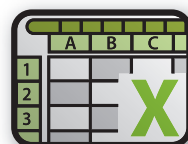


Vérification des barres comprimées et fléchies



D'après l'Eurocode 3

> Dimensionnement des barres en acier comprimées et fléchies vis-à-vis du flambement et du déversement



Feuilles de calcul à télécharger

Guide Eurocode

D'après la norme NF EN1993-1-1: 2005
(Eurocode 3, partie 1-1)



VÉRIFICATION DES BARRES COMPRIMÉES ET FLÉCHIES

**Dimensionnement des barres
en acier comprimées et fléchies
vis-à-vis du flambement
et du déversement**

Directeur de collection : Ménad CHENAF (CSTB)
Auteurs : Alain BUREAU (CTICM)
Yvan GALÉA (CTICM)

Avertissement

Le présent guide ne se substitue en aucun cas aux textes de références qu'ils soient réglementaires, normatifs ou codificatifs.

Le CSTB décline toute responsabilité quant aux conséquences directes ou indirectes de toute nature qui pourraient résulter de toute interprétation erronée du contenu du présent guide.

Feuilles de calcul



Vous pouvez télécharger gratuitement les feuilles de calcul développées sous Excel® 2003 sur le site : <http://e-cahiers.cstb.fr/>
Rubrique téléchargement, puis Eurocodes

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille, 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1^{er} juillet 1992 – art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).

© CSTB mai 2012

ISBN 978-2-86891-423-1

AVANT-PROPOS

Les autorités publiques ont confié au CSTB l'organisation et la gestion d'un programme d'accompagnement de la mise en œuvre de la directive « produits de construction » (Directive 89/106 du 21 décembre 1988). Ce programme d'accompagnement, appelé « Plan Europe » comporte plusieurs volets, tous concourant à l'intégration des textes techniques européens du domaine de la construction dans les usages français.

Le Plan Europe a été dirigé et organisé par le CSTB, en partenariat avec les acteurs du bâtiment, partenariat formalisé par une convention en date du 1^{er} juin 2004. Les partenaires concernés sont :

- le Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer ;
- le Secrétariat d'État au Logement ;
- la Fédération Française du Bâtiment (FFB) ;
- la Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment (CAPEB) ;
- l'Union Sociale pour l'Habitat (USH) ;
- la Fédération Française des Promoteurs Constructeurs de France (FPC France) ;
- la Confédération des Organismes indépendants tierce partie de Prévention, de Contrôle et d'Inspection (COPREC) ;
- l'Union Nationale des Syndicats Français d'Architectes (UNSFA) ;
- la Fédération professionnelle de l'ingénierie (SYNTEC-Ingénierie) ;
- la Chambre de l'Ingénierie et du Conseil de France (CICF) ;
- l'Association Française de Normalisation (AFNOR) ;
- le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

L'un des volets du Plan Europe est dédié spécifiquement aux Eurocodes. Il vise à procurer aux acteurs de la construction, pour les ouvrages courants, des outils leur permettant d'appliquer les principes et méthodes de dimensionnement proposées dans ces normes. Sont abordés à ce titre tous les matériaux habituels de structure : acier, béton, bois et maçonnerie vis-à-vis des actions normales, climatiques (vent, neige) ou accidentelles (feu, séisme).

Ce guide attire l'attention de l'utilisateur sur le domaine d'application couvert, forcément restreint par rapport à celui de l'Eurocode en question. Le choix délibéré a été de traiter les cas les plus couramment rencontrés. Cette restriction s'accompagnant d'une simplification de traitement.

Enfin, il est indispensable de souligner que les méthodes proposées dans ce guide sont destinées à réaliser des calculs de structure, et que leur utilisation suppose la connaissance des principes généraux de résistance des matériaux et de la mécanique des structures. Cette connaissance est indispensable pour effectuer les choix judicieux qui incombent au calculateur et apprécier la pertinence des résultats obtenus dans le contexte particulier de l'ouvrage qu'il dimensionne.

SOMMAIRE

1.	OBJET	3
2.	DOMAINE D'APPLICATION	5
3.	RÉSISTANCE AU FLAMBEMENT	7
3.1	Vérification de la résistance au flambement d'une barre simplement comprimée.....	7
3.2	Effort normal critique de flambement par torsion	9
4.	RÉSISTANCE AU DÉVERSEMENT	11
4.1	Vérification de la résistance au déversement d'une barre simplement fléchie.....	11
4.2	Moment critique de déversement élastique	11
4.3	Méthode simplifiée pour le calcul de l'élançement réduit pour le déversement des profilés laminés en I.....	14
4.4	Cas de profilés creux.....	17
5.	RÉSISTANCE DES BARRES COMPRIMÉES ET FLÉCHIES.....	19
5.1	Généralités	19
5.2	Profilés creux circulaires ou carrés	20
5.3	Barres comprimées et fléchies sans instabilité hors plan de flexion	23
5.4	Profilés à section transversale en I ou H avec instabilité hors plan de flexion	24
5.5	Facteur de moment uniforme équivalent	28
5.6	Abaques pour profilés laminés courants.....	28
6.	FEUILLE DE CALCUL POUR LA VÉRIFICATION DES BARRES COMPRIMÉES ET FLÉCHIES	29
6.1	Domaine d'application	29
6.2	Utilisation de la feuille de calcul	30
6.3	Déroulement des calculs	33
7.	EXEMPLES D'APPLICATION	35
7.1	Hypothèses générales	35
7.2	Vérification de la résistance au flambement en compression simple d'un poteau	35
7.3	Vérification de la résistance au déversement d'une poutre par la méthode simplifiée.....	37
7.4	Vérification de la stabilité d'un poteau de portique	40
7.5	Vérification de la stabilité d'un poteau de portique PRS.....	50
8.	RÉFÉRENCES	61
9.	NOTATIONS	63
	ANNEXE : Abaques pour profilés laminés courants	65

1. OBJET

La norme **EN 1993-1-1** ([1]) : Eurocode 3 : « Calcul des structures en acier – Partie 1.1 : Règles générales et règles pour les bâtiments ») fournit une méthode pour la vérification des barres comprimées et fléchies.

Cette méthode nécessite de déterminer un nombre important de paramètres intermédiaires pour calculer des critères qui permettront de conclure sur la résistance de la barre vis-à-vis des phénomènes de flambement et de déversement.

Il est donc apparu très utile de fournir des moyens simples de justification de la résistance de tels éléments.

L'objet de ce guide est de :

- présenter de manière simple et claire les méthodes de vérification pour les barres simplement comprimées, les barres simplement fléchies par rapport à leur axe de forte inertie et les barres comprimées et fléchies par rapport à leur axe de forte inertie ;
- proposer des méthodes simplifiées pour des cas courants (déversement en flexion simple de profilés laminés à section en I, résistance en flexion composée de profils creux, etc.) ;
- fournir des abaques pour une estimation rapide de la stabilité des profilés laminés en I les plus couramment utilisés ;
- donner des exemples d'application.

Ce guide est donc destiné à aider le projeteur lors de la vérification de barres comprimées et fléchies selon l'**EN 1993-1-1**.

Il est à noter qu'une feuille de calcul Excel® vient en complément du contenu de ce guide (téléchargement gratuit sur <http://e-cahiers.cstb.fr>)

Cette feuille de calcul est destinée à faciliter la vérification des barres comprimées et fléchies dans un domaine d'application plus large et sans recours à de quelconques simplifications.

2. DOMAINE D'APPLICATION

Les méthodes de vérification des barres comprimées et fléchies présentées dans ce document se réfèrent à la norme EN 1993-1-1 [①] et à son Annexe Nationale [②].

Le domaine d'application de ce guide est limité aux barres :

- à section en I doublement symétrique et à section creuse de forme circulaire, carrée ou rectangulaire ;
- à section constante sur leur longueur ;
- soumises à un effort axial constant sur leur longueur ;
- soumises à de la flexion par rapport à l'axe de forte inertie de la section.

Les méthodes couvrent la vérification de la résistance :

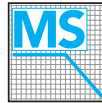
- au flambement dans le plan de flexion ;
- au flambement hors plan de flexion ;
- au déversement.

Certaines méthodes de calcul ont un domaine d'application restreint qui est alors précisé.

Le domaine d'application de la feuille de calcul Excel® est décrit dans le chapitre consacré à la présentation de cet outil de calcul.

Notes

- Ce guide contient des méthodes simplifiées. Afin de bien les distinguer du reste du texte, elles sont signalées par le pictogramme



- Les notations sont celles de l'EN 1993-1-1. Les principales notations sont explicitées à la fin du document.

3. RÉSISTANCE AU FLAMBEMENT

3.1 Vérification de la résistance au flambement d'une barre simplement comprimée

De façon générale, la résistance au flambement d'une barre simplement comprimée est la plus faible de la résistance calculée pour le flambement par rapport à l'axe de forte inertie $N_{b,y,Rd}$ et de celle calculée pour le flambement par rapport à l'axe de faible inertie $N_{b,z,Rd}$.

Le Tableau 1 résume la méthodologie de vérification.

Étape	Description	Références
1	Classe de la section	EN 1993-1-1 §5.5
2	Aire efficace A_{eff} pour les sections de Classe 4	EN 1993-1-5 Chapitre 4
3	Longueur de flambement L_{cr}	
4	Effort normal critique de flambement par flexion $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}$	
5	Élancement réduit $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}}$ pour les sections transversales de Classe 1, 2 ou 3 $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}$ pour les sections transversales de Classe 4	EN 1993-1-1 §6.3.1.2(1)
6	Courbe de flambement (a_0, a, b, c ou d)	EN 1993-1-1 Tableau 6.2
7	Coefficient de réduction χ	EN 1993-1-1 §6.3.1.2(1) ou Figure 1
8	Résistance au flambement $N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1}$ pour les sections de Classe 1, 2 ou 3 $N_{b,Rd} = \chi A_{eff} f_y / \gamma_{M1}$ pour les sections de Classe 4	EN 1993-1-1 §6.3.1.1(3)
9	Critère de résistance : $\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$	EN 1993-1-1 §6.3.1.1(1)

Tableau 1 : Résistance au flambement – Méthodologie

Notes

1. Pour le classement des profilés laminés à section transversale en I, le lecteur pourra se référer aux références [6] et [12].

Certains catalogues de profilés fournissent aussi la classe de la section en compression simple.

2. La vérification d'un élément comprimé et fléchi nécessite généralement le calcul de $N_{b,y,Rd}$ et $N_{b,z,Rd}$.

3. L'élançement réduit $\bar{\lambda}$ peut être calculé directement à partir de l'élançement λ de la barre :

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{93,9 \varepsilon}$$

Où : $\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$ avec f_y en N/mm² (voir Tableau 2)

$$\lambda = L_{cr} / i$$

i est le rayon de giration de la section pour l'axe de flambement considéré.

f_y (N/mm ²)	S235	S275	S355	S420	S460
ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Tableau 2 : Paramètre ε

4. La référence [12] fournit directement des valeurs de la résistance au flambement en compression simple pour des cas courants.

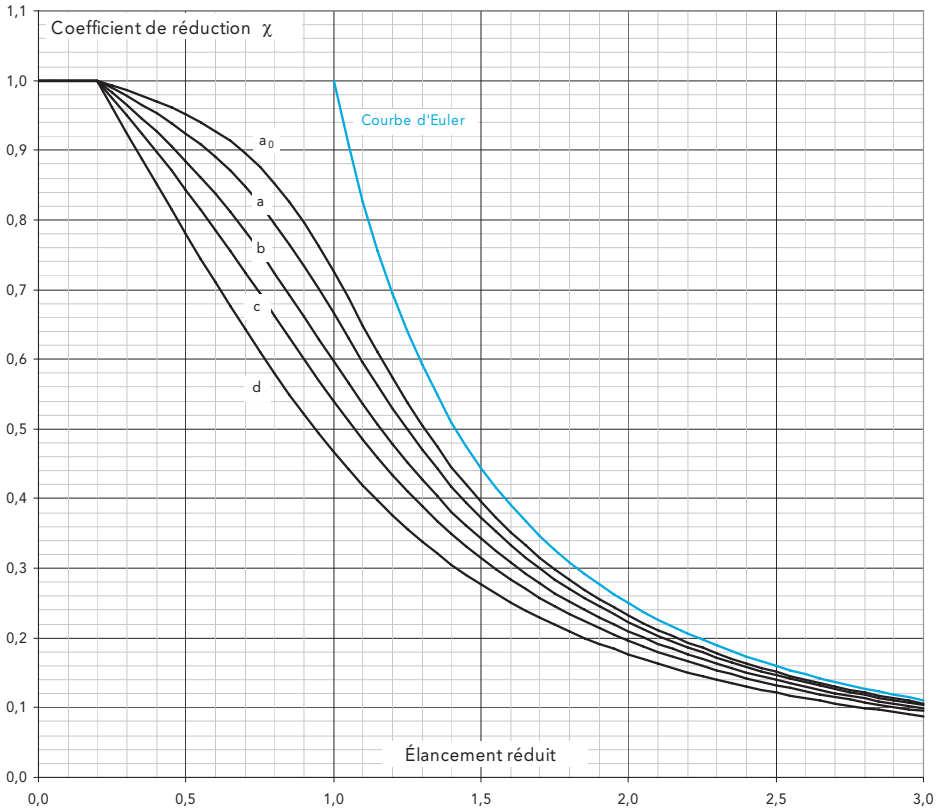


Figure 1 : Courbes de flambement

3.2 Effort normal critique de flambement par torsion

Seul le flambement par flexion est considéré dans le Tableau 1. L'EN 1993-1-1 envisage la possibilité d'un mode de flambement par torsion ou par flexion-torsion.

Pour les sections doublement symétriques, seul le flambement par torsion est à envisager. Pour les sections tubulaires, le flambement par torsion n'est jamais à craindre. Pour les sections en I, ce mode de flambement est très rarement déterminant [7]. Cependant, l'expression de l'effort normal critique pour le flambement par torsion est donnée ci-après :

$$N_{cr,T} = \frac{A}{I_y + I_z} \left(Gl_t + \frac{\pi^2 EI_w}{L_{cr,T}^2} \right)$$

Où : $L_{cr,T}$ est la longueur de flambement pour le flambement par torsion.

Pour une barre avec les conditions de liaison suivantes :

- les extrémités sont maintenues vis-à-vis des déplacements latéraux ;
- les extrémités sont maintenues en rotation autour de l'axe de la barre ;
- le gauchissement des sections est libre aux extrémités de la barre.

La longueur de flambement $L_{cr,T}$ peut être prise égale à la longueur d'épure.

Note

La méthode de vérification des barres comprimées et fléchies nécessite le calcul de l'effort normal critique de flambement par torsion.

4. RÉSISTANCE AU DÉVERSEMENT

4.1 Vérification de la résistance au déversement d'une barre simplement fléchie

La résistance au déversement n'est à vérifier que pour des barres fléchies par rapport à leur axe de forte inertie. Les tubes circulaires ou carrés ne présentent pas de risque de déversement.

Le Tableau 4 résume la méthodologie de vérification. Par souci de simplification dans la présentation de ce guide, on se limite à la méthode générale. L'EN 1993-1-1 propose d'autres méthodes qui peuvent, dans certains cas, conduire à des résultats plus favorables. La référence [12] fournit directement des valeurs de résistance au déversement pour des cas courants.

Le calcul de la résistance au déversement se fonde normalement sur le moment critique de déversement défini au paragraphe 4.2. En alternative et pour des cas simples, le paragraphe 4.3 propose une méthode simplifiée pour le calcul de l'élanement réduit qui permet d'éviter le calcul fastidieux du moment critique de déversement.

4.2 Moment critique de déversement élastique

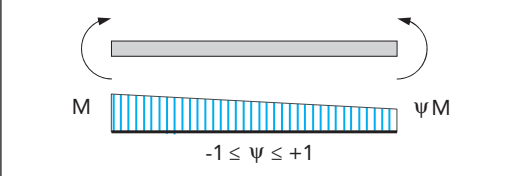
Le moment critique de déversement élastique est un paramètre essentiel dans le calcul de la résistance au déversement d'une barre. L'expression suivante peut être utilisée pour des sections doublement symétriques :

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(kL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right]$$

Où :

- k est un coefficient qui tient compte de la possibilité de rotation des sections d'extrémité, dans le plan des semelles. Le coefficient k est analogue au rapport L_{cr}/L d'une barre comprimée et il est normalement compris entre 0,5 et 1,0. Le plus souvent, on retient $k = 1$ en se plaçant du côté de la sécurité
- k_w concerne le gauchissement aux extrémités. Si aucun dispositif particulier n'a été prévu pour empêcher le gauchissement des sections d'extrémité, il convient de prendre $k_w = 1,0$
- z_g est la distance du point d'application des charges transversales au centre de cisaillement. On rappelle que ce dernier est confondu avec le centre de gravité pour les sections doublement symétriques. La distance z_g est positive lorsque les charges transversales agissent en direction du centre de cisaillement (effet déstabilisant)

- $C_2 z_g$ est pris égal à 0 si la barre n'est soumise qu'à des moments d'extrémité, ou bien si les charges transversales sont appliquées au centre de cisaillement
- C_1, C_2 sont des coefficients qui tiennent compte des conditions de maintien aux extrémités et de la forme du diagramme du moment fléchissant. On pourra se reporter aux références [2] et [9] pour la détermination de ces coefficients. Le Tableau 3 contient les valeurs pour le cas d'une barre soumise à un diagramme linéaire du moment fléchissant lorsque $k = 1$



ψ	C_1
+1,00	1,00
+0,75	1,14
+0,50	1,31
+0,25	1,52
0	1,77
-0,25	2,05
-0,50	2,33
-0,75	2,57
-1,00	2,55

Tableau 3 : Coefficient C_1 pour un diagramme linéaire de moment

■ Cas des poutres-consoles

Dans le cas des poutres-consoles à extrémité entièrement libre, on pourra se reporter à la référence [10] pour le calcul du moment critique de déversement élastique.

■ Logiciel *LTBeam*

Il est possible de calculer le moment critique de déversement élastique à l'aide du logiciel *LTBeam* développé par le CTICM et disponible gratuitement sur les sites : www.cticm.com et www.steelbizfrance.com

Le logiciel *LTBeam* permet de traiter des cas où les conditions de maintien de la barre et les dispositions du chargement sont plus complexes que celles couvertes par la formulation donnée précédemment.

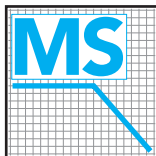
Étape	Description	Références
1	Classe de la section	EN 1993-1-1 §5.5
2	Module élastique efficace $W_{\text{eff},y}$ pour les sections de Classe 4	EN 1993-1-5 Chapitre 4
3	Moment critique de déversement $M_{\text{cr}} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(kL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right]$	Paragraphe 4.2
4	Élancement réduit $\bar{\lambda}_{\text{LT}} = \sqrt{\frac{W_{\text{ply}} f_y}{M_{\text{cr}}}}$ pour les sections transversales de Classe 1 ou 2 $\bar{\lambda}_{\text{LT}} = \sqrt{\frac{W_{\text{ely}} f_y}{M_{\text{cr}}}}$ pour les sections transversales de Classe 3 $\bar{\lambda}_{\text{LT}} = \sqrt{\frac{W_{\text{eff},y} f_y}{M_{\text{cr}}}}$ pour les sections transversales de Classe 4	EN 1993-1-1 §6.3.2.2(1) ou méthode simplifiée Paragraphe 4.3
5	Courbe de déversement (a, b, c ou d)	EN 1993-1-1 Tableau 6.4
6	Coefficient de réduction χ_{LT} pour le déversement	EN 1993-1-1 §6.3.2.2(1) ou Figure 1
7	Coefficient de réduction modifié $\chi_{\text{LT,mod}}$	EN 1993-1-1 §6.3.2.3(2)
8	Résistance au déversement $M_{\text{b,Rd}} = \chi_{\text{LT,mod}} W_{\text{ply}} f_y / \gamma_{\text{M1}}$ pour les sections de Classe 1 ou 2 $M_{\text{b,Rd}} = \chi_{\text{LT,mod}} W_{\text{ely}} f_y / \gamma_{\text{M1}}$ pour les sections de Classe 3 $M_{\text{b,Rd}} = \chi_{\text{LT,mod}} W_{\text{eff},y} f_y / \gamma_{\text{M1}}$ pour les sections de Classe 4	EN 1993-1-1 §6.3.2.1(3)
9	Critère de résistance : $\frac{M_{y,\text{Ed}}}{M_{\text{b,Rd}}} \leq 1,0$	EN 1993-1-1 §6.3.2.1(1)

Tableau 4 : Résistance au déversement – Méthodologie

Notes

1. Pour le classement des profilés laminés à section transversale en I, le lecteur pourra se référer aux références [6] et [12]. Certains catalogues de profilés fournissent aussi la classe de la section en flexion simple.
2. La vérification d'un élément comprimé et fléchi nécessite généralement le calcul de $M_{b,Rd}$.
3. La référence [12] fournit directement des valeurs de la résistance au déversement en flexion simple pour des cas courants.
4. Il est à noter que l'EN 1993-1-1 §6.3.2.4 propose une méthode simplifiée pour la vérification des poutres de bâtiments avec maintiens latéraux.

4.3 Méthode simplifiée pour le calcul de l'élancement réduit pour le déversement des profilés laminés en I



Cette méthode s'applique aux profilés laminés à section transversale en I. Elle s'applique aux cas de poutres ou de tronçons de poutre entre points de maintien au déversement, lorsqu'il n'y a pas d'effet défavorable dû à la position de charges transversales au-dessus du centre de cisaillement.

Dans le cadre d'une vérification basée sur la résistance élastique de la barre, l'élancement réduit pour le déversement peut être estimé à partir de l'expression suivante :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{k_{\lambda}}{\varepsilon \sqrt{C_1}}$$

Où :

C_1 coefficient qui dépend de la forme du diagramme du moment, à déterminer en fonction du rapport ψ des moments aux extrémités (voir *paragraphe 4.2*)

ε paramètre fonction de la nuance de l'acier :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \text{où } f_y \text{ est exprimé en N/mm}^2 \quad (\text{voir Tableau 2})$$

k_{λ} coefficient à déterminer selon la Figure 2 en fonction du paramètre caractéristique de la section β_s (voir *Tableau 5*), et de l'élancement λ_z calculé par :

$$\lambda_z = \frac{L}{i_z}$$

L distance entre points de maintien au déversement

i_z rayon de giration par rapport à l'axe de faible inertie

Pour les sections de Classe 1 ou 2 pour lesquelles on peut se référer à la résistance plastique de la section, l'élançement réduit obtenu d'après l'expression présentée ci-dessus devra être multiplié par :

- 1,07 pour tous les profilés laminés autres que ceux de la gamme HEM ;
- 1,10 pour tous les profilés de la gamme HEM.

n°	IPEA	IPE	IPEO	HEAA	HEA	HEB	HEM
80	0,380	0,518					
100	0,319	0,413		0,565	0,819	1,161	3,902
120	0,234	0,319		0,349	0,523	0,884	2,855
140	0,177	0,262		0,252	0,412	0,722	2,226
160	0,161	0,239		0,249	0,380	0,681	1,915
180	0,143	0,209	0,261	0,214	0,303	0,592	1,602
200	0,144	0,205	0,246	0,218	0,291	0,556	1,418
220	0,137	0,186	0,224	0,193	0,269	0,502	1,240
240	0,141	0,187	0,224	0,199	0,273	0,482	1,509
260				0,190	0,253	0,434	1,320
270	0,116	0,155	0,203				
280				0,172	0,229	0,388	1,161
300	0,104	0,136	0,176	0,180	0,235	0,382	1,371
320				0,172	0,239	0,381	1,267
330	0,107	0,135	0,172				
340				0,165	0,235	0,368	1,129
360	0,100	0,130	0,167	0,160	0,232	0,358	1,014
400	0,095	0,126	0,157	0,142	0,219	0,330	0,828
450	0,086	0,115	0,155	0,122	0,202	0,297	0,660
500	0,083	0,108	0,147	0,107	0,189	0,272	0,540
550	0,082	0,108	0,141	0,102	0,169	0,241	0,448
600	0,082	0,107	0,162	0,092	0,153	0,216	0,378

Tableau 5 : Coefficient géométrique de la section β_s

Note

Le coefficient β_s a pour expression : $\beta_s = \frac{GI_t \cdot A}{\pi^2 E W_{el,y}^2}$.