement à la rupture

NB : Valeur pour une barre en acier de 2,24cm² de section.

La traction

Phase élastique

Soumise à une traction suivant sa section, une barre en acier s'allonge uniformément jusqu'à une certaine limite, appelée limite d'élasticité. Il y a réversibilité du phénomène : si la charge est supprimée, la barre d'acier reprend sa dimension initiale (loi de Hooke). C'est la phase dite « élastique » (phases I et II sur le diagramme).

Phase plastique

Au-delà de la limite d'élasticité, l'allongement de la barre augmente même si la charge évolue peu, puis passe par une phase de déformation plastique où une partie de l'allongement demeure permanent si la charge diminue. Ce phénomène est appelé écrouissage. L'allongement demeure permanent (phases III et IV).

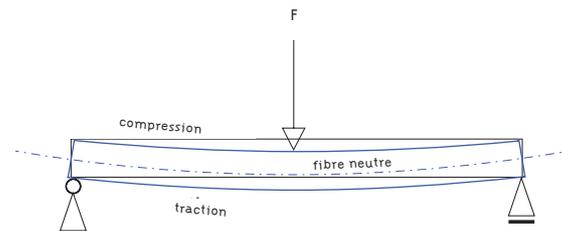
Phase de rupture

Après une phase d'allongement, la charge diminue car la section d'acier diminue. Ce phénomène est appelé « striction ». Il y a alors rupture de la barre, la déformation totale est appelée « allongement à la rupture » (phase V).

Dans une construction, les pièces de charpente sont conçues et calculées pour rester la plupart du temps dans le domaine élastique. La limite d'élasticité pour un acier ordinaire est de 235 Mpa (235 N/mm^2) ou de 355 Mpa. Pour un acier à haute limite d'élasticité, cette valeur peut s'élever à 460 Mpa, voire 690 Mpa (aciers thermomécaniques).

La flexion

Considérons une poutre horizontale appuyée à ses deux extrémités et supportant un poids placé au milieu de sa portée. La force extérieure F exercée sur la poutre par la charge qu'elle supporte est perpendiculaire à son axe longitudinal. Elle génère ce qu'on appelle une flexion ou un moment fléchissant.



Flexion générée par l'effort F :
la partie supérieure de la poutre est comprimée, la partie inférieure est tendue.

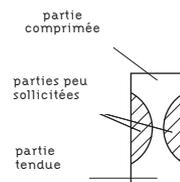
La poutre se déforme pour produire une réaction qui équilibre le système. Contrairement à la traction où la section du matériau est soumise à une contrainte uniforme, la flexion exerce de part et d'autre de la fibre neutre des contraintes variables et de signes opposés. La face supérieure de la poutre se raccourcit sous un phénomène de compression et la face inférieure s'allonge sous un phénomène inverse de traction.

Optimisation de la section d'une poutre fléchie : de la section rectangulaire au profil en I.

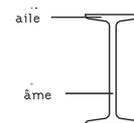
La variation des contraintes de la face supérieure à la face inférieure, de la compression à la traction, définit un axe d'équilibre appelé axe neutre dans lequel la contrainte est nulle. La matière au voisinage de cet axe joue un rôle négligeable dans la résistance de la poutre. En revanche, la matière au voisinage des faces extérieures de la section est la plus sollicitée. Elle joue donc un rôle essentiel dans la résistance de la poutre. La géométrie de la section des poutres et des poteaux est directement issue de ces constatations. Elle conduit à concentrer la matière dans les parties les plus éloignées de l'axe neutre.



a) Section rectangulaire



b) Section montrant les parties sollicitées en flexion. La poutre est peu sollicitée au voisinage de l'axe neutre

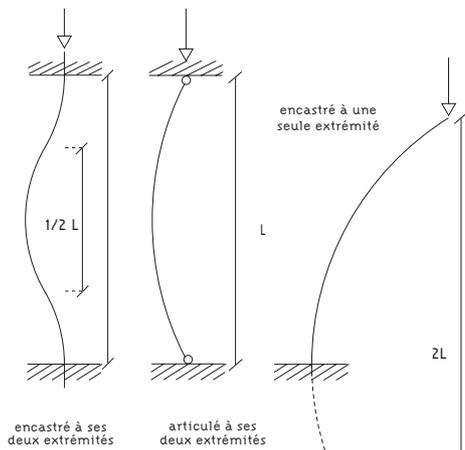


c) Profil optimisé en I

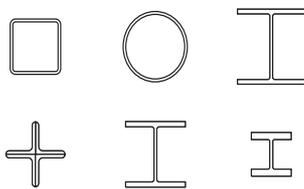
La résistance de la poutre dépendra donc de la caractéristique géométrique suivante de la section : le module de flexion, à savoir le rapport du moment d'inertie de la poutre sur la distance de la fibre neutre à l'extrémité de la section, soit I/v . Plus le module de flexion est grand, meilleure est la résistance à la flexion.

Les profils en I sont directement issus de cette considération. Sous l'effet d'un chargement en flexion l'âme sert à écarter l'aile supérieure entièrement comprimée de l'aile inférieure entièrement tendue.

À noter que les déformations de la poutre en flexion sont liées à l'inertie et que c'est souvent le critère de déformation et non celui de résistance qui est prépondérant dans la détermination des sections en construction métallique.



Les trois types principaux de flambement suivant le type de liaison de la barre ou du poteau. La longueur de flambement varie entre $1/2 L$ et $2 L$ suivant les cas.



Exemples de profils creux et de profils ouverts pour des poteaux.

La compression et le flambement

Les déformations dues à la compression ne jouent pas toujours un rôle déterminant sur les éléments de structure verticaux. En revanche, un phénomène d'instabilité appelé « flambement » apparaît à partir d'une certaine charge et en fonction du rapport existant entre la section et la hauteur de l'élément considéré. Le flambement est une forme d'instabilité propre aux éléments comprimés élancés tels que les poteaux, colonnes, barres comprimées.

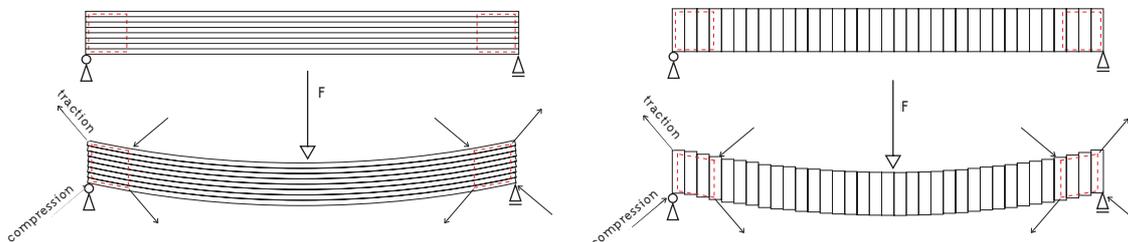
Le flambement est possible suivant les deux axes principaux de la section de l'élément. Si les conditions d'appuis sont les mêmes selon ces deux axes, le flambement se fera suivant l'axe présentant l'inertie la plus faible.

Comme pour les phénomènes de flexion, la section de la barre comprimée va jouer un rôle déterminant pour le choix du profil économique. Le profil idéal du point de vue du flambement sera donc le tube rond, profil creux dont la matière est économisée au maximum et dont l'inertie est maximale dans toutes les directions. Les profils en H permettent aussi une bonne répartition de la matière.

Le cisaillement ou effort tranchant

L'analyse des contraintes de compression, de traction et de flexion ne suffit pas pour décrire complètement le comportement des matériaux.

Schémas décomposant la traction et la compression dans une poutre fléchie et montrant le phénomène de cisaillement longitudinal et transversal.



En effet, si on considère une poutre comme un empilement de strates, celles-ci ont tendance à glisser les unes par rapport aux autres sous l'effet de la flexion. On peut décrire le même phénomène si l'on découpe la poutre en strates assemblées verticalement.

La flexion simple s'accompagne ainsi d'un cisaillement horizontal et d'un cisaillement vertical. Le cisaillement est plus important au droit des appuis car il augmente avec la variation de la flexion. Le cisaillement vertical, ou effort tranchant, peut s'interpréter comme un effort résultant de deux forces parallèles de sens opposés.

La torsion

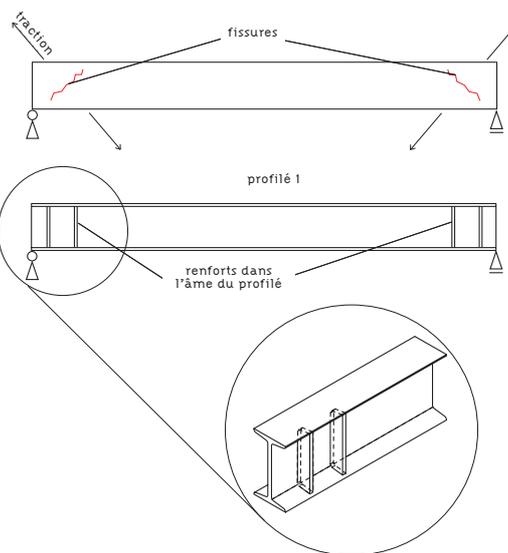
Au cas où le point d'application d'une force se trouve en dehors d'un plan passant par l'axe neutre d'un élément de structure, une autre sollicitation est générée : la torsion. Ceci correspond à l'effet d'un couple de forces dont l'axe de rotation et l'axe neutre de la poutre sont confondus. L'expérience et la théorie montrent que les profils creux sont plus rigides en torsion que les profils ouverts. Il est préférable d'éviter de faire travailler les ossatures en torsion.

La résistance à la « rupture fragile »

L'appréciation de la résistance de l'acier au choc se fait par un essai conventionnel dit « de flexion par choc sur éprouvette bi-appuyée », que l'on appelle essai « de résilience ». Plus le niveau d'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette est important, plus l'acier est résistant. L'énergie augmente quand la température augmente.

Le phénomène dit de « rupture fragile » est susceptible de se produire lorsqu'il y a un défaut, une fissure, ce qui arrive plus fréquemment quand le produit est d'une épaisseur supérieure à 10 mm. Il peut aussi apparaître lorsque la température s'abaisse, exception faite des aciers inoxydables.

Afin de réduire ce risque, il faut évidemment utiliser des aciers conformes aux normes. Mais il faut aussi pour les détails constructifs assurer un changement progressif des épaisseurs, meuler les pieds de cordon de soudure, en bref, assurer une meilleure circulation des efforts sans changement brusque de direction, pour éviter des concentrations de contraintes.



Effort tranchant au droit des appuis

Schémas montrant d'une part, une poutre en béton armé sur laquelle peuvent apparaître des fissurations provoquées par l'effort tranchant en cas de chargement vertical et, d'autre part, la solution proposée en construction métallique qui consiste à mettre des renforts au droit des appuis pour parer à ce type de problème.



La fatigue devient parfois le critère dimensionnant pour des ouvrages d'art.

C'est la cas des ponts du TGV qui sont soumis à répétition à des charges alternées pendant une longue durée (120 ans). Ici le viaduc de Mondragon sur le Rhône pour le TGV Méditerranée, Jean-Pierre Duval, architecte.

La fatigue

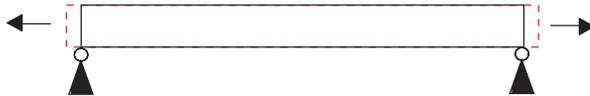
Soumis à des efforts répétés alternés, tout matériau peut se fissurer et se rompre, alors que l'effort appliqué n'entraîne pas de contrainte supérieure à la limite de rupture. On parle de « fatigue ».

Prenons par exemple le cas d'un fil de « fer » que l'on tord dans un sens puis dans l'autre. En répétant l'opération un certain nombre de fois on finit par engendrer sa rupture. Afin d'éviter ce phénomène, on définit pour les éléments et assemblages soumis à des efforts alternés cycliques une contrainte limite à ne pas dépasser et donc les efforts maximums que l'on peut appliquer. Cette contrainte limite qui a été déterminée expérimentalement, est bien inférieure à la limite d'élasticité.

Dans le cas d'une poutre qui a été conçue pour résister à un moment de flexion M, elle ne résistera pas indéfiniment à un moment alterné dont le maximum est M. Il y aura rupture au bout d'un certain nombre de cycles. Pour éviter cela, le moment alterné ne devra pas dépasser un maximum de 0,4 M à 0,5 M.

Les variations de température

Comme tous les matériaux, l'acier se dilate sous l'effet de l'augmentation de la température. Ce phénomène est réversible dans les conditions usuelles. Le coefficient de dilatation linéaire de l'acier est égal à $1,22 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ à température ambiante.



Dilatation d'une poutre

Pour une pièce métallique de 12 m de longueur, une augmentation de température de 30 °C provoque l'allongement suivant :
 $1,22 \times 10^{-5} \times 30 \times 12 = 4,4 \times 10^{-3} \text{ m}$
 = 4,4 mm

À souligner que si la pièce était bridée, c'est-à-dire si la pièce ne pouvait se dilater librement, une contrainte de 77 Mpa apparaîtrait ici.

Par ailleurs, plus la température est élevée plus la limite d'élasticité et la résistance à la traction diminuent et plus la plasticité augmente. On distingue un seuil de 500 °C environ en dessous duquel les variations sont faibles, et au-dessus duquel l'acier commence à perdre ses capacités de résistance mécanique. Il faut donc essayer de maintenir

l'échauffement des éléments dans des limites tolérables, c'est-à-dire en dessous de 500 °C, et éviter de trop brider la structure.

Les sollicitations dynamiques

Les structures peuvent être soumises à des chargements variant dans le temps, générés par des phénomènes tels que le vent, les charges roulantes, les séismes, la houle, les mouvements de foule,... De même qu'avec des charges permanentes, une structure va réagir aux excitations dynamiques.

Le cas des séismes

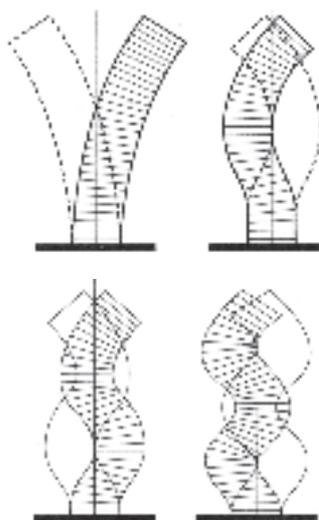
Dans le cas particulier d'un séisme, les ondes engendrent des vibrations dans le sol qui provoquent le déplacement des constructions. Les bâtiments vont alors s'opposer à leur mise en mouvement en donnant naissance à des forces d'inertie F_i qui s'opposent au mouvement. Chaque masse m attachée à la structure communiquera une force d'inertie : $F_i = m \cdot g$, où g représente l'accélération. Les charges sismiques doivent donc être équilibrées avec ces forces d'inertie et les efforts dissipés sous forme d'énergie, de manière à assurer l'équilibre dynamique et ainsi éviter toute rupture.

Pour illustrer cette idée, nous pouvons prendre comme exemple le cas, pratiquement similaire, d'un homme debout sur un tapis roulant à l'arrêt. Si l'on met en marche subitement le tapis roulant, l'homme sera déstabilisé et projeté en arrière en subissant une force d'inertie F_i proportionnelle à sa masse.

Pour comprendre les mécanismes du comportement des bâtiments face aux séismes, nous devons garder à l'esprit que la réponse du bâtiment dépend de ses caractéristiques propres.

Pour améliorer la résistance d'une construction aux séismes, il est préférable :

- de minimiser l'action des forces d'inertie en optant pour des matériaux légers tels que l'acier ;
- d'augmenter la capacité de réaction de la structure ;
- d'améliorer la capacité de stockage et de dissipation de l'énergie dans la construction, en utilisant un matériau de structure ductile et un système hyperstatique ;
- de concevoir des bâtiments avec des élancements modérés, une symétrie selon les deux axes, un centre de gravité bas, peu de niveaux ouverts et de porte-à-faux importants ;
- d'adapter la conception de la structure (souple ou rigide) aux caractéristiques du sol des fondations (ferme ou meuble). Les périodes propres du bâtiment et du sol doivent être les plus éloignées possibles pour éviter les phénomènes de résonance.



Modes d'oscillation horizontale des bâtiments à étages. Au-delà du mode fondamental (en haut à gauche), il existe schématiquement autant de modes d'oscillation qu'il y a d'étages.



Exemples de contreventements par tirants.



Exemples de palées de stabilité triangulées : contreventement en X par diagonales rigides (à gauche) ; ossature contreventée à nœuds rigides (à droite).

