



جامعة أبو بكر بلقايد

كلية التكنولوجيا

UNIVERSITÉ DE TLEMCEEN

Faculté de Technologie



L3 INGÉNIEUR GC

MATIÈRE : CHARPENTE MÉTALLIQUE 2

RÉSISTANCE À LA FLEXION DÉVIÉE

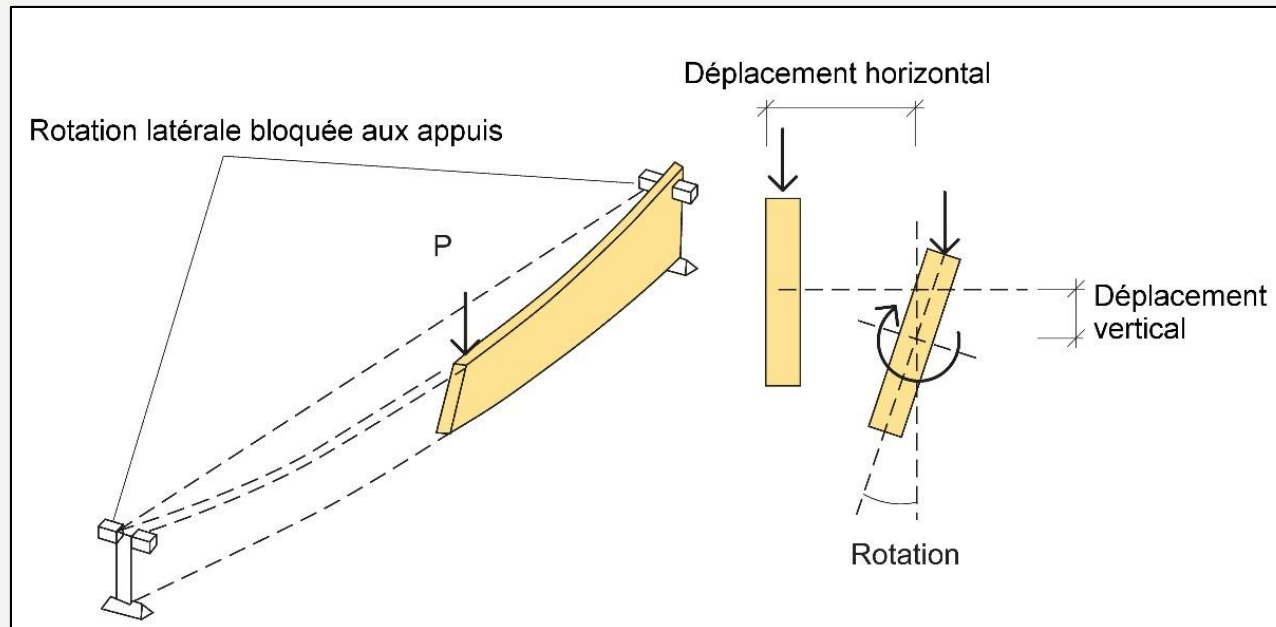
DR. TABET-DERRAZ MOULAY IDRIS

Email: moulayidriss.tabetderraz@univ-tlemcen.dz

INTRODUCTION

La **flexion déviée** est l'état de sollicitation d'un élément structural lorsque celui-ci est soumis simultanément à **deux moments fléchissants** agissant selon **deux directions différentes**, non contenues dans un même plan principal de la section.

Dans ce cas, **l'élément se déforme dans deux plans à la fois**, et la répartition des contraintes dépend des deux moments appliqués.



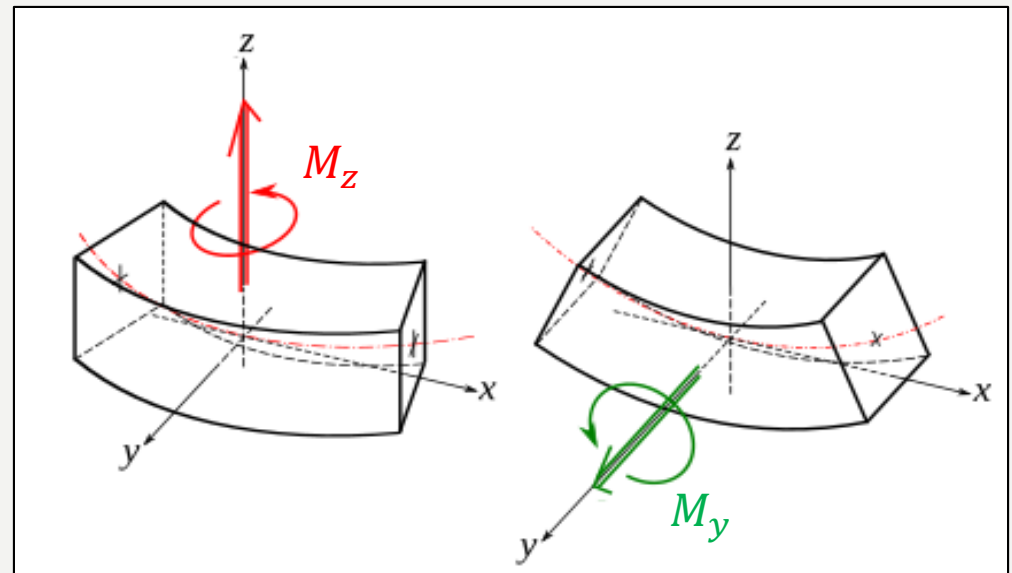
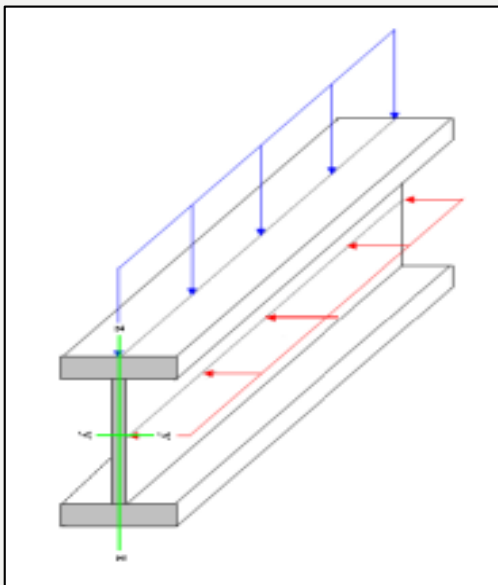
LA FLEXION DÉVIÉE (PRINCIPE)

En flexion déviée, les contraintes normales dans une section droite résultent de l'action simultanée de deux moments fléchissants agissant suivant deux directions différentes.

Le schéma montre une **section soumise à deux moments fléchissants** :

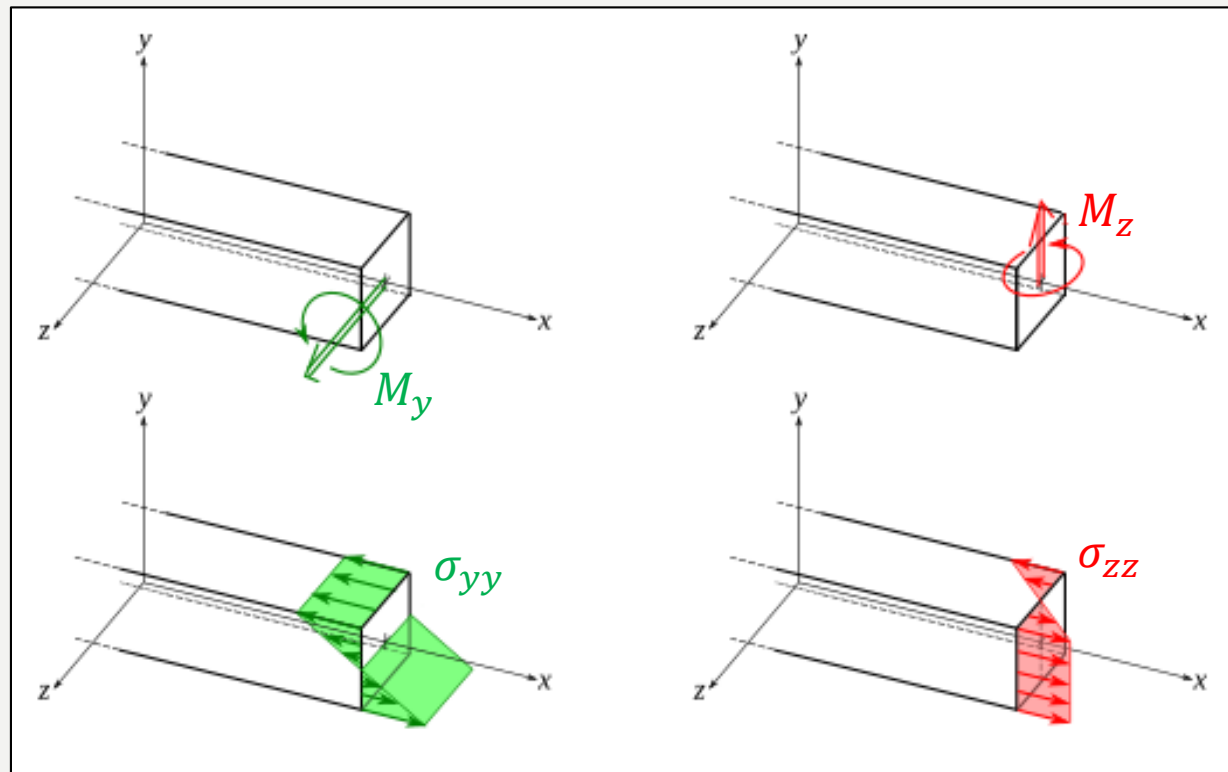
- Un moment M_y suivant l'axe $y-y$
- Un moment M_z suivant l'axe $z-z$

Agissant **simultanément** mais **dans deux directions différentes**.



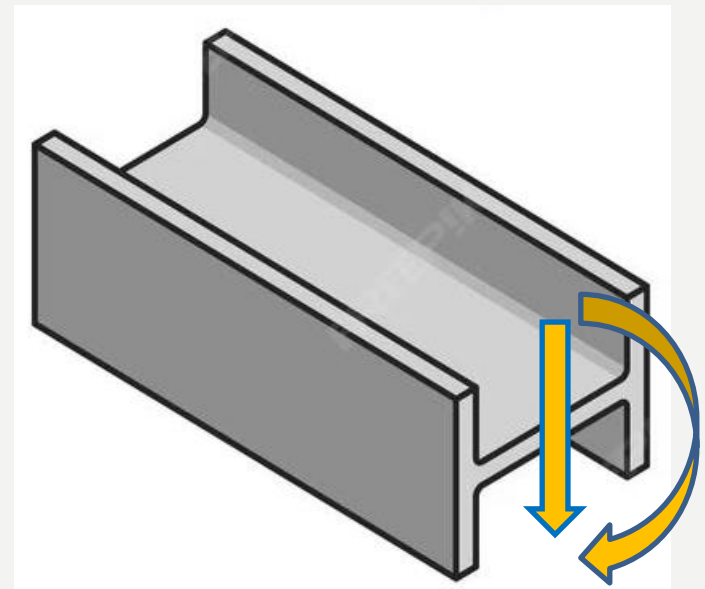
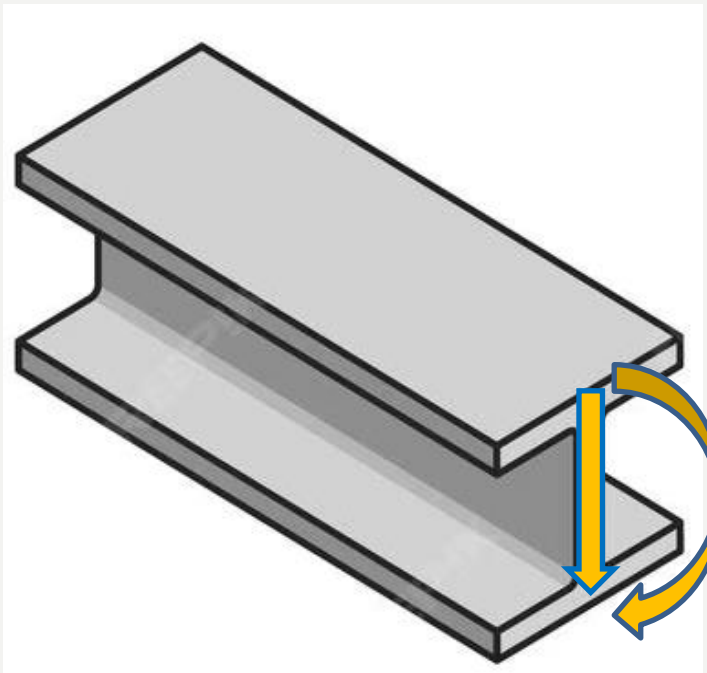
LA FLEXION DÉVIÉE (PRINCIPE)

Ainsi la répartition des contraintes de compression et de traction se font dans les deux sens y-y et z-z



LA FLEXION DÉVIÉE (PRINCIPE)

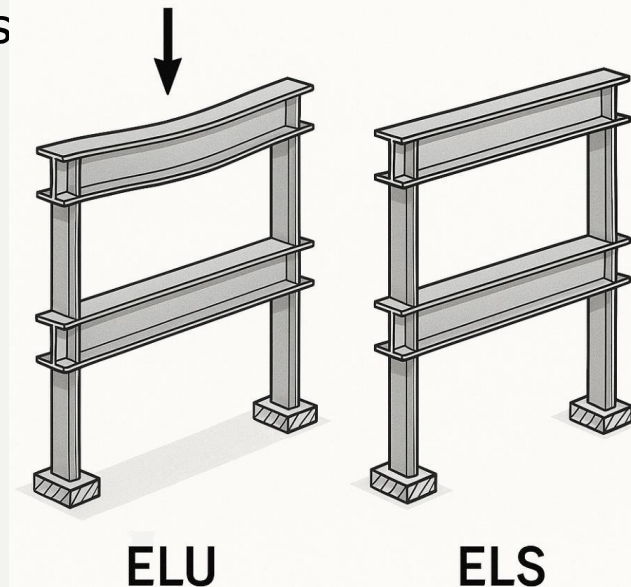
Lorsqu'une poutre est soumise à la flexion déviée, deux moments fléchissants M_y et M_z , et deux l'effort tranchant V_y et V_z (Cisaillement)



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

(CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE DE SERVICE)

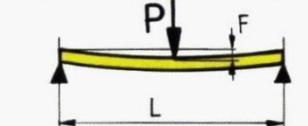
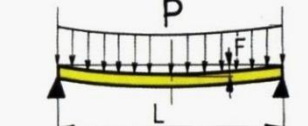
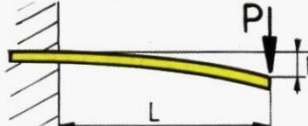
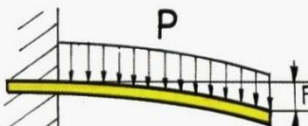
Le calcul à l'ELS d'une poutre en acier soumise à la flexion déviée se fait par la vérification de **la flèche dans les deux sens** de cette dernière afin de garantir le confort et le bon fonctionnement de la structure.

- 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	$\Delta < L/500$

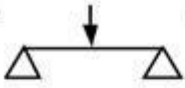
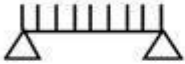

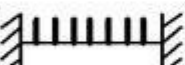


RÉSISTANCE À LA FLEXION DÉVIÉE (CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE DE SERVICE)

- 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/m/m	FLÈCHE MAXI EN M/M	Taux TRAVAIL MAXI EN D20/mm ²
 <p>POUTRE sur 2 Appuis</p>	$\frac{P \times L}{4}$	$\frac{P \times L^3}{48 \times E \times I}$	$\frac{Mf}{\frac{I}{V}}$
	$\frac{P \times L}{8}$	$\frac{5 \times P \times L^3}{384 \times E \times I}$ $\frac{P \times L \times 5 \times L^2}{8 \times 48 \times E \times I}$	$\frac{Mf}{\frac{I}{V}}$ 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			

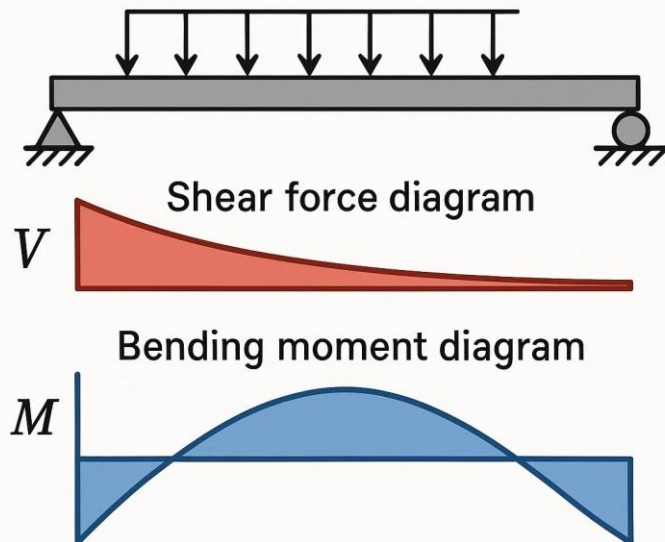
RÉSISTANCE À LA FLEXION DÉVIÉE (CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE DE SERVICE)

- 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 DÉVIÉE (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 DÉVIÉE (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 :

$$\left[\frac{M_{y,sd}}{M_{Ply,Rd}} \right]^{\alpha} + \left[\frac{M_{z,sd}}{M_{Plz,Rd}} \right]^{\beta} \leq 1$$

Avec : $\alpha = 2$ et $\beta = 1$

$$\text{Et } \begin{cases} M_{Ply,Rd} = W_{Ply} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \\ M_{Plz,Rd} = W_{Plz} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \end{cases}$$

Avec :

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

RÉSISTANCE À LA FLEXION DÉVIÉE (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 :

$$\frac{M_{y,sd}}{M_{ely,Rd}} + \frac{M_{z,sd}}{M_{elz,Rd}} \leq 1$$

$$\text{Et } \begin{cases} M_{ely,Rd} = W_{ely} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \\ M_{elz,Rd} = W_{elz} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \end{cases}$$

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

- W_{el} : module élastique.

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

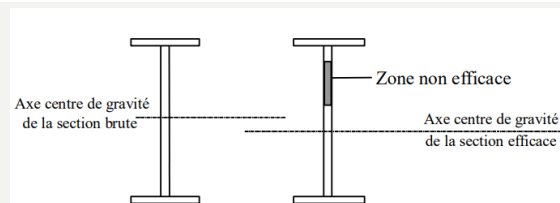
- Pour une section de **classe 4** (La section est élancée, certaines parties peuvent subir un flambement local avant d'atteindre la limite d'élasticité). On utilise une **section efficace** réduite pour tenir compte de la perte de portance :

$$\frac{M_{y,sd}}{M_{Effy,Rd}} + \frac{M_{z,sd}}{M_{Effz,Rd}} \leq 1$$

Et

$$\begin{cases} M_{Effy,Rd} = W_{Effy} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \\ M_{Effz,Rd} = W_{Effz} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \end{cases} \quad \text{Avec : } W_{eff} = \frac{I_{eff}}{y_{max}}$$

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



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

La vérification à l'effort tranchant d'une section en acier en flexion déviée se fait **dans les deux Axes** selon les règles de l'EC3 et du CCM97.

Axe y-y

$$V_{y,Sd} \leq V_{y,Rd} = \frac{A_{vz} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

A_{vz} est l'aire de cisaillement, lorsque le moment tourne autour de l'axe y-y l'aire de cisaillement est **celle de l'ame** du profilé métallique

Axe z-z

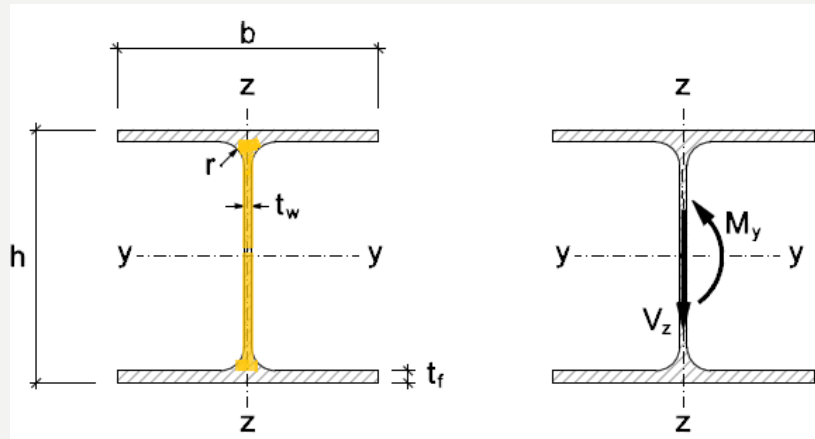
$$V_{z,Sd} \leq V_{z,Rd} = \frac{A_{vy} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

A_{vy} est l'aire de cisaillement, lorsque le moment tourne autour de l'axe z-z l'aire de cisaillement est **celle des semelles** du profilé métallique

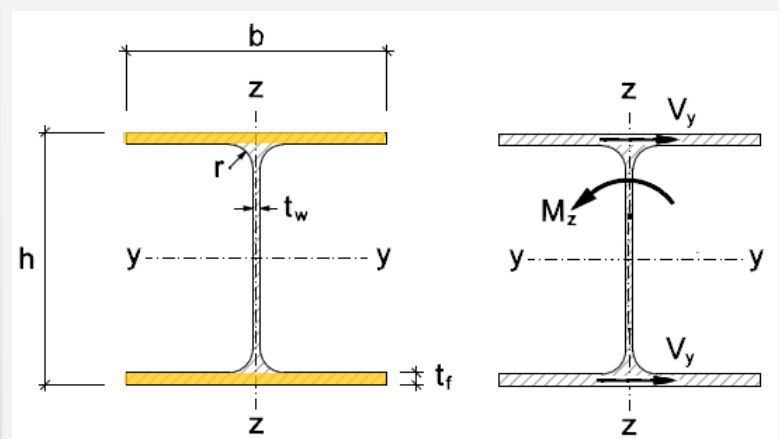
RÉSISTANCE À LA FLEXION DÉVIÉE (CALCUL À L'ÉTAT DE LIMITE ULTIME)

La vérification à l'effort tranchant d'une section en acier en flexion déviée se fait **dans les deux Axes** selon les règles de l'EC3 et du CCM97.

Axe y-y



Axe z-z



Profilé I et H: $A_{vz} = A - 2b_f t_f + (t_w + 2r) t_f$

Profilé U: $A_{vz} = A - 2b_f t_f + (t_w + r) t_f$

Profilé PRS: $A_{vz} = (h - 2t_f) t_w$

Profilé I et H et U et PRS :

$$A_{vy} = 2t_f \cdot b_f$$

RÉSISTANCE À LA FLEXION DÉVIÉE (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 DÉVIÉE (EXERCICE)

On vous demande de vérifier à l'**ELS** et à l'**ELU** la résistance des pannes en profilé **IPE140** utilisées dans la structure d'un hangar métallique, représentée sur les figures ci-dessous. Sachant que cette structure ne comporte pas de liernes.

Données :

- Longueur des pannes : 6 m, la pente (α) : 9.5°
- Entre-axe des pannes : 1.2 m
- On suppose un bardage (bacs acier) de poids de 12.0 kg/m^2 .
- La charge due à l'entretien des pannes $Q=45 \text{ daN/ml}$
- L'acier **S235** avec $E=210000 \text{ MPa}$.

