

Résistance au flambage d'un panneau raidi sous compression axiale ; Effet des imperfections résultant du soudage

I. FEDDAL¹, A. KHAMLICH², K. AMEZIANE¹

1. Laboratoire Physique de la Matière condensée, Faculté des Sciences, BP.2121, Tétouan 93002, Maroc

1. ikramfeddal@gmail.com

2. Laboratoire Systèmes de Communications et de Détection, Faculté des Sciences, BP.2121, Tétouan, Maroc

2. khamlich7@yahoo.es

Résumé

Les panneaux raidis sont couramment utilisés dans plusieurs activités industrielles et civiles : aérospatiale, aéronautique, marine et génie civil. Le plus grand avantage des raidisseurs c'est qu'ils augmentent énormément la rigidité de flexion du panneau avec un volume supplémentaire minimum de matériau. Une structure élancée ne peut pas toujours atteindre sa pleine capacité de déformation plastique. Il peut subir le flambage sous diverses formes, ce qui peut se traduire dans des circonstances extrêmes par une défaillance totale de la structure.

Les panneaux raidis sont généralement assemblés par le processus de soudage. Ce procédé affecte les propriétés matérielles et introduit des imperfections géométriques. Celles-ci influencent à leur tour la charge critique de flambage.

Dans ce travail, nous avons effectué une étude paramétrique sur le flambage d'un panneau raidi sous compression axiale afin d'évaluer la charge critique de flambage. La technique des éléments finis via le logiciel Abaqus a été utilisée. La modélisation prend en compte essentiellement la dégradation du matériau dans la zone affectée thermiquement (HAZ) et les imperfections géométriques initiales réparties. Les résultats obtenus ont montré que l'amplitude de la déformation géométrique initiale et la zone HAZ conditionnent de manière prépondérante la résistance au flambage.

Mots clés : *Panneau raidi, flambage, HAZ, imperfections, méthode des éléments finis.*

1. Introduction

Le flambage est une sorte d'instabilité qui se manifeste dans les structures élancées, comme cela se produit lorsqu'une charge axiale est appliquée en compression sur des plaques ou des poutres élancés. Pour une conception sécurisée, il est important de comprendre le comportement au flambage et de le relier aux propriétés géométriques et matérielles ainsi qu'à la distribution des

défauts affectant la structure. Les imperfections géométriques comprennent les imperfections initiales liées à la fabrication, telles que les distorsions initiales résultant des contraintes résiduelles de soudage. Des imperfections matérielles se produisent aussi tel que le ramollissement observé dans la HAZ, des structures soudées en aluminium [1].

Les raidisseurs sont introduits afin d'augmenter la résistance au flambage tout en optimisant le poids de la structure. L'optimisation structurale doit être conduite afin de trouver la meilleure configuration de montage possible de ces raidisseurs, compte tenu des imperfections qu'ils engendrent dans la structure assemblée et du chargement que celle-ci va subir en service.

Plusieurs études ont été consacrées aux panneaux raidis. Tekgoz et Gabatoz [2] ont proposé une étude concernant la séquence de soudage utilisée pour assembler la structure. Ils ont pris en considération l'épaisseur des plaques, la vitesse de soudage et les contraintes résiduelles. Ils ont montré que la séquence de soudage est un paramètre très influent dans le problème. Mouhat et Khamlich [3] ont mené une étude paramétrique sur les effets dus à imperfection géométrique répartie, une dépression localisée ainsi que la dégradation du matériau se produisant près de la bande de soudure. Ils ont quantifié la fiabilité des panneaux raidis en utilisant des représentations en réseaux de neurones artificiels pour représenter la charge de flambement.

Dans ce travail, nous effectuons une analyse paramétrique portant sur l'influence sur la résistance au flambage des panneaux raidis des imperfections géométriques initiales et de la dégradation du matériau dans la zone affectée thermiquement. L'objectif est de prédire la charge critique de flambage en fonction de ces paramètres à l'aide d'un modèle explicite établi en se basant sur un plan d'expérience. La dégradation du matériau dans la zone HAZ étant décrite par une chute du module de Young et une variation du coefficient de Poisson. La réponse du système sera ainsi modélisée par une surface polynomiale quadratique.

1. Modélisation

Les nonlinéarités géométriques sont prises en compte alors que le matériau est supposé avoir un comportement élastique linéaire. La simulation est faite à l'aide du logiciel Abaqus et l'élément de coque S4R est utilisé. Cet élément possède quatre nœuds avec six degrés de liberté à chaque nœud. Il peut prendre en compte à la fois les nonlinéarités matérielles et géométriques. Dans la présente analyse, la configuration géométrique du panneau rigidifié est fixée comme le montre la figure 1. Le panneau raidi qui sera modélisé a deux segments internes et deux segments de bord de largeur égale à la moitié de celle des segments internes.

En désignant par u les déplacements et θ les rotations, les conditions aux limites qui ont été considérées dans les simulations numériques sont représentées sur la figure 1.

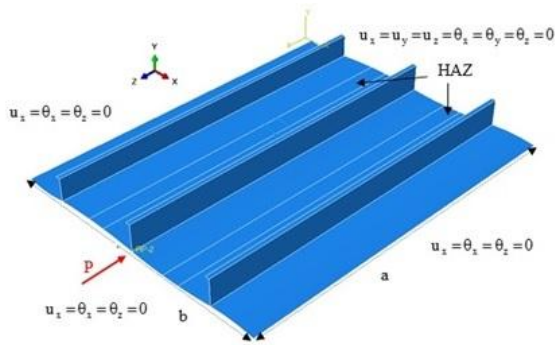


Figure 1 : Configuration géométrique du panneau raidi et conditions aux limites considérées.

La longueur totale de la plaque de base est $a=958\text{mm}$ et sa largeur est $b=757.5\text{mm}$. La zone HAZ correspond à la bande centrale de chaque segment. Elle est délimitée par deux plans parallèles au plan yz comme le montre la figure 1. La plaque et la zone HAZ ont la même épaisseur $t=4.9\text{mm}$ supposée uniforme. Les raidisseurs sont en forme de L et ont une épaisseur constante $t_w=2.95\text{mm}$, leur hauteur est $h_w=64\text{mm}$, l'épaisseur de la bride est $t_f=4.3\text{mm}$ et la hauteur de la bride est $b_f=12\text{mm}$, voir figure 2.

La plaque de base est supposée distordue par le processus de soudage.

La figure 2 montre la distorsion modélisée par une ondulation sinusoïdale d'amplitude w_0 .

Les propriétés du matériau dans la plaque et la zone HAZ sont différentes. Le matériau de la plaque est ceux l'aluminium 7075-T. Son module d'Young est $E=10^{10}\text{Pa}$ et son coefficient de Poisson est $\nu=0.33$.

Les propriétés du matériau pour la zone HAZ sont notées E_H et ν_H . Le rapport de réduction du module de Young est tel que $E_H/E \in [0.7, 0.9]$, tandis que le coefficient

de Poisson est choisi de sorte que $\nu_H/\nu \in [0.9, 1.1]$. La largeur de la zone HAZ est variée dans l'intervalle $[25\text{mm}, 75\text{mm}]$.

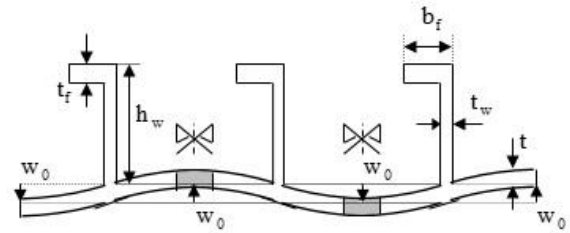


Figure 2 : Paramètres géométriques du panneau et caractéristiques de la distorsion initiale dans le plan xy

3. Résultats et discussion

Afin d'évaluer l'effet des différents paramètres sur la charge critique de flambage, des simulations ont été effectuées selon un plan d'expérience complet qui a été construit à partir des niveaux indiqués dans le tableau 1.

Paramètres	w_0 (mm)	w_H (mm)	E_H (GPa)	ν_H
Niveau min	2	25	50.19	0.297
Niveau moy	4	50	57.36	0.33
Niveau max	6	75	64.53	0.363

Tableau 1: Niveaux des paramètres considérés

Pour une combinaison donnée, le calcul éléments finis a été effectué à l'aide du logiciel Abaqus.

La modélisation intègre les nonlinéarités géométriques et les itérations sont contrôlées en utilisant la méthode de Ricks. La charge de flambage est déterminée comme étant celle associée au point limite sur la courbe qui donne la charge axiale résultante en fonction du raccourcissement axial du panneau.

Analysis of Variance					
Source	Sum Sq.	d. f.	Mean Sq.	F	Prob>F
Wh	0.30079	2	0.1504	73.87	0
Muh	0.00198	2	0.00099	0.49	0.6182
Eh	0.00522	2	0.00261	1.28	0.2868
W0	1.92328	2	0.96164	472.34	0
Wh*Muh	0.00772	4	0.00193	0.95	0.4447
Wh*Eh	0.00561	4	0.0014	0.69	0.603
Wh*W0	0.09051	4	0.02263	11.11	0
Muh*Eh	0.00538	4	0.00134	0.66	0.6227
Muh*W0	0.0171	4	0.00428	2.1	0.0953
Eh*W0	0.01248	4	0.00312	1.53	0.2078
Error	0.09772	48	0.00204		
Total	2.46779	80			

Constrained (Type III) sums of squares.

Figure 3 : Analyse de variance de la charge critique de flambage en fonction des facteurs et de leurs interactions

L'analyse de variance conduite sur les résultats obtenus, pour toutes les combinaisons du tableau en factoriel complet construit sur le tableau 1, a donné le graphe de la figure 3. Cette figure montre que dans les intervalles

considérés des paramètres, l'amplitude du défaut géométrique initial réparti, la largeur de la zone HAZ et l'interaction de ces deux facteurs expliquent la variabilité de la charge critique de flambage.

En écartant le coefficient de Poisson dans la zone HAZ qui n'a qu'une très faible influence sur les résultats, le tableau 2 récapitule les résultats obtenus en fonction des trois facteurs restant : w_h (mm), E_h (GPa) et w_0 (mm).

Tableau 2: Charge critique de flambage en fonction de la combinaison considérée

w_h (mm)	E_h (GPa)	w_0 (mm)	P_{cr} (N)
50	50.19	2	1054670
50	50.19	4	884426
50	50.19	6	667169
50	57.36	2	1056303
50	57.36	4	780428
50	57.36	6	593837
50	64.53	2	1052572
50	64.53	4	1028870
50	64.53	6	672619
75	50.19	2	1224087
75	50.19	4	1187895
75	50.19	6	729893
75	57.36	2	1222310
75	57.36	4	1187672
75	57.36	6	767896
75	64.53	2	1226288
75	64.53	4	1187728
75	64.53	6	733526
25	50.19	2	1197203
25	50.19	4	1030349
25	50.19	6	696690
25	57.36	2	1199391
25	57.36	4	1162461
25	57.36	6	698286
25	64.53	2	1201476
25	64.53	4	1163172
25	64.53	6	700403

A partir des résultats du tableau 2, il est possible de construire une surface de réponses polynomiale avec un coefficient de détermination $R^2 = 94.5\%$. Elle est donnée par :

$$\begin{aligned} \bar{P}_{cr} = & 1.8342 - 1.3434\bar{w}_h - 1.6943\bar{E}_h - 0.77015\bar{w}_0 \\ & - 0.24796\bar{w}_h\bar{E}_h + 0.037504\bar{w}_h\bar{w}_0 + 0.015449\bar{E}_h\bar{w}_0 \\ & + 1.1967\bar{w}_h^2 + 1.1077\bar{E}_h^2 - 1.0321\bar{w}_0^2 \end{aligned}$$

avec $\bar{P}_{cr} = P_{cr} / 1226288$; $\bar{w}_h = w_h / 75$; $\bar{E}_h = E_h / 67.53$ et $\bar{w}_0 = w_0 / 6$.

En fixant la valeur de $E_h = 57.36$ GPa, la figure 4 montre l'évolution de la charge critique de flambage en fonction de la largeur réduite de la zone HAZ \bar{w}_h , pour différentes valeurs de l'amplitude de l'imperfection géométrique initiale.

Nous pouvons constater que l'influence de la zone HAZ sur la charge critique de flambage n'est pas uniforme.

Les largeurs intermédiaires sont plus critiques que les autres.

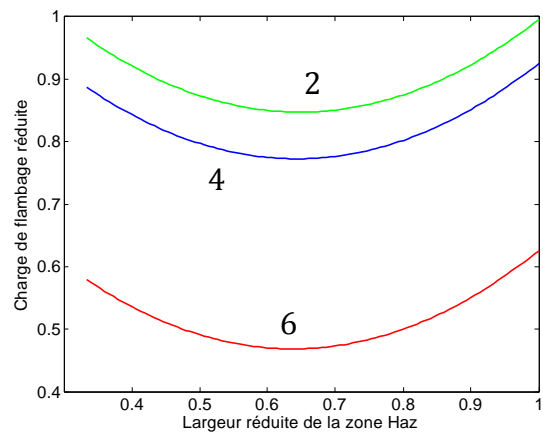


Figure 4. Evolution de la charge critique de flambage en fonction de la largeur réduite de la zone HAZ, \bar{w}_h ; l'amplitude de l'imperfection géométrique initiale prend les valeurs: $w_0 = 2, 4, 6$ mm

Afin d'augmenter la charge critique de flambage, il faut donc éviter de réaliser des soudures avec des épaisseurs moyennes. Pour obtenir la résistance optimale, on a le choix entre travailler avec l'épaisseur $w_h = 25$ mm ou bien $w_h = 75$ mm. Les valeurs intermédiaires s'avèrent nocives pour la résistance du panneau raidi. Par ailleurs, et de manière évidente, il faut réduire l'amplitude du défaut géométrique initial.

4. Conclusion

Nous avons effectué une étude paramétrique sur l'influence des caractéristiques de la zone affectée thermiquement sur la charge de flambage d'un panneau raidi. Les résultats obtenus ont montré que l'amplitude du défaut géométrique initial contrôle largement la résistance au flambage. Elle est suivie par la largeur de la zone affectée thermiquement.

L'étude a permis de déterminer la largeur idéale de la zone de soudage afin d'augmenter la résistance au flambage.

Références

- [1] B. Boon, P. Kaeding, C. Kim, and I. P. Pasqualino, "Ultimate strength," *18th international ship and offshore structures congress volume.1*, no. Issc, 2012.
- [2] M. Tekgoz, Y. Garbatov, and C. Guedes Soares, "Ultimate strength assessment of welded stiffened plates," *Engineering Structures.*, vol. 84, pp. 325–339, 2015.
- [3] O. Mouhat, A. Khamlichi, and A. Limam, "Reliability analysis of buckling limit state for friction stir welded aircraft stiffened panels," *Key engineering Materials*, vol. 640, pp. 35–42, 2015.