

Chapitre 5 :

Dimensionnement des éléments porteurs métalliques de toiture et des façades

1. Calcul des pannes :

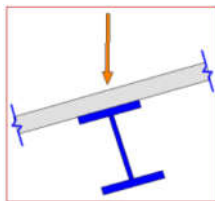
- ✓ **Fonction** : assurer le transfert des actions appliquées à la couverture d'un bâtiment à sa structure principale.
- ✓ **Disposition des pannes** : parallèles à la ligne de faîtage dans le plan des versants.
- ✓ **Portée des pannes** : entraxe des fermes ou portiques.
- ✓ **Entraxe des pannes** : déterminé par la portée admissible de la couverture.

Remarque : dans un bâtiment métallique de type «halle», le poids des pannes et lisses représente généralement 15 à 20% du poids global de la structure \Rightarrow Obligation d'optimisation.

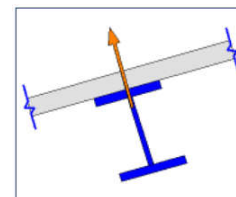


1.1. Charges à considérer pour le dimensionnement des pannes :

- ✓ Le poids propre de la couverture, des pannes, de leurs accessoires et des éventuels équipements portés en toiture.
- ✓ Les charges d'exploitation suspendues à l'intérieur (ex. :éclairage...).
- ✓ La charge d'entretien en toiture.
- ✓ La poussière.
- ✓ La neige
- ✓ Le vent.



Sous charges gravitaires (poids propre, neige, entretien...), la panne est soumise à une flexion suivant la grande inertie de sa section, et à une flexion latérale de sa semelle supérieure (là où la charge est transmise) qui se développe ou non en fonction du rôle joué par la couverture.



Sous charges perpendiculaires au versant (vent, charges ascendantes ou descendantes), la panne est soumise à une flexion suivant la grande inertie de sa section

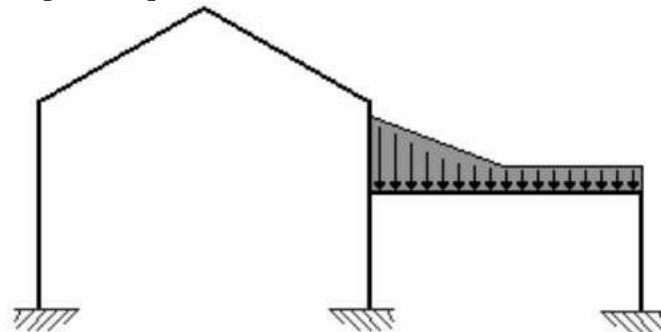
1.2. Phénomènes dus à la neige :

- ✓ La neige est souvent une des charges prépondérantes pour le dimensionnement des pannes de toiture, notamment lorsque la couverture a un faible poids propre.
- ✓ Le poids de neige à retenir dans les calculs est fonction de la région dans laquelle le bâtiment est construit, de l'altitude du site, et de la forme de la construction.
- ✓ Il faut notamment prendre garde aux phénomènes d'accumulation (répartitions non uniformes de la neige sur la toiture) liés à la forme des constructions.

A. Construction avec décrochement en élévation :

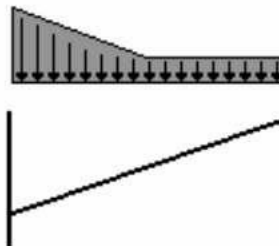
La charge de neige par m^2 est plus importante au pied du décrochement qu'en zone courante.

Si on garde un espacement de panne constant, les pannes doivent être plus résistantes dans la zone de forte charge ; or, pour que la pose de la couverture soit correcte, il faut que les pannes aient la même hauteur.



B. Phénomène le long d'un acrotère de long pan (en bas d'un versant) :

Dans cette zone, il faut des pannes plus résistantes à espacement constant, ou des pannes plus rapprochées.



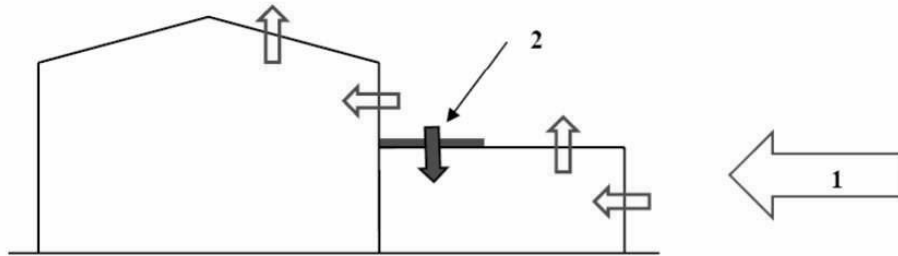
1.3. Phénomènes dus au vent:

A. Soulèvement de la toiture dans les bâtiments ouverts :

- ✓ Dans bon nombre de configurations courantes, l'action exercée par le vent sur les toitures est une action de soulèvement.
- ✓ Il faut accorder une grande attention aux ouvertures existant dans les parois verticales du bâtiment qui peuvent provoquer une augmentation notable de cette action de soulèvement.
- ✓ Un soulèvement significatif en toiture a une influence sur la conception des pannes et ses accessoires (semelle inférieure des pannes comprimée en travée (à maintenir vis-à-vis du déversement, échantignoles fortement sollicitées...))

B. Action descendante du vent sur les bâtiments avec décrochement en élévation:

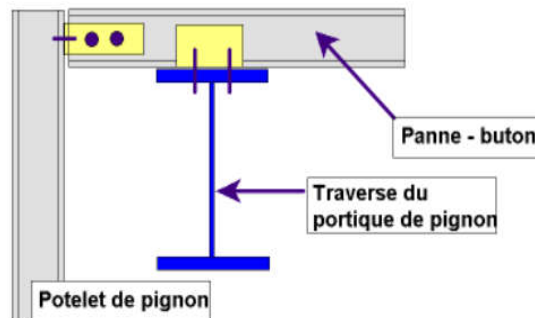
Dans certains cas particuliers, le vent peut avoir une action descendante significative sur une partie de toiture. C'est le cas notamment des toitures avec décrochement en élévation.



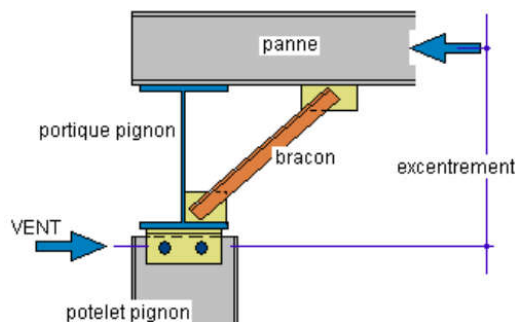
Légende : 1 Sens du vent
2 Zone dans laquelle le vent exerce une action descendante sur la toiture. Il faut prêter une grande attention à l'effet de cumul avec la neige !

✓ Pannes comprimées :

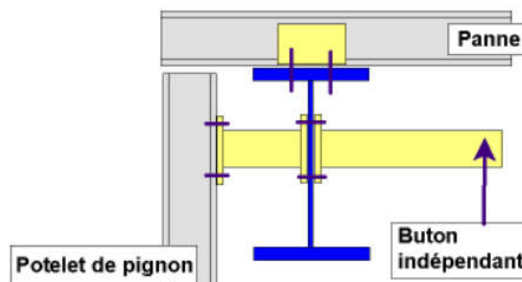
- Lorsque le pignon d'un bâtiment classique est frappé par le vent, les pannes jouant le rôle de buton ou de montant de poutre-au-vent se trouvent comprimées.

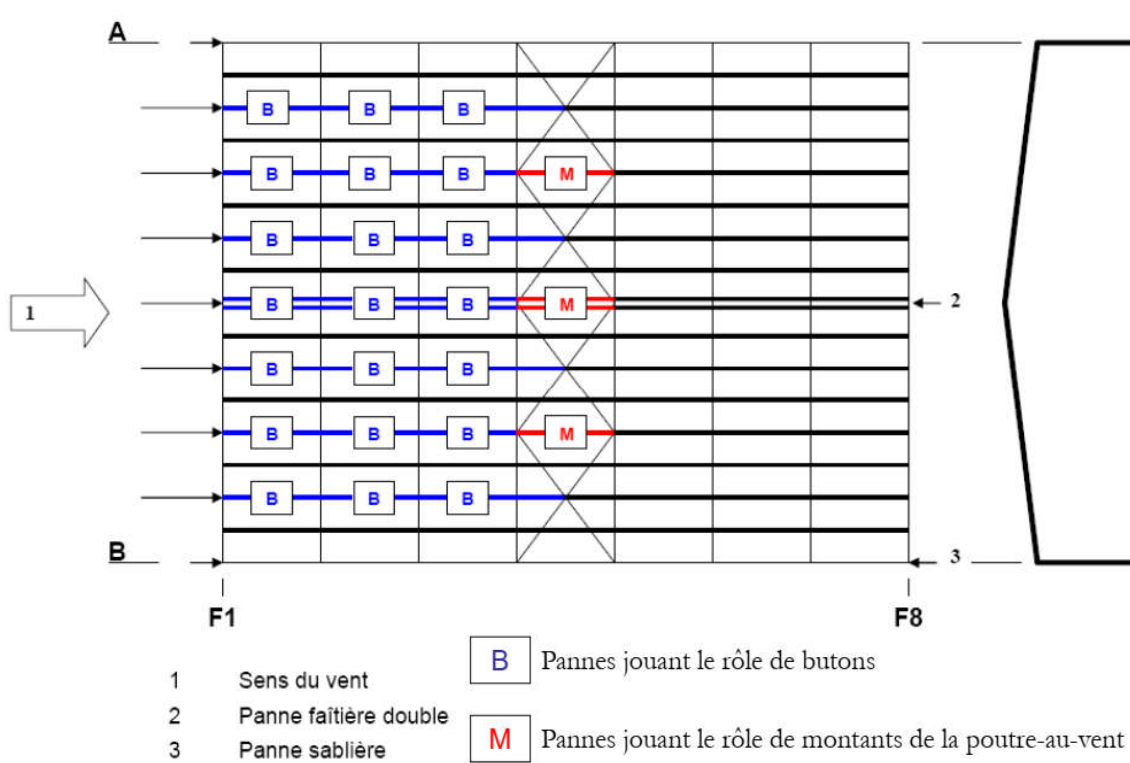


- Il importe, lors de la conception de la structure, de maîtriser les excentrement dans la transmission de ces efforts de compression.



- Si on veut éviter d'ajouter la fonction de buton à la fonction principale des pannes, on peut disposer entre les têtes de potelets de pignon et la poutre-au-vent, des butons indépendants.





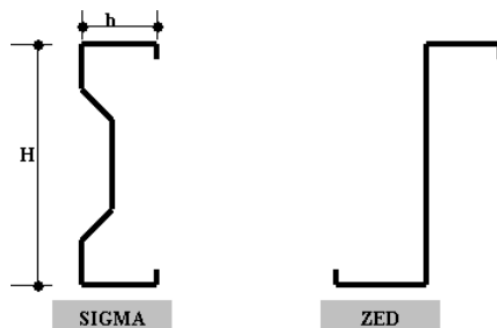
1.4. Types usuels des pannes :

a. Pannes en poutrelles laminées à chaud:

- La gamme des poutrelles IPE de faible hauteur (jusqu'à IPE 240 environ) est largement utilisée pour réaliser des pannes.
- La portée ne dépasse généralement pas 10 m.

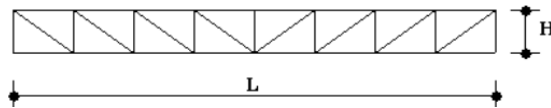
b. Pannes minces formées à froid :

- Elles sont généralement réalisées par profilage à partir d'une tôle en acier (processus de fabrication permettant d'obtenir toutes les formes imaginables).
- Les principales formes de section utilisées pour les pannes sont les Sigma et les Zed.
- On a généralement une hauteur de la section H comprise entre 140 et 350 mm, une épaisseur de la tôle profilée comprise entre 1,5 et 4 mm et une largeur de la semelle b souvent de l'ordre de 70 mm (pour les pannes Zed, les largeurs de la semelle supérieure et de la semelle inférieure diffèrent légèrement pour permettre la mise en continuité des pannes par emboîtement).
- Les portées franchies peuvent atteindre 12 à 15m (ce qui permet de réduire le nombre de portiques).



c. Pannes treillis :

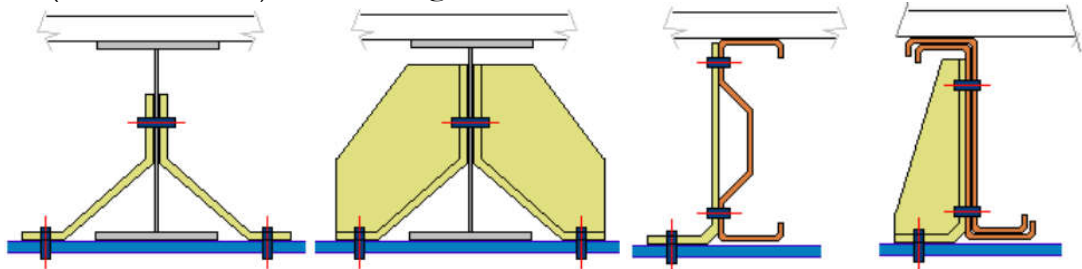
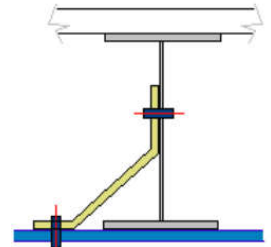
- Elles sont peu utilisées.
- Le rapport L/H est de l'ordre de 15.



1.5. Liaisons des pannes à la structure principale :

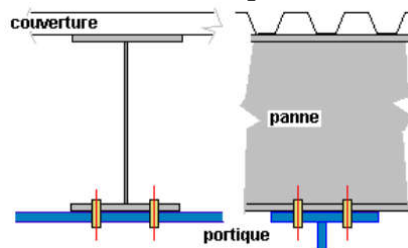
a) Assemblage par échantignole :

- L'échantignole est réalisée au moyen d'un plat plié.
- Cet assemblage ne convient que pour des efforts modestes.
- L'échantignole est dimensionnée en flexion sous l'effet de l'effort de soulèvement et de l'effort suivant versant.
- L'assemblage par échantignole est la solution la plus utilisée.
- Pour des charges plus importantes, l'assemblage par échantignole double (raidie ou non) est envisagé.



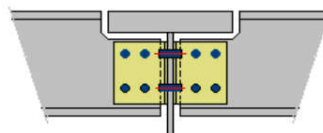
b) Assemblage par boulonnage :

- Il s'agit d'un boulonnage direct de la semelle inférieure de la panne sur la semelle supérieure de la poutre principale (traverse de portique en général).
- Sous l'effet de l'effort de soulèvement, la semelle inférieure de la panne est fléchiée et les boulons de fixation sont tendus. Sous l'effet de l'effort parallèle au versant, l'âme de la panne est mise en flexion.



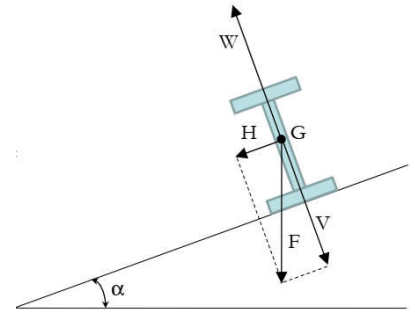
c) Assemblage par doubles cornière âme de panne sur âme de poutre principale :

Ce type d'assemblage est rarement utilisé.



1.6. Sollicitations :

- Pannes posées inclinées → flexion déviée. (pente très faible → flexion simple).
- Les pannes sont soumises à :
 - ✓ des charges verticales (poids propre de la panne et des couvertures, neige, charges suspendues éventuellement...): leur résultante ramenée en charge linéique **F** se décompose en une charge **V** parallèle à l'âme de la panne et une charge **H** perpendiculaire à l'âme (à prendre en compte pour éviter le risque de déversement latéral;
 - ✓ une charges oblique **W** due au vent (pression ou succion) appliquée perpendiculairement au versant (donc parallèlement à l'âme de la panne).



1.7. Dimensionnement :

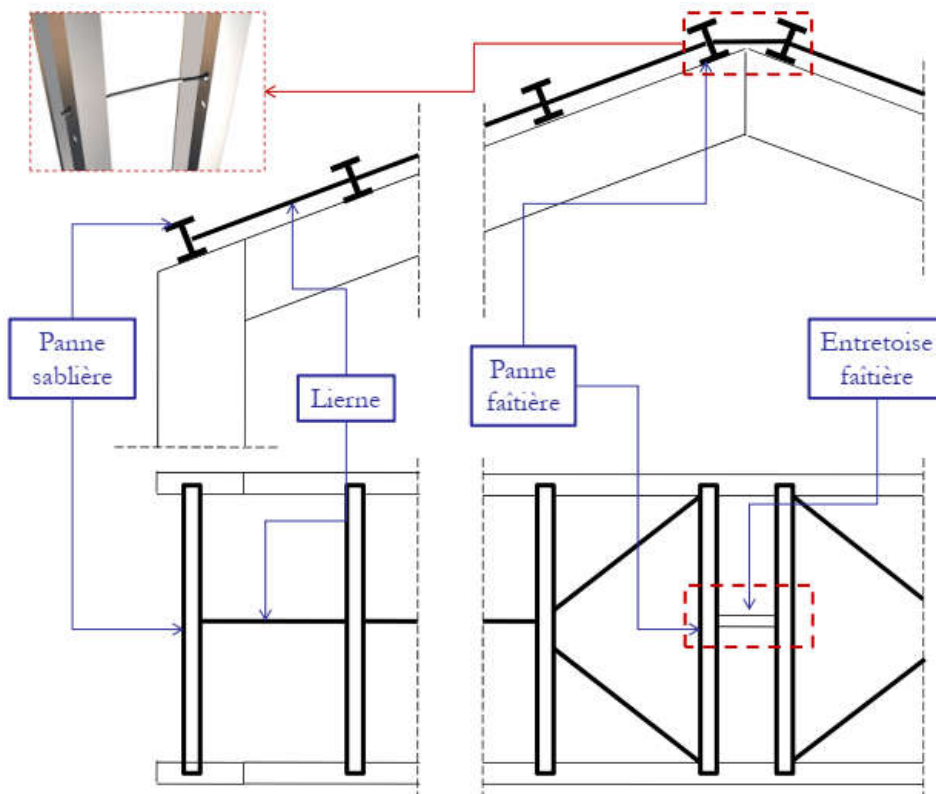
Les pannes sont dimensionnées par le calcul pour satisfaire simultanément aux conditions de **résistance** et de **flèche**.

a) Conditions de résistance :

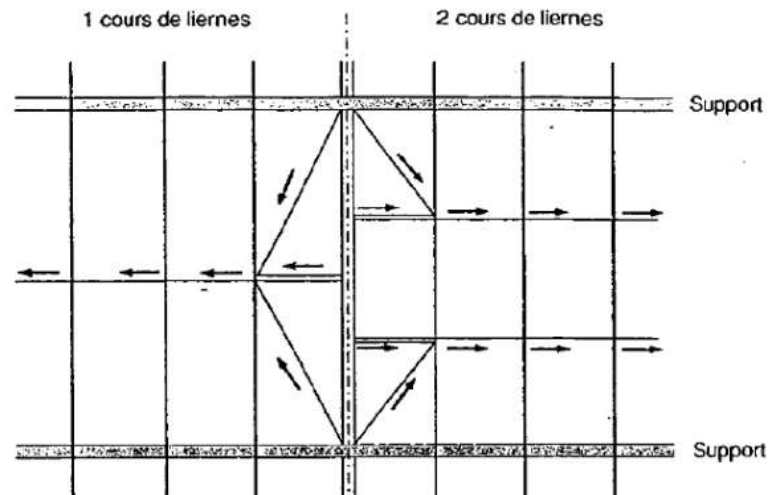
$$\sigma_x = \frac{M_x}{W_y} + \frac{M_y}{W} \leq \sigma_e$$

Remarque :

Pente de 8 à 10% → effet de la charge **H** particulièrement préjudiciable (à cause de la faible inertie transversale des profils des pannes) → sections de pannes importantes → plus onéreuses.



→ **Solution**: réduction de la partie transversale des pannes en les reliant entre elles par des liernes (tirants fonctionnant en traction qui sont soumis à des efforts croissants au fur et à mesure qu'ils se rapprochent du faîtiage) situées à mi-portée ou au tiers de la portée.



- ✓ Les liernes ne peuvent pas être attachées aux pannes faîtières → les tensions sont transmises aux portiques par des tirants en diagonale.
- ✓ Méthodes de calcul → **flexion simple** ou **déviée, composée ou non**.
 - Sections de classe 1 et 2 : calcul en **plasticité**.
 - Sections de classe 3 : calcul en **élasticité**.
 - Sections de classe 4 : cas particulier des pannes en tôle pliée : profils minces → sections efficaces + calcul en élasticité,
 - avec vérification de la stabilité au **déversement** → (pose des liernes).
 - avec vérification de la stabilité au voilement des âmes.

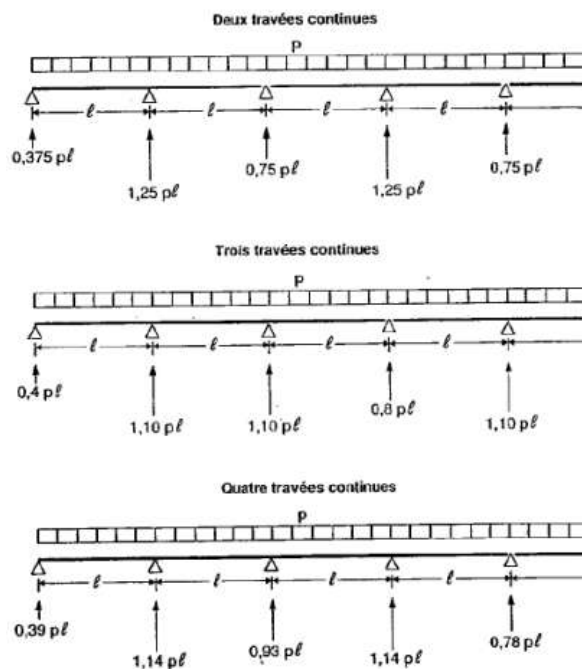
b) Conditions de flèche :

$$f_x \leq f_{ad} \quad \text{avec} \quad f_{ad} = l/200 : \text{flèche admissible.}$$

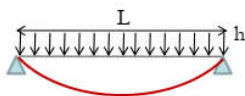
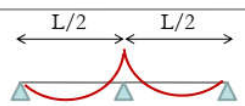
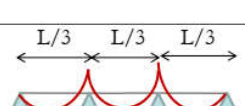
$$f_y \leq f_{ad}$$

- les cas des sollicitations dans le plan d'inertie forte

Réactions d'appuis		
Moment de flexion maximum	$M_{y,max} = vL^2/8$	$M_{y,max} = -vL^2/8$ $M_y = 9vL^2/128$
Flèches maximales	$f = (5/384)(vL^4/EI) < L/200$	$z = (1/EI)[(vL^3x/48) - (vLx^3/16) + (vx^4/24)]$ <p>Pour $x=3L/8$</p> $f' = (2,05/384)(vL^4/EI) = 0,41f < L/200$

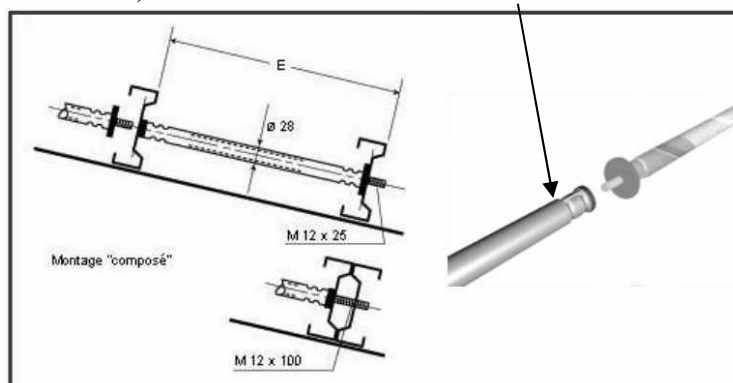


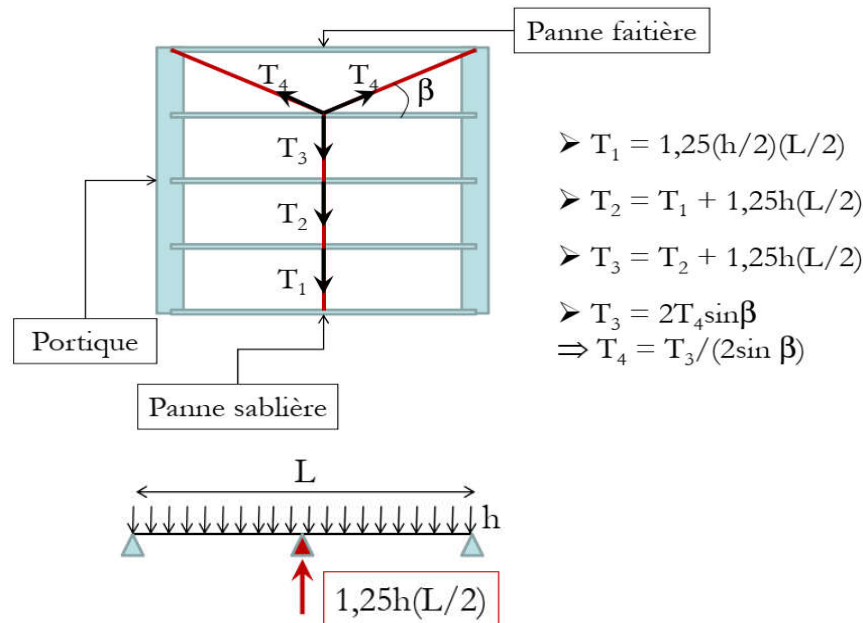
Sollicitations dans le plan d'inertie faible

Panne sans lierne		$M_{z,max} = hL^2/8$
Panne avec une lierne à mi-portée		$M_{z,max} = -hL^2/32$
Panne avec deux liernes aux tiers de la portée		$M_{z,max} = -hL^2/72$

1.8. Calcul des liernes :

- ✓ Les liernes des pannes ont les fonctions suivantes :
 - en phase de montage du bâtiment, assurer la rectitude des pannes avant mise en place de la couverture;
 - en phase d'exploitation du bâtiment, apporter aux pannes un maintien latéral.
- ✓ Les liernes travaillent à la traction (des tirants). Ce sont généralement des barres en fer rond, des cornières ou des tubes.

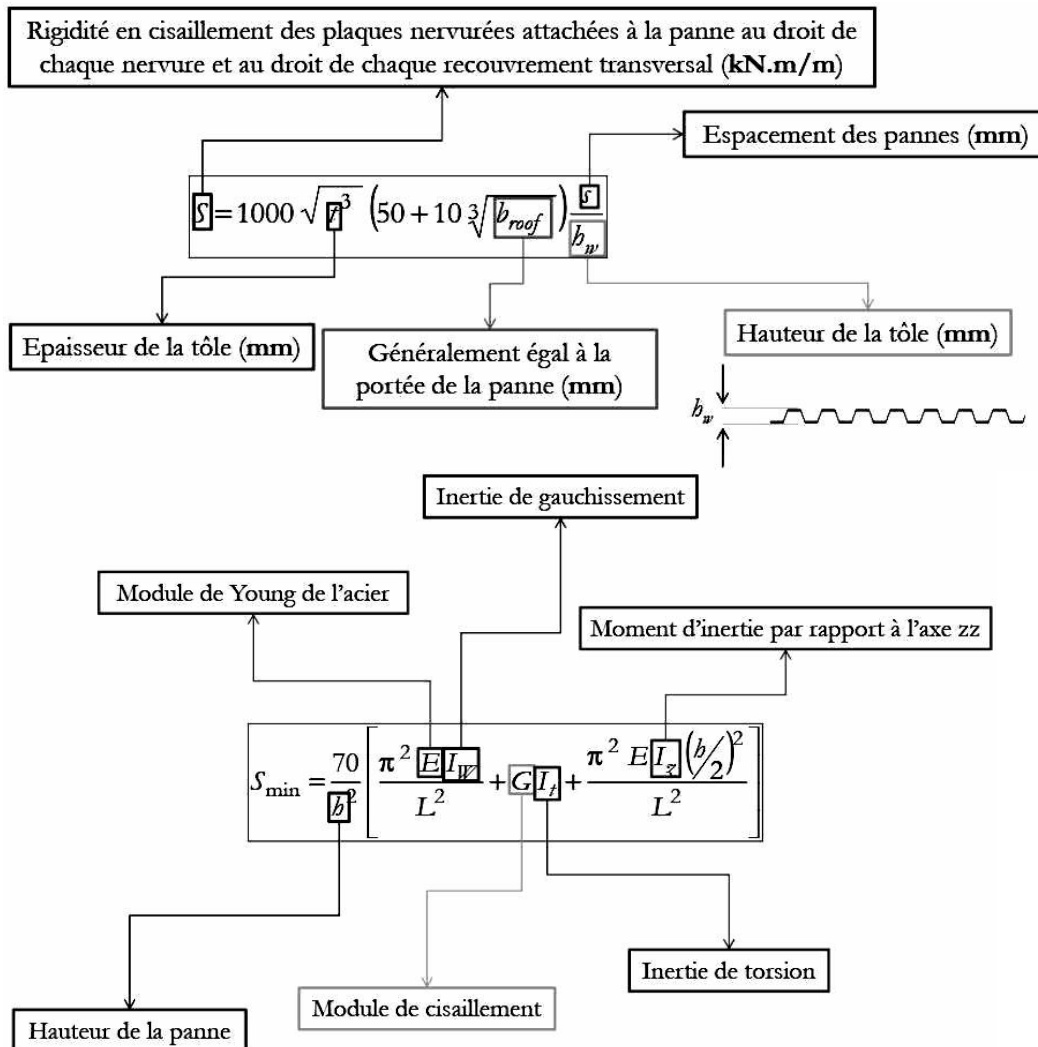




1.9. Capacité d'une tôle pour le maintien de la panne :

- ✓ La panne est considérée maintenue latérale dans le plan de la tôle si l'exigence suivante est satisfaite :

$$S \geq S_{\min}$$



2. Calcul des lisses :

- ✓ **Fonction** : assurer le transfert des actions appliquées à la façade d'un bâtiment à sa structure principale.
- ✓ **Disposition** des lisses : horizontalement à l'extérieur des poteaux de portiques (éventuellement des potelets), sur lesquels elles s'appuient.
- ✓ **Portée** des lisses : entraxe des fermes ou portiques.
- ✓ **Entraxe** des lisses : déterminé par la portée admissible du bardage.

Remarque : dans un bâtiment métallique de type «halle», le poids des pannes et lisses représente généralement 15 à 20% du poids global de la structure
 ⇒ Obligation d'optimisation.

2.1. Types usuels des lisses :

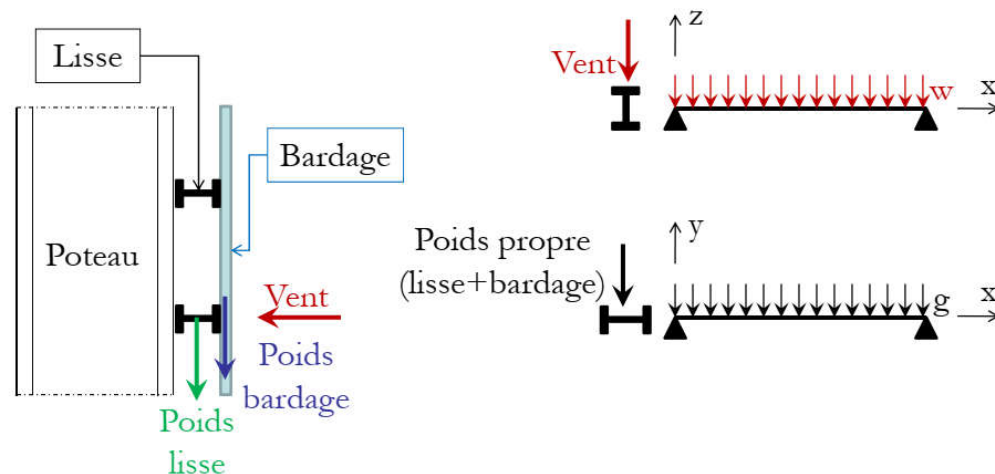
- ✓ Lisses en poutrelles laminées à chaud (IPE, UAP).
- ✓ Lisses minces formées à froid.

2.2. Charges à considérer pour le dimensionnement des lisses :

- ✓ Les charges de vent sur les bardages.
- ✓ Poids propre de la lisse.
- ✓ Poids propre du bardage.

2.3. Dimensionnement:

Les lisses sont dimensionnées par le calcul pour satisfaire simultanément aux conditions de résistance et de flèche.



2.4. Conditions de résistance :

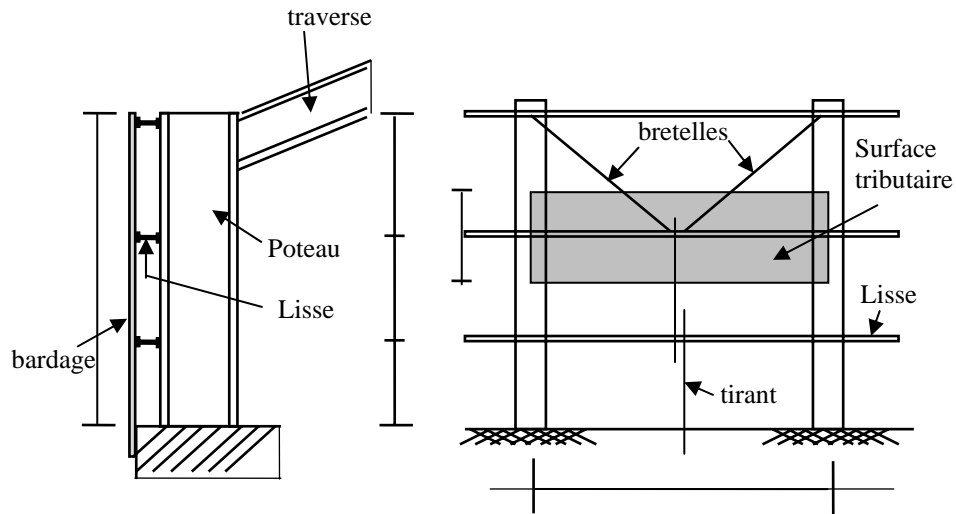
$$\sigma = \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq \sigma_e$$

- ✓ Méthodes de calcul → flexion **bi-axiale** (ou **déviée**).
 - Sections de classe 1 et 2 : calcul en **plasticité**.
 - Sections de classe 3 : calcul en **élasticité**.
 - Sections de classe 4 : cas particulier des pannes en tôle pliée :
 profils minces → sections **efficaces** + calcul en **élasticité**,

2.5. Conditions de flèche : (généralement dimensionnantes)

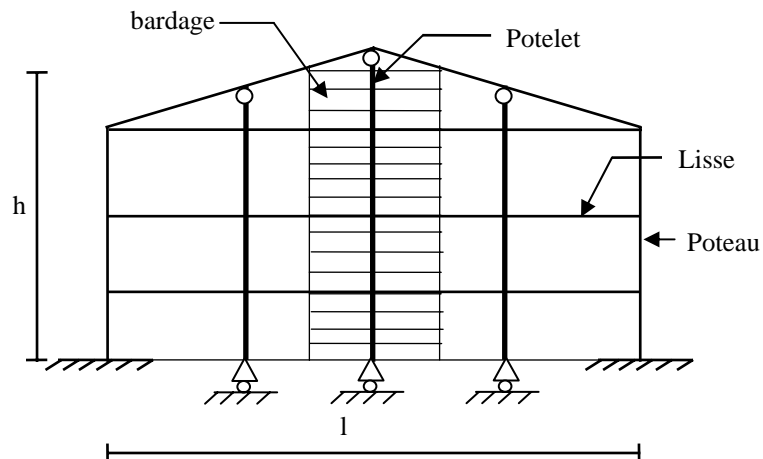
$$\begin{aligned} f_x &\leq f_{ad} \\ f_y &\leq f_{ad} \end{aligned} \quad \text{avec } f_{ad} = 1/200 : \text{flèche admissible.}$$

2.6. Possibilité d'utilisation des tirants (suspentes) et bretelle (pareil que les pannes)



3. Calcul des potelets :

Les potelets sont le plus souvent des profilés en I ou H destinés à rigidifier la clôture (bardage) et résister aux efforts horizontaux du vent. Leurs caractéristiques varient en fonction de la nature du bardage (en maçonnerie ou en tôle ondulée) et de la hauteur de la construction. Ils sont considérés comme articulés dans les deux extrémités.



- ✓ **Fonction** : reprendre les efforts dus au vent pignon et supporter les lisses du bardage.
- ✓ **Disposition** des potelets : verticalement au niveau de la façade pignon. Ce sont des poutres bi-articulées.
- ✓ **Types usuels des potelets** : des profilés laminés à chaud **I** ou **H**.
- ✓ **Charges** à considérer pour le dimensionnement des potelets :
 - efforts dus au vent;
 - poids propre du potelet, du bardage et des lisses.

⇒ Dimensionnement en flexion composée + vérification de la condition de flèche (généralement dimensionnante).

3.1 Principe de dimensionnement :

Pour les éléments comprimés et fléchis, très élancés, on les dimensionne souvent sous la condition de la flèche.

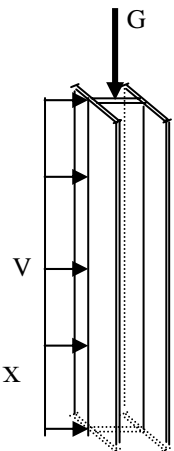
3.2 Condition de flèche :

La vérification de la flèche se fait sous le vent normal (non pondéré).

$$f_x = \frac{5}{384} \times \frac{V_n \cdot l^4}{E \cdot I_x} \leq f_{ad} = \frac{l}{200} \quad l : \text{longueur du potelet le plus chargé.}$$

$$I_x \geq \frac{1000}{384} \times \frac{V_n \cdot l^3}{E}$$

On choisit la section du profilé dans les tableaux ayant au moins la valeur de I_x supérieure ou égale à la valeur trouvée.



3.3 Vérification des contraintes :

Le potelet est sollicité à la flexion (due au vent) et à la compression (due à son poids propre, aux poids des bacs de bardage et des lisses). En aucun cas, il ne supporte la toiture (il est assujéti au portique par appui glissant). La vérification des contraintes est donnée par la formule empirique suivante :

$$\frac{9}{8} (k\sigma + k_d \cdot \sigma_{fx}) \leq \sigma_e$$

$k_d = 1.0$: le déversement est empêché par la présence du bardage tout le long de la longueur du potelet.

- Contrainte de flexion :

$$\sigma_{fx} = \frac{M_x}{W_x} \quad \text{avec} \quad M_x = \frac{V_n \times l^2}{8}$$

- Contrainte de compression :

$$\sigma = \frac{G}{A}$$

avec

G : poids propre des éléments supportés par le potelet ;

G = Poids des lisses + Poids du bardage + Poids propre du potelet

Les élancements : $\lambda_x = \frac{l_x}{i_x}$ et $\lambda_y = \frac{l_y}{i_y} \Rightarrow \lambda_{\max} = \text{Max}(\lambda_x, \lambda_y)$

K : Coefficient du flambement déterminé dans les tableaux en

fonction de λ_{\max} .