

Etude numérique de la stabilité au voilement local des âmes des profilés laminés sous compression centrée

Ch. TALEB^a, F. AMMARI^b

- a. *Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Faculté de génie civil, ELALIA BAB ELZOUAR, ALGER. chemsougc@live.fr*
b. *Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Faculté de génie civil, ELALIA BAB ELZOUAR, ALGER. fat_ammari@yahoo.fr*

Résumé :

Les éléments structuraux utilisés en construction métallique peuvent être considérés comme un assemblage de parois planes : âme et semelles. La simulation numérique du voilement d'une plaque appuyée sur quatre cotés permet de valider les résultats du programme numérique. Modéliser le voilement de l'âme d'un profilé métallique permettra d'évaluer sa contrainte critique de voilement afin de revoir la classification des profilés laminés.

Abstract :

The structural elements used in steel construction can be considered as an assembly of flat plates: web and flanges. Numerical buckling simulation of a plate which is supported on its four sides serves to validate the results of the numerical program. The web buckling model of a steel profile allow to evaluate the critical buckling strain in order to review the classification of rolled profiles.

Mots clefs : Voilement des plaques, théorie des plaques minces, méthode des éléments finis, programmation numérique.

1 Introduction :

Le voilement des plaques est un sujet qui ne cesse de prendre de l'importance dans le domaine de la recherche en construction métallique [4, 8], et ce dans le but de développer la partie réglementaire qui traite ce sujet [6, 7].

Les profilés, laminés ou soudés, peuvent être considérés comme un assemblage d'un certain nombre de parois planes, dont chacune est délimitée soit par une autre paroi qui lui est orthogonale ou par un bord libre.

Dans un premier temps, nous allons modéliser le voilement d'une plaque simplement appuyée sur son contour dans le but de valider les résultats numériques avec ceux de la littérature. Sur la base du même programme, nous allons simuler le voilement des âmes des profilés laminés courants dans le but de calculer les contraintes critiques. Les élancements correspondants seront comparés avec ceux adoptées par les CCM97 et l'EC3, ce qui permettra de revoir la classification des sections transversales de ces profilés.

On s'intéresse au cas des profilés soumis à une compression centrée.

2 Simulation du voilement d'une plaque simplement appuyée sur son contour:

Commençons par modéliser un cas dont les résultats théoriques sont connus, celui d'une plaque appuyée sur quatre cotés. Par hypothèse la plaque est rectangulaire, formée d'un matériau isotrope, homogène et élastique. Elle est simplement appuyée sur ses quatre côtés et soumise à une force linéaire de compression agissant suivant sa largeur. L'objectif de cette modélisation est le calcul de la contrainte critique de voilement.

Le programme numérique est exécuté par le logiciel CASTEM2000. Il est écrit sous langage GIBIANE.

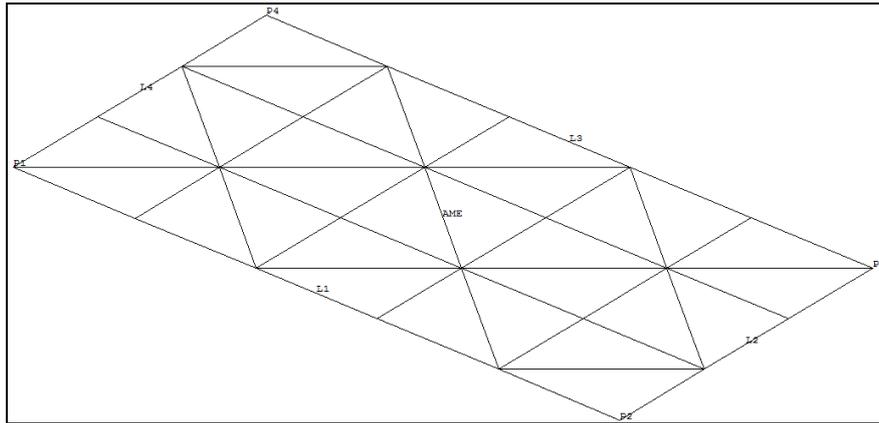


FIG. 1 – Plaque modélisée par CASTEM.

La formule de la contrainte critique de voilement d'une plaque appuyée sur quatre cotés dont ses dimensions en plan ($a \times b$) et son épaisseur (t), soumise à une compression suivant sa largeur est donnée dans la littérature technique [1].

$$\sigma_{cr} = \frac{k_{\sigma} \pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (1)$$

Prenons l'exemple d'une plaque de longueur ($a=4\text{m}$) et une épaisseur ($t=0,01\text{m}$). Faisons varier sa largeur (b), et comparons les valeurs numériques de sa charge critique de voilement avec les valeurs théoriques.

b (m)	0,15	0,25	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,65
σ_{cr} (MPa) numérique	3271	1185	606	465	367	300	246	176
σ_{cr} (MPa) théorique	3374	1215	620	475	375	304	251	179
Erreur %	3,13	2,45	2,19	2,13	2,08	2,04	2,02	2,02

TAB. 1 – Charge critique de voilement estimé par CASTEM et celle de la formule théorique.

La solution numérique converge vers la solution théorique, vu que l'erreur est de l'ordre de 3%.

3 Modèle numérique d'un profilé métallique :

Pour modéliser un profilé métallique, il suffit de remplacer les appuis dans le sens longitudinal de la plaque du paragraphe précédent par deux plaques d'épaisseur (t_r) et de largeur (b_r). Ces plaques (qui représentent les semelles du profilé) sont perpendiculaires par rapport au plan moyen de la plaque initiale (qui représente l'âme du profilé métallique).

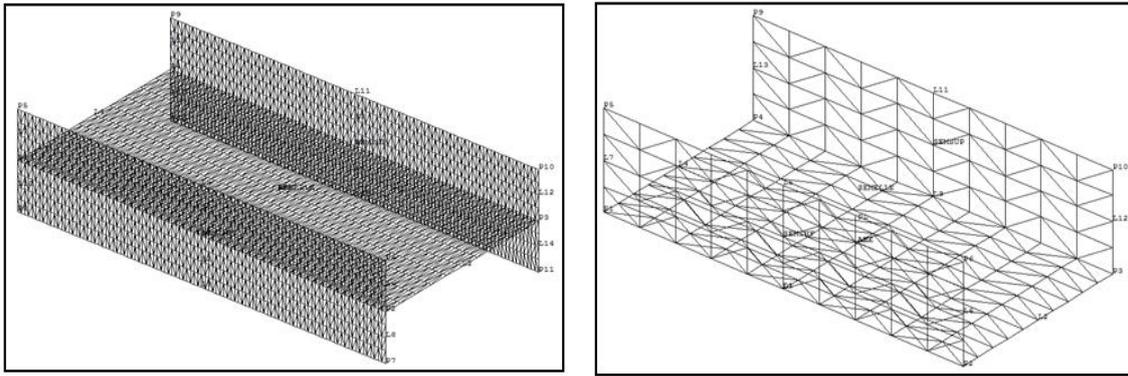


FIG. 2 – Profilés en I, H et en U modélisés par CASTEM.

4 Reclassification des profilés laminés de type HEA :

D'après la classification des sections transversales donnée par les CCM97 [6] et l'EC3 [7], la classe des profilés laminés courants, en compression centrée, dépend de la classe de leurs âmes [9]. Classifier les âmes avec les limites données dans ces règlements revient à considérer le coefficient de voilement égale à celui d'une plaque appuyée sur quatre coté ($k_\sigma = 4$), hors que ce coefficient dépend des dimensions des semelles (tableau 1).

4.1 Estimation du coefficient de voilement :

En utilisant la modélisation numérique, nous allons estimer la valeur de la contrainte critique de voilement (σ_{cr}), par la suite on peut déduire le coefficient de voilement (k_σ) à partir de la formule (1) :

$$k_\sigma = \frac{12(1 - \nu^2)}{\pi^2 E} \times \sigma_{cr} \times \left(\frac{b}{t}\right)^2 \quad (2)$$

Les valeurs des contraintes critiques de voilement des âmes et les coefficients de voilement correspondants pour les profilés laminés de type HEA sont données dans le tableau (2) ci-après :

Profilé	σ_{cr} (MPa)	k_σ	Profilé	σ_{cr} (MPa)	k_σ
HEA100	6575,24	4,35	HEA340	1525,88	5,26
HEA120	4390,22	5,07	HEA360	1464,07	5,25
HEA140	3603,72	5,31	HEA400	1351,49	5,23
HEA160	3347,81	5,30	HEA450	1112,91	5,25
HEA180	2435,87	5,31	HEA500	945,43	5,26
HEA200	2347,65	5,26	HEA550	810,85	5,25
HEA220	2110,48	5,24	HEA600	710,16	5,23
HEA240	2080,97	5,24	HEA650	632,43	5,21
HEA260	1795,41	5,27	HEA700	609,54	5,17
HEA280	1657,39	5,24	HEA800	483,95	5,15
HEA300	1662,86	5,25	HEA900	419,78	5,12
HEA320	1598,95	5,27	HEA1000	349,67	5,10

TAB. 2 – Valeurs des contraintes critiques de voilement des âmes des profilés laminés de type HEA et leurs coefficients de voilement estimés numériquement.

4.2 Calcul de l'élancement réduit :

En connaissant la valeur numérique du coefficient de voilement, nous pouvons calculer l'élancement réduit $\bar{\lambda}_p$ par le biais de la formule donnée dans [7] :

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{b}{t}}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad (3)$$

Afin de comparer les valeurs de l'élancement réduit $\bar{\lambda}_p$ ainsi calculées avec ceux considérées dans la réglementation, nous remplaçons le coefficient de voilement dans la formule (3) par ($k_\sigma=4$). Les valeurs de $\bar{\lambda}_p$ réglementaires et estimés numériquement, pour chaque nuance d'acier, sont données dans le tableau suivant :

Profilé	$\lambda=b/t$	$\bar{\lambda}_p$ selon l'EC3			$\bar{\lambda}_p$ selon l'approche numérique		
		Fe360	Fe430	Fe510	Fe360	Fe430	Fe510
HEA100	11,20	0,20	0,21	0,24	0,19	0,21	0,23
HEA120	14,80	0,26	0,28	0,32	0,23	0,25	0,29
HEA140	16,73	0,29	0,32	0,36	0,26	0,28	0,32
HEA160	17,33	0,31	0,33	0,38	0,27	0,29	0,33
HEA180	20,33	0,36	0,39	0,44	0,31	0,34	0,38
HEA200	20,62	0,36	0,39	0,45	0,32	0,34	0,39
HEA220	21,71	0,38	0,42	0,47	0,33	0,36	0,41
HEA240	21,87	0,38	0,42	0,48	0,34	0,37	0,42
HEA260	23,60	0,42	0,45	0,51	0,36	0,39	0,45
HEA280	24,50	0,43	0,47	0,53	0,38	0,41	0,47
HEA300	24,47	0,43	0,47	0,53	0,38	0,41	0,46
HEA320	25,00	0,44	0,48	0,54	0,38	0,42	0,47
HEA340	25,58	0,45	0,49	0,56	0,39	0,43	0,48
HEA360	26,10	0,46	0,50	0,57	0,40	0,44	0,49
HEA400	27,09	0,48	0,52	0,59	0,42	0,45	0,52
HEA450	29,91	0,53	0,57	0,65	0,46	0,50	0,57
HEA500	32,50	0,57	0,62	0,71	0,50	0,54	0,62
HEA550	35,04	0,62	0,67	0,76	0,54	0,59	0,67
HEA600	37,38	0,66	0,72	0,81	0,58	0,63	0,71
HEA650	39,56	0,70	0,76	0,86	0,61	0,66	0,75
HEA700	40,14	0,71	0,77	0,87	0,62	0,68	0,77
HEA800	44,93	0,79	0,86	0,98	0,70	0,76	0,86
HEA900	48,13	0,85	0,92	1,05	0,75	0,81	0,92
HEA1000	52,61	0,93	1,01	1,14	0,82	0,89	1,01

TAB. 3 – L'élancement réduit $\bar{\lambda}_p$ selon l'EC3 et selon l'approche numérique pour les âmes des HEA.

D'après les CCM97 et l'EC3, les élancements des parois internes sous compression centrée sont limités pour chaque classe de 1 à 4. En compression centrée, une paroi interne est de classe 1 si $\bar{\lambda}_p < 0,58$, de classe 2 si $\bar{\lambda}_p < 0,67$ et de classe 3 si $\bar{\lambda}_p < 0,74$ [5]. Pour un élancement réduit supérieure à celui de la classe 3, la paroi interne est considérée de classe 4.

4.3 Reclassification :

En connaissant les élancements réduits des âmes des profilés laminés de type HEA (TAB. 3), et en se basant sur les limites données précédemment, nous pouvons établir une classification de ces profilés. La classe est donnée à chaque fois pour l'EC3 et selon l'approche numérique.

Profilé	Classification					
	selon l'EC3			selon l'approche numérique		
	Fe360	Fe430	Fe510	Fe360	Fe430	Fe510
HEA100	1	1	1	1	1	1
HEA120	1	1	1	1	1	1
HEA140	1	1	1	1	1	1
HEA160	1	1	1	1	1	1
HEA180	1	1	1	1	1	1
HEA200	1	1	1	1	1	1
HEA220	1	1	1	1	1	1
HEA240	1	1	1	1	1	1
HEA260	1	1	1	1	1	1
HEA280	1	1	1	1	1	1
HEA300	1	1	1	1	1	1
HEA320	1	1	1	1	1	1
HEA340	1	1	1	1	1	1
HEA360	1	1	1	1	1	1
HEA400	1	1	2	1	1	1
HEA450	1	1	2	1	1	1
HEA500	1	2	3	1	1	2
HEA550	2	3	4	1	2	2
HEA600	2	3	4	1	2	3
HEA650	3	4	4	2	2	4
HEA700	3	4	4	2	3	4
HEA800	4	4	4	3	4	4
HEA900	4	4	4	4	4	4
HEA1000	4	4	4	4	4	4

TAB. 4 – Classification des HEA selon l'EC3 et selon notre approche numérique.

- Remarques :

A partir de l'HEA400 le profilé change de classe pour la nuance Fe510. Ceci est dû au fait de considérer le coefficient de voilement estimé numériquement qui est égale à 5,23 au lieu de 4 pour l'approche règlementaire. Ce changement de classe ne devient significatif que pour les sections de classes 4, où une partie de la section transversale du profilé est affectée par le voilement local et donc négligée dans le calcul de sa résistance. C'est le cas de l'HEA550 qui devient de classe 2 pour la nuance Fe510 selon notre approche, et donc toute sa section transversale qui devient efficace. Son coefficient de voilement a comme valeur 5,25.

5 Conclusion :

Un nombre important d'essais nous a permis d'élaborer un programme numérique qui répond le mieux à notre sujet de recherche et donne des résultats non seulement du même ordre, mais même fort approchés.

La simulation numérique du comportement de l'âme d'un profilé métallique vis-à-vis du voilement sous l'effet d'une compression uniforme, nous a permis de constater que cette paroi ne se comportait comme une plaque appuyée sur quatre côtés ($k\sigma=4$) que si les dimensions des semelles du profilé arrivent à des valeurs précises.

L'utilisation de la valeur numérique du coefficient de voilement dans le calcul de l'élanement réduit de l'âme pour les profilés laminés courants a permis de revoir leur classification actuelle. Certains profilés qui étaient considérés de classe 4 sont devenu de classe meilleure, ce qui permet de baser leurs résistances sur l'aire de la section nominale au lieu de l'aire de la section efficace réduite.

References

- [1] S.P. TIMOSHENKO, J. Monroe Gere, Theory of Elastic Stability 2E, MCGRAW-HILL, 1961.
- [2] C. DUBAS, Contribution à l'étude du voilement des tôles raidies, école polytechnique fédérale de Zurich, Editeur S.A. Leemann frères & Co. Zurich, 1948.
- [3] J.L. BATOZ, G. DHATT, Modélisation des structures par éléments finis, volume 2 poutres et plaques, HERMES, Paris 1990. P221-417.
- [4] R. MAQUOI, Instabilités structurales: Principes généraux, Techniques de l'Ingénieur, 2009.
- [5] J. Dehard, Classification des sections, HEMES GRAMME, 2008. P42-52.
- [6] CCM97: Règles de conception et de calcul des structures en acier, Centre national de recherche appliquée en génie parasismique, 1997.
- [7] Eurocode 3: Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale, AFNOR, 1999.
- [8] V.A. Zarutskii, Stability analysis of rectangular plates unidirectionally strengthened by ribs, INTERNATIONAL APPLIED MECHANICS, Vol. 36, No. 4, 2000.
- [9] European wide flange beams HE A, HE B and HE M 100- 1000 in accordance with Euronorm 53-62.
- [10] L. JAOUEN, Vibrations de flexion des plaques, UNIVERSITE DE SHERBROOKE, 2002.
- [11] J. COURBON, Plaques minces élastiques, Techniques de l'Ingénieur, 1980.
- [12] F.SABOURIN, E.SALLE, Calcul des structures par éléments finis, INSA de Lyon, 2002.
- [13] R. MAQUOI, Instabilités structurales des plaques, Voilement, Techniques de l'Ingénieur, 2010.
- [14] Z. Zhulin, Ultimate strength of postbuckling for simply supported rectangular composite thin plates under compression, APPLIED MATHEMATICS AND MECHANICS, April 1998.
- [15] P. Lestuzzi, Mécanique des Structures II, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2010.
- [16] E. Le Fichoux, Présentation et utilisation de CASTEM2000, ENSTA-LME, 1998.
- [17] P. PASQUET, Mécanique des structures : CALCULS MECANIKES-I et II, documentation CASTEM2000, 1999.
- [18] P. SPITERI, Introduction à la méthode des éléments finis, Techniques de l'Ingénieur, 2002.
- [19] P. RAPIN, Méthode des éléments finis, Techniques de l'Ingénieur, 1993.
- [20] CASTEM 2000, Recueil d'exemples commentés, C.E.A / D.M.T / L.A.M.S, 1992.
- [21] J. Dehard, Analyse des structures en acier, HEMES GRAMME, 2009.
- [22] J. Dehard, Les éléments fléchis, HEMES GRAMME, 2009.