

Evaluation fiabiliste de la sensibilité du dimensionnement des structures tubulaires composite sous pression

M. Chérifi^(1,a), A. Hocine^(2,a), S. Carbillet^(3,b), D. Chapelle^(4,b)

^(a)Laboratoire de Contrôles, Tests, Mesures et Simulations Mécanique, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie

^(b)Département de Mécanique appliquée, FEMTO ST, Université de Franche comté, Besançon, France

Email : ⁽¹⁾hamadainh@hotmail.fr, ⁽²⁾hocineaek.dz@gmail.com, stani.carbillet@univ-fcomte.fr, ^(3,b)david.chapelle@univ-fcomte.fr

RESUME :

On s'intéresse dans le présent papier à l'étude fiabiliste basée sur la méthode de Monte Carlo, afin d'évaluer la sensibilité d'un outil de dimensionnement des structures tubulaires composites aux incertitudes géométriques et mécaniques. La démarche consiste en premier à prélever un échantillon aléatoire des variables d'entrées, puis en effectuant une analyse numérique en utilisant un couplage établi, et enfin la caractérisation des propriétés statistiques de la réponse mécanique. L'idée fondamentale est de faire des tirages aléatoires pour les paramètres d'entrée, puis de calculer la réponse mécanique en contrainte circonférentielle pour chaque tirage. Enfin, on calcule la réponse probabiliste en employant des simulations de Monte Carlo. Pour garantir une grande précision des résultats obtenus, nous avons effectué 10^3 simulations. Les résultats obtenus montrent que la probabilité de défaillance augmente d'une manière significative quand toutes les variables aléatoires sont considérées en même temps.

1. INTRODUCTION

Jusqu'à nos jours les pipelines et les réservoirs métalliques sont considérés comme le moyen le plus fiable pour le transport et le stockage des fluides. La littérature a permis de montrer de nombreuses défaillances enregistrées lors de leur exploitation. Les matériaux composites se présentent comme un sérieux candidat à la substitution des matériaux métalliques, où la plupart des recherches se sont penchées actuellement vers la conception et 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. En dimensionnement, les calculs analytiques et les simulations numériques ne fournissent généralement qu'un seul résultat, or de petites variations affectent les paramètres d'une pièce à l'autre, et les conditions réelles de chargement sont rarement parfaitement connues. Assurer la sécurité du dimensionnement exige d'intégrer la notion d'incertitude.

C'est dans ce contexte que plusieurs travaux sont lancés dans le domaine du calcul mécano-fiabiliste des structures [1,2] et particulièrement en composite [3-4] en vue de prolonger leurs durée de vie et de rationaliser leurs exploitations.

Amirat et al [1] 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 [2] 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.

Mitsunori et al [5] ont étudié le comportement probabiliste des fibres d'un composite soumis à une variation des conditions de chargement et des propriétés du matériau. Dans ce cadre, nous pouvons citer les travaux de Beakou et al [6] 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.

D'après la littérature, plusieurs méthodes probabilistes ont été utilisées dans le calcul mécano-fiabiliste. Frangopol et Recek [3] 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 António et Hoffbauer [7] 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). Dans Hang-Zhou Li et Bak Kong Low [4] 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.

La présente contribution a pour objet la proposition d'une étude probabiliste basée sur la distribution de la contrainte circonférentielle σ_θ par une loi normale à travers la paroi de l'épaisseur de la structure tubulaire soumise à un chargement de pression interne avec effet de fond. Cette étude permet d'évaluer la sensibilité de l'outil de dimensionnement aux incertitudes de conception telles que l'angle d'orientation des fibres, la charge intérieure ainsi que les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé.

2. FORMULATION PROBABILISTE

Pour une durée de vie bien définie, la fiabilité est l'aptitude d'un système à garantir sa fonction pour laquelle il est conçu. Ainsi on peut déduire le critère de défaillance par la fonction performance $G(x_i)$ donnée par l'équation (1):

$$G(z_i) = R(z_i) - S(z_i) \quad (1)$$

Avec

$G(z_i)$: Fonction qui définit la marge de sûreté de la structure,

Z_i : Variables aléatoires de base,

$R(z_i)$: La résistance

$S(z_i)$: La sollicitation.

$G(z_i) > 0$ Représente l'état de sécurité du système, tandis que $G(z_i) \leq 0$ traduit la condition de défaillance.

Pour évaluer la probabilité de défaillance, on a appliqué la méthode de Monte Carlo sur les différentes variables aléatoires. Le but d'une analyse fiabiliste est de donner une estimation de la probabilité de défaillance P_f et cela revient à développer l'indice de fiabilité β . Cet indice est déduit par la résolution de l'équation (2)

$$\beta = \min \sqrt{\sum_i [T_i(Z_i)]^2} \text{ avec } G(z_j) \leq 0 \quad (2)$$

$T_i(z_j)$ Représente toute transformation probabiliste appropriée. La solution de cette optimisation peut être obtenue par des algorithmes d'optimisation standards. Dans notre cas, la marge de sécurité $G(z_i)$ correspond à la différence entre la résistance transversale Y' et la contrainte circonférentielle calculée σ_θ :

$$G(z_j) = Y' - \sigma_\theta \quad (3)$$

La densité de probabilité par la loi normale est donnée par l'équation (4)

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

Avec :

σ : L'écart type.

m : la moyenne.

x : variable aléatoire.

L'état de défaillance est mesuré par la probabilité de défaillance P_f , qui représente simplement la probabilité d'avoir une marge de sûreté négative :

$$P_f = Pr[G \leq 0] \quad (5)$$

Dans le présent papier, la probabilité de défaillance et la fonction de densité sont évaluées en s'appuyant sur la méthode de Monte Carlo. Le principe de base de cette évaluation, consiste à faire des tirages aléatoires pour des paramètres d'entrée (tableau 2), puis par le biais du modèle de comportement de la structure tubulaire, on déduit la réponse mécanique, exprimée en contrainte circonférentielle pour chaque tirage. Après cette première étape, une analyse statistique sur les ensembles de réponse est prévue, afin de déterminer les fonctions de densité de probabilité de la réponse mécanique, ainsi que la marge de sûreté.

3. DEMARCHE D'ANALYSE

Afin d'aboutir à une évaluation de la sensibilité du dimensionnement des tubes composite sous pression aux différentes incertitudes, deux programmes de calcul ont été calculés: le premier programme fournit la réponse mécanique en calculant la distribution des contraintes et le deuxième programme détermine la réponse probabiliste en employant des simulations de Monte Carlo. Pour réaliser une grande précision des résultats, nous avons effectué 10^3 simulations.

Les paramètres aléatoires du pipeline en composite comprennent : la géométrie, les conditions de service, de fabrication et du choix du matériau T300/5208 (tableau 1). Le tableau 2, présente les variables aléatoires avec leurs coefficients de variation (CV) [8, 9]. De ce fait notre travail a été focalisé sur ses six variables à savoir, les modules de Young E1, E2, le module de cisaillement G12, la Charge interne Pi, le Rapport de diamètre Rap, l'Angle d'orientation des fibres φ .

Paramètre	T300/5208	Paramètre	T300/5208
E1(GPa)	181	X (MPa)	1500
E2(GPa)	10.3	X'(Mpa)	1500
E3(GPa)	10.3	Y (Mpa)	40
G12(GPa)	7.17	Y'(Mpa)	246
v21	0.28	S (Mpa)	68
v32	0.59	X (MPa)	1500

Tableau 1 . Caractéristiques mécaniques du T300/5208[10].

Variable	Moyenne	Coefficient de variation (CV)
Module de young longitudinal E1	181 GPa	4%
Module de young transversal E2	10.3 GPa	1%
Module de cisaillement G12	7.17 GPa	12%
Charge interne Pi	10 MPa	10%
Angle d'orientation des fibres φ	55°	1%

Tableau 2. Variables aléatoires des paramètres correspondants

La structure tubulaire en composite, sous pression interne de 10 MPa avec effet de fond, est caractérisée par un diamètre intérieur $d = 100$ mm avec une stratification de seize couches, où l'épaisseur couche est de 0.15625 mm.

4. ANALYSE DE SENSIBILITE MECANIQUE

La figure 1 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, par ordre décroissant, sont ; le rapport des diamètres avec 68%, le chargement de pression 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 b-d), l'incertitude due aux diamètres diminue, jusqu' à 14% pour $Rap = 1.50$, alors que le chargement en pression 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.

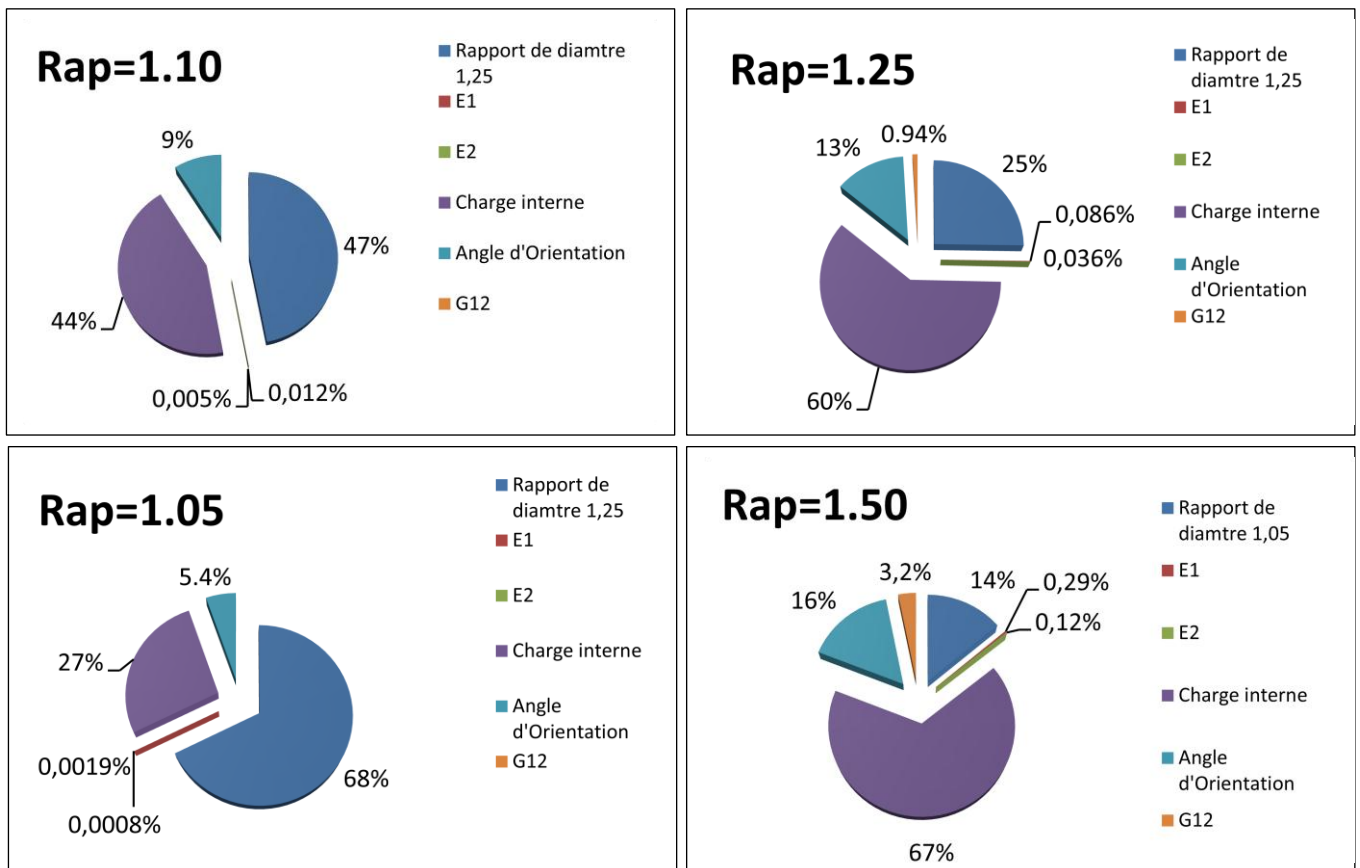


Figure 1. Représentation hiérarchique des variables importants d'un pipeline pour des rapports de diamètre a)Rap = 1.05, b)Rap = 1.10, c)Rap = 1.25, d) Rap = 1

4 .DISTRIBUTION PROBABILISTE DE LA CONTRAINTE

CIRCONFÉRENTIELLE

La figure 2 présente la variation de la fréquence en fonction de la contrainte circonférentielle pour trois combinaisons des variables aléatoires d'entrée. A partir des allures de la figure 2, on remarque que quand seulement les propriétés matérielles sont considérées en tant qu'aléatoire (E1, E2 et G12), la dispersion de la contrainte circonférentielle est négligeable. Dans cette situation, on considère que les efforts mécaniques sont déterministes. Quand, on rajoute l'angle d'enroulement, la dispersion de la contrainte circonférentielle devient observable. En ajoutant encore, les incertitudes liées à la pression appliquée ($CV(P_i) = 10\%$) selon le tableau 1, la dispersion de la contrainte circonférentielle augmente d'une manière proportionnelle.

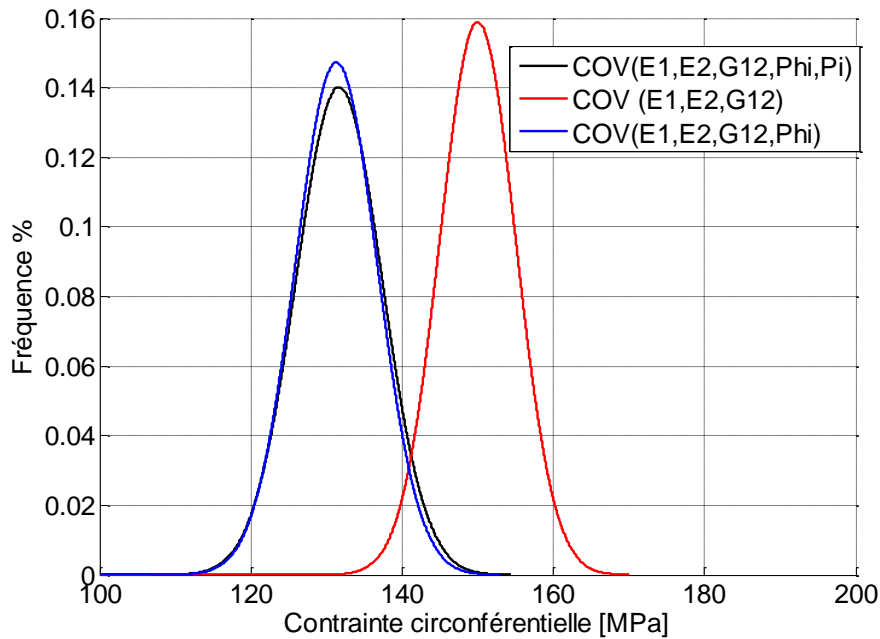


Figure 2. Réponse du système sur la contrainte circonférentielle pour une variation simultanée des coefficients de variations pour $Rap = 1.05$.

5. ANALYSE FIABILISTE

Afin d'évaluer la probabilité de défaillance due aux variations des incertitudes et des variables, il est nécessaire de considérer la marge de sécurité $G(xi)$ pour le pipeline multicouche en composite, comme défini au-dessus.

La distribution de la marge de sécurité par rapport aux incertitudes est représentée par la figure 3. Les allures indiquent que la probabilité de défaillance augmente d'une manière significative quand toutes les variables aléatoires sont considérées en même temps.

Les figures 4 et 5 présentent séparément les deux facteurs influant sur la probabilité d'endommagement de notre pipeline. Il s'agit du chargement en pression et l'angle d'orientation des fibres. Pour mettre en valeur chaque facteur, nous avons varié progressivement leurs coefficients de variation pour un $Rap = 1.05$.

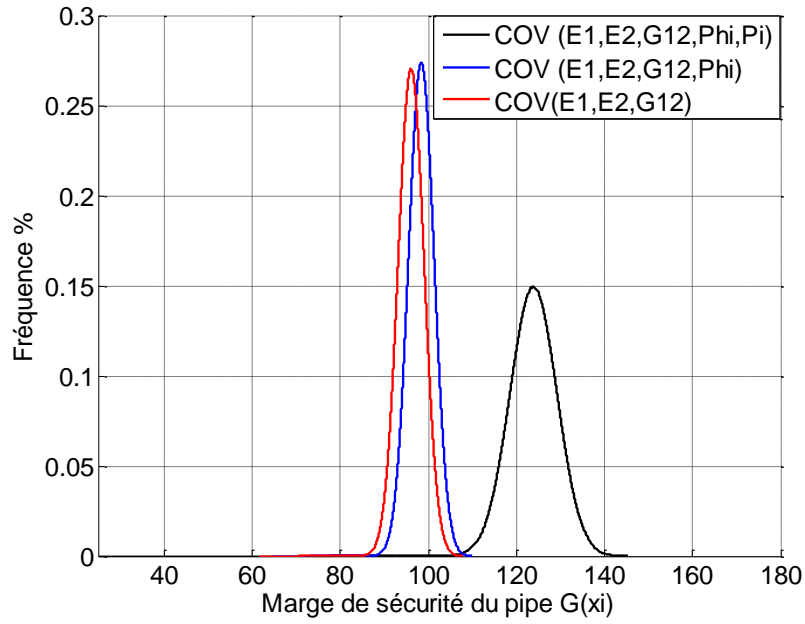


Figure 3. Distribution de la marge de sécurité par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap = 1.05).

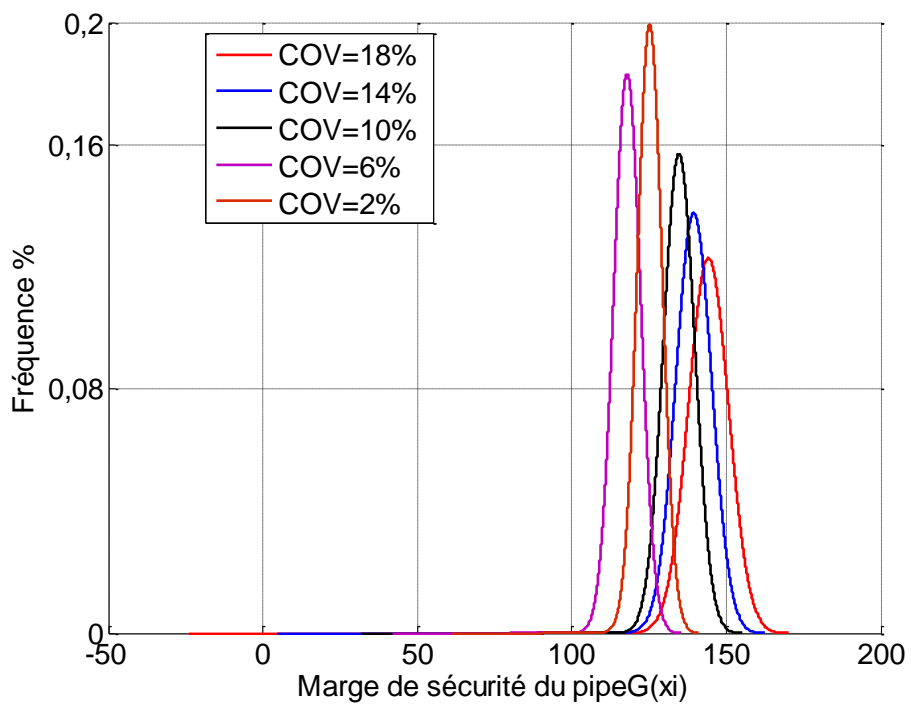


Figure 4 .Evolution de la marge de sécurité pour une variation du coefficient de la charge interneavecRap = 1.05.

D'après la figure 4, où une variation de 2% à 18% du coefficient de variation du chargement, induit une nette augmentation de la fréquence et une remarquable réduction de la marge de sécurité.

D'une manière similaire, il est nettement visible que l'évaluation de l'angle d'orientation ne présente pratiquement aucun danger sur la sécurité de notre pipeline (figure 5), puisque les contraintes circonférentielles calculées sont très inférieures à celles de la résistance transversale du matériau Y' (Tableau 2). Par conséquent, la fonction $G(xi)$ est toujours positive.

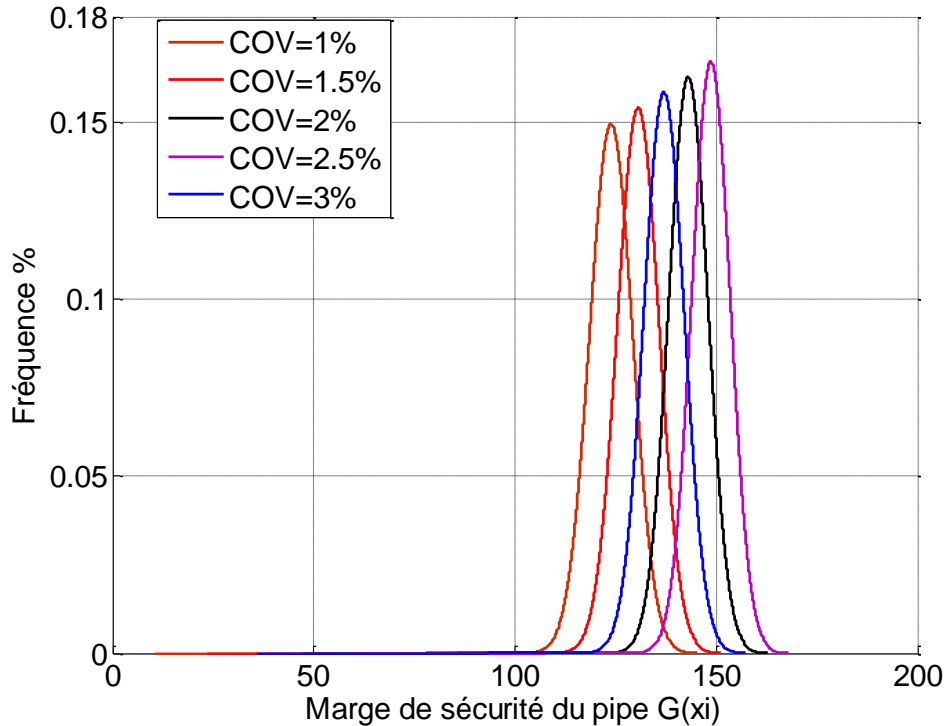


Figure 5. Evolution de la marge de sécurité pour une variation du coefficient de l'angle d'orientation avec $Rap = 1.05$.

CONCLUSION

Le présent travail a pour objet d'élaborer une étude probabiliste basée sur la distribution de la contrainte circonférentielle σ_θ à travers la paroi d'une structure tubulaire soumise à un chargement de pression interne avec effet de fond. La présente contribution permet d'évaluer la sensibilité de l'outil de dimensionnement développé, aux incertitudes de conception, ainsi que les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé.

Les résultats obtenus ont permis de dégager les conclusions suivantes :

- L'augmentation du rapport de diamètre, amplifie l'effet de l'incertitude du chargement en pression.
- La prise en compte de l'angle d'enroulement et du chargement comme variable aléatoire, influe sur la dispersion de la contrainte circonférentielle.
- La probabilité de défaillance augmente d'une manière significative quand toutes les variables aléatoires sont considérées en même temps et principalement ceux citées ci-dessus.

Pour conclure ce présent travail, on peut conclure dire que l'étude probabiliste nous a permis de déduire qu'en premier lieu, la détermination des facteurs dominant est très

important pour chaque conception. En deuxième lieu, la valeur du coefficient de variation paramètres de conception (tolérance) dans le dimensionnement et l'exploitation des pipelines en composites. Car, elle nous permettra de se limiter à la zone de sécurité sans entrer dans la zone de défaillance. Enfin, il est facile de voir que la probabilité de défaillance augmente d'une manière significative quand toutes les variables aléatoires sont considérées en même temps.

Afin d'améliorer la présente étude, il est nécessaire d'utiliser d'autres lois telle que : Lorentzian (Cauchy), Gaussien et Polynomiale. Le présent objectif sera traité en cours de nos futures communications.

Références:

- [1] A. Amirat, A. Mohamed-Chateauf, K. Chaoui, «Reliabilityassessment of underground pipelines under thecombinedeffect of active corrosion and residual stress», *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 83(2006) 107–117.
- [2] RabiaKhelif, AlaaChateauf, KamelChaoui, «Reliability-basedassessment of polyethylene pipe creeplifetime»,*International Journal of Pressure Vessels and Piping* 84 (2007) 697–707.
- [3] D. M. Frangopol, S. Recek, «Reliability of fiber-reinforced composite laminate plates », *Probabilistic Engineering Mechanics* 18 (2003) 119–137.
- [4] Hang-Zhou Li, Bak Kong Low, «Reliabilityanalysis of circular tunnel underhydrostatic stress field», *Computers and Geotechnics* 37 (2010) 50–58th
- [5] Mitsunori M, Y. Murotsu, T. Tanaka, S. Shao, «Reliability-basedoptimizationoffibrouslaminatedcomposites»,*Reliability Engineering and System Safety* 56 (1997) 285-290.
- [6] A. Beakou, A. Mohamed, « Influence of variable on the optimum winding angle of cylindrical laminated composites », *composite structures* 53 (2001) 287-293.
- [7] C. C. Antónioet L. N. Hoffbauer, «An approach for reliability-basedrobust design optimization of angle-plycomposites», *Composite Structures* 90 (2009) 53–59.
- [8] Khelifa R., Chateauf A., Chaoui K., « Reliability-basedassessment of polyethylene pipe creeplifetime », *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 84, 697–70, 2007.
- [9] Amirat A., Chateauf A. M., Chaoui K., « Reliabilityassessment of underground pipelines under the combinedeffect of active corrosion and residual stress », *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 83, 107–117, 2006.
- [10] Tsai S.W., « Composite Design, Think Composites », 4th edition, Dayton, 1988.