



HAL
open science

Flambage de structures composites tubulaires sous pression externe

Hilario Hernandez-Moreno, Bernard Douchin, Francis Collombet, Dominique Choqueuse, Peter Davies

► **To cite this version:**

Hilario Hernandez-Moreno, Bernard Douchin, Francis Collombet, Dominique Choqueuse, Peter Davies. Flambage de structures composites tubulaires sous pression externe : Construction de champs par corrélation calculs analytiques - essais. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01490611

HAL Id: hal-01490611

<https://hal.science/hal-01490611>

Submitted on 15 Mar 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Flambage de structures composites tubulaires sous pression externe

Construction de champs par corrélation calculs analytiques - essais

Hilario Hernández-Moreno^{*,} — Bernard Douchin^{*} — Francis Collombet^{*} — Dominique Choqueuse^{***} — Peter Davies^{***}**

** Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse, équipe PRO²COM
IUT Paul Sabatier, 133c avenue de Rangueil, BP 67701, F-31077 Toulouse Cedex 4
Bernard.Douchin@iut-tlse3.fr*

*** Instituto Politécnico Nacional, ESIME Unidad Ticomán
Av. Ticomán No. 600, Col. San José Ticomán, 07340, México D. F., México*

**** IFREMER Service Matériaux & Structures, Centre de Brest
BP 70, F-29280 Plouzané*

RÉSUMÉ. L'étude du flambage de structures composites tubulaires sous pression externe est proposée. Les conditions expérimentales (enceinte hyperbare reproduisant les conditions de chargement en grande profondeur) ne facilitent pas une observation directe et en temps réel du comportement des structures étudiées. Grâce à l'utilisation croisée de modèles analytiques de la littérature et des informations issues de quelques points de mesure, des champs de déformation sont construits. Les modes de flambage et les valeurs de pression critique associées sont identifiés. Un lien explicite est réalisé entre modes d'endommagement et zones d'extrema de déformation.

ABSTRACT. A study of the buckling behaviour of tubular composite structures under external pressure has been performed. The experimental conditions (hyperbaric pressure vessel to simulate deep sea pressure loading) make direct observation of the structural response difficult. By correlating analytical model results with data points the strain fields have been calculated. Buckling modes and the corresponding critical pressures have been identified. An explicit relationship has been established between damage modes and regions of maximum strain.

MOTS-CLÉS: Flambage, tubes composites par enroulement filamentaire, pression externe, dialogue calculs - essais.

KEYWORDS: Buckling, filament wound cylinders, implosion, calculation – experiment dialogue.

1. Introduction

La recherche océanographique en eaux profondes utilise des enceintes instrumentées ; certaines d'entre elles sont en matériaux composites et fabriquées par le procédé d'enroulement filamentaire. Ces enceintes sont principalement exposées à la pression externe pendant le service. Afin de prévoir leur comportement, des cylindres composites verre/époxy réalisés par enroulement filamentaire (rapport diamètre/épaisseur supérieur à 25) (cf. Figure 1a) sont sollicités en pression externe dans une chambre hyperbare (Hernández Moreno, 2006), (cf. Figure 2b). L'angle d'enroulement dans la section centrale des tubes cylindriques a une valeur de 55° (valeur classique en pression externe (Messenger, 2001)), et les deux extrémités sont renforcées par un enroulement à 90° . Les motifs en losanges issus de l'enroulement filamentaire sont superposés dans l'épaisseur du tube afin de garantir une homogénéité du matériau suivant la direction Z (cf. Figure 1b).

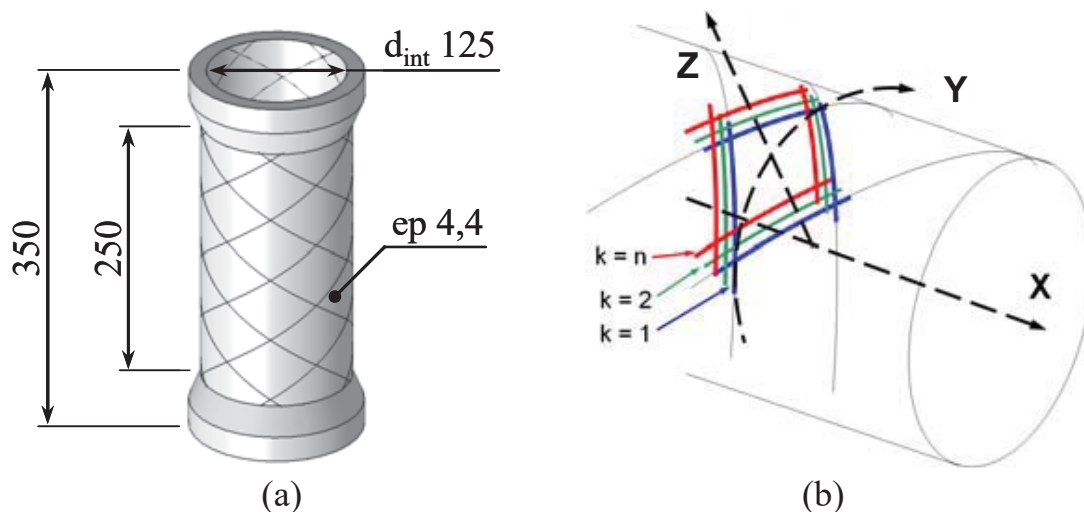


Figure 1. (a) Structure composite tubulaire, (b) superposition des motifs issus de l'enroulement dans l'épaisseur ($k =$ numéro de la couche)

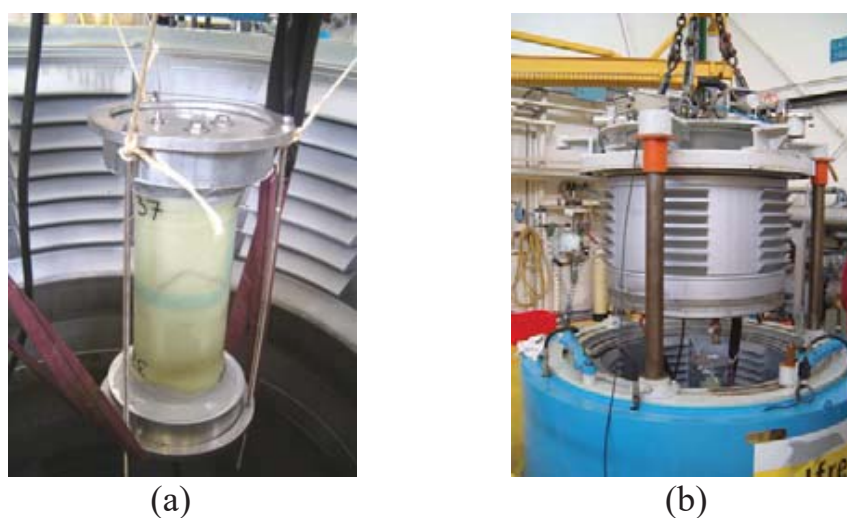


Figure 2. (a) Structure composite lors de sa mise en place dans le caisson hyperbare d'IFREMER Centre de Brest (b)

2. Modèles analytiques de flambage

Les modes et les pressions critiques de flambage sont estimés par différents modèles analytiques de coques cylindriques minces de la littérature (adaptés au cas traité ici) : le modèle de Donnell (Donnell, 1933), celui proposé par Flügge (Flügge, 1973), un modèle modifié de Flügge, le modèle de Cheng et Ho (Cheng *et al.*, 1963), et une version modifiée du modèle de Sanders proposée par Messenger (Messenger, 2001). Les équations d'équilibre de ces modèles sont de la forme suivante (ici pour le modèle modifié de Flügge) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{yx}}{\partial y} - p \left[\frac{\partial w}{\partial x} + r \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right] &= 0 \\ \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} + \frac{1}{r} \frac{\partial M_y}{\partial y} + \frac{1}{r} \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - p \left[\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{1}{2} r \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} \right] &= 0 \\ \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} - \frac{N_y}{r} - p \left[\frac{1}{2} r \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + r \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] &= 0 \end{aligned} \quad [1]$$

où u , v et w sont les déplacements de la coque suivant les directions axiale, circonférentielle et radiale, r est le rayon de la coque (rayon de la surface moyenne du tube), et p est la pression externe appliquée sur la coque. La solution cinématique classique de flambage de coques cylindriques est de la forme (Weaver *et al.*, 2002) :

$$\begin{aligned} u &= U \sin\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{ny}{r}\right) & v &= V \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{ny}{r}\right) \\ w &= W \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{ny}{r}\right) \end{aligned} \quad [2]$$

où U , V et W sont les amplitudes des déplacements u , v , w respectivement, m est le nombre de demi ondes dans la direction axiale, et n est le nombre d'ondes dans la direction circonférentielle. Ces différents modèles ne prennent pas en compte les effets de fond, en accord avec le dispositif de maintien des tubes dans l'enceinte hyperbare, où les tirants verticaux bloquent la compression axiale (cf. Figure 2a). L'évaluation des capacités de ces modèles à restituer la cinématique de flambage, est obtenue en y injectant des lois de comportement élastiques isotropes transverses (une couche d'enroulement étant modélisée par deux unidirectionnels superposés, et l'épaisseur étant estimée en moyenne). Ce choix est confirmé par l'expérience car le comportement des enceintes reste élastique jusqu'au flambage (cf. Figure 4b). La première pression critique donnée par tous les modèles est comprise entre 6,3 et 8 MPa, pour un mode de flambage avec une demi onde axiale et 3 ondes sur la circonférence ($m = 1$ et $n = 3$).

3. Validation expérimentale de la cinématique et construction des champs

Les essais donnent une pression d'implosion moyenne de 6,7 MPa (écart type de 0,3 MPa), et confirment les modes analytiques de flambage (cf. Figure 3c). Les modèles de Flügge et de Cheng et Ho fournissent des prévisions les plus proches des observations expérimentales (cf. Figures 3a et 3b).

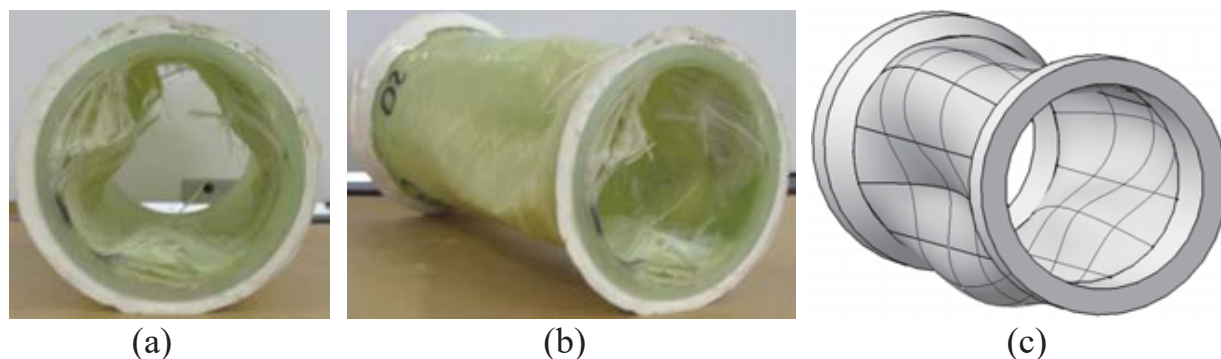


Figure 3. Implosion d'un tube avec un mode 3 circonférentiel (a) et un mode 1 axial (b), et confirmation post-mortem de la cinématique de flambage (c)

Quatre spécimens sont équipés avec des jauges de déformation à l'intérieur du tube, dans la section centrale : quatre jauges dans la direction axiale x et quatre autres suivant la circonférence y (cf. Figure 4a).

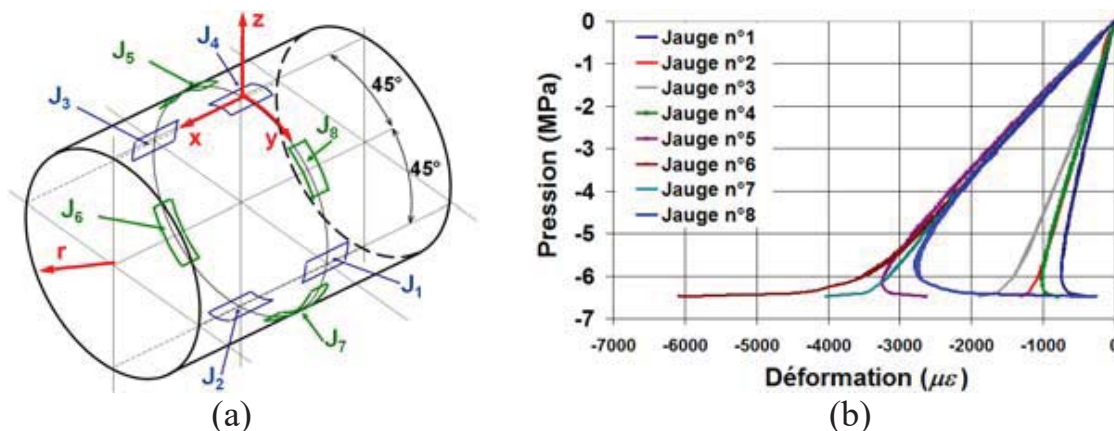


Figure 4. (a) Position et orientation des jauges, (b) courbe caractéristique pression/déformations

Ces structures instrumentées permettent le suivi du comportement lors du flambage, ainsi que la reconstruction, d'après les mesures des jauges (cf. Figure 4b), des champs de déplacement et de déformation sur l'ensemble de la structure (cf. Figure 5). La Figure 6 illustre ces champs de déformation obtenus sur l'ensemble de la structure, dans la section centrale où la déformation circonférentielle prédomine (cf. Figure 6a), et dans une section proche d'une extrémité où la distorsion angulaire est dominante (cf. Figure 6b). De plus, les repères de 1 à 6 permettent d'associer ces déformations aux endommagements montrés Figure 7.

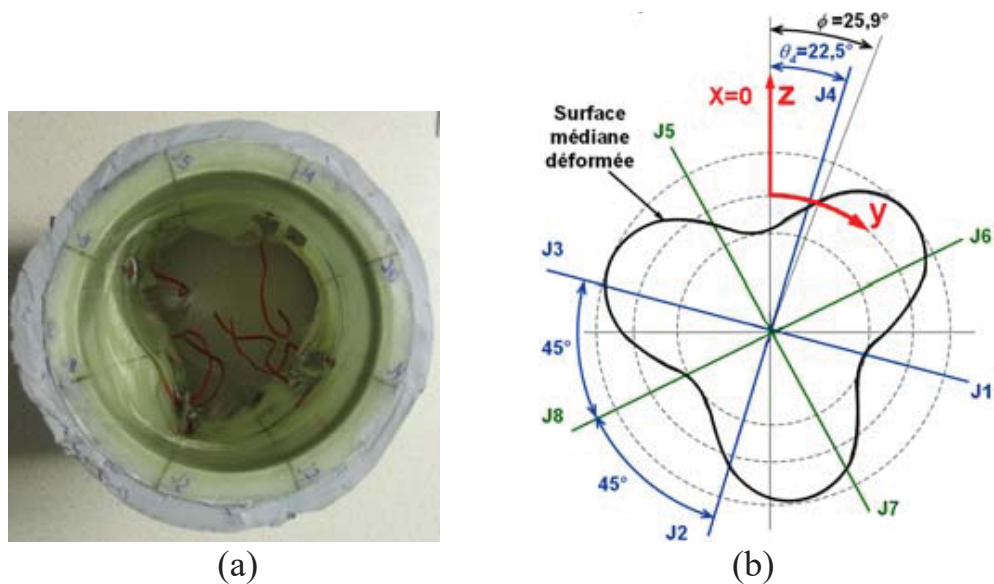


Figure 5. (a) Vue de la déformée et de la position des jauges sur l'éprouvette, (b) exemple de recalage de la position angulaire des jauges

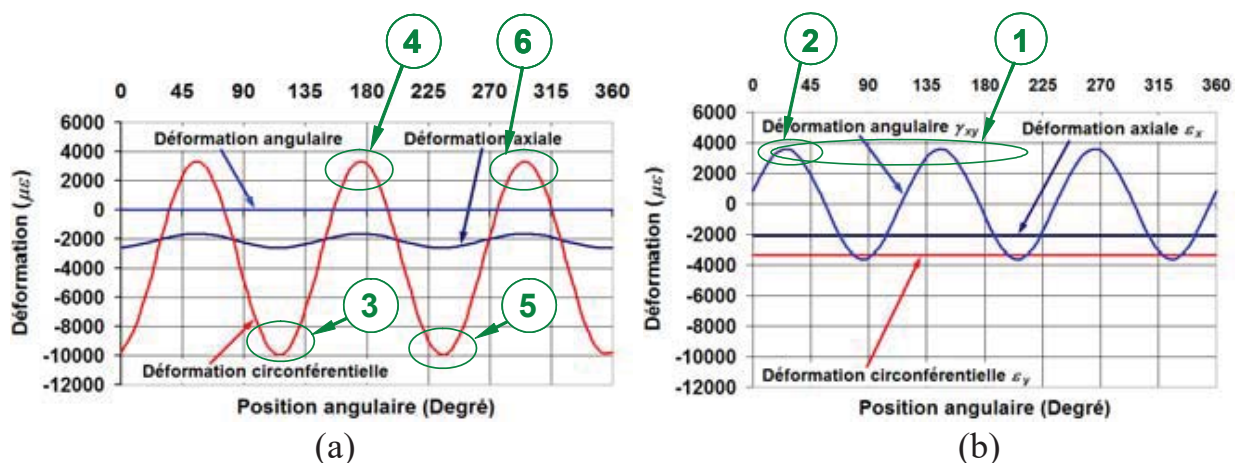


Figure 6. Présentation suivant un repérage angulaire des champs de déformations construits : (a) dans la section centrale du tube, (b) dans une section d'extrémité

L'observation post-mortem des tubes (cf. Figure 7) permet de relier les zones endommagées avec les déformations (cf. Figure 6). Ces zones coïncident avec les lieux de déformations maximales. La zone ① (de 20° à 180°) est associée à des déformations de cisaillement, comme la zone ② (de 0° à 30°). La zone ③ (de 130° à 150°) correspond aux extrema de compression dans les directions longitudinale et circonférentielle. La zone ④ (autour de 195°) est celle des extrema de déformations d'extension. La zone ⑤ (autour de 240°) coïncide avec le lieu d'extrema en compression. La zone ⑥ (autour de 320°) est le siège de déformation d'extension provoquant une fissure longitudinale.

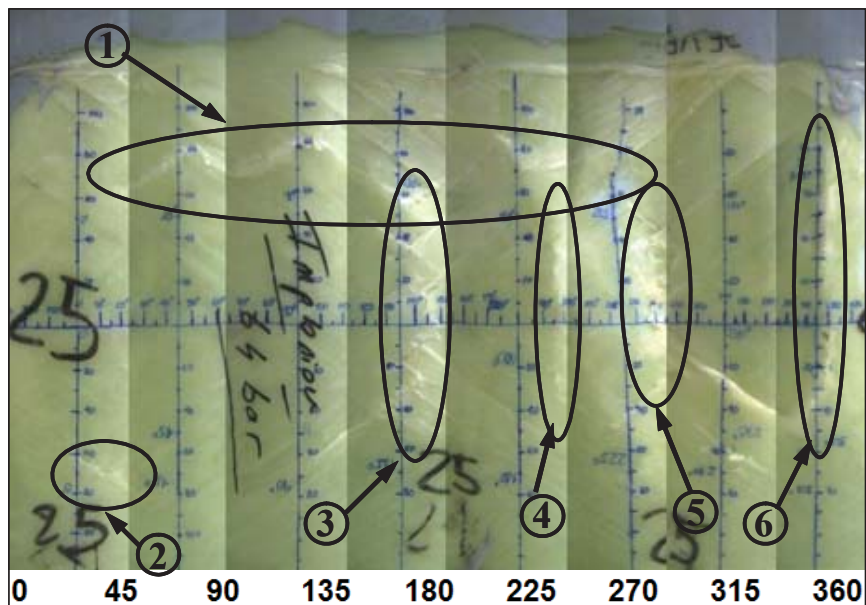


Figure 7. Photos de la surface extérieure développée (de 0 à 360°) d'un tube après implosion et repérage des zones endommagées

A partir de quelques points de mesures, des champs de déformation sont construits. Ils restituent les conditions de flambage par pression externe de tubes composites pour lesquels l'observation directe et en temps réel est très limitée. Ceci est réalisé grâce à une formulation analytique qui fournit de plus des valeurs de pression critique en accord avec l'expérience. Les liens observés entre endommagement post mortem et zones de déformation maximale offrent la perspective de développement de modèles éléments finis pour une étude fine de la ruine de telles structures.

4. Bibliographie

- Cheng S, Ho BPC., "Stability of heterogeneous anisotropic cylindrical shells under combined loading". *AIAA Journal*, Vol. 1, 1963, p. 892-898.
- Donnell LH., Stability of thin-walled tubes under torsion. NACA report No. 479, 1933, p. 95-116.
- Flügge W., *Stress in shells*, 2nd edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg NewYork, 1973.
- Hernández Moreno H., Monitoring de la fabrication de tubes composites réalisés par enroulement filamentaire et comportement mécanique sous pression externe. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse, 2006.
- Messenger T., "Buckling of imperfect laminated cylinders under hydrostatic pressure". *Composite Structures*, Vol. 53, 2001, p. 301-307.
- Weaver P. M., Driesen J. R., Roberts P., "The effect of flexural/twist anisotropy on compression buckling of quasi-isotropic laminated cylindrical shells", *Composite Structures*, Vol. 55, 2002, p. 195-204.