



جامعة أبو بكر بلقايد

كلية التكنولوجيا

UNIVERSITÉ DE TLEMCEEN

Faculté de Technologie



L3 INGÉNIEUR GC

MATIÈRE : CHARPENTE MÉTALLIQUE 2

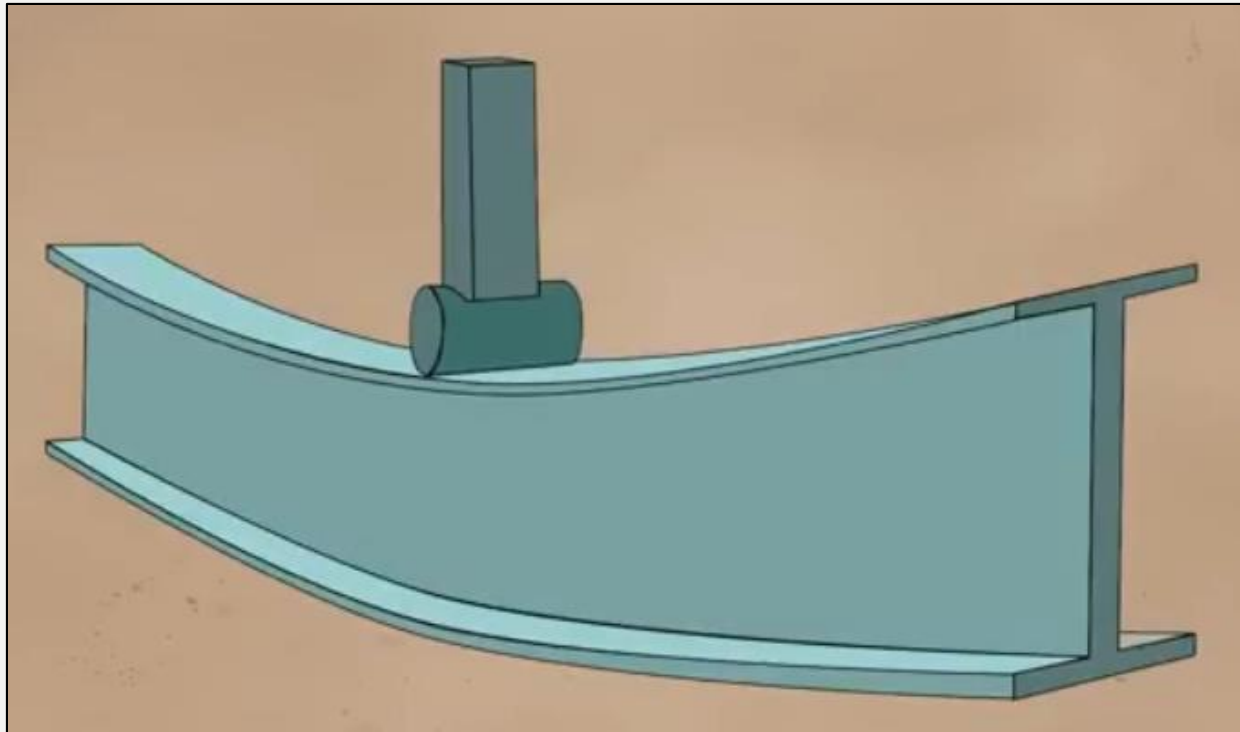
RÉSISTANCE À LA FLEXION SIMPLE

DR. TABET-DERRAZ MOULAY IDRIS

Email: moulayidriss.tabetderraz@univ-tlemcen.dz

INTRODUCTION

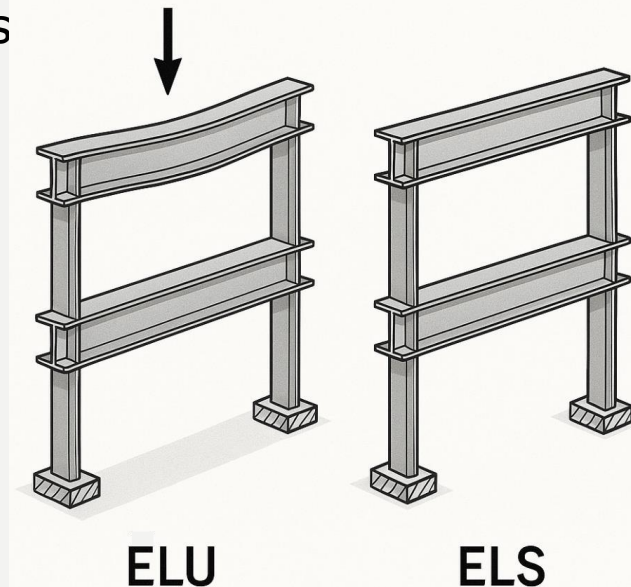
Dans le domaine du génie civil, les éléments structurels sont soumis à différentes sollicitations qui influencent leur comportement et leur durabilité. Ce chapitre s'intéresse à la résistance des éléments métalliques soumis à la flexion simple.



NOTIONS DE BASE DE CALCUL (LES ÉTATS DE LIMITE)

Les états limites sont des états au-delà desquels la structure ne satisfait plus aux exigences de performance pour lesquelles elle a été conçue. Les états limites sont classés en :

- **Etats limite ultimes (ELU)** : Les états limites ultimes sont associés à l'effondrement de la structure, ou à d'autres formes de ruine structurale (perte de stabilité)
- **Etats limites de services (ELS)** : Les états limites de service sont associés à l'esthétique de la structure et au confort des occupants (déformations excessives et vibrations)



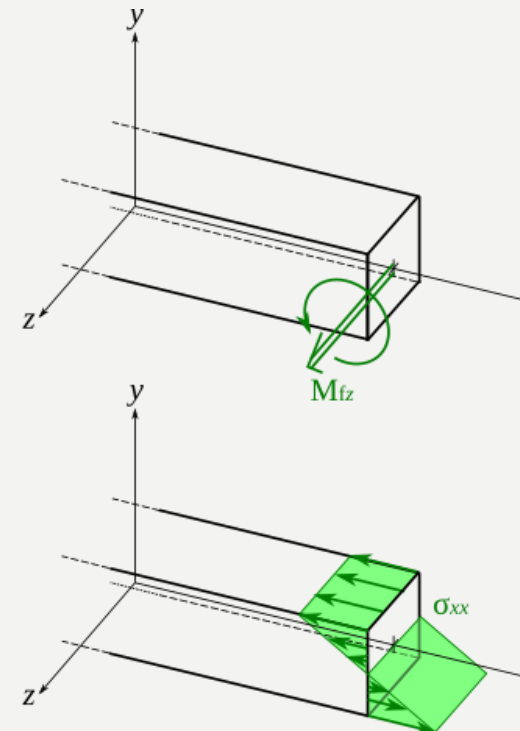
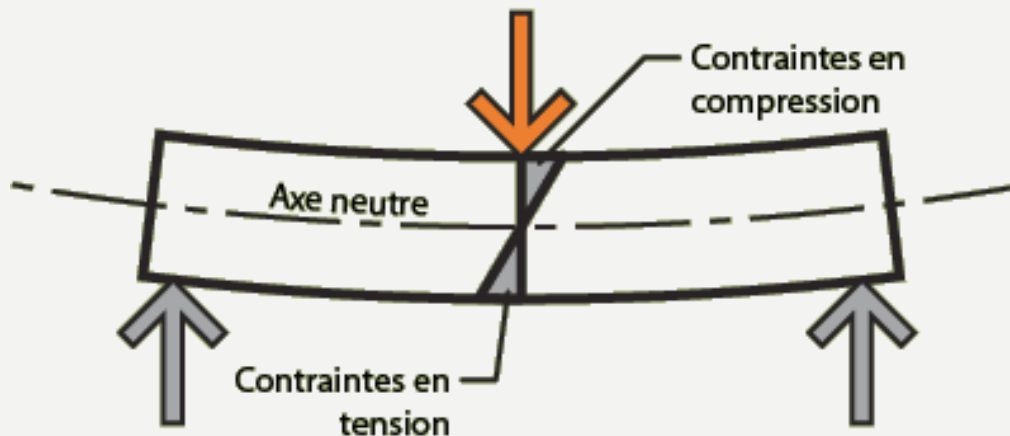
NOTIONS DE BASE DE CALCUL (ACTION SUR LA STRUCTURE)

- Combinaisons d'actions

	ELU		ELS
	Combinaisons fondamentales	Combinaisons accidentelles	Combinaisons caractéristiques
G + 1 action variable	$1,35 G + 1,5 I$ $1,35 G + 1,5 S$ $1,35 G + 1,5 W$ $G + 1,5 W$ (si soulèvement)	$G + S_A$	$G + I$ $G + S$ $G + W$
G + 2 actions variables	$1,35 G + 1,5 I + 1,5 \psi_{0S} S$ $1,35 G + 1,5 I + 1,5 \psi_{0W} W$ $1,35 G + 1,5 S + 1,5 \psi_{0I} I$ $1,35 G + 1,5 S + 1,5 \psi_{0W} W$ $1,35 G + 1,5 W + 1,5 \psi_{0I} I$ $1,35 G + 1,5 W + 1,5 \psi_{0S} S$	$G + S_A + \psi_{2I} I$ $G + S_A + \psi_{2W} W$ (mais $\psi_{2W} = 0$)	$G + I + \psi_{0S} S$ $G + I + \psi_{0W} W$ $G + S + \psi_{0I} I$ $G + S + \psi_{0W} W$ $G + W + \psi_{0I} I$ $G + W + \psi_{0S} S$
G + 3 actions variables (si mentionné dans le projet)	$1,35 G + 1,5 I + 1,5 \psi_{0S} S + 1,5 \psi_{0W} W$ $1,35 G + 1,5 S + 1,5 \psi_{0I} I + 1,5 \psi_{0W} W$ $1,35 G + 1,5 W + 1,5 \psi_{0I} I + 1,5 \psi_{0S} S$	$G + S_A + \psi_{2I} I + \psi_{2W} W$	$G + I + \psi_{0S} S + \psi_{0W} W$ $G + S + \psi_{0I} I + \psi_{0W} W$ $G + W + \psi_{0I} I + \psi_{0S} S$

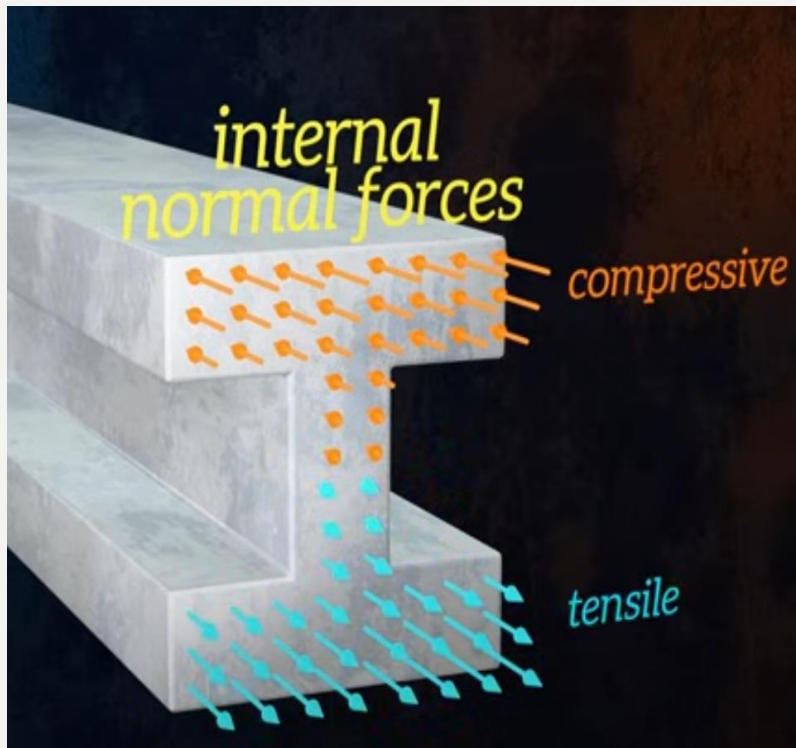
RÉSISTANCE À LA FLEXION (PRINCIPE)

La flexion d'une poutre est un mode de déformation qui se produit lorsqu'une poutre est soumise à des charges perpendiculaires à son axe longitudinal. Sous l'effet de ces charges, la poutre se courbe et des contraintes internes apparaissent. Les éléments sollicités à la flexion simple dans les structures métalliques sont généralement les poutres.



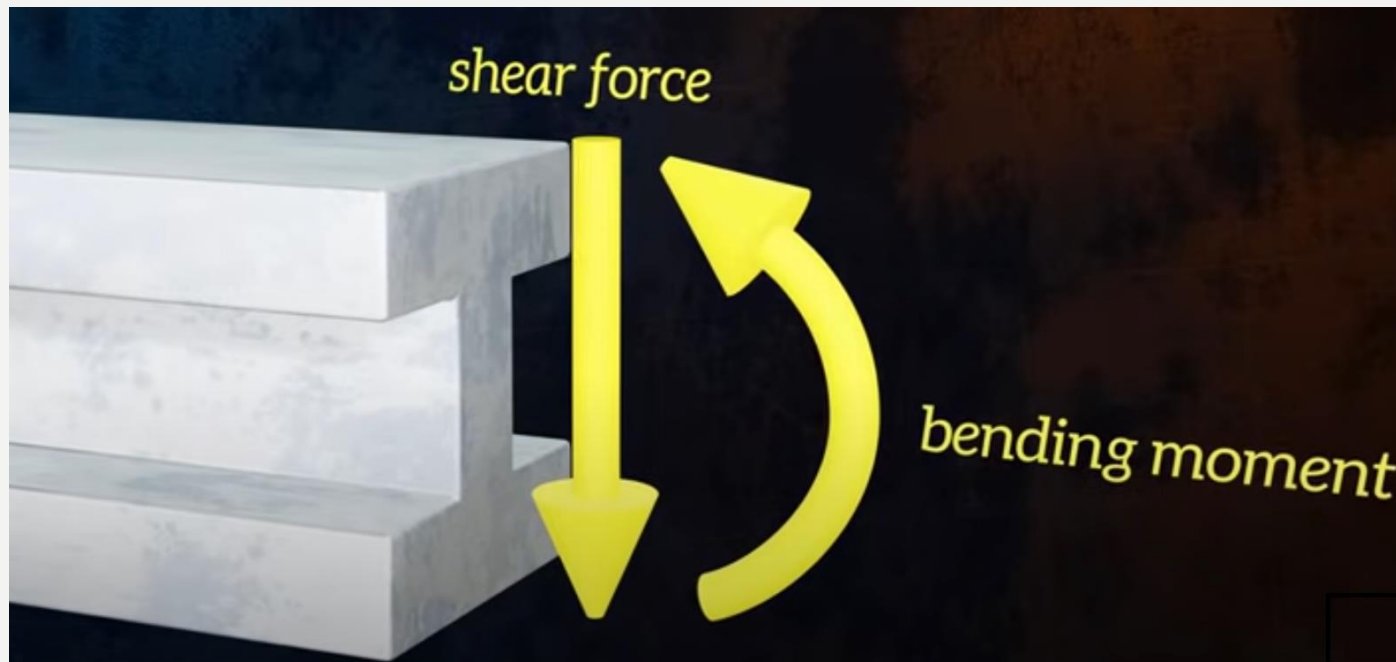
RÉSISTANCE À LA FLEXION (PRINCIPE)

Un moment de flexion (M), est un moment qui fait fléchir la poutre par une courbure et séparer la section transversale en deux parties ; une comprimée et l'autre tendue). la force de cisaillement s'engendre également en raison de l'opposition des deux forces de traction et de compression,



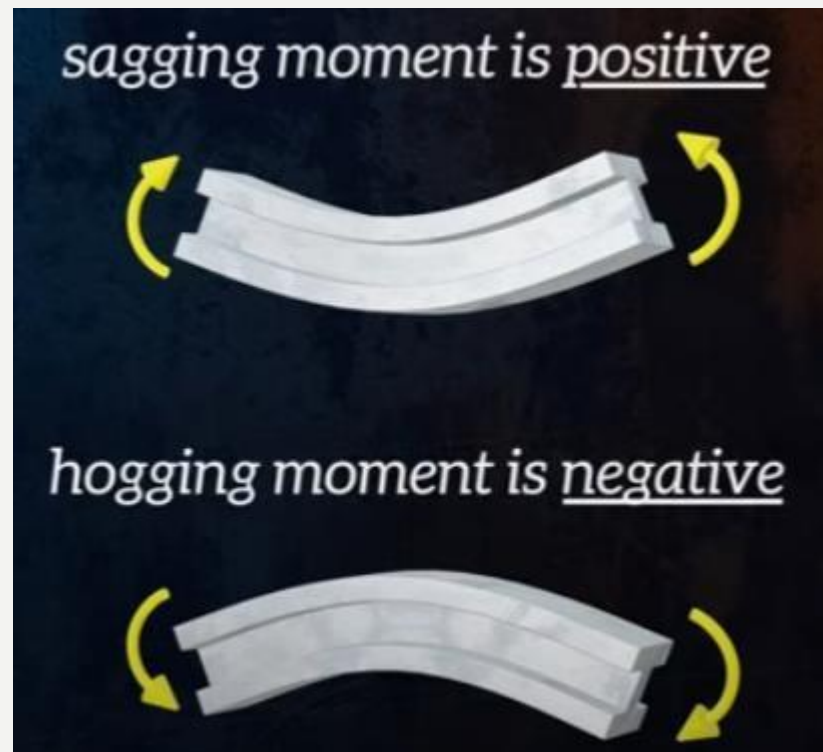
RÉSISTANCE À LA FLEXION (PRINCIPE)

Ainsi, lorsqu'une poutre est soumise à la flexion, deux sollicitations agissent sur sa section transversale : le moment fléchissant M , responsable des contraintes de traction et de compression, et l'effort tranchant V (Cisaillement), qui génère des contraintes de cisaillement.



RÉSISTANCE À LA FLEXION (PRINCIPE)

Il est à noter qu'une poutre soumise à la flexion peut être en flexion positive ou flexion négative, selon le sens du moment fléchissant et donc la position des zones de compression et de traction par rapport à la fibre neutre change.



RÉSISTANCE À LA FLEXION

(CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE DE SERVICE)

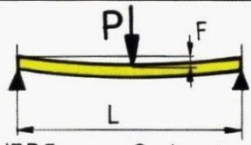
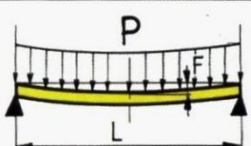
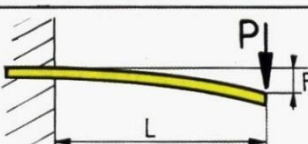
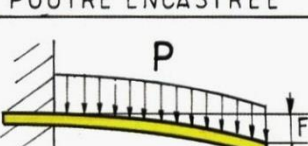
Le calcul à l'ELS d'une poutre en acier soumise à la flexion se fait par la vérification de **la flèche (déplacement verticale de la courbure)** de cette dernière afin de garantir le confort et le bon fonctionnement de la structure.

- la flèche (f_{max}) causée par la flexion ne doit donc pas dépasser une limite pour satisfaire la condition de l'ELS, cette limite est exigée par les règlements en vigueur de la construction métallique CCM97 (Algérien) et l'Eurocode 3 (européen) :

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	$\Delta < L/500$

RÉSISTANCE À LA FLEXION (CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE DE SERVICE)

- la flèche (f_{max}) est calculée par des combinaisons des charges à l'ELS, sans majorations des charges en fonction de la charge appliquée et du type d'appuis. (voir quelques exemples sur la figure ci-dessous) :

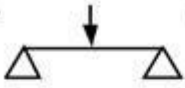
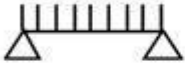

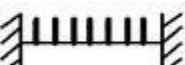


Disposition des charges	MOMENT FLÉCHISSANT EN Kg/mm	FLÈCHE MAXI EN M/M	Taux TRAVAIL MAXI EN Ddn/mm ³
 <p>POUTRE sur 2 Appuis</p>	$\frac{P \times L}{4}$	$\frac{P \times L^3}{48 \times E \times I}$	$\frac{Mf}{\frac{I}{V}}$
	$\frac{P \times L}{8}$	$\frac{5 \times P \times L^3}{384 \times E \times I}$ $\frac{P \times L}{8} \times \frac{5 \times L^2}{48 \times E \times I}$	$\frac{Mf}{\frac{I}{V}}$ AU MILIEU
 <p>POUTRE ENCASTRÉE</p>	$P \times L$	$\frac{P \times L^3}{3 \times E \times I}$	$\frac{Mf}{\frac{I}{V}}$ A L'ENCASTREMENT
	$\frac{P \times L}{2}$	$\frac{P \times L^3}{8 \times E \times I}$	$\frac{Mf}{\frac{I}{V}}$
E - MODULE D'ELASTICITÉ I - INERTIE SECTION Mf - MOMENT FLÉCHISSANT			

A. MOUAY

RÉSISTANCE À LA FLEXION

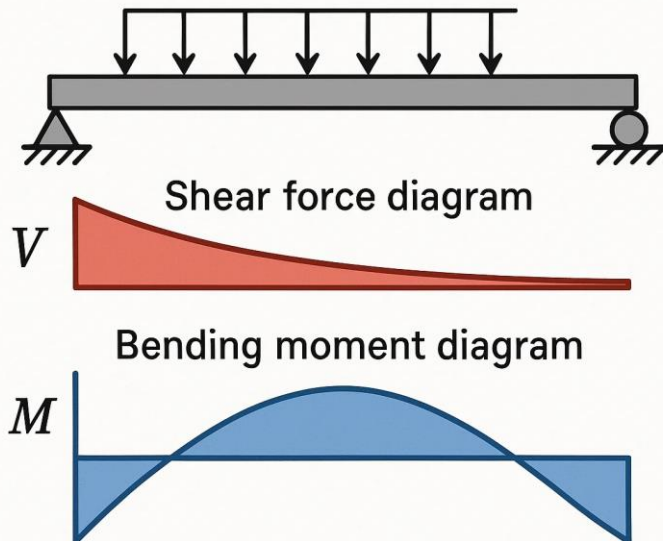
(CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE DE SERVICE)

- la flèche (f_{max}) est calculée par des combinaisons des charges à l'ELS, sans majorations des charges en fonction de la charge appliquée et du type d'appuis. (voir quelques exemples sur la figure ci-dessous) :

poutre...	charge...	Moment Max (kNm)	Flèche Max
sur 2 appuis	 1 ponctuelle	= $PL/4$ -	= $P.L^3/48.E.I$
	 2 répartie	= $pL^2/8$ 17,100	= $5.p.L^4/384.E.I$
appuyée-encastree	 3 répartie	= $-pL^2/8$ -	= $p.L^4/185.E.I$
bi-encastree	 4 répartie	= $pL^2/12$ -	= $p.L^4/384.E.I$
encastree-libre	 5 ponctuelle	= $-PL$ -	= $P.L^3/3.E.I$
	 6 répartie	= $-pL^2/2$ -	= $p.L^4/8.E.I$

RÉSISTANCE À LA FLEXION (CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE ULTIME)

Le calcul à l'ELU d'une poutre métallique sollicitée à la flexion simple se fait par la vérification de la résistance au moment et au cisaillement. On cherche d'abord par les règles de l'RDM le moment maximal (M_{Sd}) et le cisaillement maximal (V_{Sd}), bien évidemment, après avoir déterminé les combinaisons des charges les plus défavorables à l'ELU



Pour les Moments

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}$$

Pour les efforts tranchants

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}$$

RÉSISTANCE À LA FLEXION (CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE ULTIME)

En flexion, le moment appliqué à une section métallique induit une contrainte normale dans la fibre extrême, donnée par :

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq \sigma_e = \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Ce qui donne la formule de résistance à la flexion simple d'un profilé en acier :

$$M_{Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}}$$

où W est le **module de résistance**; il peut être Plastique W_{pl} , élastique W_{el} ou efficace W_{eff} selon la classe de la section du profilé

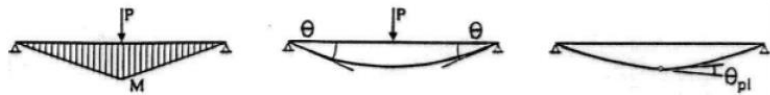
- f_y : limite d'élasticité de l'acier (en MPa), valeur caractéristique de résistance.
- γ_{M0} : coefficient partiel de sécurité, généralement égal à 1,10 selon le CCM97 et à 1,00 selon EC3.

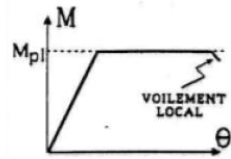

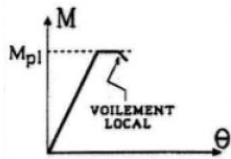

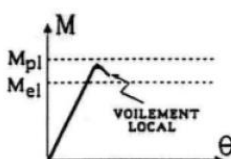
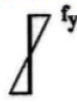
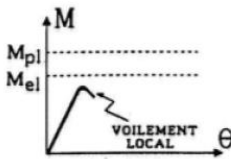

RÉSISTANCE À LA FLEXION (CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE ULTIME)

Moment résistant à la flexion simple :

$$M_{Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{m0}}$$

où W est le **module de résistance**; il peut être Plastique W_{pl} , élastique W_{el} ou efficace W_{eff} selon la classe de la section du profilé



Classe	Modèle de comportement	Résistance de calcul	Capacité de rotation plastique
1		PLASTIQUE sur la section complète 	Importante
2		PLASTIQUE sur la section complète 	Limitée
3		ELASTIQUE sur la section complète 	Aucune
4		ELASTIQUE sur la section efficace 	Aucune

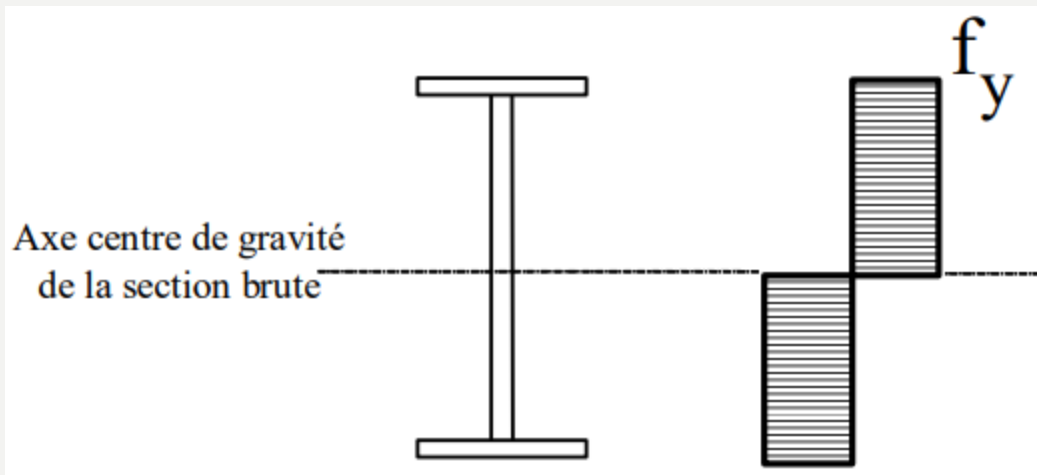
RÉSISTANCE À LA FLEXION (CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE ULTIME)

- Pour une section de **classe 1 & 2** (section peut développer une **rotule plastique complète** sans risque de voilement locale). La résistance en flexion est donnée par :

$$M_{Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

Avec :
$$W_{pl} = \sum_i A_i y_i^*$$

- W_{pl} : module plastique de la section, utilisé pour le calcul du moment plastique résistant.



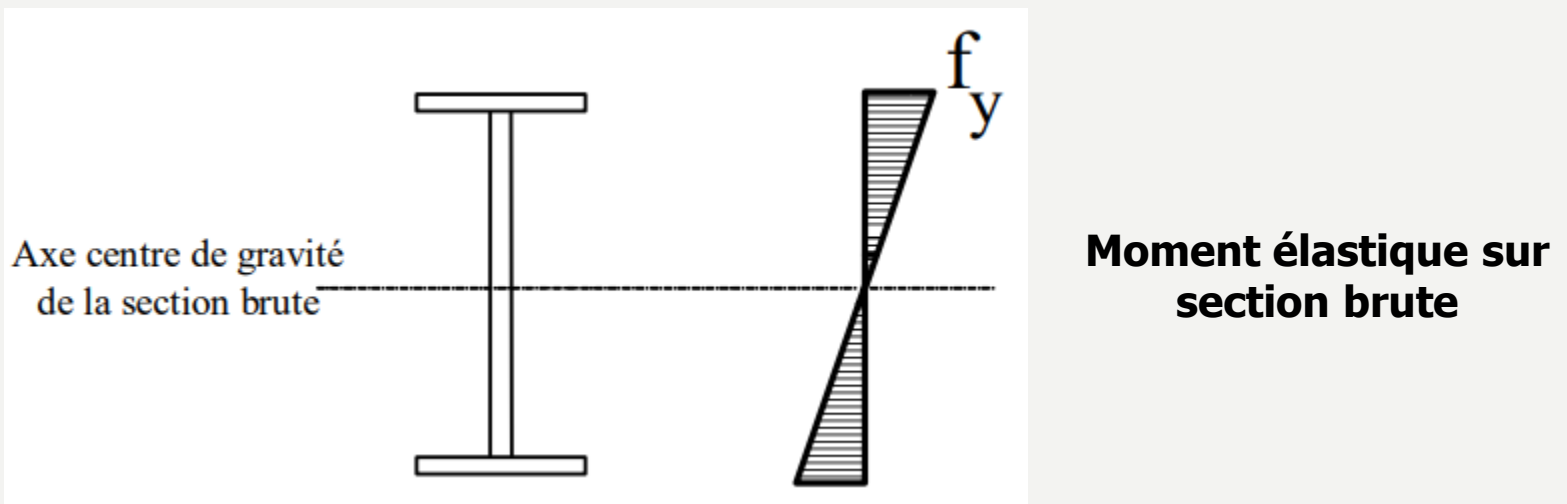
RÉSISTANCE À LA FLEXION (CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE ULTIME)

- Pour une section de **classe 3** (La section est élastique, c'est-à-dire que la contrainte maximale ne doit pas dépasser la limite d'élasticité). La résistance en flexion est limitée au moment élastique :

$$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

Avec : $W_{el} = \frac{I}{y_{\max}}$

- W_{el} : module élastique.



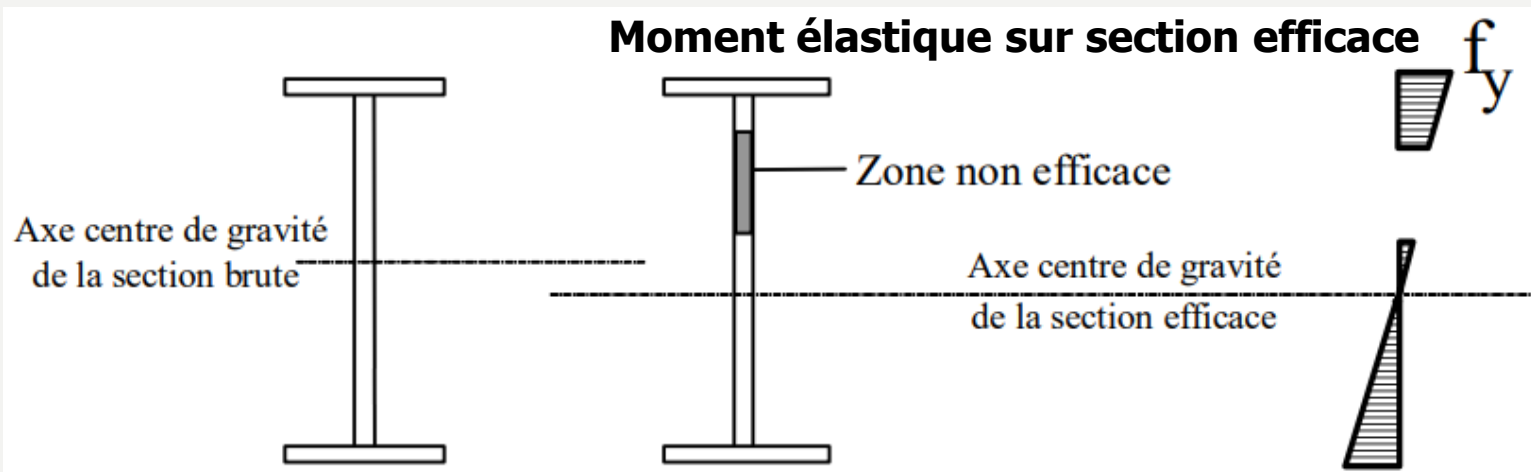
RÉSISTANCE À LA FLEXION (CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE ULTIME)

- Pour une section de **classe 4** (La section est élancée, certaines parties peuvent subir un flambement local avant d'atteindre la limite d'élasticité). On utilise une **section efficace** réduite pour tenir compte de la perte de portance :

$$M_{Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$


Avec : $W_{eff} = \frac{I_{eff}}{y_{max}}$

- W_{eff} : module de section efficace, calculé à partir de la partie non-flambée.



RÉSISTANCE À LA FLEXION (CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE ULTIME)

- Voici le résumé de la résistance des profilés métallique à la flexion simple selon la classe de la section (en générale on favorise la classe 1 & 2)

Classe de section	Comportement	Résistance en flexion M_{Rd}	Remarques	
Classe 1	Plastique, sans instabilité locale	$M_{Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$	Rotule plastique possible, redistribution admissible	
Classe 2	Plastique, instabilité locale limitée	$M_{Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$	Pas de rotation plastique complète, mais même résistance que Classe 1	
Classe 3	Élastique, limite d'élasticité atteinte	$M_{Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$	Comportement linéaire élastique, pas de plastification	
Classe 4	Élancée, flambement local possible	$M_{Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$	Réduction des parties élancées (par flambement local) : utilisation de W_{eff}	

RÉSISTANCE À LA FLEXION (CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE ULTIME)

La vérification à l'effort tranchant d'une section en acier en flexion se fait selon les règles de l'EC3 et du CCM97. Elle vise à s'assurer que la résistance au cisaillement de la section n'est pas dépassée et que les effets éventuels du cisaillement sur la résistance en flexion sont correctement pris en compte.

- La résistance de la section au cisaillement est donnée par :

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

- A_v : aire résistante au cisaillement (en général l'âme pour les profilés I ou H)
- f_y : limite d'élasticité de l'acier
- γ_{M0} : coefficient partiel de sécurité :
 - 1,10 avec le CCM97
 - 1,00 selon l'EC3

RÉSISTANCE À LA FLEXION (CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE ULTIME)

Dans le contexte de la vérification des structures métalliques, il peut y avoir interaction entre l'effort tranchant V_{sd} et le moment fléchissant M_{sd} . Cela signifie que lorsqu'un élément est soumis à des efforts combinés de flexion et de cisaillement, la résistance de la section peut être réduite, notamment en flexion.

- Lorsque $V_{Sd} \leq 0,5 V_{pl,Rd}$: il n'y a pas d'interaction significative
 - Lorsque $V_{Sd} > 0,5 V_{pl,Rd}$: il y a une **interaction significative** entre cisaillement et flexion, Dans ce cas, on **réduit la résistance en flexion** en remplaçant f_y par f_{red} dans les formules de résistance M_{Rd}
- La réduction se fait via une **limite d'élasticité réduite f_{red}** :

$$f_{red} = (1 - \rho) f_y$$

avec :

$$\rho = \left(\frac{2V_{Sd}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$$

RÉSISTANCE À LA FLEXION (EXERCICE)

Soit des poutres en flexion avec des charge de $G = 1\text{KN/m}$, $Q = 4\text{KN/m}$, de section IPE240, d'acier S235, et de longueur $l = 5\text{m}$

1. Vérifier la résistance de la poutre suivante à la flexion simple
2. Vérifier la flèche, on donne $f_{adm} = l / 200$
3. Vérifier l'effort tranchant aux appuis

