



# Programme d'éducation et de formation tout au long de la vie

## Projet SKILLS

Octobre 2013



# CONCEPTION ET CALCUL DE PANNES LAMINÉES À CHAUD



Programme d'éducation  
et de formation  
tout au long de la vie

# OBJECTIFS DU MODULE DE FORMATION

- Savoir concevoir des pannes en profilé laminé à chaud
- Savoir calculer et vérifier des pannes en profilé laminé à chaud
- Savoir prendre en compte la couverture pour la stabilisation des pannes

- **Introduction**
- **Conception et détails constructifs**
- **Calculs**
  - ✓ Actions et sollicitations
  - ✓ Résistance de section
  - ✓ Déversement
- **Stabilisation des pannes par la couverture**
  - ✓ Généralités
  - ✓ Conséquences pour la vérification de la panne
  - ✓ Vérification des éléments de couverture
- **Conclusion**

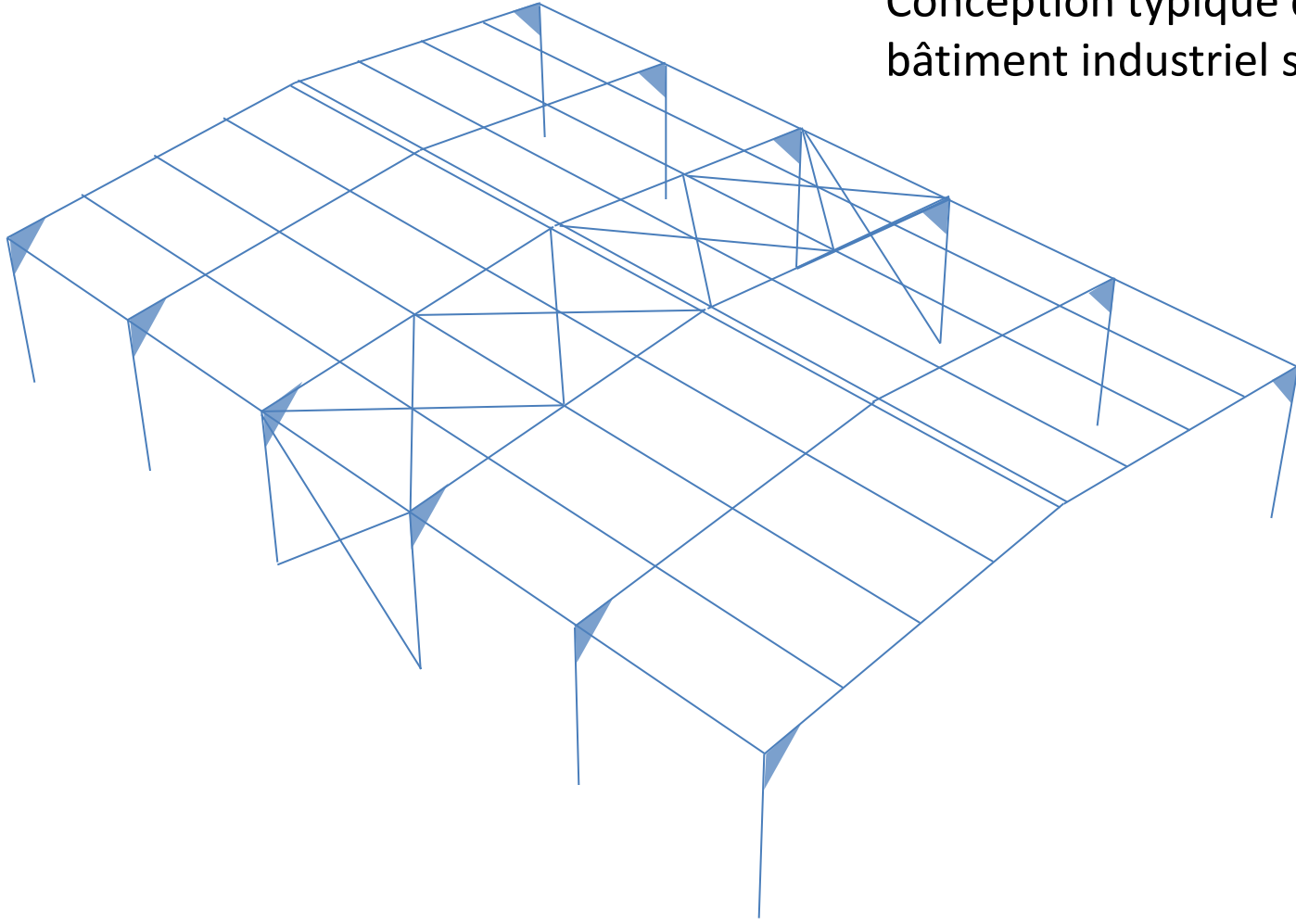
# INTRODUCTION



Programme d'éducation  
et de formation  
tout au long de la vie

# INTRODUCTION

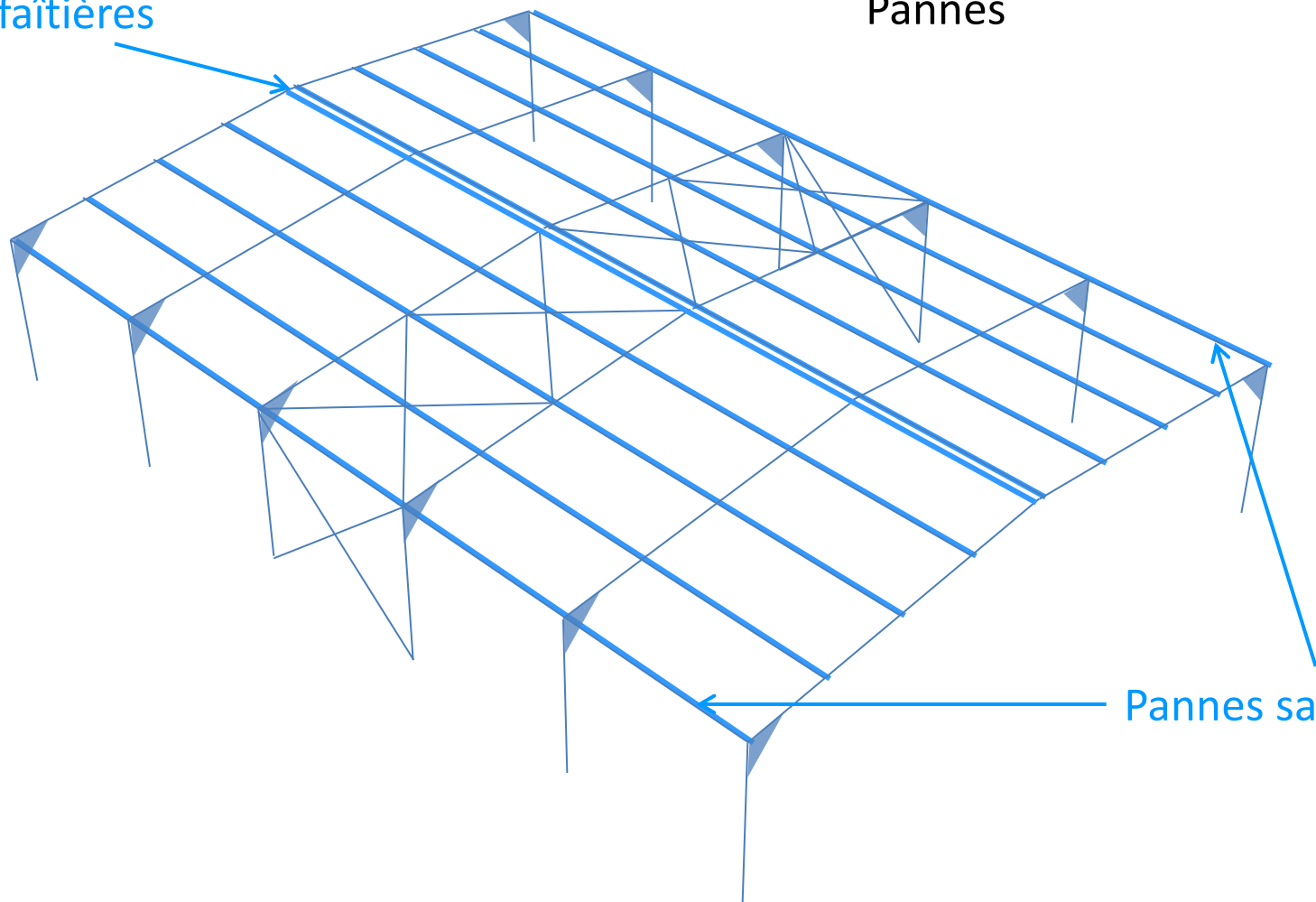
Conception typique d'un  
bâtiment industriel simple



# INTRODUCTION

Pannes faîtières

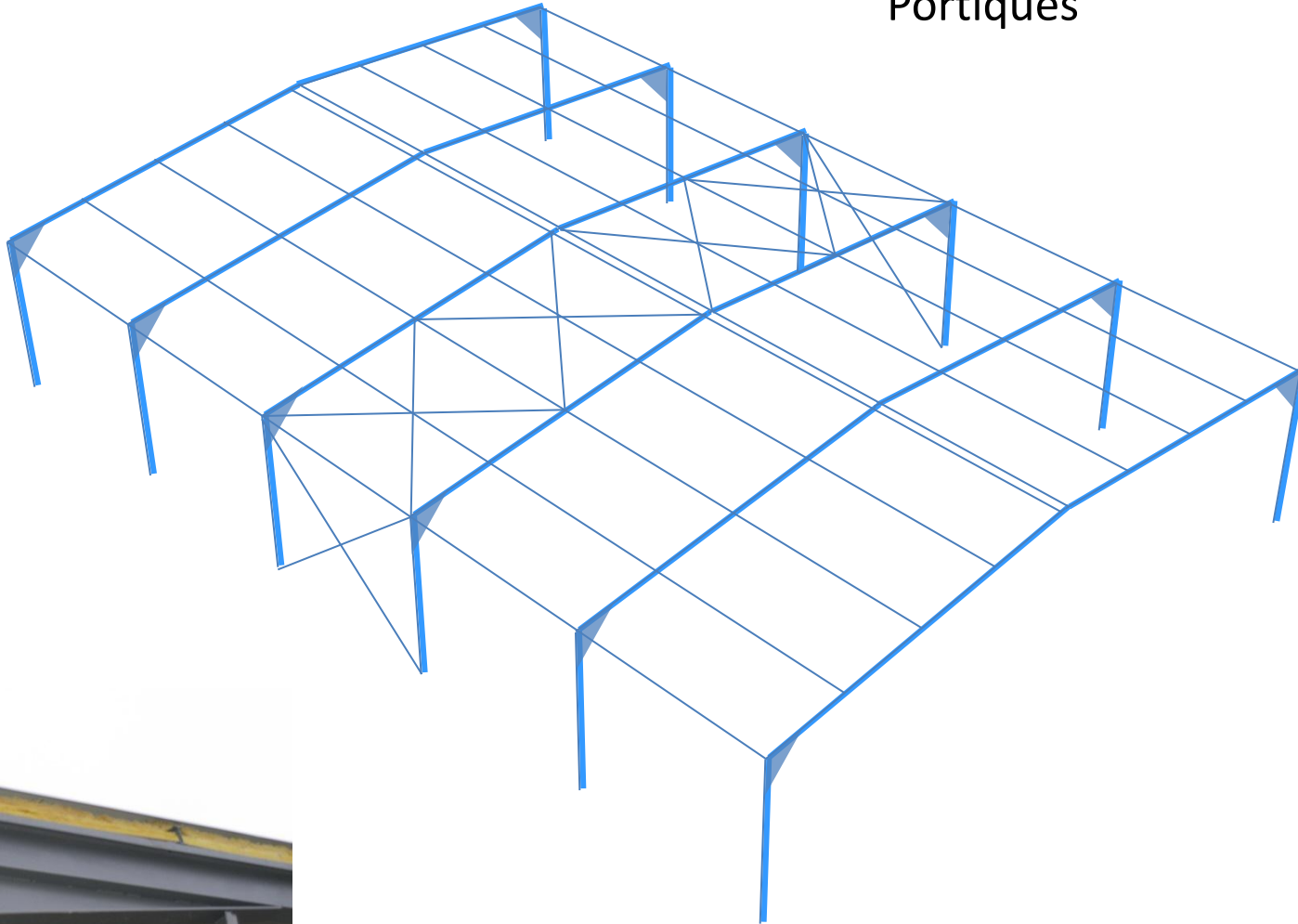
Pannes



Pannes sablières

# INTRODUCTION

Portiques



# INTRODUCTION

Contreventement horizontal



Photo APK

# INTRODUCTION

Contreventement vertical

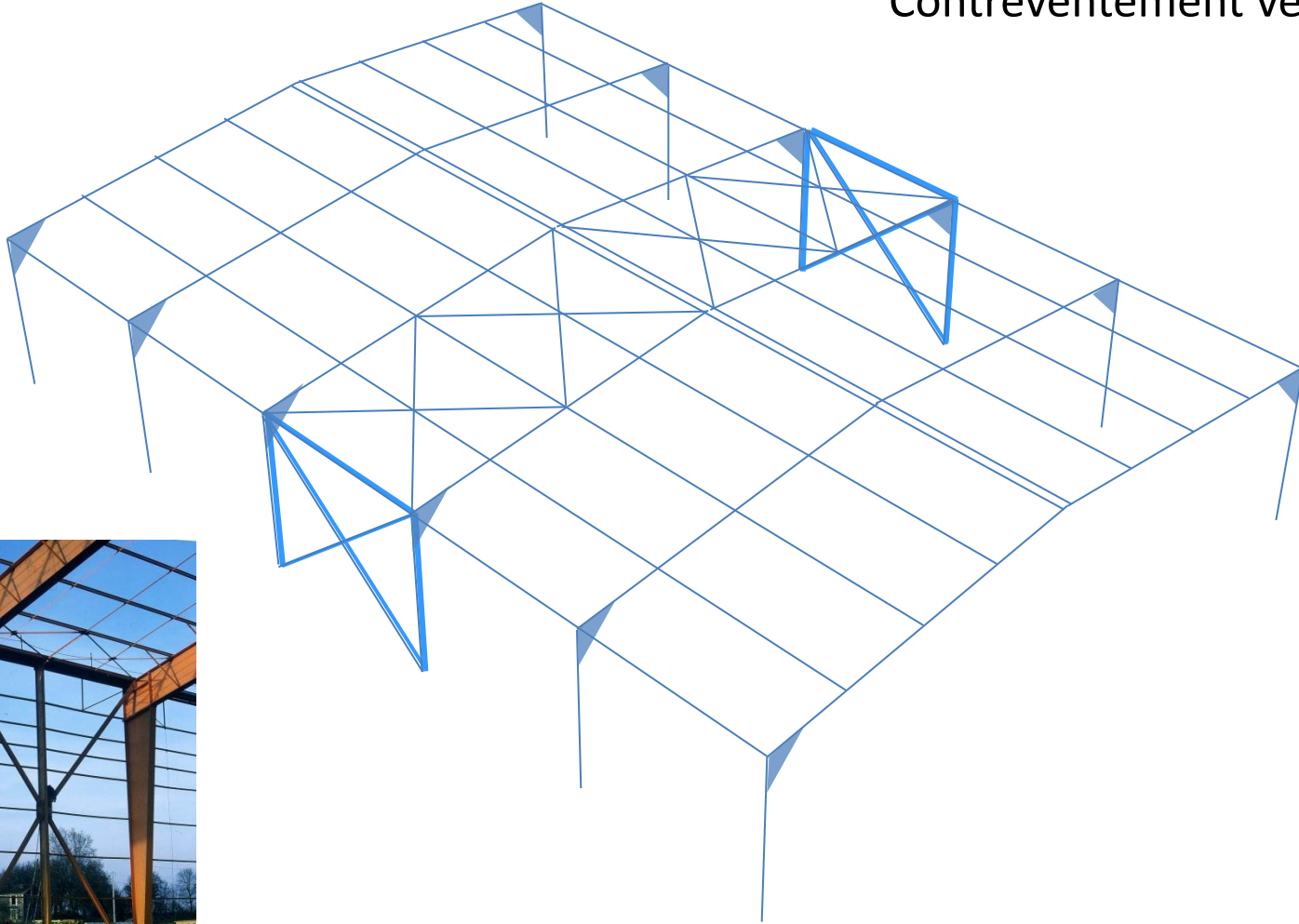


Photo APK

# INTRODUCTION



# INTRODUCTION



Photo APK

- Fonction des pannes dans la structure du bâtiment
  - ✓ Transmission des charges verticales aux éléments principaux (portiques)
  - ✓ Transmission des charges horizontales aux contreventements
  - ✓ Participation à la stabilisation du bâtiment en tant que montant de poutre au vent et de contreventement horizontal
  - ✓ Stabilisation des traverses

# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS



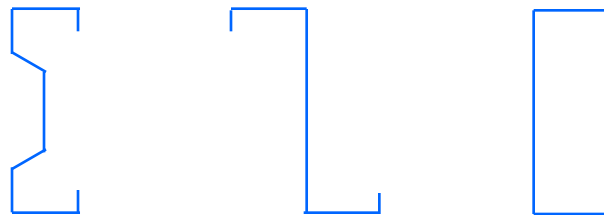
Programme d'éducation  
et de formation  
tout au long de la vie

## ➤ Choix du type d'élément

- ✓ Profilés laminés à chaud (IPE, UPE)



- ✓ Profilés formés à froid (Sigma, Z, C)



# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

## ➤ Choix de la section

### ✓ Treillis



### ✓ Profilés ajourés : pour des cas particuliers



- Critères pour le choix de la section
  - ✓ Portée de la panne (grande ou petite ?)
  - ✓ Charges sur la panne (vent, neige, entretien)
  - ✓ Système statique de la panne
  - ✓ Sollicitation dans la panne (flexion et effort normal ?)

# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

## ➤ Profilés laminés à chaud en I

- ✓ Série « I » : choix si prédominance de la flexion

IPEa

IPE

IPN

IPEo

léger

- ✓ Série « H » : choix si risque de flambement élevé

HEAA

HEA

HEB

HEM

lourd

léger

lourd

# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

## ➤ Systèmes statiques

- ✓ Pannes sur deux appuis simples



- ✓ Pannes sur trois appuis



- ✓ Pannes continues sur la longueur du bâtiment

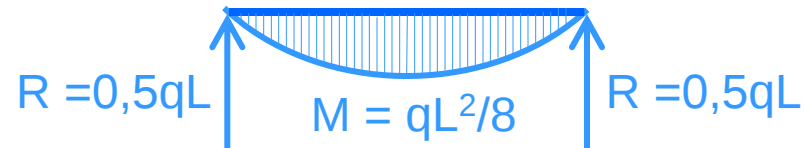


- ✓ Pannes cantilever



# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

✓ Pannes sur deux appuis simples – Panne isostatique

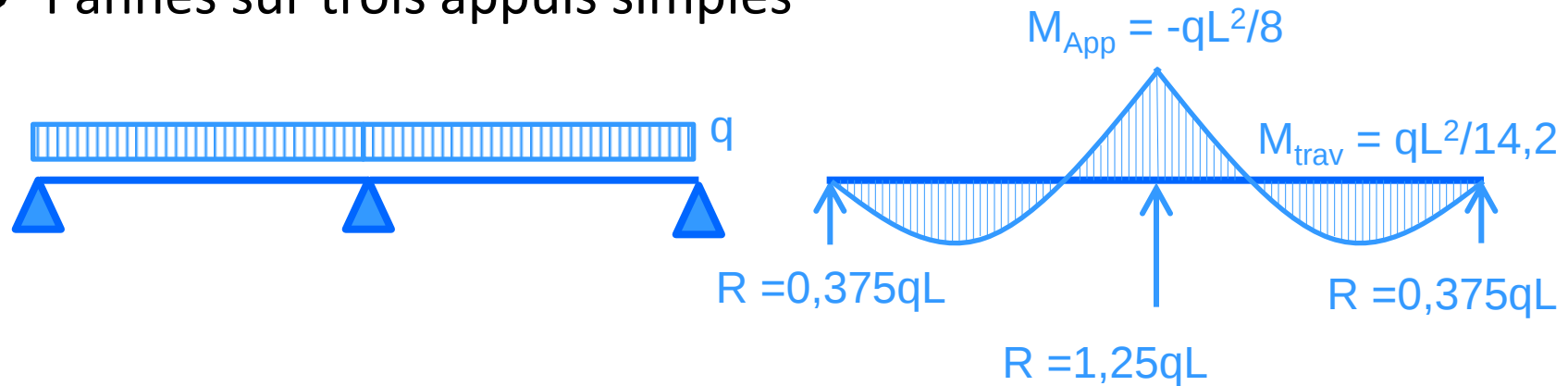


Avantages :      montage simple  
                         transport simple

Inconvénients : flèche élevé ( $5/384 qL^4/EI$ )  
                         moment fléchissant élevé  
                         poids de la panne élevé

# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

✓ Pannes sur trois appuis simples

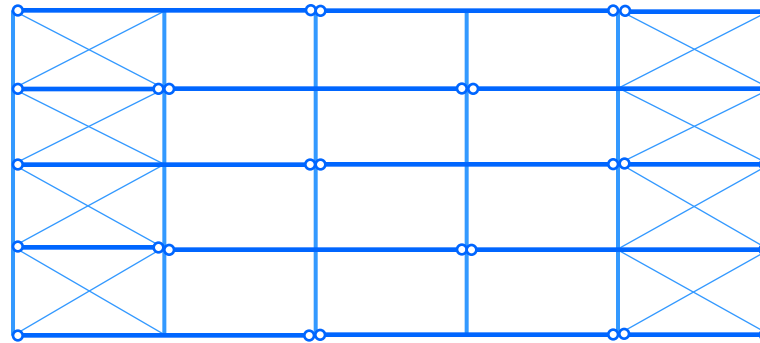


Avantage : montage simple  
transport simple  
réduction de la flèche (max: 42% de la  
panne isostatique)

Inconvénients : moment fléchissant élevé  
poids moyen

## CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

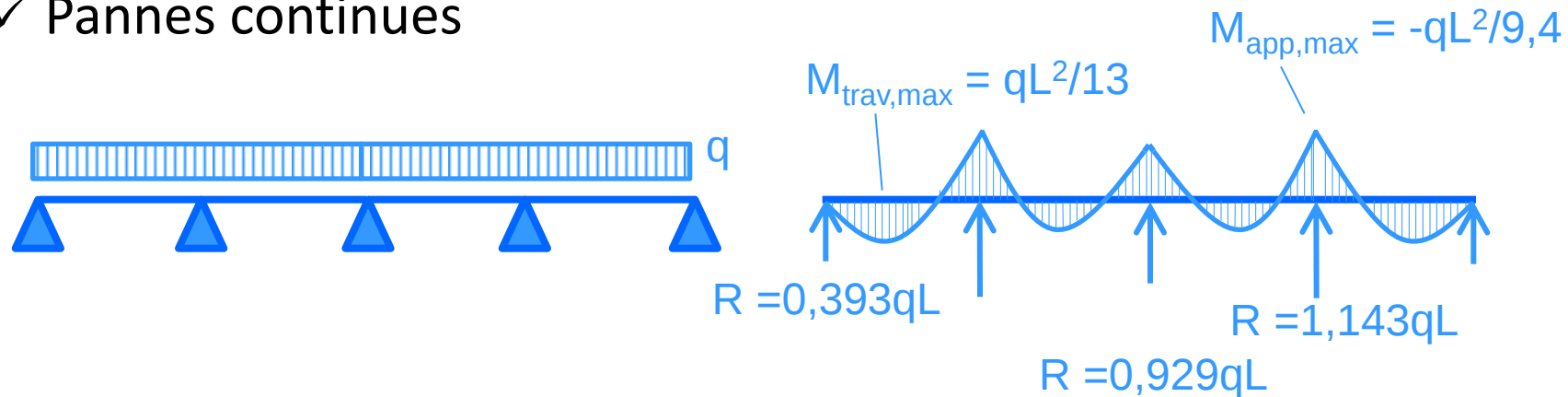
- ✓ Pannes sur trois appuis simples



- Positionnement alterné des pannes continues
  - Répartition équilibrée des efforts sur les traverses (effet de continuité)
  - Pannes sur deux appuis simples dans les travées d'extrémité : **Attention à flèche différentielle**  
**Risque d'accumulation d'eau**

# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

## ✓ Pannes continues



Avantage : flèche faible (max: 20% de la panne isostatique)  
poids léger

Inconvénients : montage couteux (joints de continuité)  
rigidité du joint difficile à assurer

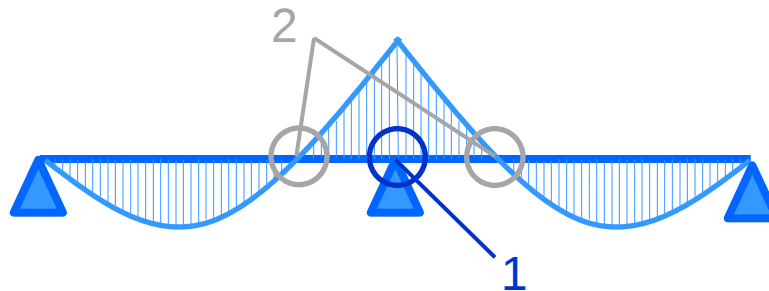
# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

## ✓ Joint de continuité – Localisation

- Sur l'appui (1) :

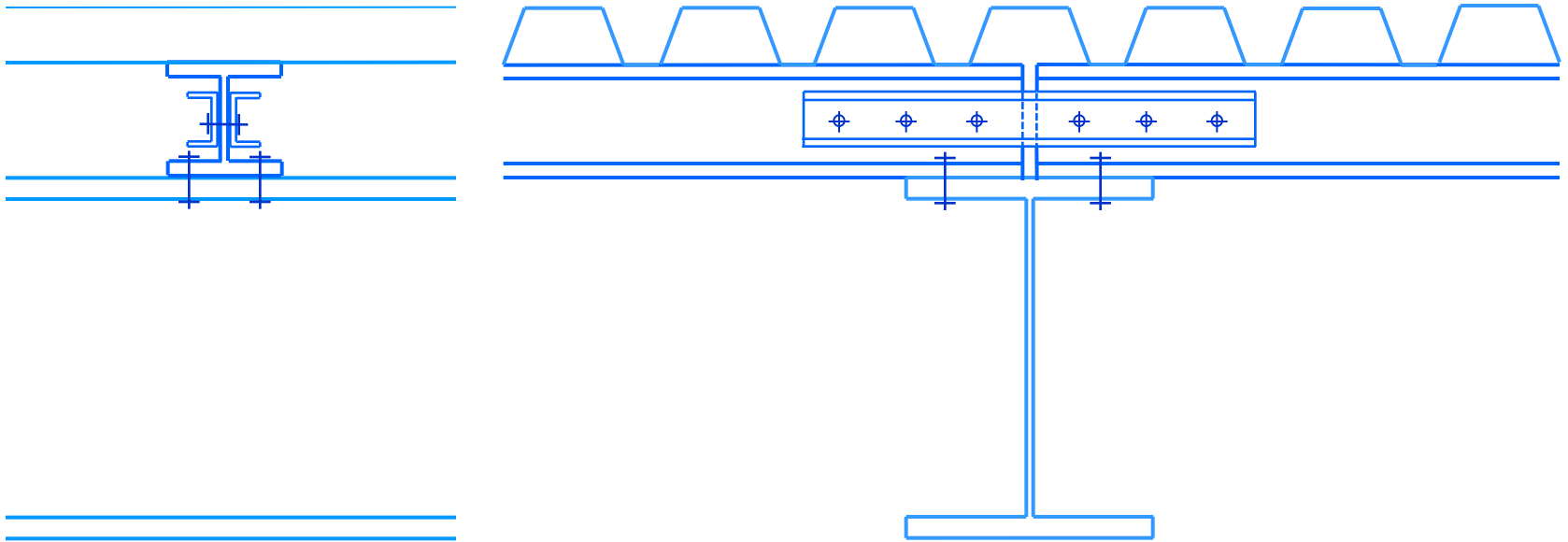
|               |                |
|---------------|----------------|
| Avantage :    | Montage simple |
| Inconvénient: | Efforts élevés |
- En travée (2):

|               |                        |
|---------------|------------------------|
| Avantage:     | Efforts moins élevés   |
| Inconvénient: | Montage plus difficile |



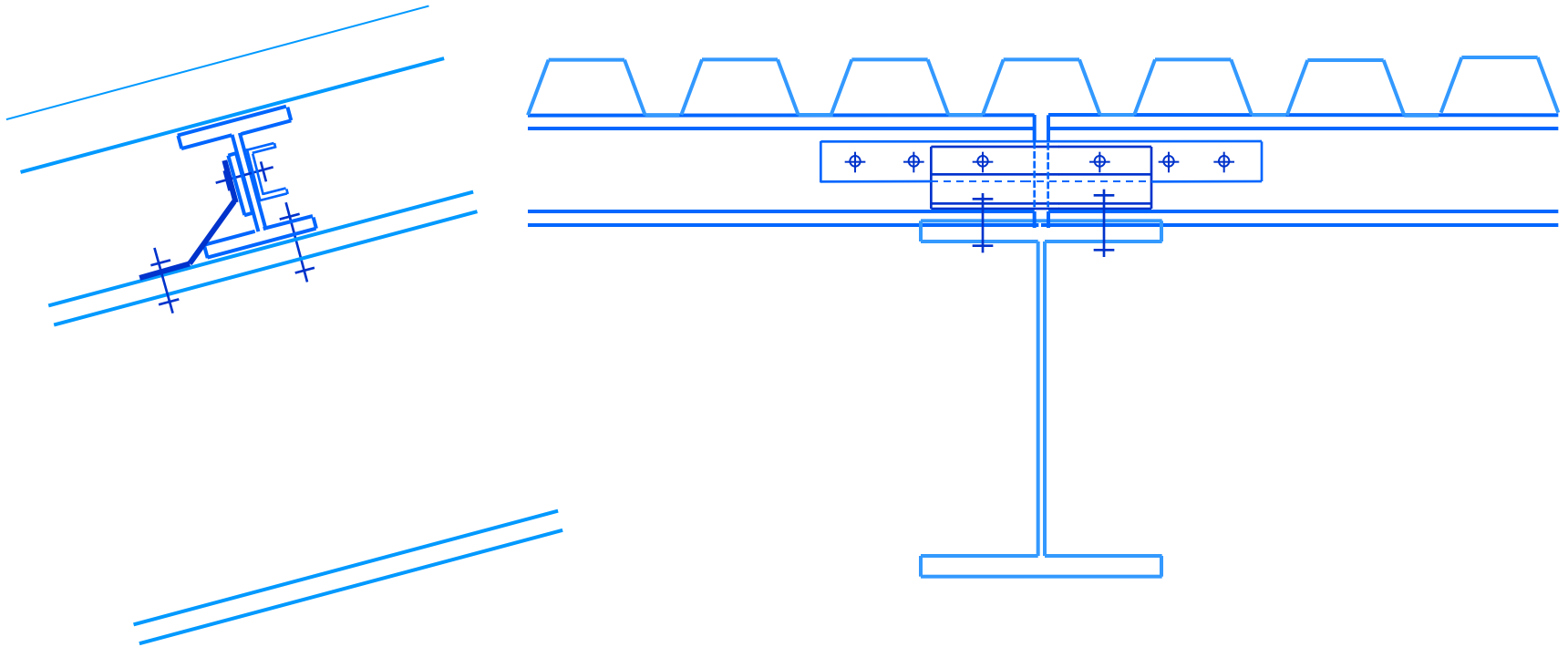
# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

✓ Joint de continuité sur l'appui



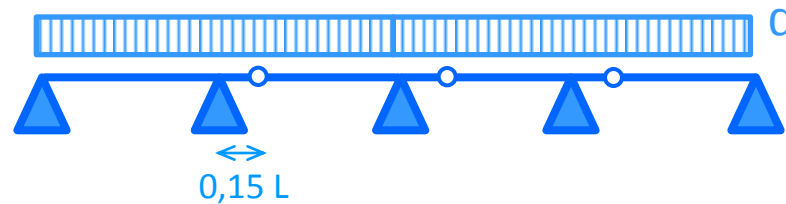
# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

✓ Joint de continuité sur l'appui



# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

✓ Pannes cantilever

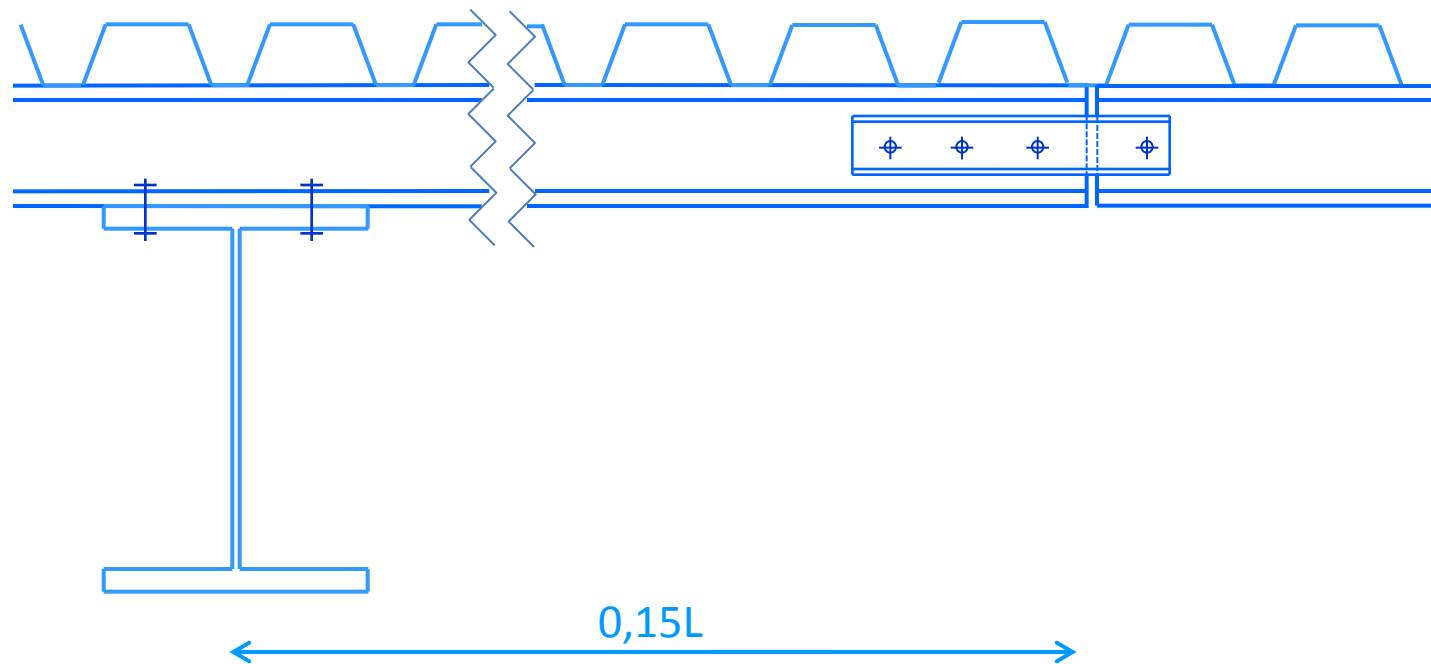


Avantage : montage simple

Inconvénients : remplacement d'une travée de panne difficile  
→ création d'un mécanisme

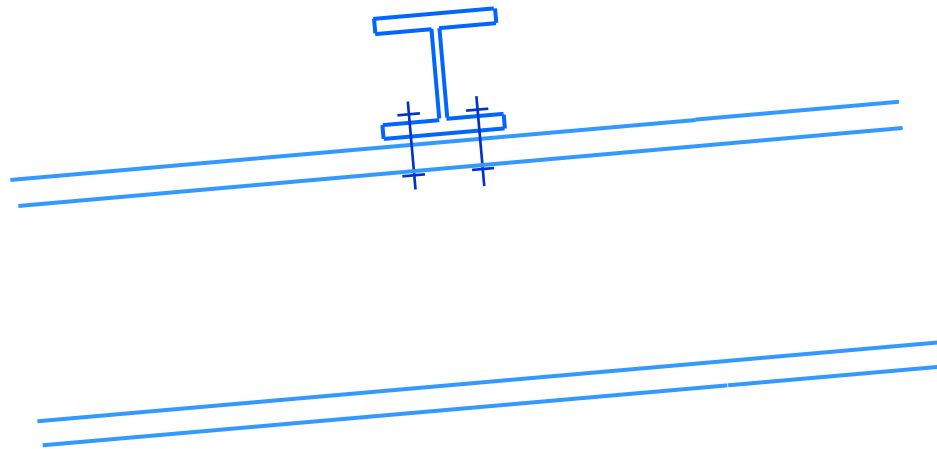
# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

- ✓ Joint d'articulation pour panne cantilever



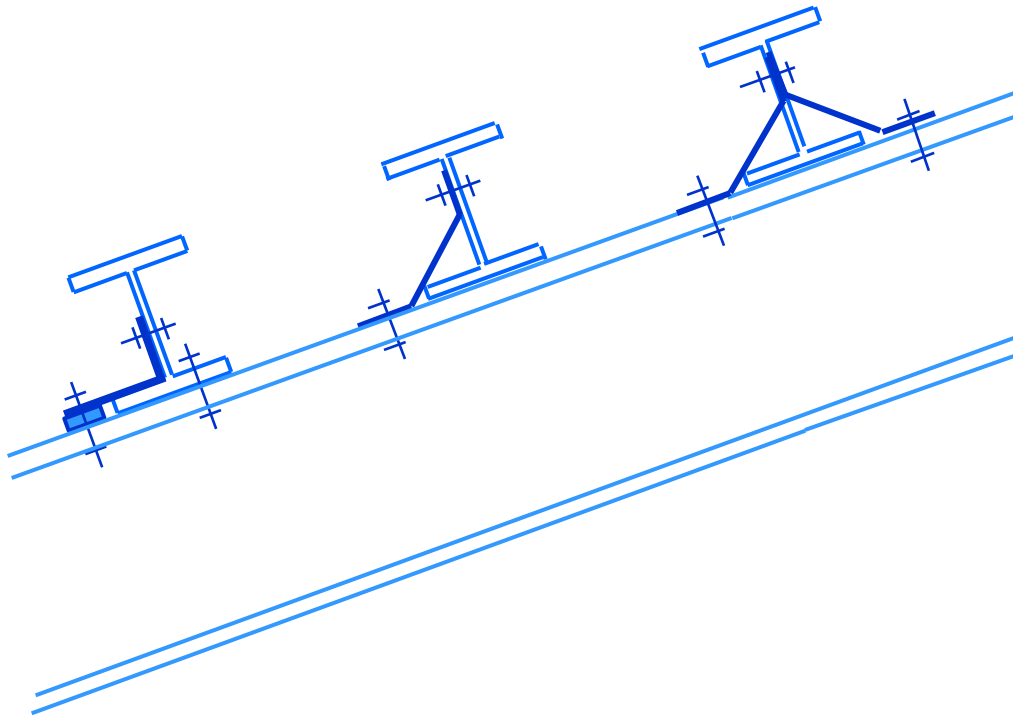
# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

- ✓ Fixation sur traverse – pente  $< 10\%$ 
  - Boulonnage suffisant

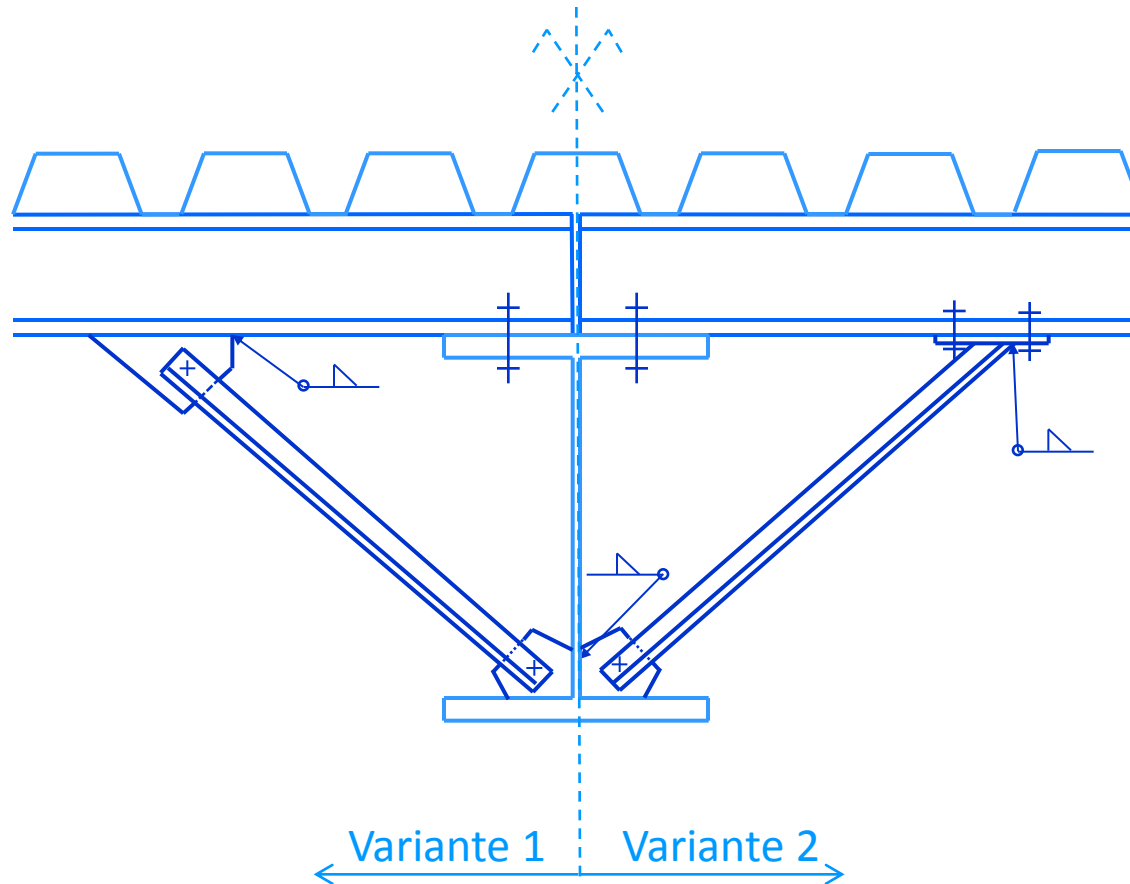


# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

- ✓ Fixation sur traverse – pente  $> 10\%$ 
  - Boulonnage insuffisant – Attention à la rotation de la panne



## ➤ Pannes braconnées



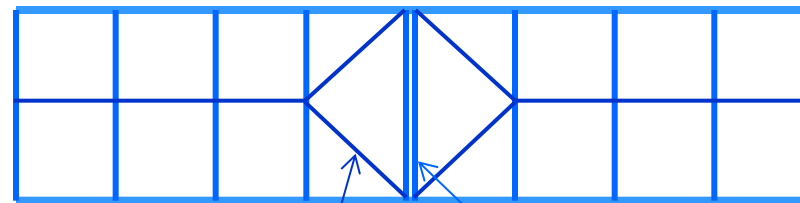
## ➤ Pannes braconnées

- ✓ Système panne – bracon = maintien en torsion pour la traverse
- ✓ Système panne – bracon assure la continuité de la panne
- ✓ Profil bracon : cornière, double cornière
- ✓ Attention : compression créée dans la panne par le braconnage
- ✓ Attention : distribution de moment change (appuis intermédiaires pour la panne)
- ✓ Attention : efforts de stabilisation supplémentaires pour les pannes

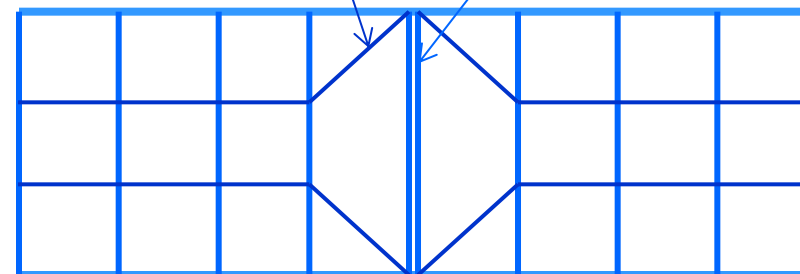
# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

## ➤ Liernes

### ✓ Liernes simples



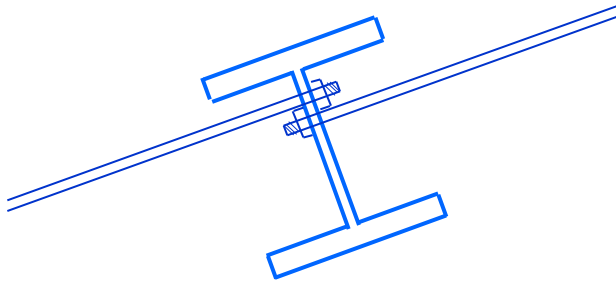
### ✓ Liernes doubles



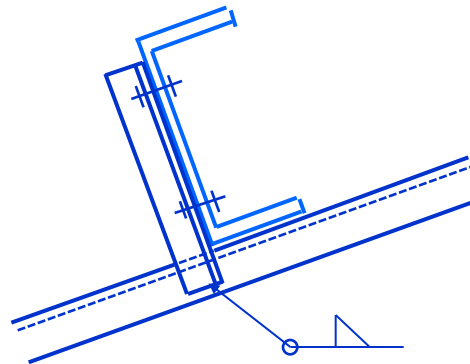
## ➤ Liernes

- ✓ Réduction de la portée des pannes par rapport au moment hors plan
- ✓ Transmission des charges hors plan aux traverses
- ✓ Section :

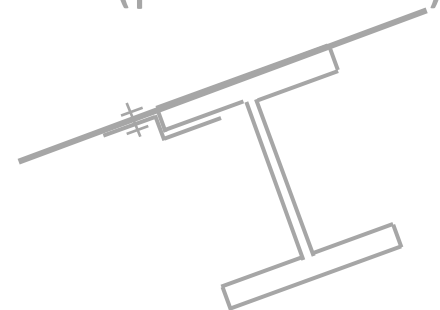
tiges filetées



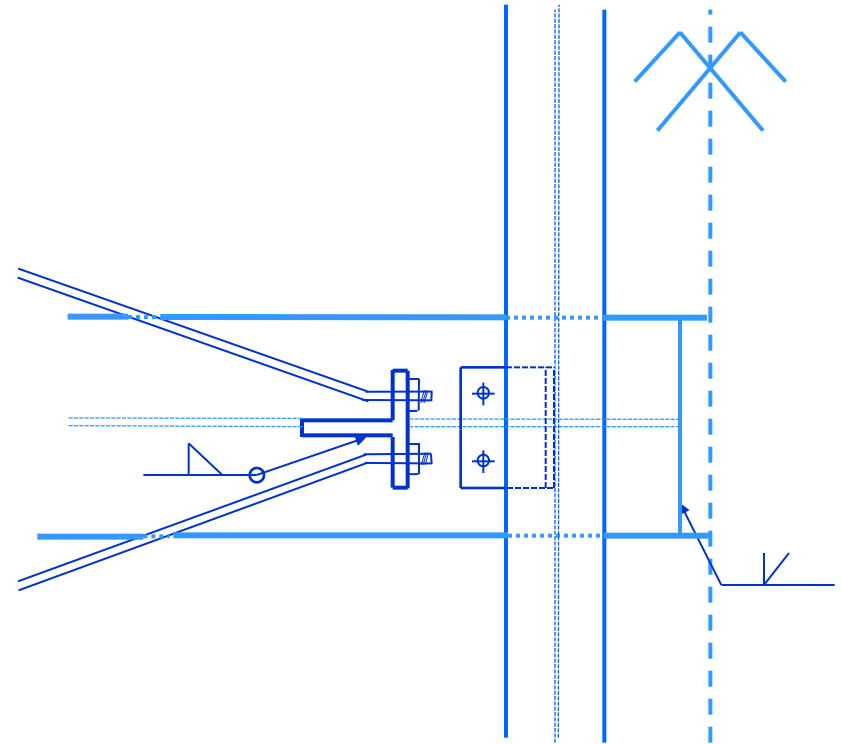
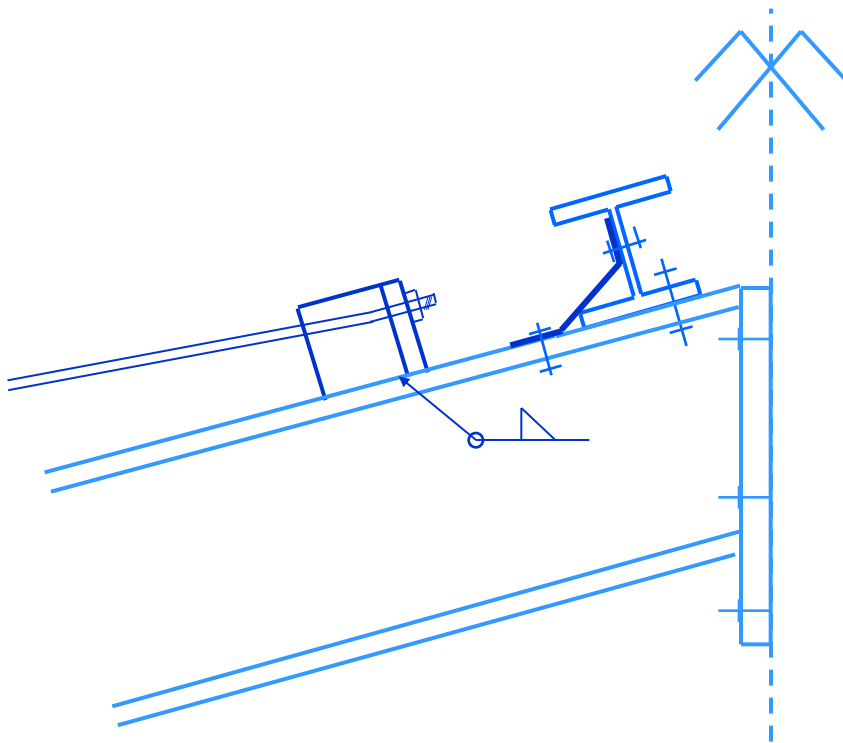
cornières



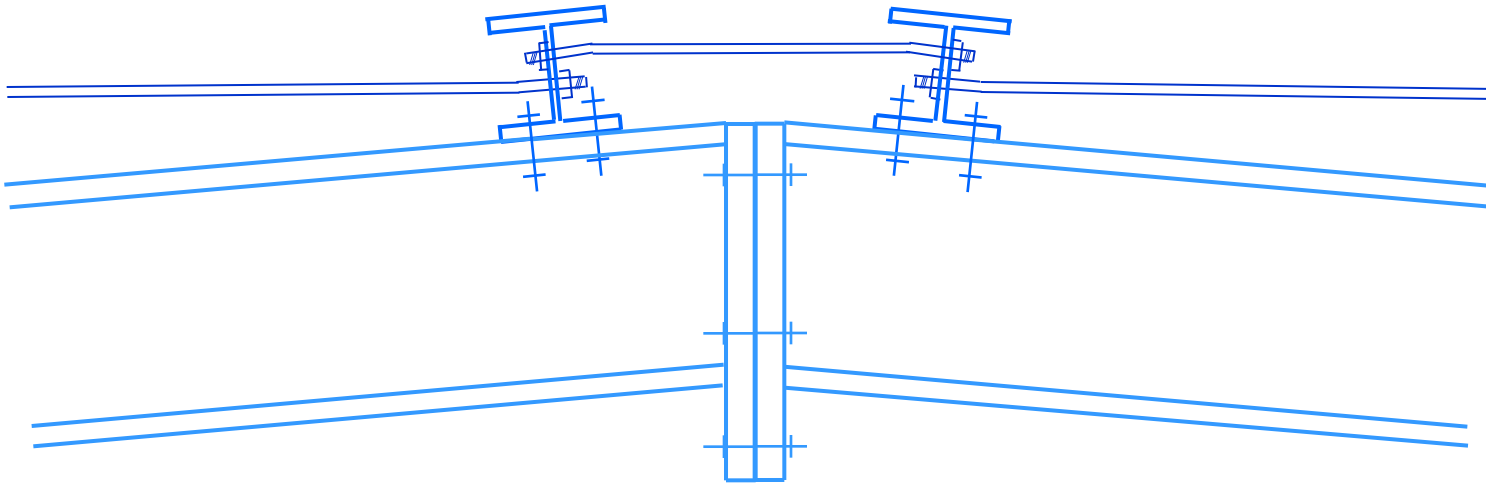
plats(peu utilisés)



## ➤ Liernes – Détail panne faîtière



## ➤ Liernes – Détail panne faîtière



# CONCEPTION ET DÉTAILS CONSTRUCTIFS

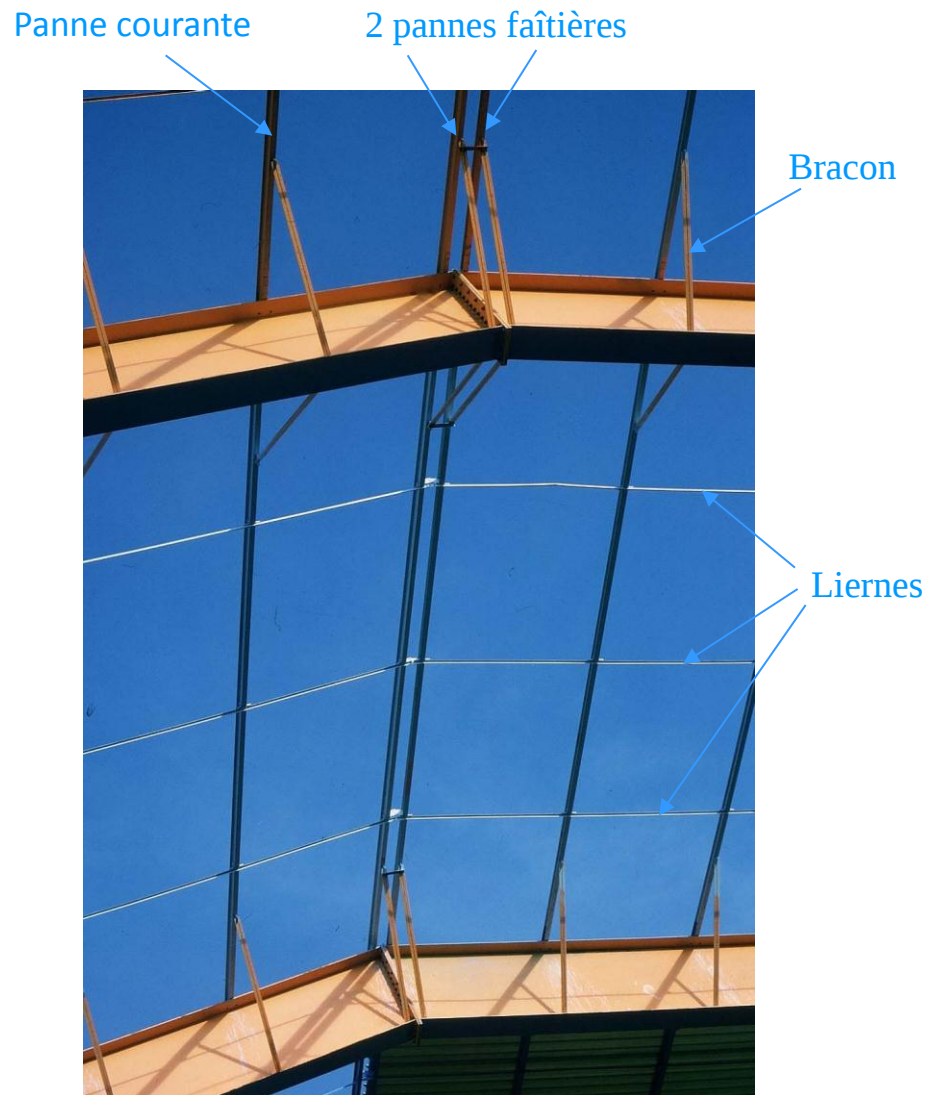


Photo APK

# CALCUL

## ACTIONS ET SOLLICITATIONS



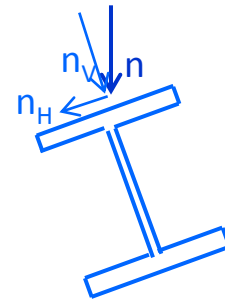
Programme d'éducation  
et de formation  
tout au long de la vie

# CALCUL – ACTIONS ET SOLLICITATIONS

## ➤ 3 types d'actions variables

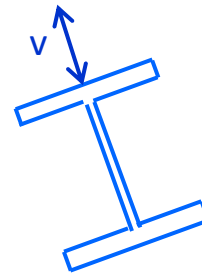
- ✓ Charges de neige

  - EN 1991-1-3



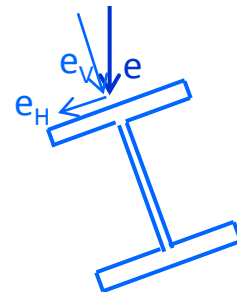
- ✓ Charges de vent

  - EN 1991-1-4



- ✓ Charges d'entretien

  - EN 1991-1-1



## ➤ Charges d'exploitation sur toiture

### ✓ Classification des toitures

EN 1991-1-1 § 6.3.4

| Catégorie | Usage spécifique                                                                                |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| H         | Toitures inaccessibles sauf pour entretien et réparations courants                              |
| I         | Toitures accessibles pour les usages des catégories A à D (Habitation, bureaux, commerces... ). |
| K         | Toitures accessibles pour les usages particuliers, hélisations, par exemple.                    |

## ➤ Charges d'exploitation pour la catégorie H

| Toiture                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | $q_k$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $Q_k$<br>[kN] |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------|
| Catégorie H                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $q_k$                         | $Q_k$         |
| <p>NOTE 1 Pour la catégorie H, <math>q_k</math> peut être choisi dans une fourchette 0,00 kN/m<sup>2</sup> à 1,0 kN/m<sup>2</sup> et <math>Q_k</math> dans une fourchette 0,9 kN et 1,5kN.<br/>Les valeurs recommandées sont:</p> $q_k = 0,4 \text{ kN/m}^2, Q_k = 1,0 \text{ kN}$ <p>....</p> <p>NOTE 3 On admet que <math>q_k</math> agit sur une aire A, qui peut être fixée par l'Annexe Nationale. La valeur recommandée pour A est de 10 m<sup>2</sup>, la fourchette allant de zéro à l'aire totale de la toiture.</p> <p>NOTE 4 Sur les toitures (en particulier de la catégorie H), il n'est pas nécessaire d'appliquer les charges d'exploitation combinées aux charges dues à la neige et/ou au vent.</p> |                               |               |

## ➤ Charges d'exploitation pour la catégorie H

- ✓ Ces valeurs (*du tableau précédent*) ne tiennent pas compte de l'accumulation incontrôlée de matériaux de construction susceptibles de se produire lors de la maintenance. [EN 1991-1-1 § 6.3.4.2 \(2\)](#)
- ✓ Pour les toitures, des vérifications distinctes doivent être effectuées pour la charge concentrée  $Q_k$  et pour la charge uniformément répartie  $q_k$ , agissant indépendamment l'une de l'autre. [EN 1991-1-1 § 6.3.4.2 \(3\)P](#)
- ✓ Il convient de calculer les toitures autres que celles à simple paroi réalisées par des plaques profilées de manière à ce qu'elles résistent à une charge de 1,5 kN sur une surface carrée de 50 mm de côté. [EN 1991-1-1 § 6.3.4.2 \(4\)](#)

## ➤ Charges d'exploitation pour la catégorie H selon AN

| Type de toiture                                           | $q_k$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $Q_k$<br>[kN] |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------|
| Toiture de pente inférieure à 15% recevant une étanchéité | 0,8                           | 1,5           |
| Autres toitures                                           | 0                             | 1,5           |

La charge répartie  $q_k$  couvre une aire de 10m<sup>2</sup>, dont la forme et la localisation sont à choisir de la façon la plus défavorable pour la vérification à effectuer (sans toutefois que le rapport entre longueur et largeur dépasse la valeur de 2).

Ces charges d'exploitation ne valent que pour la justification des éléments au regard de leur rôle comme éléments structuraux de la toiture.

Ces charges d'exploitation tiennent compte du matériel spécifique d'exploitation, ainsi que des effets dynamiques.

La charge répartie et la charge ponctuelle ne sont pas à appliquer simultanément.

Ces charges d'exploitation ne sont pas prises en compte simultanément avec les charges de neige ou les actions du vent.

- Sollicitation agissant dans les pannes
  - ✓ Transmission des charges verticales aux traverses
    - Moment fléchissant dans le plan et effort tranchant
    - Moment fléchissant hors plan et effort tranchant
    - Moment de torsion (généralement négligeable)
  - ✓ Transmission des charges horizontales aux poutres au vent
    - Effort normal dans toute la file de pannes

# CALCUL

## RÉSISTANCE DE SECTION

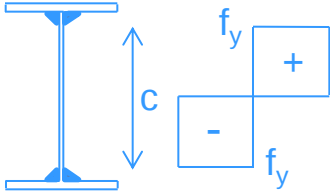
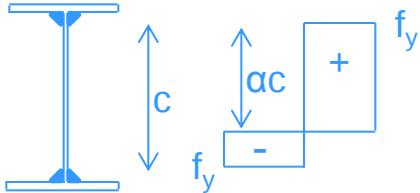


# CALCUL – RÉSISTANCE DE SECTION

## ➤ Classification de la section

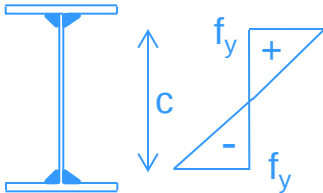
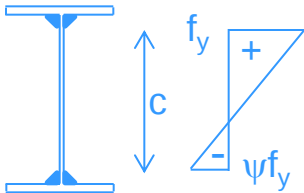
### ✓ Parois comprimées internes

EN 1993-1-1 § 5.6

| Classe | Paroi fléchie                                                                     | Paroi comprimée et fléchie                                                          |                                          |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
|        |  |  |                                          |
| 1      | $c/t \leq 72\varepsilon$                                                          | $\alpha > 0,5$                                                                      | $\alpha \leq 0,5$                        |
|        |                                                                                   | $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$                                      | $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$  |
| 2      | $c/t \leq 83\varepsilon$                                                          | $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$                                      | $c/t \leq \frac{415\varepsilon}{\alpha}$ |

# CALCUL – RÉSISTANCE DE SECTION

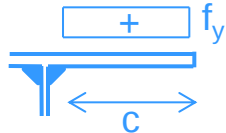
- Classification de la section
  - ✓ Parois comprimées internes

| Classe                         | Paroi fléchie                                                                     | Paroi comprimée et fléchie                                                          |                                              |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                                |  |  |                                              |
| 3                              | $c/t \leq 124\varepsilon$                                                         | $\psi > -1$                                                                         | $\psi \leq -1$                               |
|                                |                                                                                   | $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$                                    | $c/t \leq 62\varepsilon(1-\psi)\sqrt{-\psi}$ |
| $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ |                                                                                   |                                                                                     |                                              |

## ➤ Classification de la section

### ✓ Semelles en console

EN 1993-1-1 § 5.6

| Classe | Paroi comprimée                                                                   |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|        |  |
| 1      | $c/t \leq 9\varepsilon$                                                           |
| 2      | $c/t \leq 10\varepsilon$                                                          |
| 3      | $c/t \leq 14\varepsilon$                                                          |

→ Semelle de profilé laminé  
généralement classe 1, 2

# CALCUL – RÉSISTANCE DE SECTION

## ➤ Résistance de section – Moment fléchissant dans le plan

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0$$

EN 1993-1-1 § 6.2.5

| Classe 1 et 2                               | Classe 3                                    | Classe 4                                     |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| $M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$ | $M_{c,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}}$ | $M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} f_y}{\gamma_{M0}}$ |

- ✓ Les trous de fixation dans les semelles tendues peuvent être ignorés sous réserve que :

$$\frac{A_{f,net} 0,9 f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}}$$

## ➤ Résistance de section – Moment fléchissant dans le plan

- ✓ Les trous de fixation dans la zone tendue de l'âme peuvent être ignorés sous réserve que :

$$\frac{A_{\text{zone,net}} 0,9f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_{\text{zone}} f_y}{\gamma_{M0}}$$

- ✓ Excepté dans le cas des trous oblongs et surdimensionnés, les trous de fixation dans la zone tendue de l'âme peuvent être ignorés sous réserve qu'ils soient remplis par les fixations.

## ➤ Résistance de section – Cisaillement

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0$$

EN 1993-1-1 § 6.2.6 (1)

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_V (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$$

|                                                                              |                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $A_V$ pour les sections laminées en I et H,<br>charge parallèle à l'âme      | $A_V = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f \geq \eta h_w t_w$ |
| $A_V$ pour les sections laminées en I et H,<br>charge parallèle aux semelles | $A_V = A - h_w t_w$                                 |

Nuance d'acier  $\leq$  S460  $\rightarrow \eta = 1,2$

Nuance d'acier  $>$  S460  $\rightarrow \eta = 1,0$

## ➤ Résistance de section – Voilement par cisaillement

✓ Vérification selon EN 1993-1-5 si:

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \frac{\varepsilon}{\eta}$$

EN 1993-1-1 § 6.2.6 (6)

→ Cette vérification est toujours satisfaite pour les pannes en profilés laminés à chaud

## ➤ Résistance de section – Flexion et cisaillement

✓ Vérification si:  $V_{Ed} > 0,5V_{c,Rd}$  EN 1993-1-1 § 6.2.8 (1)

✓ Réduction de la limite d'élasticité prise en compte pour le calcul du moment résistant :

$$f_{y,\text{réduit}} = (1 - \rho)f_y$$

✓ ou : pour les poutres en I ou H à ailes égales fléchies selon l'axe fort:

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left[ W_{pl,y} - \frac{\rho A_w^2}{4t_w} \right] f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{mais} \quad M_{y,V,Rd} \leq M_{y,c,Rd}$$

## ➤ Résistance de section – Flexion et cisaillement

✓ Coefficient de réduction  $\rho$ :

EN 1993-1-1 § 6.2.8 (3)

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

## ➤ Résistance de section – Flexion et effort normal – Classe 1 et 2

- ✓ Pour les sections en I/H bi-symétriques, pas de réduction pour le moment résistant par rapport à l'axe fort si :

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd} \quad \text{et} \quad N_{Ed} \leq \frac{0,5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}$$

- ✓ Pour les sections en I/H bi-symétriques, pas de réduction pour le moment résistant par rapport à l'axe faible si :

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}$$

EN 1993-1-1 § 6.2.9.1 (4)

# CALCUL – RÉSISTANCE DE SECTION

## ➤ Résistance de section – Flexion et effort normal – Classe 1 et 2

|                                                                        |              |                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Moment résistant selon l'axe fort                                      | $n \leq a/2$ | $M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd}$                                                     |
|                                                                        | $n > a/2$    | $M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} (1-n)/(1-0,5a)$                                      |
| Moment résistant selon l'axe faible                                    | $n \leq a$   | $M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd}$                                                     |
|                                                                        | $n > a$      | $M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \left[ 1 - \left( \frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right]$ |
| $n = N_{Ed,Rd} / N_{pl,Rd}$ et $a = (A - 2bt_f) / A$ mais $a \leq 0,5$ |              |                                                                                |

## ➤ Résistance de section – Flexion et effort normal – Classe 1 et 2

✓ Flexion bi-axiale:

$$\left( \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right)^{\alpha} + \left( \frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right)^{\beta} \leq 1 \quad \text{EN 1993-1-1 § 6.2.9.1 (5)}$$

✓ Pour les sections en I/H

$$\alpha = 2 \quad \text{et} \quad \beta = 5n \quad \text{mais} \quad \beta \geq 1$$

- Résistance de section – Flexion et effort normal – Classe 3

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{EN 1993-1-1 § 6.2.9.2}$$

- Résistance de section – Flexion et effort normal – Classe 4

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1$$

EN 1993-1-1 § 6.2.9.3

## ➤ Résistance de section – Flexion, cisaillement et effort normal

- ✓ Résistance comme pour l'interaction flexion – effort normal si :

$$V_{Ed} \leq 0,5V_{c,Rd} \quad \text{EN 1993-1-1 § 6.2.10 (2)}$$

- ✓ Sinon utiliser pour l'aire de cisaillement une limite d'élasticité réduite :

$$(1-\rho)f_y$$

# CALCUL

## CRITÈRE DE STABILITÉ POUR LES PANNES NON MAINTENUES



## ➤ Barres uniformes fléchies

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$$

EN 1993-1-1 § 6.3.2.1

✓ Moment résistant de calcul :

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

✓ Coefficient de réduction :

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

EN 1993-1-1 § 6.3.2.2

# CALCUL – CRITÈRE DE STABILITÉ

## ➤ Facteur d'imperfection

| Courbe de déversement                | a    | b    | c    | d    |
|--------------------------------------|------|------|------|------|
| Facteur d'imperfection $\alpha_{LT}$ | 0,21 | 0,34 | 0,49 | 0,76 |

## ➤ Courbe de déversement

| Sections transversales | Limites      | Courbe de déversement |
|------------------------|--------------|-----------------------|
| Sections en I laminées | $h/b \leq 2$ | a                     |
|                        | $h/b > 2$    | b                     |
| Sections en I soudées  | $h/b \leq 2$ | c                     |
|                        | $h/b > 2$    | d                     |
| Autres sections        | -            | d                     |

- Barres fléchies et comprimées **non maintenues** EN 1993-1-1 § 6.3.3

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1$$

- ✓  $\Delta M_{y,Ed}$  et  $\Delta M_{z,Ed}$  : Moments provoqués par le décalage de l'axe neutre pour les sections de classe 4
- ✓  $k_{yy}, k_{zz}, k_{yz}, k_{zy}$  : Coefficients d'interaction selon l'Annexe A ou B de l'EN 1993-1-1

- Coefficients de réduction pour le flambement [EN 1993-1-1 § 6.3.1.2](#)

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \phi = 0,5 \left[ 1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

✓ Facteur d'imperfection

| Courbe de flambement     | a <sub>0</sub> | a    | b    | c    | d    |
|--------------------------|----------------|------|------|------|------|
| Facteur d'imperfection α | 0,13           | 0,21 | 0,34 | 0,49 | 0,76 |

# CALCUL – CRITÈRE DE STABILITÉ

✓ Courbe de flambement

| Sections transversales | Limites        |                                         | Flambement selon l'axe | Courbe de déversement |                |
|------------------------|----------------|-----------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|
|                        |                |                                         |                        | Autres                | S 460          |
| Sections en I laminées | $h/b > 1,2$    | $t_f \leq 40\text{mm}$                  | y – y<br>z – z         | a<br>b                | $a_0$<br>$a_0$ |
|                        |                | $40\text{ mm} < t_f \leq 100\text{ mm}$ | y – y<br>z – z         | b<br>c                | a<br>a         |
|                        | $h/b \leq 1,2$ | $t_f \leq 100\text{mm}$                 | y – y<br>z – z         | b<br>c                | a<br>a         |
|                        |                | $t_f > 100\text{ mm}$                   | y – y<br>z – z         | d<br>d                | c<br>c         |

- ✓ Elancement réduit

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{cr}}}$$

- ✓ Effort normal critique autour de l'axe y

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_{cr,y}} \quad \rightarrow L_{cr,y} \text{ est la distance entre 2 traverses}$$

- ✓ Effort normal critique autour de l'axe z

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr,z}} \quad \rightarrow L_{cr,z} \text{ est la distance entre 2 traverses ou traverse et lierne}$$

# CALCUL

## CRITÈRE DE STABILITÉ POUR LES PANNES (PARTIELLEMENT) MAINTENUES



# CALCUL – RÉSISTANCE AU DÉVERSEMENT

- Barres fléchies et comprimées (**partiellement**) maintenues

$$\frac{\chi_{op} \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} \geq 1,0$$

EN 1993-1-1 § 6.3.4

- ✓  $\alpha_{ult,k}$  : est le facteur d'amplification à appliquer aux charges de calcul pour atteindre la résistance caractéristique de la section transversale sans considération de l'instabilité hors plan, mais tenant compte de l'instabilité dans le plan
- ✓  $\chi_{op}$  : est le coefficient de réduction calculé pour l'élanement réduit  $\bar{\lambda}_{op}$
- **Attention : Cette méthode n'est pas applicable pour la flexion déviée. Il convient alors de s'assurer que l'élément stabilisant est capable de reprendre les charges agissant dans son plan.**

✓ Calcul de  $\bar{\lambda}_{op}$

$$\bar{\lambda}_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}}$$

- $\alpha_{cr,op}$  : est le facteur d'amplification à appliquer aux charges de calcul agissant dans le plan pour atteindre la charge critique élastique au flambement latéral ou au déversement sans tenir compte du flambement par flexion dans le plan

# CALCUL – RÉSISTANCE AU DÉVERSEMENT

- ✓ Proposition pour le calcul de  $\alpha_{ult,k}$

$$\alpha_{ult,k} = \frac{1}{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}}}$$

- $N_{Rk}, M_{y,Rk}$  : résistances caractéristiques **élastiques** de section
- $\chi_y$  : coefficient de réduction de flambement par flexion dans le plan
- $k_{yy}$  : 
$$k_{yy} = \frac{C_{my,0}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$
- $C_{my,0}$  : coefficient de moment uniforme équivalent

EN 1993-1-1 Annexe A

# CALCUL – RÉSISTANCE AU DÉVERSEMENT

- ✓ Proposition pour le calcul de  $\alpha_{cr,op}$ 
  - Calcul à l'aide d'un logiciel approprié
  - Ou : par interaction linéaire entre flambement hors plan et déversement

$$\alpha_{cr,op} = \frac{1}{\frac{1}{\text{Min}(\alpha_{cr,z}, \alpha_{cr,T})} + \frac{1}{\alpha_{cr,LT}}}$$

$$\alpha_{cr,z} = \frac{N_{cr,z}}{N_{Ed}}$$

$$\alpha_{cr,T} = \frac{N_{cr,T}}{N_{Ed}}$$

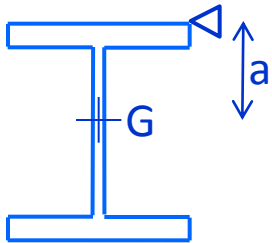
$$\alpha_{cr,LT} = \frac{M_{cr}}{M_{Ed}}$$

# CALCUL – RÉSISTANCE AU DÉVERSEMENT

- ✓ Effort normal critique pour le flambement par torsion

$$N_{crT} = \frac{1}{i_s^2} \left( \frac{\pi^2 E I_z a^2}{L^2} + \frac{\pi^2 E I_w}{L^2} + G I_t \right) \quad \text{EN 1993-1-1 Annexe BB.3.3}$$

$$i_s^2 = i_y^2 + i_z^2 + a^2$$



→ a : est la distance entre le centre de gravité de la panne et le maintien latéral continu

→ un bac de couverture suffisamment rigide peut constituer un maintien latéral

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

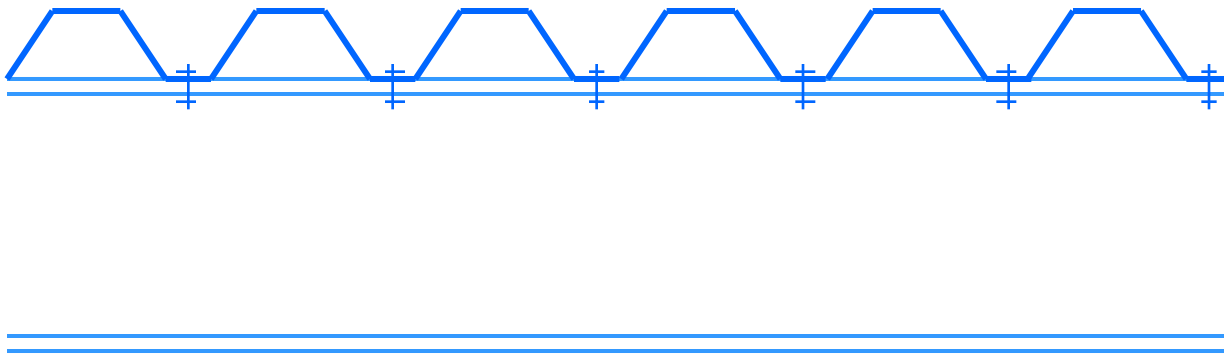


Programme d'éducation  
et de formation  
tout au long de la vie

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

## ➤ Type de couverture concerné

- ✓ Tôle trapézoïdale/bac conforme à l'EN 1993-1-3



## ➤ Classes de construction

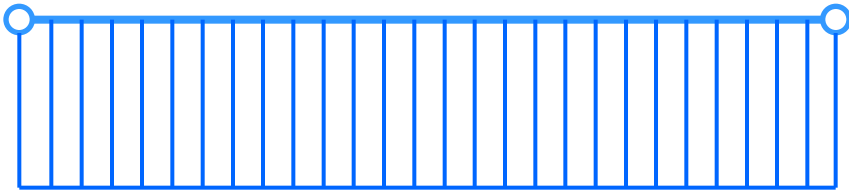
EN 1993-1-3 §2 (6)

- ✓ Classe de construction I : construction dans laquelle des profilés et plaques formés à froid sont calculés pour contribuer à la résistance et la stabilité globales d'une structure.
- ✓ Classe de construction II : construction dans laquelle des profilés et plaques formés à froid sont calculés pour contribuer à la résistance et la stabilité d'éléments structuraux individuels.
- ✓ Classe de construction III : construction dans laquelle les plaques formées à froid sont utilisées comme éléments assurant uniquement un transfert de charges à la structure.

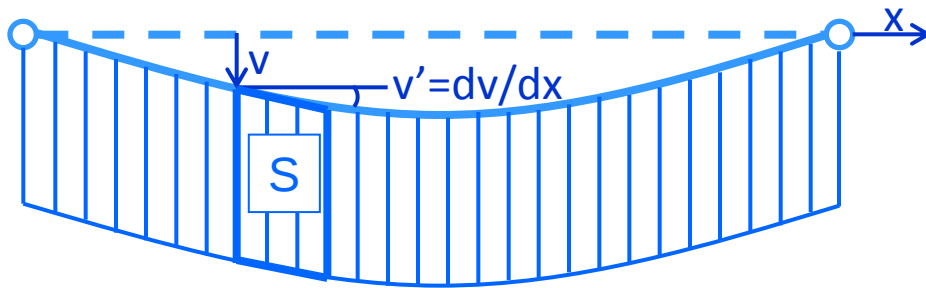
# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

## ➤ Effet 1

- ✓ Le bac s'oppose à la rotation de la panne dans le plan de la toiture



Panne et bac – état non déformé



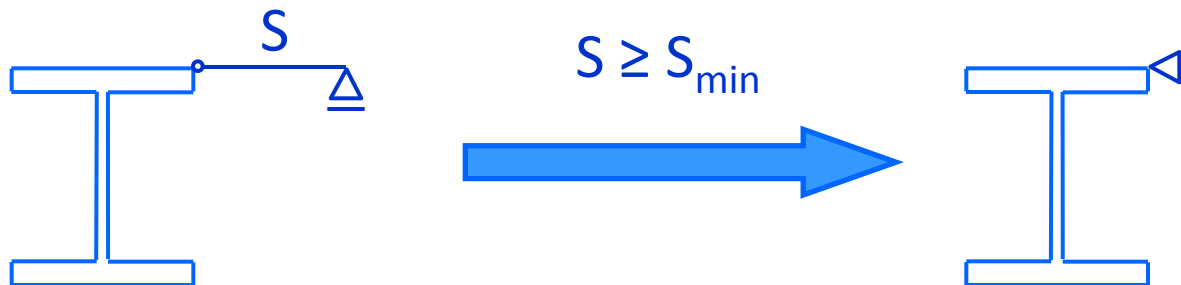
Panne et bac – état déformé

→ le bac s'oppose à la rotation  $v'$  par sa rigidité  $S$

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

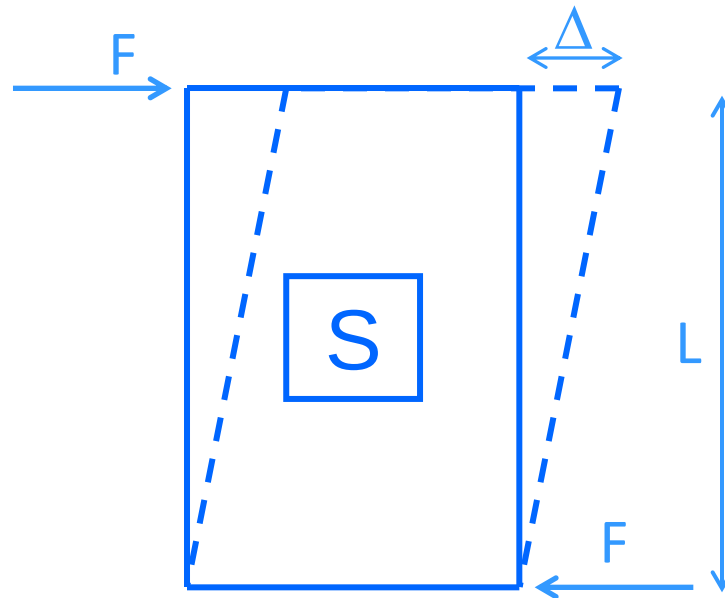
- Conséquence pour la vérification de la panne
  - ✓ Calcul de la panne avec un maintien latéral, si la valeur limite de  $S$  est respectée

$$S \geq \left( EI_w \frac{\pi^2}{L^2} + GI_t + EI_z \frac{\pi^2}{L^2} 0,25h^2 \right) \frac{70}{h^2} = S_{\text{lim}} \quad \text{EN 1993-1-1 BB.2.1}$$



# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

- Rigidité en cisaillement S



$$S = F \frac{\Delta}{L}$$

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

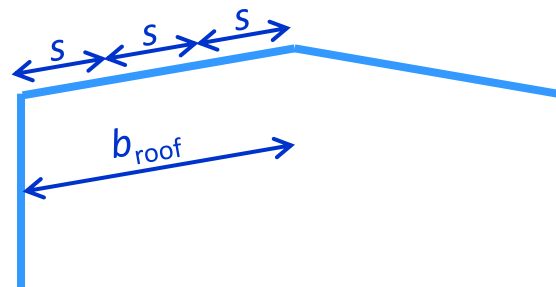
- Calcul de la rigidité en cisaillement  $S$  d'un bac acier

$$S = 1000 \sqrt{t^3} \left( 50 + 10 \sqrt[3]{b_{\text{roof}}} \right) \frac{S}{h_w} \quad \text{EN 1993-1-3 10.11 (10)}$$

- ✓  $S$  : la rigidité en cisaillement en N.mm/mm
- ✓  $t$  : épaisseur de la tôle en mm
- ✓  $s$  : distance entre pannes en mm
- ✓  $h_w$  : hauteur d'une nervure de la tôle en mm
- ✓  $b_{\text{roof}}$  : largeur de la toiture/d'un versant en mm

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

- Calcul de la résistance au cisaillement  $S$  d'un bac acier



# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

- Domaine d'application de l'expression

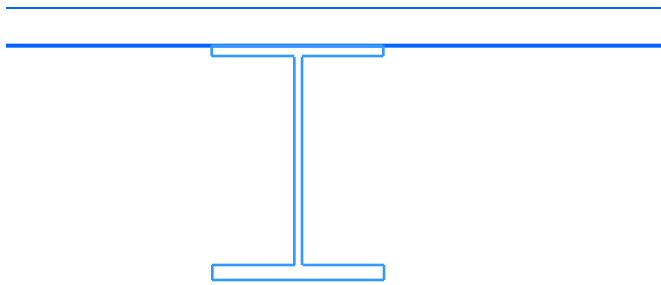
$$S = 1000 \sqrt{t^3} \left( 50 + 10 \sqrt[3]{b_{\text{roof}}} \right) \frac{S}{h_w}$$

- ✓ Fixation du bac à la panne au droit de chaque nervure
- ✓ Attache de couture au droit de chaque recouvrement transversal
- ✓ Sinon : Recommandations de la CECM N°88

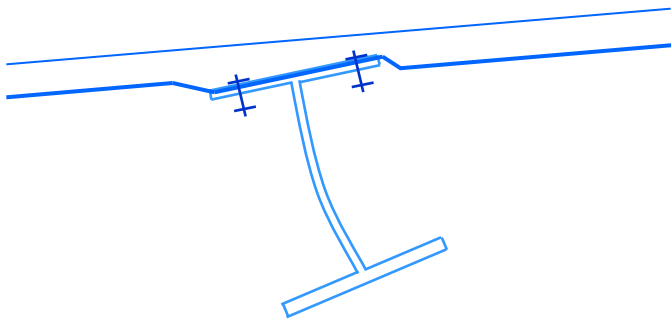
# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

## ➤ Effet 2

- ✓ Le bac s'oppose à la rotation de torsion de la panne



Panne et bac – état non déformé



Panne et bac – état déformé

→ bac et fixations s'opposent à la rotation de torsion de la panne

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

- Conséquence pour la vérification de la panne
  - ✓ Panne maintenue en torsion si la valeur limite de  $C_{\theta,k}$  est respectée

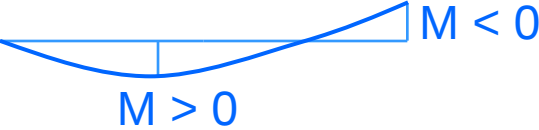
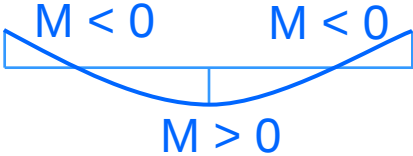
$$C_{\theta,k} \geq \frac{M_{pl,k}^2}{EI_z} K_{\theta} K_v$$

EN 1993-1-1 BB.2.2

- ✓  $K_v$  : 0,35 pour une analyse élastique
- ✓  $K_v$  : 1,00 pour une analyse plastique
- ✓  $K_{\theta}$  : valeur en fonction de la distribution du moment

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

✓ Valeur de  $K_{\theta}$

| Cas | Distribution du moment                                                                                           | sans maintien transversal | avec maintien transversal |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1   | <br>$M > 0$                     | 4,0                       | 0                         |
| 2a  | <br>$M > 0$ $M < 0$             | 3,5                       | 0,12                      |
| 2b  | <br>$M < 0$ $M < 0$<br>$M > 0$ |                           | 0,23                      |
| 3   | <br>$M > 0$                   | 2,8                       | 0                         |

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

## ➤ Calcul de $C_{\theta,k}$

- ✓ Panne maintenue en torsion si la valeur limite de  $C_{\theta,k}$  est respectée

$$\frac{1}{C_{\theta,k}} = \frac{1}{C_{\theta R,k}} + \frac{1}{C_{\theta C,k}} + \frac{1}{C_{\theta D,k}}$$

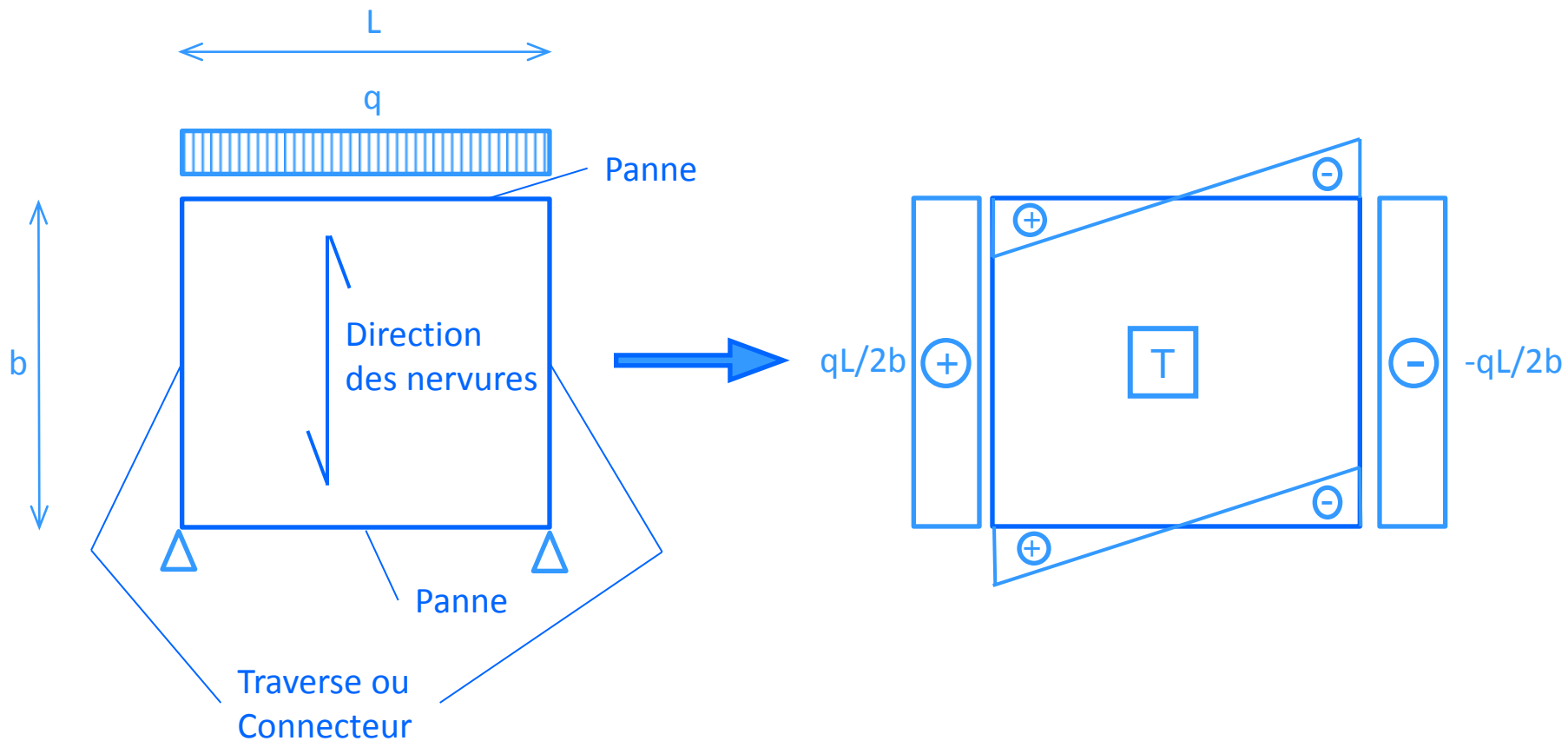
EN 1993-1-1 BB.2.2

- ✓  $C_{\theta,Rk}$  : rigidité en rotation procurée à la poutre par l'élément stabilisant en supposant une fixation rigide
- ✓  $C_{\theta,Ck}$  : rigidité en rotation de la fixation entre poutre et élément stabilisant
- ✓  $C_{\theta,Dk}$  : rigidité en distorsion de la poutre → pour les profilés laminés  $C_{\theta D,k} = \infty$

- Valeur de  $C_{\theta,Rk}$  et  $C_{\theta,Ck}$ 
  - ✓ Comportement mécanique de la tôle et des fixations complexe
    - Valeurs calculées sur la base d'essais
    - Formules empiriques simplifiées données dans l'EN 1993-1-3 § 10.1.5.2
    - Facteurs d'influence :
      - Epaisseur de la tôle
      - Largeur de la nervure
      - Largeur de la semelle du profilé
      - Charge
      - Type de fixation

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

- Vérification au cisaillement du bac dans son plan
  - ✓ Hypothèse sur la répartition du cisaillement dans le bac



# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

- Vérification au cisaillement du bac dans son plan
    - ✓ Critère de vérification selon : Recommandations de la CECM N°88
      - Vérification au cisaillement des attaches de couture entre panneaux de bac
      - Vérification au cisaillement des fixations entre bac et support
      - Vérification à la ruine de l'extrémité du bac
      - Vérification au voilement du bac
- Modes de ruine non admissibles (non ductiles)

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

- ✓ Résistance au cisaillement des attaches de couture entre bacs

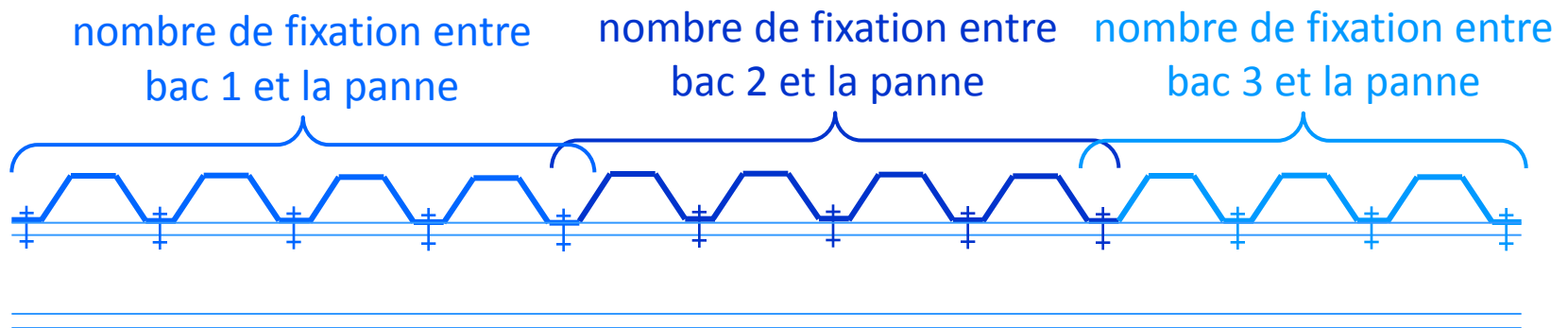
$$P_{\max} = \frac{1}{n} \left[ n_s F_s + \frac{\beta_1}{\beta_3} (n+1) F_p \right] \geq V_{\max}$$

- $V_{\max}$  : est l'effort maximal de cisaillement
- $n$  : est le nombre de pannes - 1
- $n_s$  : est le nombre d'attaches de couture sans compter les fixations sur les pannes
- $F_s$  : est la résistance d'une attache de couture
- $\beta_1$  : est un coefficient tenant compte du nombre de fixations entre **1** bac et la panne
- $\beta_3$  : est un coefficient qui tient compte de la disposition de la fixation entre le bac et la panne
- $F_p$  : est la résistance d'une fixation entre le bac et la panne

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

- ✓ Résistance au cisaillement des attaches de couture entre bacs

→  $\beta_1$



# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

✓ Résistance au cisaillement des attaches de couture entre bacs

→  $\beta_1$

| Nombre de fixations entre 1 bac et la panne | Fixations dans les creux d'onde | Fixations aux sommets d'onde |
|---------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 2                                           | 0,13                            | 1,00                         |
| 3                                           | 0,30                            | 1,00                         |
| 4                                           | 0,44                            | 1,04                         |
| 5                                           | 0,58                            | 1,13                         |
| 6                                           | 0,71                            | 1,22                         |
| 7                                           | 0,84                            | 1,33                         |
| 8                                           | 0,97                            | 1,45                         |

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

- ✓ Résistance au cisaillement des attaches de couture entre bacs

→  $\beta_3$

Si fixation dans les creux d'onde :

$$\beta_3 = 10$$

Si fixation aux sommets d'onde :

$$\beta_3 = \frac{(n_f - 1)}{n_f}$$

- $n_f$  : est le nombre de fixations entre **1** bac et la panne

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

## ➤ Modes de ruine non admissibles (non ductiles)

- ✓ Ruine par cisaillement des fixations entre bac et panne
- ✓ Ruine de l'extrémité du bac
- ✓ Ruine par voilement du bac

→ Vérification :

Résistance aux modes  
de ruine non admissibles

>

Résistance au cisaillement  
des attaches de couture  $P_{\max}$

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

- ✓ Résistance des fixations entre bac et panne tenant compte de l'effet de levier

$$\frac{w}{\alpha_3 p} 0,6 F_p \geq P_{\max}$$

- $w$  : est la distance entre pannes
- $\alpha_3$  : est un coefficient tenant compte de pannes intermédiaires
- $p$  : distance entre fixations
- $F_p$  : est la résistance d'une fixation entre pannes et bac

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

✓ Résistance des fixations entre bac et panne

→  $\alpha_3$

| Nombre de pannes dans la profondeur du diaphragme | $\alpha_3$ |
|---------------------------------------------------|------------|
| 2                                                 | 1,00       |
| 3                                                 | 1,00       |
| 4                                                 | 0,90       |
| 5                                                 | 0,80       |
| 6                                                 | 0,71       |
| 7                                                 | 0,64       |
| 8                                                 | 0,58       |

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

- ✓ Résistance à la ruine de l'extrémité du bac

$$k \left( \frac{t^{1,5} w \cdot f_y}{d^{0,5}} \right) \geq P_{\max}$$

- $t$  : est l'épaisseur du bac
- $w$  : est la distance entre pannes
- $f_y$  : est la limite d'élasticité de l'acier du bac
- $d$  : est la distance entre ondes
- $k$  : est 0,9 pour les fixations dans chaque onde  
est 0,3 pour les fixations tous les deux ondes

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

✓ Résistance au voilement du bac

→ En général : prise en compte du voilement local et du voilement global

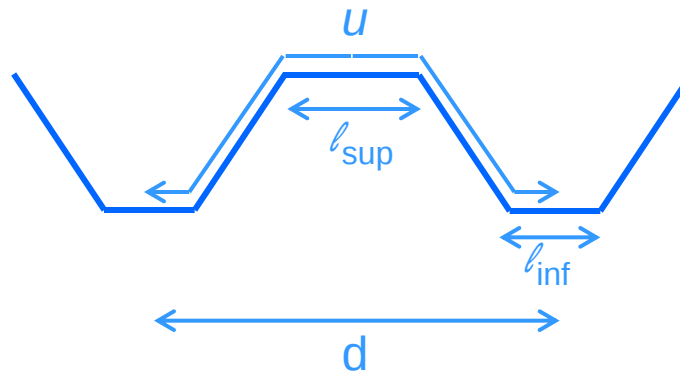
→ Voilement local négligeable si :

$$\frac{\ell}{t} \leq 2,9 \left( \frac{E}{f_y} \right)^{0,5}$$

- $\ell$  : est la largeur de la petite semelle du bac
- $t$  : est l'épaisseur du bac
- $E$  : est le module de Young du matériau du bac
- $f_y$  : est la limite d'élasticité du matériau du bac

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

- ✓ Résistance au voilement du bac



$$\ell = b_k = \text{Min}(\ell_{sup}, \ell_{inf})$$

# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

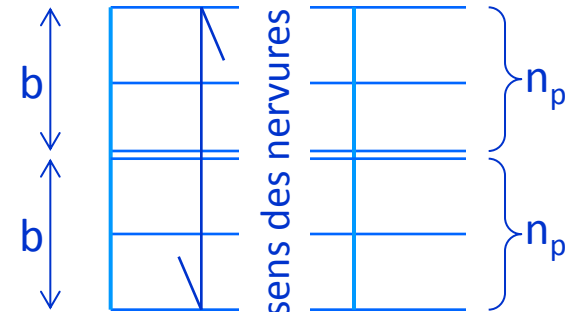
✓ Résistance au voilement global du bac

$$V_g = \frac{14,4}{b} D_x^{0,25} D_y^{0,75} (n_p - 1)^2 \geq P_{\max}$$

- $b$  : est la profondeur du diaphragme
- $n_p$  : est le nombre total de pannes

- $D_x = \frac{E.t^3d}{12(1-\nu)u}$

- $D_y = \frac{E.I_y}{d}$



# STABILISATION DE LA PANNE PAR LA COUVERTURE

- ✓ Résistance voilement local par cisaillement du bac

→ Semelle sans raidisseur

$$V_{\ell} = 4,83E \left( \frac{t}{\ell} \right)^2 b.t$$



→ Semelle avec raidisseur

$$V_{\ell} = \frac{36b}{b_k^2} D_x^{0,25} D_y^{0,75}$$



$$D_y = \frac{E.t^3}{10,92}$$

$$D_x = \frac{EI_F}{b_k}$$

$I_F$  : est l'inertie de la semelle  
à vérifier du bac

✓ Interaction voilement global et voilement local

$$V_{\text{red}} = \frac{V_g V_\ell}{V_g + V_\ell} \geq P_{\text{max}}$$

# CONCLUSION



Programme d'éducation  
et de formation  
tout au long de la vie

# CONCLUSION

- Les pannes sont généralement sollicitées en flexion déviée et par un effort normal.
- Les critères dimensionnant pour les pannes sont habituellement la flèche et le déversement.
- La prise en compte des effets stabilisants procurés à une panne par la couverture peut augmenter fortement la résistance au déversement.
- Si la couverture est prise en compte dans le calcul des pannes, il convient de prendre en compte les charges de stabilisation dans la vérification de la couverture.



# Programme d'éducation et de formation tout au long de la vie

Les modules de formation SKILLS ont été développés par un consortium d'organisations dont les logos apparaissent au bas de cette diapositive. Le matériel est placé sous une licence créative commune



Le projet a été financé avec le support de la Commission Européenne. Ce module reflète seulement l'opinion de ses auteurs et la Commission ne peut être tenue responsable pour toute utilisation qui peut être faite des informations qu'il contient.

