

# Comportement d'une coque confinée sous pression externe – Etude expérimentale

ZEMAM Sajid<sup>1</sup>, JRAD Mohamad<sup>1</sup>, MATHIEU Norman<sup>1</sup>, BUMBIELER Frédéric<sup>2</sup>, HATTAB Mahdia<sup>1</sup>

1. Université de Lorraine, CNRS, Arts et Métiers ParisTech, LEM3, F-57000 Metz, France

2. Andra, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs – France

**RESUME** Les coques cylindriques minces, largement employées comme éléments structuraux, sont sujettes au flambage en raison de leur faible résistance à la flexion sous pression externe. Pour approfondir la compréhension de la stabilité structurelle des cylindres minces en acier soumis à une pression externe uniforme, une étude expérimentale est conduite, incluant une discussion sur le flambage des cylindres en acier confinés par du coulis cimentaire et du sable. L'article met en lumière l'importance de la rigidité du milieu confinant, dans le contexte de la résistance et de la stabilité des structures. Ces résultats offrent une première tentative pour comprendre le phénomène de flambage des coques cylindriques minces confinées sous pression externe.

**Mots-clefs** flambage, confinement, stabilité, coque cylindrique

## I. INTRODUCTION

Le flambage est un phénomène au cours duquel une structure soumise à un chargement subit un changement de mode de déformation. Il intervient suite un accroissement infiniment petit du chargement après une charge dite critique. Selon le cas, le comportement post-critique peut être stable ou non [A. Limam (1991)]. Concrètement, le flambage est un processus au cours duquel une structure soumise à une charge, subit un changement de forme important lié à des effets géométriques non linéaires. La charge critique de flambage est la valeur de la contrainte à partir de laquelle une augmentation infiniment petite de la charge entraîne une modification significative de la forme de la structure, la configuration obtenue est appelée mode de flambage.

On peut différencier le flambage élastique du flambage plastique en fonction de la valeur de la contrainte maximale atteinte dans la structure pendant le chargement critique. En effet, la contrainte maximale dans le cas du flambage élastique est inférieure à la limite d'élasticité, alors que le flambage plastique est accompagné par la plastification de la structure. Le flambage linéaire correspond à une structure qui conserve sa forme jusqu'au flambage. Pendant le flambage non linéaire une déformation pré-flambage apparaît et évolue en fonction du niveau du chargement jusqu'à l'instabilité structurelle [L. Wullschleger&H.-R. Meyer-Piening (2002)].

Dans plusieurs applications, les tubes cylindriques en acier sous pression externe sont confinés dans une cavité rigide ou déformable [Watkins, R. K. (2004)] : pipelines en acier enterrés,

revêtements pour la réhabilitation des pipelines endommagés, tunnels et gaines techniques du secteur de l'énergie munis d'un chemisage, et dans les puits de production de pétrole et de gaz avec tubage en acier. En raison de l'effet confinant de la cavité, le déplacement du cylindre en acier est empêché dans le sens extérieur et le flambage se produit souvent sous la forme d'un « lobe vers l'intérieur » [Omara, A. M., et al. (1997)], comme le montre la figure 1. [Glock, D. (1977)] a proposé une solution analytique pour le problème du flambage d'un tube cylindrique élastique sous pression hydrostatique confiné dans un milieu rigide sans frottement. La pression hydrostatique est directement appliquée sur la section du tube cylindrique et le milieu confinant est non suiveur, ce qui autorise la séparation entre eux. Il s'est basé sur une configuration 2D avec du flambage de type mono-lobe et une formulation énergétique. En employant la méthode de minimisation du potentiel d'énergie, il a obtenu une relation pour calculer la pression de flambage :

$$P_{GL} = \frac{E}{1 - \nu^2} \left( \frac{t}{D} \right)^{2.2} \quad (1)$$

Où E est le module de Young,  $\nu$  est le coefficient de Poisson, D est le diamètre du cylindre et t est l'épaisseur de la paroi.

Des comparaisons avec des résultats d'éléments finis [Kyriakides, S. & Babcock, C.D. (1982)] ont montré que la formule (1) de Glock peut prédire avec précision la pression de flambement d'un tube cylindrique élastiques parfait confiné dans un milieu rigide. Pour le cas du flambage d'un tube cylindrique confiné dans un milieu rigide suiveur, [Cheney, J. A. (1971)] a développé une solution analytique en se basant sur la théorie des petites déformations. La pression critique pour un cylindre parfait est alors obtenue avec la relation suivante :

$$P_{cr}^{ch} = \frac{2.55 E}{1 - \nu^2} \left( \frac{t}{D} \right)^{11/5} \quad (2)$$

Pour tenir compte des défauts de remplissage gap ou vide entre le tube et le milieu confinant rigide (voir figure 2), [El-Sawy, K., & Moore, I. D. (1998)] ont proposé en se basant sur des résultats numériques l'expression semi-empirique suivante pour la pression de flambement des cylindres élastiques :

$$P_{EM} = \frac{2E}{1 - \nu^2} \left( \frac{t}{D} \right)^3 \left( \frac{25 + 700 \left( \frac{t}{D} \right) + 315 \left( \frac{g}{R} \right)}{0.15 + 130 \left( \frac{t}{D} \right) + 1400 \left( \frac{t}{D} \right)^2 + 145 \left( \frac{g}{R} \right)} \right) \quad (3)$$

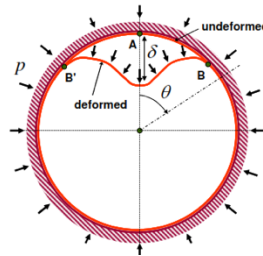
Où g est la valeur maximale du gap entre le tube et la cavité.

Notons que les relations (1), (2) et (3) considèrent un comportement élastique du tube. Cependant les tubes en acier possèdent un comportement de type élasto-plastique. Pour ce type de comportement, [Montel, R. (1960)] a proposé une formule semi-empirique basée sur les travaux du Timoshenko et des résultats expérimentaux et en considérant que le flambage se manifeste lorsque la limite élastique est atteinte :

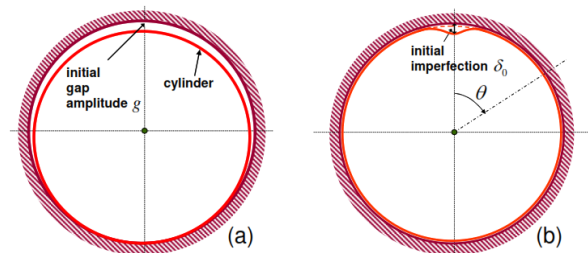
$$P_M = \frac{14.1\sigma_y}{\left( \frac{D}{t} \right)^{1.5} \left[ 1 + \frac{1.2(\delta_0 + 2g)}{t} \right]} \quad (4)$$

Où  $\delta_0$  représente la valeur initiale du défaut géométrique (figure 1) et  $\sigma_y$  la limite d'élasticité de l'acier.

Il a indiqué que cette équation est valable pour  $60 \leq D/t \leq 340$ ,  $250 \text{ MPa} \leq \sigma_y \leq 500 \text{ MPa}$ ,  $0.1 \leq \delta_0 \leq 0.5$ ,  $g/t \leq 0.25$  et  $g/R \leq 0.0025$



**FIGURE 1.** Représentation schématique du problème de flambage d'un cylindre confiné sous pression externe dans une cavité [Daniel Vasilikis, Spyros A.Karamanos (2011)].



**FIGURE 2.** Représentation schématique d'un anneau confiné avec (a) une imperfection initiale de remplissage type gap (b) une imperfection géométrique initiale [Daniel Vasilikis, Spyros A.Karamanos (2011)].

## II. ESSAI DE FLAMBAGE CONFINÉ

Cette étude expérimentale vise à examiner les aspects clés du flambage dans les cylindres en acier confinés, en s'appuyant sur les résultats obtenus pour contextualiser et éclairer notre compréhension. Le flambage, décrit comme une défaillance structurelle due à l'instabilité, a fait l'objet de précédentes études expérimentales pour déterminer ses mécanismes et implications, notamment dans le cas des cylindres en acier. Cependant l'influence du milieu confinant n'a pas été étudiée expérimentalement. Nous avons réalisé des essais de flambage avec deux types de milieu confinant : du sable et du coulis cimentaire comme indiqué dans le tableau 1 ci-dessous.

**Tableau 1.** Milieu confinant utilisé pendant les essais

| Essai No.  | Épaisseur du coulis            | $f_c$ |
|------------|--------------------------------|-------|
| E1_fc_0    | 0 mm (sable seul)              | 0     |
| E2_fc_0,48 | 43 mm (coulis cimentaire seul) | 0,48  |

## A. Préparation des éprouvettes

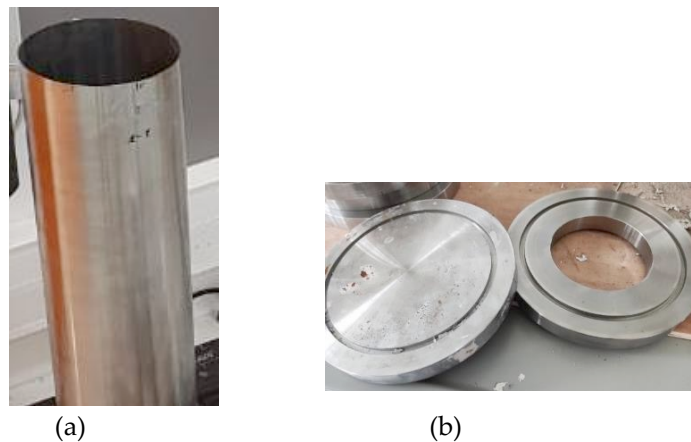
### A.1. Éprouvettes en acier

Les éprouvettes sont des tubes en acier API5L X65. Les caractéristiques mécaniques de l'acier ont été déterminées en laboratoire par des essais de traction uni axiale réalisés sur des éprouvettes découpées dans le même tube d'acier utilisé pour obtenir les éprouvettes d'essais de flambage. Les résultats sont résumés dans le tableau 2 ci-dessous.

**Tableau 2 - Caractéristiques mécanique sous chargement uni axial de l'acier API 5L X65**

| Matériau   | Module d'Young E (MPa) | Coefficient de Poisson | Limite d'élasticité $\sigma_y$ (MPa) |
|------------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| API 5L X65 | 205000                 | 0,3                    | 446                                  |

Dans nos essais, la hauteur de l'éprouvette est de 480 mm, le rayon moyen est égale à 80 mm et l'épaisseur est de 2 mm (rapport  $R/t=40$ ). Aux deux extrémités de la coque, nous positionnons des frettes en acier doux (Figure 3) afin d'assurer des conditions aux limites maîtrisées et reproductibles. En l'occurrence ici, il s'agit d'un encastrement. Pour assurer la liaison entre la coque et les frettes, nous utilisons du métal à bas point de fusion.



**FIGURE 3: (a) Coque cylindrique, (b) Frettes inférieure et supérieure**

Le centrage est vérifié sur la paroi interne en haut et en bas de la coque. Ce procédé permet la fixation de la coque sans avoir à utiliser un serrage mécanique et présente l'intérêt d'être simple à réaliser et reproductible.

### A.2. Coulis cimentaire

Le coulis cimentaire est composé de ciment CEM III/A, de fumée de silice, de bentonite, d'hydrotalcite et d'eau. Le module de Young et la résistance de compression du coulis à l'âge de 14 jours sont respectivement de 154 MPa et 0.56 MPa, en série.

## B. Instrumentation

Afin de mesurer les déformations orthoradiales sur la coque, nous disposons de plusieurs jauges sur la surface externe de l'éprouvette. Les jauges sont collées à mi-hauteur de la coque ( $H/2$ ) et espacées de  $40^\circ$  (9 jauges sur la circonférence, voir Figure 4).



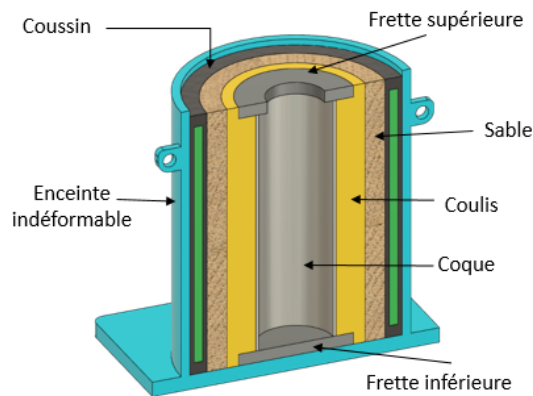
**FIGURE 4** : Schéma d'instrumentation d'une éprouvette cylindrique

### C. Dispositif d'essai

Afin d'étudier le comportement d'une coque mince confinée sous chargement radial, un dispositif d'essai a été développé à l'INSA de Lyon [The Nguyen Nguyen (2017)] et est actuellement utilisé au LEM3 (Figure 5). La coque peut être confinée par du coulis et du sable (en des proportions variables selon les essais), qui remplit l'espace entre la coque et le dispositif de chargement. Le chargement est appliqué au milieu confinant par l'intermédiaire d'un coussin gonflable qui repose contre une enceinte rigide, et transmis à la coque. Le coussin gonflable est relié à une pompe électrique qui le remplit d'huile et le met sous pression. Le capteur de pression est positionné à l'entrée du coussin gonflable. Le coussin gonflable se déforme peu, donc en première approximation, la pression de confinement appliquée sur le milieu confinant est égale à la pression mesurée dans le coussin gonflable. Cependant la pression au niveau du coussin ne reflète pas le chargement appliqué à la coque. Pour empêcher le déplacement axial de la coque, le banc d'essai est placé sous une presse Zwick de 1200 kN, ce qui nous permet également de mesurer la charge axiale en fonction de la pression appliquée. La presse est programmée pour maintenir une position fixe (déplacement imposé) après l'établissement du contact. Le contact est assuré en appliquant une précharge de 2,5 kN. Les données d'essai sont enregistrées sur un PC équipé d'une centrale d'acquisition de données. Les signaux sont enregistrés avec une fréquence d'échantillonnage de 5 Hz.

### D. Protocole expérimental

La première étape consiste en la mise en place de l'échantillon équipé de frettes et instrumenté, au centre du banc d'essai. Ensuite, l'espace entre la coque confinée par du coulis cimentaire (temps de prise de 14 jours) et l'enveloppe gonflable est rempli de sable Hostun S28.



**FIGURE 5 : Banc d'essai de flambage**

Un couvercle métallique est placé pour éviter que le sable ne s'échappe pendant l'essai. La prochaine étape est la mise en contact entre la traverse de la presse et le couvercle (figure 6), puis le démarrage de l'essai et l'acquisition des données, en appliquant une précharge de 2,5 kN.

Une fois que la valeur de la précharge est atteinte, la pompe électrique est activée. L'essai se termine si une des conditions suivantes est vérifiée :

- On atteint la charge souhaitée.
- La limite en force de la presse est atteinte.
- La coque flambe.

Les vannes de la pompe sont ensuite ouvertes et l'acquisition des données est arrêtée lorsque la pression dans le coussin gonflable atteint zéro.



**FIGURE 6 : Banc d'essai fermé avec la traverse de la presse mise en contact**

### III. RÉSULTATS

Les Figures 7, 8 et 9 représentent respectivement l'évolution de la pression au cours du chargement et la déformation orthoradiale du cylindre mesurée par des jauges placées en différents endroits de sa face externe (voir Figure 4). On observe que la pression critique est plus élevée lorsque le milieu confinant est du sable seul (18MPa) que lorsque le milieu confinant est du coulis seul (10MPa). Cela s'explique par le fait que la rigidité du sable ( $E=1000$  MPa) est supérieure à celle du coulis ( $E=154$  MPa). Il est en effet établi que la pression critique augmente avec l'augmentation de la rigidité du milieu confinant [Gumbel, J. E. (1983), Daniel Vasilikis & Spyros A. Karamanos (2011)]. La différence de nature de milieu confinant (matériau granulaire dans la cas du sable vs coulis cimentaire) peut cependant également avoir une influence sur la transmission du chargement mécanique à la coque et donc sur la pression critique de flambage. De même, l'évolution de la déformation orthoradiale lorsque la pression du coussin augmente dépend fortement de la nature du milieu confinant. Dans le cas du sable, ces courbes contiennent deux parties linéaires de pentes différentes (le changement de pente a lieu vers 9MPa). Ce changement de pente pourrait correspondre au passage du domaine élastique vers le domaine plastique ou un changement de mode de déformation sans perte de stabilité. En revanche, dans le cas du coulis, les courbes de la figure 9 ne présentent qu'une variation linéaire, car la pression critique dans le cas du coulis est inférieure à la pression impliquant l'entrée en plasticité de l'acier  $P_y=10.4$  MPa. Le mode de flambement pour les deux essais sont représentés dans les Figures 10 et 11. En ce qui concerne le mode de flambage, nous observons un flambage de type mono-lobe, caractérisé par un lobe de forme étroite et étendue pour le sable, ou un lobe de forme évasée pour le coulis cimentaire.

Le tableau 3 ci-dessous compare les résultats obtenus à partir de l'expérience, représentant la pression du fluide dans le coussin (donc appliquée sur le milieu confinant), avec la pression calculée selon l'équation de Glock, et la pression calculée selon l'équation de Cheney, qui considère le milieu confinant comme un milieu rigide suiveur, en plus de la pression calculée selon l'équation de Montel qui suppose que le flambage se manifeste lorsque la limite élastique est atteinte. Cette comparaison calculs/essais n'est donnée qu'à titre indicatif car les pressions comparées ne sont pas identiques dans les 2 cas (pression appliquée au milieu confinant pour les résultats expérimentaux et pression appliquée à la coque pour les résultats de calcul).

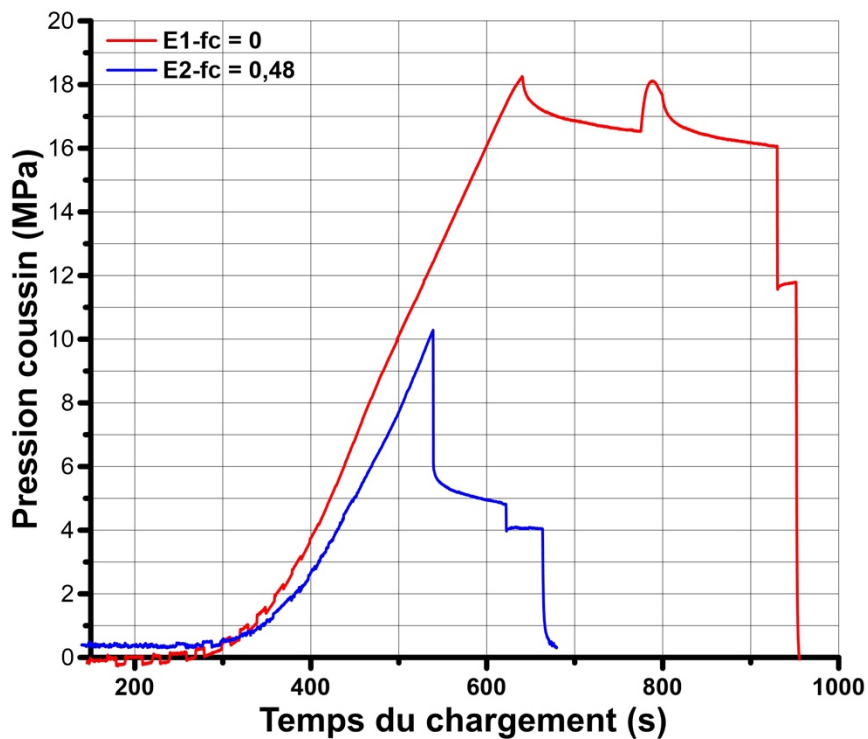


FIGURE 7 : Evolution de la pression dans le coussin au cours du chargement pour les deux essais E1 et E2

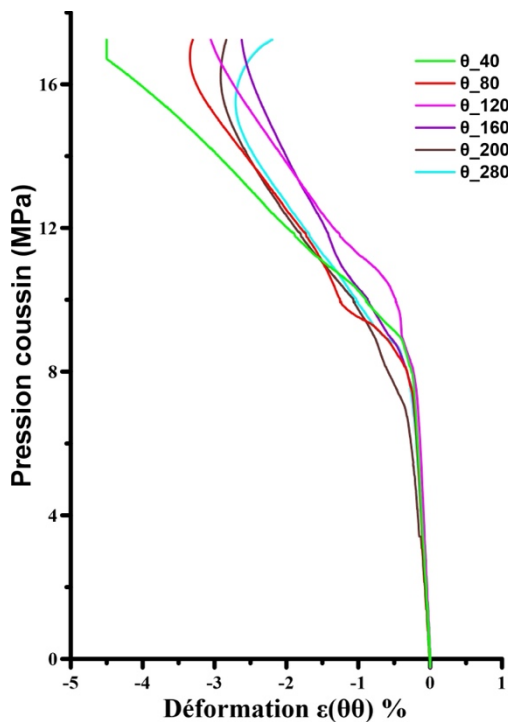


FIGURE 8: Déformations orthoradiales pour l'essai E1\_  $f_c=0$

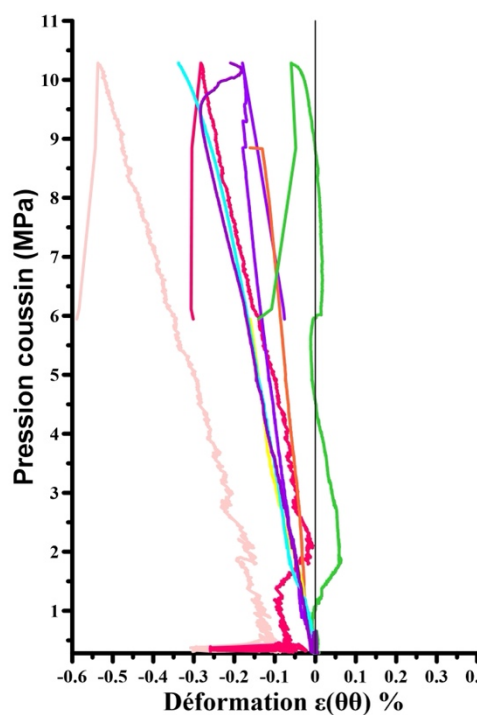
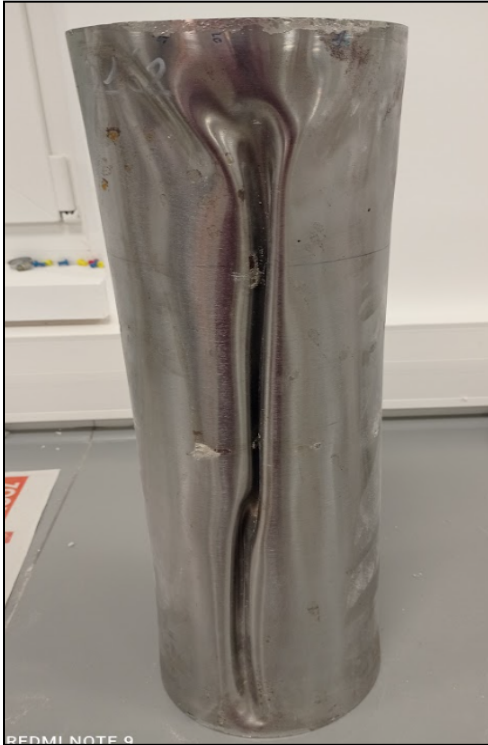


FIGURE 9: Déformations orthoradiales pour l'essai E2\_  $f_c=0.48$



**FIGURE 10** : Déformée du cylindre pour l'essai  
E1\_fc= 0



**FIGURE 11** : Déformée du cylindre pour  
l'essai E2\_fc= 0,48

**Tableau 3** : Comparaison des pressions critiques entre les résultats expérimentaux et les calculs analytiques

| Essai No.  | $P_{\text{experimental}}$ | $P_{GL}$  | $P_{Ch}$  | $P_M$    |
|------------|---------------------------|-----------|-----------|----------|
| E1_fc_0    | 17 MPa                    | 14,65 MPa | 37.36 MPa | 8.79 MPa |
| E2_fc_0,48 | 10,28 MPa                 |           |           |          |

## CONCLUSIONS

Nous avons développé une méthodologie expérimentale pour étudier l'effet de la rigidité du milieu confinant sur le comportement au flambage sous contact de coques en acier. Ce milieu confinant influe sur la pression critique et le mode de flambage. Une baisse significative de la pression critique est observée avec la baisse de rigidité du milieu confinant. Le mode de flambage reste en revanche invariant (mono-lobé) mais la forme finale est légèrement influencée par le changement de milieu confinant.

## REFERENCES

- Cheney, J. A.. (1971), Pressure buckling of ring encased in cavity, *J. Engrg. Mech.*, 97(2), 333-342.,
- El-Sawy, K., and Moore, I. D.,(1998), Stability of Loosely Fitted Liners Used to Rehabilitate Rigid Pipes, *J. Struct. Eng.*, 124(11), pp. 1350–1357.10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:11(1350)
- Glock, D.(1977) Überkritisches Verhalten eines Starr Ummantelten Kreisrohres bei Wasserdruck von Aussen und Temperaturdehnung. (Post-Critical Behavior of a Rigidly Encased Circular Pipe Subject to External Water Pressure and Thermal Extension), *Der Stahlbau*, Vol. 7, pp. 212-217.,
- Gumbel, J. E. (1983). Analysis and design of buried flexible pipes, *thesis presented to the University of Surrey, Surrey, United Kingdom, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.*
- Kyriakides, S.,(1982) Babcock, C.D. On the initiation of a propagating buckle in offshore pipelines, *Third International Conference on the Behavior of Offshore Structures, Boston, MA*, Vol. 2, pp. 187-199.
- L. Wullschleger and H. R. Meyer-Piening(2002), Buckling of geometrically imperfect cylindrical shells - definition of a buckling load, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol.37, pp. 645-657.,
- Limam, A.( 1991), Flambage de coques cylindriques sous combinaison de chargements: pression interne et compression axiale. *Thèse de Doctorat, Lyon : INSA de Lyon*, 211 p.
- Montel, R., (1960), Formule Semi-Empirique pour la Détermination de la Pression Extérieure Limite d'Instabilité des Conduits Métalliques Lisses Noyées dans du Béton, *La Houille Blanche*, 15(5), pp. 560–568.10.1051/lhb/1960048
- Omara, A. M., Guice, L. K., Straughan, W. T., and Akl, F. A.,(1997), Buckling Models of Thin Circular Pipes Encased in Rigid Cavity, *J. Eng. Mech.*, 123(12), pp. 1294–1301.10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:12(1294)
- Vasilikis, D., and Karamanos, S. A.,(2011), Buckling Design of Confined Steel Cylinders Under External Pressure, *ASME J. Press. Vess. Tech.*, 133(1), p. 011205.10.1115/1.4002540
- Vasilikis, D and Spyros A.Karamanos (2009) Stability of confined thin-walled steel cylinders under external pressure *International Journal of Mechanical Sciences* 51(1), pp. 21-32.10.1016/j.ijmecsci.2008.11.006
- Watkins, R. K.,(2004), Buried Pipe Encased in Concrete, *International Conference on Pipeline Engineering and Construction, San Diego, CA, ASCE*. [https://doi.org/10.1061/40745\(146\)87](https://doi.org/10.1061/40745(146)87)