

Cours de construction métallique I

I. Introduction générale et principes de base



Equipe enseignante : Sami MONTASSAR (E-mail: sami.montassar@enit.utm.tn)

Ramzi ZAKHAMA (E-mail: ramzi.zakhama@enit.utm.tn)

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2019-2020

Domaines d'utilisation

- **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



- **Ponts et passerelles** : à poutre, en arc, suspendu, à haubans ...





- **Les tours et les mâts** : pylônes des lignes électriques, de télécommunication ...





- **Les constructions métalliques en tôle** : réservoirs, silos, pipelines ...



- **Les calottes sphériques**



- Les mécanismes mobiles : les grues ...



- Les plates-formes off-shore



- Les châteaux d'eau



- Autres structures ...



Principaux avantages des constructions en acier

- **La légèreté :**

Les constructions en acier sont, en général, plus légères que celles en béton armé ou précontraint, en bois, en pierre ...

La légèreté peut être caractérisée par le rapport entre le poids volumique et la résistance (appelé rendement).

- **La solidité :**

Grâce à l'homogénéité des matériaux utilisés en construction métallique.

- **La résistance mécanique :**

- ✓ Grande résistance à la traction → franchissement de grandes portées.

- ✓ Bonne tenue aux séismes (ductilité + mêmes résistances à la traction et à la compression).

- **L'industrialisation :**

La préparation et la mise en forme des éléments de structures en acier se font en atelier. Ces éléments arrivent sur le chantier prêts à être montés et assemblés. Cela nécessite des techniques et des équipements modernes.

- **L'imperméabilité :**

L'acier se caractérise par son imperméabilité (fluides: liquide + gaz). Attention lors de la réalisation des assemblages.

- **Les possibilités architecturales :**

Beaucoup plus étendues qu'en béton.

- **Les modifications:**

Aisément réalisables.

Quelques inconvénients des constructions en acier

- **La corrosion :**

L'acier tend à s'oxyder et à se corroder lorsqu'il est soumis à des atmosphères humides, à des agressions chimiques, à la condensation, qu'il est en contact avec l'eau ou les sols.

La protection contre la corrosion peut se faire par:

- ✓ l'ajout d'additifs à l'acier.
- ✓ le revêtement périodique de la surface d'acier (galvanisation, métallisation au pistolet, électrozinguage ...) avec peinture ou vernis.
- ✓ la sélection de formes de structures sans brèches et fentes afin de se prémunir des risques de l'humidité et des poussières.

- **Mauvaise tenue au feu nécessitant des mesures de protection onéreuse:**

Le module d'élasticité de l'acier commence à diminuer à partir de la température $T=200^{\circ}\text{C}$. L'acier perd sa capacité portante et passe à l'état plastique à partir de la température $T=600^{\circ}\text{C}$.

- **Susceptibilité aux phénomènes d'instabilité élastique:**

En raison de la minceur des profils.

Le matériau acier

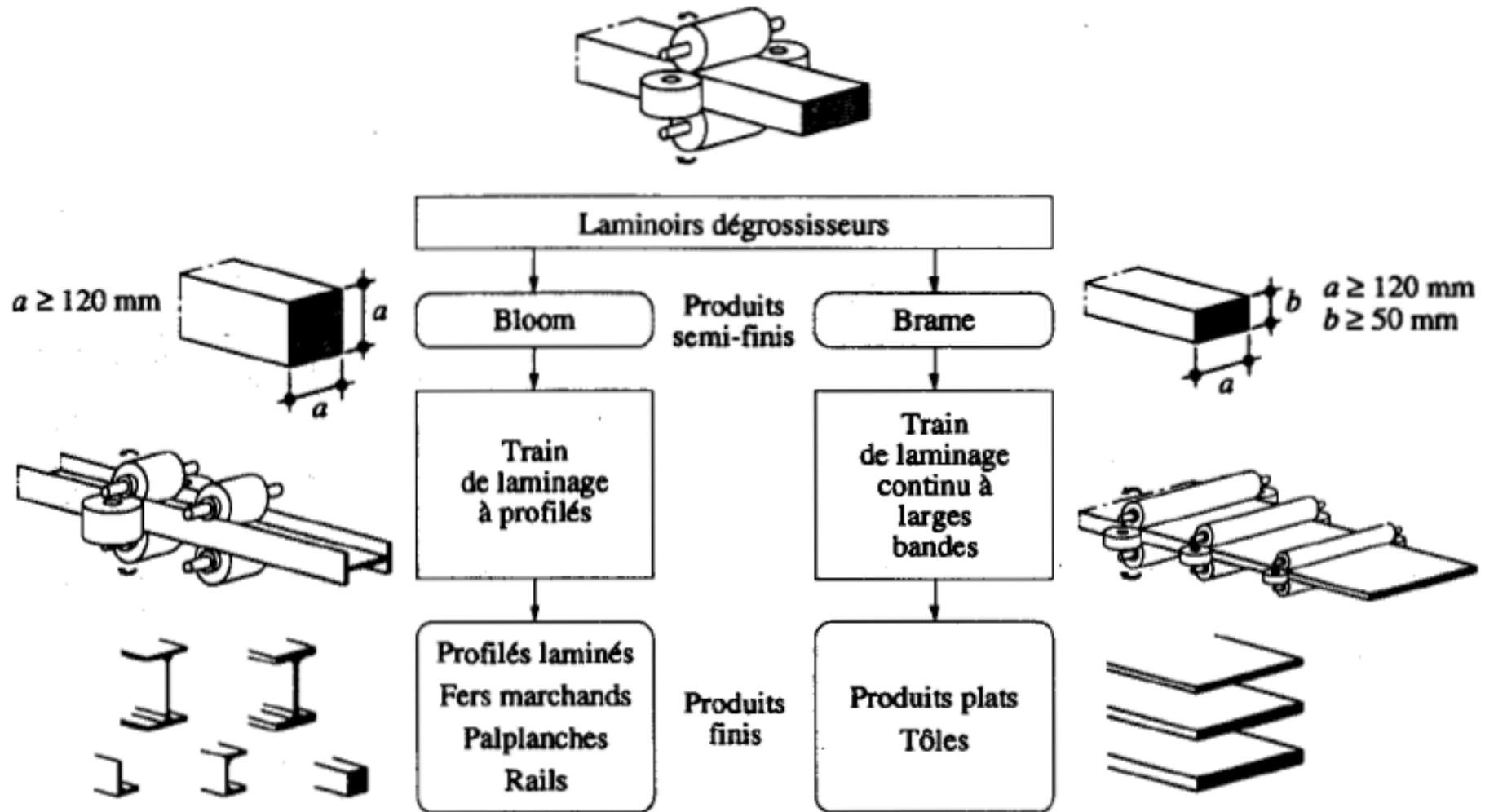
□ L'acier est un matériau issu de la réduction du minerai de fer ou du recyclage de ferrailles.

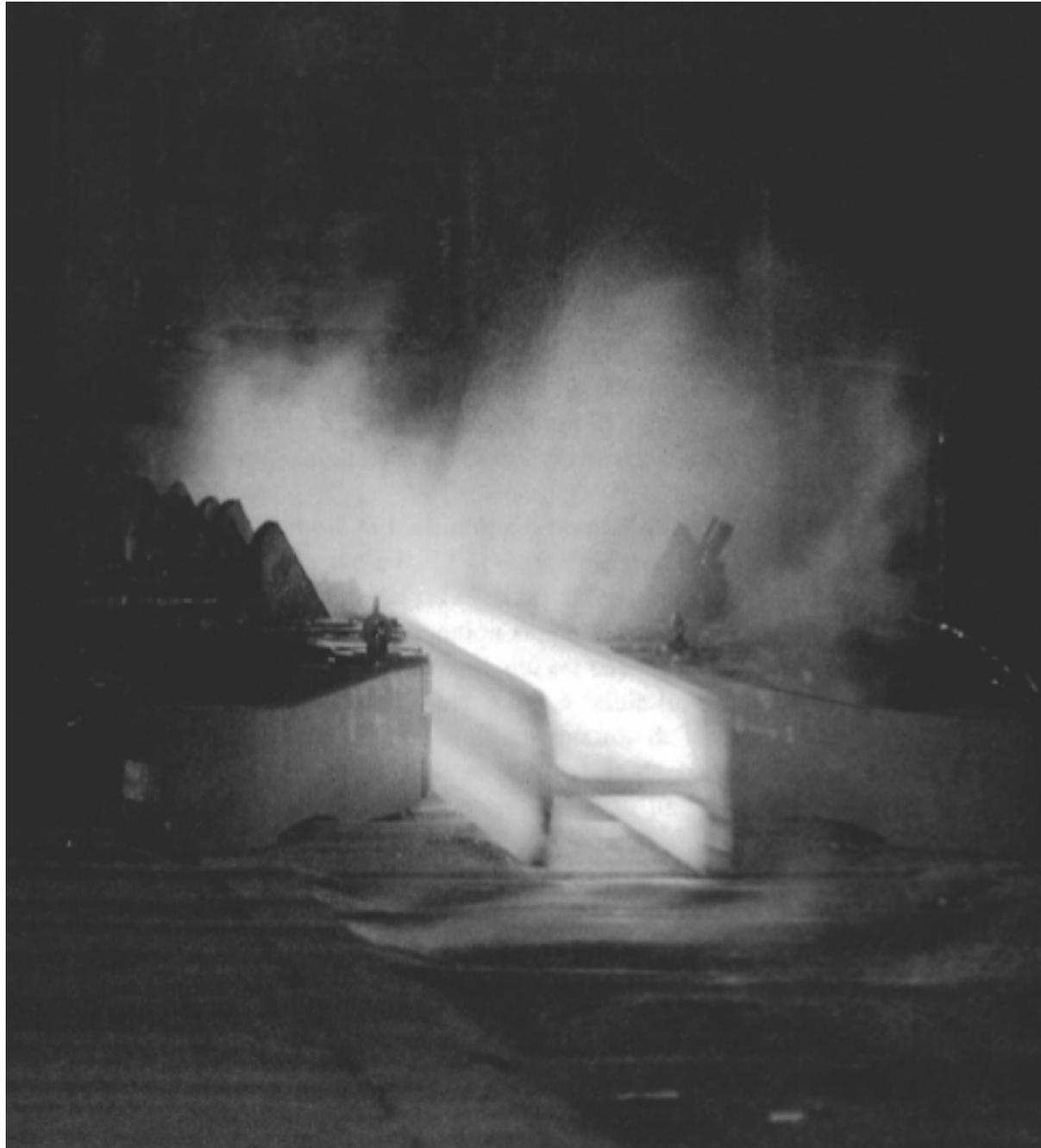
□ Les aciers de construction sont constitués essentiellement de **fer**.

Ils contiennent en général de 0,1 à 1% de **carbone** + des additions variables (manganèse, silicium, molybdène, chrome, nickel, titane, tungstène...).

□ Les aciers de construction peuvent être **laminés, étirés** ou **tréfilés**.

Phases principales du laminage à chaud





Classification des produits sidérurgiques

□ Les produits en acier peuvent être classés en 2 grandes catégories :

- Les produits **longs** qui sont obtenus par laminage à chaud, étirage ou tréfilage (poutrelles, palplanches, câbles, fils, ronds à béton...).

- les produits **plats** qui subissent en général un laminage à froid supplémentaire, à l'exception des tôles de forte épaisseur (tôles, bardages, profils minces, profils creux...).

Les produits longs

- **Les laminés marchands:** on distingue :

a) les ronds pleins,

b) les carrés pleins,

c) les hexagones pleins,

d) les plats,

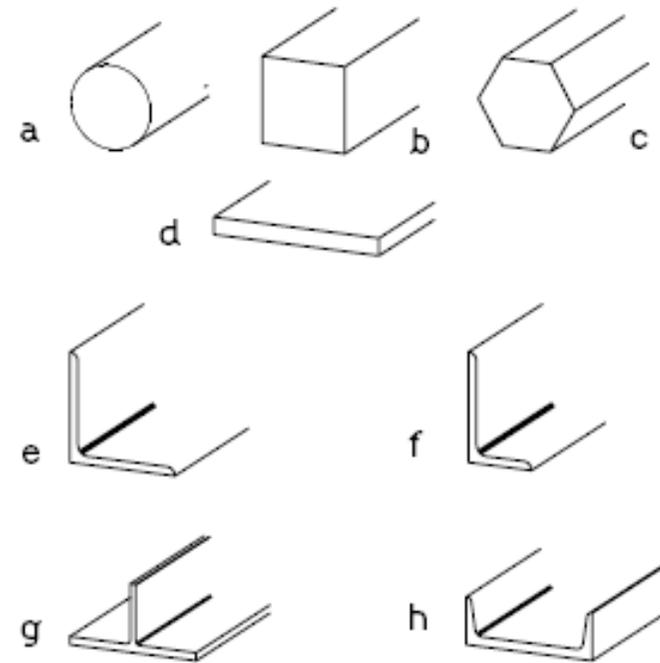
e) les cornières (L) à ailes égales,

f) les cornières (L) à ailes inégales,

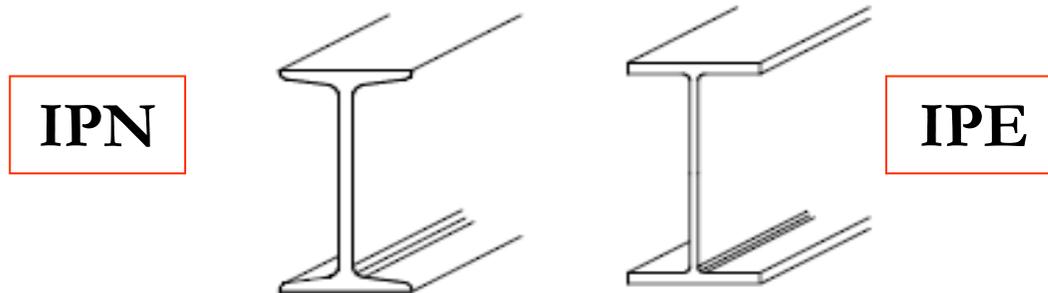
g) Les fers en T,

h) les petits U

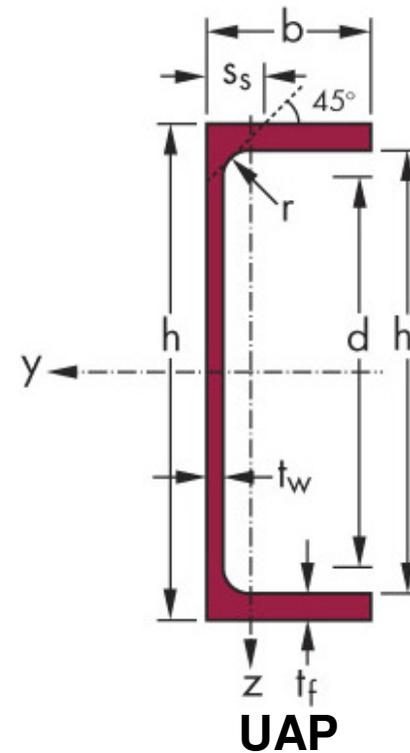
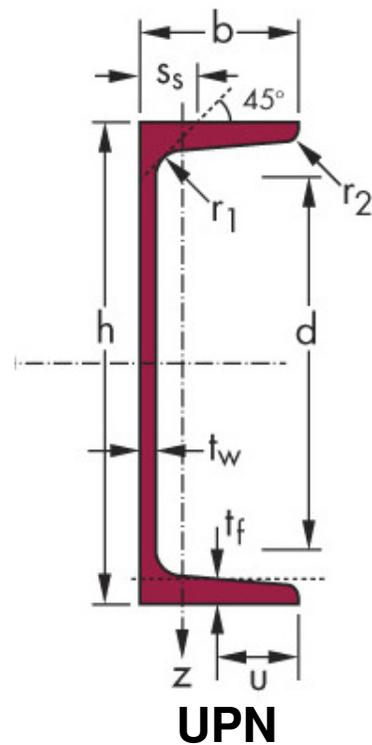
...



- **Les poutrelles laminées:** elles peuvent avoir différentes sections, en I, en U, ou en H.
 - Les poutrelles en I sont de deux sortes :
 - IPN : poutrelles en I normales. Les ailes sont d'épaisseur variable, ce qui entraîne des petites difficultés pour les attaches ;
 - IPE : poutrelles en I européennes. Les ailes présentent des bords parallèles, les extrémités sont à angles vifs (seuls les angles rentrants sont arrondis). Les IPE sont un peu plus onéreux, mais plus commodes et sont d'usage courant.

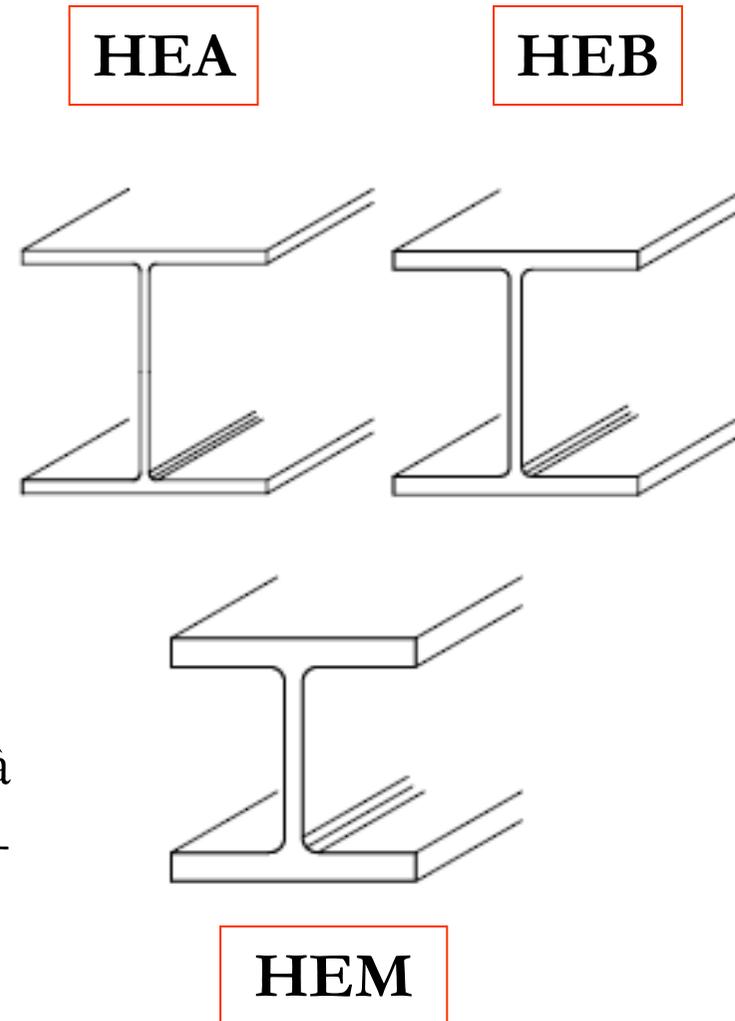


- Les poutrelles en U souvent utilisées comme éléments secondaires. On distingue:
 - UPN : les faces internes des ailes sont inclinées;
 - UAP : l'épaisseur des ailes est constante;
 - UPE : l'épaisseur des ailes est constante.



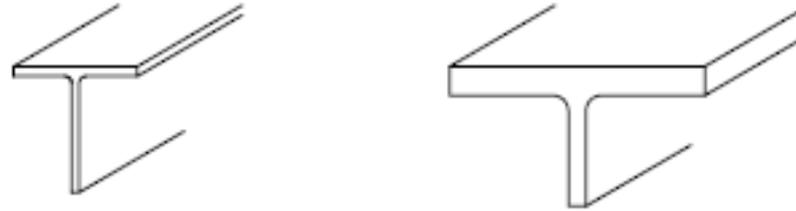
➤ Les poutrelles en HE se décomposent en trois séries suivant l'épaisseur relative de leur âme et de leurs ailes :

- HEA;
- HEB;
- HEM.



Il existe aussi des poutrelles HL (à très larges ailes), HD (poutrelles-colonnes) et HP (poutrelles-pieux).

- **Les demi poutrelles** : Le découpage des poutrelles I et H suivant l'axe longitudinal a de multiples utilisations : sections T, membrures de poutres...



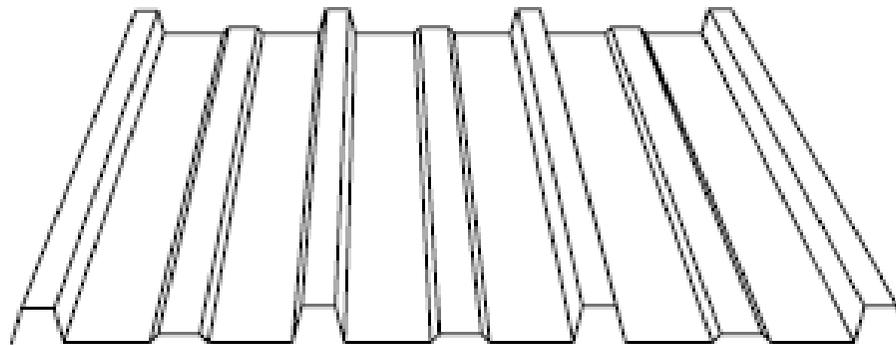
- **Les poutrelles dissymétriques** : Ce sont des poutres reconstituées composées soit d'un T et d'une large semelle inférieure soudée (dénommées IFB, pour Integrated Floor Beam), soit formées d'un H dont la semelle inférieure a été élargie par adjonction d'un plat (dénommée SFB, pour Slim Floor Beam). Grâce à leur aile inférieure élargie, elles sont particulièrement adaptées pour la pose de planchers préfabriqués, de coffrages en acier permettant d'incorporer la dalle dans la hauteur de la poutrelle, soit encore pour la pose de dalles alvéolaires en béton précontraint.

Les produits plats

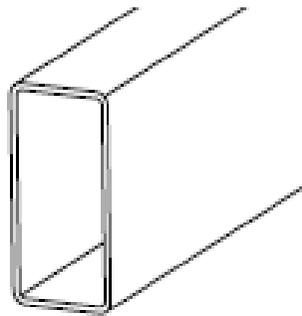
- **Les tôles et les larges plats :**
 - ✓ Les tôles sont fabriquées sous forme de bobines.
 - ✓ Elles sont livrées en largeurs standards ou à la demande, mais les largeurs sont en général limitées à 1800 mm.
 - ✓ L'épaisseur ne dépasse pas 16 à 20 mm pour les tôles laminées à chaud et 3 mm pour les tôles laminées à froid.
 - ✓ Celles-ci peuvent être mises en forme par profilage, pliage ou emboutissage.

- **Les tôles nervurées :**

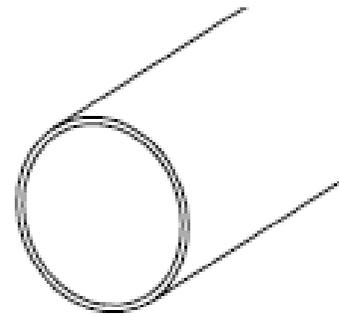
- ✓ Ce sont des tôles minces que l'on nervure par profilage à froid à l'aide d'une machine à galets. Les tôles nervurées sont issues de bobines galvanisées et souvent prélaquées.
- ✓ Les applications concernent les produits d'enveloppe (bardage), de couverture (bac, support d'étanchéité) et de plancher (bac pour plancher collaborant ou à coffrage perdu), ainsi que les panneaux sandwich incorporant des matériaux isolants.



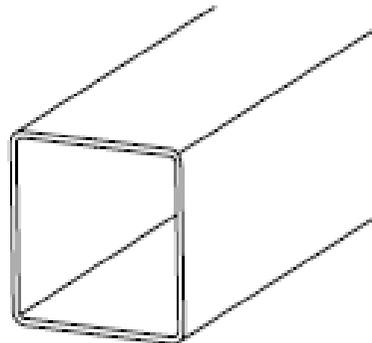
- **Les profils creux :** Les tubes de construction sont appelés « profils creux ». Ils sont fabriqués en continu à partir de tôles minces ou moyennes repliées dans le sens de leur longueur.



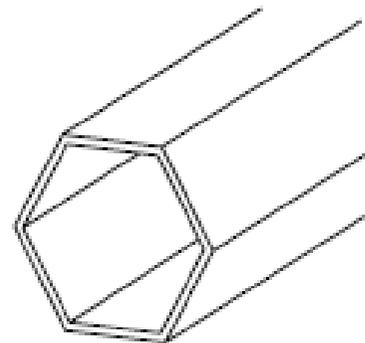
a



b

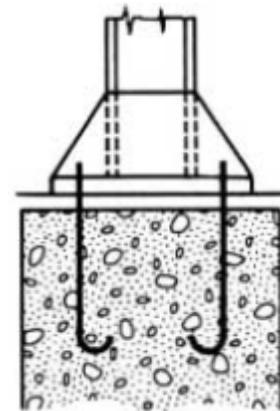
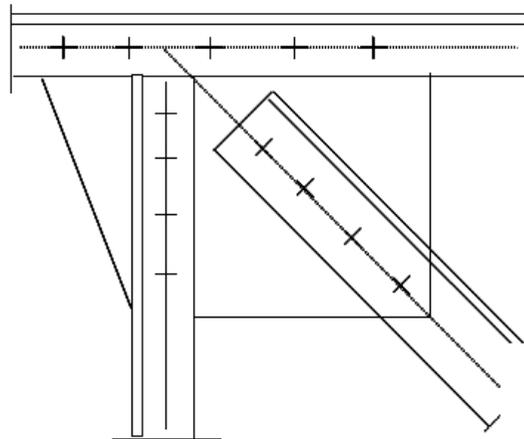
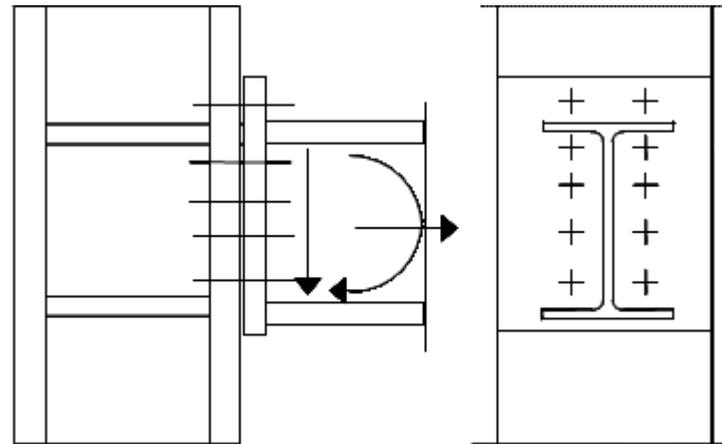
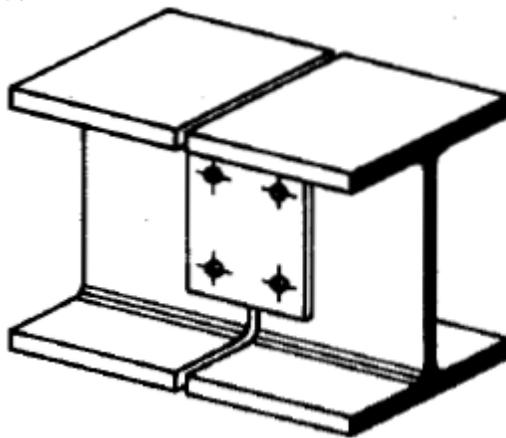


c



d

- **Les plaques :** On parle de plaques lorsque l'épaisseur dépasse 20 mm. On peut obtenir des plaques jusqu'à 400 mm d'épaisseur et 5200 mm de largeur. Les plaques sont principalement utilisées pour les ouvrages d'art. Leur assemblage par soudure peut être complexe. Il existe aussi des plaques à épaisseur variable pour les ouvrages d'art.



- **Les profils minces** : Les tôles minces galvanisées (d'épaisseur inférieure à 5 mm) peuvent être profilées à froid pour réaliser des profils minces. De sections très diverses, les profils minces sont utilisés en serrurerie, en menuiserie métallique et en ossatures légères : pannes de charpente, ossatures de murs ou de cloisons, de faux plafond...



Comportement mécanique de l'acier

Essai de traction

ϵ_y : allongement élastique

f_y : limite d'élasticité

ϵ_u : allongement à la rupture

f_u : limite de rupture

$\epsilon_r - \epsilon_u$: allongement de striction

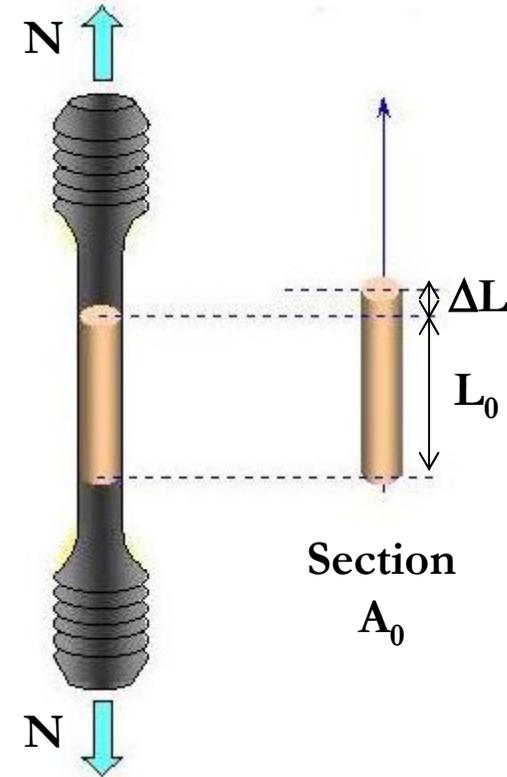
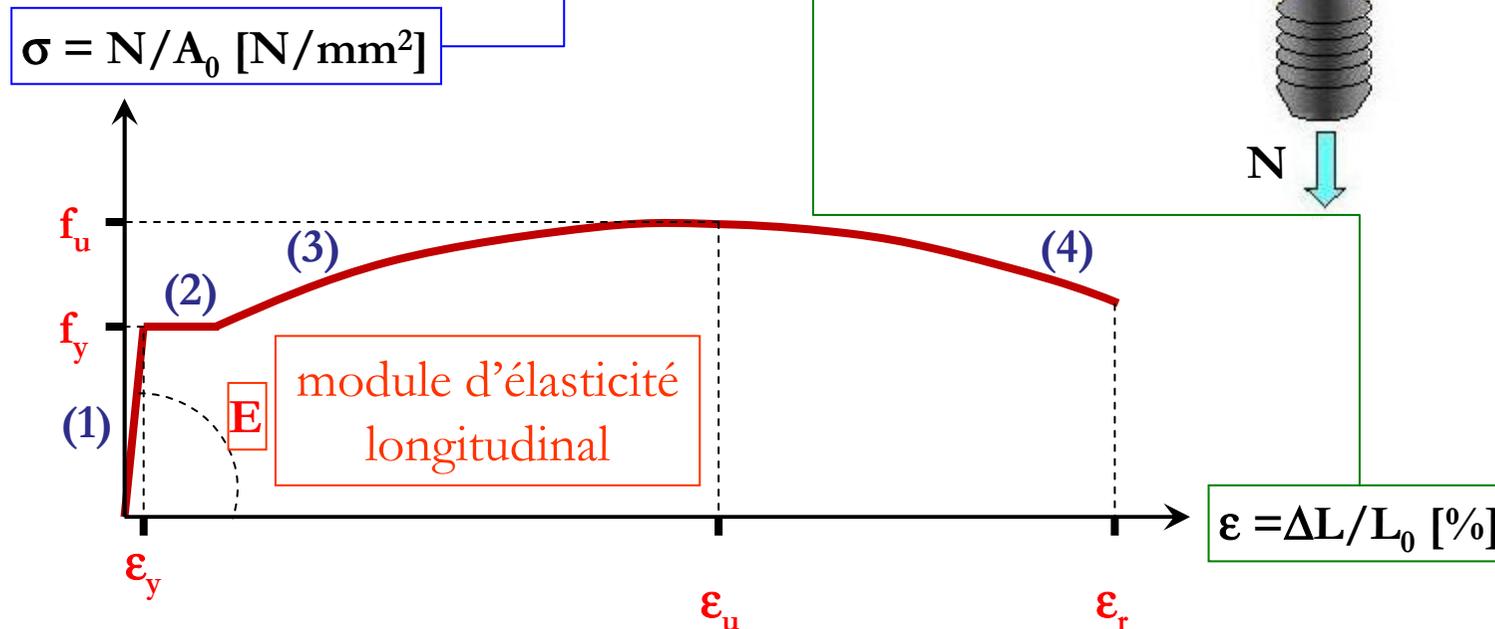


Diagramme **contrainte** **déformation**



□ Ce diagramme contrainte-déformation se décompose en 4 phases :

- **Phase 1 - domaine élastique** : obéissant à la loi de Hooke

$$\sigma = E.\varepsilon$$

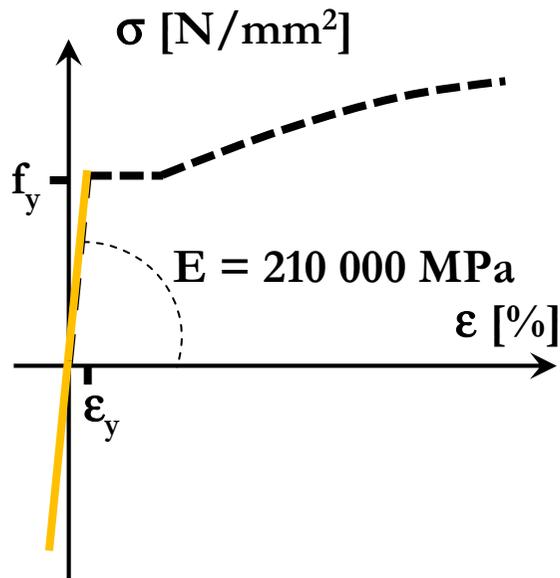
- **Phase 2 - palier d'écoulement plastique** : traduisant un allongement sous charge constante.
- **Phase 3 – domaine d'écrouissage** : correspondant à une nouvelle augmentation de la sollicitation avec l'allongement.
- **Phase 4 – domaine de striction** : correspondant à une réduction localisée de la section de l'éprouvette.

- ❑ En construction métallique, les pièces et les éléments des ossatures sont conçus et calculés pour rester la plupart du temps dans le domaine élastique.

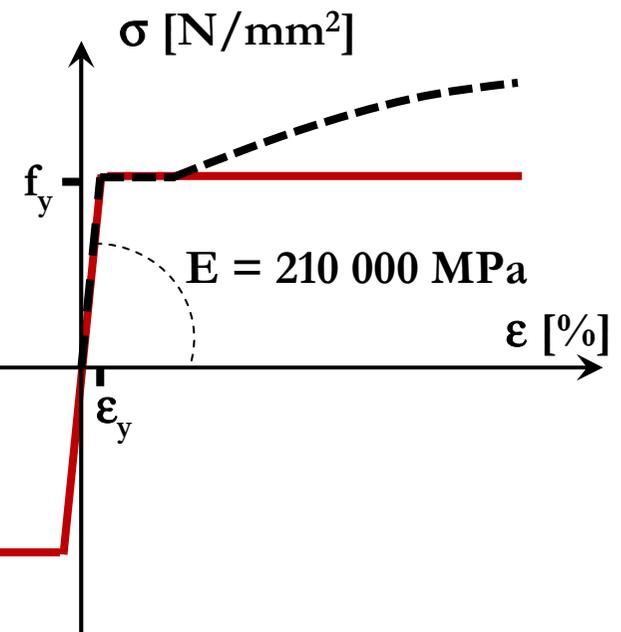
- ❑ Le palier d'écoulement plastique représente une réserve de sécurité. Il traduit la **ductilité** de l'acier (elle permet une bonne tenue aux séismes).

- ❑ L'acier a un comportement **élastoplastique**.

Comportement élastique



Comportement élastoplastique parfait



↑ Traction
↓ Compression

Comportement réel

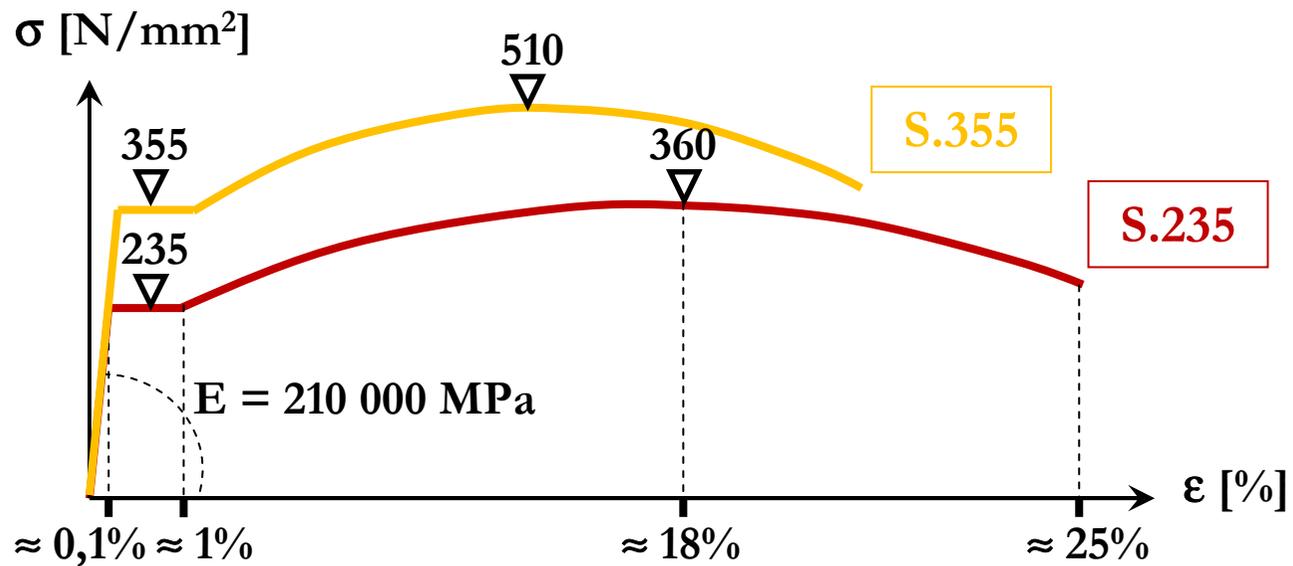
Principales caractéristiques des aciers de construction

Poids volumique	$\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$
Module d'élasticité longitudinale	$E = 2,1 \times 10^5 \text{ MPa}$
Coefficient de Poisson	$\nu = 0,3$
Module d'élasticité transversale	$G = E / 2(1 + \nu) = 0,8 \times 10^5 \text{ MPa}$
Contrainte limite élastique de cisaillement pur (critère de Von Mises)	$\tau_e = 0,58 f_y$
Coefficient de dilatation thermique	$\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (pour $T < 100^\circ\text{C}$)
Température de fusion	$\cong 1500 \text{ }^\circ\text{C}$

Nuances principales des aciers de construction

Caractéristiques mécaniques des aciers en fonction de leur épaisseur t	Nuances d'aciers		
	S 235	S 275	S 355
Limite élastique f_y (MPa) $t \leq 16$ mm $16 < t \leq 40$ mm $40 < t \leq 63$ mm	235 225 215	275 265 255	355 345 335
Contrainte de rupture en traction f_u (MPa) $t \leq 3$ mm $3 < t \leq 100$ mm	360/510 340/470	430/580 410/560	510/680 490/630
Allongement minimal moyen ε $t \leq 3$ mm $3 < t \leq 150$ mm	18 % 23 %	15 % 19 %	15 % 19 %
	Utilisation courante	Utilisation plus rare (ouvrages d'art)	

Diagrammes contrainte-déformation des aciers de nuances S 235 et S 355



Facteurs affectant la conception d'une construction en acier

La **sécurité structurale** de l'ossature (capacité portante, stabilité, résistance au feu ...)

+

L'**aptitude au service** de la construction (utilisation des surfaces ou des volumes, fonctionnement, confort ...)

+ prise en compte de :

- l'économie de la construction
- et
- l'impact sur l'environnement

Les règles et normes de conception et de calcul appliquées à l'étude des projets de construction en acier

Règles CM66
+
Leur additifs de 1980

Les **Eurocodes** structuraux concernant
les structures métalliques

- **EC 0** : qui définit les bases de calcul des structures
- **EC 1** : qui définit les exigences en matière de sécurité, d'aptitude au service et de durabilité des structures ainsi que les actions qui les sollicitent
- **EC 3** : qui porte sur la conception et le calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil en acier
- **EC 4** : qui porte sur la conception et le calcul d'ouvrages mixtes acier-béton
- **EC 8** : qui définit les exigences de tenue au séisme des bâtiments et ouvrages

L'Eurocode 3 est subdivisé en différentes parties :

- EN 1993-1 Règles générales et règles pour les bâtiments ;
- EN 1993-2 Ponts métalliques ;
- EN 1993-3 Pylônes, mâts et cheminées ;
- EN 1993-4 Silos, réservoirs et canalisations ;
- EN 1993-5 Pieux et palplanches ;
- EN 1993-6 Chemin de roulement.

Sécurité des structures

Une définition de la sécurité : l'absence du risque.

- Un ouvrage en acier doit être **conçu** et **calculé** de manière à présenter une sécurité liée à l'**existence** et à l'**utilisation** de cette construction.

- En général les risques sont :
 - * la **ruine** de l'ouvrage ou de l'un de ses éléments,
 - * un comportement anormal susceptible d'affecter la **durabilité**, l'**aspect** ou l'**utilisation** de cet ouvrage.

- En réalité la notion de sécurité reste liée aux diverses causes d'**incertitudes** qui peuvent exister, qui sont liées au grand nombre d'imprécisions, d'imperfections et d'erreurs pouvant affecter :

- * la conception d'une structure,
- * la fabrication des éléments,
- * la transformation des pièces,
- * le montage sur site,
- * l'exploitation par le maître d'ouvrage,
- * etc.

- L'idée de base du **probabilisme** est de limiter la probabilité d'atteindre des états indésirables de la structure en acier à une valeur acceptable en tenant compte du caractère aléatoire des paramètres dans le calcul.

↓
En réalité, les lois de probabilité des différentes variables ne sont pas toujours connues

↓
Semi-probabilisme

↓
Méthode dite **aux états limites**

Les états-limites

- **État-limite** : État particulier au delà duquel (dépassement dans le sens défavorable) la structure (ou l'un de ses éléments) n'assure plus les fonctions et ne satisfait plus aux exigences pour lesquelles elle a été conçue.

On distingue deux catégories d'états-limites :

- les états-limites ultimes (**E.L.U.**)
et
- les états limites de service (**E.L.S.**)

- **États-limites ultimes (E.L.U.)** : Il y a effondrement de la structure ou d'autres formes de ruine structurale au delà de ces états → Sécurité des biens et des personnes.

Un E.L.U. est atteint lorsque l'on constate :

- une perte d'équilibre,
- une instabilité de forme,
- une rupture d'élément,
- une déformation plastique exagérée
- etc.

- **États-limites de service (E.L.S.)** : Ils correspondent à des critères dont le non respect ne permet pas à l'élément d'être exploité dans des conditions satisfaisantes, ou compromet sa durabilité. (limitation des flèches, de la fissuration du béton ...)

Pont métallique provisoire au gouvernorat de Jendouba (2011)



Couverture de la salle de sport de Hammamet



Les actions agissant sur une structure (Eurocode 1)

- ❑ Une action désigne une **charge** appliquée à la structure (action directe) ou une **déformation** imposée (action indirecte).
- ❑ La **valeur de calcul** d'une action est obtenue en faisant le produit d'une **valeur représentative de base (caractéristique)** de l'action par un **coefficient partiel de sécurité**.
- ❑ Les actions peuvent être subdivisées en 3 catégories:
 - **Les actions permanentes (G) :**
 - ✓ poids propres des structures et des équipements fixes,
 - ✓ action de la précontrainte,
 - ✓ déplacement différentiel des appuis,
 - ✓ déformation imposée à la construction.

- **Les actions variables (Q) :**

- ✓ charges d'exploitation,
- ✓ action du vent,
- ✓ action de la neige,
- ✓ action des gradients thermiques,
- ✓ charges en cours de construction.

- **Les actions accidentelles (A) :**

- ✓ chocs,
- ✓ incendie,
- ✓ séisme,
- ✓ explosions.

Les combinaisons d'actions (Eurocode 1)

- A l'ELU :

= 1,35 action permanente défavorable

= 1,0 action permanente favorable

✓ **Combinaisons d'actions fondamentales** (situations de projet durables et transitoires pour des vérifications autres que celles concernant la fatigue) :

$$\sum_j \gamma_{g,j} G_j + \gamma_{q,1} Q_1 + \sum_{i>1} \gamma_{q,i} \psi_{0,i} Q_i$$

= 1,5 action variable défavorable

= 0 action variable favorable

✓ **Combinaisons d'actions accidentelles** :

$$\sum_j G_j + A + \psi_{1,1} Q_1 + \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_i$$

- A l'ELS :

✓ Combinaisons rares:

$$\sum_j G_j + Q_1 + \sum_{i>1} \Psi_{0.i} Q_i$$

✓ Combinaisons fréquentes:

$$\sum_j G_j + \Psi_{1.1} Q_1 + \sum_{i>1} \Psi_{2.i} Q_i$$

✓ Combinaisons quasi permanentes:

$$\sum_j G_j + \sum_{i>0} \Psi_{2.i} Q_i$$

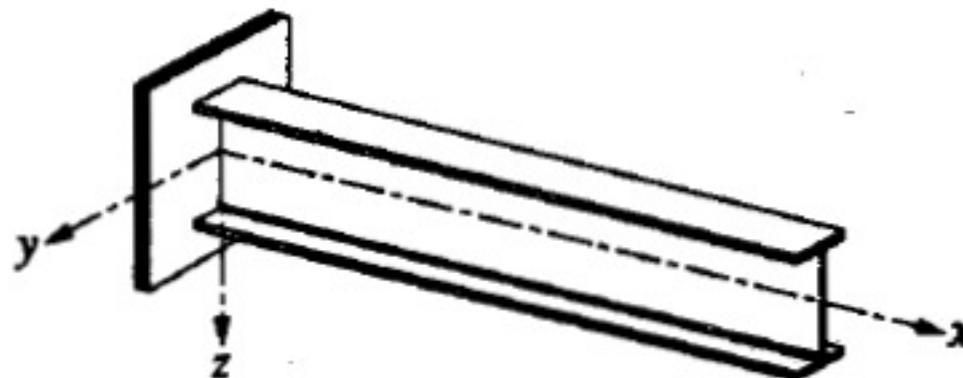
Coefficients Ψ pour les bâtiments

Action	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Charges d'exploitation des bâtiments ¹⁾			
— Catégorie A — d'habitation, résidentiels	[0,7]	[0,5]	[0,3]
— Catégorie B — bureaux	[0,7]	[0,5]	[0,3]
— Catégorie C — lieux de réunion	[0,7]	[0,7]	[0,6]
— Catégorie D — commerces	[0,7]	[0,7]	[0,6]
— Catégorie E — stockage	[1,0]	[0,9]	[0,8]
Charges dues à la circulation dans les bâtiments			
— Catégorie F — véhicules de poids ≤ 30 kN	[0,7]	[0,7]	[0,6]
— Catégorie G — véhicules de poids compris entre 30 kN et 160 kN	[0,7]	[0,5]	[0,3]
— Catégorie H — Toits	[0]	[0]	[0]
Charges dues à la neige sur les bâtiments	[0,6] ²⁾	[0,2] ²⁾	[0] ²⁾
Charges dues au vent sur les bâtiments	[0,6] ²⁾	[0,5] ²⁾	[0] ²⁾
Température (hors incendie) dans les bâtiments ³⁾	[0,6] ²⁾	[0,5] ²⁾	[0] ²⁾
<p>1) Pour les combinaisons de charges d'exploitation dans les bâtiments à plusieurs étages, voir l'ENV 1991-2-1.</p> <p>2) Des modifications peuvent être nécessaires en fonction des régions géographiques.</p> <p>3) Voir l'ENV 1991-2-5.</p>			

Valeurs limites recommandées des déformations

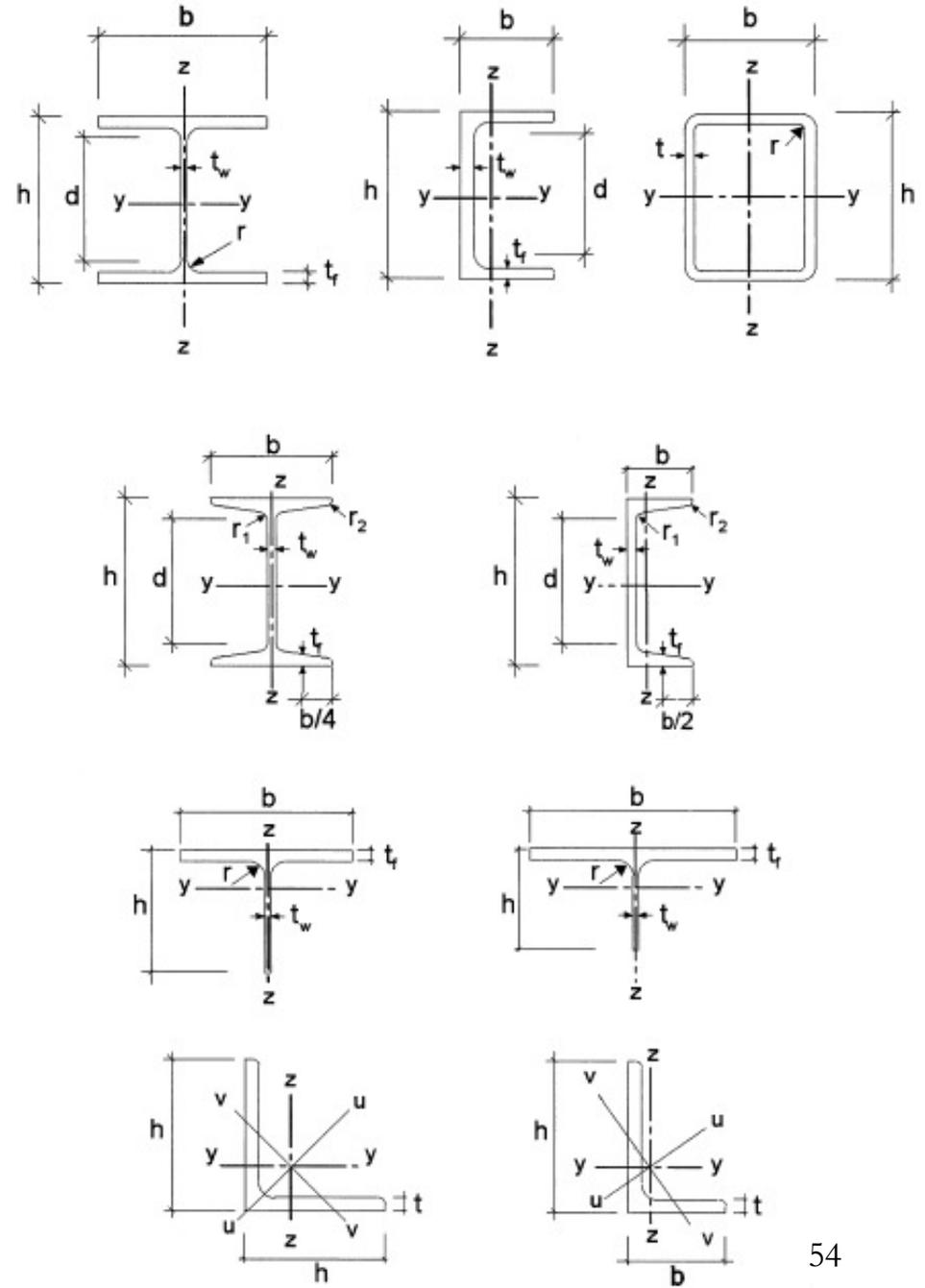
Type de structure	Valeur limite
toitures en général	$f < L/200$
planchers en général	$f < L/250$
planchers supportant des poteaux	$f < L/400$
poteaux de portiques en général	$\Delta < L/300$
poteaux de portiques avec pont roulant	$\Delta < L/500$

Convention – axes (Eurocode3)



$x-x$ - sur la longueur de la barre
 $y-y$ - axe de la section transversale
 $z-z$ - axe de la section transversale

- d'une manière générale :
 - $y-y$ - axe de section transversale parallèle aux semelles ;
 - $z-z$ - axe de section transversale perpendiculaire aux semelles ;
- pour les cornières :
 - $y-y$ - axe parallèle à l'aile la plus petite ;
 - $z-z$ - axe perpendiculaire à l'aile la plus petite ;
- quand nécessaire :
 - $u-u$ - axe principal de forte inertie (lorsqu'il ne coïncide pas avec l'axe yy) ;
 - $v-v$ - axe principal de faible inertie (lorsqu'il ne coïncide pas avec l'axe zz).



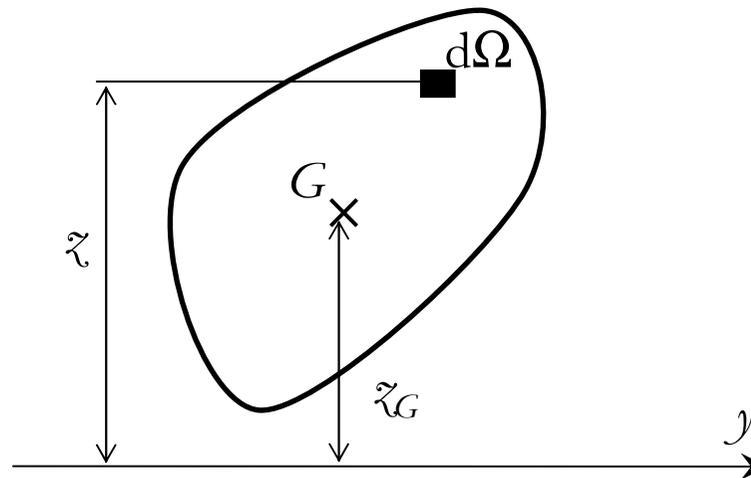
Caractéristiques géométriques des sections

□ Le moment statique de l'aire Ω par rapport à l'axe y

$$S_y = \int_{\Omega} z d\Omega$$

□ L'ordonnée du centre de gravité G par rapport à l'axe y

$$z_G = \frac{S_y}{\Omega} = \frac{\int_{\Omega} z d\Omega}{\Omega}$$



□ Le **moment d'inertie** d'une section d'aire Ω par rapport à l'axe y

$$I_y = \int_{\Omega} z^2 d\Omega$$

□ de même $I_z = \int_{\Omega} y^2 d\Omega$

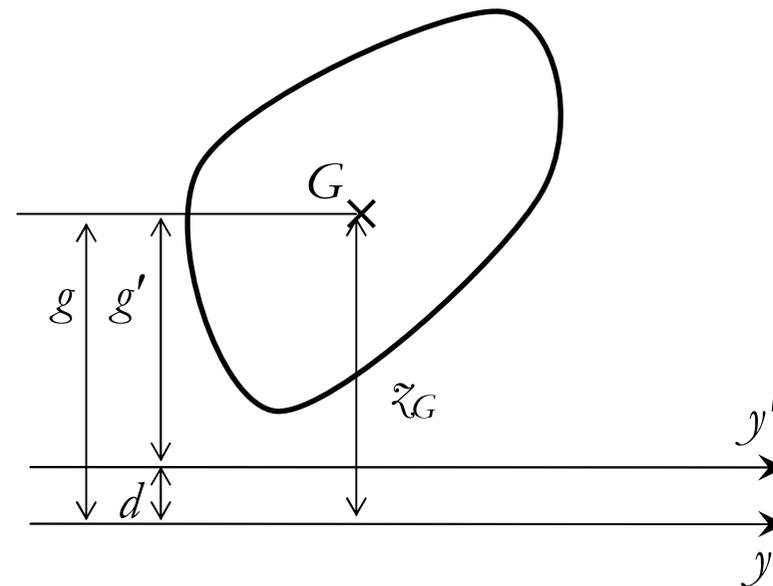
□ Conséquences d'un changement d'axe

$$S_{y'} = S_y - \Omega d$$

$$I_{y'} = I_y - \Omega(g^2 - g'^2)$$

□ Si l'axe y' passe par G

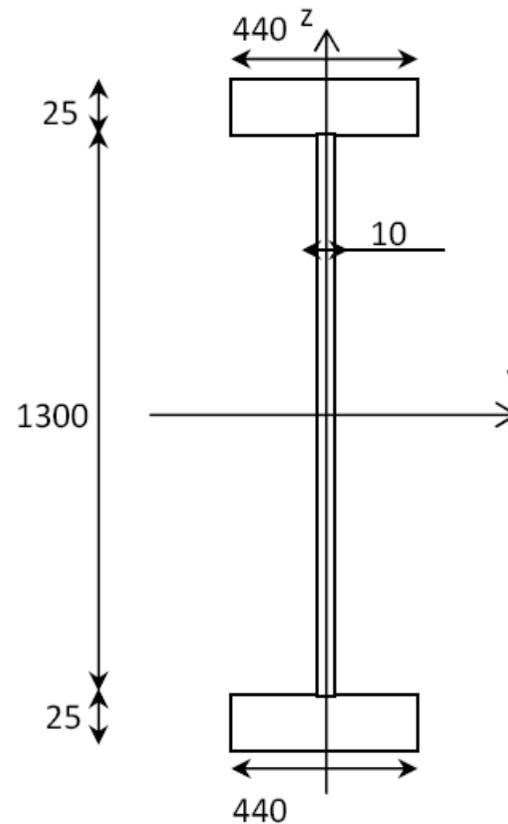
$$I_y = I_G + \Omega g^2$$



Applications (Caractéristiques géométriques des sections)

□ Application I-1 :

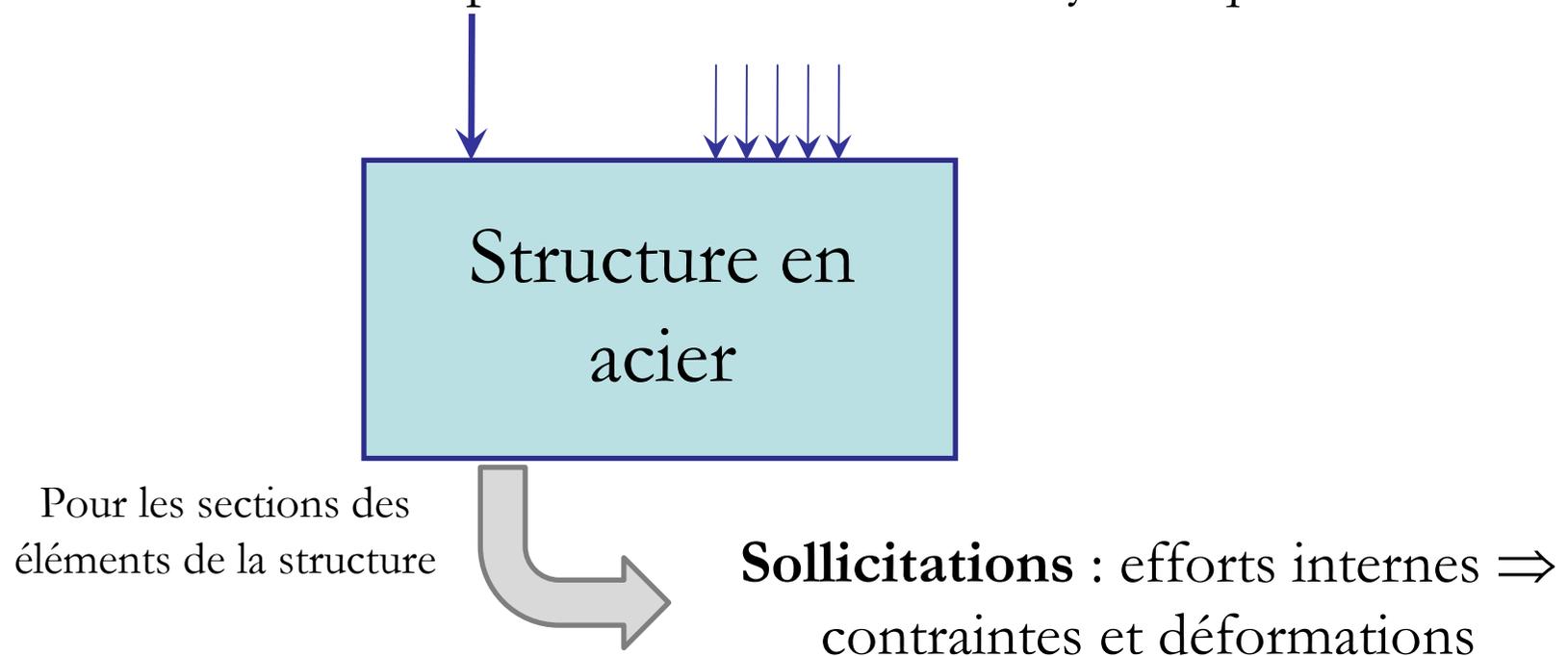
Déterminer A ; I_y ; I_z ; $W_{el,y}$; $W_{el,z}$.



Unité : mm

Résistance en section

Actions extérieures : charges concentrées et/ou réparties (forces / moments) – déplacements ou rotations imposés – variations de température – sollicitations dynamiques ...



□ Les **sollicitations** sont de 5 natures différentes :

✓ La **traction**.

⇐ Effort normal

✓ La **compression**.

✓ La **flexion**.

⇐ Moment de flexion

✓ Le **cisaillement**.

⇐ Effort tranchant

✓ La **torsion**.

⇐ Moment de torsion

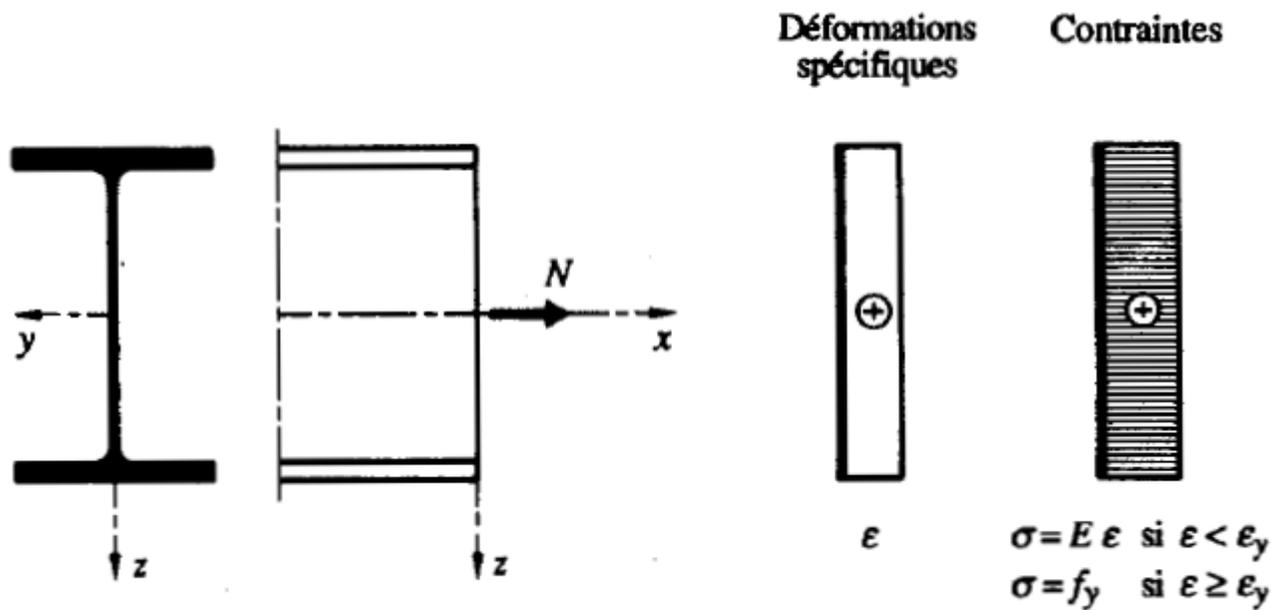
□ Une section peut être soumise à une **interaction** d'efforts (combinaison d'un effort normal, d'un moment de flexion, d'un effort tranchant et/ou d'un moment de torsion).

□ On distingue : la flexion **simple**, la flexion **biaxiale** (déviée ou gauche), la flexion **composée** et la flexion biaxiale composée.

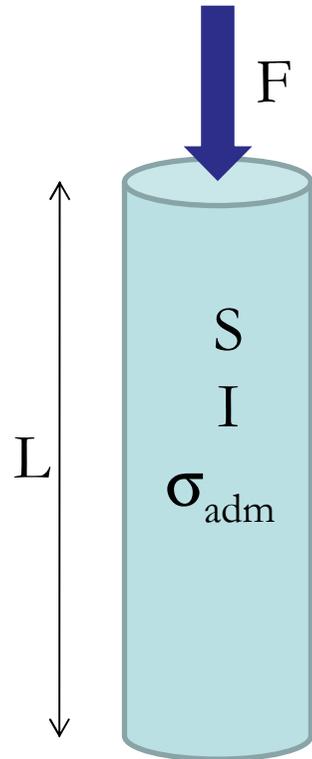
Effort normal de traction

Contrainte uniforme

$$N = \int_S \sigma \, dS = \sigma \int_S dS = \sigma \cdot S$$



Compression centrée + flambement



- Résistance (structures massives)

$$\sigma = \frac{F}{S} \leq \sigma_{adm}$$

- Flambement (structures élancées)

$$F \leq F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_f^2}$$

❑ Le flambement est possible suivant les deux axes principaux de la section de l'élément.

❑ On définit :

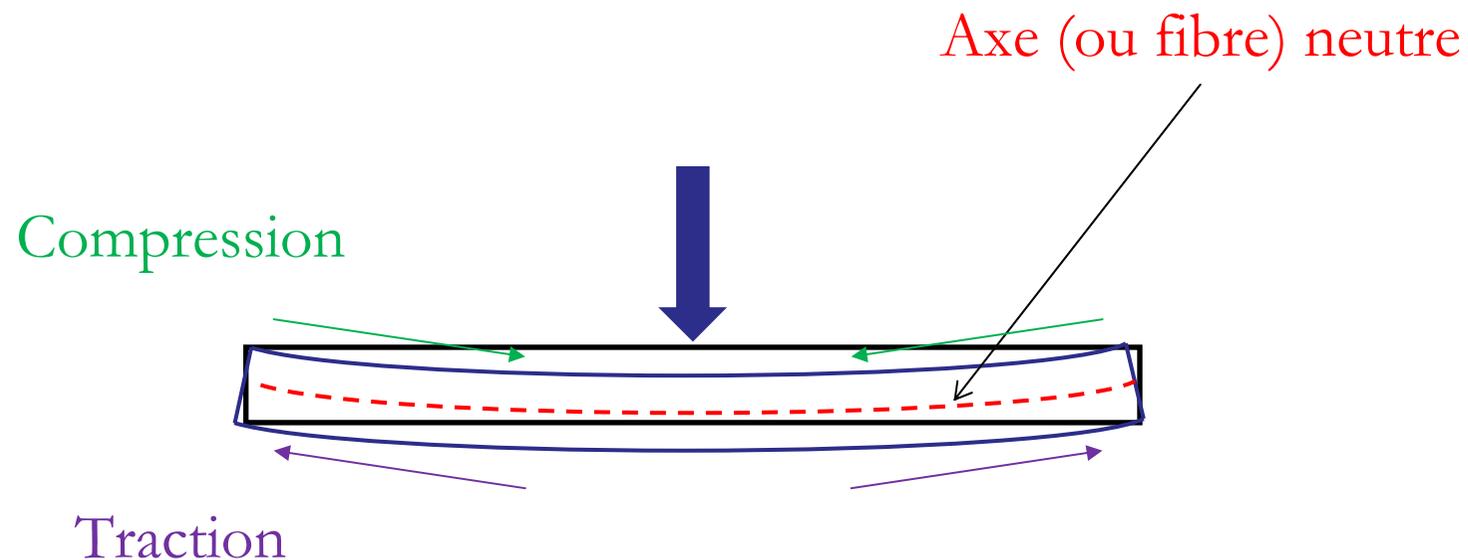
➤ l'élanement

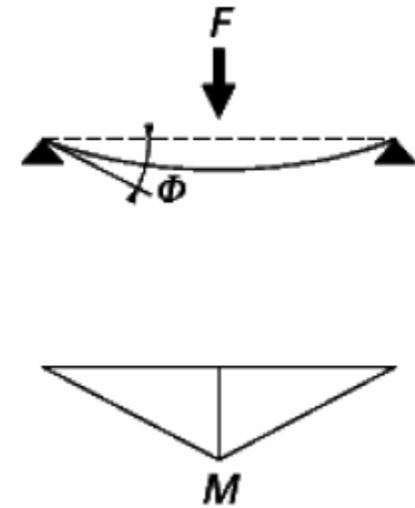
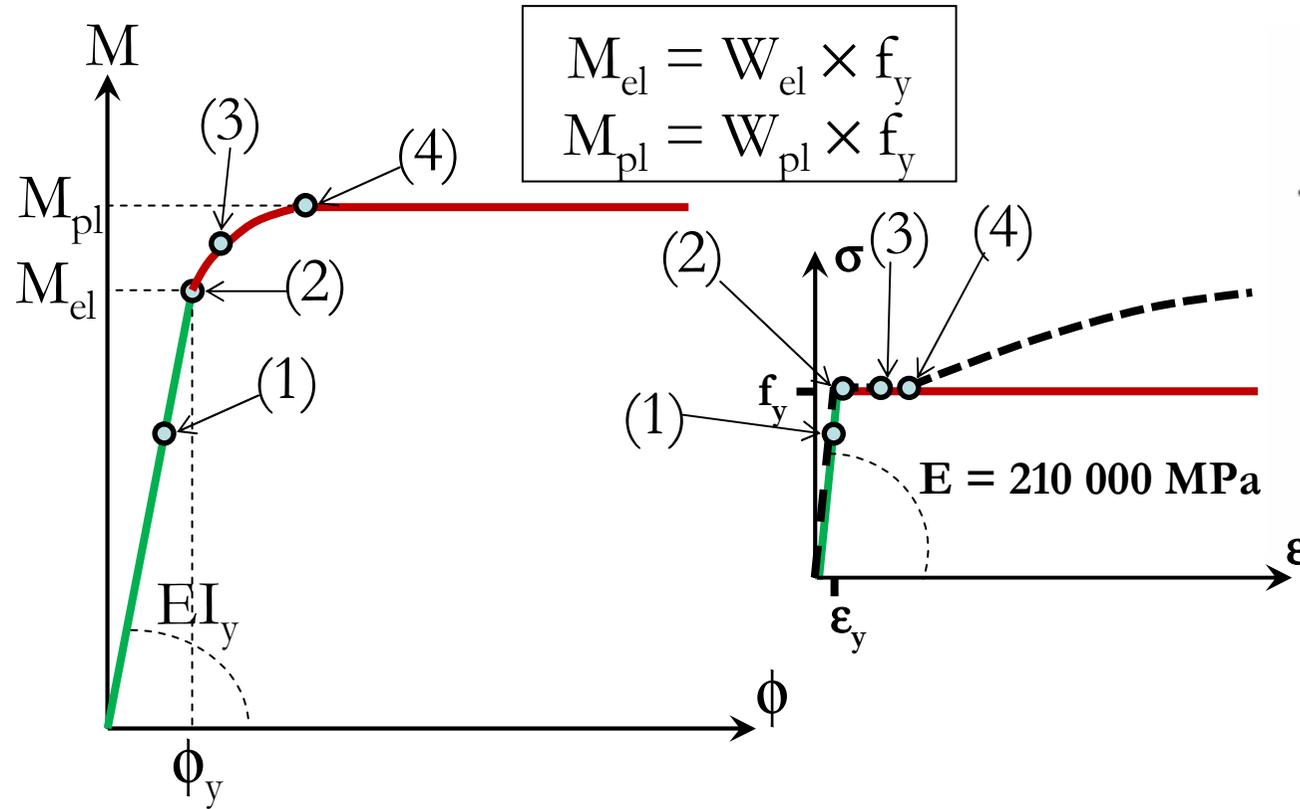
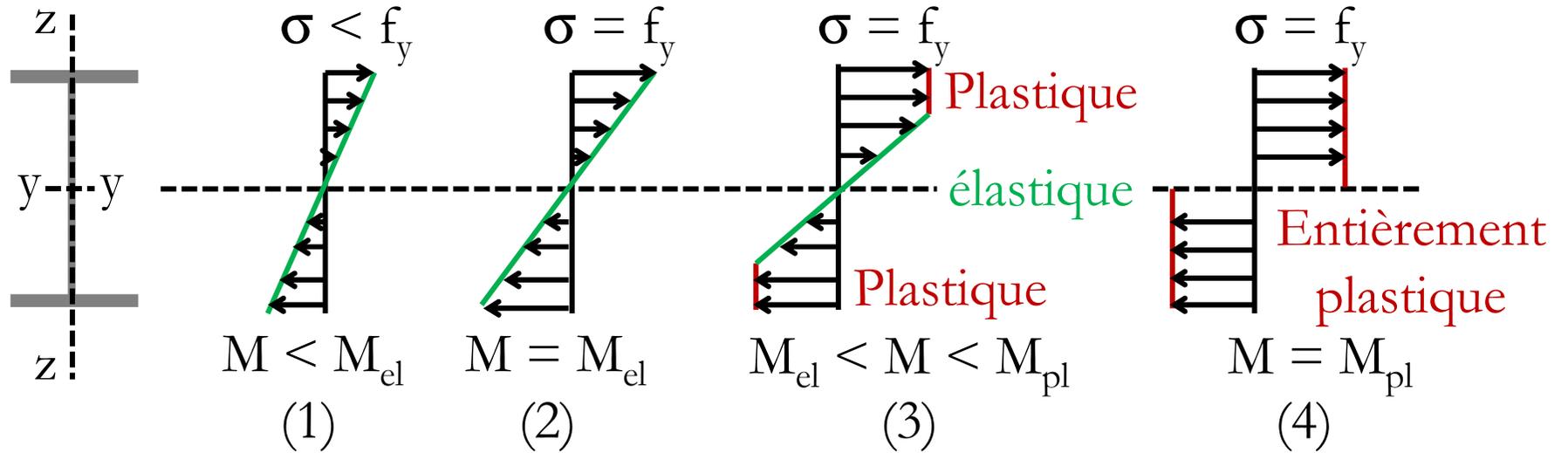
$$\lambda = \frac{l_f}{i}$$

➤ le rayon de giration

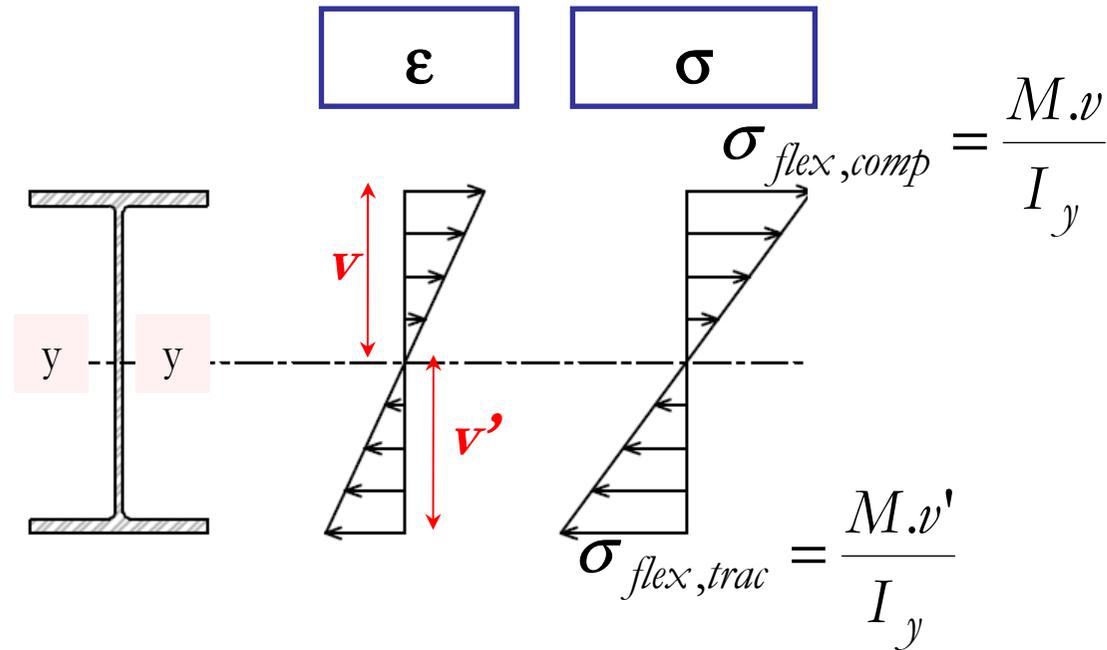
$$i = \sqrt{\frac{I}{S}}$$

Flexion simple
(Moment fléchissant)





□ Résistance **élastique** d'une section en flexion simple :



v (v') : distance entre la fibre supérieure (inférieure) et l'axe neutre.

$I_y = \int_A \tilde{x}^2 dA$: moment d'inertie de la section par rapport à l'axe de flexion y .

\Rightarrow Module d'inertie élastique : $W_{el,y} = \min\left(\frac{I_y}{v}, \frac{I_y}{v'}\right)$

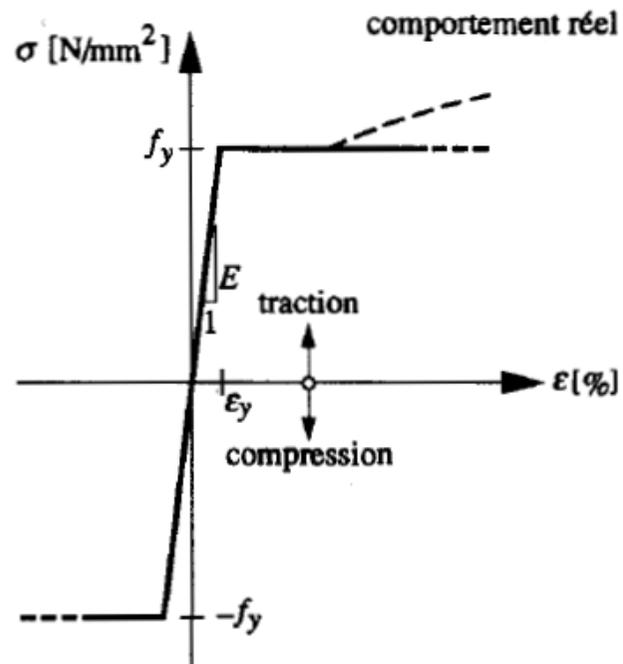
$$\Rightarrow \sigma_{flex,max} = \max\left(|\sigma_{flex,comp}|; |\sigma_{flex,trac}|\right) = \frac{M}{W_{el,y}}$$

⇒ Pour rester dans le domaine élastique :

$$\sigma_{flex,max} = \frac{M}{W_{el,y}} \leq f_y$$
$$\Rightarrow M \leq f_y \cdot W_{el,y} = M_{el,y}$$

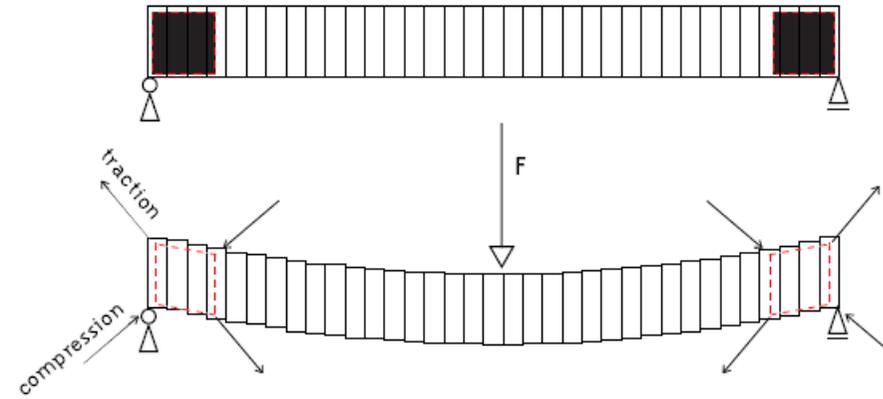
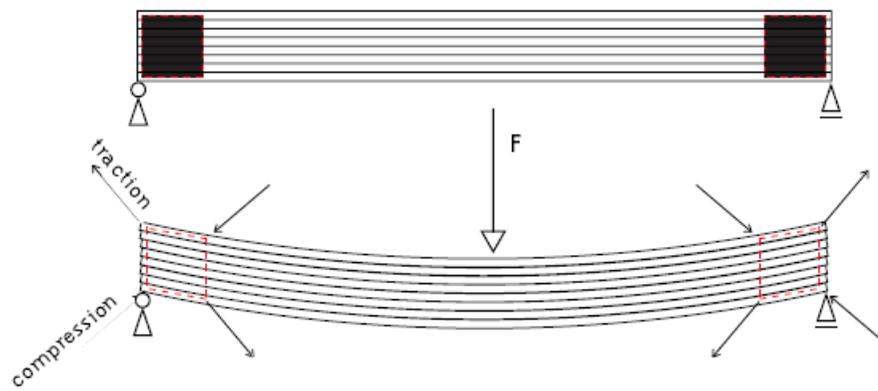
❑ Résistance **plastique** d'une section en flexion simple :

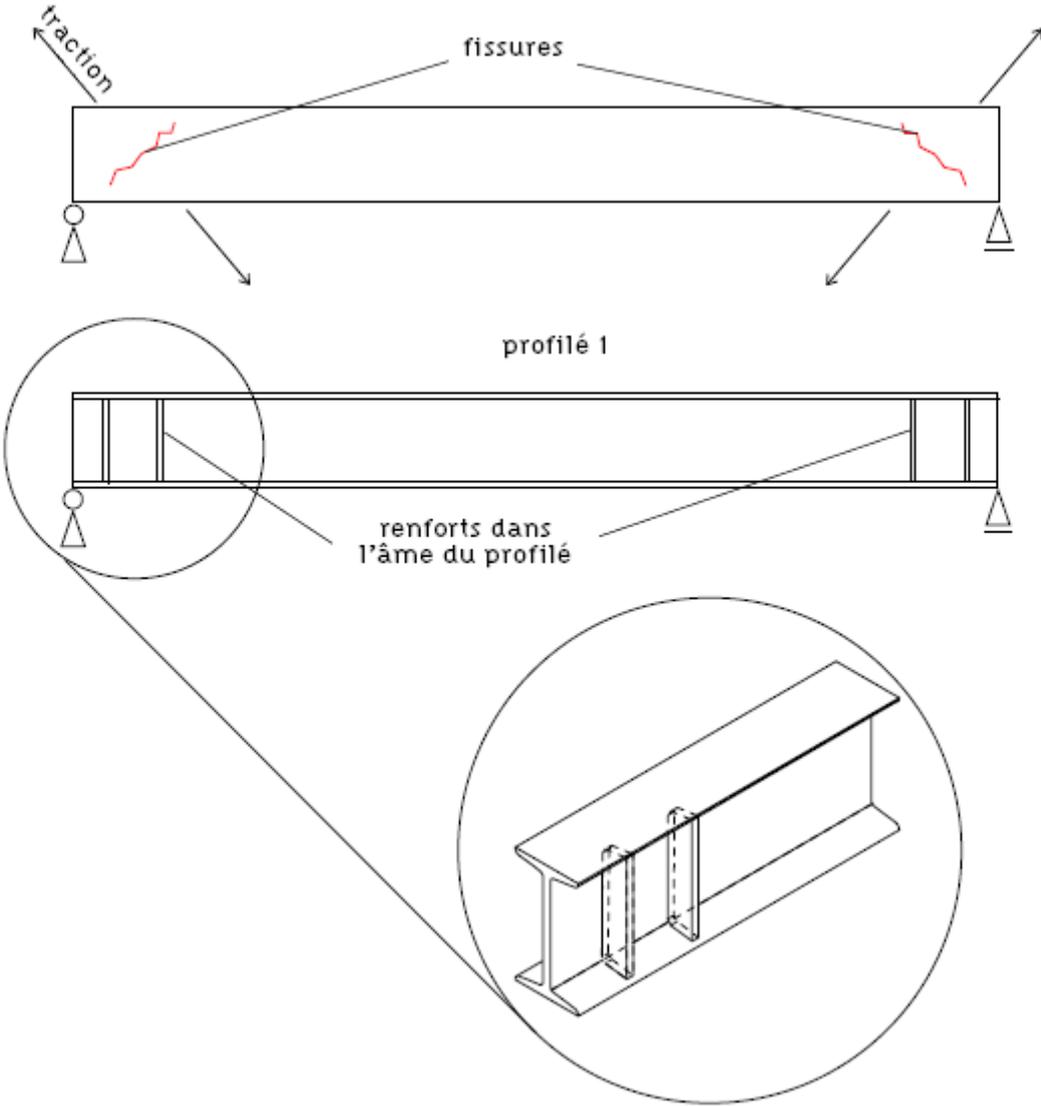
Le critère de dimensionnement élastique n'utilise pas la grande ductilité de l'acier.



$$M \leq M_{pl,y} = f_y \cdot W_{pl,y}$$

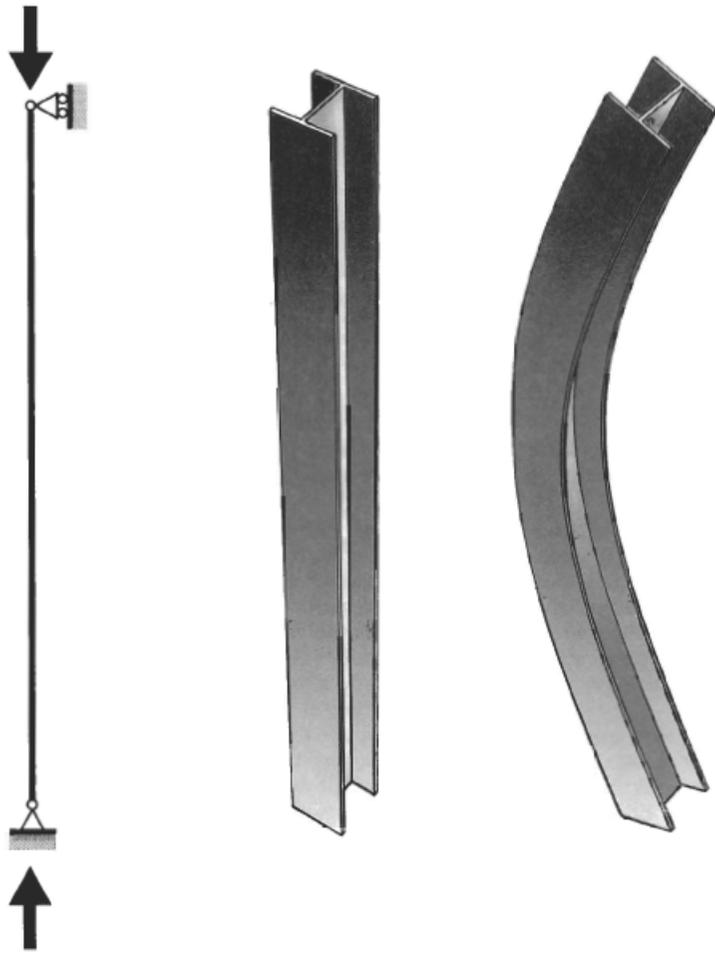
Cisaillement (Effort tranchant)

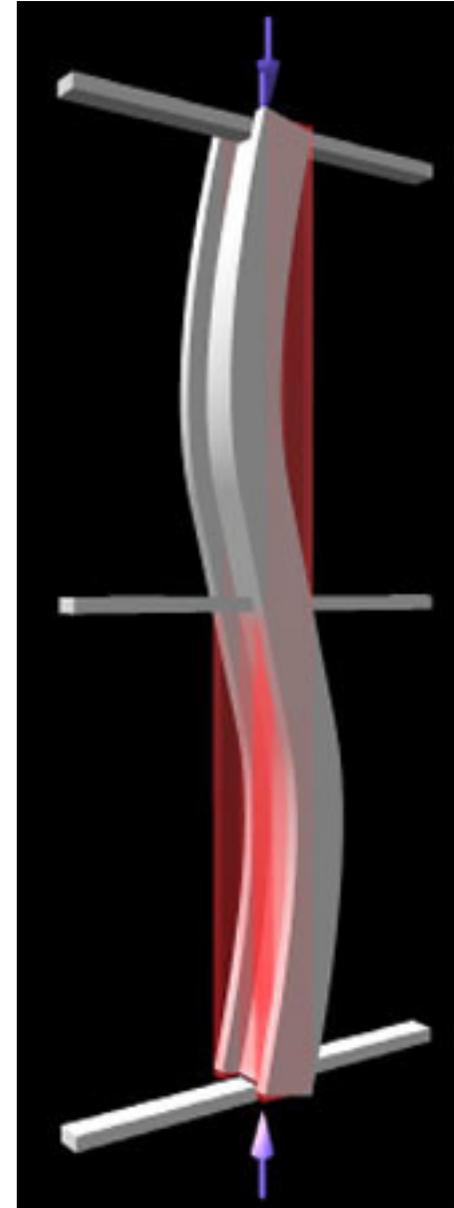
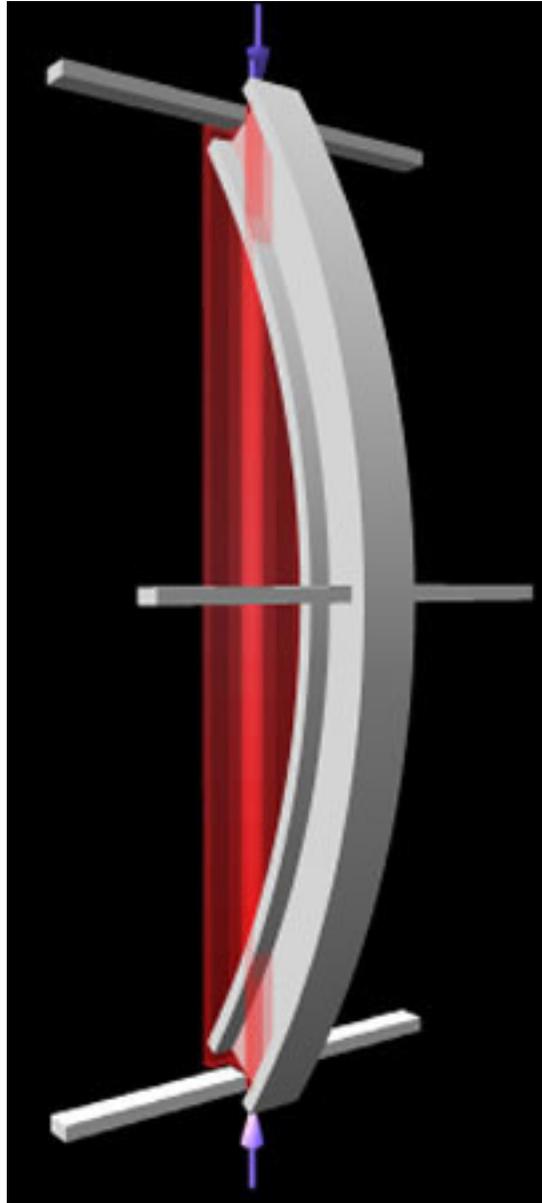
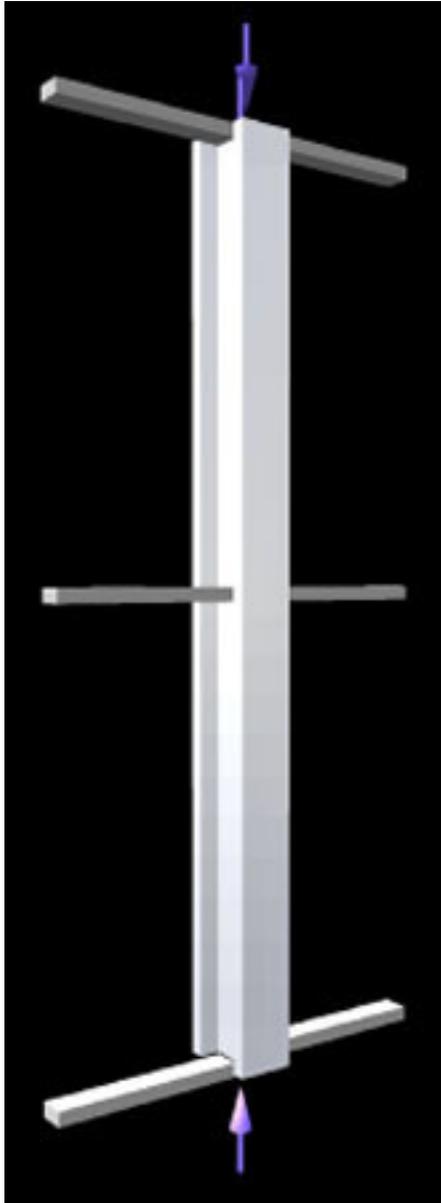




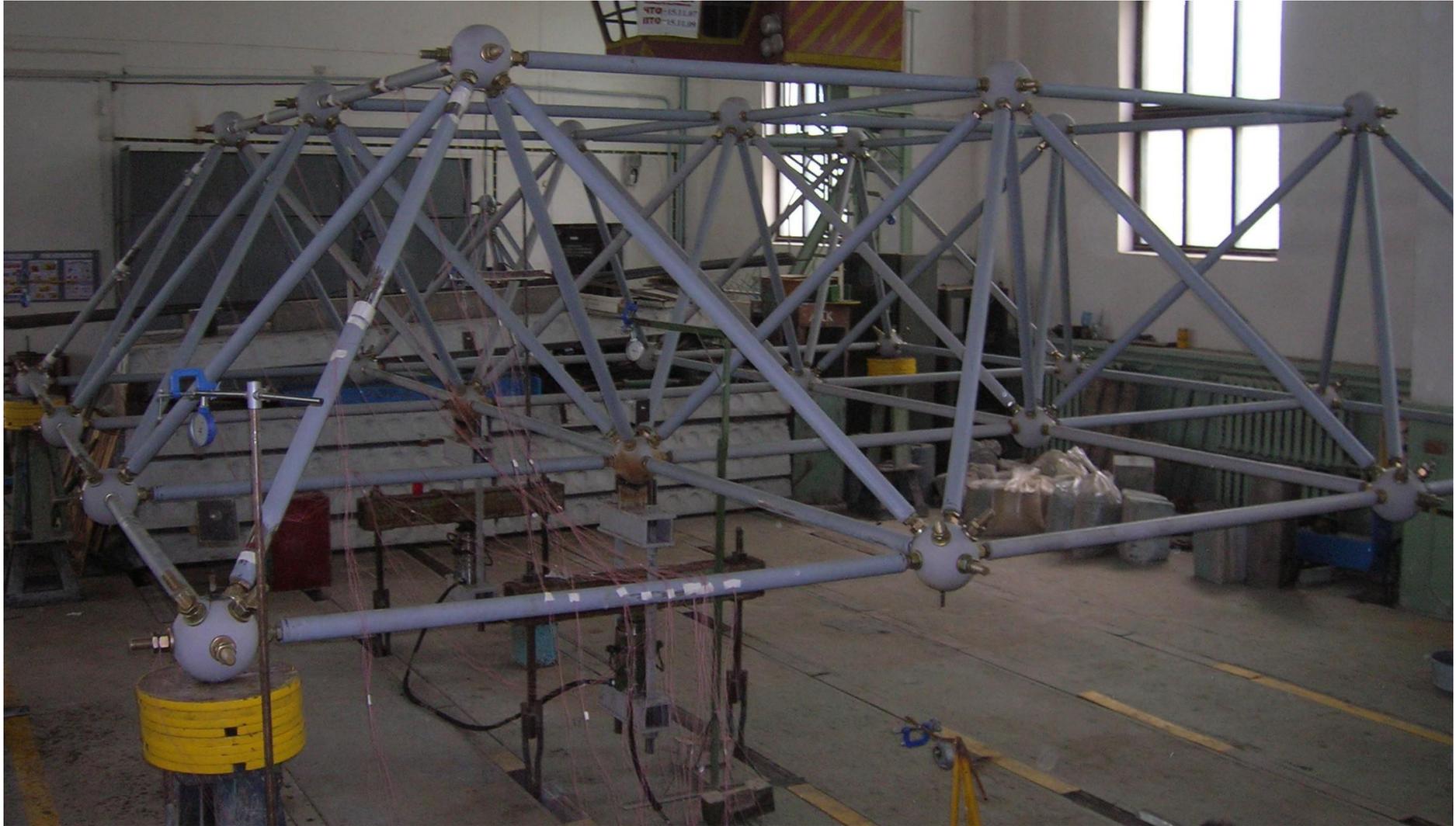
Phénomènes d'instabilité

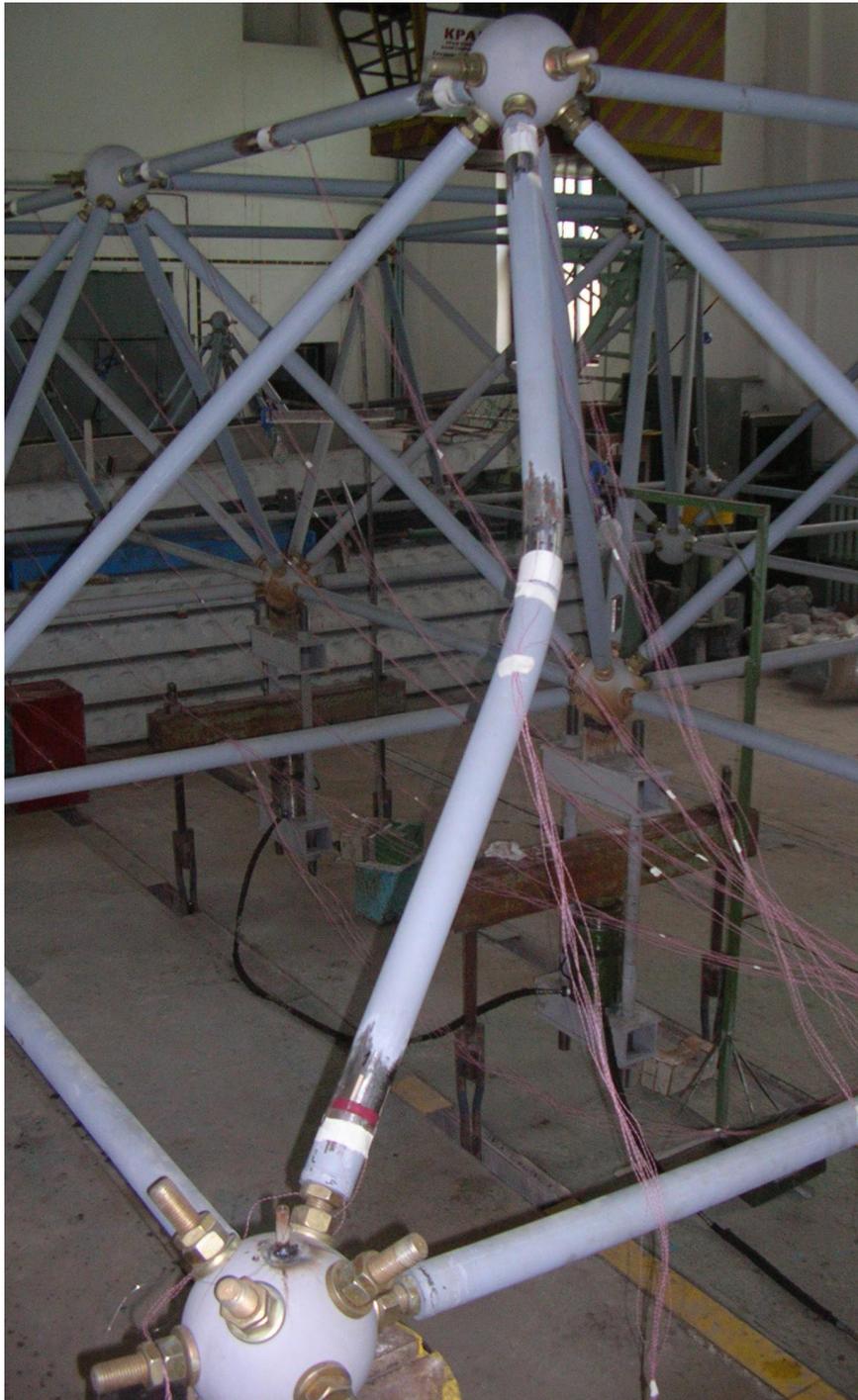
☐ Le flambement



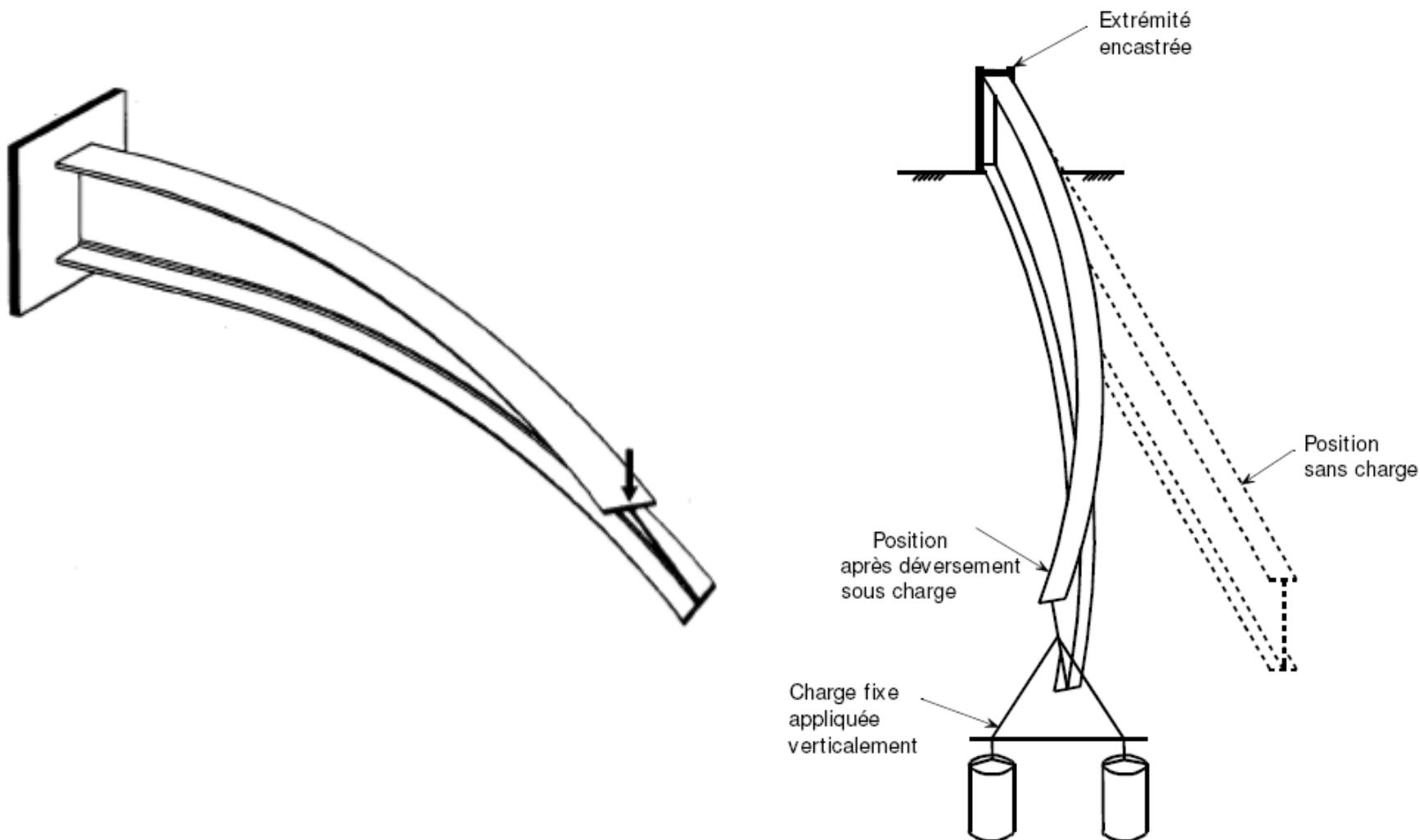


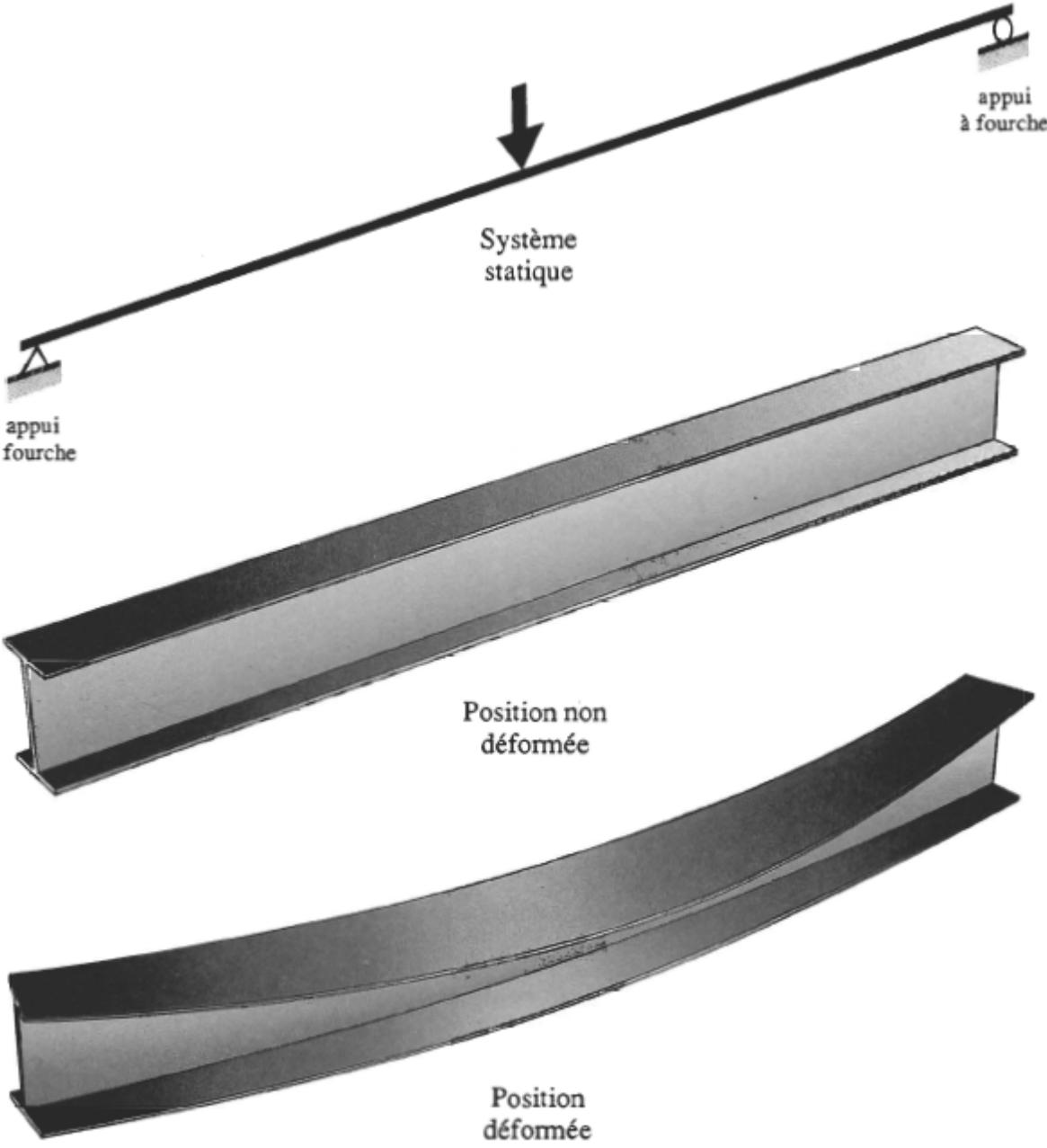
Etude expérimentale – Flambement des barres d'un treillis

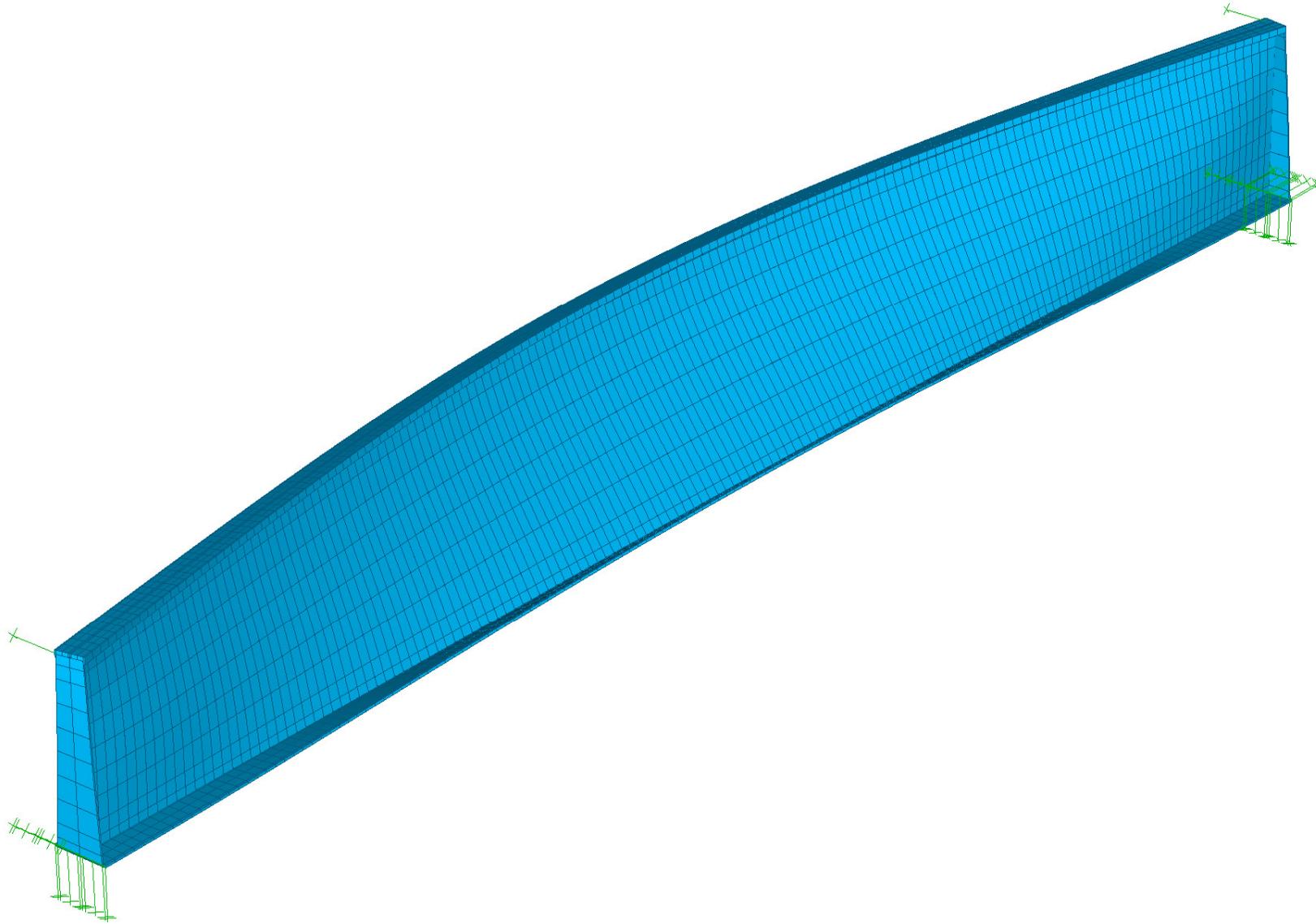


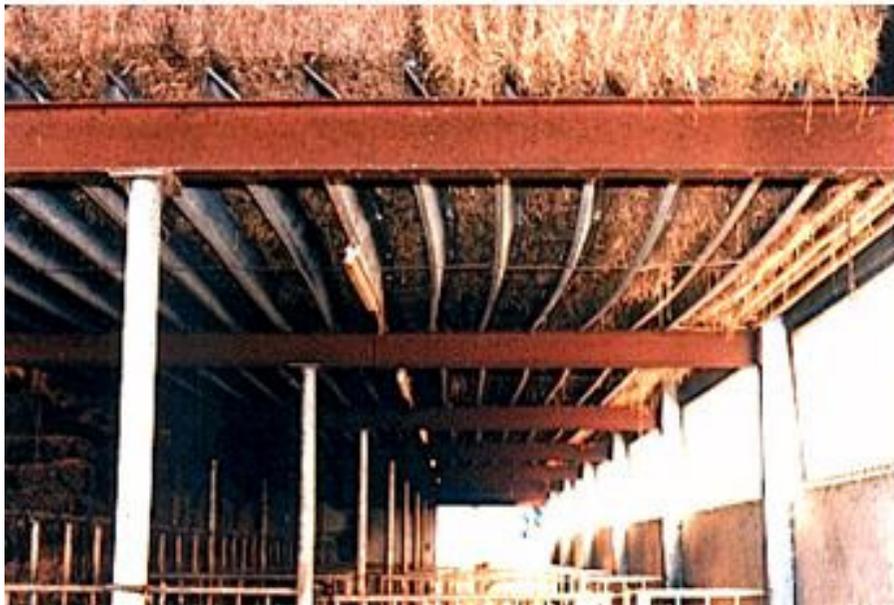


□ Le **déversement** affecte les semelles comprimées des pièces fléchies

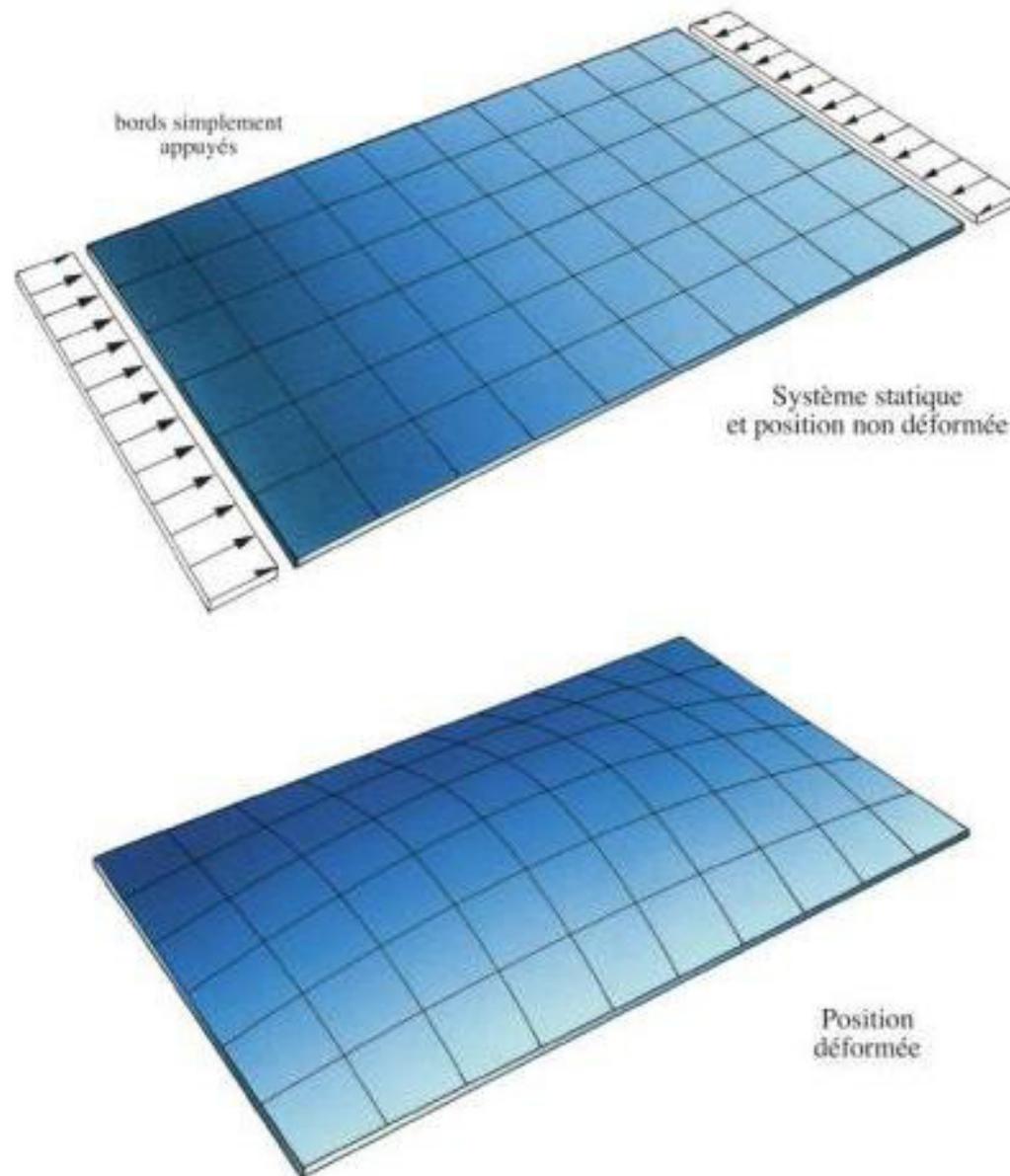


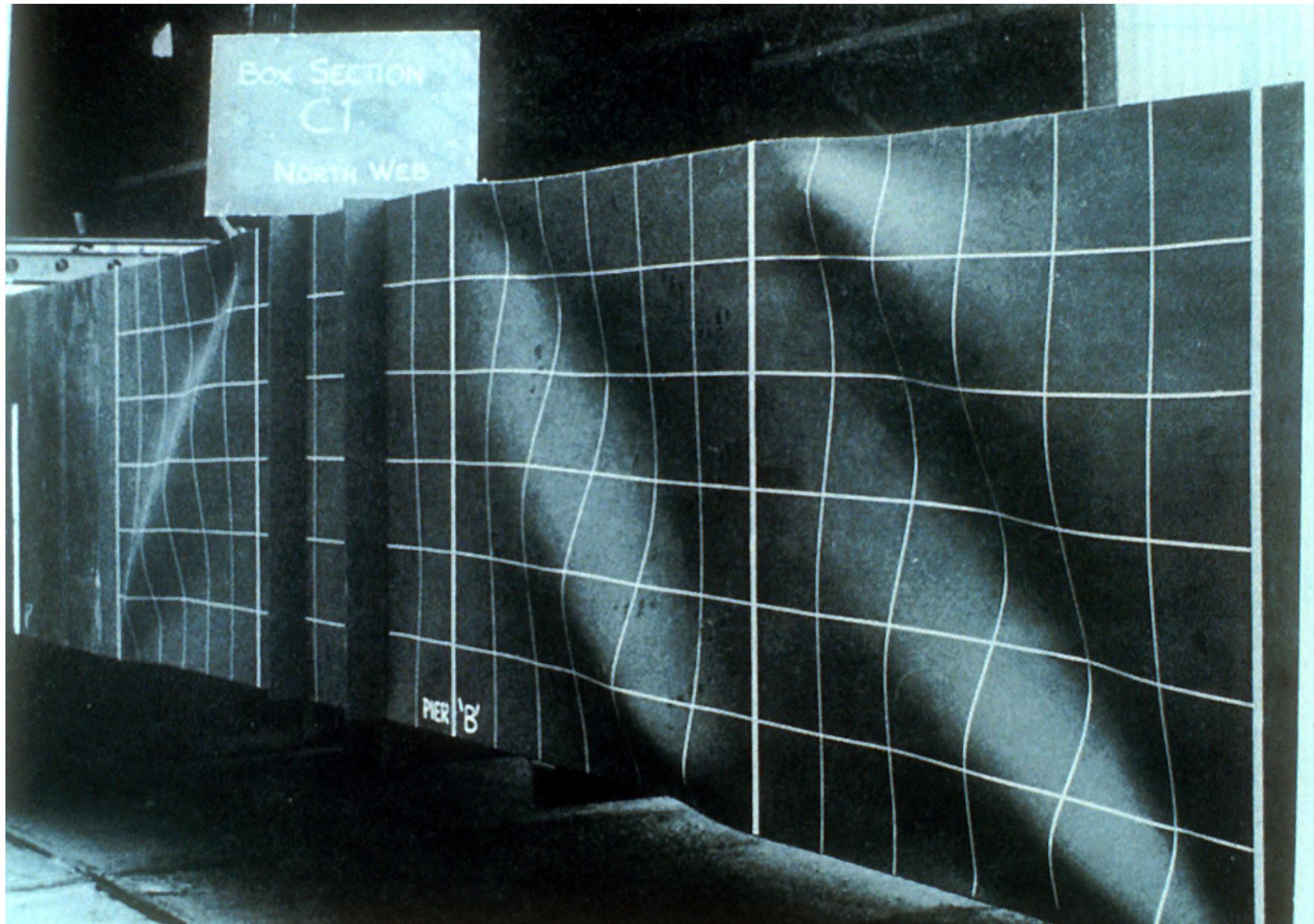


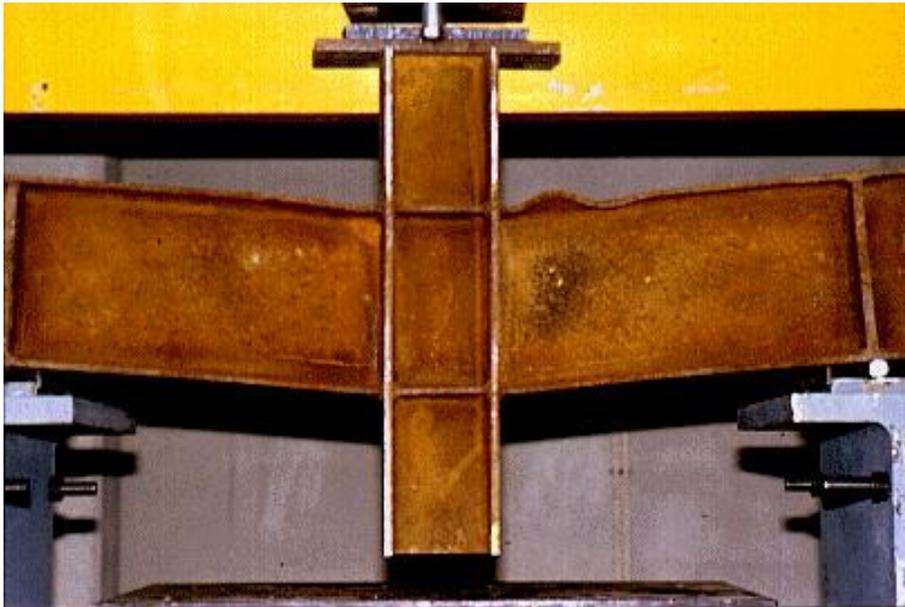




□ Le **voilement** affecte les âmes des pièces fléchies







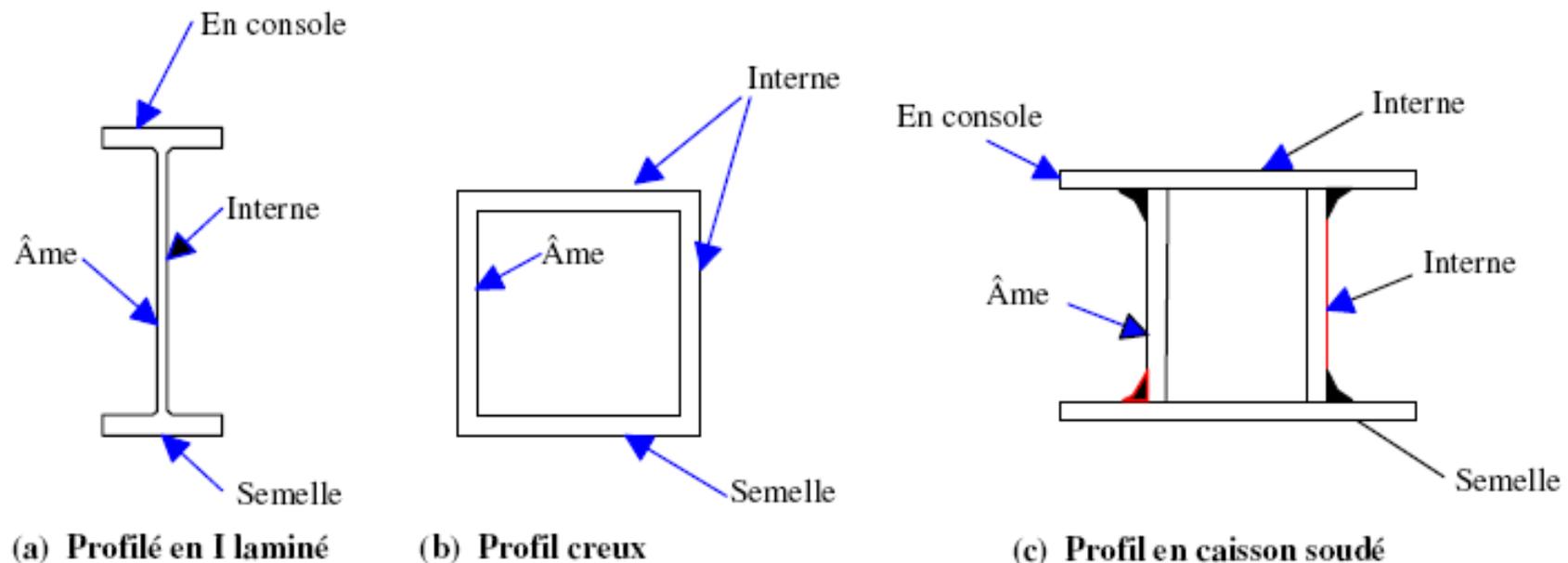
**Voilement local d'une
semelle de poutre**



**Voilement d'une âme de
poutre par cisaillement**

Voilement local

□ Les profilés de construction, qu'ils soient **laminés** ou **soudés**, peuvent être considérés comme être constitués d'un ensemble des parois distinctes, dont certaines sont internes (âmes de poutres ouvertes, semelles de caissons) et d'autres sont en console (semelles des profils ouverts, ailes des cornières).



❑ Comme les parois des profilés de construction sont relativement **minces** comparées à leur largeur, lorsqu'elles sont sollicitées en **compression** (par suite de l'application de charges axiales sur la totalité de la section et/ou par suite de flexion) elles peuvent **se voiler localement**.

❑ Le voilement local au sein de la section transversale peut limiter la capacité de résistance aux sollicitations du profil en l'empêchant d'atteindre sa limite élasticité.

❑ La ruine prématurée (provoquée par les effets du voilement local) peut être évitée en limitant le rapport **largeur/épaisseur** (ou **élancement**) des parois individuelles au sein de la section transversale.

Classification des sections transversales

□ L'EC 3 a instauré une classification des sections transversales en fonction de plusieurs critères :

- élancement des parois
- résistance de calcul
- capacité de rotation plastique
- risque de voilement local
- etc. ...

□ 4 classes de section ont été définies, allant de la section 1 (la plus performante) à la section 4 (la plus fragile)

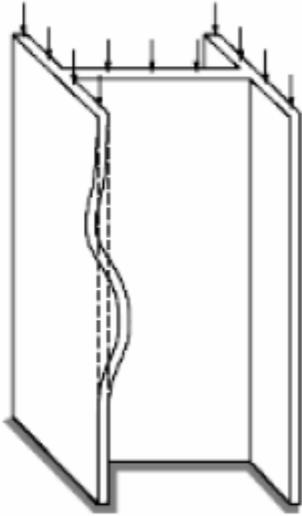
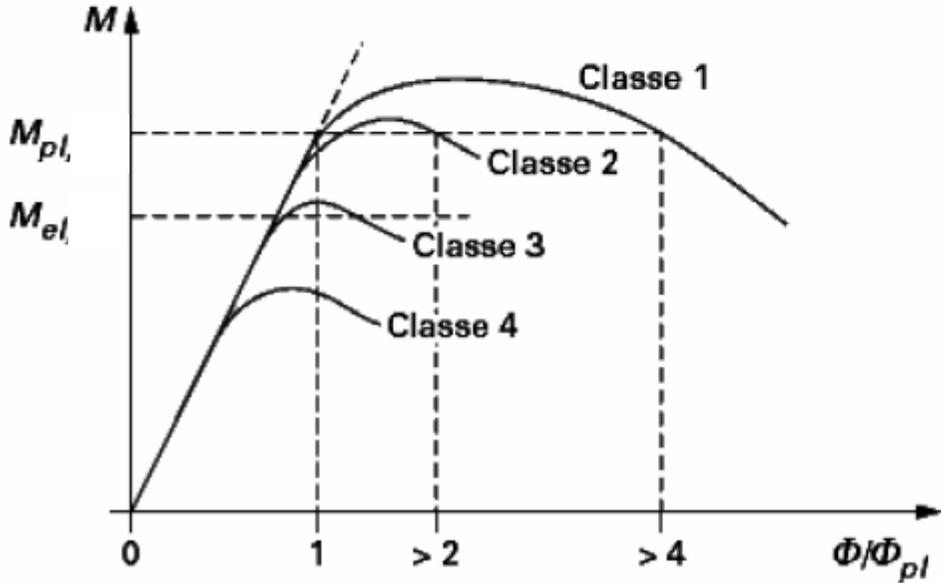
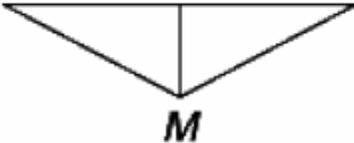
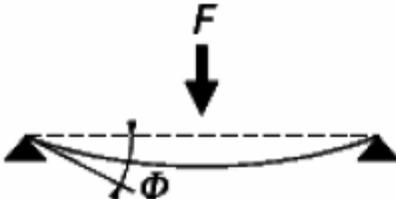
❖ **classe 1** : sections transversales pouvant atteindre leur résistance plastique, sans risque de voilement local, et possédant une capacité de rotation importante pour former une rotule plastique.

❖ **classe 2** : sections transversales pouvant atteindre leur résistance plastique, sans risque de voilement local, mais avec une capacité de rotation limitée.

❖ **classe 3** : sections transversales pouvant atteindre leur résistance élastique en fibre extrême, mais non leur résistance plastique, du fait des risques de voilement local.

❖ **classe 4** : sections transversales ne pouvant atteindre leur résistance élastique, du fait des risques de voilement local.

⇒ Le rôle de la classification des sections transversales est d'identifier dans quelle mesure leur résistance et leur capacité de rotation sont limitées par l'apparition du voilement local.



Voilement local

CLASSE	MODELE DE COMPORTEMENT	RESISTANCE DE CALCUL	CAPACITE DE ROTATION PLASTIQUE
1		PLASTIQUE sur section complète 	Importante $5 \theta_{pl}$
2		PLASTIQUE sur section complète 	Limitée $3 \theta_{pl}$
3		ELASTIQUE sur section complète 	Aucune θ_{pl}
4		ELASTIQUE sur section efficace 	Aucune $< \theta_{pl}$

Voilement local



- ❑ Les diverses parois comprimées d'une section transversale (âme ou semelle) peuvent, en général, être de classes différentes. La classe d'une section transversale est définie par la classe la plus élevée (la plus défavorable) de ses parois comprimées.

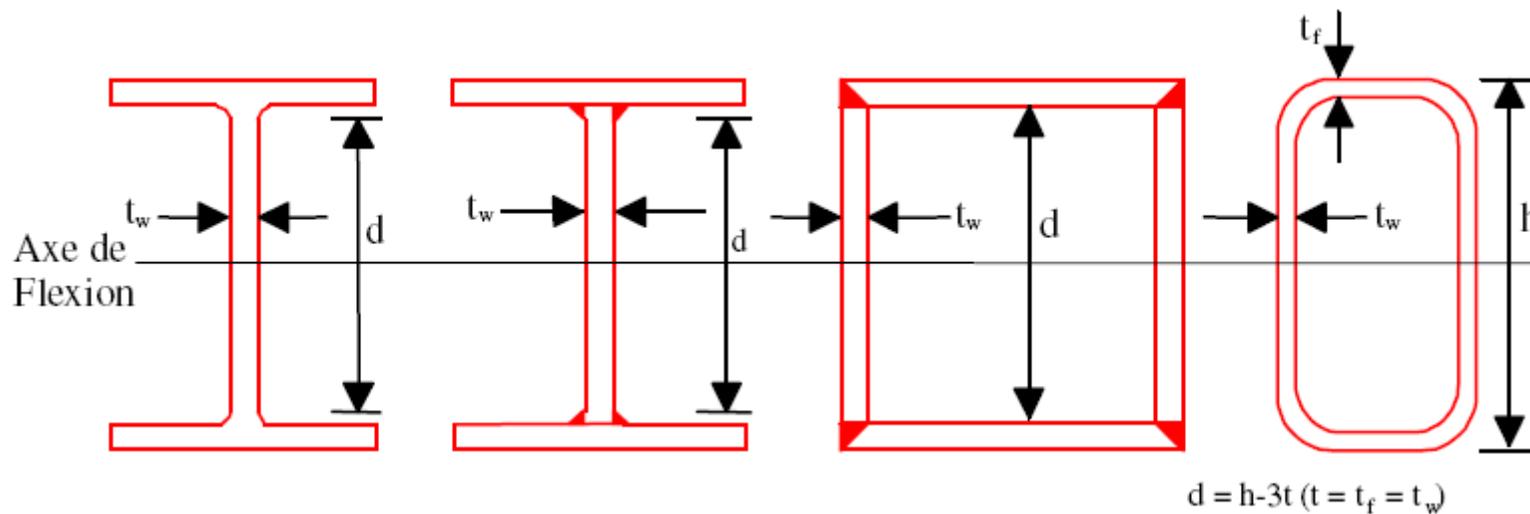
- ❑ Le fait de déterminer la classe d'une section permet de choisir la méthode de calculs (analyse plastique ou élastique).

- ❑ La classification peut être établie en fonction des **élancements limites des parois**. Les tableaux qui suivent définissent les classes 1, 2 et 3. Les parois présentant un élancement supérieur à l'élancement limite de la classe 3 sont naturellement de classe 4.

Rapports largeur/épaisseur maximaux pour les parois comprimées

$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	f_y (N/mm ²)	235	275	355
	ε	1	0,92	0,81
	ε^2	1	0,85	0,66

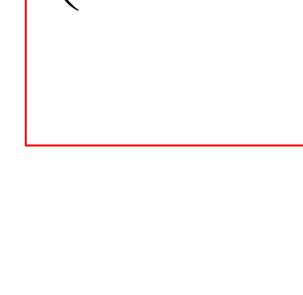
a) Âmes : (parois internes perpendiculaires à l'axe de flexion)



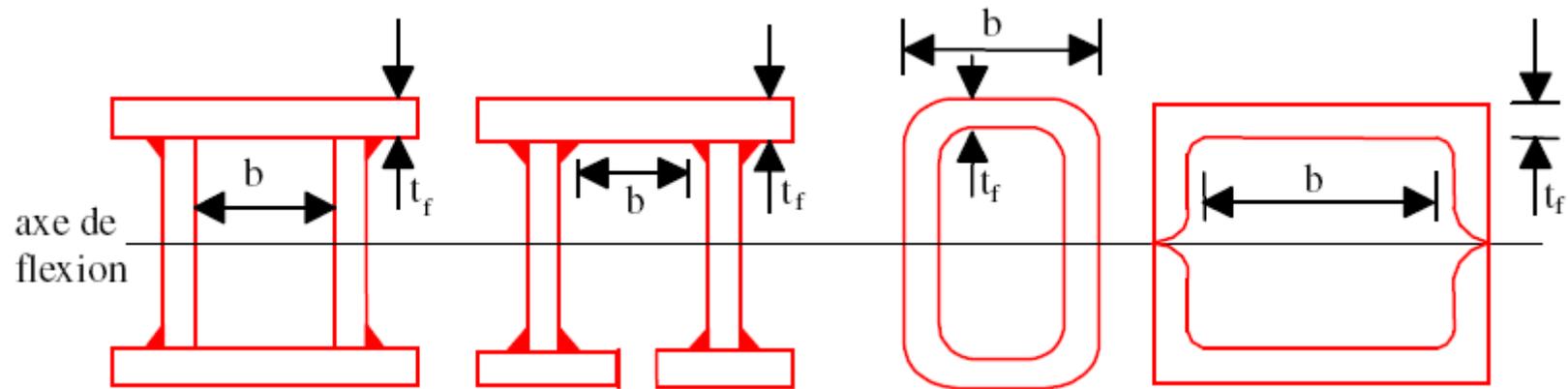
Classe	Âme fléchée	Âme comprimée	Âme en flexion composée	
Distribution des contraintes dans la paroi (compression positive)				
1	$d/t_w \leq 72 \epsilon$	$d/t_w < 33 \epsilon$	Quand $\alpha > 0,5$: $d/t_w \leq 396\epsilon/(13\alpha - 1)$ Quand $\alpha < 0,5$: $d/t_w \leq 36\epsilon/\alpha$	
2	$d/t_w \leq 83 \epsilon$	$d/t_w < 38 \epsilon$	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 des contraintes dans la paroi (compression positive)				
3	$d/t_w \leq 124 \epsilon$	$d/t_w < 42 \epsilon$	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	235	275	355
	ϵ	1	0,92	0,81

□ Détermination de α (pour les âmes des sections I et H) :

$$\alpha = \frac{1}{d} \left(\frac{b}{2} + \frac{1}{2} \frac{N_{Ed}}{t_w f_y} - (t_f + r) \right) \leq 1$$


$$d = b - 2t_f - 2r$$

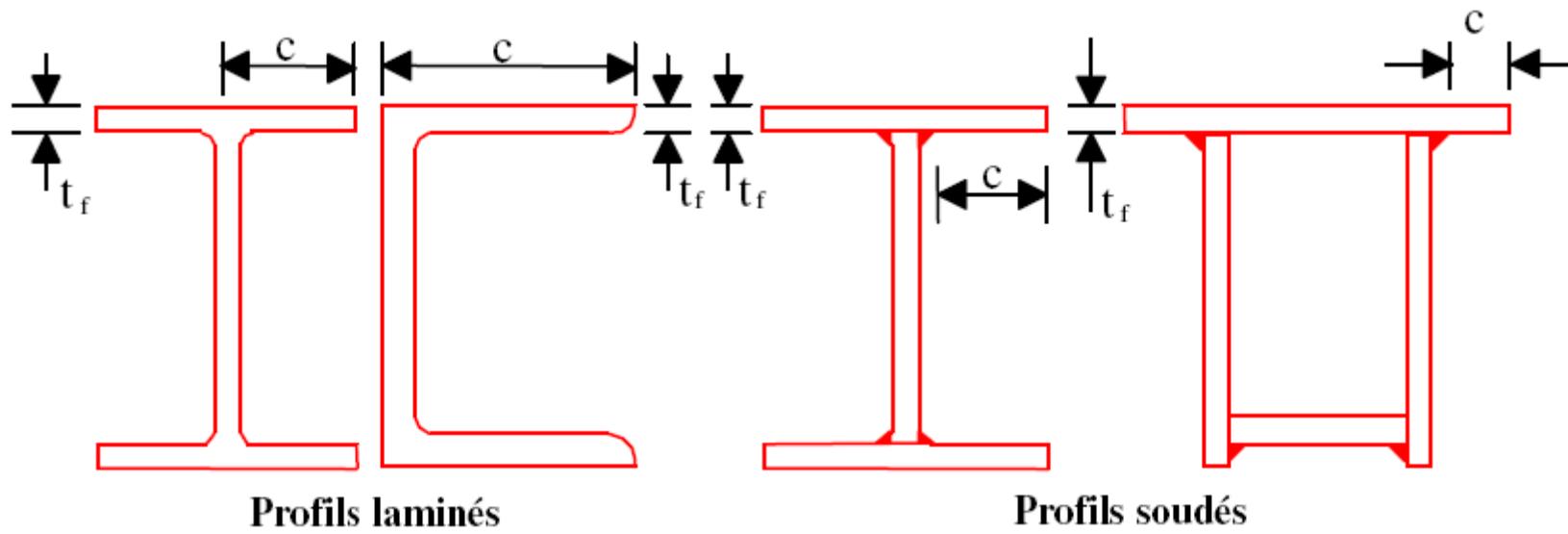
b) Parois internes de semelles : (parois internes parallèles à l'axe de flexion)



Classe	Type	Section fléchie		Section comprimée	
Distribution des contraintes dans la paroi et sur la hauteur de la section (compression positive)					
1	Profils creux laminés Autres	$(b - 3t_f) / t_f \leq 33\epsilon$	$b / t_f \leq 33\epsilon$	$(b - 3t_f) / t_f \leq 42\epsilon^*$	$b / t_f \leq 42\epsilon$
2	Profils creux laminés Autres	$(b - 3t_f) / t_f \leq 38\epsilon$	$b / t_f \leq 38\epsilon$	$(b - 3t_f) / t_f \leq 42\epsilon^*$	$b / t_f \leq 42\epsilon$
Distribution des contraintes dans la paroi et sur la hauteur de la section (compression positive)					
3	Profils creux laminés Autres	$(b - 3t_f) / t_f \leq 42\epsilon$	$b / t_f \leq 42\epsilon$	$(b - 3t_f) / t_f \leq 42\epsilon^*$	$b / t_f \leq 42\epsilon$
$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y	235	275	335	
	ϵ	1	0,92	0,81	

* Pour une section transversale comprimée sans flexion les classifications 1,2,3 sont inapplicables: 93 et donc la limite d'élancement est la même dans chaque cas, c.a.d. ceux de la Classe 3.

c) Parois de semelles en console

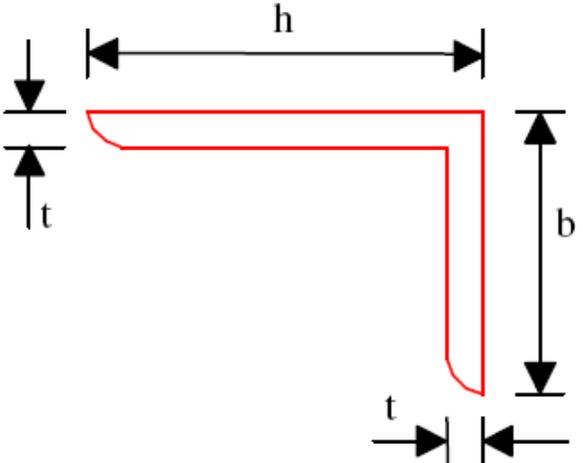
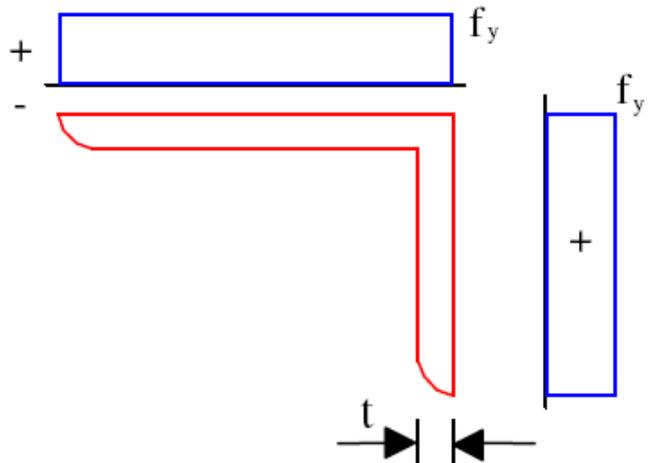


Classe	Type de section	Paroi comprimée	Paroi en flexion composée	
			Bord comprimé	Bord tendu
Répartition des contraintes dans l'élément (compression positive)				
1	Laminé Soudé	$c/t_f \leq 10\varepsilon$ $c/t_f \leq 9\varepsilon$	$c/t_f \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$ $c/t_f \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t_f \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$ $c/t_f \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	Laminé Soudé	$c/t_f \leq 11\varepsilon$ $c/t_f \leq 10\varepsilon$	$c/t_f \leq \frac{11\varepsilon}{\alpha}$ $c/t_f \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t_f \leq \frac{11\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$ $c/t_f \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Répartition des contraintes dans l'élément (compression positive)				
3	Laminé Soudé	$c/t_f \leq 15\varepsilon$ $c/t_f \leq 14\varepsilon$	$c/t_f \leq 23\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ $c/t_f \leq 23\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$	
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355
	ε	1	0,92	0,81

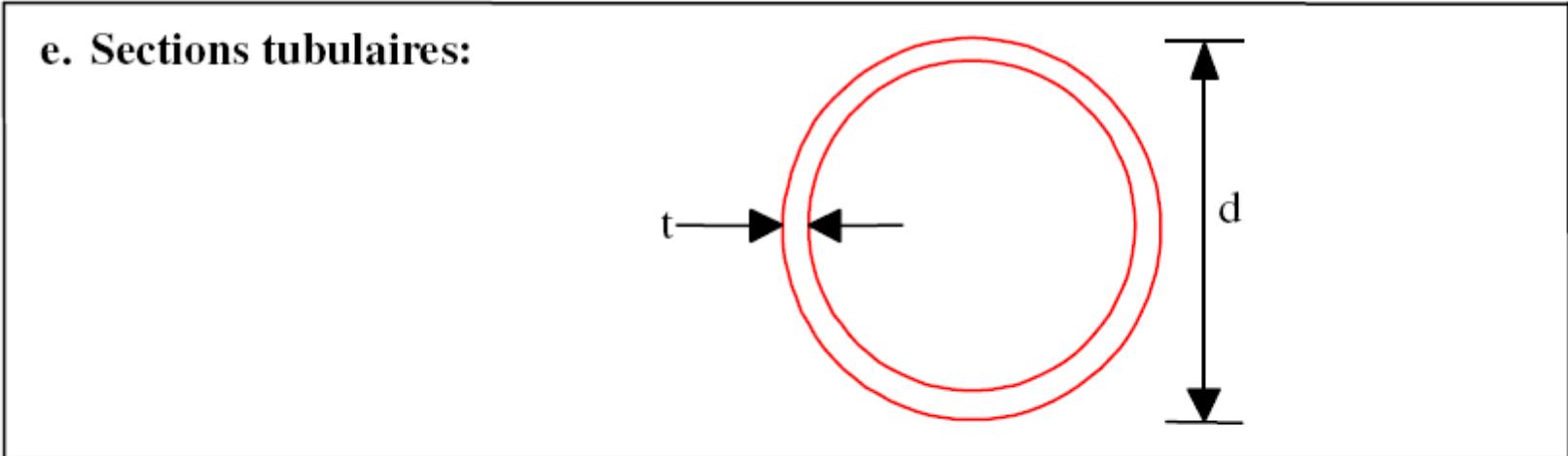
Coefficient de voilement pour parois en console soumises à de la flexion composée

Bord libre comprimé					
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	+1	0	-1	$+1 \geq \psi \geq -1$	
Coefficient de voilement k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
Bord libre tendu					
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	+1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Coefficient de voilement k_σ	0,43	$0,578/(\psi+0,34)$	1,7	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

d) Cornières

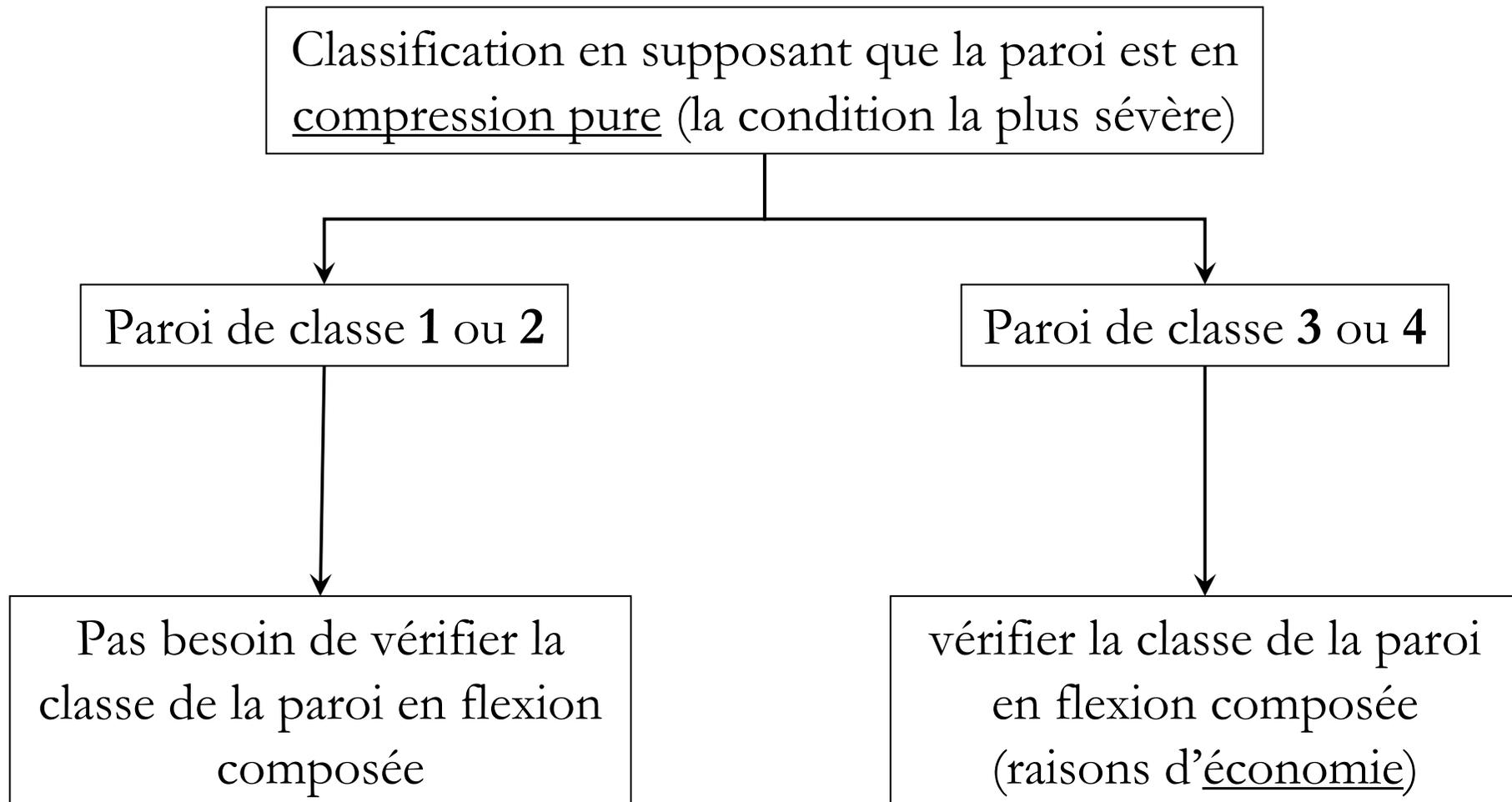
<p>d. Cornières: Cf aussi (c). "Parois de semelles en console"</p>	 <p>(Ne s'applique pas aux cornières en contact continu avec d'autres composants).</p>
<p>Classe</p>	<p>Section comprimée</p>
<p>Distribution des contraintes dans la section transversale (compression positive)</p>	
<p>3</p>	<p>$\frac{h}{t} \leq 15\epsilon; \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$</p>

e) Sections tubulaires



Classe	Section fléchie et/ou comprimée			
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$			
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$			
3	$d/t \leq 90\varepsilon^2$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355
	ε	1	0,92	0,81
	ε^2	1	0,85	0,66

□ Sections avec parois en **flexion composée** :



Applications (Classification des sections)

□ Application I-2 :

On considère une poutre reconstituée soudée (PRS) en acier S235 travaillant à la flexion simple. La section adoptée est celle de l'application I-1. Montrer que la section est de classe 4.

□ Application I-3 :

On considère une poutre, constituée d'un profilé IPE400 en acier S.275, soumise à la flexion composée (l'effort normal de compression $N_{Ed} = 300$ kN). Déterminer la classe de section.

Caractéristiques des sections transversales

- ❑ **Aire brute (A)** : les caractéristiques de la section brute sont déterminées en utilisant les dimensions nominales sans déduction des trous éventuels.

- ❑ **Aire nette (A_{net})** : d'une section transversale est égale à son aire brute diminuée des aires des trous.

- ❑ **Aire efficace (A_{eff})** : d'une section transversale est calculée en se basant sur les largeurs efficaces des parois comprimées et les largeurs brutes des parois tendues.

- ❑ **Coefficient de réduction de la section ($\beta = A_{eff}/A$)**

Caractéristiques de la section efficace des sections transversales de classe 4

- ❑ Pour les sections de classe 4, le **voilement local** peut se produire pour des contraintes critiques inférieures à la limite élastique \Rightarrow il intervient donc dans le dimensionnement.

- ❑ L'approche de l'EC 3 consiste :
 - à déterminer une section dite **efficace** avec des caractéristiques réduites par rapport à la section réelle ou brute ;
 - à appliquer ensuite à cette section efficace, les critères de dimensionnement valables pour les sections de classe 3.

- ❑ La section efficace est obtenue en calculant la largeur efficace de chaque paroi constituant la section brute.

Procédure de détermination de la largeur efficace d'une paroi

1) calcul de Ψ sur la section brute

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

2) calcul de k_σ par la formule appropriée dans les tableaux suivants :

Distribution des contraintes (compression positive)				Largeur efficace b_{eff}		
				$\psi = 1:$ $\bar{b} = b - 3t$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0:$ $\bar{b} = b - 3t$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2b_{eff}}{5 - \psi}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0:$ $\bar{b} = b - 3t$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -2$
Coefficient de voilement k_σ	4,0	$\frac{8,2}{1,05 + \psi}$	7,81	$7,81 - 6,92\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98(1 - \psi)^2$
Alternativement, pour $1 \geq \psi \geq -1$: $k_\sigma = \frac{16}{[(1 + \psi)^2 + 0,112(1 - \psi)^2]^{0,5} + (1 + \psi)}$						

parois internes comprimées

Distribution des contraintes (compression positive)		Largeur efficace b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -1$	
Coef. de voilement k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Coefficient de Voilement k_σ	0,43	$\frac{0,578}{\psi + 0,34}$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

parois comprimées en console

3) calcul de l'élancement réduit :

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}}{t} \frac{1}{\pi} \sqrt{12(1-\nu^2) \frac{f_y}{k_\sigma E}}$$

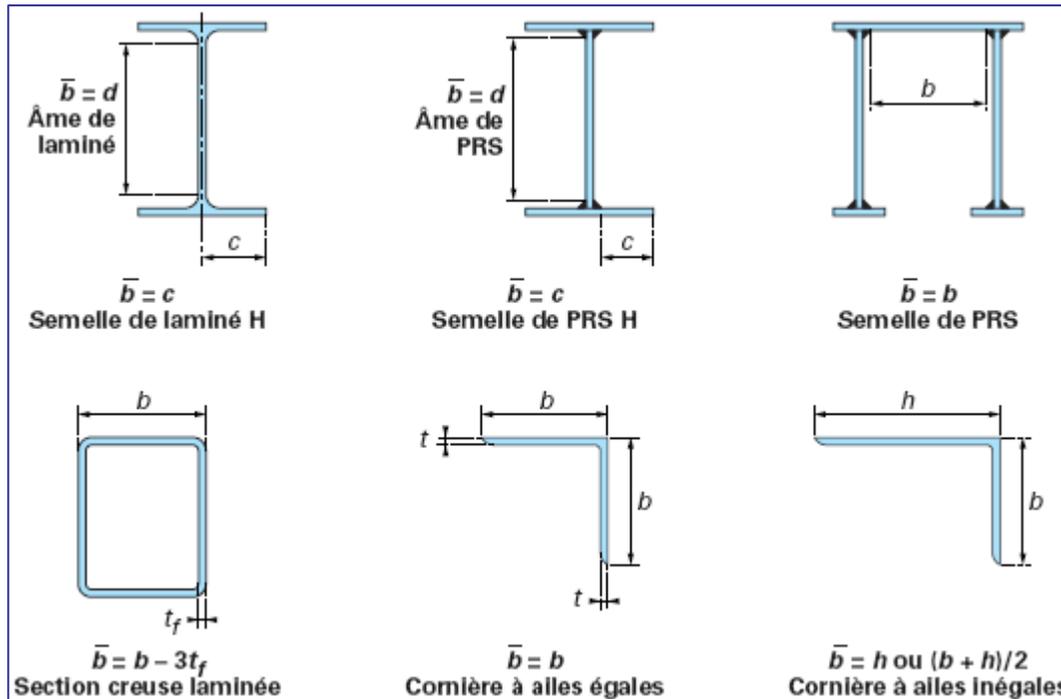
$$\Rightarrow \bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}$$

Contrainte critique de voilement local

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{\bar{b}} \right)^2$$

Epaisseur de la paroi

Largeur de la paroi



4) calcul de ρ et par conséquent b_{eff}

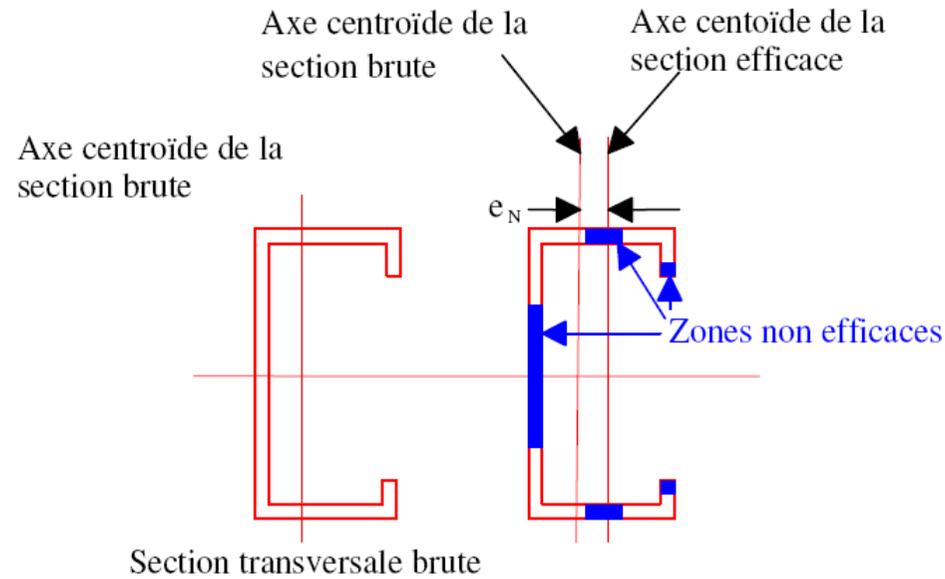
$$\rho = 1 \quad \text{si } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,22}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{si } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

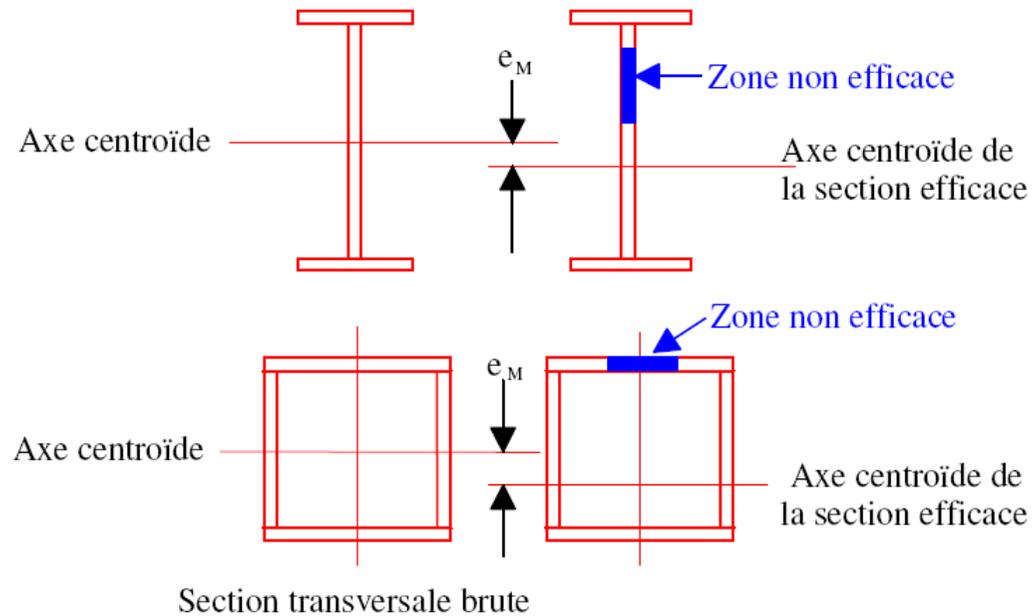
5) répartition de la largeur efficace suivant la valeur de ρ et la configuration appropriée des tableaux.

□ Remarque importante :

En général, on détermine la largeur efficace des semelles avant d'entamer la détermination de la largeur efficace de l'âme.



(a) Sections Classe 4: sections efficaces -effort normal (compression)



(b) Sections Classe 4 :sections effiaces- moment fléchissant

Applications (Sections de classe 4)

□ Application I-4 :

On considère une poutre reconstituée soudée (PRS) en acier S235 travaillant à la flexion simple. La section adoptée est celle des applications I-1 et I-2.

- Donner les dimensions de la section efficace.
- Calculer la position du nouveau centre de gravité.
- Calculer l'inertie I_y par rapport au nouvel axe $y'y'$ et déterminer $W_{el,y'}$.