

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.

Université de Tlemcen
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil



Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master en Génie Civil
Option : Construction Métallique

Thème :

Élaboration d'un outil numérique pour la vérification des sections transversales

Présenté le 03/07/2017 par :

Mlle FRIDJA Dounia Mme MERABET Sakina.

Devant le Jury composé de :

Mr. BDJAOUI. Chakib	President
Mr. HAMD AOUI. Karim	Examineur
Mme. BENADLA. Zahira	Examinatrice
Mr. MISSOUM. Abdelghani	Encadreur
Mr. BENYELLES. Zoheir	Encadreur
Mr. BOUMECHRA. Nadir	Encadreur

Dédicace

C'est grâce à ALLAH seul que j'ai pu achever ce travail. Je le dédie à :

Mes Très Chers Parents, en témoignage et en gratitude de leur dévouement et leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral et tous les efforts qu'ils ont consentis pour mon éducation et mon instruction pour me voir réussir un jour ...Que Dieu les garde...

A mon petit ange Adem et mon Mari Mohamed.

A mes très chères sœurs Fatima, Khadidja et Asma.

A mes très chers frères Mohamed et Merabet.

A tous les professeurs qui m'ont enseigné tout au long de mon parcours d'études.

Une spéciale dédicace à la promotion C.M 2017 avec qui j'ai passée des moments inoubliables.

Mme. MERABET Sakina.

Dédicace

*C'est grâce à ALLAH seul que j'ai pu achever ce travail et que je le
dédie à :*

*Mes Très Chers Parents, en témoignage et en gratitude de leur
dévouement et leur soutien permanent durant toutes mes années
d'études,
leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral et tous les efforts qu'ils
ont
consentis pour mon éducation et mon instruction pour me voir réussir
un*

A mes très chères sœurs Meriame, Amina et Maghnia.

A mes très chers frères Abde Al kadereet Ayoub.

A tout ma famille surtout mes cousines Djahida, Amara, Wassinia

*A mes professeur de toutes les années scolaire de primaire a
l'université (grasse a vous je suis là)*

A toute la promotion de construction métallique génie 2017

Mlle. FRIDJA Dounia

Remerciement

On adresse nos plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers le bon DIEU, le clément et le miséricordieux, lequel nous a accordé la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

On veut exprimer nos gratitude à nos encadreur Mr.MISSOUM A, Mr. BENYELLES Z. Mr. BOUMECHRA N. pour avoir largement contribué à notre formation, avoir profité de leurs grandes expériences et avoir partagé le fruit de leurs connaissances durant notre travail.

On remercie également Mr.BJAOUI.Ch le président de jury aussi que les examinateurs Mr. HAMDAOUI.K et Mme BENADLA.Z devant lesquels nous avons l'honneur d'exposer notre travail, et qui ont pris peine de le lire et de s'y intéresser.

On réserve une pensée spéciale à tous les enseignants du département de génie civil de la faculté de technologie, université de Tlemcen Abou-Bekr Belkaïd qui ont su nous donner une formation didactique et appréciable durant tout notre cursus.

On remercie aussi tous nos camarades, avec lesquels on a eu le plaisir de travailler, ainsi que toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration et l'achèvement de ce mémoire.

Résumé

L'actuel travail est destiné particulièrement aux étudiants en fin d'année de licence de génie civil. Il est utilisé pour le calcul et vérifications lors des travaux dirigés de la matière des « Structures Métalliques ».

Utiliser les formules du code Algérien de calcul des structures en acier « CCM 97 » est plus ou moins compliqués à mettre en œuvre et risquent d'induire des erreurs de calcul.

Actuellement, il existe des logiciels pour calculer une structure métallique en intégralité, en général en 3 D mais inadaptés pour de vérifications de résistance ou d'instabilité d'un élément isolé.

L'application réalisée en langage « Visual Basic » sous Microsoft Excel est une feuille de calcul où les données et les résultats sont affichées et permet de calculer ou vérifier la résistance ou l'insatiabilité d'un élément d'une structure en acier telle que un poteau, une poutre, une panne, ... et ceci d'une manière automatique et surtout répétée. Il est reconnu qu'il est complexe de réaliser une telle vérification d'instabilité et plus particulièrement celle relative au déversement tout en évitant des erreurs de calculs.

Beaucoup de choses restent à faire afin de compléter notre application et avoir un outil complet avec une interface graphique plus poussée.

Mots clés: Visual Basic, application, structure métallique.

ملخص

يهدف هذا الملخص للتحقق من المسائل دروس الهياكل المعدنية و هذا العمل موجه لطلاب الهندسة المدنية في وقتنا الحالي نجد كثيرا من البرامج الخاصة بحساب مباني معدنية استعمال هذه البرامج غالبا ما يكون الخيار الأمثل و الأسرع و في هذا الوقت أغلبية الحسابات تقوم بالبرامج الحاسوبية المعلوماتية الفكرة هي إنشاء برنامج لتسهيل عملية الحساب للمباني المعدنية داخل البرنامج اكسل

Obstacle

The current work is intended especially for students at the end of the year of civil engineering license. It is used for the calculation and verification during the directed work of the material "Metallic Structures".

Using the formulas of the Algerian Code for the calculation of steel structures "CCM 97" is more or less complicated to implement and may lead to calculation errors.

Currently, there are software programs for calculating a complete metal structure, generally in 3 D but unsuitable for checking the resistance or instability of an isolated element.

The application in "Visual Basic" language in Microsoft Excel is a spreadsheet where the data and the results are displayed and makes it possible to calculate or check the resistance or the insatiability of an element of a steel structure such as A post, a beam, a breakdown, and this in an automatic and above all repeated manner. It is recognized that it is complex to carry out such an instability check and more particularly that relating to the spill while avoiding calculation errors.

Many things remain to be done in order to complete our application and have a complete tool with a more advanced graphical interface.

Keywords: Visual Basic, application, metallic structure.

Liste Des Notations

E	Module d'élasticité longitudinal ($E=2.1*10^5$ Mpa) ;
G	Module de cisaillement ($G=81000$ Mpa) ;
f_y	La résistance limite d'élasticité minimale ;
f_u	La résistance à la traction minimale ;
γ_M	Coefficient partiel de sécurité s'appliquant à la résistance ;
W_{pl}	Module plastique ;
W_{el}	Module élastique ;
W_{eff}	Module élastique de la section efficace ;
A	L'aire de la section ;
A_{eff}	L'aire efficace de la section ;
A_v	L'aire de cisaillement ;
B	Largeur de la semelle ;
t_f	L'épaisseur de la semelle ;
t_w	L'épaisseur de l'âme ;
h	La hauteur totale ;
L	Longueur générale ;
L_f	Longueur de flambement ;
λ	Élancement ;
λ_1	Élancement limite ;
$\bar{\lambda}$	Élancement réduit ;
$\bar{\lambda}_{LT}$	Élancement de déversement ;
I_y	Moment d'inertie selon l'axe y ;
I_z	Moment d'inertie selon l'axe z ;
I_{max}	Inertie maximale dans un profilé ;
I_{min}	Inertie minimale dans un profilé ;
i_y, i_z	Rayon de giration suivant respectivement les axes yy et zz ;
I_t	Moment d'inertie de torsion ;
I_w	Moment d'inertie de gauchissement ;
I_0	Rayon d'inertie polaire ;
ε	Coefficient de réduction élastique de l'acier ;
χ	Coefficient de réduction du flambement ;
α	Facteur d'imperfection ;

σ_{cr}	Contrainte critique ;
N_{Sd}	Effort axial ;
V_{Sd}	Effort tranchant ;
$M_{y.Sd}$	Moment de flexion autour de l'axe yy ;
$M_{z.Sd}$	Moment de flexion autour de l'axe zz ;
$N_{t.Rd}$	Effort axial de traction ;
$N_{pl.Rd}$	Résistance plastique de la section ;
$N_{u.Rd}$	Résistance ultime de section nette (boulons ordinaires) ;
$N_{net.Rd}$	Résistance plastique de section nette (boulon précontrainte) ;
$N_{c.Rd}$	Effort axial de compression ;
$N_{0.Rd}$	Résistance de calcul de la section brute au voilement local ;
$M_{pl.Rd}$	Moment résistant plastique ;
$M_{ply.Rd}$	Moment résistant plastique autour de l'axe yy ;
$M_{plz.Rd}$	Moment résistant plastique autour de l'axe zz ;
$M_{el.Rd}$	Moment résistant élastique ;
$M_{ely.Rd}$	Moment résistant élastique autour de l'axe yy ;
$M_{elz.Rd}$	Moment résistant élastique autour de l'axe zz ;
$M_{0.Rd}$	Moment résistant au voilement local ;
$M_{v.Rd}$	Moment résistant plastique réduit compte tenu de l'effort tranchant ;
$M_{N.Rd}$	Moment résistant plastique de la section brute ;
$M_{Ny.Rd}$	Moment résistant plastique de la section brute autour de l'axe yy ;
$M_{Nz.Rd}$	Moment résistant plastique de la section brute autour de l'axe zz ;

Liste des figures

Figure 1.1	<i>Dimensions et axes des sections.....</i>	3
Figure 1.2	<i>Classes de section en acier.....</i>	5
Figure 1.3	<i>Formes et dimensions proposées pour la classification de l'ameÉ.....</i>	8
Figure 1.4	<i>Formes et dimensions proposées pour la classification des semelles.....</i>	10
Figure 1.5	<i>Exemple du profilée.....</i>	12
Figure 2.1	<i>Relation Moment fléchissant Effort tranchant.....</i>	18
Figure 2.2	<i>Relation Moment fléchissant Effort Normal.....</i>	19
Figure 2.3	<i>Flexion sous un effort de compression.....</i>	20
Figure 2.4	<i>Courbes d'imperfection des profilés dans le C.C.M 97.....</i>	22
Figure 3.16	<i>- Conditions d'appuis du poteau étudié.....</i>	35

Liste des tableaux

Tableau 1.1	<i>Classification des âmes.....</i>	<i>7</i>
Tableau 1.2	<i>Classification des parois de semelles en console.....</i>	<i>9</i>
Tableau 1.3	<i>Classification des cornières et des sections tubulaires.....</i>	<i>11</i>
Tableau 2.1	<i>Longueur de flambement.....</i>	<i>21</i>
Tableau 2.2	<i>Valeur du facteur d'imperfection α.....</i>	<i>22</i>
Tableau 2.3	<i>Choix de la courbe de flambement.....</i>	<i>23</i>
Tableau 2.4	<i>Facteur de moment uniforme équivalent en fonction de diagramme de moment.....</i>	<i>24</i>
Tableau 2.5	<i>Module de résistance.....</i>	<i>25</i>
Tableau 2.6	<i>Courbe de déversement recommandé pour une section transversale.....</i>	<i>26</i>
Tableau 2.7	<i>Valeurs recommandées pour les facteurs d'imperfection des courbes de déversement.....</i>	<i>26</i>

Liste des images

Image 1.1	<i>Voilement local sur une poutre</i>	12
Image3 1	<i>Lancement de l'application Excel</i>	29
Image 3 2	<i>Tableau des profilés sous format Excel</i>	30
Image 3.3	<i>Caractéristiques géométriques des aciers utilisés</i>	30
Image 3.4	<i>Accès à la fenêtre développeur et lancement de Visual Basic</i>	31
Image 3.5	<i>Présentation de la page« UserForm 2 »</i>	31
Image 3.6	<i>Présentation de la flèche pour l'exécution</i>	31
Image 3.7	<i>Présentation de la poutre traitée</i>	32
Image 3.8	<i>Saisie de la nuance d'acier</i>	32
Image 3.9	<i>Choix du Profilé</i>	32
Image 3.10	<i>Choix du type de Profilé</i>	33
Image 3.11	<i>Saisie de la longueur de la barre</i>	33
Image 3.12	<i>Vérification de l'effort tranchant (Dans ce cas, la condition est vérifiée)</i>	33
Image 3.13	<i>Vérification du moment fléchissant</i>	34
Image 3.14	<i>Vérification de l'effort tranchant+moment fléchissant</i>	34
Image 3.15	<i>Vérification du déversement</i>	35
Image 3.16	<i>Conditions d'appuis du poteau étudié</i>	35
Image 3.17	<i>représentation de la vérification de l'effort normal</i>	36
Image 3.18	<i>Vérification du flambement</i>	36

Table des matières

Dédicaces.....	II
Remerciements.....	IV
Résumé.....	V
Liste des notations.....	VIII
Liste des figures.....	X
Liste des image	XI
Liste des tableaux.....	XII
Table des matières.....	XIII
INTRODUCTION GENERAL.....	1
CHAPITRE 1 CLASSIFICATION DES SECTIONS TRANSVERSALES.....	2
1 INTRODUCTION.....	3
2 NOTATIONS.....	3
3 CLASSIFICATION DES SECTIONS TRANSVERSALES.....	4
3.1 BASE.....	5
3.2 PRINCIPE DE CLASSIFICATION.....	5
4 CLASSIFICATION DES SECTIONS.....	5
5 ETAPES DE LA CLASSIFICATION D'UNE SECTION TRANSVERSALE.....	5
6 COMMENTAIRE SUR LE TABLEAU 1-1.....	8
7 AME COMPRIME (OU PARTIE DE L'AME COMPRIMEE).....	8
8 SEMELLE COMPRIMEE (OU UNE PARTIE DE LA SEMELLE COMPRIMEE)..	10
9 PAROIS DE SEMELLES EN CONSOLE.....	10
10 CLASSE DE LA SECTION TOTALE.....	11
11 APPLICATION.....	12
12 CONCLUSION.....	13
CHAPITRE 2 RÉSISTANCE ET INSTABILITÉS DES ÉLÉMENTS D'UNE STRUCTURE MÉTALLIQUE.....	14
1 INTRODUCTION.....	15

2	EFFORT AXIAL DE TRACTION (N).....	15
3	EFFORT AXIAL DE COMPRESSION (N).....	15
4	MOMENT FLÉCHISSANT (M).....	16
5	EFFORT TRANCHANT (V).....	16
6	MOMENT FLÉCHISSANT + EFFORT TRANCHANT($M + V$).....	16
7	MOMENT FLÉCHISSANT + EFFORT AXIAL ($M + N$).....	18
7.1	SECTION DE CLASSES 1 ET 2.....	18
	a) Flexion autour de l'axe yy	18
	b) Flexion autour de l'axe zz	19
	c) Flexion bi-axiale.....	19
7.2	SECTION DE CLASSE 3.....	19
7.3	SECTION DE CLASSE 4.....	19
8	MOMENT FLÉCHISSANT + EFFORT AXIAL + EFFORT TRANCHANT($M + N + V$).....	20
9	FLAMBEMENT.....	20
9.1	DÉFINITION.....	20
9.2	CRITERE DE RESISTANCE.....	20
9.3	VERIFICATION DU FLAMBEMENT SIMPLE.....	21
9.4	FLAMBEMENT FLEXION.....	23
10	DÉVERSEMENT.....	25
10.1	LA RESISTANCE AU DEVERSEMENT	25
10.2	VERIFICATION DES ELEMENTS COMPRIMES ET FLECHIS.....	27
11	CONCLUSION.....	27
CHAPITRE 3 LOGICIEL DE CALCUL ET VÉRIFICATIONS DES ÉLÉMENTS D'UNE STRUCTURE MÉTALLIQUE.....		28
1	PRÉSENTATION DU LOGICIEL.....	29
2	FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL.....	29
3	EXEMPLES D'APPLICATION.....	32

3.1 Exemple 1.....	32
3.2 Exemple 2.....	35
4 Conclusion.....	36
CONCLUSION GENERALE.....	37
BIBLIOGRAPHIE.....	38

Introduction générale

Le présent travail s'adresse aux étudiants de génie civil et plus particulièrement ceux en fin d'année de licence ayant des applications de calcul et vérifications lors des travaux dirigés de la matière « Structures Métalliques ».

Le nouveau code Algérien de calcul des structures en acier « CCM 97 » fournit un ensemble de nouvelles règles de calculs, plus ou moins compliqués à mettre en œuvre. Cette complexité peut conduire à des erreurs d'interprétation et de vérification.

Il a donc semblé utile de proposer un outil d'aide susceptible de contribuer modestement à une meilleure maîtrise des applications du CCM 97.

Aujourd'hui, on trouve de plus en plus des logiciels pour calculer une structure métallique en globalité, en général en 3 D, puis des macros associées traitent les phases de dimensionnement élément par élément après avoir effectué l'extraction des sollicitations selon les différentes combinaisons. L'utilisation de ces logiciels est de plus en plus répandue et il ne serait pas faux de dire que peu de calculs se font aujourd'hui autrement que par un traitement informatique.

L'idée est de développer un outil simple et facile à utiliser pour traiter un problème particulier de vérification d'un simple élément en acier. Cet outil sera construit sous forme d'une interface graphique dans un langage « Visual Basic » sous Microsoft Excel. Ainsi, la conception de ce logiciel va être sous forme d'une feuille de calcul où les données et les résultats seront affichés simultanément.

Chapitre 1

Classification des sections transversales

Classification des sections transversales

1. INTRODUCTION

Les profilés d'éléments d'une charpente métallique sont caractérisés par la classe de leur section transversale ; une propriété indispensable dans les calculs.

2. NOTATIONS

Les notations utilisées, par le règlement Algérien « CCM97 » sont définies ci-dessous (voir figure 1.1).

L'axe longitudinal des éléments structuraux est noté xx par convention.

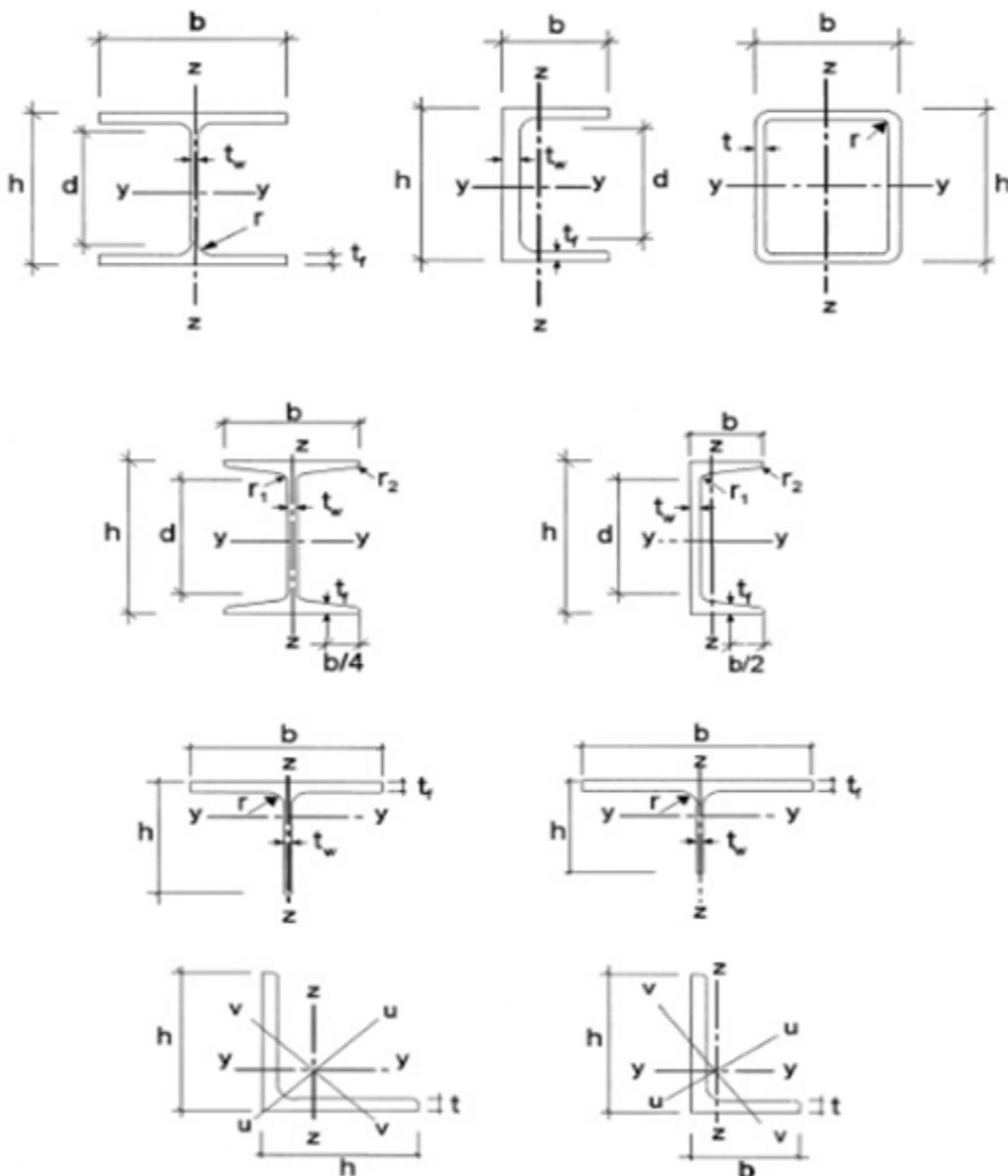


Figure 1.1 - Dimensions et axes des sections

Classification des sections transversales

3. CLASSIFICATION DES SECTIONS TRANSVERSALES

3.1 BASE

Lorsque l'on utilise une analyse globale élastique, les éléments peuvent avoir des sections transversales de n'importe quelle classe, à condition que le calcul de ces éléments prenne en compte la limitation éventuelle de la résistance de la section par le voilement local.

3.2 PRINCIPE DE CLASSIFICATION

Les règles CCM97 donnent une classification des sections transversales basée essentiellement sur les critères suivants :

- Résistance de calcul.
- Capacité de rotation.
- Risque de voilement local.

4. CLASSIFICATION DES SECTIONS

On distingue 4 classes de sections

Classe 1 : Section transversales pouvant former une rotule plastique avec capacité de rotation requise pour une analyse plastique.

Classe 2 : Section transversale massive pouvant développer leur moment de résistance plastique, mais avec une capacité de rotation limitée.

Classe 3 : Section transversale dont la contrainte calculée dans la fibre extrême comprimée en acier peut atteindre la limite d'élasticité, mais dont le voilement local est susceptible d'empêcher le développement du moment de résistance plastique.

Classe 4 : Section transversale dont la résistance au moment fléchissant ou à la compression doit être déterminée avec prise en compte explicite des effets de voilement local.

Le rôle de la classification des sections transversales est d'identifier dans quelle mesure leur résistance et leur capacité de rotation sont limitées par l'apparition du voilement local.

Les lois de comportement moment-rotation correspondant à chaque classe de section peuvent être modélisées comme suit :

Classification des sections transversales

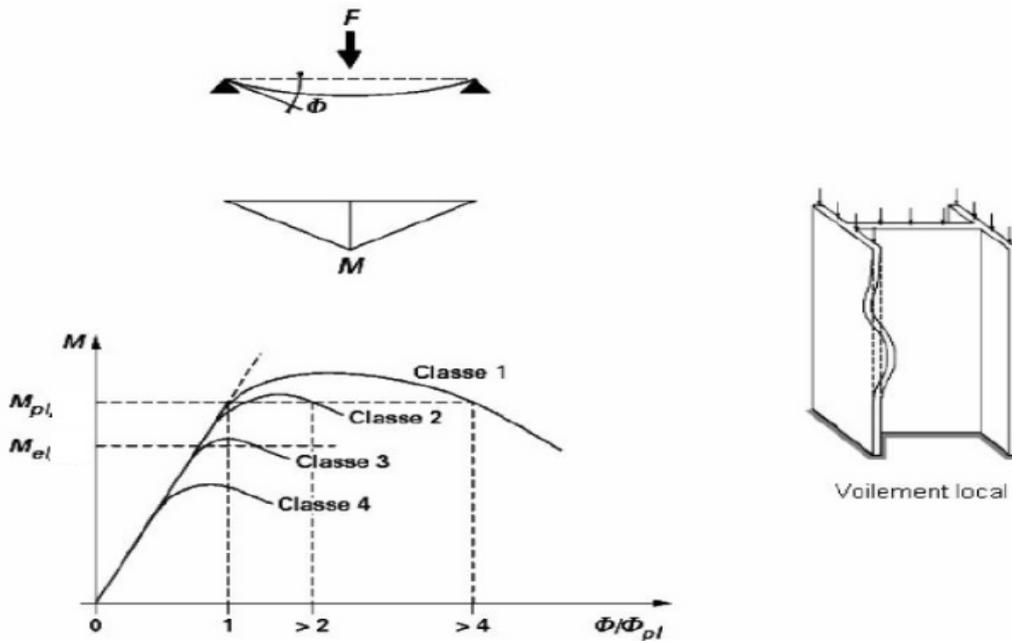


Figure 1.2 - Classes de section en acier

5 ETAPES DE LA CLASSIFICATION D'UNE SECTION TRANSVERSALE

La classification d'une section transversale doit d'abord passer par la classification de ses parois localement comprimées. Pour cela, il faut :

- ✓ Définir les parois (âme ou semelle) qui sont sollicitées en compression :
 - Une compression simple de la section \Rightarrow Tous les parois de la section sont comprimées. Elles sont donc toutes à classer.
 - Une flexion (simple ou déviée) seule ou composée de la section Déterminer la position de l'axe neutre pour définir les parois localement comprimées et les classer, en écartant celles entièrement tendues
- ✓ Une paroi localement comprimée (âme ou semelle) peut être entièrement ou partiellement comprimées.
- ✓ Une paroi partiellement comprimée, dit paroi en flexion, est traversée par l'axe neutre qui délimite sa partie comprimée de celle tendue.
- ✓ Une paroi entièrement comprimée, dit paroi comprimées, peut être obtenue dans une section fléchie (semelle comprimée).

Les profilés de construction, qu'ils soient laminés ou soudés, peuvent être considérés comme être constitués d'une âme et de semelles.

Classification des sections transversales

Le classement d'une section transversale dépend des dimensions de chacune de ses parois comprimées. Ces parois sont souvent de classes différentes. La classe de la section sera, dans ce cas, la classe la plus haute de ses parois comprimées.

La classification peut être établie en fonction des élancements limites des parois. Le tableau 1-1 donne les rapports largeur-épaisseur maximaux pour les parois de classe 1,2 ou 3. Les parois présentant un élancement supérieur à l'élancement limite de la classe 3 sont naturellement de classe 4.

Pour quelque profilés laminés courants, sollicités soit en compression seule, soit en flexion simple, les tableaux 1.1 et 1.2 donnent directement les classes ;

Classification des sections transversales

(a) Âmes : (parois internes perpendiculaires à l'axe de flexion)¹

Classe	Âme fléchie	Âme comprimée	Âme en flexion composée	
Distribution de contraintes dans la paroi (compression positive)				
1	$d/t_w \leq 72 \epsilon$	$d/t_w \leq 33 \epsilon$	Quand $\alpha > 0,5$: $d/t_w \leq 398 \epsilon / (13 \alpha - 1)$ Quand $\alpha < 0,5$: $d/t_w \leq 36 \epsilon / \alpha$	
2	$d/t_w \leq 83 \epsilon$	$d/t_w \leq 38 \epsilon$	Quand $\alpha > 0,5$: $d/t_w \leq 456 \epsilon / (13 \alpha - 1)$ Quand $\alpha < 0,5$: $d/t_w \leq 41,5 \epsilon / \alpha$	
Distribution de contraintes dans la paroi (compression positive)				
3	$d/t_w \leq 124 \epsilon$	$d/t_w \leq 42 \epsilon$	Quand $\psi > -1$: $d/t_w \leq 42 \epsilon / (0,67 + 0,33\psi)$ Quand $\psi \leq -1$: $d/t_w \leq 62 \epsilon (1 - \psi) \sqrt{(-\psi)}$	
$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y (N/mm ²)	235	275	355
	ϵ	1	0,92	0,81

Tableau 1.1 - Classification des âmes

6 COMMENTAIRE SUR LE TABLEAU 1-1

Une paroi est ici traité isolément de la section à laquelle elle appartient. Le diagramme de contraintes est propre à l'âme. Ainsi, dans le cas d'une section dissymétrique simplement fléchie, l'âme est soumise à une flexion composée.

Dans le cas de la flexion composée, la position de l'axe neutre élastique ou plastique n'est connue qu'après détermination des sollicitations dans la section, donc après l'analyse globale de la structure. Lorsque l'effort axial peut être évalué ou connu avant de procéder à l'analyse globale, il est possible en exprimant le moment résistant de la section en présence de l'effort axial.

Dans le cas d'une âme fléchie-tendue, l'élançement limite de la classe 3 est calculé avec un rapport de contrainte déterminé sur la base d'une distribution élastique de contraintes ($\psi < 1$), en faisant abstraction du fait qu'à l'état limite ultime, la limite d'élasticité serait d'abord atteinte sur la fibre tendue.

7 AME COMPRIMÉ (OU PARTIE DE L'AME COMPRIMÉE)

S'agissant d'une paroi interne perpendiculaire à l'axe de flexion, il faut prendre la hauteur de la partie droite de l'ame.

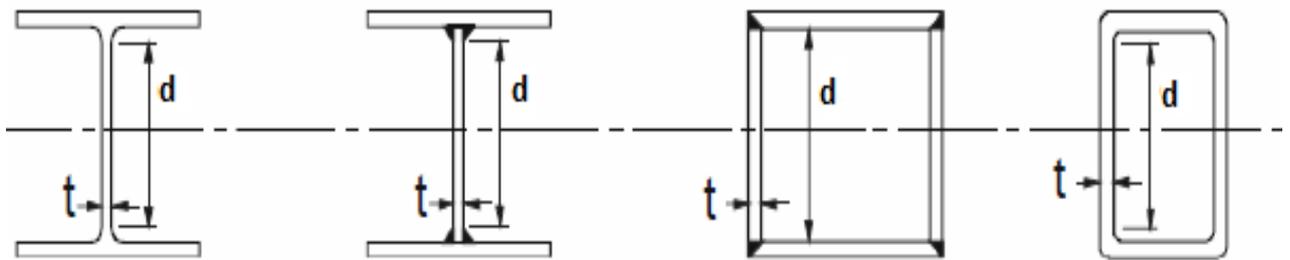


Figure 1.3 - Formes et dimensions proposées pour la classification de l'ame

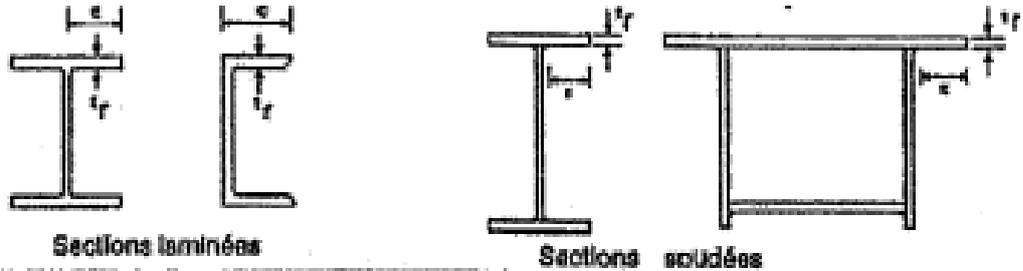
- Calculer le rapport $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y(N/mm^2)}}$ (donné aussi en bas du tableau).
- Calculer d/t_w pour une comparaison avec la valeur limite fixée.
- Classer l'ame en fonction du type de la sollicitation (flexion \equiv **colonne 1**, compression \equiv **colonne 2** et flexion composée \equiv **colonne 3**).
- Pour les sections I et H laminées soumises une flexion composée (**colonne 3**) autour de l'axe y-y, si une distribution des contraintes est adoptée sur la paroi ame, le rapport α peut être calculé avec la formule suivante :

Classification des sections transversales

$$\alpha = \frac{1}{d} \left(\frac{h}{2} + \frac{N_{sd}}{2 * t_w * f_y} - (t_f + r) \right) \leq 1$$

- Si la valeur du rapport d/t_w est supérieure à celle fixée pour la classe 3, alors la section de l'âme est de classe 4.

(c) Parois de semelles en console :



Classe	Type de section	Paroi comprimée	Paroi en flexion composée		
			bord comprimé	bord tendu	
Distribution de contraintes dans la paroi (compression positive)					
1	laminées	$c/t_f \leq 10 \epsilon$	$c/t_f \leq \frac{10 \epsilon}{\alpha}$	$c/t_f \leq \frac{10 \epsilon}{\alpha \sqrt{\alpha}}$	
	soudées	$c/t_f \leq 9 \epsilon$	$c/t_f \leq \frac{9 \epsilon}{\alpha}$	$c/t_f \leq \frac{9 \epsilon}{\alpha \sqrt{\alpha}}$	
2	laminées	$c/t_f \leq 11 \epsilon$	$c/t_f \leq \frac{11 \epsilon}{\alpha}$	$c/t_f \leq \frac{11 \epsilon}{\alpha \sqrt{\alpha}}$	
	soudées	$c/t_f \leq 10 \epsilon$	$c/t_f \leq \frac{10 \epsilon}{\alpha}$	$c/t_f \leq \frac{10 \epsilon}{\alpha \sqrt{\alpha}}$	
Distribution de contraintes dans la paroi (compression positive)					
3	laminées	$c/t_f \leq 15 \epsilon$	$c/t_f \leq 23 \epsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}$ $c/t_f \leq 21 \epsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}$ Pour k_σ voir tableau 5.3.3		
	soudées	$c/t_f \leq 14 \epsilon$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$		f_y (N/mm ²)	235	275	355
		r	1	0,92	0,81

Tableau 1.2 - Classification des parois de semelles en console

Classification des sections transversales

8 SEMELLE COMPRIMÉE (OU UNE PARTIE DE LA SEMELLE COMPRIMÉE)

En distinguant entre une paroi interne et une paroi en consol, en se réfère au tableau 1-2.

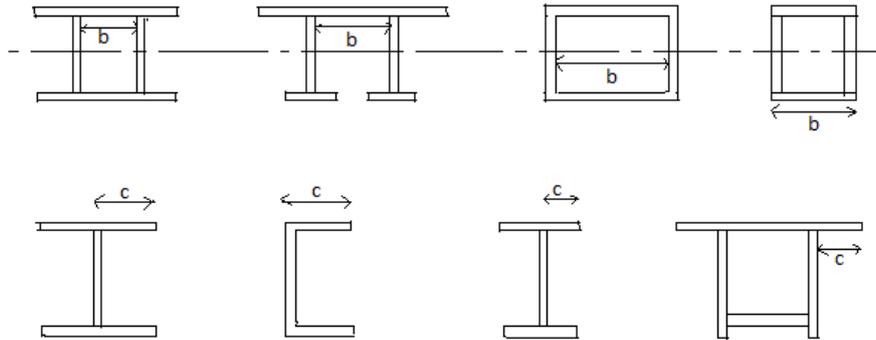


Figure 1.4 - Formes et dimensions proposées pour la classification des semelles

- Il faut respecter la similitude de la semelle avec une forme proposée dans les tableaux [figure 1-7] pour mesurer les valeurs de b ou c et t_f .
- Le rapport $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y(N/mm^2)}}$ étant calculé, il faut tenir compte du type de formage du profile (laminé ou soudé) pour la classification.
- Retenir le type de la sollicitation dans la paroi pour calculer le rapport exigé :

9 PAROIS DE SEMELLES EN CONSOLE

[Tableau 1-2]

- Paroi comprimée : la paroi en console est entièrement comprimée. on peut avoir ce cas sous une flexion mono axial/y (ou/z si la paroi est totalement comprimée) seule ($N_{sd}=0$) ou composée ($N_{sd}\neq 0$) ; une compression simple ; une flexion déviée seule ou composée.
- Paroi en flexion : une console de semelle est considérée en flexion si l'axe neutre passe à travers sa paroi. Suivant le signe de la contrainte à son bord ; deux cas de limites ont été proposée dans le tableau 1-2.

Classification des sections transversales

Ces cas sont obtenus sous une flexion mono axial seule ou composée quand l'axe de flexion est perpendiculaire à la paroi, ou sous une flexion déviée (seule : $N_{sd}=0$ ou composée : $N_{sd}\neq 0$).

- Dans la colonne convenable, classer la semelle moyennant le rapport calculé.
- Si la valeur calculé du rapport est supérieure à celle fixée pour la classe 3, alors la section de la semelle est de classe 4.

Le tableau 1-4 permet la classification des parois comprimées pour les profilés laminés en cornières en considérant leurs ailes comme des semelles en console [Tableau 1-3].

d) Cornières				
Se référer aussi à (c) "Parois de semelles en console" (voir feuille 3)	<p>(Ne s'applique pas aux cornières en contact continu avec d'autres composants)</p>			
Classe	Section comprimée			
Distribution de contraintes dans la section (compression positive)				
3	$\frac{h}{t} \leq 15 \epsilon$ $\frac{b+h}{2t} \leq 11,5 \epsilon$			
e) Sections tubulaires				
Classe	Section fléchie et/ou comprimée			
1	$d/t \leq 50 \epsilon^2$			
2	$d/t \leq 70 \epsilon^2$			
3	$d/t \leq 90 \epsilon^2$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y (N/mm ²)	235	275	355
	ϵ	1	0,92	0,81
	ϵ^2	1	0,85	0,66

Tableau 1.3 - Classification des cornières et des sections tubulaires

10 CLASSE DE LA SECTION TOTALE

Classification des sections transversales

- La classe d'une section transversale est prise la plus défavorable entre les classes de ses parois constituantes (âme et semelle).

Le phénomène de voilement local réduit les résistances des sections de classe 4. Cette réduction peut être prise en compte en remplaçant les largeurs nominales des parois comprimées de classe 4 par les largeurs efficaces définies dans le tableau 1-2.



Image1.1 - Voilement local sur une poutre

11 Application : Classification de la section IPE160.

Classez la section d'un IPE 160 constitué d'un acier F_e360 dans la compression.

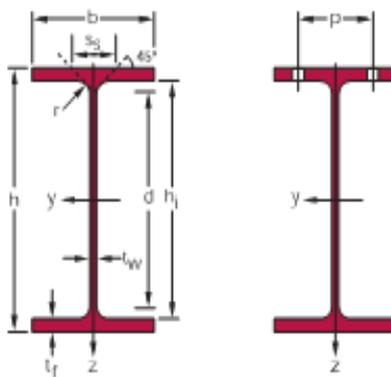


Figure 1.5 – Exemple du profilée

Les caractéristiques géométriques de la section IPE160 :

$$h = 160 \text{ mm}$$

$$b = 82 \text{ mm}$$

$$d = 127,2 \text{ mm}$$

$$t_w = 5 \text{ mm}$$

Classification des sections transversales

$$t_f = 7,4 \text{ mm}$$

Calcul du coefficient ε :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{fy}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

La semelle supérieur et la semelle inférieur : (Tableau 1-3 ; parois comprimé)

$$C = b / 2 = 82 / 2 = 41 \text{ mm} \Rightarrow \left(\frac{c}{t_f} = \frac{41}{7,4} = 5,54 < 10 \cdot \varepsilon = 10 \right)$$

Les semelles sont de classe 1.

L'âme : (Tableau 1-1 ; âme comprimé)

$$\frac{d}{t_w} = \frac{127,2}{5} = 25,44 \Rightarrow (25,44 < 33 \cdot \varepsilon = 33)$$

L'âme est de classe 1.

\Rightarrow La section est de classe 1 en compression.

12 CONCLUSION

Une attention particulière doit être faite sur la classification des profilés transversale car de cette dernière dépend de la résistance de calcule, la capacité de rotation et le risque de voilement locale.

En effet, c'est la classification des sections transversale qui fait la différence avec l'ancien règlement, en occurrence, le CM 66.

Dans l'ensemble, il y'a quatre classes et chaqu'une est définie par des paramètres telle que le d/t_w ou c/t_f .

CHAPITRE 2

RÉSISTANCE ET INSTABILITÉS DES ÉLÉMENTS D'UNE STRUCTURE MÉTALLIQUE

Résistance et instabilité des éléments d'une structure métallique

1 INTRODUCTION

En construction métallique, non seulement il faut vérifier la résistance des éléments mais aussi leur stabilité telle que le « flambement, déversement et voilement ».

Il existe plusieurs vérifications de résistance selon les sollicitations appliquées, à s'avoir : traction, compression, effort tranchant, flexion ainsi que leur combinaison. Ces derniers vont être traités dans ce chapitre.

2 EFFORT AXIAL DE TRACTION « N »

Dans un élément sollicité en traction, l'effort de traction « N » dans chaque section transversale. Il doit rester inférieur à l'effort résistant de traction, soit :

$$N \leq N_R = \min[N_{pl} ; N_u ; N_{net}]$$

Avec :

$$N_{pl} = A \cdot f_y / \gamma_{M_0} \quad (\text{Résistance plastique de la section brute}).$$

$$N_u = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M_2} \quad (\text{Résistance ultime de la section nette au droit des trous des fixations}).$$

$$N_{net} = A_{net} \cdot f_y / \gamma_{M_0} \quad (\text{Résistance plastique de la section nette pour les assemblages par boulons précontraint à l'É.L.U}).$$

3 EFFORT AXIAL DE COMPRESSION « N »

Dans un élément sollicité en compression axiale, l'effort de compression « N » dans chaque section transversale doit rester inférieur à l'effort résistant de compression, soit :

$$N \leq N_R$$

Avec :

Pour les sections de classe 1,2 ou 3 :

$$N_R = N_{pl} = A \cdot f_y / \gamma_{M_0} \quad (\text{Résistance plastique de la section brute}).$$

Pour les sections de classe 4 :

$$N_R = N_o = A_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M_1} \quad (\text{Résistance de calcul de la section brute au voilement local}).$$

A_{eff} : Aire efficace de la section

Résistance et instabilité des éléments d'une structure métallique

4 MOMENT FLÉCHISSANT « M »

En l'absence d'effort tranchant, le moment fléchissant « M » dans chaque section transversale doit rester inférieur au moment résistant, soit :

$$M \leq M_R$$

Avec :

Pour les sections de classe 1 ou 2 :

$$M_R = M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M_0} \text{ (Moment résistant plastique).}$$

Pour les sections de classe 3 :

$$M_R = M_{el} = W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M_0} \text{ (Moment résistant élastique).}$$

Pour les sections de classe 4 :

$$M_R = M_0 = W_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M_1} \text{ (Moment résistant au voilement local).}$$

5 EFFORT TRANCHANT « V »

L'effort tranchant de chaque section transversale doit rester inférieur à l'effort tranchant résistant, soit :

$$V \leq V_{pl} = 0,58 \cdot f_y \cdot A_V / \gamma_{M_0}$$

A_V : est l'aire de cisaillement, qui peut être déterminé comme suite (pour un effort parallèle à l'âme) :

- Profils laminés I ou H :

$$A_V = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) t_f$$

- Profils laminés U :

$$A_V = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) t_f$$

- Profiles reconstitués soudés I ou H :

$$A_V = (h - 2 \cdot t_f) t_w$$

6 MOMENT FLÉCHISSANT + EFFORT TRANCHANT « M + V »

Le moment résistant plastique d'une section transversale est réduit par la présence de cisaillement.

Si l'effort tranchant est faible cette réduction est négligeable (et compensée par l'écroutissement du matériau).

Résistance et instabilité des éléments d'une structure métallique

En revanche, dès lors que l'effort tranchant dépasse la moitié de l'effort tranchant plastique résistant, il faut prendre en compte son interaction sur le moment résistant plastique, soit :

$$\text{Si } V \leq 0,5V_{pl}, \quad M \leq M_R$$

$$\text{Si } V > 0,5V_{pl}, \quad M \leq M_V$$

Avec :

M_R : Moment résistant plastique

M_V : moment résistant plastique réduit compte tenu de l'effort tranchant, déterminé en utilisant une limite d'élasticité réduite f_{red} pour l'aire de cisaillement seule soit :

$$f_{red} = (1 - \rho)f_y$$

Avec :

$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V}{V_{pl}} - 1 \right)^2$$

Pour les sections transversales à semelles égales et fléchies suivant l'axe de forte inertie, on obtient :

$$M_v = [W_{pl} \cdot f_y - W_v \cdot f_y + W_v \cdot f_{red}] / \gamma_{M_0}$$

$$M_v = [W_{pl} - W_v] \cdot f_y / \gamma_{M_0}$$

Avec M_v : module de résistance plastique de l'aire de cisaillement A_V .

$$A_V = h \cdot t_w \quad \text{Et} \quad w_v = \frac{h \cdot t_w^2}{4} = \frac{A_V^2}{4 \cdot t_w}$$

Soit :

$$M_V = \left[W_{pl} - \frac{\rho \cdot A_V^2}{4 \cdot t_w} \right] \frac{f_y}{\gamma_{M_0}}$$

Qui peut se représenter graphiquement comme ci-dessous:

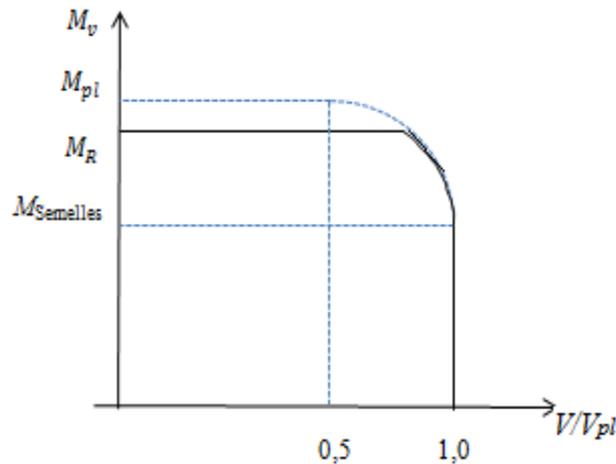


Figure 2.1 – Relation Moment fléchissant Effort tranchant

7 MOMENT FLÉCHISSANT + EFFORT AXIAL « M + N »

7.1 SECTION DE CLASSES 1 ET 2

Pour les sections de classe 1 et 2, il faut vérifier en l'absence d'effort tranchant que le moment fléchissant « M » reste inférieur au moment résistant plastique « M_N » réduit de fait de l'effort axial, soit : $M \leq M_N$

Avec :

Pour un plat :

$$M_N = M_{pl} \left(1 - \left[\frac{N}{N_{pl}} \right]^2 \right)$$

Et le critère devient :

$$\frac{M}{M_{pl}} + \left(\frac{N}{N_{pl}} \right)^2 \leq 1$$

Pour une section comportant des semelles :

- Si $N \leq \min[0,25N_{pl}; 0,50A_w \cdot f_y / \gamma_{M_0}]$; alors $M_N = M_{pl}$
- Si $> \min[0,25N_{pl}; 0,50A_w \cdot f_y / \gamma_{M_0}]$, $A_w = A - 2 \cdot b \cdot t_f$ étant l'aire de l'âme ; il faut distinguer 3 cas :

a) Flexion autour de l'axe yy

$$M_{Ny} = M_{ply} \frac{1 - \frac{N}{N_{pl}}}{1 - 0,5a}$$

$$\text{Avec } a = \min \left[\frac{A_w}{A}; 0,5 \right]$$

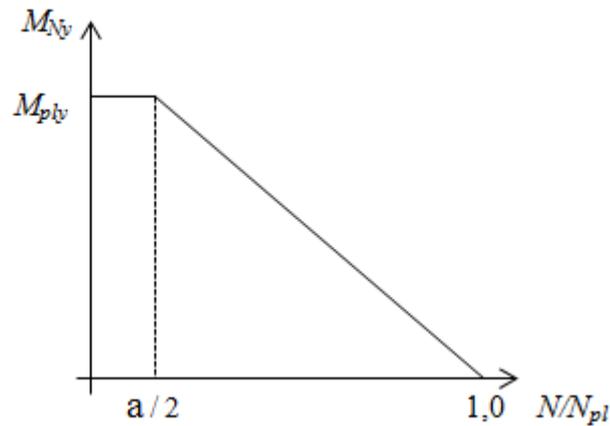


Figure 2.2 – Relation Moment fléchissant Effort Normal

b) Flexion autour de l'axe zz

$$M_{Nz} = M_{plz} \left[1 - \left(\frac{\frac{N}{N_{pl}} - a}{1 - a} \right)^2 \right]$$

Avec : $a = \min \left[\frac{A_w}{A}; 0,5 \right]$

c) Flexion bi-axiale

$$\left[\frac{M_y}{M_{Ny}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_z}{M_{Nz}} \right]^\beta \leq 1$$

Les exposants α et β valent, pour des sections en I et H :

$$\alpha = 2 \text{ Et } \beta = 5 \frac{N}{N_{pl}} \quad \text{avec } \beta \geq 1$$

7.2 SECTION DE CLASSE 3

Les sections de classe 3 sont considéré comme satisfaisante si la contrainte longitudinale maximale σ_x vérifie la condition $\sigma_x \leq f_y / \gamma_{M_0}$

Ce qui s'écrit encore :

$$\frac{N}{A} + \frac{M_y}{W_{ely}} + \frac{M_z}{W_{elz}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M_0}}$$

7.3 SECTION DE CLASSE 4

Les sections de classe 4 considérés comme satisfaisantes, si la contrainte longitudinale maximale σ_x calculée en utilisant les largeurs efficaces des parois comprimées vérifient la condition :

$$\sigma_x \leq f_y / \gamma_{M_1}$$

Résistance et instabilité des éléments d'une structure métallique

Ce qui s'écrit encore :

$$\frac{N}{A_{eff}} + \frac{M_y + N \cdot e_y}{W_{effy}} + \frac{M_z + N \cdot e_z}{W_{effz}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Avec :

e : Décalage de l'axe neutre concerné, la section transversale étant supposée soumise à une compression uniforme ($N=0$).

8 MOMENT FLÉCHISSANT + EFFORT AXIAL + EFFORT TRANCHANT « M + N + V »

Lorsque l'effort tranchant dépasse la moitié de l'effort tranchant résistant plastique, il faut prendre en compte son effet, ainsi que celui de l'effort axial, pour calculer le moment résistant plastique réduit.

Si $V \leq 0,5 \cdot V_{pl}$ critères du paragraphe 2.7 à vérifier.

Si $V > 0,5 \cdot V_{pl}$ la résistance de calcul de la section transversale aux combinaisons de moment et effort axial doit être calculée en utilisant une limite d'élasticité réduite f_{red} pour l'aire de cisaillement A_V .

Avec :

$$f_{red} = (1 - \rho) \cdot f_y \text{ et } \rho = \left(\frac{2 \cdot V}{V_{pl}} - 1 \right)^2$$

9 FLAMBEMENT

9.1 DEFINITION

Le flambement est un phénomène d'instabilité d'une structure qui, soumise à un effort normal de compression, a tendance à fléchir et se déformer dans une direction perpendiculaire à l'axe de compression (passage d'un état de compression à un état de flexion).

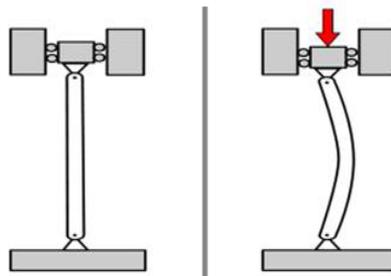


Figure 2.3 - Flexion sous un effort de compression

9.2 CRITERE DE RESISTANCE

Résistance et instabilité des éléments d'une structure métallique

$$\lambda = \frac{l_f}{i} \quad \text{Élancement}$$

$$\sigma_c = \frac{N}{A} \quad \text{Contrainte de compression}$$

$$N_c = \frac{\pi^2 \cdot EI}{l^2} \quad \text{Effort critique d'Euler}$$

$$\sigma_c = \frac{N_c}{A} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \quad \text{Contrainte critique d'Euler}$$

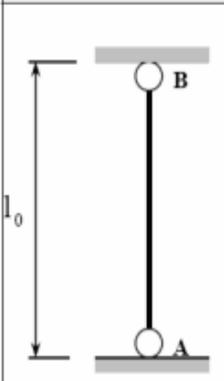
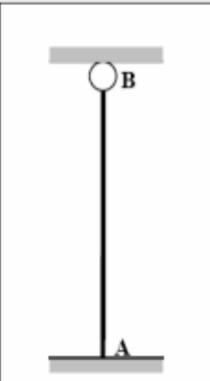
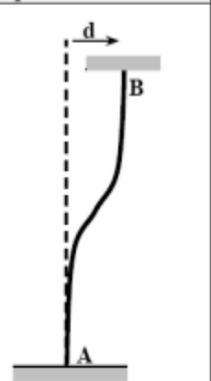
Longueur de flambement l_f en fonction des liaisons aux appuis				
A et B sont sur la même verticale			Déplacement de B en tête de poteau	
				
$l_f = l_0$	$l_f = \frac{\sqrt{2}}{2} l_0$	$l_f = \frac{l_0}{2}$	$l_f = 2 l_0$	$l_f = l_0$

Tableau 2.1 - Longueur de flambement

9.3 VERIFICATION DU FLAMBEMENT SIMPLE

On doit vérifier que

$$N_{sd} \leq N_{Rd}$$

Avec

$$N_{Rd} = \frac{\chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\gamma_{M1} = 1.1$$

$$\beta_A = 1 \quad \text{Pour les sections de classe 1, 2, 3}$$

$$\beta_A = \frac{A_{ff}}{A} \quad \text{Pour les sections de classe 4}$$

Le coefficient χ prend en compte les imperfections de toutes sortes. Pour le déterminer,

Résistance et instabilité des éléments d'une structure métallique

on passe par les 4 courbes de flambement correspondantes à une graduation des imperfections présentées par les barres réelles. Les courbes de flambement dépendent du type de section, des caractéristiques géométriques ainsi que de l'axe de flambement.

Courbe de flambement	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Facteur D'imperfection α	0.21	0.34	0.49	0.76

Tableau 2.2 - Valeur du facteur d'imperfection α

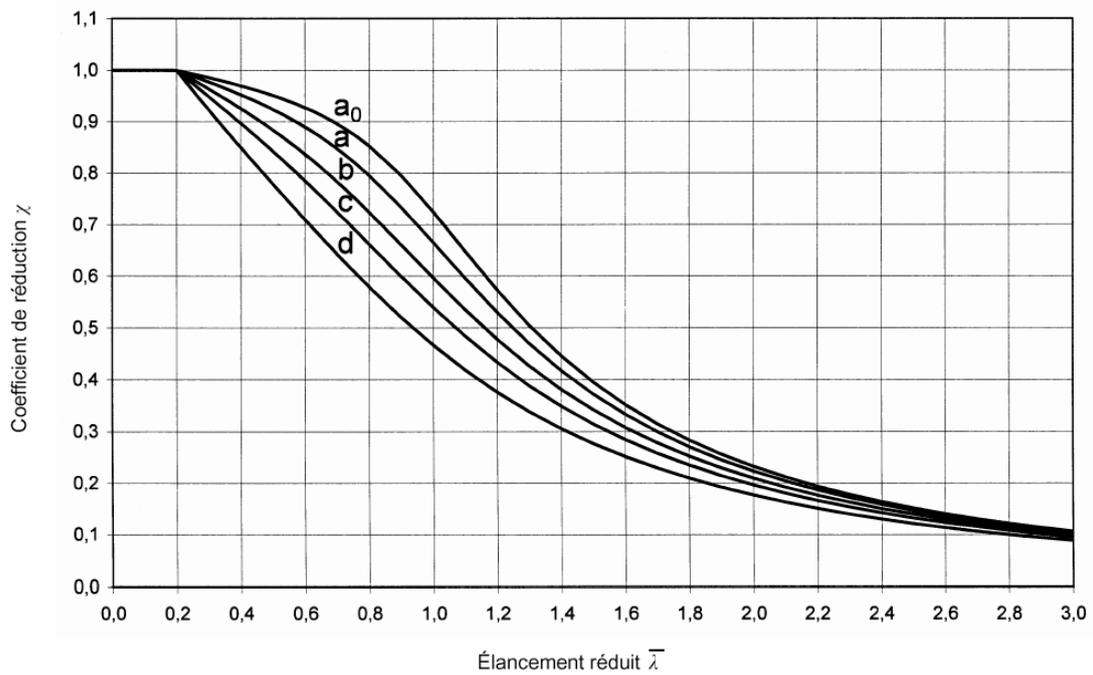


Figure 2.4 - Courbes d'imperfection des profilés dans le C.C.M 97

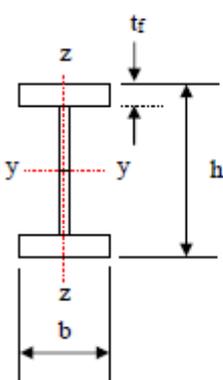
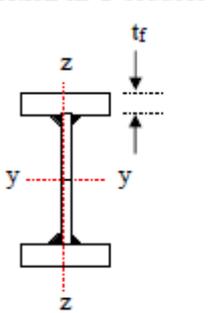
Tableau 5 Choix de la courbe de flambement correspondant à une section			
Type de Section	limites	Axe de flambement	Courbe de flambement
Section en I laminées 	$h/b > 1.2$ $t_f \leq 40\text{mm}$	$y-y$ $z-z$	a b
	$40\text{mm} < t_f \leq 100\text{mm}$	$y-y$ $z-z$	b c
	$h/b \leq 1.2$ $t_f \leq 100\text{mm}$	$y-y$ $z-z$	b c
	$t_f > 100\text{mm}$	$y-y$ $z-z$	d d
Section en I soudées 	$t_f \leq 40\text{mm}$	$y-y$ $z-z$	b c
	$t_f > 40\text{mm}$	$y-y$ $z-z$	c d

Tableau2.3 - Choix de la courbe de flambement

Calculer ε :
$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Calculer λ_1 :
$$\lambda_1 = 93,9 * \varepsilon$$

Calculer l'élancement λ :
$$\lambda = \frac{L}{i}$$

Calculer l'élancement réduit $\bar{\lambda}$:
$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} * \sqrt{\beta_A}$$

Calculer ϕ :
$$\phi = 0,5 [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

Calculer χ :
$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

9.4 FLAMBEMENT FLEXION

Les éléments sollicités simultanément en flexion et en axiale, doivent satisfaire à diverses conditions, selon la classe de leur section transversale.

Sections de classe 1 et 2 :

Résistance et instabilité des éléments d'une structure métallique

$$\frac{N_{sd}}{\chi_{\min} \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_y \cdot M_{y,sd}}{W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_z \cdot M_{z,sd}}{W_{pl,z} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

Avec:

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y \cdot N_{sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y} \quad \text{Mais } k_y \leq 1$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z \cdot N_{sd}}{\chi_z \cdot A \cdot f_y} \quad \text{Mais } k_z \leq 1$$

$$\mu_y = \bar{\lambda} \cdot (2 \cdot \beta_{Mz} - 4) + \left[\frac{W_{pl,z} - W_{el,z}}{W_{el,z}} \right] \quad \text{Mais } \mu_y \leq 0,9$$

$$\mu_z = \bar{\lambda} \cdot (2 \cdot \beta_{My} - 4) + \left[\frac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{el,y}} \right] \quad \text{Mais } \mu_z \leq 0,9$$

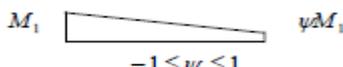
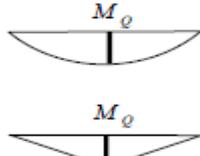
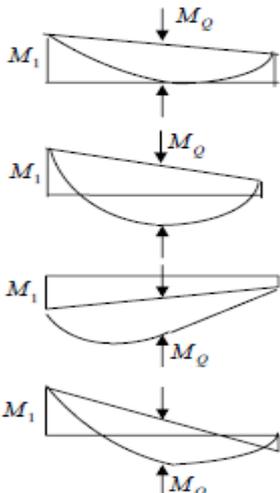
Tableau 8. Facteur de moment uniforme équivalent β_M	
Diagramme de moment	Facteur de moment uniforme équivalent β_M
<p>Moments d'extrémités</p>  <p>M_1 ψM_1 $-1 \leq \psi \leq 1$</p>	$\beta_{M\psi} = 1.8 - 0.7\psi$
<p>Moments dus à des charges transversales</p>  <p>M_0 M_0</p>	$\beta_{M,0} = 1.3$ $\beta_{M,0} = 1.4$
<p>Moments dus à des charges transversales</p>  <p>M_0 M_0 M_0 M_0</p>	$\beta_M = \beta_{M\psi} + \frac{M_0}{\Delta M} (\beta_{M,0} - \beta_{M\psi})$ $M_0 = \max M $ dû aux charges transversales seulement Pour diagramme de moment sans changement de signe $\Delta M \begin{cases} \max M \\ \max M + \min M \end{cases}$ Pour diagramme de moment avec changement de signe

Tableau 2.4 - Facteur de moment uniforme équivalent en fonction de diagramme de moment

Résistance et instabilité des éléments d'une structure métallique

10 DÉVERSEMENT

Les éléments structuraux élancés, chargés dans leur plan rigide, ont tendance à présenter une instabilité dans un plan plus flexible. Dans le cas d'une poutre fléchie selon son axe de forte inertie, la ruine peut survenir sous une forme d'instabilité qui provoque une flèche latérale combinée à une torsion ; la poutre se dérobe, c'est le déversement.

Une fois que le déversement s'est produit, la poutre présente un comportement instable similaire à celui correspondant au flambement par divergence.

Pour une poutre, constituée d'un matériau homogène et élastique, soumise à un moment de flexion constant. L'étude théorique de la stabilité conduit à une valeur critique correspondant à une bifurcation d'équilibre. Dans le cas particulier d'une poutre comportant une section constante bi-symétrique, supposée indéformable et dont les extrémités sont simplement maintenues en torsion, une expression classique de ce moment critique de déversement a été établie sous la formule :

$$M_{Cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_t \cdot \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L^2 \cdot G \cdot I_t} \right)}$$

La valeur du moment critique de déversement est modifiée dans la pratique par les caractéristiques réelles de la barre comprenant les imperfections du matériau, les dimensions réelles de la section, la condition de liaisons, la variation du moment de flexion et la position du point d'application des charges transversales par rapport au centre de cisaillement qui peut être celui du centre de gravité de la section.

10.1 LA RÉSISTANCE AU DEVERSEMENT

Pour une barre maintenue latéralement et soumise à une flexion selon l'axe fort, la vérification réglementaire vis-à-vis du déversement consiste à vérifier que :

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

Le moment résistant de calcul au déversement s'exprime par la relation suivante

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

χ_{LT} : Coefficient de réduction pour le déversement

W_y : Module de résistance dépendant de la classe de la section transversale

Classe	1 ou 2	3	4
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$

Tableau 2.5 - Module de résistance

Résistance et instabilité des éléments d'une structure métallique

Cas général :

Le coefficient de réduction pour le déversement χ_{LT} , se détermine à partir de la relation

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0.5}} \quad \text{Mais} \quad \chi_{LT} \leq 1$$

$$\phi_{LT} = 0.5 \cdot [1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \left[\beta_w \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{M_{cr}} \right]^{0.5}$$

M_{cr} Est le moment critique pour le déversement élastique

α_{LT} Le facteur d'imperfection qui conditionne le choix de la courbe de déversement

Section transversales	Limites	Courbe de déversement
Section en I laminées	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Section en I soudées	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Autre section	-	d

Tableau 2.6 - Courbe de déversement recommandé pour une section transversale

Les valeurs de α_{LT} sont données dans le tableau :

Courbe de déversement	a	b	c	d
Facteur d'imperfection α_{LT}	0.21	0.34	0.49	0.76

Tableau 2.7 - Valeurs recommandées pour les facteurs d'imperfection des courbes de déversement

Le moment critique de déversement élastique peut être déterminé par une analyse de stabilité élastique de la barre, à condition que le calcul prenne en compte tous les paramètres susceptibles d'affecter notablement la valeur de M_{cr} tels que

- ✓ La géométrie de la section.
- ✓ La rigidité au gauchissement.
- ✓ La position verticale de la charge transversale par rapport au centre de cisaillement.
- ✓ Les conditions de maintien latéral.

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(K_z \cdot L)^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{K_z}{K_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(K_z \cdot L^2) \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} + (C_2 \cdot Z_g)^2 - C_2 \cdot Z_g \right\}$$

E Module de Young.

G Module de cisaillement.

I_z Inertie de flexion par rapport à l'axe faible z.

Résistance et instabilité des éléments d'une structure métallique

I_t	Inertie de torsion.
I_w	Inertie de gauchissement.
L	Longueur de la barre ou tronçon de barre étudié.
K_z Et K_w	Coefficients de longueur de flambement.
Z_g	Distance entre le point d'application de la charge et le centre de cisaillement.
C_1 Et C_2	Coefficients d'épandant des conditions de maintien aux extrémités

10.2 VERIFICATION DES ELEMENTS COMPRIMES ET FLECHIS

On doit vérifier ces éléments en cumulant linéairement leurs effets ; pour les classes 1 et 2

$$\frac{N_{sd}}{\chi_z \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{K_{LT} M_{y, sd}}{\chi_{LT} W_{pl, y} \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{K_z M_{z, sd}}{W_{pl, z} \frac{f_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

Avec:

$$K_{LT} = 1 - \frac{U_{LT} N_{sd}}{\chi_z A f_y} \quad \text{avec } K_{LT} \leq 1$$

$$U_{LT} = 0.15 \bar{\lambda}_z \beta_{MLT} - 0.15 \quad \text{avec } U_{LT} \leq 0.9$$

CONCLUSION

Afin de dimensionner ou vérifier un élément d'une structure métallique, il est essentiel d'identifier avec précision les sollicitations qui sont appliquées. En fonction du type de la sollicitation, on vérifie la formule adaptée en résistance et en instabilité.

CHAPITRE 3

PROGRAMME DE CALCUL ET VÉRIFICATIONS DES ÉLÉMENTS D'UNE STRUCTURE MÉTALLIQUE

1. PRÉSENTATION DU LOGICIEL

L'outil de calcul que nous avons développé a été conçu pour être utilisé sous Microsoft « Excel ». La programmation est donc réalisée sous « Visual Basic ». Il est ainsi indispensable d'avoir « Excel » afin de faire fonctionner notre programme.

Comme tout outil de calcul, on aura besoin des données telles que dimensions, les caractéristiques mécaniques « fournies par le fabricant » et les conditions de pose de l'élément à étudier. Puis en sortie, les efforts et les vérifications de résistance et/ou d'instabilité sont donnés et comparés.

2. FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL

Afin de mieux comprendre le fonctionnement du logiciel, nous allons traiter un exemple de calcul. Pour cela, on lance l'application « Excel ». L'utilisateur doit absolument avoir sa base de données des profilés « téléchargeable sur le site web du plus gros fabricant d'acier, à savoir Areclor Métal » et que cette dernière soit sur le même répertoire que notre application Excel.

De même, on aura besoin de connaître les caractéristiques mécaniques des aciers utilisés « f_y , f_u , ... ».

Ces informations sont déjà présentes dans notre logiciel et l'utilisateur peut les utiliser ou les modifier si le souhaite.

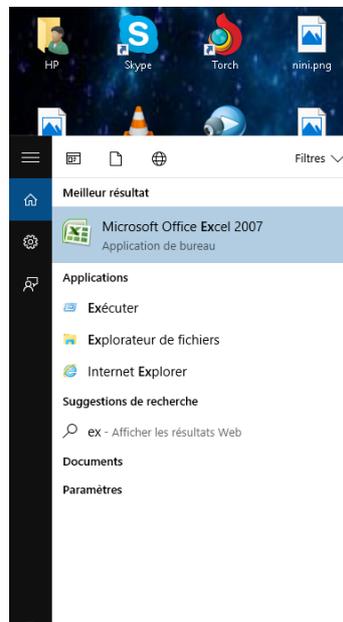


Image3 1 : Lancement de l'application Excel

Logiciel de calcul et vérifications des éléments d'une structure métallique

Profiles.xls [Mode de compatibilité] - Microsoft Excel

Accueil Insertion Mise en page Formules Données Révision Affichage Développeur

Visual Basic Macros Enregistrer une macro Utiliser les références relatives Sécurité des macros Insérer Mode Création Exécuter la boîte de dialogue Propriétés Visualiser le code Contrôles Source Kits d'extension Actualiser les données XML Importer Exporter Panneau de documents Modifier

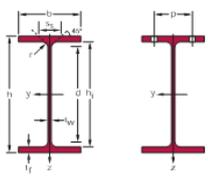
AE19 min [Npl.Rd;Nu.Rd]

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJAKAL

Poutrelles I européennes
Dimensions: IPE 80 - 600 conformes à l'Euronorme 19-57; IPE A 80 - 600; IPE O 180 - 600; IPE 750
Tolérances: EN 10034: 1993
Etat de surface conforme à EN 10163-3: 1991, classe C, sous-classe 1

European I beams
Dimensions: IPE 80 - 600 in accordance with Euronorm 19-57; IPE A 80 - 600; IPE O 180 - 600; IPE 750
Tolerances: EN 10034: 1993
Surface condition according to EN 10163-3:1991, class C, subclass 1

Europäische I-Profile
Abmessungen: IPE 80 - 600 gemäß Euronorm 19-57; IPE A 80 - 600; IPE O 180 - 600; IPE 750
Toleranzen: EN 10034: 1993
Oberflächenbeschaffenheit gemäß EN 10163-3: 1991, Klasse C, Untergruppe 1



Désignation Designation Bezeichnung	Dimensions Abmessungen	Dimensions de construction Konstruktionsmaße	Surface Oberfläche	Désignation Designation Bezeichnung	Valeurs statiques / Section properties / Statistische Kennwerte												Classification EN 1993-1-1																
					axe fort y-y strong axis y-y starke Achse y-y				axe faible z-z weak axis z-z schwache Achse z-z								Puro	comparaison															
	g	h	b	t _w	t _f	A	I _y	I _z	I _{pl,y}	I _{pl,z}	A _{ef}	W _{el,y}	W _{el,z}	W _{pl,y}	W _{pl,z}	r _s	r _z	r _y	r _w	Puro	comparaison												
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm ⁴	mm ⁴	mm ⁴	mm ⁴	mm ²	mm ³	mm ³	mm ⁴	mm ⁴	mm	mm	mm	mm														
12 IPE 80A*	5,0	70	46	3,0	4,2	6,30	49,6	59,6	-	-	0,325	44,90	50,0	44,20	16,51	10,90	3,10	3,07	4,05	2,80	4,69	1,04	17,60	0,42	0,09	1	1	-	1	1	-	8	
13 IPE 90*	5,9	80	46	3,0	5,3	7,24	45,6	59,6	-	-	0,282	54,54	50,0	49,34	20,02	23,22	2,24	2,50	5,49	2,69	5,92	1,09	28,10	0,70	0,12	1	1	-	1	1	-	8	
14 IPE 100A*	6,9	90	55	3,6	4,7	8,70	55,6	74,6	-	-	0,297	57,57	50,0	49,5	145,2	23,81	32,90	4,01	4,04	12,42	4,77	7,54	1,22	23,20	0,77	0,20	1	1	-	1	1	-	8
15 IPE 100*	6,1	100	55	4,1	5,7	10,2	55,6	74,6	-	-	0,400	49,33	50,0	51,1	171,0	24,20	29,41	4,07	5,03	15,92	5,79	9,15	1,24	23,70	1,20	0,25	1	1	-	1	1	-	8
16 IPE 120*	8,7	117,6	64	3,0	5,1	11,0	107,4	93,4	-	-	0,472	54,47	50,0	52,7	287,4	43,77	49,87	4,02	5,01	22,29	7,00	10,90	1,42	22,20	1,04	0,71	1	1	-	1	1	-	8
17 IPE 120	10,4	120	64	4,4	6,2	12,4	107,4	93,4	-	-	0,475	45,92	50,0	10,4	317,0	52,96	60,72	4,90	6,31	27,67	8,65	13,50	1,45	25,20	1,74	0,69	1	1	-	1	1	-	8
18 IPE 140*	10,5	137,4	73	3,0	5,4	12,4	124,2	112,2	-	-	0,547	52,05	50,0	10,5	434,9	63,30	76,60	5,70	6,21	34,42	9,90	15,52	1,65	23,20	1,36	1,58	1	1	-	1	1	-	8
19 IPE 140	12,9	140	73	4,7	6,9	16,4	124,2	112,2	-	-	0,551	42,70	50,0	12,9	541,2	77,32	88,34	5,74	7,64	44,92	12,31	19,25	1,65	26,70	2,45	1,98	1	1	LRd	1	1	-	8
20 IPE 160*	12,7	157	82	4	5,9	16,2	145,2	127,2	-	-	0,619	48,70	50,0	12,7	689,3	87,81	99,09	6,52	7,00	54,92	12,27	20,70	1,83	26,24	1,96	3,09	1	1	-	1	3	-	8
21 IPE 160	15,8	160	82	5	7,4	20,1	145,2	127,2	-	-	0,623	39,47	50,0	15,8	864,3	100,7	123,9	6,50	6,66	60,31	16,66	26,10	1,84	30,24	3,60	3,46	1	1	-	1	1	-	8
22 IPE 180*	15,4	177	91	4,3	6,5	19,6	164	146	M10	40	0,694	45,15	50,0	15,4	1063	120,1	135,3	7,37	9,20	51,89	16,00	27,96	2,05	27,04	2,70	5,93	1	1	-	2	3	-	8
23 IPE 180	19,0	180	91	5,3	8	23,9	164	146	M10	40	0,693	37,12	50,0	19,0	1317	146,3	166,4	7,42	11,25	100,9	22,16	34,60	2,05	31,04	4,79	7,42	1	1	-	1	2	-	8

Prêt

Image 3 2 : Tableau des profilés sous format Excel

PFCM2017-2.xlsm - Microsoft Excel

Accueil Insertion Mise en page Formules Données Révision Affichage Développeur

Visual Basic Macros Enregistrer une macro Utiliser les références relatives Sécurité des macros Insérer Mode Création Exécuter la boîte de dialogue Propriétés Visualiser le code Contrôles Source Kits d'extension Actualiser les données XML Importer Exporter Panneau de documents Modifier

Avertissement de sécurité La mise à jour automatique des liens a été désactivée Options...

E85 fu(N/mm²)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
80	2,8	0.1182	0.1132	0.1079	0.0987						
81	2,9	0.1105	0.1105	0.1012	0.0937						
82	3,0	0.1036	0.1036	0.0951	0.0882						
83	nuance d'acier	Epaisseur en mm									
84	EN100025	t ≤ 40 mm					40 < t ≤ 100 mm				
85		f _t (N/mm ²)									
86	Fe360	235	360	215	340						
87	Fe430	275	430	255	410						
88	Fe510	355	510	355	490						
89		Coefficients									
90	numero	K	C1	C2	C3						
91	1		1,132	0,459	0,525						
92	1		0,5	0,972	0,304	0,38					
93	2		1,285	1,562	0,753						
94	2		0,5	0,712	0,552	1,07					
95	3		1,385	0,553	1,73						
96	3		0,5	1,07	0,432	3,05					
97	4		1,136-2*(alpha-0,5)^2	alpha*(1,72-1,8*alpha)*C1	1,73						
98	4		0,5	1,07+2,58*(alpha-0,5)^2	alpha*(1,76-1,9*alpha)*C1	3,05					
99	5		1,565	1,267	2,64						
100	5		0,5	0,938	0,715	4,8					
101	6		1,1	1,046	0,43	1,12					
102	6		0,5	1,01	0,41	1,89					
103	7		1+2,92*(alpha)^3	alpha*(2,44-3,24*alpha)*C	1,12						
104	7		0,5	1+(0,6-alpha)*(alpha)^3	2*alpha^2*(1,3-alpha)*C1	1,89					
105	8		1,385	0,877	0						
106	8		0,5	0,992	0,411	0					
107	9		1+alpha*(1,68-2,24*alpha)	alpha*(3,44-3,62*alpha)*C	0						
108	9		0,5	1+0,48*(alpha)^3	14,4*(alpha)^2*(0,71-alpha)	0					
109	10		2	2,05	0,83	0					
110	10		2	2,05	0,83	0					
111	11		2	1,28*alpha	0,43	0					
112	11		2	1,28*alpha	0,43	0					
113											
114											

Prêt

Image 3 3 : Caractéristiques géométriques des aciers utilisés

Information Importante :

Il est impératif d'activer le développeur. Pour cela, lancer Excel, puis cliquer sur le bouton office, puis « option Excel », personnaliser le ruban, ajouter développeur.



Image 3.4 : Accès à la fenêtre développeur et lancement de Visual Basic

Avant tout, on clique sur « UserForm 2 » qui figure dans la fenêtre gauche « VB Project (PFECM2017) ».

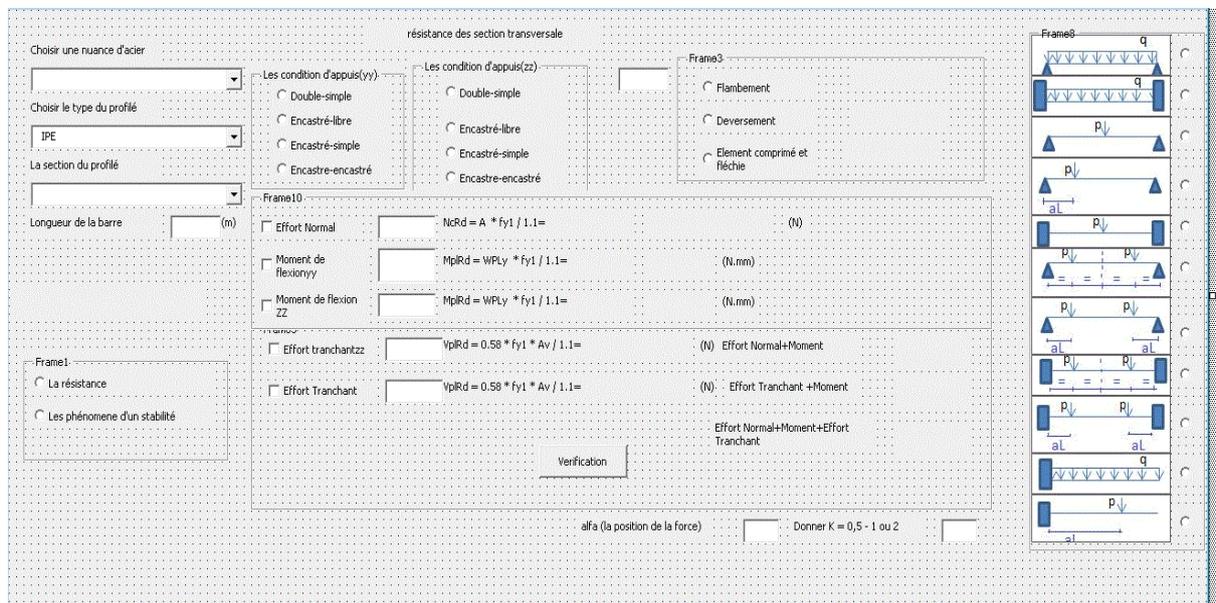


Image 3.5 : Présentation de la page « UserForm 2 »

Il faut de click sur la flèche verre pour l'exécution du programme



Image 3.6: Présentation de la flèche pour l'exécution

3. EXEMPLES D'APPLICATION

3.1.Exemple 1

Données de l'exemple à traiter

Soit une poutre métallique constituée d'un profilé laminé « IPE 270 » en acier Fe 360. Cette dernière de longueur 5 m est posée sur 2 appuis (voir schéma ci-dessous).

Elle est sollicitée par un moment maximal « $M_{y,Sd} = 98 \text{ KN.m}$ et un effort tranchant « $V_{Sd} = 240 \text{ KN}$ »

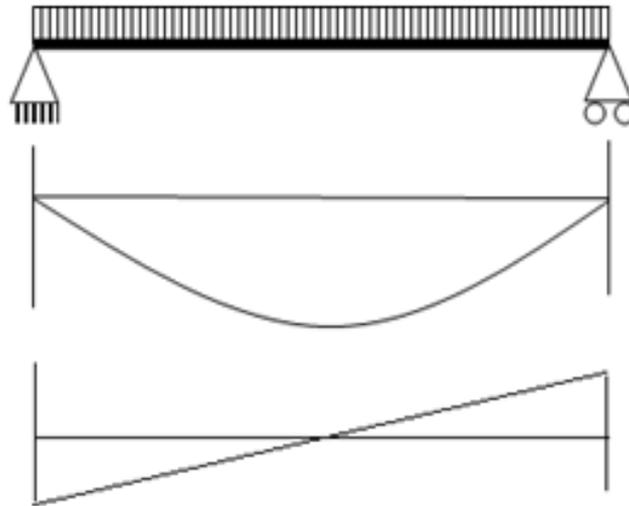


Image 3.7: Présentation de la poutre traitée

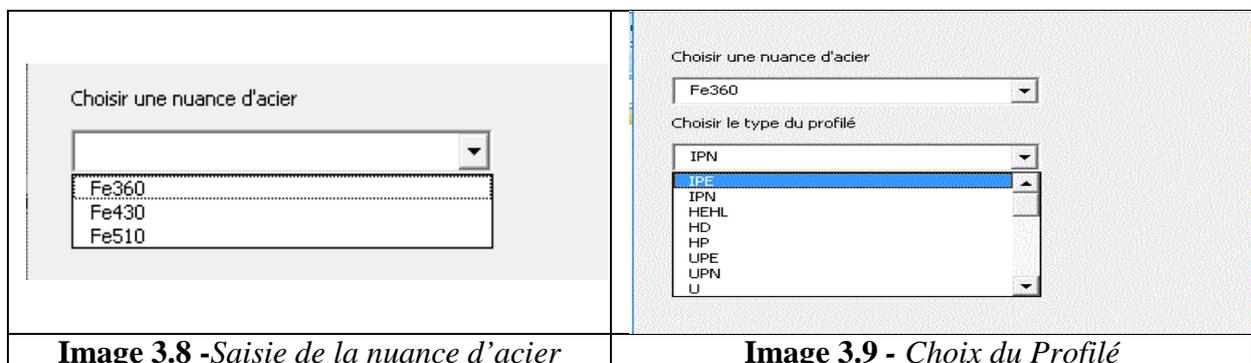
Dans cet exemple, on vérifie la résistance à l'effort tranchant, au Moment Fléchissant et à la combinaison « Effort Tranchant-Moment Fléchissant ».

De même, on va vérifier l'instabilité au déversement de la poutre.

Solution de l'exemple

Premièrement on va choisir la nuance de l'acier

Puis, on sélectionne le type de profilé et ses dimensions



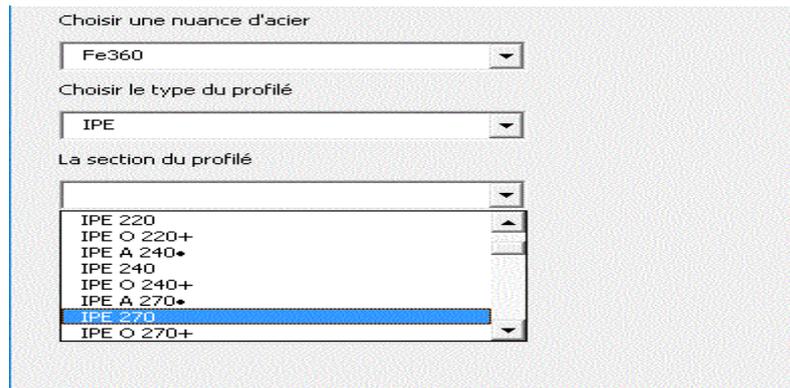


Image 3.10 – Choix du type de Profilé

La longueur de la barre est saisie

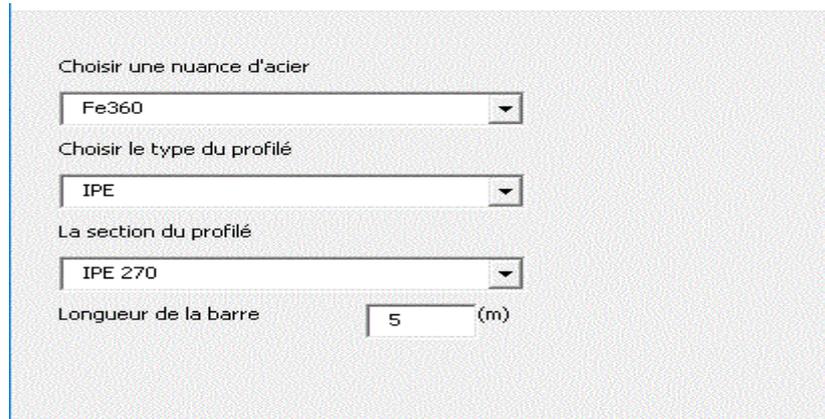


Image 3.11 – Saisie de la longueur de la barre

En fin, on fait le choix sur le type de vérification à réaliser. Dans notre cas, ça sera celle relative à l'effort tranchant dans un premier temps.

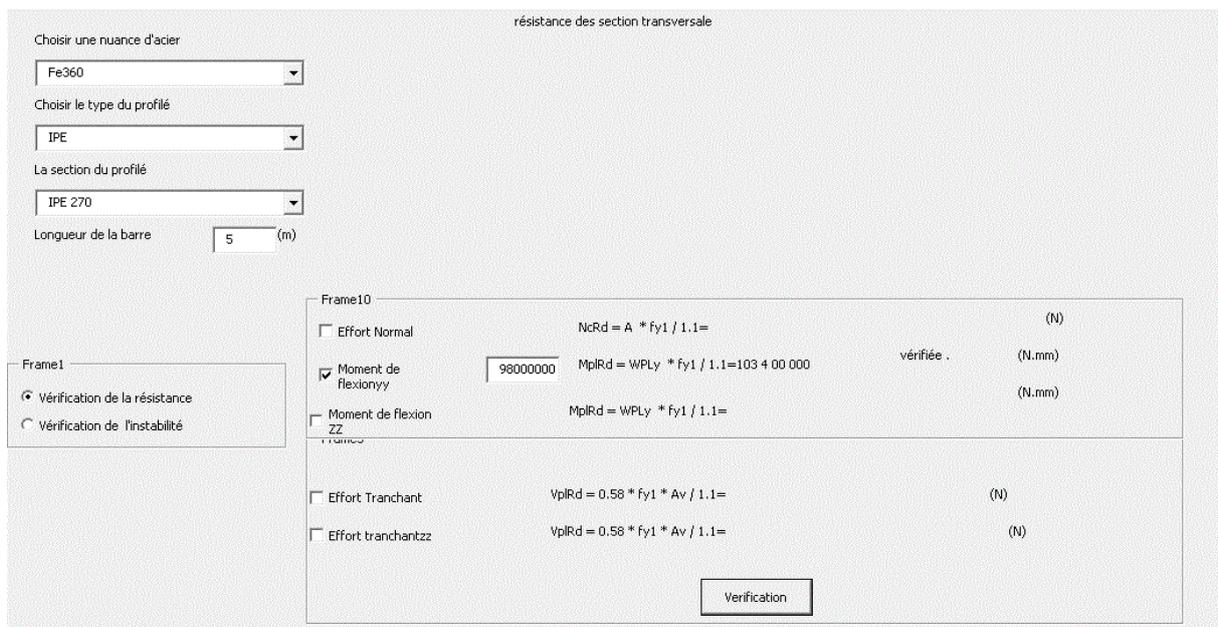


Image 3.12 - Vérification de l'effort tranchant (Dans ce cas, la condition est vérifiée)

Dans un deuxième temps, on fera une vérification de moment fléchissant

Logiciel de calcul et vérifications des éléments d'une structure métallique

résistance des section transversale

Choisir une nuance d'acier

Choisir le type du profilé

La section du profilé

Longueur de la barre (m)

Frame1
 Vérification de la résistance
 Vérification de l'instabilité

Frame10	
<input type="checkbox"/> Effort Normal	$NcRd = A * fy1 / 1.1 =$ (N)
<input type="checkbox"/> Moment de flexionyy	$MplRd = WPLY * fy1 / 1.1 = 103\ 4\ 00\ 000$ vérifiée . (N.mm)
<input type="checkbox"/> Moment de flexion ZZ	$MplRd = WPLY * fy1 / 1.1 =$ (N.mm)
<input checked="" type="checkbox"/> Effort Tranchant	<input type="text" value="240000"/> $VplRd = 0.58 * fy1 * Av / 1.1 = 2\ 73\ 755$ vérifiée . (N)
<input type="checkbox"/> Effort tranchantz	$VplRd = 0.58 * fy1 * Av / 1.1 =$ (N)

Image 3.13 Vérification du moment fléchissant

Puis, on fera la vérification des deux combinaisons « Effort Tranchant-Moment Fléchissant

résistance des section transversale

Choisir une nuance d'acier

Choisir le type du profilé

La section du profilé

Longueur de la barre (m)

Frame1
 Vérification de la résistance
 Vérification de l'instabilité

Frame10	
<input type="checkbox"/> Effort Normal	$NcRd = A * fy1 / 1.1 =$ (N)
<input checked="" type="checkbox"/> Moment de flexionyy	<input type="text" value="98000000"/> $MplRd = WPLY * fy1 / 1.1 = 103\ 4\ 00\ 000$ vérifiée . (N.mm)
<input type="checkbox"/> Moment de flexion ZZ	$MplRd = WPLY * fy1 / 1.1 =$ (N.mm)
<input checked="" type="checkbox"/> Effort Tranchant	<input type="text" value="240000"/> $VplRd = 0.58 * fy1 * Av / 1.1 = 2\ 73\ 755$ vérifiée . (N) non vérifiée.
<input type="checkbox"/> Effort tranchantz	$VplRd = 0.58 * fy1 * Av / 1.1 =$ (N)

Image 3.14 Vérification de l'effort tranchant+moment fléchissant

Pour terminer, une vérification de déversement est effectuée

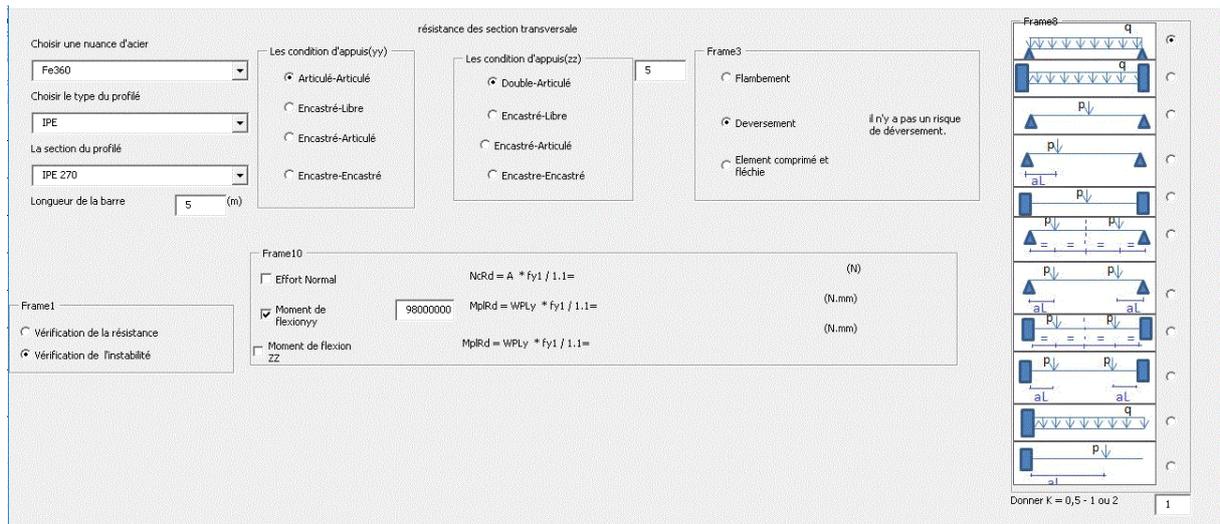


Image 3.15- Vérification du déversement

3.2.Exemple 2

Soit un poteau métallique Constitué d'un profilé laminé « HEA320» en acier Fe 360. Ce dernier est de longueur 4.5m. Il est posée sur 2 appuis.

Il est sollicité par un effort normal $N_{sd} = -2500$ KN.

Les conditions d'appuis sont présentées sur la figure ci-dessous

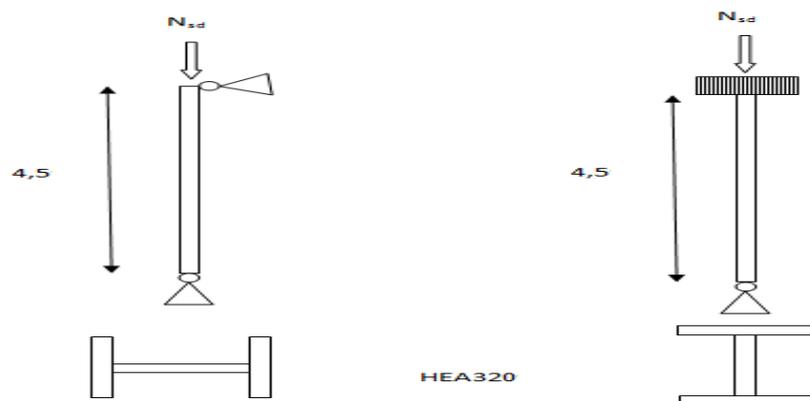


Image 3.16 - Conditions d'appuis du poteau étudié

La solution de l'exemple

1. Vérification à l'effort normale

résistance des section transversale

Choisir une nuance d'acier

Choisir le type du profilé

La section du profilé

Longueur de la barre (m)

Frame1

Sans effet d'instabilité

Avec effet d'instabilité

Frame10		résistance des section transversale		
<input checked="" type="checkbox"/> Effort Normal	<input type="text" value="-2500000"/>	$N_{cRd} = A * f_{y1} / 1.1 = 2\ 6\ 57\ 636$	Element résiste à la Compression .	(N)
<input type="checkbox"/> Moment de flexion yy		$M_{plRd} = W_{PLY} * f_{y1} / 1.1 =$		(N.mm)
<input type="checkbox"/> Moment de flexion ZZ		$M_{plRd} = W_{PLY} * f_{y1} / 1.1 =$		(N.mm)
<input type="checkbox"/> Effort Tranchant		$V_{plRd} = 0.58 * f_{y1} * A_v / 1.1 =$		(N)
<input type="checkbox"/> Effort tranchantzz		$V_{plRd} = 0.58 * f_{y1} * A_v / 1.1 =$		(N)

Image 3.17 représentation de la vérification de l'effort normal

Vérification du flambement

résistance des section transversale

Choisir une nuance d'acier

Choisir le type du profilé

La section du profilé

Longueur de la barre (m)

Les condition d'appuis(yy)

Double-simple

Encastré-libre

Encastré-simple

Encastre-encastré

Les condition d'appuis(zz)

Double-simple

Encastré-libre

Encastré-simple

Encastre-encastré

Frame3

Flambement

Deversement

Element comprimé et fléchié

la section du poteau est suffisante.

Frame1

Sans effet d'instabilité

Avec effet d'instabilité

Frame10		résistance des section transversale		
<input checked="" type="checkbox"/> Effort Normal	<input type="text" value="-2500000"/>	$N_{cRd} = A * f_{y1} / 1.1 = 2\ 6\ 57\ 636$	Element résiste à la Compression .	(N)
<input type="checkbox"/> Moment de flexion yy		$M_{plRd} = W_{PLY} * f_{y1} / 1.1 =$		(N.mm)
<input type="checkbox"/> Moment de flexion ZZ		$M_{plRd} = W_{PLY} * f_{y1} / 1.1 =$		(N.mm)

Image 3.18 Vérification du flambement

4. CONCLUSION

Nous avons essayé d'expliquer le fonctionnement de notre application par illustration de deux exemples. Le premier il s'agissait d'une poutre sollicitée en flexion et qu'on avait vérifié son déversement.. Dans le deuxième exemple, un poteau soumis à la compression et qu'on vérifié son instabilité, le flambement

L'ensemble des vérifications pour le poteau ont étaient satisfaisantes alors que pour la poutre déverse et ne résiste pas à la combinaison effort tranchant moment fléchissant. Tous ces résultats ont été comparés aux calculs à la main, un travail fastidieux et conséquent.

Conclusion Générale

Le travail qui a été mené et qui s'adresse particulièrement aux étudiants en fin de licence de génie civil afin d'effectuer une vérification de leur calculs lors des séances des travaux dirigés de la matière « Structures Métalliques » où autres.

L'outil qui a été réalisé en langage « Visual Basic » sous Microsoft Excel est une feuille de calcul où les données et les résultats sont affichées permet de calculer ou vérifier la résistance ou l'insatiabilité d'un élément d'une structure en acier telle que un poteau, une poutre, une panne, ... et ceci d'une manière automatique et surtout répétée. Il est reconnu qu'il est complexe de réaliser une telle vérification d'instabilité et plus particulièrement celle relative au déversement tout en évitant des erreurs de calculs.

Utiliser des logiciels plus développés payants est inadaptée pour des vérifications de résistance et d'instabilité. Non seulement, il faut faire un calcul de la structure complète puis vérifier les éléments un par un.

Aujourd'hui, nous avons réussi à concevoir un modeste logiciel de calcul sur Excel que beaucoup d'étudiants connaissent. Certes, il n'est aussi poussé qu'un produit professionnel, mais il permet rapidement de faire une vérification d'un élément en acier d'une structure.

Beaucoup de choses restent à faire afin d'avoir un outil complet avec une interface graphique plus poussée.

En perspective, il est intéressant de développé notre application avec des fenêtres d'aide ou commentaires en même temps que des récapitulatifs et figures insérées dans l'application.

Il serait souhaitable d'avoir des résultats des calculs qui se mettent à jour au fur et à mesure que l'on change les données

Il faut avoir un éventail sur le choix d'unité et éviter des conversions manuelles qu'il faut introduire dans le logiciel. C'est donc un continuel développement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **APK JEAN-PIERRE MUZEAU** La construction métallique avec les Eurocode
- [2] Cours construction métallique selon le CCM97 et l’Eurocode 3.
- [3] **JEAN MOREL** Calcule des structures métalliques selon l’Eurocode 3.
- [4] Règle de conception et de calcul des structures en acier « CCM 97 ».