



HAL
open science

Effet des incertitudes mécaniques et géométriques sur la conception des pipelines en composite

Bouhafs Mohamed, Sereir Zouaoui, Alaa Chateauneuf

► To cite this version:

Bouhafs Mohamed, Sereir Zouaoui, Alaa Chateauneuf. Effet des incertitudes mécaniques et géométriques sur la conception des pipelines en composite. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.14. hal-00597879

HAL Id: hal-00597879

<https://hal.science/hal-00597879>

Submitted on 2 Jun 2011

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.

Effet des incertitudes mécaniques et géométriques sur la conception des pipelines en composite

Effect of mechanical and geometrical uncertainties on the composite pipelines conception

Bouhafs Mohamed¹, Sereir Zouaoui², Alaa M. Chateaneuf³

1 : Département d'Electromécanique, Institut de Maintenance et Sécurité Industrielle
Université d'Oran, BP 05 route de l'aéroport, Es-sénia, Oran, Algérie
Email : mohamedbouhafs@yahoo.fr

2 : Faculté de Génie mécanique, Département de Génie maritime, BP 1505 El m'naoer
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf, Oran, Algerier.
Email : serzou@hotmail.com

3 : LaMI – UBP & IFMA
Campus de Clermont-Fd, BP 265, 63175 Aubière cedex, France
Email: alaa.chateaneuf@cust.univ-bpclermont.fr

Résumé

Afin de réduire les contraintes circonférentielles engendrées par un chargement mécanique d'un pipeline en composite, nous avons proposé un modèle analytique basé sur la formulation de Tsai. Une étude paramétrique a été proposée pour valoriser ces contraintes à travers l'épaisseur du pipeline. Pour mettre en valeur la variabilité des incertitudes causées par des défauts de fabrication, des erreurs de manipulation en service ou des endommagements statiques ou cycliques du matériau, nous avons proposé une étude fiabiliste qui cerne la sensibilité des paramètres les plus importants lors de la conception d'un pipeline en composite. En se servant de la méthode de Monte-Carlo, nous avons estimé l'effet des incertitudes dues à la variation des caractéristiques mécaniques et géométriques du pipeline ainsi que la charge appliquée. A partir des résultats obtenus, il a été constaté que pour des coefficients de variation bien contrôlés, les paramètres les plus dominants sont l'épaisseur et la charge appliquée.

Abstract

In order to reduce the hoop stresses caused by a mechanical loading in the composite pipelines, we proposed an analytical model based on Tsai assumption. A parametric study was proposed to develop these stresses through the thickness of the pipeline. To emphasize the variability of the uncertainties caused by manufacturing defects, handling errors in service and static or cyclic damages of material, we proposed a reliability study which determines the sensitivity of the most important parameters during the filament winding pipeline. Using the Monte Carlo method, we estimated the effect of uncertainties due to the variation of the mechanical and geometrical characteristics of the pipeline as well as the applied load. From the obtained results, it was noted that for well controlled coefficients of variation, the most dominant parameters are the thickness and the applied load.

Mots Clés : Contraintes circonférentielles, pipe en composite, fiabilité, méthode de Monte-Carlo.

Keywords : Hoop stresses, composite pipeline, reliability, Monte Carlo method.

1. Introduction

Jusqu'à nos jours les pipelines sont considérés comme le moyen le plus fiable pour le transport des fluides. Selon la nature du produit à transporter, ces pipelines peuvent être fabriqués en acier, en aluminium, en PVC ou en composite. Vu les nombreuses défaillances remarquées lors de l'exploitation des pipelines en aciers, exposés aux milieux corrosifs, la plupart des recherches se sont penchées actuellement vers la construction de nouveaux pipelines performants en matériaux composites. Pour permettre une meilleure construction, il est nécessaire de faire un bon dimensionnement des différents paramètres géométriques ou mécaniques pour assurer un rapport adéquat entre le poids et la résistance. C'est dans ce contexte que plusieurs travaux sont lancés dans le domaine de la conception et la modélisation des pipelines en composite en vue de prolonger leurs durée de vie et de rationaliser leurs exploitations. Dans ce cadre, nous pouvons citer les travaux de Beakou et al [3] qui ont effectué une analyse fiabiliste sur un pipeline en composite avec un angle d'orientation de fibres ($\pm\alpha$). Leur étude consiste à trouver l'incertitude tolérée pour une bonne conception du pipeline. Amirat et al [4] ont réalisé une étude fiabiliste basée sur l'analyse de l'effet

des contraintes résiduelles existantes sur un pipeline en acier. Ces contraintes sont dues à la présence de la corrosion sous contrainte du pipeline. Khelif et al [5] ont proposé une étude fiabiliste pour l'estimation de la durée de vie d'un pipeline en polyéthylène soumis à un chargement externe, à une pression interne et à des conditions d'environnement variables. Frangopol et Recek [6] ont développé une méthode fiabiliste focalisée sur les stratifiés soumis à des chargements aléatoires en définissant le critère de défaillance par l'utilisation de la méthode de Monte Carlo. Tandis que Mitsunori et al [7] ont étudié le comportement probabiliste des fibres d'un composite soumis à une variation des conditions de chargement et des propriétés du matériau. António et Hoffbauer [8] ont proposé une approche qui considère simultanément la fiabilité et la robustesse d'un matériau composite en se basant sur deux méthodes ; la fiabilité basée sur l'optimisation de la conception (RBDO) et l'optimisation de conception robuste (RDO). Hang-Zhou Li et Bak Kong Low [9] ont présenté une méthode fiabiliste du premier ordre (FORM). Cette méthode est utilisée pour le calcul de l'indice de fiabilité d'un tube circulaire soumis à un champ de contraintes hydrostatiques.

Le présent travail a pour objet la proposition d'une étude probabiliste basée sur le calcul de la contrainte circonférentielle σ_θ . Pour atteindre cet objectif, nous avons déterminé la distribution de la contrainte circonférentielle de long de l'épaisseur de notre pipeline. Par la suite, nous avons pris en considération les principaux variables de conception tels que le rapport entre le diamètre intérieur et le diamètre extérieur, l'angle d'orientation des fibres, la charge intérieure ainsi que les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé. Finalement, nous avons déterminé l'évolution de la réponse ainsi que la marge de sécurité en fonction des coefficients de variation.

2. Formulation

2.1 Calcul des contraintes

Pour la formulation mathématique d'un tube soumis à un chargement mécanique, la théorie des stratifiés reste toujours valable, il faut seulement effectuer une transformation nécessaire pour avoir un passage des coordonnées cartésiennes en coordonnées cylindriques. En utilisant les coordonnées cylindriques (r, θ, z) , les contraintes par couche d'un tube multicouches axisymétrique sont données par :

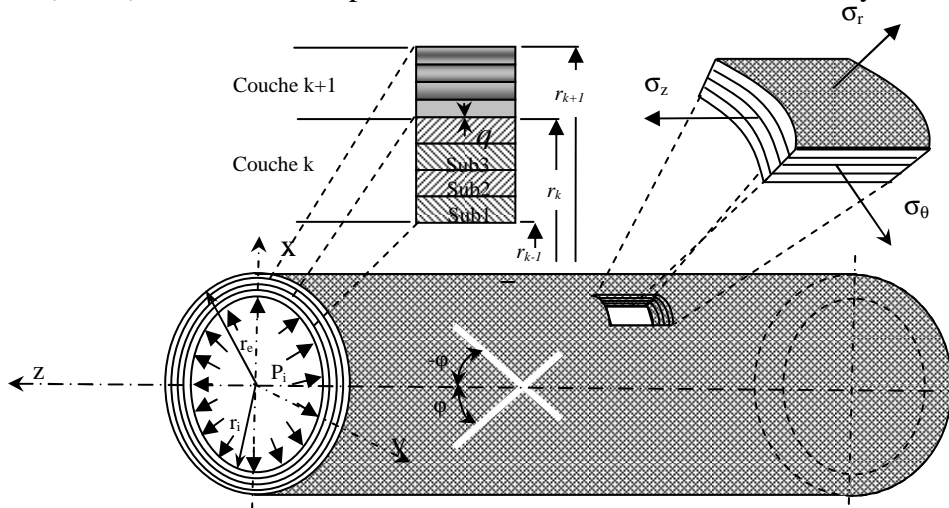


Fig. 1. Coordonnées et état de contraintes pour un pipe en multicouches

$$\begin{aligned}\sigma_r^{(k)} &= \left(\bar{C}_{r\theta}^{(k)} + \lambda_k \bar{C}_{\theta\theta}^{(k)} \right) A_1^{(k)} r^{\lambda_k - 1} + \left(\bar{C}_{r\theta}^{(k)} - \lambda_k \bar{C}_{\theta\theta}^{(k)} \right) A_2^{(k)} r^{-\lambda_k - 1} \\ \sigma_\theta^{(k)} &= \left(\bar{C}_{rr}^{(k)} + \lambda_k \bar{C}_{r\theta}^{(k)} \right) A_1^{(k)} r^{\lambda_k - 1} + \left(\bar{C}_{rr}^{(k)} - \lambda_k \bar{C}_{r\theta}^{(k)} \right) A_2^{(k)} r^{-\lambda_k - 1}\end{aligned}\quad (\text{Eq. 1})$$

A l'interface entre la couche $(k-1)$ et la couche k , la contrainte radiale au niveau de l'interface doit satisfaire les conditions aux limites suivantes:

$$\begin{aligned} r = r_{k-1} &\Rightarrow \sigma_r^{(k)} = -q_{k-1} \\ r = r_k &\Rightarrow \sigma_r^{(k)} = -q_k \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2})$$

En utilisant ces deux conditions, les deux paramètres $A_1^{(k)}$ et $A_2^{(k)}$ sont exprimés par :

$$\begin{aligned} A_1^{(k)} &= \frac{r_{k-1}^{1-\lambda_k}}{\left(\bar{C}_{r\theta}^{(k)} + \lambda_k \bar{C}_{\theta\theta}^{(k)}\right)} \left(\frac{q_{k-1} C_k^{2\lambda_k} - q_k C_k^{\lambda_k-1}}{1 - C_k^{2\lambda_k}} \right) \\ A_2^{(k)} &= \frac{r_k^{\lambda_k+1}}{\left(\bar{C}_{r\theta}^{(k)} - \lambda_k \bar{C}_{\theta\theta}^{(k)}\right)} \left(\frac{-q_{k-1} C_k^{\lambda_k+1} + q_k C_k^{2\lambda_k}}{1 - C_k^{2\lambda_k}} \right) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3})$$

Avec
$$C_k = \frac{r_{k-1}}{r_k}$$

Par la substitution de l'équation (Eq. 3) dans (Eq. 2), la contrainte radiale et circonférentielle sont écrites comme suit:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(k)} &= A^{(k)} \left[\left(\frac{r}{r_k}\right)^{\lambda_k-1} - \left(\frac{r_k}{r}\right)^{\lambda_k+1} \right] + B^{(k)} \left[-\left(\frac{r}{r_k}\right)^{\lambda_k-1} + C_k^{2\lambda_k} \left(\frac{r_k}{r}\right)^{\lambda_k+1} \right] \\ \sigma_\theta^{(k)} &= A^{(k)} \lambda_k \left[\left(\frac{r}{r_k}\right)^{\lambda_k-1} + \left(\frac{r_k}{r}\right)^{\lambda_k+1} \right] - B^{(k)} \lambda_k \left[\left(\frac{r}{r_k}\right)^{\lambda_k-1} + C_k^{2\lambda_k} \left(\frac{r_k}{r}\right)^{\lambda_k+1} \right] \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4})$$

Avec
$$A^{(k)} = \frac{q_{k-1} C_k^{\lambda_k+1}}{1 - C_k^{2\lambda_k}} \quad \text{et} \quad B^{(k)} = \frac{q_k}{1 - C_k^{2\lambda_k}}$$

Utilisant les équations (Eq. 4) et (Eq. 5), nous trouvons :

$$q^{(k+1)} \phi^{(k+1)} r_{k+1} + q^{(k)} \gamma^{(k)} r_k + q^{(k-1)} \phi^{(k)} r_{k-1} = 0 \quad k=1, 2, \dots, (n-1) \quad (\text{Eq. 5})$$

Avec
$$\phi^{(k)} = \frac{2 \lambda_k R_{\theta\theta}^{(k)} C_k^{\lambda_k}}{1 - C_k^{2\lambda_k}} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\gamma^{(k)} = -R_{r\theta}^{(k)} - \frac{\lambda_k R_{\theta\theta}^{(k)} (1 + C_k^{2\lambda_k})}{1 - C_k^{2\lambda_k}} - \frac{\lambda_{k+1} R_{\theta\theta}^{(k+1)} (1 + C_{k+1}^{2\lambda_{k+1}})}{1 - C_{k+1}^{2\lambda_{k+1}}} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\lambda_{k+1} = \sqrt{\frac{R_{rr}^{(k+1)}}{R_{\theta\theta}^{(k+1)}}} = \sqrt{\frac{\bar{C}_{\theta\theta}^{(k+1)}}{\bar{C}_{rr}^{(k+1)}}} \quad (\text{Eq. 8})$$

Pour résoudre le système d'équations donné par l'expression (Eq. 4), nous avons besoin des conditions aux limites aux parois internes et externes du pipeline. Pour un cylindre creux soumis aux contraintes normales $\sigma_r = -P_i$ (pression) sur sa surface interne ($r=r_i$) et à une pression $\sigma_r = -p_e$ sur sa surface externe ($r=r_e$), les conditions aux limites sont :

$$\begin{aligned} r = r_i &\Rightarrow \sigma_r = -P_i \\ r = r_e &\Rightarrow \sigma_r = -P_e \end{aligned} \quad (\text{Eq. 9})$$

2.2 Calcul Fiabiliste

Pour une durée de vie bien définie, la fiabilité est l'aptitude d'un système à garantir sa fonction pour laquelle est destinée. Ainsi, nous pouvons déduire le critère de défaillance par la fonction performance $G(x_i)$ exprimée par l'équation suivante :

$$G(x_i) = R(x_i) - S(x_i) \quad (\text{Eq. 10})$$

Avec $G(x_i)$ définit la marge de sûreté de la structure, x_i variables aléatoires de base, $R(x_i)$ est la résistance et $S(x_i)$ est la sollicitation. $G(x_i) > 0$ représente l'état de sécurité du système, tandis que $G(x_i) \leq 0$ traduit la condition de défaillance. Pour évaluer la probabilité de défaillance, nous avons appliqué la méthode Monte Carlo pour les différentes variables aléatoires (Tableau 1). Les paramètres aléatoires du pipeline sont en relation avec la géométrie, les conditions de services, de fabrication et du choix du matériau. Dans notre cas, la marge de sécurité $G(x_i)$ correspond à la différence entre la résistance transversale Y' et la contrainte circonférentielle calculée σ_θ :

$$G(x_i) = Y' - \sigma_\theta \quad (\text{Eq.11})$$

Paramètres	valeur entrante	CV (%)
E_1	181 GPa	4%
E_2	10.3 GPa	1%
G_{12}	7.17 GPa	12%
p_i	10 MPa	10%
Rap	1	1%
φ	55°	1%

Tab. 1. valeurs des variables aléatoires avec leur coefficient de variations (CV)

3. Applications et discussions

Pour notre application, nous avons choisi un pipeline en composite de diamètre intérieur $d=100$ mm et d'une stratification de seize couches. Pour avoir un rapport de diamètres $Rap=1.05$, le diamètre extérieur est de 105mm. La charge est appliquée seulement aux parois internes du pipeline $p_i = 10$ MPa. Le pipeline possède une longueur totale de 1000 mm. Le matériau pipeline choisi est en graphite/Epoxy T300/5208 avec des caractéristiques mécaniques données au tableau 2.

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{21}	ν_{31}	ν_{32}
181	10.3	10.3	7.17	0.28	0.28	0.59
X (MPa)	X' (MPa)	Y (MPa)	Y' (MPa)	S (MPa)		
1500	1500	40	246	68		

Tab. 2. caractéristiques et Propriétés mécaniques du matériau T300/5208 [10]

Pour atteindre notre objectif, nous avons effectué le couplage entre deux programmes. Le premier se base sur la formulation analytique donnée au paragraphe 2.1 pour la détermination de la distribution de la contrainte circonférentielle et radiale à travers l'épaisseur du pipeline. Les résultats obtenus sont injectés dans le deuxième programme pour le calcul probabiliste en se servant de la méthode de Monte Carlo.

Afin d'avoir une bonne représentation des contraintes mécaniques, chaque pli est subdivisé en dix sous-couches. Nous avons aussi proposé des stratifiés avec des angles d'orientations $\pm\varphi$, comme suggéré dans la littérature. Pour une représentation cohérente de la contrainte radiale et circonférentielle, des quantités adimensionnelles sont employées. La coordonnée adimensionnelle du rayon est définie par $\alpha = \frac{r - r_i}{r_e - r_i}$ de plus la contrainte circonférentielle est divisée par la contrainte

circonférentielle moyenne $\sigma_{\theta m} = \frac{p_i r_i}{r_e - r_i}$.

Notre modèle a été validé numériquement avec la méthode des éléments finis et analytiquement avec les modèles de Xia [2], de Parnas [11] et de Wild [12]. Pour des pipelines avec des séquences d'empilement $[55/-55/55/-55]_{2s}$ sous une pression interne, la figure 2 représente la contrainte circonférentielle σ_θ pour un composite en graphite epoxy T300/934. Par contre à la figure 3, nous avons représenté l'évolution du rapport entre les contraintes circonférentielles $\sigma_\theta/\sigma_{\theta m}$ pour un composite en graphite époxy T300/5208. Pour les deux matériaux, la comparaison montre

une bonne concordance entre nos résultats et ceux donnés par les autres méthodes numériques et analytiques. A la figure 2, l'erreur maximale entre la méthode actuelle et la méthode de Xia [2] n'atteint pas 1.2%, mais avec la méthode des éléments finis elle est seulement de 1.1. Par contre, pour la figure 3, l'erreur maximale est relativement significative, parce que la différence atteint 8.6% en comparaison avec la méthode de Wild [12] et de 6.1% avec la méthode de Parnas [11].

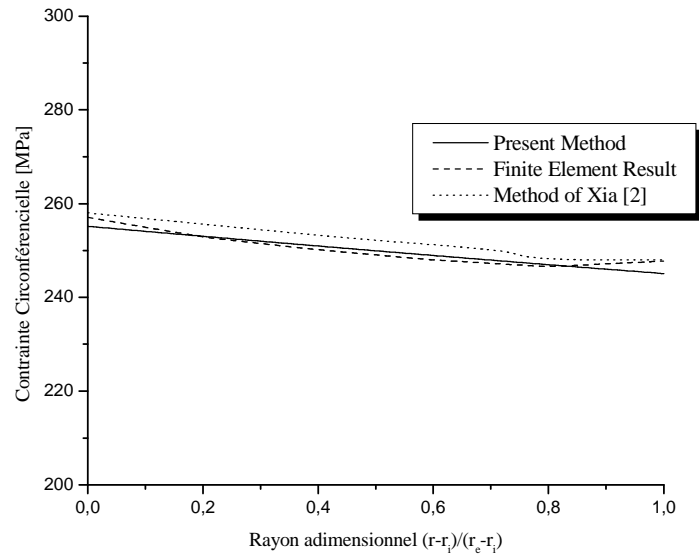


Fig. 2. Distribution de la contrainte circonférentielle par rapport au rayon adimensionnel des trois méthodes utilisées d'un graphite époxy T300/934.

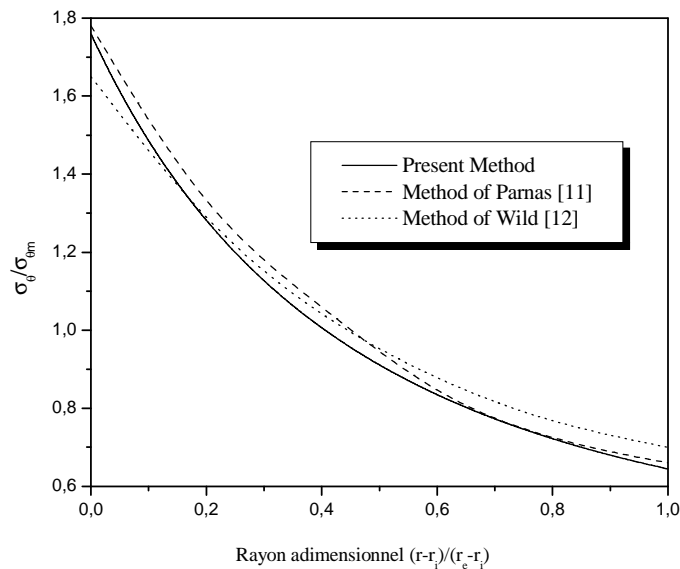


Fig. 3. Distribution de la contrainte circonférentielle $\sigma_\theta/\sigma_{\theta_{\max}}$ en fonction du rayon adimensionnelle pour les trois méthodes utilisant le matériau T300/5208 avec un rapport de rayon $r_e/r_i=1.5$.

La figure 4 représente la répartition des différents facteurs influant sur la variation de la contrainte circonférentielle σ_θ . Pour un rapport de diamètres $Rap=1.05$, nous pouvons déduire que les facteurs qui ont la plus grande influence sont ; le rapport des diamètres avec 68%, la charge interne avec 27%, l'angle d'orientation des fibres avec 5.4% et enfin les caractéristiques mécaniques du matériau

choisi. Par l'augmentation du rapport de diamètres (figures 4.b-d), l'incertitude due aux diamètres diminue, jusqu'à 14% pour $Rap=1.50$, alors que la pression interne enregistre une augmentation assez importante avec plus de 67%. Dans tous les cas, les incertitudes liées aux propriétés mécaniques n'ont pas d'influence significative sur la sécurité du pipeline.

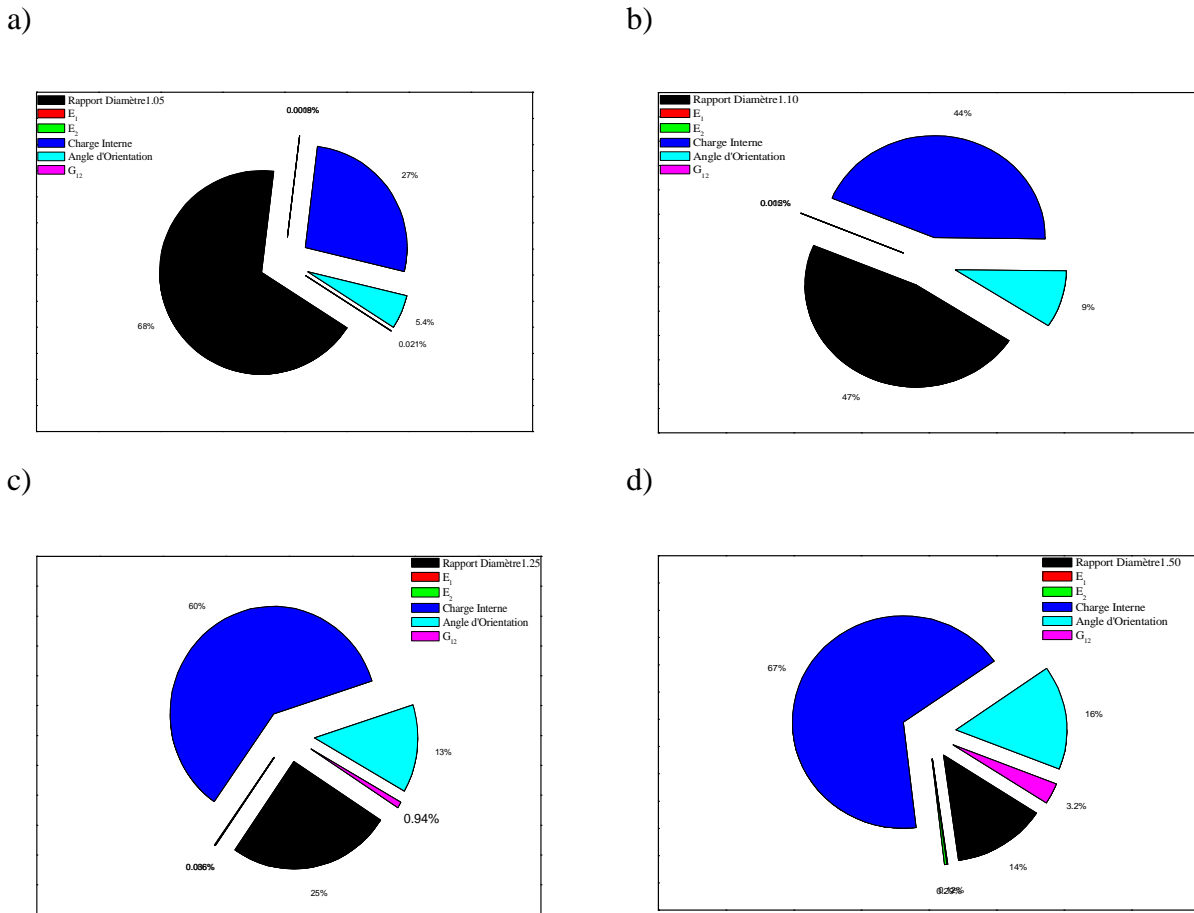


Fig. 4. Représentation hiérarchique des variables importantes d'un pipeline pour des rapports de diamètre a) $Rap= 1.05$, b) $Rap=1.10$, c) $Rap=1.25$, d) $Rap=1.50$.

Afin d'estimer les risques d'endommagement provoqués par des incertitudes géométriques et mécaniques représentées par les coefficients de variation (Tableau 1), il est nécessaire de définir la fonction $G(x_i)$ qui exprime la marge de sécurité ou l'état limite de notre pipeline. Selon la figure 5, il est clair que cette marge de sécurité délimite le champ de service et constitue la limite du champ d'endommagement lorsqu'elle est égale à zéro. Pour un rapport $Rap= 1.05$, il est évident que les incertitudes dues aux caractéristiques mécaniques ne présentent aucun danger. En employant d'autres paramètres tels que la variation de la pression et du diamètre externe, le danger devient plus probable.

De cette figure, nous avons effectué une variation progressive des coefficients de variation des différents facteurs dominant pour $Rap1.05$. Nous avons commencé par les moins dominants pour finir avec ceux qui ont une forte influence. Il est clair que la variation est bien visible ; soit sur la contrainte ou bien sur l'amplitude de la fréquence probabiliste du système surtout pour les paramètres les plus dominants. Pour un changement des propriétés mécaniques (moins dominants), la variation de la contrainte est presque négligeable. Par le changement de l'ensemble des paramètres donnés aux tableaux 1, la variation de la contrainte est très importante avec une queue très prolongée vers le coté droit.

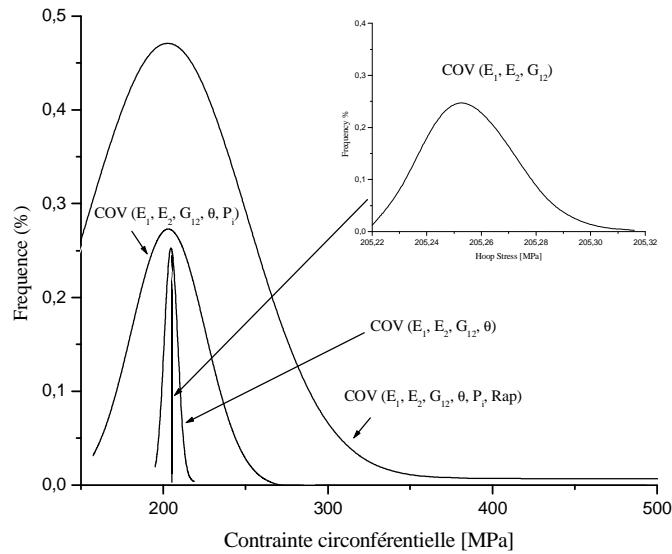


Fig. 5. Réponse du système sur la contrainte circonférentielle pour une variation simultanée des coefficients de variations pour $Rap=1.05$.

Aux figures 6, 7 et 8, nous avons évalué séparément les trois facteurs influant sur la probabilité d'endommagement de notre pipeline. Il s'agit de l'épaisseur du pipeline (rapport des diamètres), la charge interne et l'angle d'orientation des fibres. Pour mettre en valeur chaque facteur, nous avons varié progressivement leurs coefficients de variation pour $Rap=1.05$.

Dans la figure 6, nous avons changé le coefficient de variation de 2% et 18%. Il est clair que l'augmentation de ce coefficient de variation engendre une nette augmentation de la fréquence et une réduction de la marge de sécurité. Donc, le risque d'endommagement devient plus probable. La même constatation est faite lors de l'évaluation du coefficient de variation dans la figure 7. Mais cette fois le risque est encore plus probable, parce que la marge de sécurité est remarquablement réduite pour des faibles coefficients de variation. La zone d'endommagement est très allongée vers le côté droit. De la figure 8, il est nettement visible que l'évaluation de l'angle d'orientation ne présente pratiquement aucun danger sur la sécurité de notre pipeline, puisque les contraintes circonférentielles calculées sont très inférieures à celles de la contrainte transversale Y' (Tableau 2). Par conséquent, la fonction $G(x_i)$ est toujours positive.

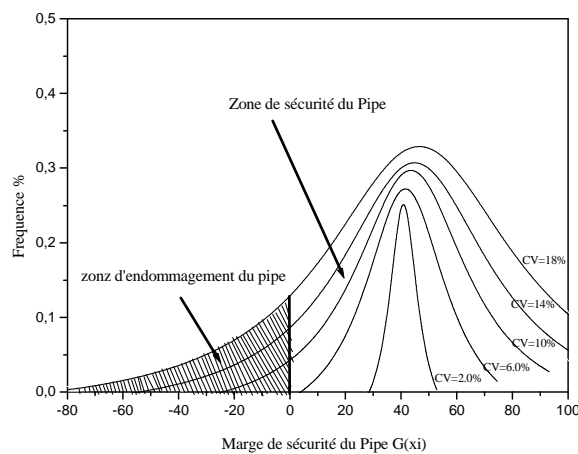


Fig. 6. Evolution de la marge de sécurité pour une variation du coefficient de la charge interne avec $Rap=1.05$.

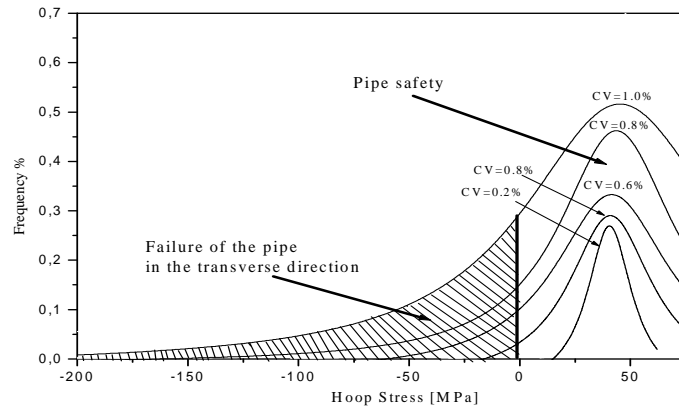


Fig. 7. Evolution de la marge de sécurité pour une variation du coefficient du diamètre externe avec $Rap=1.05$.

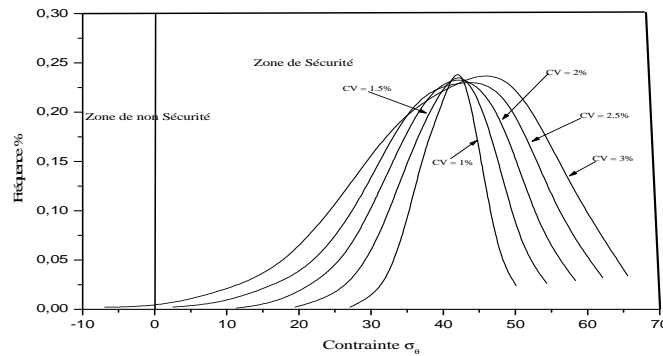


Fig. 8. Evolution de la marge de sécurité pour une variation du coefficient de l'angle d'orientation avec $Rap=1.05$.

Conclusion

Du présent travail, nous pouvons dire que le modèle analytique proposé pour le calcul des contraintes circonférentielles et radiales à travers l'épaisseur du pipeline est très précis comparativement aux autres méthodes numériques et analytiques. Sous une pression interne, la contrainte circonférentielle enregistre des valeurs maximales comparativement à la contrainte radiale. Donc, elle représente plus de risque pour notre pipeline.

Le couplage entre le programme du calcul des contraintes et celui du calcul probabiliste, nous a permis d'identifier les principaux paramètres influant sur l'endommagement du pipeline. A partir des résultats obtenus, nous avons constaté que la détermination des facteurs dominant est jugée très utile pour la conception de notre pipeline, parce qu'elle nous donne une idée générale sur les erreurs et les incertitudes tolérées. Nous avons constaté aussi que les paramètres influant sont, l'épaisseur totale du pipeline, le mode de chargement, les séquences d'empilement et enfin les propriétés mécaniques du matériau composite choisi. Il est aussi à signaler que la valeur du coefficient de variation de chaque paramètre est un facteur déterminant pour la localisation de la zone de sécurité et la zone d'endommagement probable lors de la conception.

Références

[1] Stephen W. Tsai et Ajit K. Roy «Introduction to Composite Materials, Pressure Vessels section 23», Technomic Publishing Company, Inc., 1980.
 [2] M. Xia, K. Kemmochi, H. Takayanagi. «Analysis of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipe under combined internal pressure and thermomechanical loading», Composite Structures 51 (2001) 273-283.
 [3] A. Beakou, A. Mohamed, « Influence of variable on the optimum winding angle of cylindrical laminated composites », composite structures 53 (2001) 287-293.

- [4] A. Amirat, A. Mohamed-Chateaneuf, K. Chaoui, «Reliability assessment of underground pipelines under the combined effect of active corrosion and residual stress», *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 83 (2006) 107–117.
- [5] Rabia Khelif, Alaa Chateaneuf, Kamel Chaoui, «Reliability-based assessment of polyethylene pipe creep lifetime», *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 84 (2007) 697–707.
- [6] D. M. Frangopol, S. Recek, «Reliability of fiber-reinforced composite laminate plates », *Probabilistic Engineering Mechanics* 18 (2003) 119–137.
- [7] Mitsunori M, Y. Murotsu, T. Tanaka, S. Shao, «Reliability-based optimization of fibrous laminated composites», *Reliability Engineering and System Safety* 56 (1997) 285-290.
- [8] C. C. António et L. N. Hoffbauer, «An approach for reliability-based robust design optimization of angle-ply composites», *Composite Structures* 90 (2009) 53–59.
- [9] Hang-Zhou Li, Bak Kong Low, «Reliability analysis of circular tunnel under hydrostatic stress field», *Computers and Geotechnics* 37 (2010) 50–58
- [10] Tsai, S.W.' *Composite Design, Think Composites*, (4th edition), Dayton, 1988.
- [11] Parnas L. , Katirci N., *Design of fiber-reinforced composite pressure vessels under various loading conditions*, *Composite Structures* 58 (2002) 83–95
- [12] Wild PM, Vickers GW. *Analysis of filament-wound cylindrical shells under combined centrifugal, pressure and axial loading*. *Compos Part A* 1997; 28(1):47–55.