

Modélisation numérique d'un pipe en composite stratifié fissuré sous compression axiale

H. Benyahia^a, D. Ouinas^a et M. Sahnoun^a

a. Laboratoire de Modélisation Numérique et Expérimentale des Phénomènes Mécanique, Université Ibn Badis BP 188 Mostaganem 27000 Algérie

Résumé :

Les coques minces sont utilisées dans de nombreux domaines comme éléments structurels. Elles sont malheureusement souvent sujettes à des instabilités plus ou moins catastrophiques (flambage). L'attention est focalisée dans ce papier sur l'effet des défauts géométriques localisés sur le flambage des coques cylindriques minces (pipes en composite stratifié) soumises à la compression axiale en présence des fissures longitudinale, radiale et inclinée par rapport à l'horizontal. L'approche adoptée est basée sur les équations du mouvement, qui sont numériquement résolues au moyen d'un code d'éléments finis (ABAQUS / Explicit) et en utilisant des modèles numériques. Les résultats indiquent que l'augmentation du rayon du pipe conduit à la diminution du paramètre de flambage et les valeurs maximales sont obtenues pour les plus faibles orientations des fibres. Les contraintes maximales sont obtenues pour le rayon de 400mm. Par ailleurs, l'augmentation du nombre de plis du pipe en composite mène à l'accroissement du paramètre du flambage. La taille de la fissure, son orientation et sa position dans le pipe sont mis en évidence.

Abstract :

Thin shells are used in many fields such as structural elements. Unfortunately, they are often subject to more or less catastrophic instability (buckling). Attention has focused in this paper on the effect of defects on the geometrical localized buckling of thin cylindrical shells (pipes composites laminate) subjected to axial compression in the presence of crack longitudinal, radial and inclined relative to the horizontal. The approach is based on the equations of motion, which are solved numerically using a finite element code (ABAQUS / Explicit) and using numerical models. The results indicate that increasing the radius of the pipe leading to the decrease of the parameter buckling and maximum values are obtained for the lowest fiber orientations. The maximum stresses are obtained for the radius of 400mm. Moreover, the increase in the number of plies in composite pipe leads to the increase of the parameter buckling. The size of the crack, its orientation and position in the pipe are highlighted.

Mots clefs : Flambage, Fissure et pipe, Concentration de contraintes, Analyse par éléments finis.

Introduction

La concurrence Internationale et l'évolution des moyens de production dans l'industrie mécanique imposent des résultats de plus en plus élevées où les nouvelles technologies et matériaux composites sont des points clés de la réussite[1]. Les matériaux composites sont très utilisés dans le monde industriel et trouvent des applications aussi bien dans le domaine du transport (aéronautique, aérospatial, maritime, ferroviaire...) et dans le domaine hydraulique car ils permettent d'atteindre des performances que les matériaux classiques ne peuvent fournir[2]. Le passage des matériaux métalliques aux matériaux composites engendre des coûts importants mais il s'agit en fait d'un investissement à moyen et long terme. L'inhomogénéité et l'anisotropie des matériaux composites rendent leurs mécanismes d'endommagement plus nombreux et plus complexes. Les matériaux composites sont obtenus en assemblant différents constituants élémentaires ayant des comportements macroscopiques différents. Le choix de ces constituants permet d'améliorer les performances du matériau final, de manière à répondre à un besoin spécifique (légèreté, résistance aux efforts, bonne tenue à la fatigue...). Au sein d'une structure composite, on peut voir apparaître endommagement constitué de micro-décohésions et de microfissures, des ruptures de pli, ruptures des fibres et des matrices, décohésion de l'interface....

La compréhension du comportement mécanique des coques en composites est essentielle pour assurer l'intégrité de ces structures au cours de leur durée de fonctionnement. Plusieurs des études ont porté sur la prédiction de configurations optimales des stratifiés pour améliorer la capacité de charge des coques cylindriques en composites sous différentes conditions de charge telles que la compression axiale pure [3-5], la compression axiale et de torsion combiné [6,7] et charge transversale [8]. Dans notre travail, nous nous intéressons sur un autre aspect important associé à un comportement de flambement des coques cylindriques en composites : sa sensibilité potentielle à la présence d'une fissure. La présence de défauts tels que les fissures, qui peuvent se développer au cours de la vie de fabrication ou de service de coques cylindriques composites, pourrait sérieusement affecter le comportement de flambement des structures non seulement en réduisant leur capacité de charge.

1 Présentation de la problématique du flambement

Le matériau composite stratifié d'un pipe contient une phase discontinue de renfort plus rigide et plus résistante que la phase continue de la matrice. Ses propriétés mécaniques résultent essentiellement de :

- La nature des constituants et leurs propriétés.
- La géométrie du renfort (forme, élancement), sa distribution (répartition, orientation), ainsi que sa concentration (taux volumique ou massique).

La recherche de nouveaux matériaux composites plus performants pour les applications spatiale, aéronautique et hydraulique a causé, depuis quelques années, un grand intérêt de la part des industriels.

Il est demandé souvent de plus en plus aux fabricants des pipes d'améliorer leur résistances aux sollicitations thermiques et mécaniques auxquelles ils sont soumis lors de leur mise en service : (flambement, chocs, abrasion, fissures, ruptures) [3]. Dans ce papier, nous nous sommes intéressés à l'analyse linéaire du flambage par la méthode des éléments finis pour étudier le comportement de ces matériaux ; la tendance est donc d'une part, voir l'effet des sollicitations de compression en présence une et plusieurs fissures et d'autre part, montrer l'effet de l'épaisseur de la couche et l'orientation des fibres dans le pipe. Le but du présent travail était de résoudre le problème de flambement pour la coque composite cylindrique soumise à une pression uniforme externe à l'extrémité libre et l'autre extrémité comportant le bord complètement encastree. L'un des avantages des stratifiés est la possibilité d'orienter les fibres selon des directions adaptées aux efforts imposés à la structure. La conception d'une structure stratifiée passe donc par le choix des matériaux, des orientations des fibres et de l'agencement des plis (séquence d'empilement de plis d'inclinaison donnée).

2 Modèles géométriques du pipe

2.1 Pipe sans fissure

Pour bien mener cette étude, nous avons considéré une coque cylindrique en composite stratifié (AS4/PEEK) composée de 12 plis orientés alternativement selon $(\theta / -\theta)_6$. La longueur du pipe est $H = 6m$ et l'épaisseur de plis $e_p = 0.127mm$. L'effet de l'orientation des fibres du composite et la taille du diamètre pipe sur le coefficient de flambement sont mis en évidence. La figure 1, montre les conditions aux limites et le maillage utilisé dans les calculs.

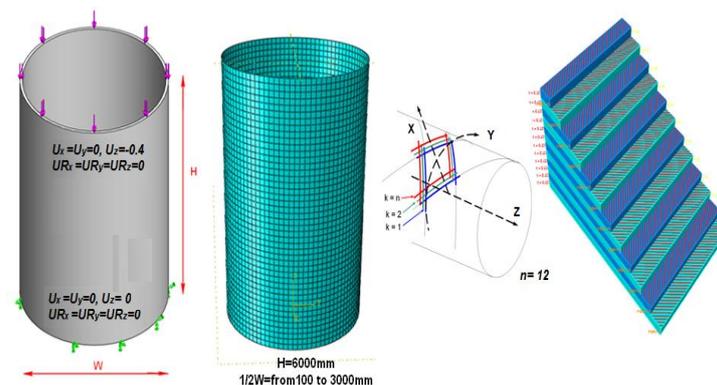


FIG. 1 – Modèle géométrique, maillage et nombres de plis du pipe.

Le pipe est sollicitée en compression dans la direction perpendiculaire sur l'extrémité libre sous la contrainte appliquée 1N par unité de longueur. Dans une première approche on considère le modèle géométrique du pipe sans défaut (Figure 1). Dans la seconde, on prévoit l'existence d'une fissure dans le pipe en composite. L'effet de la taille de la fissure et sa position sont étudiés (Figure 2).

TABLE I. Caractéristiques mécaniques du matériau

les propriétés	E1(MPa)	E2(MPa)	ν_{12}	G12(MPa)	G13(MPa)	G23(MPa)
AS4/PEEK	234000	14000	0.2	2750	2750	5600

Dans le calcul nous avons employé le code commercial des éléments finis ABAQUS 6.11. Nous avons utilisé 12850 éléments quadrilatéraux à huit nœuds avec un maillage raffiné et spécial au voisinage de la fissure comme le montre la Fig.2. La résolution a été faite en état de contraintes planes. Les caractéristiques mécaniques du matériau étudié sont reportées dans le tableau I.

2.2 Pipe en présence d'une fissure

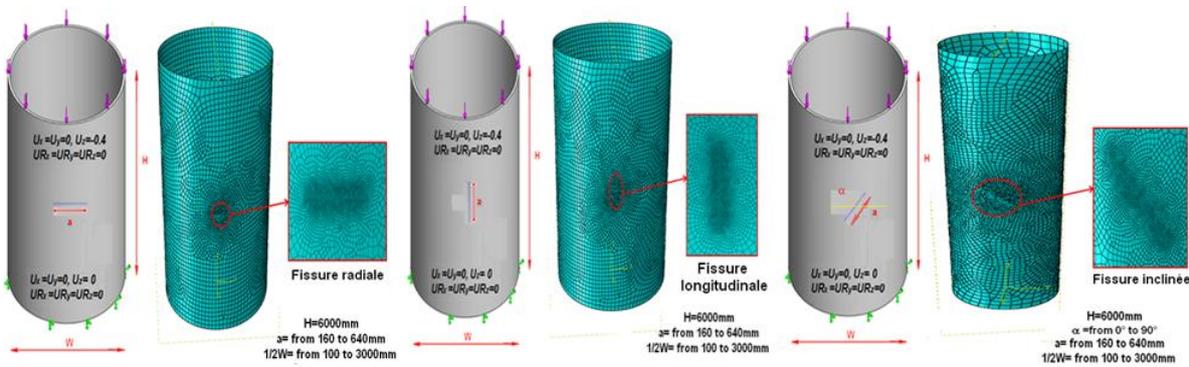


FIG. 2 – Modèle géométrique et maillage du pipe en présence d'une fissure.

3 Influence de l'orientation des fibres sur le coefficient de flambement

La Figure 3 représente la variation de coefficient λ en fonction de l'orientation des fibres θ du matériau composite pour des diamètres différents du pipe. Il est clair que l'augmentation du rayon de pipe conduit à la diminution de coefficient de flambement. Ainsi que les valeurs maximales sont obtenues par les plus faibles orientations des fibres dans un intervalle variant de 0° à 20° . Ceci montre que lorsque les fibres ont tendance à être parallèle à la charge appliquée, la résistance du pipe sera de plus en plus importante. A $\theta=0^\circ$ le paramètre de flambement est de onze fois plus important que celui obtenu à 90° pour le plus faible diamètre du pipe.

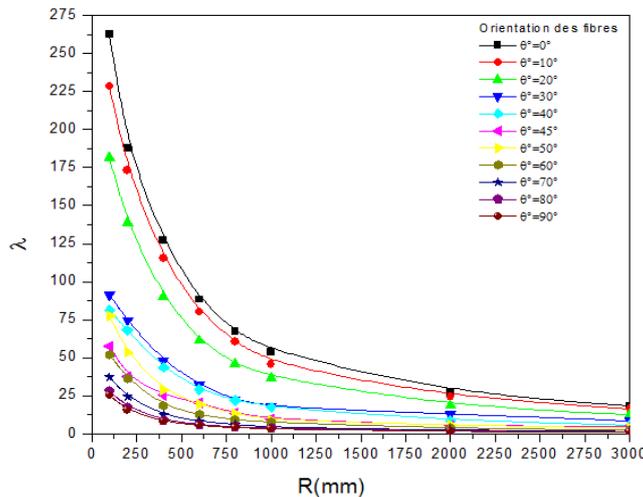


FIG. 3 – Effet de l'orientation des fibres ($\theta = - \theta$) : $\lambda \text{ } \delta \text{ } (R)$.

4 Influence de diamètre du pipe sur le coefficient de flambement λ

La Figure 4 montre l'évolution du coefficient de flambement en fonction de l'orientation des fibres des plis du matériau composite. Il est à noter que quelque soit le diamètre du pipe, nous constatons une diminution de λ avec l'augmentation de l'angle d'orientation des fibres. Sauf pour l'angle $\theta=0^\circ$ on remarque une nette stabilisation de coefficient de flambement λ jusqu'à 40° , au-delà de cette valeur λ diminue.

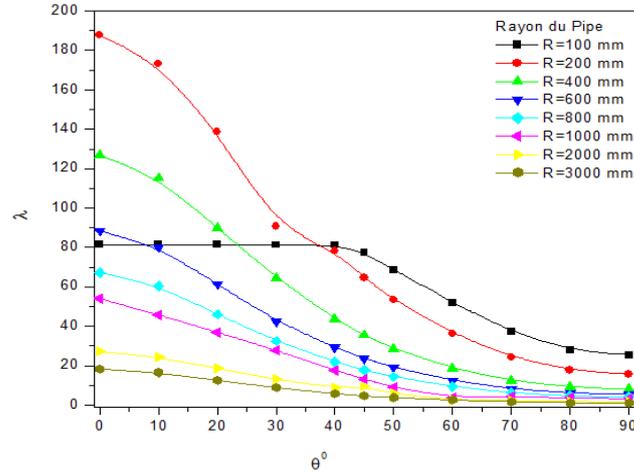


FIG. 4 – Effet du diamètre du pipe sur λ .

5 Influence du nombre de plis

Sur la Figure 5 on montre l'effet du nombre de plis sur la variation du paramètre de flambage λ . Il est à constater que l'accroissance du nombre de plis fait croître la valeur du coefficient de flambement λ . Ceci montre que le pipe est de plus en plus stable en augmentant le nombre de couche. En plus l'augmentation d'orientation des fibres ($\theta = \theta$) provoque la diminution de λ . Les valeurs de λ sont maximales lorsque $\theta=0^\circ$. Nous constatons que le paramètre λ passe du simple au double en augmentant le nombre des plis de 12 à 26 couches.

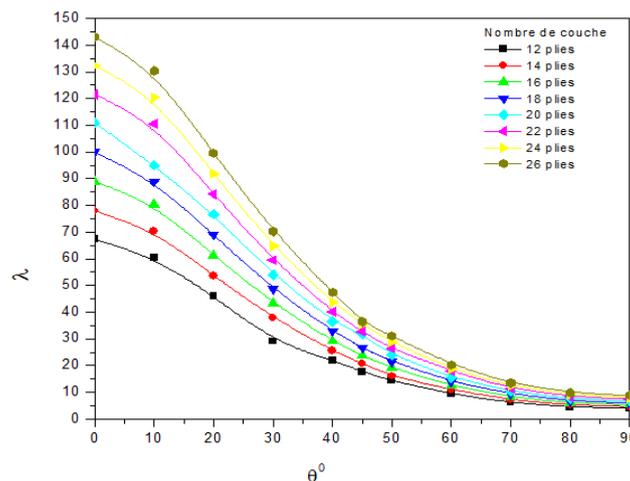


FIG. 5 – Effet de variation du nombre de couche: $\lambda \propto (E_p)$.

6 Influence de la fissure sur λ

Sur la Figure 6, on montre l'effet de la présence de fissure et sa taille sur la variation du paramètre λ . Trois différentes orientations sont considérées : Fissure circonférentielle, fissure longitudinale et fissure inclinée. Il est à noter que λ diminue quasi-linéairement en fonction de l'augmentation de l'orientation des fibres pour le cas de la fissure circonférentielle. Pour les deux autres cas, λ cette diminution est plus importante avec l'importance de la taille de la fissure. La Figure 6, montre que le paramètre de flambement augmente exponentiellement en fonction de la diminution de l'angle d'inclinaison des fibres du matériau composite pour les deux cas de fissure longitudinale et inclinée. Cette augmentation est beaucoup plus rapide et importante à partir de l'angle $\theta \geq 45^\circ$. Les plus faibles valeurs de λ sont obtenues pour le cas de la fissure longitudinale, ce qui montre que ce type de fissure affecte négativement la stabilité de la structure. Par contre les plus importantes valeurs sont obtenues pour le cas de la fissure inclinée. Dans ce cas, les valeurs passent du simple au triple en comparaison avec le cas de la fissure longitudinale.

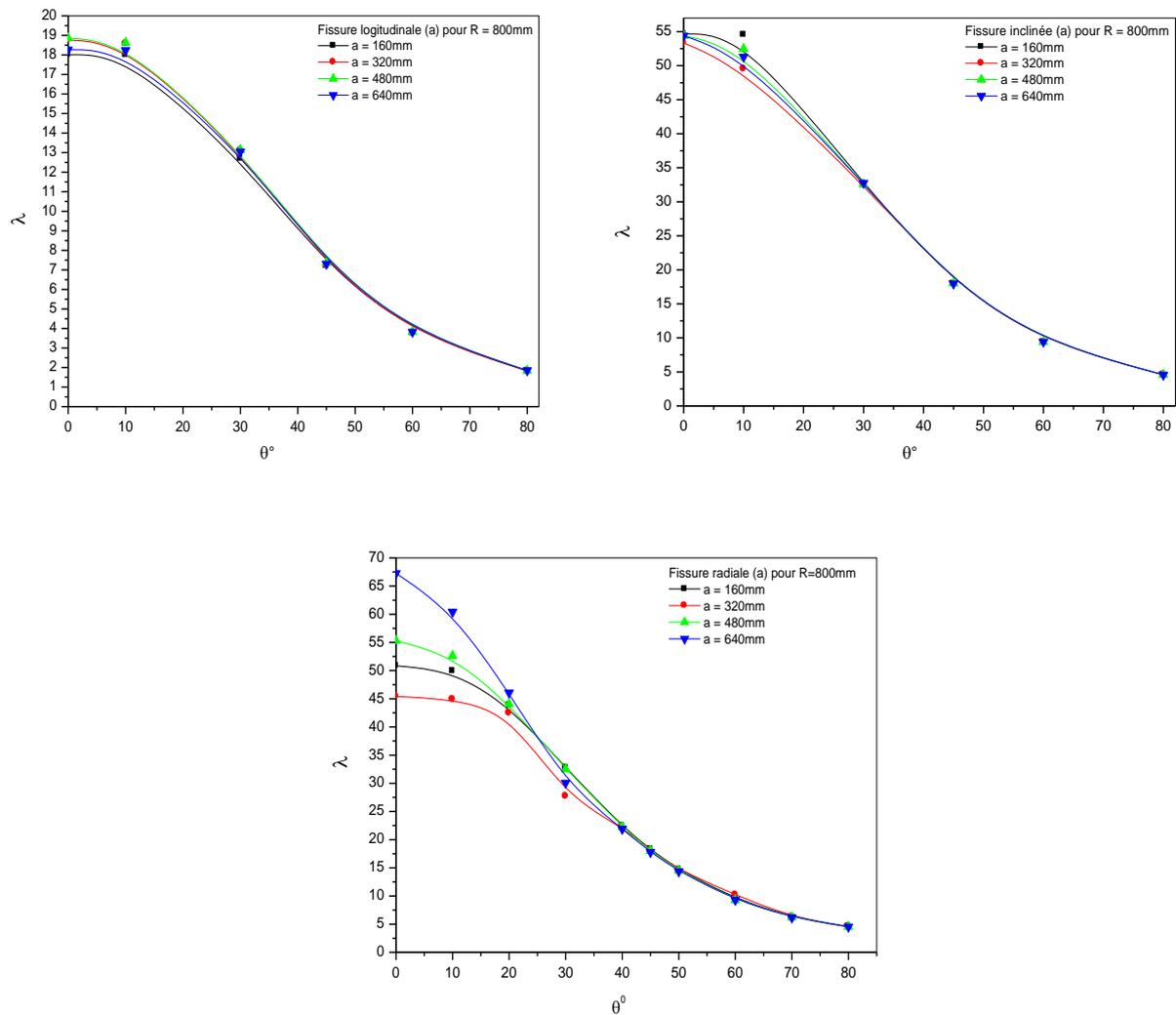


FIG. 6 – Effet de la fissure.

Conclusion

L'étude a été menée en utilisant le code de calcul (ABAQUS). Nous avons déterminé le paramètre de flambement dans un pipe en composite stratifié sous l'effet de compression uni-axiale avec et sans la présence de fissure.

L'ensemble des résultats obtenus montrent :

- La charge critique de flambement atteint des valeurs maximales importantes lorsque les fibres sont orientées à 45°. Les valeurs minimales sont obtenues lorsque les fibres sont orientées dans l'intervalle de 50° à 90°.
- L'augmentation du rayon du pipe conduit à la diminution du paramètre de flambage et les valeurs maximales sont obtenues pour les plus faibles orientations des fibres.
- Les contraintes maximales sont obtenues pour le rayon de 400mm.
- Par ailleurs, l'augmentation du nombre de plis du pipe en composite mène à l'accroissement du paramètre du flambage, donc à une meilleur la stabilité de la structure.
- En présence de fissures, longitudinale et inclinée, λ augmente exponentiellement en fonction de la diminution de l'angle d'inclinaison des fibres du matériau composite. Cette augmentation est beaucoup plus rapide et importante à partir de l'angle $\theta \geq 45^\circ$.

Les plus faibles valeurs de λ sont obtenues pour le cas de la fissure longitudinale, ce qui montre que ce type de fissure affecte négativement la stabilité de la structure. Par contre les plus importantes valeurs sont obtenues pour le cas de la fissure inclinée. Dans ce cas, les valeurs passent du simple au triple en comparaison avec le cas de la fissure longitudinale.

References

- [1] Vaziri A., on the buckling of cracked composite cylindrical shells under axial compression, *Compos Struct*; 80:152–158(2007).
- [2] G. cailletaud, M. tijani, S. cantournet, L. corte, S. el arem, S. forest, E. herve-luanco, M. maziere, H. proudhon, D. ryckelynck. *Mécanique des matériaux solides*. Mars 2011; 2.
- [3] Weaver PM. Design of laminated composite cylindrical shells under axial compression. *Composites Part B* 2000;31:669–79.
- [4] Weaver PM, Driesen JR, Roberts P. The effects of flexural/twist anisotropy on compression buckling of laminated cylindrical shells. *Compos Struct* 2002;55:195–204.
- [5] Geier B, Meyer-Peiening HR, Zimmermann R. On the influence of laminated stacking on buckling of composite cylindrical shells subjected to axial compression. *Compos Struct* 2002;55:467–74.
- [6] Meyer-Peiening HR, Farshad M, Geier B, Zimmermann R. Buckling loads of CFRP composite cylinders under combined axial and torsion loading-experiments and computations. *Compos Struct* 2001;53: 427–35.
- [7] Diaconu CG, Masaki S, Sekine H. Buckling characteristics and layup optimization of long laminated composite cylindrical shells subjected to combined loads using lamination parameters. *Compos Struct* 2002;58:423–33.
- [8] Sai Ram KS, Sreedhar Babu T. Buckling of laminated composite shells under transverse load. *Compos Struct* 2002;55:157–68