

## CALCUL DES CONTRAINTES DANS UN ÉLÉMENT SOU MIS À DE LA TORSION

par S. Baraka et A. Bureau

1

Le calcul des contraintes dues à la torsion constitue pour le projeteur, un problème souvent complexe. Des notes techniques sur le calcul des caractéristiques torsionnelles, parfois avec des programmes de calcul, ont déjà été publiées dans la revue Construction Métallique [1], [2], [3] et [4]. Il semble qu'il y ait encore des difficultés à évaluer les contraintes, même dans des cas relativement simples. C'est ce qu'on tente de faire ici à travers un exemple de poutre en console, sur une section à profil ouvert et sur une section à profil fermé.

On se place délibérément dans le cadre des hypothèses et des méthodes de l'annexe G de l'Eurocode 3 [5] mais il n'est pas nécessaire de connaître ce texte pour comprendre la présente note. Les caractéristiques torsionnelles qui ne sont pas données par les tables habituelles peuvent être évaluées en supposant que les parois de la section sont suffisamment élancées pour pouvoir effectuer tous les calculs en ligne moyenne du profil. On admettra que ceci est vrai pour tous les laminés courants.

Afin de comparer les différentes contraintes trouvées, on a cumulé les contraintes de torsion qui sont l'objet de cette note, aux contraintes dues à la flexion. Pour les contraintes normales, il s'agit des contraintes habituellement calculées, notamment sur les bords extérieurs des ailes (contraintes maxi). Pour les contraintes de cisaillement, il s'agit de celles calculées « exactement » le long des parois. Le lecteur pourra par la suite, simplifier ces calculs en adoptant les seules contraintes de cisaillement moyennes qui sont prises en compte dans les calculs courants.

### Principales notations

La notation est celle de l'Eurocode 3.

- $B$  : Bimoment
- $E$  : Module d'élasticité longitudinale
- $G$  : Module d'élasticité transversale
- $I_t$  : Inertie de torsion de **St Venant**
- $I_\omega$  : Inertie sectorielle
- $M$  : Moment de flexion

---

**S. BARAKA** – Ingénieur au CTICM  
**A. BUREAU** – Ingénieur au CTICM

**CAL-ELE 1-2000**

- $S_{\omega}$  : Moment statique sectoriel  
 $T$  : Moment de torsion total  
 $T_v$  : Moment de torsion de **St Venant**  
 $T_w$  : Moment de torsion non uniforme  
 $V$  : Effort tranchant  
 $\sigma$  : Contrainte normale à la section  
 $\tau$  : Contrainte de cisaillement  
 $\omega$  : Aire sectorielle

Signes :

Les axes généraux sont ceux de l'Eurocode 3.

Les signes particuliers choisis pour les aires sectorielles, les moments statiques sectoriels et les bimoments sont donnés dans le cours de l'exposé.

2

**1. – SECTIONS OUVERTES**

L'élément étudié est une console constituée par un profil UAP 200 en acier S235, soudé sur la semelle d'un poteau. L'encastrement est supposé parfait. La vérification par rapport à l'instabilité globale ou locale n'entre pas dans le cadre de la présente note technique.

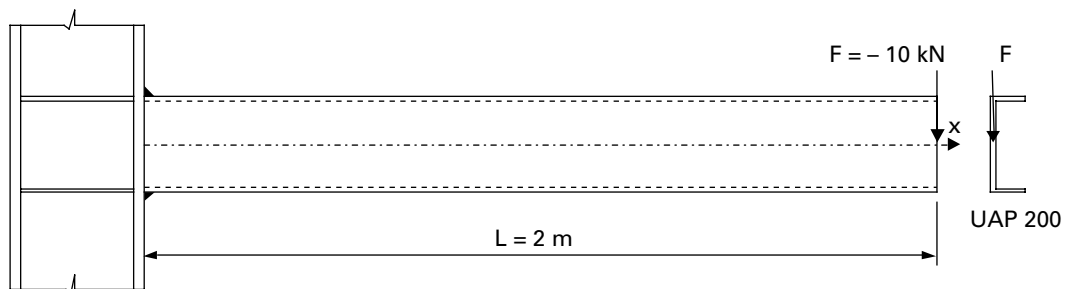


Fig. 1

Une charge ponctuelle  $F$  est appliquée à l'extrémité de la console, dans le plan moyen de l'âme. Étant donnée la position du centre de torsion, le moment de torsion induit est négatif.

**1.1. – Caractéristiques de la section**

Le catalogue de l'OTUA [6] fournit les dimensions de la section et les caractéristiques mécaniques des sections UAP.

Ces caractéristiques comprennent notamment la position du centre de gravité  $G$ , celle du centre de cisaillement  $S$  et l'inertie de torsion de **St-Venant**.

$$y_G = 18,2 \text{ mm}$$

$$y_S = 27,1 \text{ mm}$$

$$I_t = 11,24 \text{ cm}^4$$

Dans la suite, on néglige l'effet des congés de raccordement.

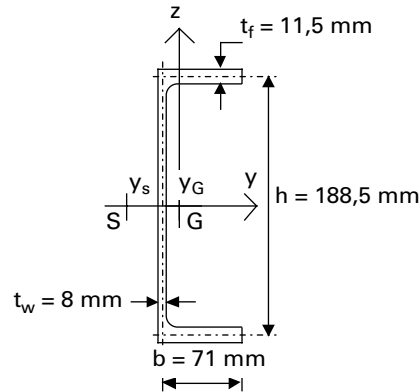


Fig. 2

3

Diagramme des aires sectorielles

Les aires sectorielles ne sont pas données en général par les tables de profilés.

Le diagramme des aires sectorielles est donné à la figure 3. Les valeurs de  $\omega_0$  et  $\omega_1$  peuvent être calculées à l'aide des expressions suivantes :

$$\omega_0 = hb(\alpha - 1)/2$$

$$\omega_1 = hb\alpha/2$$

avec :

$$\alpha = \frac{1}{2 + \frac{ht_w}{3bt_f}} = 0,382$$

On obtient ainsi :

$$\omega_0 = -4\,135 \text{ mm}^2 \quad \text{et} \quad \omega_1 = +2\,556 \text{ mm}^2$$

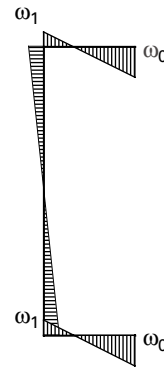


Fig. 3

**Note :** Le signe est choisi en fonction du sens du gauchissement (+ pour une extension de la fibre concernée)

Dans notre exemple, le moment de torsion peut être assimilé à deux forces produisant un couple équivalent sur la section (voir la figure 4). La flexion des ailes montre les positions des points en traction et compression. Les signes des aires sectorielles que nous avons adoptés sont dans le sens du gauchissement (déplacement suivant x). Elles impliquent que le bimoment est positif si la contrainte normale est écrite de la manière suivante :

$$\sigma_\omega = + B\omega/I_w$$

**CAL-ELE 1-2000**

Des conventions de signe différentes peuvent être trouvées dans la littérature. L'annexe G de l'Eurocode 3 ne fixe malheureusement aucune convention.

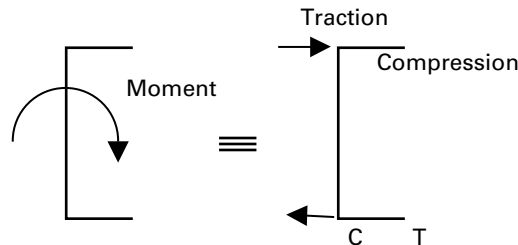


Fig. 4

Diagramme des moments statiques sectoriels

La figure 5 présente le diagramme des moments statiques sectoriels. Les expressions suivantes permettent de calculer les valeurs particulières du diagramme.

$$S_{\omega 1} = 0,25hb^2t_f(1 - 2\alpha)$$

$$S_{\omega 2} = 0,25hb^2t_f [ 1 - 2\alpha - \alpha h t_w / (2bt_f) ]$$

$$S_{\omega 3} = 0,25hb^2t_f (1 - \alpha)^2 \text{ (maxi sur semelle)}$$

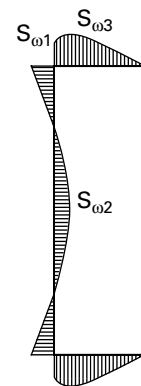


Fig. 5

On obtient :

$$S_{\omega 1} = + 0,644 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (+ 64,4 \text{ cm}^4)$$

$$S_{\omega 2} = - 0,319 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (- 31,9 \text{ cm}^4)$$

$$S_{\omega 3} = + 1,043 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (+ 104,3 \text{ cm}^4)$$

Inertie sectorielle

Elle est obtenue par l'expression :  $I_w = \frac{b^3 h^2 t_f}{12} \left( \frac{2ht_w + 3bt_f}{ht_w + 6bt_f} \right)$

D'où :  $I_w = 10396 \cdot 10^6 \text{ mm}^6 \quad (I_w = 10396 \text{ cm}^6)$

**1.2. – Calcul des efforts (analyse globale)**

La force  $F$  engendre :

- un effort tranchant constant sur la longueur de l'élément ( $V_z = - F$ ),
- un moment fléchissant ( $M_y$ ) qui varie linéairement de 0 à l'extrémité de l'élément, à  $FL$  au droit de l'encastrement,
- un moment de torsion constant sur la longueur de l'élément ( $T = Fy_S$ ).

Le moment de torsion se décompose en un moment de torsion de **St Venant** ( $T_v$ ) et un moment de torsion non uniforme ( $T_w$ ) :

$$T = T_v + T_w$$

ou encore en fonction des déplacements généralisés,

$$T(x) = G I_t \frac{d\theta}{dx} - E I_w \frac{d^3\theta}{dx^3}$$

où :  $\theta$  est l'angle de rotation par rapport à l'axe longitudinal (angle de torsion),

$x$  est l'abscisse de la section considérée, à partir de l'encastrement (où  $\theta = 0$ ).

Dans toute la suite, on pose : 
$$\lambda = \sqrt{\frac{G I_t}{E I_w}}$$

L'équation différentielle linéaire en  $\theta$  a pour solution :

$$\theta(x) = a + b \sinh(\lambda x) + c \cosh(\lambda x) + \frac{T}{G I_t} x$$

où  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont des constantes qui peuvent être calculées en écrivant les conditions aux limites suivantes :

• pour  $x = 0$   $\theta = 0 \Rightarrow a + c = 0$  (rotation nulle)

$$\theta' = 0 \Rightarrow \lambda b + \frac{T}{G I_t} = 0 \quad (\text{gauchissement nul})$$

• pour  $x = L$   $\theta'' = 0 \Rightarrow b \lambda^2 \sinh(\lambda L) + c \lambda^2 \cosh(\lambda L) = 0$  (bimoment nul à l'extrémité)

On peut exprimer les constantes :

$$b = -\frac{T}{\lambda G I_t} \quad \text{et} \quad a = -c = -\frac{T}{\lambda G I_t} \tanh(\lambda L)$$

D'où l'expression de la rotation :

$$\theta(x) = \frac{T}{\lambda G I_t} \left[ \lambda x + \frac{\sinh(\lambda(L-x))}{\cosh(\lambda L)} - \tanh(\lambda L) \right]$$

Cette relation permet de calculer, entre autres :

a) la rotation à l'extrémité de la console

pour  $x = L$ ,

$$\theta = \frac{T L}{G I_t} \left[ 1 - \frac{1}{\lambda L} \tanh(\lambda L) \right]$$

Le facteur entre crochets représente le coefficient de réduction de la rotation par rapport à la torsion uniforme.

**CAL-ELE 1-2000**

b) le moment de torsion de **St Venant**

$$T_v = G I_t \frac{d\theta}{dx} = T \left[ 1 - \frac{\cosh(\lambda(L-x))}{\cosh(\lambda L)} \right]$$

ainsi • pour  $x = 0$ ,  $T_v = 0$

• pour  $x = L$ ,  $T_v = T \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(\lambda L)} \right]$

**6**

c) le moment de torsion non uniforme

$$T_w = -E I_w \frac{d^3\theta}{dx^3} = T \left[ \frac{\cosh(\lambda(L-x))}{\cosh(\lambda L)} \right]$$

ainsi • pour  $x = 0$ ,  $T_w = T$

• pour  $x = L$ ,  $T_w = T \left[ \frac{1}{\cosh(\lambda L)} \right]$

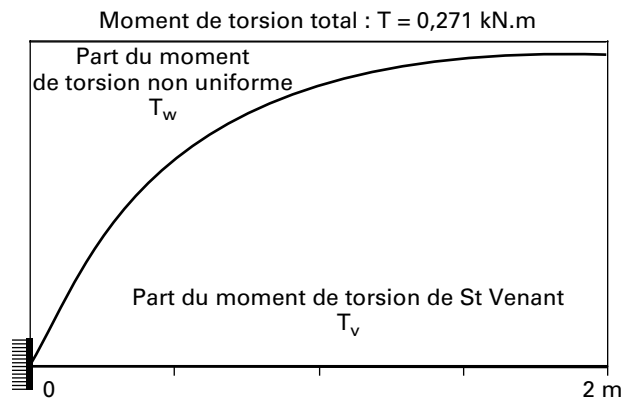


Fig. 6

d) le bimoment

Le bimoment s'exprime par :  $B = \int_0^x T_w dx = -\frac{T \sinh(\lambda(L-x))}{\lambda \cosh(\lambda L)}$

Ainsi, • pour  $x = 0$ ,  $B = -T \tanh(\lambda L) / \lambda$

• pour  $x = L$ ,  $B = 0$

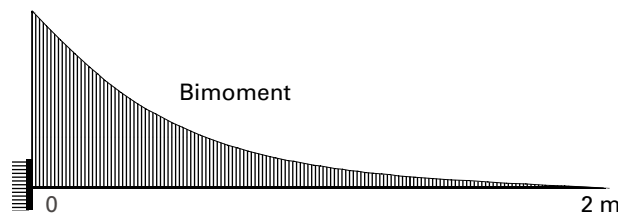


Fig. 7

**1.3. – Calcul des contraintes normales à l’encastrement (application numérique)**

Convention de signe :  $\sigma > 0$  pour la traction

$\sigma < 0$  pour la compression

Le paramètre  $\lambda$  peut être calculé :  $\lambda = \sqrt{\frac{GI_t}{EI_w}} = 2,08 \text{ m}^{-1}$

Le moment de torsion total vaut :  $T = y_S F = -0,271 \text{ kN.m}$

À l’encastrement, le bimoment est :  $B = -T \tanh(\lambda L) / \lambda = 0,13029 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$

Le premier diagramme de la figure 8 présente la répartition des contraintes normales dues au seul moment fléchissant. La valeur de la contrainte maximale de flexion peut facilement être obtenue par :

$$\sigma_f = M_y / W_{el,y} = 20 \cdot 10^3 / 194,59 = 102,8 \text{ MPa}$$

Le deuxième diagramme présente la répartition des contraintes normales dues à la torsion seule. Les valeurs de ces contraintes peuvent être calculées ainsi :

$$\sigma_{\omega 0} = B \omega_0 / I_w = 0,13029 \cdot 10^9 (-4135) / 10396 \cdot 10^6 = -51,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\omega 1} = B \omega_1 / I_w = 0,13029 \cdot 10^9 (+2556) / 10396 \cdot 10^6 = +32,0 \text{ MPa}$$

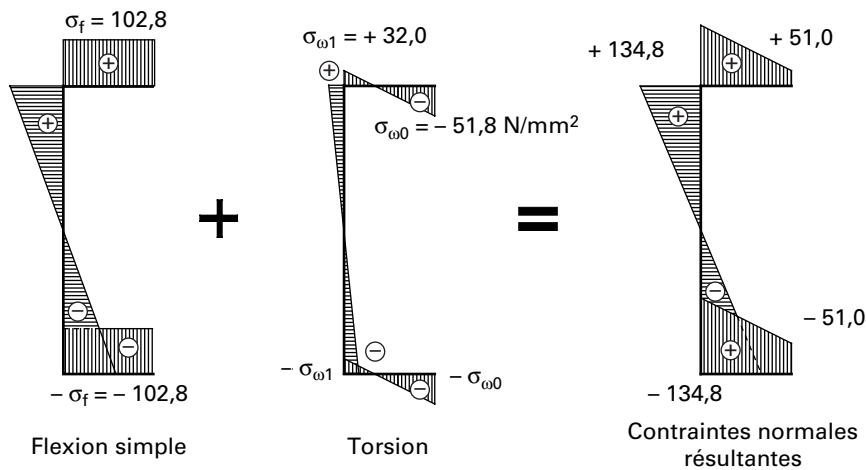


Fig. 8 – Contraintes normales en MPa

**1.4. – Calcul des contraintes de cisaillement**

Les contraintes de cisaillement dans la section sont dues :

- à la torsion de **St Venant** (a),
- à la torsion non uniforme (b),
- à l’effort tranchant (c).

7

## CAL-ELE 1-2000

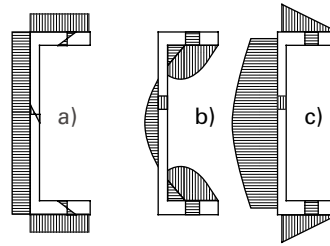


Fig. 9

8

Par convention, on a orienté les flux de cisaillement dans le sens d'application des forces extérieures : au droit d'une section, c'est l'action de la partie droite de la poutre sur la partie gauche.

a) Contraintes de cisaillement dues à la torsion de **St Venant**

Le moment de torsion de **St Venant** est nul au droit de l'encastrement. Il est en revanche maximal à l'extrémité de la console (pour  $x = L$ ). Dans ce cas, nous pouvons calculer les contraintes de cisaillement  $\tau_v$ .

$$\text{À l'extrémité de la console : } T_v = T \left[ 1 - \frac{1}{\cosh(\lambda L)} \right] = -0,2626 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$|\tau_v|_{max} = \frac{|T_v| t}{I_t} \quad \text{dans les semelles } (t_f = 11,5 \text{ mm}) : \quad |\tau_v|_{max} = 25,8 \text{ MPa}$$

$$\text{dans l'âme } (t_w = 8 \text{ mm}) : \quad |\tau_v|_{max} = 18,0 \text{ MPa}$$

b) Contraintes de cisaillement dues à la torsion non uniforme

Les contraintes de cisaillement dues à la torsion non uniforme peuvent être calculées en tout point de la section, par l'expression suivante :

$$\tau_\omega = - \frac{T_w S_\omega}{I_w t}$$

$S_\omega$  est le moment statique sectoriel (voir diagramme de la figure 5).

Calculons les contraintes de cisaillement à l'encastrement ( $x = 0$ ). Le moment de torsion non uniforme est alors égal au moment de torsion total :

$$T_w = T = -0,271 \text{ daN} \cdot \text{cm}$$

d'où :

$$\tau_{\omega 1} = 1,5 \text{ MPa (âme)}$$

$$\tau_{\omega 2} = -1,0 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\omega 3} = 2,4 \text{ MPa (maxi sur semelle)}$$

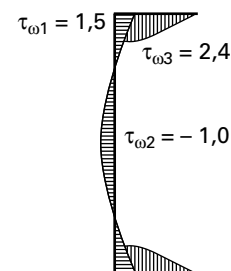


Fig. 10



c) Contraintes de cisaillement dues à l'effort tranchant

L'effort tranchant est constant sur la longueur de l'élément :  $V_z = -10$  kN

La contrainte de cisaillement est calculée à l'aide de l'expression suivante :

$$\tau = \frac{V_z S_y}{I_y t}$$

où :  $S_y$  est le moment statique de la partie supérieure à la position considérée,

$I_y$  est le moment d'inertie /  $Gy$ ,

$t$  est l'épaisseur de la paroi concernée

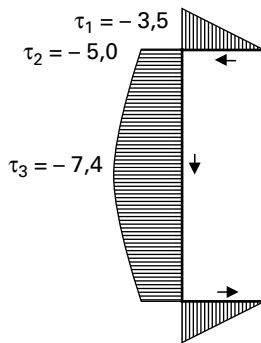


Fig. 11

On obtient ainsi,

- sur la semelle, à la jonction âme-semelle :  $\tau_1 = \frac{V_z b h}{2 I_y} = -3,5$  MPa
- sur l'âme, à la jonction âme-semelle :  $\tau_2 = \frac{V_z b h t_f}{2 I_y t_w} = -5,0$  MPa
- au milieu de l'âme :  $\tau_3 = \frac{V_z}{I_y} \left[ \frac{h^2}{8} + \frac{b t_f h}{2 t_w} \right] = -7,4$  MPa

d) Contraintes de cisaillement résultantes à l'encastrement

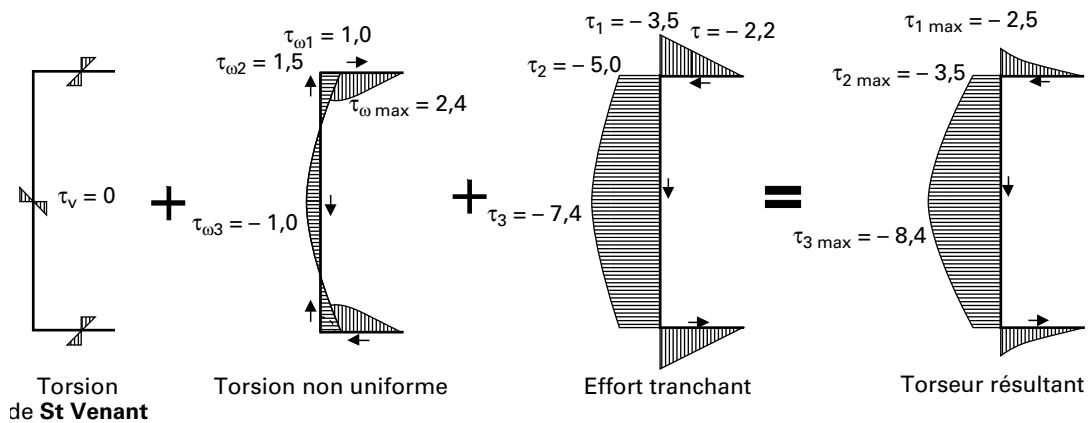


Fig. 12 – Contraintes de cisaillement en MPa

**CAL-ELE 1-2000**

La contrainte maximale de cisaillement est obtenue au milieu de l'âme :

$$\tau_{2\max} = \tau_{\omega 3} + \tau_3 = -8,4 \text{ MPa}$$

On notera qu'en ce point, la contrainte normale totale est nulle.

Dans les ailes, la contrainte résultante de cisaillement max se situe à la jonction avec l'âme (et non au point de moment statique sectoriel maximum) :

$$\tau_{1\max} = \tau_{\omega 1} + \tau_1 = -3,5 + 1,0 = -2,5 \text{ MPa}$$

10

**1.5. – Conclusion**

Dans les profils ouverts, les contraintes normales dues à la torsion représentent souvent entre 20 et 50 % des contraintes dues à la flexion. Dans l'exemple présenté ici, l'essentiel des contraintes de cisaillement dues à la torsion au droit de l'encastrement, est en fait dû à la torsion non uniforme. En tout état de cause, la valeur moyenne des contraintes dans l'épaisseur de la paroi dues au moment de torsion uniforme est nulle. C'est la raison pour laquelle l'annexe G de l'Eurocode 3 [5] admet de négliger l'effet du moment de torsion uniforme dans les **sections ouvertes à parois minces**.

**2. – SECTIONS FERMÉES**

On propose de reprendre l'exemple précédent, avec la section UAP 200 fermée par un plat de 8 mm d'épaisseur, soudé aux extrémités des ailes.

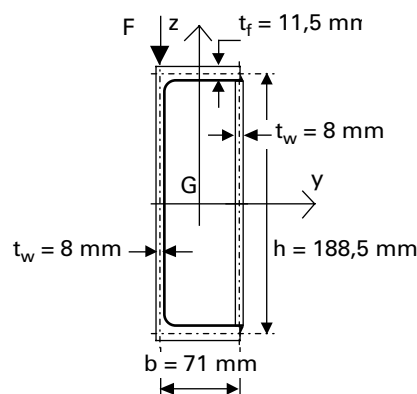


Fig. 13

**2.1. – Caractéristiques de la section**

Si on néglige l'influence des congés de raccordement, on obtient une section doublement symétrique. Le centre de cisaillement est alors confondu avec le centre de gravité. La charge étant appliquée au même point, on notera que le moment de torsion est plus important que précédemment.

Inertie de torsion de St Venant

$$I_t = \frac{4A_c^2}{\sum_i b_i/t_i} = 1205 \text{ cm}^4$$

où :  $A_c$  est l'aire de la cellule enfermée dans la ligne moyenne des parois ( $A_c = bh$ ),

$b_i/t_i$  est le rapport largeur/épaisseur d'une paroi  $i$ .

Moment d'inertie tangent polaire

C'est le moment d'inertie polaire par rapport au centre de torsion.

$$I_p = \int r_s^2 t ds = 2 \times 188,5 \times 8 \times (71 / 2)^2 + 2 \times 71 \times 11,5 \times (188,5/2)^2 = 1831 \text{ cm}^4$$

où :  $r_s$  est la distance du centre de cisailment à la tangente à la paroi au point considéré.

Coefficient de Bencoter

Ce coefficient, introduit par **Bencoter** [7] permet d'obtenir pour les profils fermés, une équation différentielle linéaire d'équilibre semblable à celle des profils ouverts. Il s'exprime par :

$$K = 1 - I_t/I_p = 1 - 1205/1831 = 0,342$$

Aires sectorielles

$$\omega = \frac{hb}{4} \left( 1 - \frac{2ht_f}{bt_w + ht_f} \right)$$

d'où :  $\omega = 1956 \text{ mm}^2$  (19,56  $\text{cm}^2$ )

Notons que  $\omega = 0$  lorsque  $ht_f = bt_w$

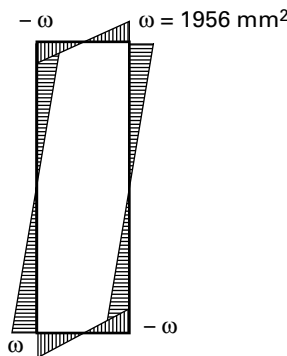


Fig. 14

Inertie sectorielle

$$I_w = \frac{2}{3}(bt_f + ht_w)\omega^2 = 5929 \text{ cm}^6$$

On constate, sur cet exemple, que l'inertie de gauchissement a diminué par rapport à celle de la section ouverte étudiée précédemment malgré un ajout de matière.

Dans le cas particulier où  $ht_f = bt_w$ , l'inertie de gauchissement est nulle.

## CAL-ELE 1-2000

### 2.2. – Calcul des efforts (analyse globale)

L'équation différentielle linéarisée s'écrit :

$$T(x) = G I_t \frac{d\theta}{dx} - \frac{E I_\omega}{K} \frac{d^3\theta}{dx^3}$$

On retrouve une relation similaire à celle des profils ouverts avec la seule différence du coefficient  $K$  de **Benscoter**. La suite des calculs est similaire à ce qui a été vu précédemment pour les sections ouvertes.

12

### 2.3. – Calcul des contraintes normales

Les contraintes normales sont calculées de la même manière que pour les sections ouvertes.

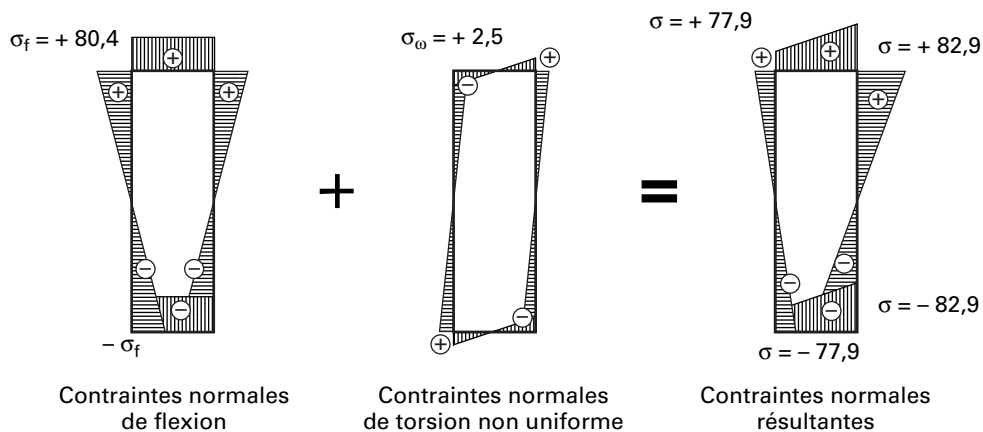


Fig. 15

On constate que bien que le centre de torsion soit plus éloigné de la charge, la contrainte normale  $\sigma_\omega$  ne représente que 3 % de la contrainte de flexion. Elle peut être négligée. Cela confirme les prescriptions de l'Annexe G de l'Eurocode 3.

### 2.4. – Calcul des contraintes de cisaillement

Pour les profils fermés, l'annexe G de l'Eurocode 3 préconise de calculer les contraintes de cisaillement en ne considérant que la torsion uniforme. Il faut noter que dans les parois, les deux flux de cisaillement en torsion uniforme et en torsion non uniforme sont dans le même sens.

La contrainte de cisaillement dans la paroi  $i$  s'écrit :

$$\tau_i = \frac{T}{2A_c t_i}$$

qui est l'équilibre direct dans la « cellule » [4].

où :  $A_c$  est l'aire de la cellule ( $A_c = bh$ )

Le moment de torsion est :  $T = Fy_S = Fb/2 = 0,355 \text{ kN} \cdot \text{m}$

D'où les contraintes de cisaillement,

- dans les semelles :  $\tau = 1,2 \text{ MPa}$
- dans les âmes :  $\tau = 1,7 \text{ MPa}$

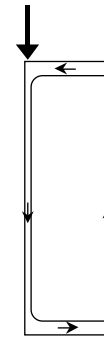


Fig. 16

Il suffit alors de cumuler ces contraintes à celles dues à l'effort tranchant. Du fait des symétries de la section, les contraintes de cisaillement se calculent comme pour la section de base en divisant l'effort tranchant et la dimension de l'aile par 2 (et en modifiant en conséquence la valeur du moment d'inertie de flexion  $I_y = 1173 \text{ cm}^4$ ). On trouve :

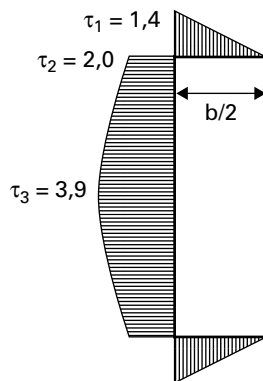


Fig. 17 – Contraintes de cisaillement dues à l'effort tranchant en MPa

d'où le cumul des contraintes de cisaillement (en MPa) indiqué à la figure 18. Les valeurs données sont des valeurs absolues. Les flèches indiquent l'action en une section droite de la partie droite sur la partie gauche de la poutre.

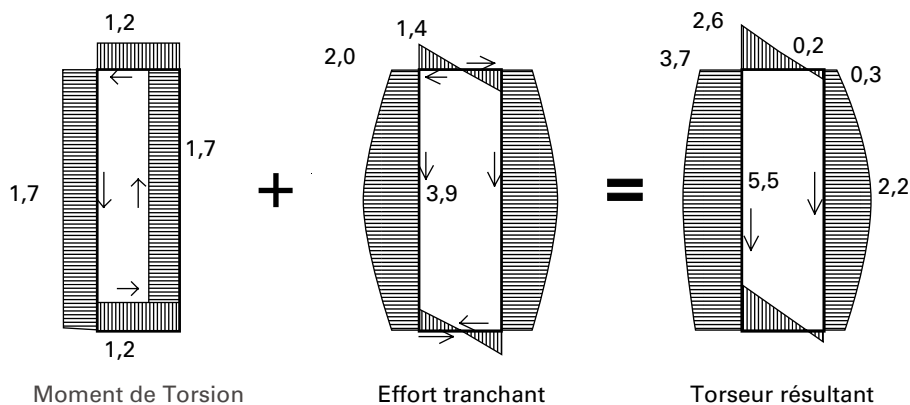


Fig. 18

**CAL-ELE 1-2000****2,5. – Conclusion**

Dans la cellule fermée examinée et c'est le cas le plus courant, les effets de torsion non uniforme sont négligeables. C'est la raison pour laquelle l'annexe G de l'Eurocode 3 admet de ne tenir compte pour ce type de section que de la torsion de **St Venant**.

14

**3. – RÉFÉRENCES**

- [1] **Dziewolski R.** – Torsion non uniforme des poutres à parois minces et à profils composés d'éléments fermés et ouverts. Revue Construction Métallique n° 2-64. CTICM.
- [2] **De Loringhoven L.** – La torsion des poutres. Revue Construction Métallique n° 4-67. CTICM.
- [3] **Sokol L.** – Calcul des caractéristiques géométriques de torsion des profils ouverts à parois minces. Revue Construction Métallique n° 3-89. CTICM.
- [4] **Baraka S.** – Caractéristiques torsionnelles des profils à parois minces. Revue Construction Métallique n° 1-96. CTICM.
- [5] **Eurocode 3** partie 1.1. Annexe G. À paraître.
- [6] **Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier (OTUA).** – Produits sidérurgiques – caractéristiques dimensionnelles. Édition 1993.
- [7] **Benscoter.** – A Theory of Torsion Bending for Multicell Beams, Journal of Applied Mechanics, March 1954.

**ANNEXE 1 – RAPPELS SUR LES FONCTIONS HYPERBOLIQUES**

$$\sinh(x) = (e^x - e^{-x})/2 \quad \text{fonction dérivée : } \cosh(x)$$

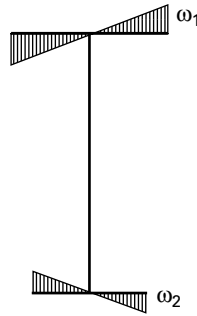
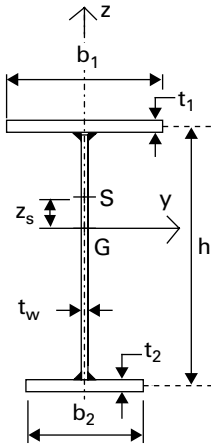
$$\cosh(x) = (e^x + e^{-x})/2 \quad \text{fonction dérivée : } \sinh(x)$$

$$\tanh(x) = \sinh(x)/\cosh(x) \quad \text{fonction dérivée : } 1/\cosh^2(x)$$

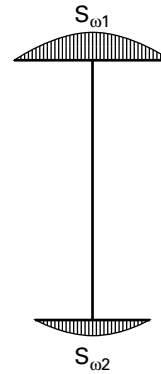
**ANNEXE 2 – FORMULAIRE DE SECTIONS**

Cette annexe donne les propriétés torsionnelles de quelques sections simples connues.

**Profil en I mono-symétrique par rapport au plan moyen de l'âme**



Aires sectorielles



Moments statiques sectorielles

On pose : 
$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^3 \left(\frac{t_1}{t_2}\right)}$$

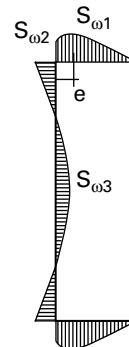
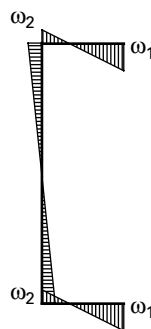
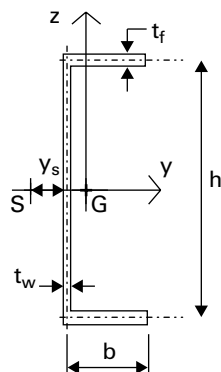
Position du centre de cisaillement :  $z_s = -(|\bar{z}| - \alpha h)$

Aires sectorielles : 
$$\omega_1 = \frac{\alpha b_1 h}{2} \qquad \omega_2 = \frac{(1 - \alpha)}{2} b_2 h$$

Moments statiques sectoriels : 
$$S_{\omega 1} = \frac{\alpha}{8} b_1^2 h t_1 \qquad S_{\omega 2} = \frac{(1 - \alpha)}{8} b_2^2 h t_2$$

Inertie sectorielle : 
$$I_w = \frac{\alpha}{12} b_1^3 h^2 t_1$$

**Profil en U**



**CAL-ELE 1-2000**

On pose :  $\alpha = \frac{1}{2 + \frac{ht_w}{3bt_f}}$

Position du centre de torsion :  $y_S = \alpha b$

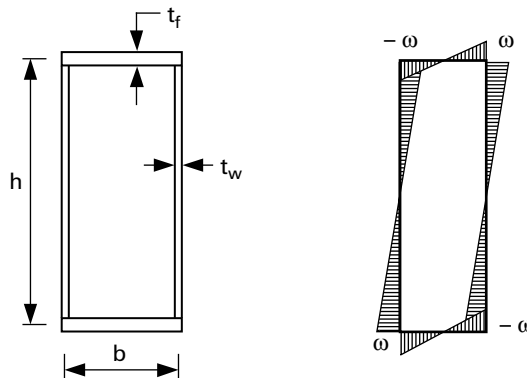
Aires sectorielles :  $\omega_0 = \frac{(\alpha - 1)hb}{2}$   $\omega_1 = \frac{\alpha}{2}hb$

Moments statiques sectoriels :  $S_{\omega 1} = \frac{(1 - 2\alpha)}{4} b^2 ht_f$

$$S_{\omega 2} = \frac{\left(1 - 2\alpha - \alpha \frac{ht_w}{2bt_f}\right)}{4} b^2 ht_f$$

$$S_{\omega 3} = \frac{(1 - \alpha)^2}{4} b^2 ht_f$$

Inertie sectorielle :  $I_w = \frac{b^3 h^2 t_f}{12} \left( \frac{2ht_w + 3hbt_f}{ht_w + 6bt_f} \right)$

**Profil en caisson symétrique**

Aires sectorielles :  $\omega = \frac{hb}{4} \left( 1 - \frac{2h \cdot t_f}{ht_f + bt_w} \right)$

Inertie sectorielle :  $I_w = \frac{2}{3} (bt_f + ht_w) \omega^2$

16