

1.1 Introduction

La consommation mondiale des hydrocarbures ne cesse d'augmenter. Par conséquent, pour accroître la production de ces derniers-là, il est important de doubler le réseau de canalisations tout en augmentant la pression de service. Ceci est considéré comme très coûteux en raison des projets énormes et des problèmes géopolitiques qui peuvent être rencontrés. Ainsi, le développement de la résistance du pipeline est obligatoire. Alors que, l'épaisseur du pipeline métallique doit être agrandie et ses propriétés mécaniques et chimiques doivent être améliorées

Ces dernières années, la fiabilité des systèmes de canalisations d'ingénierie et de désignation technologique presque partout connaît une crise. La principale cause d'accidents fréquents sur les communications en acier était la corrosion.

De nombreuses études théoriques et tests pratiques ont montré que les polymères et leurs compositions sont une alternative prometteuse aux pipelines métalliques. L'efficacité des pipelines composites est confirmée par la croissance de l'ingénierie des communications des composites. Les principaux avantages des pipelines en composites sont une longue durée de vie (jusqu'à 80-100 ans), une faible résistance et un bon comportement des propriétés mécaniques, l'absence de systèmes de protection cathodique et anodique en raison de la résistance à la corrosion externe, leurs structures et plus légère à celle des pipelines en acier donc un gain de poids considérable.

1.2 La microstructure des composites :

Pratiquement tous les composites sont constitués d'éléments discontinus appelés renforts, noyés dans une phase continue appelée matrice.

Schématiquement, les renforts assurent une part importante de la tenue mécanique (rigidité et résistance) du composite ils peuvent avoir plusieurs géométries, tandis que la matrice maintient les renforts en position, transfère les efforts entre eux, et assure toutes les autres fonctions techniques. Il peut par exemple s'agir d'une protection contre diverses agressions (thermiques, chimiques, chocs...), de fonctions esthétiques (couleur, aspect...), de donner sa forme extérieure au produit fini...

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Par exemple dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes.

1.3 Structure des matériaux composites :

1.3.1 Monocouche :

Il représente l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées ou à fibres courtes.

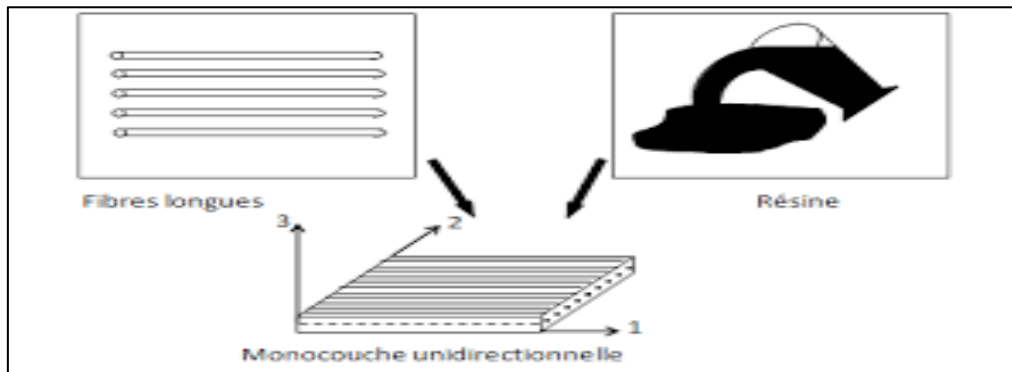


Figure (1-1) : structure d'un matériau composite monocouche

1.3.2 Stratifiée :

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Les pièces structurales sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir.

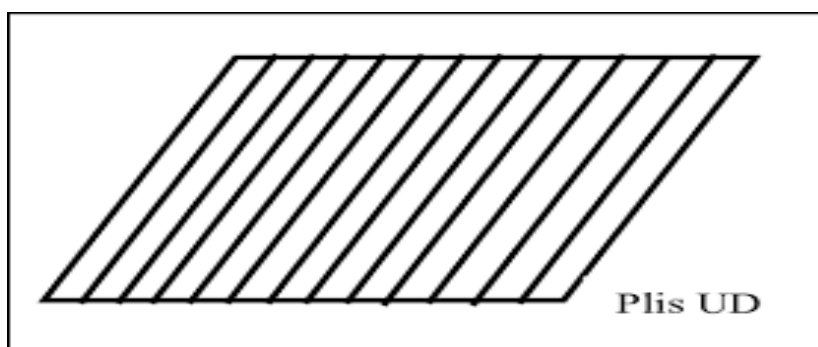


Figure (1-2) : structure d'un matériau composite stratifiée

1.3.3 Sandwichs :

Une structure sandwich est obtenue à partir de deux peaux ou semelles, réalisées dans un matériau ayant de très bonnes caractéristiques mécaniques, collées sur une âme réalisée avec un matériau très léger et ayant de faibles caractéristiques mécaniques. Une telle structure présente en flexion des rapports résistance/masse et rigidité/masse très importants.

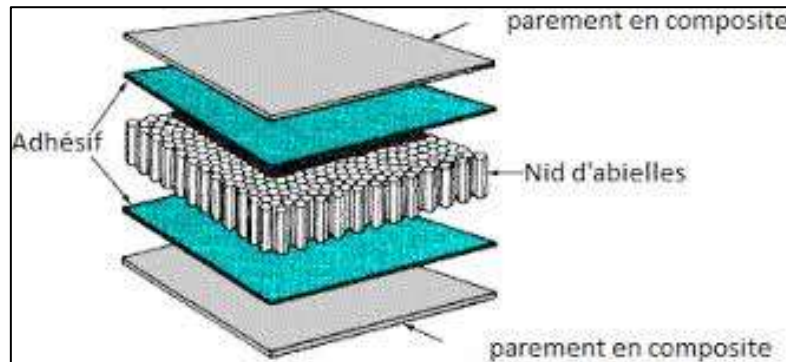


Figure (1-3) : structure d'un matériau composite sandwichs

1.4 Procède de fabrication des pipelines en composites :

L'utilisation optimale des pipelines en composites passe obligatoirement par un stade de conception plus ou moins délicat, selon le type d'utilisation finale.

L'agencement des fibres joue en particulier un rôle capital dans le comportement futur des réalisations. L'imprégnation est destinée à améliorer la transmission des efforts entre la matrice et les renforts. C'est une étape cruciale qui peut s'effectuer au moment de la transformation (on parlera de voie humide) ou lors de l'élaboration de tissus préimprégnés (on parlera de voie sèche). Les techniques de fabrication des pipelines sont nombreuses. Citons :

- L'enroulement filamentaire
- Le moulage par centrifugation et la pultrusion

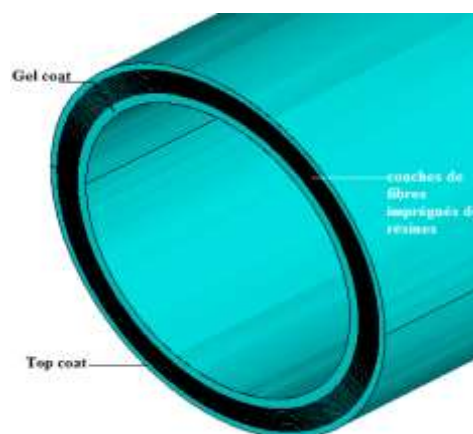


Figure (1-4) : Structure d'un pipeline en composite.

1.4.1 L'enroulement filamentaire :

Le procédé d'enroulement filamentaire permet d'obtenir des pièces en matériau composite, par enroulement de fibres sur un mandrin (pièce). Il consiste à enrouler, par l'intermédiaire d'un guide-fil, des fibres imprégnées de résine sur le mandrin et à faire polymériser la structure. Ce procédé permet de donner des pièces de très bonne caractéristique mécanique.

En procédé d'enroulement filamentaire, selon la coordination entre le mouvement de rotation et le mouvement axial, trois types de configurations d'enroulement peuvent être obtenues : polaire, hélicoïdale et le circonférentielle. Le choix est basé sur la forme de la pièce et les orientations de renforcement nécessaires [13] on distingue.

- L'enroulement hélicoïdal.
- L'enroulement circonférentiel.
- L'enroulement polaire.



Figure (1-5): Procédé de fabrication par enroulement filamentaire.

1.4.1.1 Enroulement hélicoïdal :

Permet d'ajuster l'angle des renforts par rapport à l'axe de la structure en fonction des caractéristiques mécaniques désirées. L'angle est déterminé préalablement par calcul en adéquation avec le chargement pour permettre à la structure d'avoir des caractéristiques mécaniques élevées. Ce type d'enroulement permet de réaliser des couches successives avec des angles différents.

1.4.1.2 Enroulement discontinu :

La direction d'enroulement des fils est inclinée par rapport à l'axe du mandrin d'un angle dont la valeur est déterminée par le mouvement relatif du guide-fil par rapport à la rotation du mandrin. La valeur de l'angle est choisie en fonction du rapport souhaité entre la résistance tangentielle et la résistance transversale. La nappe de fils est régulièrement répartie et stratifiée sur toute la surface du mandrin par des mouvements alternatifs du guide-fil parallèlement à l'axe du mandrin. Ce type d'enroulement donne une grande liberté pour la disposition angulaire des fils. Il permet en particulier de réaliser des couches successives avec des angles différents.

Ce procédé d'enroulement a de nombreuses applications pour la fabrication de pièces de grandes dimensions comme des conteneurs, la fabrication d'enveloppes de fusées, de torpilles, de tube de forage pétrolier, de bouteilles de gaz, etc.

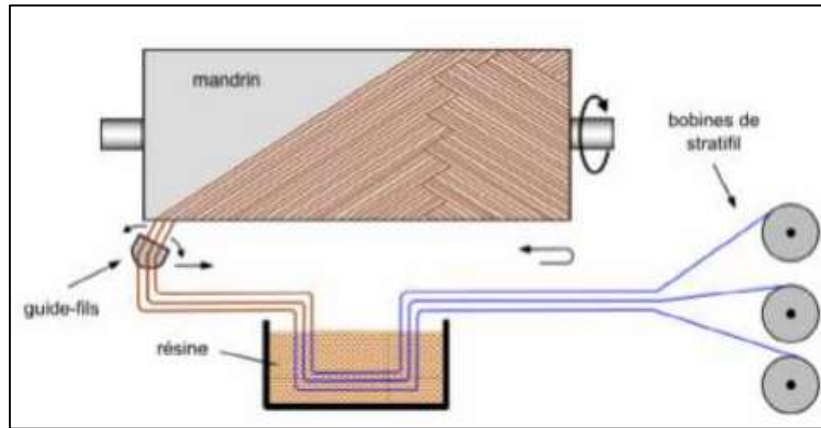


Figure (1-6) : le principe de l'enroulement hélicoïdal discontinu.

1.4.1.2.1 Enroulement continu :

L'enroulement continu permet la fabrication industrielle de tubes et tuyaux hautes performances de divers diamètres et grandes longueurs. Figure (I-7) montre ce type d'enroulement : Dans l'enroulement hélicoïdal, l'angle α est de 5° à 80° par rapport à l'axe longitudinal comme le montre la figure ci-dessous :

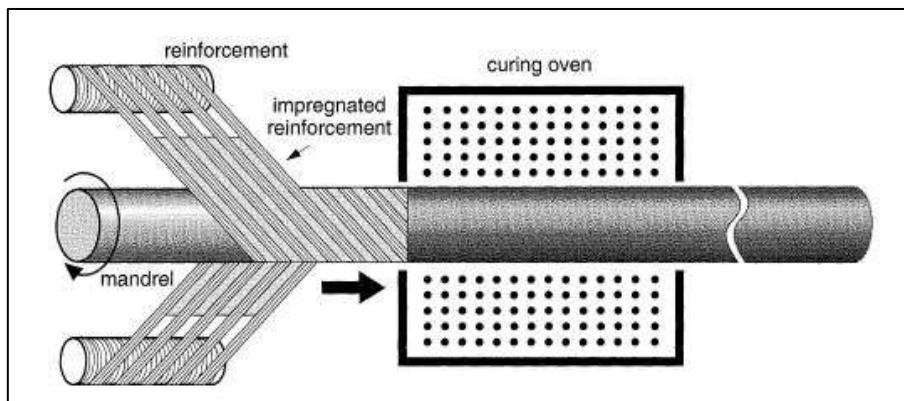


Figure (1-7) : le principe de l'enroulement hélicoïdal continu.

1.4.1.3 Enroulement circonférentiel :

Le bobinage est effectué à 90° par rapport à l'axe du mandrin et confère une résistance tangentielle élevée. Pour obtenir une résistance longitudinale satisfaisante, il est nécessaire d'intercaler des couches de tissus unidirectionnels dans le sens axial du mandrin. Ce type d'enroulement est assez peu utilisé.

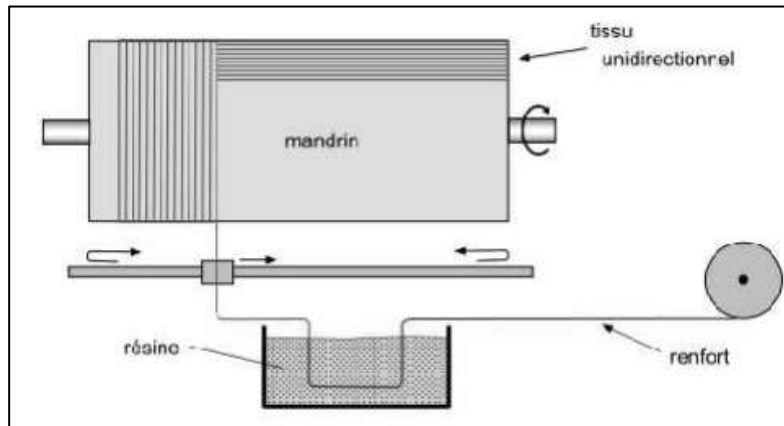


Figure (1-8) : le principe de l'enroulement circonférentiel [17].

1.4.1.4 Enroulement Polaire :

Ce type d'architecture est utilisé pour des orientations de fibres proches de 0° par rapport à l'axe longitudinal de la pièce. Avec ce type d'enroulement, il est possible de couvrir la totalité de la surface d'une pièce. Le plus souvent, ce type d'enroulement est utilisé pour des mandrins avec des extrémités fermées de forme sphérique, ou ayant des dômes [14].

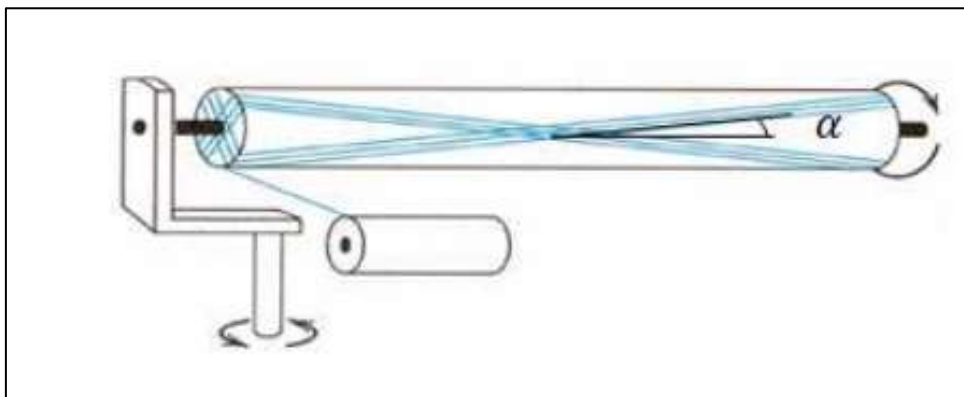


Figure (1-9) : le principe de l'enroulement polaire [18].

1.4.2 Moulage par centrifugation :

Cette technique est utilisée pour le moulage d'objets de révolution, notamment tubes, tuyaux, réservoirs, etc. Il s'agit d'une extrapolation (figure) de la technique de fabrication de tuyaux en fonte ou en béton centrifugé. Le moule de révolution, est mis en rotation (à environ 2000 tr/min). Après un éventuel revêtement en gel, il va une introduction simultanée et continue des :

- Renforts : torons ou mèches coupés
- Résines catalysées et accélérées (résines époxydes, polyesters, etc.).

L'imprégnation du renfort par la résine est réalisée par mouvement centrifuge. Le système de résine et les fibres hachées sont appliqués sur la surface du moule à l'aide d'un bras d'alimentation mobile équipé d'un hachoir et d'un pistolet pulvérisateur, qui passe en arrière et en avant pendant que le moule est tourné. La polymérisation est réalisée à température ambiante, ou éventuellement accélérée en étuve [15].

Un renfort sous forme de rouleau (par exemple, mat, tissu) peut éventuellement être introduit en interrompant la rotation du moule. La résine est ensuite introduite au moment de la rotation.

Après polymérisation, le tuyau cylindrique est extrait du moule, le retrait des systèmes de résine permettant le démoulage. Cette technique nous permet d'obtenir une bonne finition de surface à l'extérieur avec un diamètre et une épaisseur de tuyaux bien définis. Ce processus de fabrication nécessite une grande usine et une grande précision dans l'équilibrage du moule.

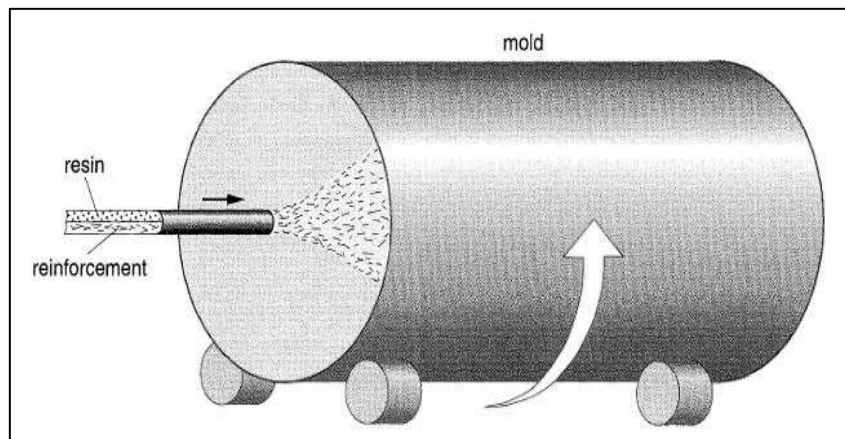


Figure (1-10) : principe du Moulage centrifuge

1.4.3 Moulage par pultrusion :

Le moulage par pultrusion est un procédé utilisé pour produire des profils, droits ou courbes, à section constante, fortement renforcés dans la direction principale.

Dans cette technique (figure), les renforts (mèches, ignames, mèches tissées, rubans, etc.) passent à travers un bain de résine catalysée où ils sont imprégnés. Le renfort imprégné est ensuite tiré à travers une filière chauffée, qui élimine l'excès de résine, détermine la forme en coupe transversale et durcit le système de résine.

Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les profils obtenus présentent des propriétés mécaniques élevées compte tenu de la possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevées, jusqu'à 80% en volume. Des exemples de fabrication comprennent des cannes à pêche, divers profils courbés [16].

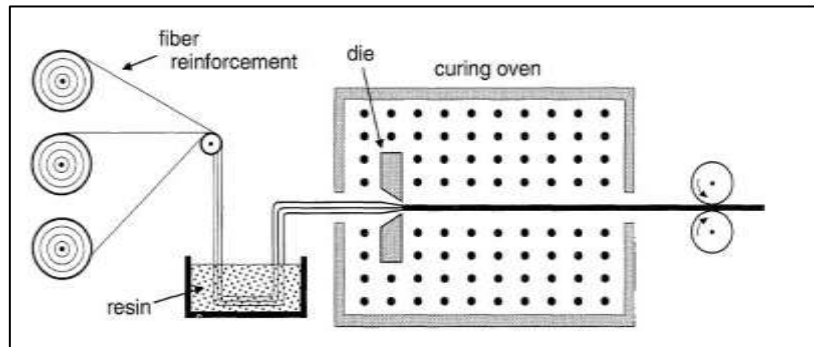


Figure (1-11) : principe du Moulage par pultrusion

1.5 - Les défauts de fabrication :

Lors du processus de fabrication des pipelines en composites des défauts sont souvent observés et cela revient à plusieurs facteurs comme :

- Porosité de la résine.
- Sous-croisement de la résine.
- Mauvais mouillage des fibres.
- Répartition inégale des brins dans la couche et épaisseur des fibres.

Lorsque la fabrication est parfaitement maîtrisée, la qualité des structures fabriquées est bonne et présente peu d'inconvénients.

1.5.1 Les ruptures liées à ces défauts :

1.5.1.1 La rupture translaminaire :

La rupture translaminaire correspond à une rupture des fibres (traction ou compression généralement suite à un effort dans le sens des fibres).

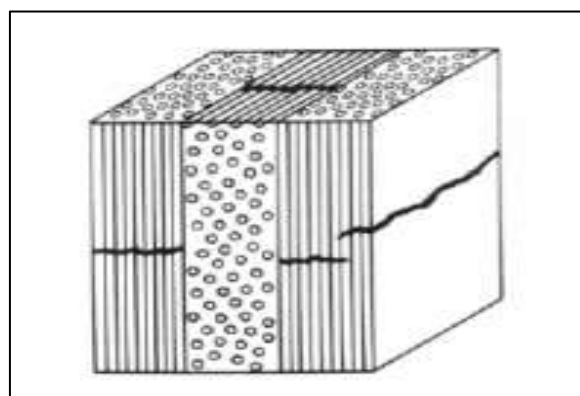


Figure (1-12) : mode de rupture translaminaire

1.5.1.2 La rupture intra-laminaire

La rupture translaminaire concerne la détérioration de la matrice et elle est provoquée par une contrainte dans le plan des fibres

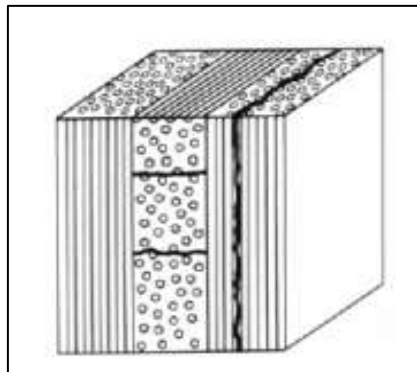


Figure (1-13) : mode de rupture intra-laminaire

1.5.1.3 La rupture inter-laminaire :

La rupture inter-laminaire correspond à une décohésion des couches du laminé. Ces modes de rupture n'apparaissent habituellement pas seuls et lorsqu'un endommagement est initié, plusieurs modes de ruptures sont combinés.

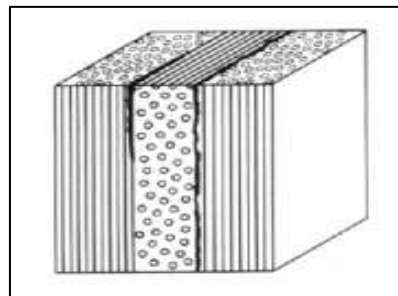


Figure (1-14) : mode de rupture inter-laminaire

1.6 Le vieillissement :

Le vieillissement correspond à une évolution lente et irréversible d'une ou de plusieurs propriétés du matériau composite. Cette évolution peut résulter de modifications de la structure des macromolécules qui assurent leur cohésion mécanique, de leur composition ou de sa morphologie.

Malgré les performances élevées dont ils jouissent les matériaux composites aux conditions standards, ils représentent une grande sensibilité au milieu environnemental (température, humidité, rayonnement UV, condition d'exploitation...), dont leurs propriétés sont susceptibles d'être dégradées, suite à la diffusion de l'eau sous la présence de la température qui accélère le processus de dégradation.

Lors d'un vieillissement sans contrainte, la diffusion d'eau à travers la matrice a principalement pour conséquences :

- La diminution des propriétés mécaniques et thermomécaniques de la matrice par plastification et hydrolyse.
- La diminution des propriétés cohésives de l'interface par hydrolyse ou condensation de l'agent de couplage.
- La création de microfissures et décohésions interraciales sous l'effet de différentiels de gonflement et éventuellement de pressions osmotiques.

1.7 Le phénomène de perlage :

Si on prend le cas des composites à matrice organique renforcés de fibres, une expérience de mise sous pression interne croissante d'un tube industriel standard conduit au 3 type de comportement décrit par la courbe en Figure (1-15) Cette courbe représente l'évolution de la pression interne P en fonction de la déformation dans l'axe ϵ_x du tube. Le comportement est, en première approximation, élastique linéaire jusqu'à une certaine pression linéaire P_{lin} .

À ce niveau de pression, l'observation de la microstructure par microscopie révèle un endommagement diffus, sous forme de décohésion entre fibres et matrice, ou de microfissures dans la matrice. Ensuite, un nouveau régime pseudo linéaire s'établit.

À une pression de perlage P_p , des gouttelettes ou des jets fins de liquide apparaissent en surface du tube ; dans le cas du transport de gaz, on assiste à une baisse de pression soudaine. C'est le phénomène de perlage. Il correspond à la perte d'étanchéité du tube mais sans perte totale des propriétés mécaniques [14].

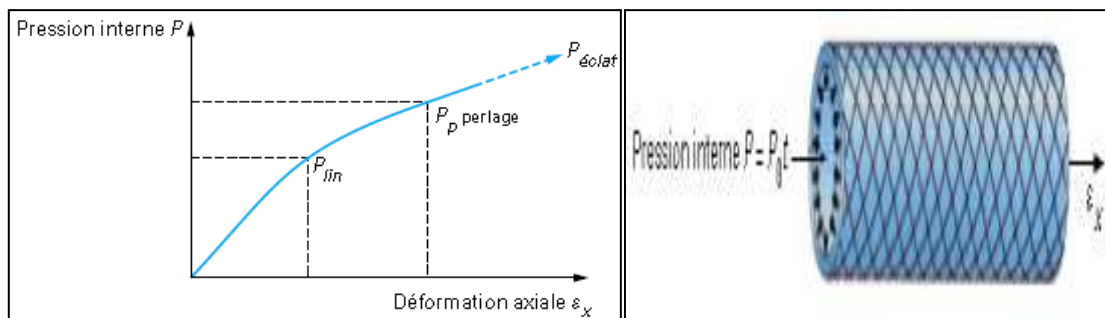


Figure (1-15) : Comportement schématique d'un tube en matériau composite mis sous pression interne croissante.

De nombreuses observations de micrographies en microscope électronique figure (II.16) montrent qu'au perlage, un réseau de microfissures cheminant le long des interfaces entre fibres et matrice et dans la matrice elle-même est apparu. Ces microfissures permettent au fluide de traverser la paroi du tube et de diffuser jusqu'à la surface externe. Si l'on poursuit l'expérience, le perlage s'intensifie. Il est en général impossible d'atteindre l'éclatement, la pression interne ne pouvant compenser les pertes par fuites.

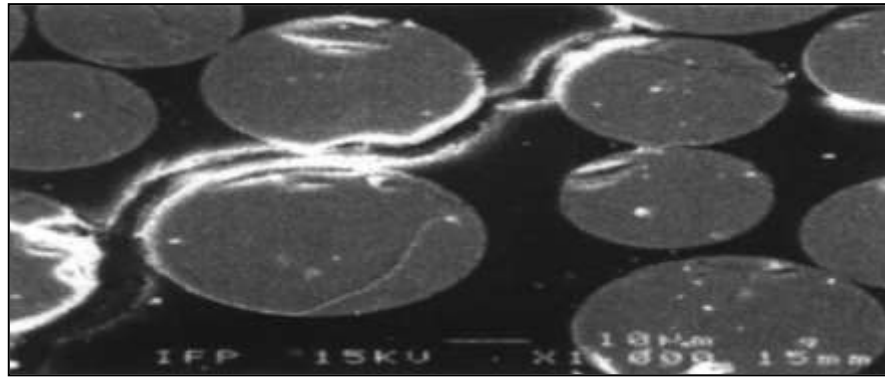


Figure (1-16) : Micrographies au microscope montrant des fissures dans la paroi d'un tube en composite après perlage.

1.8 Domaine d'application des pipelines en composites :

Les plus grands exploitants de pipelines en composites sont les industries pétrolières et gazeuses, ils sont utilisés dans le transport du pétrole brut depuis les gisements jusqu'aux stations de traitement, ensuite la distribution aux consommateurs.

Dans l'industrie nucléaire les canalisations en composite sont employés pour assurent la circulation d'eau dans les centrales nucléaires. Ils sont aussi utilisés comme canalisations dans le transport et la distribution d'eau potable.

1.9 Les avantage et inconvénient de l'utilisation des pipelines en composites :

Par rapport aux matériaux traditionnels, la construction de pipelines composites présente de nombreux avantages, on peut citer :

- Un bon comportement des propriétés mécaniques
- Meilleure résistance à la corrosion
- Faible coefficient de frottement et bonne résistance à l'usure
- Une grande capacité d'amortissement des vibrations et une flexibilité
- Possibilité de construire des structures a propriétés mécaniques enlevées spécialement sur les axes de chargement
- Le gain de poids car le remplacement des matériaux classiques par des matériaux composites est motivé par ce facteur là
- Les composites ont un coût inférieur comparé aux métaux pendant leur durée de vie

Malgré tous ces avantages qui reste en faveur des installations modernes mais les matériaux composites présentes quelques inconvénients qu'on peut citer ci-dessous :

- La tenue en chaleur et inferieur à celle des métaux
- La détection des problèmes (fissure) et difficile par rapport aux métaux
- La mise en œuvre des réparations est beaucoup plus complexe.

1.10 Conclusion :

Dans ce chapitre est mentionner certaines techniques de fabrication des pipelines ou des tubes en matériaux composites qui remplissent souvent des critères de choix, ils commencent à prendre une place de plus en plus importante dans les nouveaux secteurs néanmoins ils sont toujours en cours de développement et cela revient aux avantages indéniables qu'ils présentent par rapport aux alliages et aux métaux classiques et qui sont représenter en général par la rigidité la ténacité la résistance.

Jusqu'à aujourd'hui, des études sont toujours en cours pour tenter d'améliorer la structure des pipelines en composite afin de minimiser le taux de défaut.

2.1 Introduction :

Jusqu'à nos jours les pipelines 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, l'un des inconvénients majeurs des pipelines en composite est bien leurs analyses qui sont un peu plus difficiles que ceux des pipelines en matériaux traditionnels, cela est dû au caractère hautement anisotrope des propriétés mécaniques du matériau de base, tant sur les plans rigidités que résistance, qui sont concentrées dans la direction des fibres.

Dans ce chapitre nous allons procéder à une étude d'un pipeline multicouche en composite (Fibre de carbone/ époxy), dont l'objectif est de voir l'effet du changement des séquences d'empilements ainsi que l'effet de la température et l'humidité de chaque couche sur la contrainte radiale et circonférentielle.

2.2 Comportement mécanique :

- Dans une conduite, on s'intéresse à l'étude des contraintes qui s'exercent dans deux directions circonférentielle et longitudinalement (contrainte dite longitudinale ou axiale).

Les différentes sources de contraintes circonférentielles et longitudinale sont :

- La pression interne de service est la composante de contrainte la plus importante.
- La fabrication de la conduite induit des contraintes résiduelles.
- La pression interne, s'exerçant sur une conduite ovalisée, donne une contrainte de flexion.
- Les tassements et glissements de terrain induisent des contraintes secondaires.
- Les changements de températures le long de l'axe du gazoduc.
 - Dans de nombreux matériaux, les contraintes appliquées peuvent avoir un ou plusieurs effets suivants, l'importance de la contrainte :
 - Lorsqu'il est soumis à une contrainte relativement faible, le matériau subit une déformation élastique, et retourne à son état initial après l'élimination de la contrainte.
 - Lorsqu'il est soumis à des niveaux de contrainte modérés, le matériau atteint sa limite d'élasticité, ou limite apparente d'élasticité et commence à subir une déformation plastique. Il ne retournera pas à son état initial, mais subira une déformation permanente.
 - Lorsqu'il est soumis à des niveaux de contrainte relativement élevés, le matériau connaît une défaillance ou une rupture parce que sa limite conventionnelle de proportionnalité a été dépassée.

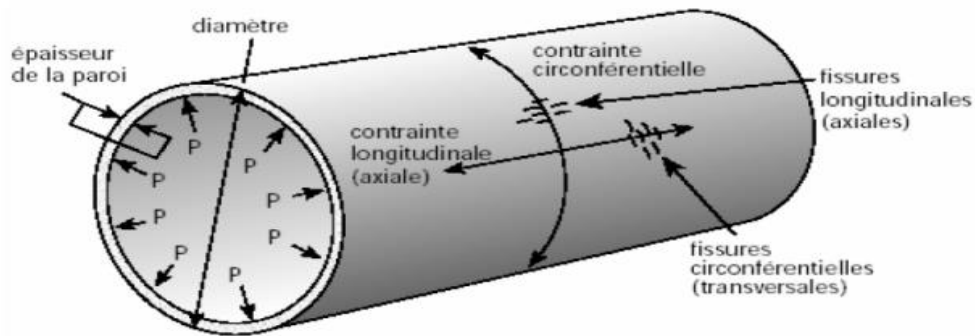


Figure (2-1) : Contraintes s'exerçant sur un pipeline

2.2.1 Modèle analytique :

Figure (2-2) représente un pipeline multicouche en composite sous une charge interne sous forme de pression. Le pipeline multicouche est supposé orthotrope avec un angle d'orientation des fibres de $\pm\phi$. Pour ce cas de figure, la théorie classique de composite plat (laminated plate theory) peut être appliquée, à condition de faire un changement de repère qui permet le passage des coordonnées cartésiennes (x, y, z) aux coordonnées cylindriques (r, θ, z) , où r est l'axe des rayons, θ est l'axe circonférentiel et z est le repère axial. Cette théorie est basée sur la loi générale de Hooke.

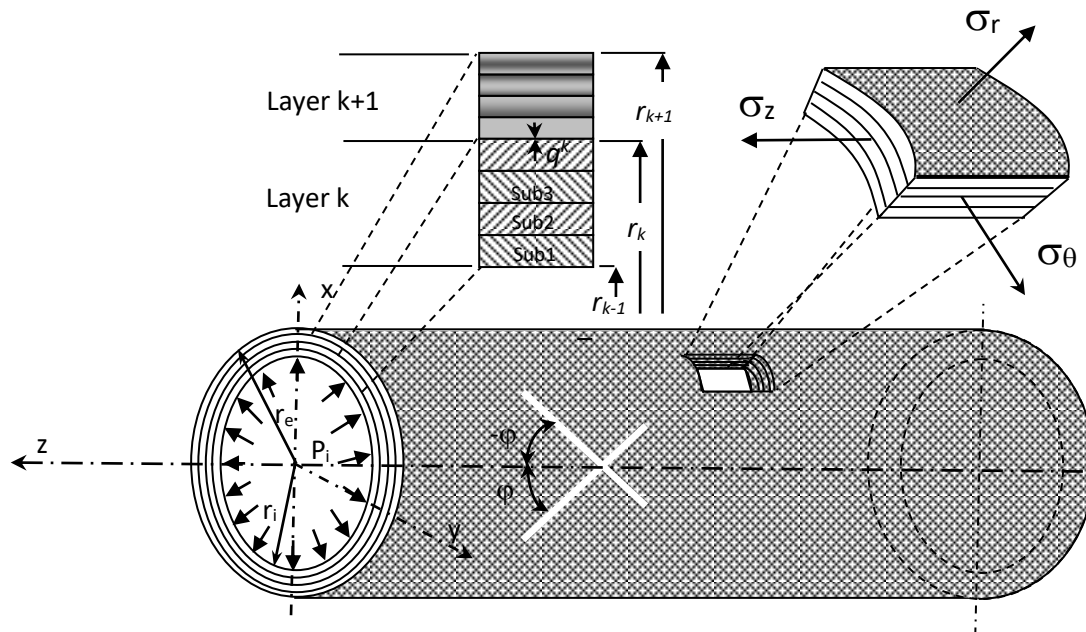


Figure (2-2) : Coordonnées et état de contrainte dans un pipe en composite multicouche.

En utilisant ces coordonnées, on peut déduire la relation contrainte-déplacement, qui peut être écrite pour la $k^{\text{ième}}$ couche sous forme matricielle de la forme :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{r\theta} \\ \tau_{rz} \\ \tau_{\theta z} \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{13} & 0 & 0 & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} & 0 & 0 & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{13} & \bar{C}_{23} & \bar{C}_{33} & 0 & 0 & \bar{C}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{44} & \bar{C}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{45} & \bar{C}_{55} & 0 \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{36} & 0 & 0 & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{r\theta} \\ \gamma_{rz} \\ \gamma_{\theta z} \end{Bmatrix}^{(k)} \quad (2.1)$$

$\bar{S}_{ij}(i, j = r, \theta, z)$, la relation déformation contrainte s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^{(k)} &= \bar{S}_{rr}^{(k)} \sigma_r^{(k)} + \bar{S}_{r\theta}^{(k)} \sigma_\theta^{(k)} + \bar{S}_{rz}^{(k)} \sigma_z^{(k)} \\ \varepsilon_\theta^{(k)} &= \bar{S}_{r\theta}^{(k)} \sigma_r^{(k)} + \bar{S}_{\theta\theta}^{(k)} \sigma_\theta^{(k)} + \bar{S}_{\theta z}^{(k)} \sigma_z^{(k)} \\ \varepsilon_z^{(k)} &= \bar{S}_{rz}^{(k)} \sigma_r^{(k)} + \bar{S}_{\theta z}^{(k)} \sigma_\theta^{(k)} + \bar{S}_{zz}^{(k)} \sigma_z^{(k)} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Pour le cas de contraintes plane, $\varepsilon_z=0$, la relation déformation contrainte prend la forme suivante :

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^{(k)} &= R_{rr}^{(k)} \sigma_r^{(k)} + R_{r\theta}^{(k)} \sigma_\theta^{(k)} \\ \varepsilon_\theta^{(k)} &= R_{r\theta}^{(k)} \sigma_r^{(k)} + R_{\theta\theta}^{(k)} \sigma_\theta^{(k)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\text{Avec } R_{ij}^{(k)} = S_{ij}^{(k)} - \frac{S_{iz}^{(k)} S_{jz}^{(k)}}{S_{zz}^{(k)}} \quad (i, j = r, \theta) \quad (2.4)$$

$$v_{iz}^{(k)} = \frac{S_{iz}^{(k)}}{S_{zz}^{(k)}} \quad (i = r, \theta) \quad (2.5)$$

Par conséquent, les contraintes dans la couche k pour le cas de contraintes planes sont données par :

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(k)} &= \bar{C}_{rr}^{(k)} \varepsilon_r^{(k)} + \bar{C}_{r\theta}^{(k)} \varepsilon_\theta^{(k)} \\ \sigma_\theta^{(k)} &= \bar{C}_{r\theta}^{(k)} \varepsilon_r^{(k)} + \bar{C}_{\theta\theta}^{(k)} \varepsilon_\theta^{(k)} \\ \sigma_z^{(k)} &= \bar{C}_{rz}^{(k)} \varepsilon_r^{(k)} + \bar{C}_{\theta z}^{(k)} \varepsilon_\theta^{(k)} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Avec $\bar{C}_{ij}(i, j = r, \theta, z)$ sont les termes de la matrice de rigidité.

Pour un état de contrainte plane, l'expression du déplacement radial s'écrit comme suit :

$$u_r^{(k)} = A_1^{(k)} r^{\lambda_k} + A_2^{(k)} r^{-\lambda_k} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^{(k)} &= \frac{\partial u_r^{(k)}}{\partial r} \\ \varepsilon_\theta^{(k)} &= \frac{u_r^{(k)}}{r} \end{aligned} \quad (2.8)$$

En substituant les équations (2.7) dans l'équation (2.6), la contrainte radiale et circonférentielle peuvent être réécrites sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}\sigma_r^{(k)} &= \left(\bar{C}_{r\theta}^{(k)} + \lambda_k \bar{C}_{\theta\theta}^{(k)} \right) A_1^{(k)} r^{\lambda_k - 1} + \left(\bar{C}_{r\theta}^{(k)} - \lambda_k \bar{C}_{\theta\theta}^{(k)} \right) A_2^{(k)} r^{-\lambda_k - 1} \\ \sigma_\theta^{(k)} &= \left(\bar{C}_{rr}^{(k)} + \lambda_k \bar{C}_{r\theta}^{(k)} \right) A_1^{(k)} r^{\lambda_k - 1} + \left(\bar{C}_{rr}^{(k)} - \lambda_k \bar{C}_{r\theta}^{(k)} \right) A_2^{(k)} r^{-\lambda_k - 1}\end{aligned}\quad (2.9)$$

Lorsque la charge superficielle $q^{(k)}$ est présente au niveau de l'interface entre deux couches successives "k-1" et "k", la contrainte radiale au niveau de l'interface doit satisfaire les conditions aux limites suivantes :

$$\begin{aligned}r = r_{k-1} &\Rightarrow \sigma_r^{(k)} = -q_{k-1} \\ r = r_k &\Rightarrow \sigma_r^{(k)} = -q_k\end{aligned}\quad (2.10)$$

Par l'utilisation de ces conditions aux limites, on peut déduire les constantes $A_1^{(k)}$ et $A_2^{(k)}$ de l'équation (2.9) de la forme :

$$\begin{aligned}A_1^{(k)} &= \frac{r_{k-1}^{1-\lambda_k}}{\left(\bar{C}_{r\theta}^{(k)} + \lambda_k \bar{C}_{\theta\theta}^{(k)} \right)} \left(\frac{q_{k-1} C_k^{2\lambda_k} - q_k C_k^{\lambda_k - 1}}{1 - C_k^{2\lambda_k}} \right) \\ A_2^{(k)} &= \frac{r_k^{\lambda_k + 1}}{\left(\bar{C}_{r\theta}^{(k)} - \lambda_k \bar{C}_{\theta\theta}^{(k)} \right)} \left(\frac{-q_{k-1} C_k^{\lambda_k + 1} + q_k C_k^{2\lambda_k}}{1 - C_k^{2\lambda_k}} \right)\end{aligned}\quad (2.11)$$

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

De plus, la substitution des équations (2.10) et (2.11) dans l'équation (2.9), nous permettra d'avoir directement la contrainte radiale et la contrainte circonférentielle :

$$\begin{aligned}\sigma_r^{(k)} &= A^{(k)} \left[\left(\frac{r}{r_k} \right)^{\lambda_k - 1} - \left(\frac{r_k}{r} \right)^{\lambda_k + 1} \right] + B^{(k)} \left[- \left(\frac{r}{r_k} \right)^{\lambda_k - 1} + C_k^{2\lambda_k} \left(\frac{r_k}{r} \right)^{\lambda_k + 1} \right] \\ \sigma_\theta^{(k)} &= A^{(k)} \lambda_k \left[\left(\frac{r}{r_k} \right)^{\lambda_k - 1} + \left(\frac{r_k}{r} \right)^{\lambda_k + 1} \right] - B^{(k)} \lambda_k \left[\left(\frac{r}{r_k} \right)^{\lambda_k - 1} + C_k^{2\lambda_k} \left(\frac{r_k}{r} \right)^{\lambda_k + 1} \right]\end{aligned}\quad (2.12)$$

Avec :

$$A^{(k)} = \frac{q_{k-1} C_k^{\lambda_k + 1}}{1 - C_k^{2\lambda_k}}\quad (2.13)$$

Et
$$B^{(k)} = \frac{q_k}{1 - C_k^{2\lambda_k}}\quad (2.14)$$

Pour la détermination du déplacement radial, nous allons utiliser les équations (2.7) et (2.11), pour aboutir à :

$$u_r^{(k)} = \left(R_{r\theta}^{(k)} \sigma_r^{(k)} + R_{\theta\theta}^{(k)} \sigma_\theta^{(k)} \right) r\quad (2.15)$$

La détermination de l'expression de la charge $q^{(k)}$ entre les couches induit la satisfaction des conditions aux limites existantes au niveau de l'interface entre les couches suivantes :

$$u_r^{(k)} = u_r^{(k+1)} \quad \text{Pour } r = r_k\quad (2.16)$$

Les conditions initiales et extrêmes sont respectivement 25 °C à 100 °C cela correspond au domaine des solutions composites à base de résine.

Pour une représentation cohérente de la contrainte radiale et circonférentielle, des quantités adimensionnelles sont employées. La coordonnée adimensionnelle du rayon est définie avec des caractéristiques et propriétés mécaniques données au tableau (2-1), par $\alpha_r = \frac{r-r_i}{r_e-r_i}$ de plus

la contrainte circonférentielle est divisée par la contrainte circonférentielle moyenne

$$\sigma_{\theta m} = \frac{P_i r_i}{r_e - r_i}.$$

Pour atteindre notre objectif, nous avons effectué un programme basé sur la formulation analytique pour la détermination de la distribution de la contrainte circonférentielle et radiale ainsi que le déplacement radial à travers l'épaisseur du pipeline.

Tableau (2-1) : Caractéristiques mécaniques du T300/5208

E1(GPa)	E2(GPa)	E3(GPa)	G12(GPa)	v21	v31	v32
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		

Notre modèle a été validé numériquement avec la méthode des éléments finis et analytiquement avec les modèles de Xia [19], de Parnas [21] et de Wild [20]. Pour des pipelines avec des séquences d'empilement [55/-55/55/-55]_{2s} sous une pression interne. Dans la figure (2-3), nous avons représenté l'évolution du rapport entre les contraintes circonférentielles $\sigma_{\theta}/\sigma_{\theta m}$ pour un composite en graphite époxy T300/5208.

La comparaison montre une bonne concordance entre nos résultats et ceux donnés par les autres méthodes analytiques. L'erreur maximale est relativement significative, parce que la différence atteint 6.1 % en comparaison avec la méthode de Parnas [21] et de 8.6 % avec la méthode de Wild [20].

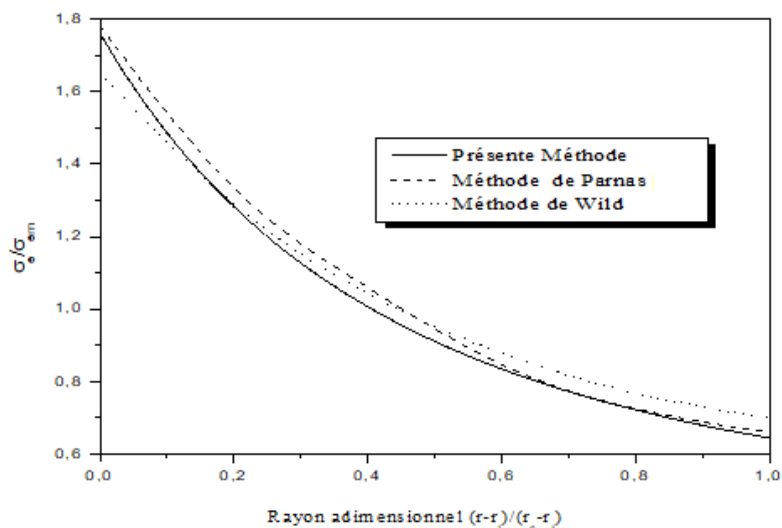


Figure (2-3) : Distribution de la contrainte circonférentielle $\sigma_{\theta}/\sigma_{\theta m}$ en fonction du rayon adimensionnelle pour les trois méthodes utilisant le matériau T300/5208 avec un rapport géométrique de rayon $r_e/r_i = 1.5$

2.2.2.1 Effet des angles d'orientation :

La figure (2-4) montre la variation de la contrainte radiale à travers les parois du tube pour trois types de séquences d'empilement. Pour la séquence $[55/55/55/55]_{2s}$, l'allure prend une forme linéaire parce que le passage d'une couche orientée de 55° à une autre de -55° n'a pratiquement aucun effet perturbateur, par contre pour les deux autres séquences $[30/-30/55/-55]_{2s}$ et $[55/-30/-55/30]_{2s}$, le passage d'une couche de $\pm 55^\circ$ à une autre de $\pm 30^\circ$ entraîne un changement brusque dans la pente de cette contrainte. D'ici, on peut dire que le signe l'orientation de la couche n'a aucun effet sur la grandeur de la contrainte radiale.

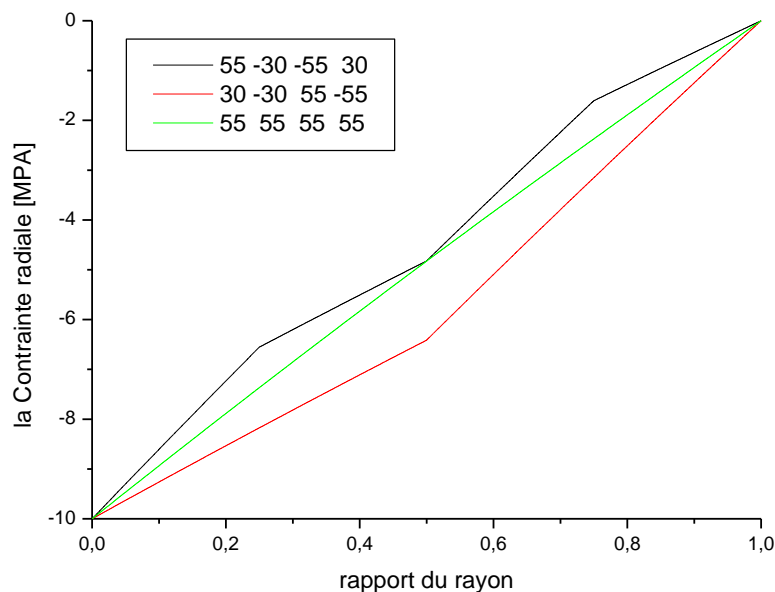


Figure (2-4) : Evolution de la Contrainte radiale en fonction du rapport du rayon pour types de stratifiés, d'un rapport géométrique $(b/a) = 1.05$.

La figure (2-5) représente la variation de la contrainte circonférentielle en fonction du rapport des rayons pour les mêmes séquences d'empilement. La contrainte admet des valeurs maximales aux parois internes du tube, en allant vers les parois externes, cette contrainte diminue légèrement. Le passage d'une couche de $\pm 55^\circ$ à une autre de $\pm 30^\circ$ entraîne un changement brusque considérable dans la valeur de cette contrainte. La raison pour laquelle la séquence $[55\ 55\ 55\ 55]$ est la plus adoptée, selon la bibliographie par ce qu'elle offre des valeurs beaucoup moins importantes que celles des deux autres séquences.

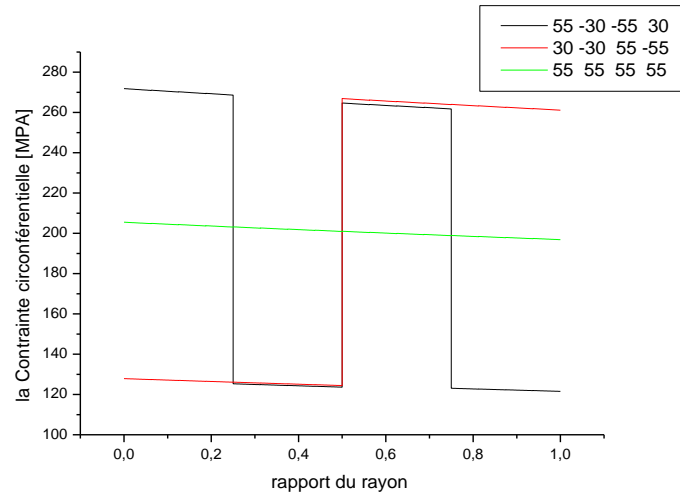


Figure (2-5) : Evolution de la Contrainte circonférentielle en fonction du rapport du rayon pour trois types de stratifiés, d'un rapport géométrique $(b/a) = 1.05$

2.2.2.2 Effet de l'épaisseur du pipe :

Afin de voir l'effet de l'épaisseur sur l'évolution de la contrainte radiale, on a augmenté progressivement le diamètre extérieur du tube de 52 mm, 56mm et 77 mm, relatives aux trois rapports $Rap = re/ri = 1.05, 1.12, 1.54$. Sur cette base, on a tracé la figure (2-6), qui représente l'évolution du rapport contrainte radiale/charge intérieure en fonction du rapport des rayons du tube stratifié $[55/55/55/55]_{2s}$, a partir des résultats obtenus on déduit que lorsque le rapport des rayons Rap augmente, l'allure prend une forme parabolique. Pour des rapports moins importants, cette allure a tendance à une forme linéaire.

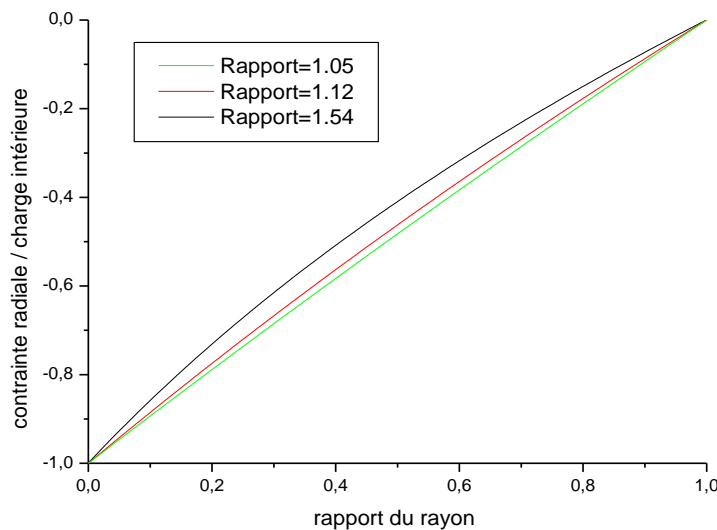


Figure (2-6) : Rapport entre la contrainte radiale et la charge intérieure pour un tube stratifié $[55/55/55/55]_2$.

2.3 Comportement hygro-thermomécanique :

2.3.1 Modèle analytique :

Le comportement élastique des matériaux composites présenté concerne uniquement les contraintes produites par un chargement mécanique. D'autres contraintes sont également produites par des changements de température ou par l'absorption d'humidité M.Bouhafs [22]. Une variation de la température dans un matériau composite produit des contraintes thermiques, tandis que l'absorption d'humidité produit des contraintes hygroscopiques. Les paramètres physiques appropriés pour quantifier ces phénomènes, sont les coefficients de dilatation thermique et le coefficient d'expansion d'humidité (gonflement). Pour les composites à matrices polymères, les fibres ont des coefficients de dilatation thermiques sensiblement plus petits que ceux de la matrice. Lorsqu'un stratifié absorbe de l'humidité, il se produit le même phénomène que dans le cas du chauffage. Le coefficient de gonflement des fibres est aussi plus petit que celui de la matrice. Ces paramètres définissant le comportement thermique et humide d'un pli, peuvent être estimés par la règle des mélanges. Si les fibres et la matrice sont isotropes, les coefficients de dilatation thermique sont représentés par les expressions suivantes :

$$\alpha_1 = \frac{E_f \alpha_f \nu_f + E_m \alpha_m \nu_m}{E_f \nu_f + E_m \nu_m} \quad (2.23)$$

$$\alpha_2 = \alpha_f \nu_f (1 + \nu_f) + \alpha_m \nu_m (1 + \nu_m) - \alpha_1 (\nu_f \nu_f + \nu_m \nu_m) \quad (2.24)$$

La procédure utilisée pour développer les coefficients d'expansion d'humidité (gonflement) est analogue à celle des coefficients de dilatation thermique. La seule différence réside dans le fait que $\beta_f = 0$ pour les fibres isotropes ou orthotropes. Les coefficients d'expansion d'humidité (gonflement) dans chaque direction sont :

$$\beta_1 = \frac{E_m \beta_m \nu_m}{E_f \nu_f + E_m \nu_m} \quad (2.25)$$

$$\beta_2 = \beta_m \nu_m \left(\frac{(1 + \nu_m) \nu_f E_f + [1 - \nu_f (1 + \nu_f)] E_m}{E_f \nu_f + E_m \nu_m} \right) \quad (2.26)$$

Si les fibres sont orientées d'un angle θ_k , les coefficients de dilatation thermique ainsi que le coefficient de gonflement, seront exprimés dans l'axe global de la forme.

$$\begin{aligned} \alpha_x &= \alpha_1 \cos^2 \theta_k + \alpha_2 \sin^2 \theta_k \\ \alpha_y &= \alpha_1 \sin^2 \theta_k + \alpha_2 \cos^2 \theta_k \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{xy} &= 2(\alpha_1 - \alpha_2) \cos \theta_k \sin \theta_k \\ \beta_x &= \beta_1 \cos^2 \theta_k + \beta_2 \sin^2 \theta_k \\ \beta_y &= \beta_1 \sin^2 \theta_k + \beta_2 \cos^2 \theta_k \\ \beta_{xy} &= 2(\beta_1 - \beta_2) \cos \theta_k \sin \theta_k \end{aligned} \quad (2.28)$$

En présence d'un gradient de température et d'humidité, la relation contrainte déformation s'écrit :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_r^{(k)} &= \overline{S}_{rr}^{(k)} \sigma_r^{(k)} + \overline{S}_{r\theta}^{(k)} \sigma_\theta^{(k)} + \overline{S}_{rz}^{(k)} \sigma_z^{(k)} + \alpha_r^{(k)} \Delta T + \beta_r^{(k)} C \\
 \varepsilon_\theta^{(k)} &= \overline{S}_{r\theta}^{(k)} \sigma_r^{(k)} + \overline{S}_{\theta\theta}^{(k)} \sigma_\theta^{(k)} + \overline{S}_{\theta z}^{(k)} \sigma_z^{(k)} + \alpha_\theta^{(k)} \Delta T + \beta_\theta^{(k)} C \\
 \varepsilon_z^{(k)} &= \overline{S}_{rz}^{(k)} \sigma_r^{(k)} + \overline{S}_{\theta z}^{(k)} \sigma_\theta^{(k)} + \overline{S}_{zz}^{(k)} \sigma_z^{(k)} + \alpha_z^{(k)} \Delta T + \beta_z^{(k)} C
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Si on remplace l'expression de $\varepsilon_z^{(k)}$, dans les deux premières équations, on aura :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_r^{(k)} &= R_{rr}^{(k)} \sigma_r^{(k)} + R_{r\theta}^{(k)} \sigma_\theta^{(k)} + \nu_{rz}^{(k)} \varepsilon_z^* + \left(\alpha_r^{(k)} - \frac{\overline{S}_{rz}^{(k)}}{\overline{S}_{zz}^{(k)}} \alpha_z^{(k)} \right) \Delta T + \left(\beta_r^{(k)} - \frac{\overline{S}_{rz}^{(k)}}{\overline{S}_{zz}^{(k)}} \beta_z^{(k)} \right) C \\
 \varepsilon_\theta^{(k)} &= R_{r\theta}^{(k)} \sigma_r^{(k)} + R_{\theta\theta}^{(k)} \sigma_\theta^{(k)} + \nu_{\theta z}^{(k)} \varepsilon_z^* + \left(\alpha_\theta^{(k)} - \frac{\overline{S}_{\theta z}^{(k)}}{\overline{S}_{zz}^{(k)}} \alpha_z^{(k)} \right) \Delta T + \left(\beta_\theta^{(k)} - \frac{\overline{S}_{\theta z}^{(k)}}{\overline{S}_{zz}^{(k)}} \beta_z^{(k)} \right) C
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

Avec :

$$R_{ij}^{(k)} = \overline{S}_{ij}^{(k)} - \frac{\overline{S}_{iz}^{(k)} \overline{S}_{jz}^{(k)}}{\overline{S}_{zz}^{(k)}} \quad (i, j = r, \theta) \tag{2.31}$$

La contrainte radiale prend la forme :

$$\sigma_r = C_1 A_1 r^{\lambda-1} + C_2 A_2 r^{-\lambda-1} + D_1 + D_2 \tag{2.32}$$

Avec

$$\begin{aligned}
 D_1 &= \left[(\overline{C}_{23} + \overline{C}_{33}) \psi - \overline{C}_{i3} \alpha_i \right] \Delta T \\
 D_2 &= \left[(\overline{C}_{23} + \overline{C}_{33}) \psi - \overline{C}_{i3} \beta_i \right] C \\
 \psi &= \frac{(C_{i3} - C_{i2})}{(C_{23} - C_{22})} \alpha_i
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

En servant de la condition de continuité de la charge (2.21), l'équation (2.32) s'écrit :

$$-p_{k-1} = C_1 A_1 r_0^{\lambda-1} + C_2 A_2 r_0^{-\lambda-1} + D_1 + D_2 \tag{2.34}$$

$$-p_k = C_1 A_1 r_1^{\lambda-1} + C_2 A_2 r_1^{-\lambda-1} + D_1 + D_2 \tag{2.35}$$

La résolution de ces deux équations, nous permettra de déterminer des deux constantes A_1 et A_2 .

$$A_1 = \frac{1}{C_1} \left(\frac{p_{k-1} \frac{r_1^{-\lambda-1}}{r_0^{-\lambda-1} r_1^{\lambda-1}} + p_k \frac{1}{r_1^{\lambda-1}} + (D_1 + D_2) \left(\frac{r_0^{-\lambda-1} - r_1^{-\lambda-1}}{r_0^{-\lambda-1} r_1^{\lambda-1}} \right)}{1 - \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^{2\lambda}} \right) \tag{3.36}$$

$$A_2 = \frac{1}{C_2} \left(\frac{-p_{k-1} \frac{r_1^{\lambda-1}}{r_0^{-\lambda-1} r_1^{\lambda-1}} + p_k \frac{r_0^{\lambda-1}}{r_0^{-\lambda-1} r_1^{\lambda-1}} + (D_1 + D_2) \left(\frac{r_0^{\lambda-1} - r_1^{\lambda-1}}{r_0^{-\lambda-1} r_1^{\lambda-1}} \right)}{1 - \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^{2\lambda}} \right) \quad (2.37)$$

La substitution des deux équations (2.36) et (2.37), nous pouvons avoir les deux expressions de la contrainte hygro-thermomécanique radiale et la contrainte circonférentielle.

$$\sigma_r = \sigma_{r\text{mécanique}} + (D_1 + D_2) \left[\frac{\left(\frac{r}{a_k} \right)^{\lambda_k-1} (1 - C_k^{\lambda_k+1}) - \left(\frac{a_{k-1}}{r} \right)^{\lambda_k+1} (1 - C_k^{\lambda_k-1})}{(1 - C_k^{2\lambda_k})} \right] \quad (2.38)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_{\theta\text{mécanique}} + \left(\frac{D_3 + D_4}{1 - C_k^{2\lambda_k}} \right) \left[\begin{aligned} & \left(\frac{\overline{C_{22}} + \lambda_k \overline{C_{23}}}{\overline{C_{23}} + \lambda_k \overline{C_{33}}} \right) (1 - C_k^{\lambda_k+1}) \left(\frac{a_k}{r} \right)^{1-\lambda_k} \\ & - \left(\frac{\overline{C_{22}} - \lambda_k \overline{C_{23}}}{\overline{C_{23}} - \lambda_k \overline{C_{33}}} \right) (C_k^{\lambda_k+1}) \left(\frac{a_{k-1}}{r} \right)^{\lambda_k+1} \end{aligned} \right] \quad (2.39)$$

Les expressions de la contrainte mécanique radiale et la contrainte circonférence sont déjà données par les équations (2.12).

$$\begin{aligned} D_1 &= \left[(\overline{C_{23}} + \overline{C_{33}}) \psi_r - \overline{C_{33}} \alpha_r \right] \Delta T \\ D_2 &= \left[(\overline{C_{23}} + \overline{C_{33}}) \psi_r - \overline{C_{33}} \beta_r \right] C \\ D_3 &= \left[(\overline{C_{22}} + \overline{C_{23}}) \psi_\theta - \overline{C_{22}} \alpha_\theta \right] \Delta T \\ D_4 &= \left[(\overline{C_{22}} + \overline{C_{23}}) \psi_\theta - \overline{C_{33}} \beta_\theta \right] C \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$(\psi_j = \frac{(C_{i3} - C_{i2})}{(C_{23} - C_{22})} \alpha_j, j = r, \theta)$$

La détermination de l'expression de la charge $q^{(k)}$ entre les couches induit la satisfaction des conditions aux limites existantes au niveau de l'interface entre les couches.

$$\begin{aligned}
 & q^{k+1} \phi^{k+1} a_{k+1} + q^k \gamma^k a_k + q^{k-1} \phi^k a_{k-1} + \left(\frac{1}{\Delta} \right) (v_{\theta z}^{k+1} - v_{\theta z}^k) \sum_{k=1}^n (q^{k-1} \delta_k + q^k \mu_k) a_k = \\
 & R_{r\theta}^{k+1} (D_1 + D_2) \left[\frac{C_{k+1}^{\lambda_{k+1}-1} (1 - C_{k+1}^{\lambda_{k+1}+1}) - (1 - C_{k+1}^{\lambda_{k+1}-1})}{1 - C_{k+1}^{2\lambda_{k+1}}} + 1 \right] \\
 & - R_{r\theta}^k (D_1 + D_2) \left[\frac{(1 - C_k^{\lambda_k+1}) - C_k^{\lambda_k+1} (1 - C_k^{\lambda_k-1})}{1 - C_k^{2\lambda_k}} + 1 \right] \\
 & + R_{\theta\theta}^{k+1} \left\{ \frac{(D_1 + D_2)}{1 - C_{k+1}^{2\lambda_{k+1}}} \left[\frac{\left(\frac{C_{22} + \lambda_{k+1} C_{23}}{C_{23} + \lambda_{k+1} C_{33}} \right) C_{k+1}^{\lambda_{k+1}-1} (1 - C_{k+1}^{\lambda_{k+1}+1})}{-\left(\frac{C_{22} - \lambda_{k+1} C_{23}}{C_{23} - \lambda_{k+1} C_{33}} \right) (1 - C_{k+1}^{\lambda_{k+1}-1})} \right] + (D_3 + D_4) \right\} \\
 & - R_{\theta\theta}^k \left\{ \frac{(D_1 + D_2)}{1 - C_k^{2\lambda_k}} \left[\frac{\left(\frac{C_{22} + \lambda_k C_{23}}{C_{23} + \lambda_k C_{33}} \right) (1 - C_k^{\lambda_k+1})}{-\left(\frac{C_{22} - \lambda_k C_{23}}{C_{23} - \lambda_k C_{33}} \right) C_k^{\lambda_k+1} (1 - C_k^{\lambda_k-1})} \right] + (D_3 + D_4) \right\} \tag{2.41}
 \end{aligned}$$

Avec

$$\phi^{(k)} = \frac{2 \lambda_k R_{\theta\theta}^{(k)} C_k^{\lambda_k}}{1 - C_k^{2\lambda_k}} \tag{2.42}$$

$$\phi^{k+1} = \frac{2 \lambda_{k+1} R_{\theta\theta}^{k+1} C_{k+1}^{\lambda_{k+1}}}{1 - C_{k+1}^{2\lambda_{k+1}}} \tag{2.43}$$

$$\gamma^{(k)} = -R_{r\theta}^{(k)} - \frac{\lambda_k R_{\theta\theta}^{(k)} (1 + C_k^{2\lambda_k})}{1 - C_k^{2\lambda_k}} - \frac{\lambda_{k+1} R_{\theta\theta}^{(k+1)} (1 + C_{k+1}^{2\lambda_{k+1}})}{1 - C_{k+1}^{2\lambda_{k+1}}} \tag{2.44}$$

$$\delta_k = -2 \left[\frac{a_k c_k^{\lambda_k+1} (S_{rz}^{(k)} + \lambda_k S_{\theta z}^{(k)}) (a_k - c_k^{\lambda_k} a_{k-1}) (1 + \lambda_k) - a_{k-1}}{(S_{rz}^{(k)} - \lambda_k S_{\theta z}^{(k)}) (a_k c_k^{\lambda_k} - a_{k-1}) (1 - \lambda_k)} \right] / [S_{zz}^{(k)} (1 - c_k^{2\lambda_k})] \tag{2.45}$$

$$\mu_k = -2 \left[\frac{a_k (S_{rz}^{(k)} + \lambda_k S_{\theta z}^{(k)}) (a_k - c_k^{\lambda_k} a_{k-1}) (1 + \lambda_k) + a_k c_k^{\lambda_k}}{(S_{rz}^{(k)} - \lambda_k S_{\theta z}^{(k)}) (a_k c_k^{\lambda_k} - a_{k-1}) (1 - \lambda_k)} \right] / [S_{zz}^{(k)} (1 - c_k^{2\lambda_k})] \tag{2.46}$$

$$\Delta = \sum_{k=1}^n (a_k^2 - a_{k-1}^2) S_{zz}^{(k)} \tag{2.47}$$

$$\lambda_{k+1} = \sqrt{\frac{R_{rr}^{(k+1)}}{R_{\theta\theta}^{(k+1)}}} = \sqrt{\frac{\bar{C}_{\theta\theta}^{(k+1)}}{\bar{C}_{rr}^{(k+1)}}} \tag{2.48}$$

2.3.2 Validation :

Par la présente analyse, on va tenter de voir l'effet des conditions d'environnement telle que la température et l'humidité sur le composite de notre pipe. Un chargement mécanique additionnel est aussi appliqué, ce qui complique de plus en plus cette étude.

Les caractéristiques mécaniques et géométriques sont identiques à celles proposées pour la partie mécanique (tableau 2-1). De plus, le tableau (2-2) est ajouté pour présenter les coefficients de dilatation thermique et d'expansion d'humidité.

Tableau (2-2) : Paramètres hygrothermique pour T300/5208

$\alpha_r(1/^\circ\text{C})$	$\alpha_\theta(1/^\circ\text{C})$	$\alpha_z(1/^\circ\text{C})$	β_r	β_θ	β_z
$0.02 \cdot 10^{-06}$	$22.5 \cdot 10^{-06}$	$22.5 \cdot 10^{-06}$	0.0	0.6	0.6

2.3.2.1 Effet de la température :

Pour une température répartie supposée 60°C et une variation de séquence d'empilement on a obtenue des résultats suivants:

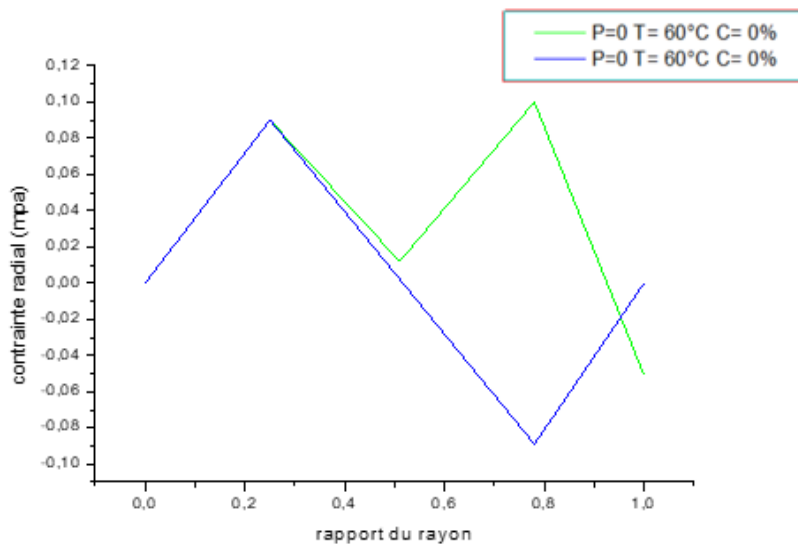


Figure (2-7) : Evolution de la contrainte radiale en fonction de l'épaisseur du tube pour une répartition uniforme de la température T = 60 °C.

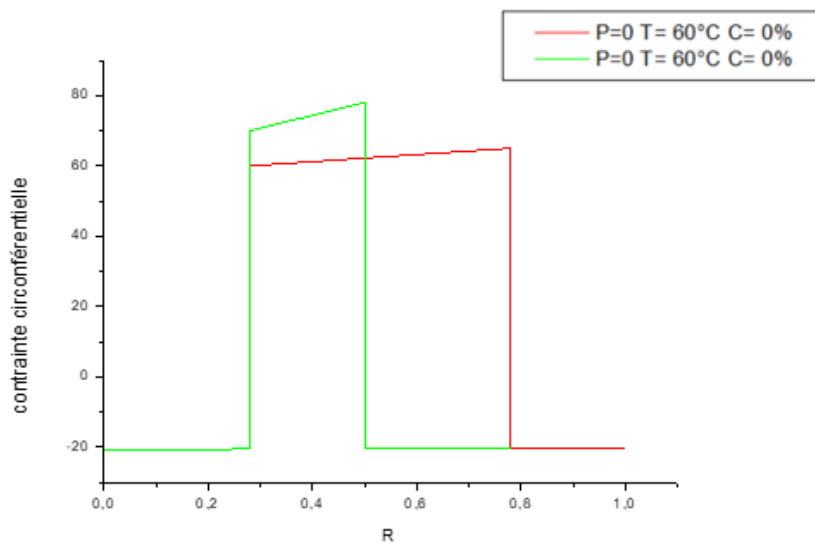


Figure (2-8) : Evolution de la contrainte circonférentielle en fonction de l'épaisseur du tube pour une répartition uniforme de la température T = 60°C.

A partir de ces graphes, on peut remarquer que la variation de la contrainte radiale est relativement faible, comparativement à la contrainte circonférentielle. Une symétrie est remarquée pour la séquence d'empilement $[0/90]_s$. Par contre, l'allure est antisymétrique pour la séquence d'empilement $[0/90]_2$. Le changement d'angle (de 0° à 90°) est marqué par un chargement brusque des deux contraintes (Figures 2-7 et 2-8). La relation des propriétés hygro-thermomécaniques et l'angle d'orientation de chaque couche du tube stratifié est la cause de ce changement.

2.3.2.2 Effet de la concentration d'humidité :

Cette partie de notre calcul a été consacrée à l'effet simultané de la concentration d'humidité exercés sur le comportement du tube en composite à savoir les contraintes radiale et circonférentielle. Une humidité relative est appliquée aux deux parois de notre tube, soit une concentration d'humidité de 1.2 %. Les figures (2-9) et (2-10), nous donne une représentation de la contrainte radiale et la contrainte circonférentielle de long de l'épaisseur du tube. Pratiquement les mêmes constatations sont faites que les deux précédentes figures (2-7) et (2-8) ; où une contrainte radiale très faible (Figure 2-9) et une contrainte circonférentielle plus importante (Figure 2-10). Cette différence des contraintes est causée un coefficient d'expansion d'humidité circonférentiel β_θ plus important que celui dans la direction radial β_r .

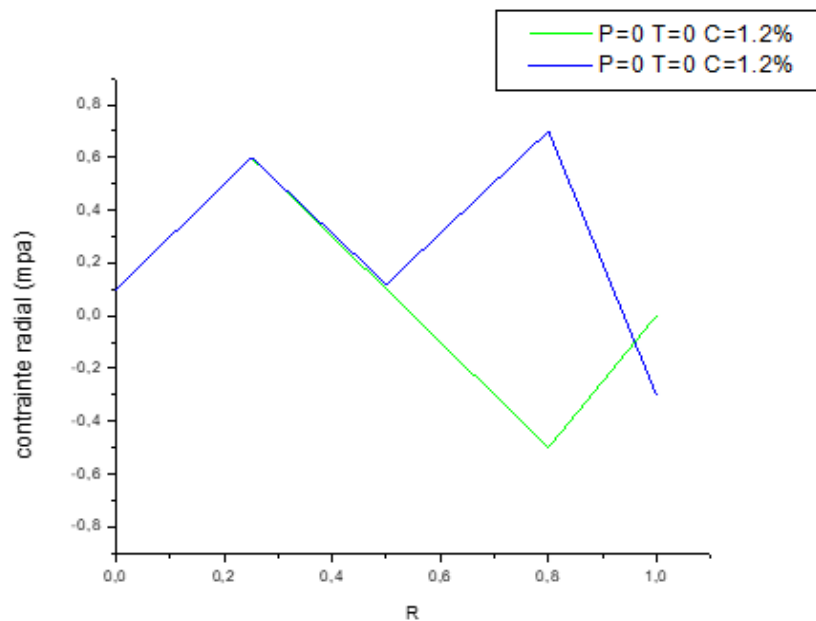


Figure (2-9) : Evolution de la contrainte radiale en fonction de l'épaisseur du tube pour une concentration de saturation $C = 1.2 \%$.

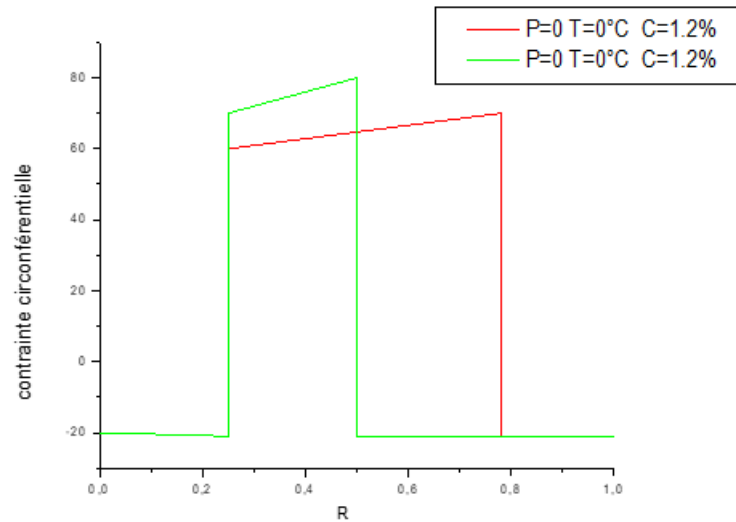


Figure (2-10) : Evolution de la contrainte circonférentielle en fonction de l'épaisseur du tube pour une concentration de saturation $C = 1.2 \%$.

2.3.2.3 Effet Hygro-thermomécanique sur le tube stratifié :

De la présente partie, on a tenté de mettre en évidence l'effet combiné de la température, de l'humidité et de la pression interne sur notre tube stratifié pour différentes séquences d'empilement. Une pression interne constante $P = 10 \text{ MPa}$, trois cas ont été proposées

- Cas 1 : $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $C = 0 \%$
- Cas 2 : $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $C = 1.2 \%$
- Cas 3 : $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $C = 1.2 \%$

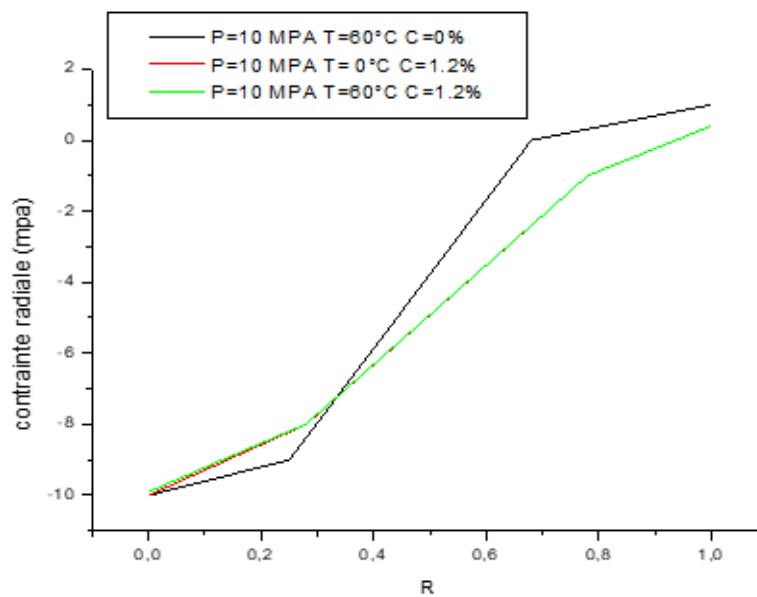


Figure (2-11) : Evolution de la contrainte radiale en fonction de l'épaisseur du tube pour la séquence $[0/90]_s$, sous l'effet des conditions d'environnement et la pression interne.

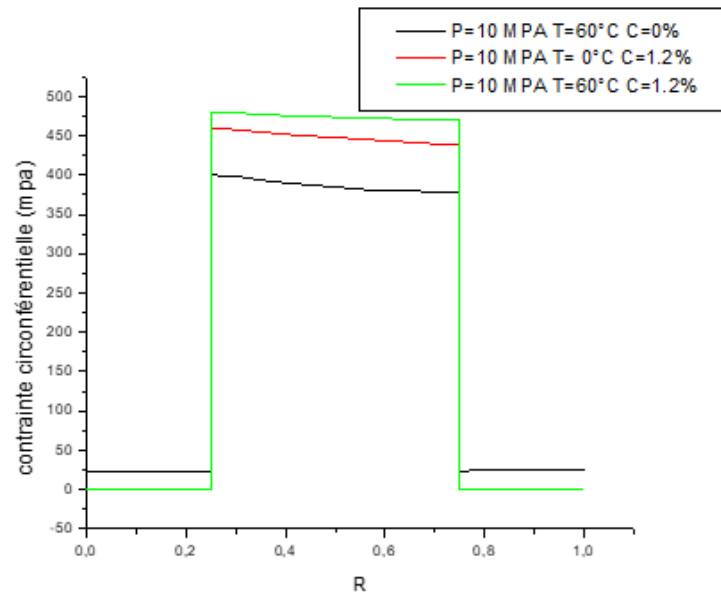


Figure (2-12) : Evolution de la contrainte circonférentielle en fonction de l'épaisseur du tube pour la séquence $[0/90]_s$, sous l'effet des conditions d'environnement et la pression interne.

D'après les résultats obtenus, on a constaté une contrainte radiale très moins importante et une contrainte circonférentielle plus importante. Cette différence réside dans l'angle d'enroulement car les fibres tissées sous un angle ont une grande résistance aux contraintes sur la voie radiale par rapport à celle de la voie circonférentielle.

2.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons traité deux parties distinctes, le comportement mécanique d'un pipe en composite et son comportement hygro-thermomécanique qui est le plus important. Il est primordial de connaître le comportement mécanique d'un système, cela nous permet d'évaluer son comportement hygrothermique pour enfin savoir son évolution hygro-thermomécanique.

- La mise en évidence de l'angle d'enroulement et du chargement comme variable, influe sur la dispersion de la contrainte radiale et circonférentielle.
- La mise en évidence de la température et la concentration de l'humidité avec l'angle d'enroulement comme variable influe sur l'évolution de la contrainte circonférentielle.

3.1.Introduction

Pour permettre une meilleure construction des pipelines en composite, 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.

On s'intéresse dans le présent chapitre 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 qui est le premier programme, 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 qui est le deuxième programme, pour garantir une grande précision des résultats obtenus, nous avons effectué 10^5 simulations et l'avantage du modèle analytique proposé est clairement montré pendant que ce grand nombre de simulation a besoin un temps très réduit de calcul, comparé à d'autres méthodes numériques. Les résultats obtenus seront discutés dans ce qui suit.

3.2.Méthode de simulation directe (Monte Carlo) :

La simulation Monte Carlo décrite d'après Rubinstein [23], Melchers [24], Lemaire et al. [25] directe comme la technique la plus simple pour estimer une espérance ou une intégrale mathématique. Elle consiste à effectuer un grand nombre de tirages N des variables aléatoires du problème étudié (Figure 3-1). Pour chaque tirage, la fonction d'état est calculée et l'on dénombre les tirages conduisant à la défaillance du système N_{def} . La probabilité de défaillance P_f est alors estimée par le rapport entre le nombre de tirages conduisant à la défaillance N_{def} et le nombre total de tirages N , soit :

$$P_f = \frac{N_{def}}{N} \quad (3.1)$$

Où N_{def} est le nombre de fois où la défaillance est vérifiée, et qui sera mesuré à l'aide de l'indicateur I qui est défini par :

$$I(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } G(x) \leq 0 \\ 0 & \text{si } G(x) > 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

L'avantage de cette méthode est qu'elle n'impose aucune condition de continuité ni de dérivabilité de la fonction d'état. Cette méthode permet en plus d'estimer la précision de la valeur de la probabilité de défaillance obtenue. Toutefois, elle conduit à des temps de calcul très élevés dès qu'il s'agit d'évaluer de faibles probabilités avec une précision raisonnable.

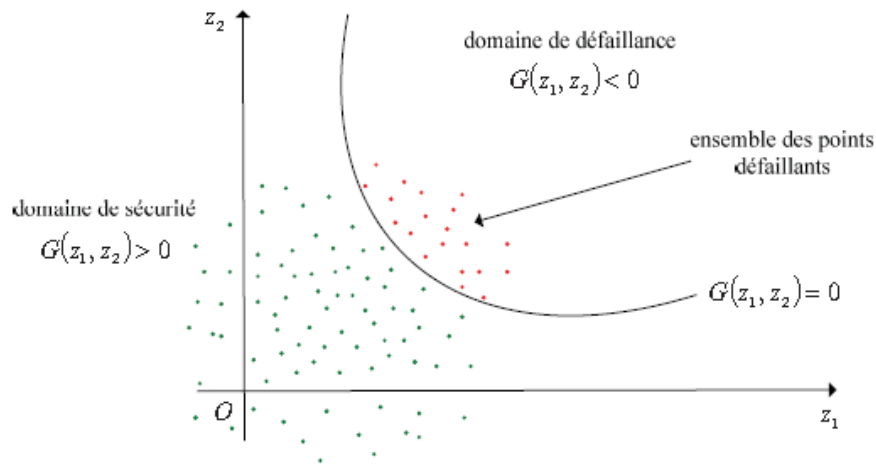


Figure (3-1) : Illustration de la simulation de Monté Carlo.

La variance de l'estimation est égale à :

$$v_{MC} = \sqrt{\frac{P_f(1-P_f)}{N}} \quad (3.3)$$

L'erreur diminue en fonction du nombre d'essais en \sqrt{N} , une augmentation de la précision nécessite donc un coût élevé. Le coefficient de variation est défini comme le quotient de l'écart-type par la moyenne :

$$C_v = \sqrt{\frac{(1-P_f)}{N P_f}} \quad (3.4)$$

Si P_f est petit par rapport à 1, le coefficient de variation est alors proche de $1/\sqrt{N P_f}$.

3.3. Analyse 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 suivante :

$$G(z_i) = R(z_i) - S(z_i) \quad (3.5)$$

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 et $S(z_i)$ 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 suivante :

$$\beta = \min \sqrt{\sum_i [T_i(z_j)]^2} \quad \text{avec } G(z_j) \leq 0 \quad (3.6)$$

$T_i(z_j)$ 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 :

$$G(z_j) = Y' - \sigma_\theta \quad (3.7)$$

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 :

$$P_f = \Pr[G \leq 0] \quad (3.8)$$

Avec $\Pr [.]$ est l'opérateur de probabilité. Lors de la conception d'un produit, on devra faire très attention pour permettre à notre système d'être utilisé dans des conditions de sécurité optimales ainsi réduire ou éliminer les probabilités de défaillance

Les mesures de sensibilité peuvent être également obtenues en calculant la variation de la probabilité de défaillance due à la variation du paramètre d'entrée

Les paramètres aléatoires du pipeline en composite concernent, la géométrie, les conditions de service, de fabrication et du matériau choisis. Le tableau (3-1) nous donne les différentes valeurs des variables aléatoires avec leurs coefficients de variation (C_v) qui sont pris de la base des données de la littérature. Pour notre modèle mécanique choisi, l'étude probabiliste n'était pas consacrée qu'à ces variables aléatoires. De plus pour l'étude hygro-thermomécanique, on a testé d'autres variables telles que la température et la concentration d'humidité. De ce fait notre travail a été focalisée pour le C_v de ses huit variables à savoir, le module de Young E_1 , E_2 , le Module de cisaillement G_{12} , la Charge interne P_i , le Rapport de diamètre Rap , l'angle d'orientation des fibres θ , la température T et la concentration d'humidité H .

Tableau (3-1) : Variables aléatoires des paramètres correspondants

Variable	Moyenne	Coefficient de variation (C_v)
Module de young longitudinal E_1	181 GPa	4%
Module de young transversal E_2	10.3 GPa	1%
Module de cisaillement G_{12}	7.17 GPa	12%
Charge interne P_i	10 MPa	10%
Rapport de diamètre Rap	1.05 à 1.50	1%
Angle d'orientation des fibers θ	55°	1%

Tableau (3-2) : Caractéristiques mécaniques du matériau choisi

Paramètre	T300/5208	Paramètre	T300/5208
E_1 (GPa)	181	X(MPa)	1500
E_2 (GPa)	10.3	X'(MPa)	1500
E_3 (GPa)	10.3	Y(MPa)	40
G_{12} (GPa)	7.17	Y'(MPa)	246
ν_{21}	0.28	S(MPa)	68
ν_{31}	0.28		
ν_{32}	0.59		

3.4. Distribution probabiliste de la contrainte circonférentielle :

Pour la séquence d'empilement [55 55 55 55], un rapport de diamètre $D_2/D_1 = 1.05$, et les conditions de température et d'humidité successivement 25 °C et 20 % la figure (3-2) nous donne la distribution de la marge de sécurité obtenue par la simulation Monte Carlo pour les différents coefficients de variation des paramètres géométriques et environnementaux.

Afin d'estimer les risques d'endommagement provoqués par des incertitudes géométriques et mécaniques représentées par ces coefficients de variation, il est nécessaire de définir la fonction $G(z_i)$ qui exprime la fonction de la marge de sécurité

Dans notre cas figure (3-2), on remarque que la distribution de la marge de sécurité est de 20 MPa et plus, tant que notre pipe fonctionne sous ces conditions-là il est en sécurité car la résistance transversale n'est pas atteinte, on peut voir aussi que la probabilité de défaillance augmente d'une manière significative quand toutes les variables aléatoires (coefficients de variation) sont considérées en même temps ce qui risque de provoquer une défaillance de notre pipe.

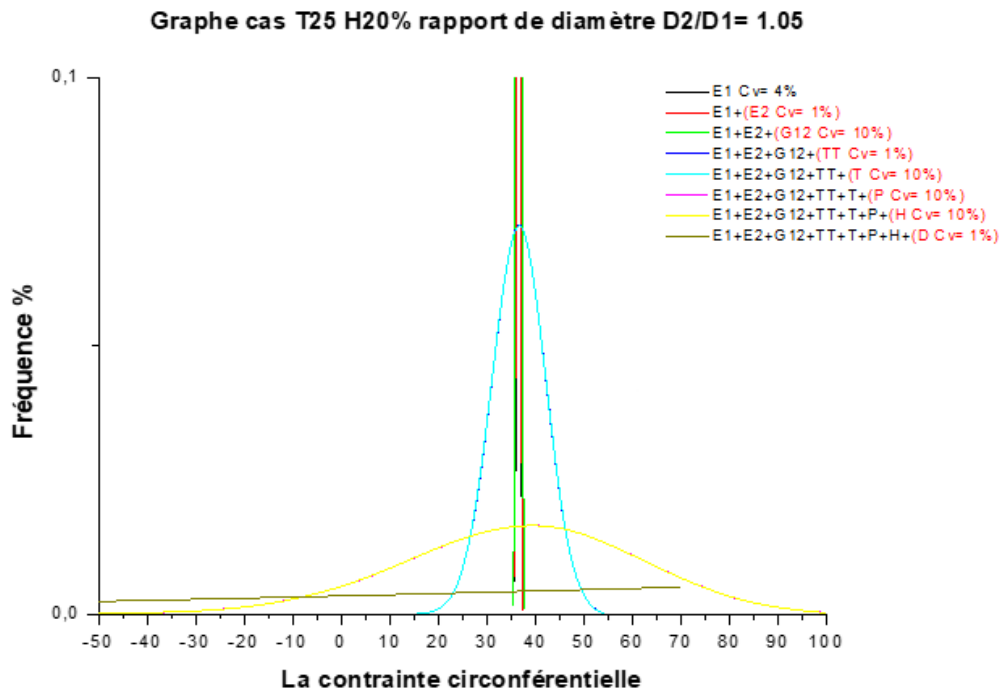


Figure (3-2) : Distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap = 1.05, T = 25 °C, H = 20 %).

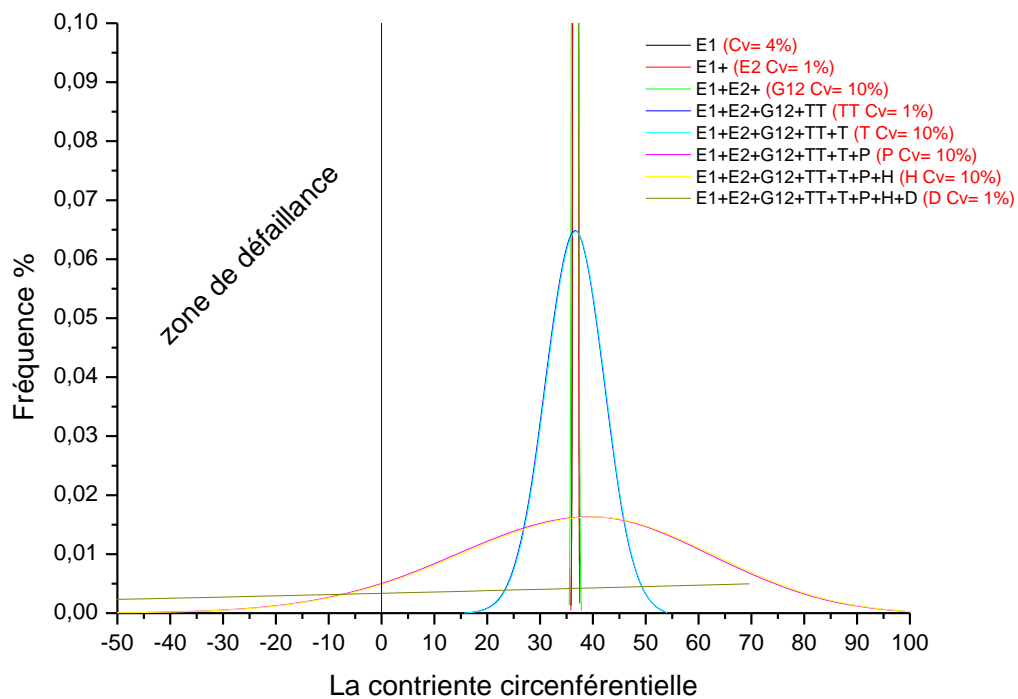


Figure (3-3) : Distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap = 1.05, T = 25 °C, H = 80 %).

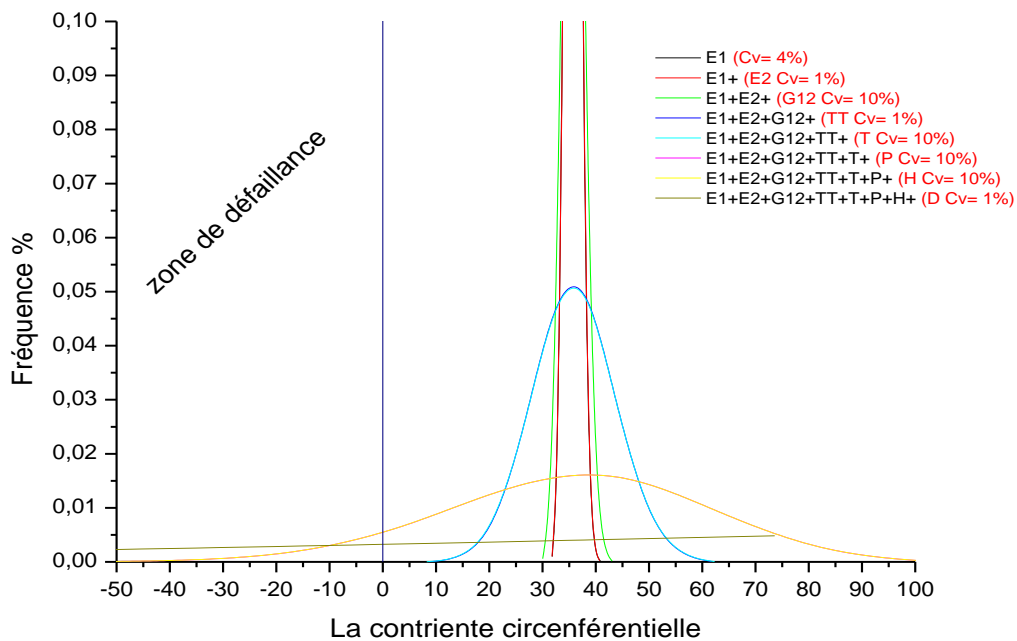


Figure (3-4) : Distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap = 1.05, T = 100 °C, H = 20 %).

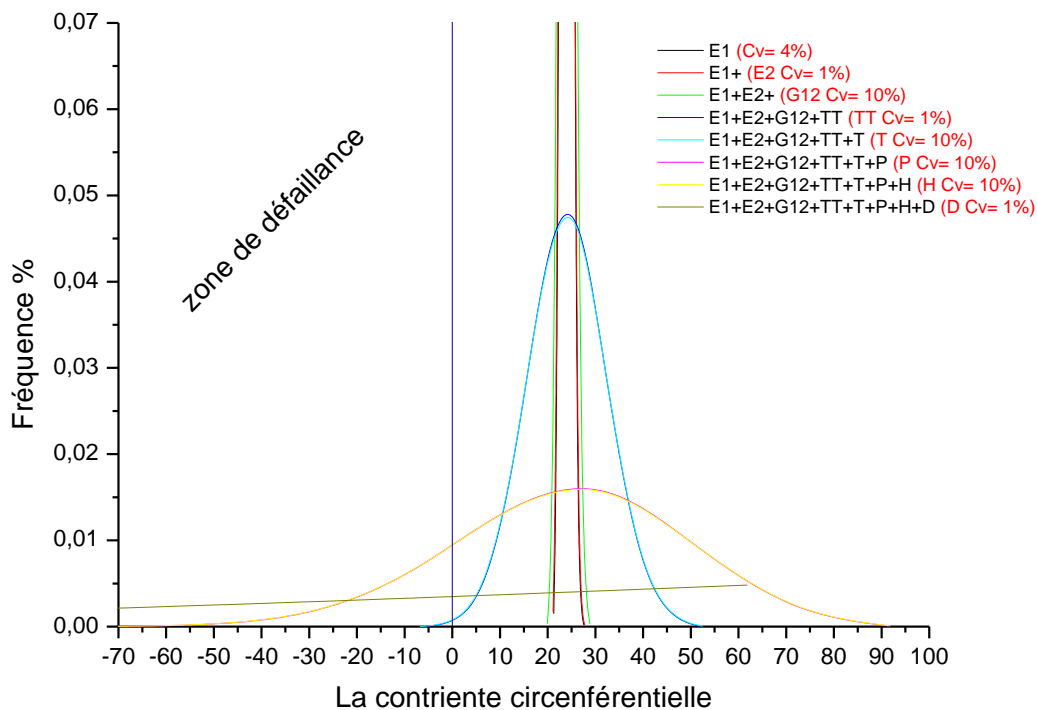


Figure (3-5) : Distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap = 1.05, T = 100 °C, H = 80 %).

Dans la figure (3-3), on a choisi les mêmes conditions d'utilisation que la figure (3-2) mais tout en augmentant la concentration d'humidité de 20 % à 80 % et de même pour la figure (3-4), on a augmenté la température à 100 °C tout en variant les coefficients de variation, l'augmentation de la température ou l'humidité engendre une nette augmentation de la probabilité de défaillance du pipe.

Chapitre 3 : Analyse probabiliste et résultats

Pour ce rapport de diamètre et conditions environnementaux, 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, l'endommagement devient plus imminent.

Pour la figure (3-5), on a augmenté les deux paramètres température $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, humidité $H = 80 \%$ au même temps on a remarqué une augmentation considérable de la marge de la zone de défaillance, dans ces condition-là notre pipe risque de s'endommager rapidement.

Le tableau (3-2) illustre les graphes du deuxième rapport de diamètre $D_2/D_1 = 1.12$ avec les mêmes conditions prises avec le premier rapport 1.05

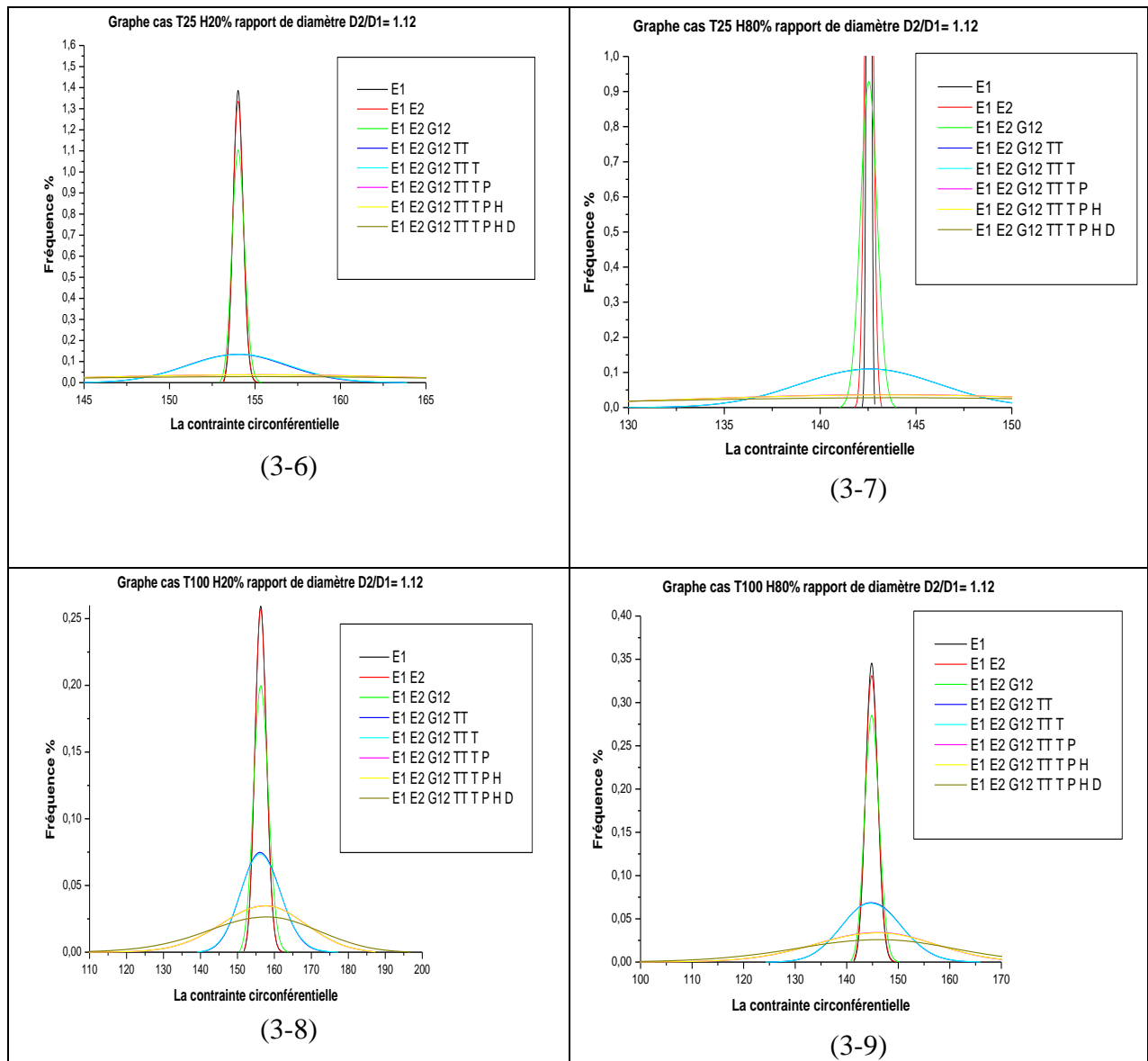


Tableau (3-2) : Distribution de la marge de sécurité par rapport aux incertitudes du pipeline (Pour les différents cas du Rap = 1.15).

Chapitre 3 : Analyse probabiliste et résultats

D'après les figures (3-6), (3-7), (3-8), (3-9) (3-10), on a tendance à remarquer que les incertitudes des paramètres généraux non pas une influence sur le pipe car pour des rapport de diamètres 1.12 et 1.54 le pipe et présent dans la zone de sécurité.

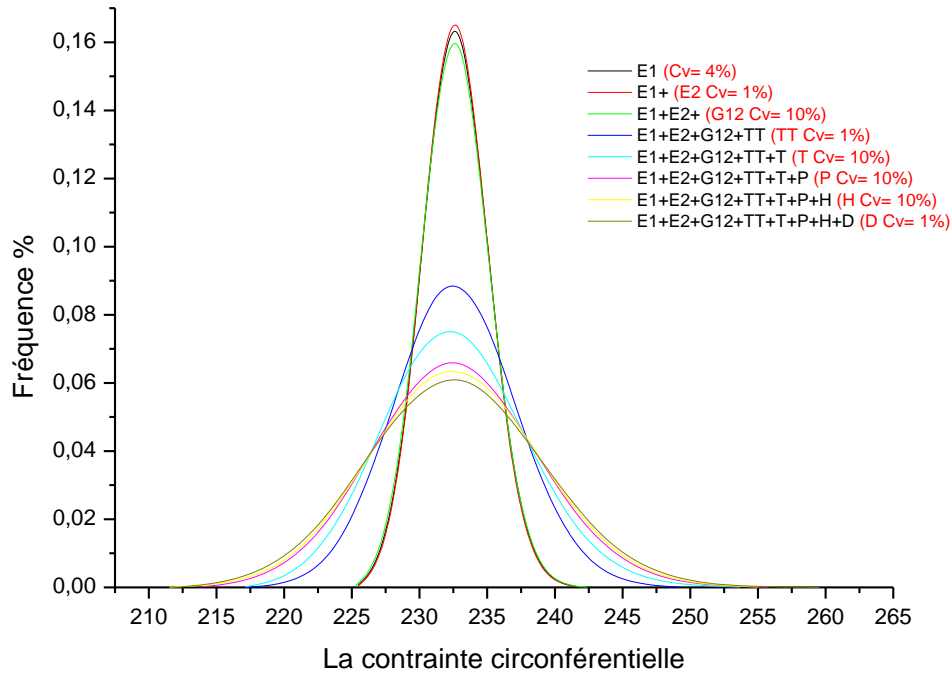


Figure (3-10) : Distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap = 1.54, T = 100 °C, H = 80 %).

D'après les résultats précédents, la probabilité de défaillance pour les combinaisons des variables aléatoires d'entrée quand seulement les propriétés matérielles sont considérées en tant qu'aléatoire (E1, E2 et G12), la dispersion de la marge de défaillance est négligeable, dans ce cas, les efforts mécaniques peuvent être considérés en tant que déterministe. Quand l'angle d'enroulement est ajouté aux propriétés matérielles, la distribution devient observable. En ajoutant les incertitudes liées à la pression appliquée (CV (P) = 10 %), la dispersion augmente de la manière proportionnelle. Quand toutes les incertitudes sont considérées c'est-à-dire en ajoutant le rapport de diamètre, la dispersion devient très grande, augmentant donc la probabilité de défaillance.

3.5. Influence de l'humidité et la température sur la distribution des contraintes :

Pour bien déterminer l'influence des deux paramètres température et humidité sur la distribution des contraintes circonférentielles, on a fait une étude comparative des 4 changements apporter ($T = 25\text{ °C}$, $H = 20\%$ - $T = 25\text{ °C}$, $H = 80\%$ - $T = 100\text{ °C}$, $H = 20\%$ - $T = 100\text{ °C}$, $H = 80\%$) à chaque rapport de diamètre (1.05 - 1.12 - 1.54) pour la séquence d'empilements de [55 -30 -55 30].

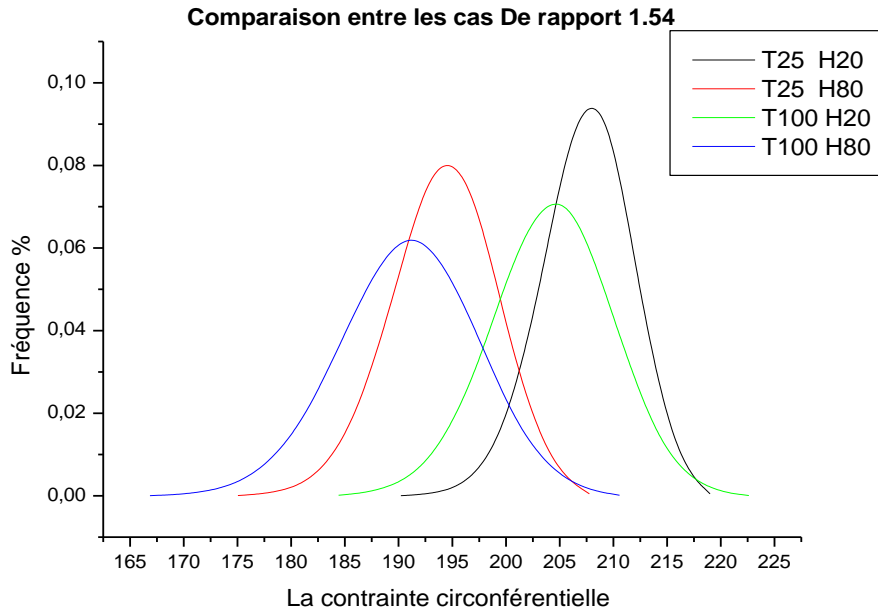


Figure (3-11) : comparaison de la distribution de la marge de sécurité par rapport aux incertitudes du pipeline du Rap = 1.54.

La figure (3-11) représente la distribution de la marge de sécurité du pipe quand on fait une augmentation de l'un des deux paramètres température ou humidité ou les deux au même temps. Il est clair que la probabilité de défaillance augmente sous qui fait que l'allure des graphes se translate à gauche vers la zone de l'endommagement, donc on peut dire que le matériau présent une zone de sécurité qui diminue chaque fois qui a une augmentation de ces paramètres température et humidité.

La même constatation est faite pour les figures (3-12), (3-13), mais cette fois y a un changement de l'épaisseur ce qui entraîne une grande probabilité de défaillance donc un risque d'endommagements plus imminent.

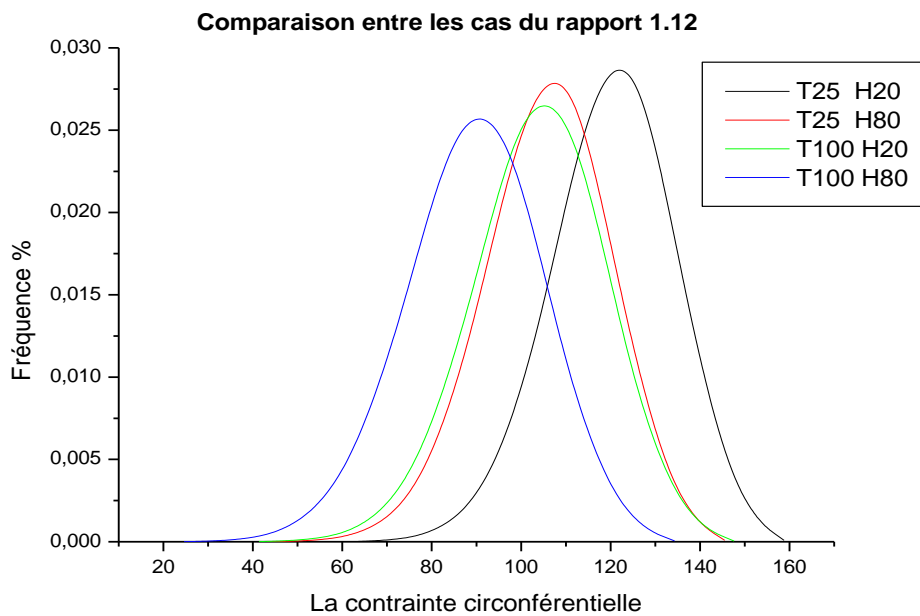


Figure (3-12) : comparaison de la distribution de la marge de sécurité par rapport aux incertitudes du pipeline du Rap = 1.12.

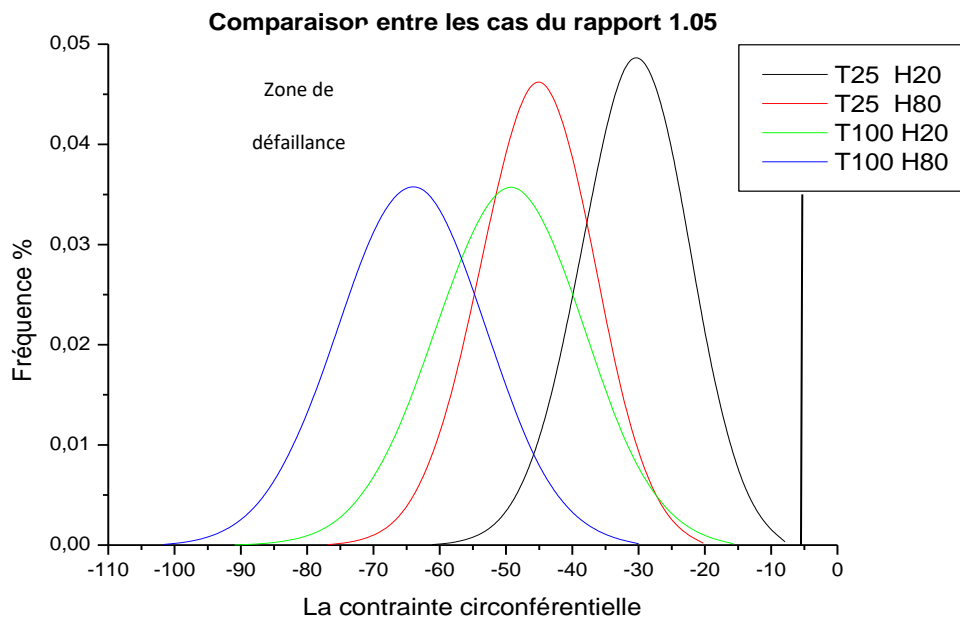


Figure (3-13) : comparaison de la distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline du Rap = 1.05.

D'après les figures (3-11) (3-12) (3-13), on constate que l'influence de la température dans des petits rapports de diamètre et plus grande par rapport à celle de l'humidité. Car la température a une influence spontanée sur la dégradation des propriétés mécaniques du matériau donc l'impact de la température sur la distribution de la marge de défaillance et plus grand que celui de l'humidité.

3.6. Influence de l'épaisseur sur la distribution des contraintes circonférentielles :

Pour la même séquence d'empilements [55 -30 -55 30], on a fait une comparaison de la distribution des contraintes pour le cas $T = 100\text{ °C}$, $H = 80\%$ des 3 différents rapports de diamètre [1.05 - 1.12 - 1.45].

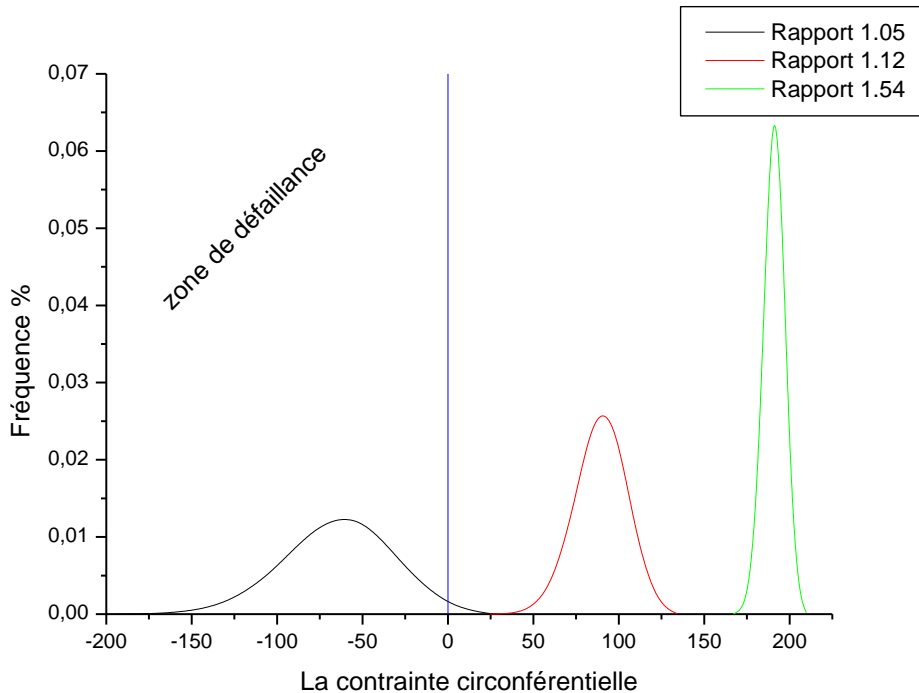


Figure (3-14) : comparaison de la distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline pour les rapports (1.05 – 1.12 – 1.54).

La figure (3-14) présente une évolution de la contrainte circonférentielle lors du changement du rapport du diamètre. Pour un rapport de diamètre 1.54 le pipe est présent totalement dans la zone de sécurité lors de la diminution de l'épaisseur à un rapport 1.12 on remarque une différence dans la distribution de la marge de sécurité mais le pipe reste toujours dans la zone de sécurité, il est nettement visible que la diminution du rapport à 1.05 présente un danger sur la sécurité de notre pipeline, puisque les contraintes circonférentielles calculées sont supérieures à celles de la résistance transversale du matériau. Par conséquent, la fonction $G(z_i)$ est négative.

Le résultat obtenu nous a permis de dégager la conclusion suivante :

- L'épaisseur joue un rôle primordial dans la sécurité, la probabilité de défaillance de notre pipe augmente à chaque fois qu'il y a une diminution d'un rapport du diamètre

3.7. Effets de la séquence d'empilement :

Dans les mêmes conditions d'exploitation [$T = 100\text{ °C} - H = 80\%$] et dans un même rapport de diamètre 1.05 la figure (3-15) présente la distribution des contraintes circonférentielles pour deux séquences d'empilements différentes [55 55 55 55] et [55 -30 -55 30].

Pour une séquence d'empilements [55 55 55 55], la queue du graphe est allongée dans la zone d'endommagement, le pipeline court le risque de s'endommager mais ça reste plus fiable par rapport à la séquence d'empilements [55 -30 -55 30] là où on remarque presque le graphe entier et présent dans la zone d'endommagements donc on constate que le changement de la séquence d'empilements a un impact considérable sur la distribution de contraintes qui s'exerce sur les parois du pipeline.

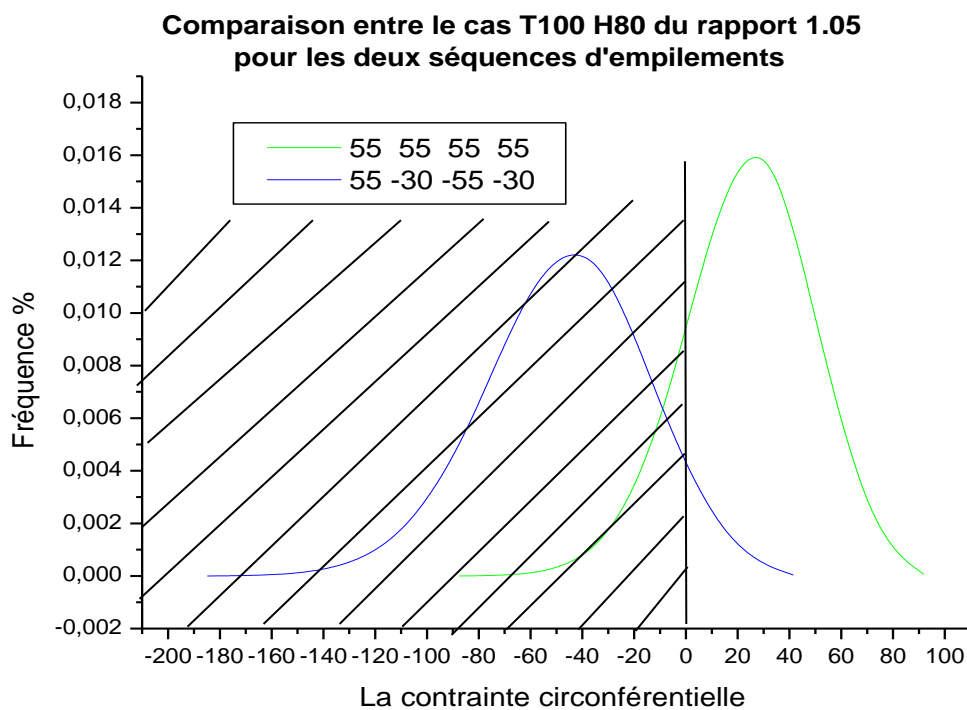


Figure (3-15) : comparaison de la distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline pour les deux différentes séquences d'empilements.

Le changement d'angle d'orientation d'une couche d'empilement à une autre, amplifie la distribution de la contrainte circonférentielle, le passage d'une couche de $\pm 55^\circ$ à une autre de $\pm 30^\circ$ entraîne un changement brusque considérable dans la valeur de cette contrainte. La raison pour laquelle la séquence là, où il n'y a pas de changement d'angle d'orientation des fibres est plus adoptée, selon la bibliographie elle offre des valeurs beaucoup moins importantes que celles des autres séquences.

3.8. Conclusion

Dans le présent chapitre on a d'élaborer une étude probabiliste basée sur la distribution de la contrainte circonférentielle à travers la paroi d'une structure tubulaire soumise à un chargement de pression interne avec effet de fond. Cette étude nous a permis 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 :

- Le rapport de diamètre, dans des conditions environnementales bien données 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
- L'influence de la température est plus grande par rapport à celle de l'humidité sur la distribution des contraintes circonférentielle.

Pour conclure, l'étude probabiliste nous a permis de déduire qu'en premier lieu, la détermination des facteurs dominants est très importante 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.

CONCLUSION GENERALE

Les pipelines en composite sont les moyens de transport de fluides les plus répandus à travers le monde vu leurs grandes résistances aux conditions d'exploitation les plus sévères et pour cela, lors de la conception il faut bien tenir compte de la fiabilité de ces derniers-là pour garantir une longue durée de vie et une sécurité totale.

Pour bien garantir la fiabilité du pipeline en composite et il est nécessaire de déterminer sa probabilité de défaillance lors de son exploitation dans des conditions bien données où il y a des différentes sollicitations aléatoires.

Le travail réalisé dans ce mémoire permet de mieux comprendre :

- L'étude du comportement mécanique et hygro-thermomécanique de ce même système, et la répartition des contraintes qui s'exerce sur lui.
- Le calcul probabiliste des différentes variables aléatoires de telle structure

Dans le premier chapitre on a pu voir le procédé de fabrication des pipelines en composites et les principes constituant de base et le domaine d'utilisation.

Le deuxième chapitre est consacré pour l'étude du comportement mécanique et hygro-thermomécanique. On a étudié le comportement mécanique à savoir le calcul des contraintes radiale et circonférentiel subit par le tube en utilisant la formulation mathématique de la mécanique des matériaux là où on n'a pu voir l'effet de l'angle d'orientation des fibres, et l'effet de l'épaisseur sur la distribution des contraintes par rapport au rapport du rayon bien donner.

Pour le troisième chapitre on a fait une étude probabiliste pour déterminer la fiabilité du pipeline en composite qui est soumis des diverses conditions de conception ou de fonctionnement à savoir l'influence des coefficients de variation des paramètres géométriques ou environnementaux agissantes sur le pipe. On a pu constater l'importance de ces variables sur la distribution des contraintes circonférentielle et l'influence de ces derniers la sur la sécurité du pipeline et on peut classer leurs influences de mettre le pipe dans la zone d'endommagements comme suit : l'épaisseur du pipe les changements internes l'angle d'orientation des fibres la température et l'humidité puis enfin les caractéristiques du matériau.

Dédicaces

Fahem

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance en premier lieu à : ma chère mère et mon cher père qui m'ont élevé soutenu durant tout mon parcours d'études.

A Tous mes frères Bilal et Ahcene et mon unique sœur Samira, Toute ma famille cousin et cousines Bohou, Nouara, Djamila. Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans ma formation. Tous mes amis proches kenza, rachida, Housseem, abdelhak, youcef, aimad, lounes et mohamed . Tous les amis sans exception

A tous ceux que j'aime.

Dédicaces

Rachida

A LA MEMOIRE DE

Mon père larbi.

*J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait votre
âme dans sa sainte miséricorde.*

A ma mère fatma.

*Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la
profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous, vos sacrifices
innombrables et votre dévouement firent pour moi un
encouragement. Vous avez guetté mes pas, et m'avez couvé de
tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours
pour mener à bien mes études. Vous m'avez aidé et soutenu
pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention
renouvelée. Puisse Dieu, tout puissant vous comblait de santé, de
bonheur et vous procurer une longue vie.*

A mes chers et adorables frères et sœurs

*Sarah, Hadjer les prunelles de mes yeux, Salima et Amina, les
douces, au cœurs si grand, Khadidja et ses enfants, Faycal le
généreux, Djamel mon grand frère que j'adore et sa femme
Bakhta, Leila et ses enfants, ma sœur Chahra zed ma jumelle
mon âme sœur, Marwa et Manel Sarah que j'aime
profondément. En témoignage de mon affection fraternelle, de
ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une
vie pleine de bonheur et de succès Que Dieu, le tout puissant,
vous protège et vous garde.*

INTRODUCTION GENERALE

Le transport des matières fluides sur les grandes distances réalisées au moyen des pipelines et tubes sous pression, constituant un système souvent en réseaux.

Les produits visés par ce terme sont généralement: le pétrole et autres hydrocarbures liquides, le gaz naturel et autres gaz combustibles, ainsi que certains produits chimiques. Le transit de produits alimentaires (bière, lait, grains...) dans de longues conduites peut entrer dans cette acception. Cependant l'évacuation gravitaire des effluents (eaux usées, eaux pluviales, tout-à-l'égout...) est faite par canalisations. L'amenée d'eau dans un ouvrage hydraulique se nomme conduite forcée [1].

L'augmentation de la demande d'énergie telles que le gaz et le pétrole nécessitent de plus en plus la construction de nouvelles lignes de pipelines. En effet, ces 50 dernières années sont devenues le moyen d'acheminement le moins coûteux et le plus sûr pour de grandes quantités d'énergies et sur des longues distances. Quel que soit l'endroit que le pipeline traverse (mer ou terre),

Au début c'était l'acier, qui a dominé toute la gamme des pipelines, mais maintenant avec la découverte de nouveaux matériaux c'est à la rentabilité que revient la place. Donc pour chaque installation, on évalue et on fait des études même sur le type de matériau à choisir. Le choix d'un tube à employer dans une tient compte de la matière dont il est formé et du type d'élaboration une fois ces deux paramètres sélectionnés, le second choix sera focalisé sur :

- Le diamètre qui dépend du fluide qui doit être transporté.
- Le choix de l'épaisseur, lui dépend de la pression hydraulique ou de service.
- Caractéristique de l'ambiance dans lequel le tube sera utilisé.
- Les paramètres de service du fluide véhiculé à savoir à sa température et à pression

Ce dernier est toujours exposé aux risques d'endommagements que ce soit par des interférences externes [2] (ou environnementales. Il faut bien noter que la majorité des ruptures des pipelines qui se trouvent sur terre ou immergés en mer sont causées principalement par des agressions externes. Ces dernières se résument à des enfoncements, des éraflures ou aussi les combinaisons (enfoncements + éraflures). Des études récentes faites par Européen Gas Pipeline Incident Groupe [3], pour 1060 cas de rupture dans les pipelines, ont montré que 49.6 % ont été causées par des agressions externes. Les autres causes d'incidents se répartissent en défauts de corrosion (15.3%), les défauts de construction (16.5%), ouverture de vannes par erreur (4.6%), les glissements de terrain (7.3%) et autres avec 6.7%. Toutes les structures mécaniques sont soumises à des efforts dont leurs origines varient selon leur fonctionnement, leur milieu environnant ainsi qu'aux effets extérieurs qui sont variables ; dans la majorité des cas, elles sont sous forme de sollicitations cycliques qui peuvent provoquer leur endommagement.

Donc, pour illustrer ce phénomène plusieurs auteurs ont traité ce sujet de diverses visions. L'un des pionniers qui avait la plus grande application pratique dans l'évaluation des pipelines défauts isolés, est l'ASME avec sa norme B31G [4]. Une vaste série de tests sur les pipelines érodées réelles, qui ont été mis hors service avait été effectuée en les soumettant à une pression interne jusqu'à la rupture. Sur la base des résultats des expériences, des expressions mathématiques pour calculer la pression maximale dans les canalisations corrodées ont été développés. Ces expressions, bien que semi empirique, basées sur le principe de la mécanique de la rupture. Teixeira et al [5] ont effectué une étude fiabiliste sur un pipeline affecté de corrosion et soumis à une pression interne en utilisant la méthode de fiabilité de premier ordre (FORM).

Vu ces défaillances constatées pour ce type d'installation à savoir les pipelines à travers le choix de l'acier comme matériau de base pour cette industrie, d'autre recherche ont été mené sur cet axe, qui consiste à trouver d'autres alternatives sur le choix du matériau. Sur ce fait que des chercheurs ont entamé des travaux sur le matériau composite et ainsi pouvoir tester ce nouveau matériau comme un remplacement potentiel. Ainsi, les matériaux composites et en particulier les composites à fibres longues ne sont utilisés de manière systématique que lorsque les matériaux traditionnels qui présentent des faiblesses ainsi qu'ils ne peuvent plus répondre aux exigences d'utilisation ou lorsque leur surcoût de fabrication est compensé par le gain de poids dû à leur faible densité

L'utilisation des matériaux composites étant récente et malgré l'effort de recherche entrepris, leur tenue à long terme soulève de nombreuses questions tant fondamentales que technologiques.

La raison pour laquelle, la plupart des recherches se sont penchées maintenant vers de nouveaux matériaux de construction tels que les matériaux composites soient par caractérisation expérimentale ou modélisation numérique. À cause des hétérogénéités et de leur anisotropie, la nature des endommagements ainsi que les mécanismes à l'origine de leur apparition et de leur progression sont très différentes des mécanismes rencontrés dans les matériaux plus conventionnels. Les endommagements tels que la rupture du renfort, la fissuration matricielle ou encore le délaminage peuvent être à l'origine de la ruine prématurée d'une structure. Ainsi, la pénétration d'agents agressifs dans les tubes en composite, notamment la diffusion d'humidité en environnement humide, conduit à l'amorçage et au développement du processus d'endommagement.

Richard et al [6] ont fait une optimisation de l'endommagement d'un pipe en composite sollicité sous une pression interne en utilisant une méthode couplée mécano-fiabiliste. Ellyin et al [7] ont présenté une étude expérimentale sur l'effet de l'absorption d'humidité sur les propriétés mécaniques d'un pipe en composite en fibre de verre avec la considération du paramètre température. Karam Y. Maalawi [8] a présenté un modèle mathématique pour augmenter la résistance d'un tube à parois mince en composite sous chargement externe. Le

tube considéré est en multicouches à différentes fractions volumiques. L'objectif est d'avoir une pression de service critique aboutissant à une géométrie optimale. Enfin Bouhafes M a réalisé un modèle analytique qui permet l'étude hygro-thermomécanique à partir du modèle mécanique d'un pipeline en composite.

D'après la littérature, plusieurs méthodes probabilistes ont été utilisées dans le calcul mécano-fiabiliste. Frangopol et Recek [9] 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 [10] ont proposé une approche qui considère simultanément la fiabilité et la robustesse d'un matériau composite [11] 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 [12] 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.

Ce travail de fin d'études se compose de trois parties :

Après une introduction générale, une première partie présente le matériau composite et la méthode utilisée pour la conception des réseaux de tuyauterie et canalisation, la deuxième partie sera dédiée pour l'étude de comportement mécanique et le comportement hygro-thermomécanique du pipeline en composite, la troisième partie est dédiée à l'utilisation de la méthode mécano-fiabiliste Monte-Carlo de pipe en composite, et enfin un conclusion générale.

Liste des figures

Figure (1-1) : structure d'un matériau composite monocouche	2
Figure (1-2) : structure d'un matériau composite stratifié	2
Figure (1-3) : structure d'un matériau composite sandwichs	3
Figure (1-4) : Structure d'un pipeline en composite	3
Figure (1-5) : Procédé de fabrication par enroulement filamentaire.....	4
Figure (1-6) : principe de l'enroulement hélicoïdal discontinu	5
Figure (1-7) : le principe de l'enroulement hélicoïdal continu	5
Figure (1-8) : le principe de l'enroulement circonférentiel.....	6
Figure (1-9) : le principe de l'enroulement polaire	6
Figure (1-10) : le principe de l'enroulement polaire	7
Figure (1-11) : principe du Moulage par pultrusion.....	8
Figure (1-12) : mode de rupture translaminaire	8
Figure (1-13) : mode de rupture intra-laminaire	9
Figure (1-14) : mode de rupture inter-laminaire	9
Figure (1-15) : Comportement schématique d'un tube en matériau composite mis sous pression interne croissante.....	10
Figure (1-16) : Micrographies au microscope montrant des fissures dans la paroi d'un tube en composite après perlage	11
Figure (2-1) : Contraintes s'exerçant sur un pipeline.....	14
Figure (2-2) : Coordonnées et état de contrainte dans un pipe en composite multicouches ..	14
Figure (2-3) : Distribution de la contrainte circonférentielle $\sigma_{\theta}/\sigma_{\theta m}$ en fonction du rayon adimensionnelle pour les trois méthodes utilisant le matériau T300/5208 avec un rapport géométrique de rayon $r_e/r_i=1.5$	18
Figure (2-4) : Evolution de la Contrainte radiale en fonction du rapport du rayon pour types de stratifiés, d'un rapport géométrique $(b/a)=1.05$	19
Figure (2-5) : Evolution de la Contrainte circonférentielle en fonction du rapport du rayon pour trois types de stratifiés, d'un rapport géométrique $(b/a)=1.05$	20
Figure (2-6) : Rapport entre la contrainte radiale et la charge intérieure pour un tube stratifié $[55/55/55/55]_2$	20
Figure (2-7) : Evolution de la contrainte radiale en fonction de l'épaisseur du tube pour une répartition uniforme de la température $T= 60^{\circ}\text{C}$	25
Figure (2-8) : Evolution de la contrainte circonférentielle en fonction de l'épaisseur du tube pour une répartition uniforme de la température $T= 60^{\circ}\text{C}$	25

Figure (2-9) : Evolution de la contrainte radiale en fonction de l'épaisseur du tube pour une concentration de saturation $C= 1.2\%$	26
Figure (2-10) : Evolution de la contrainte circonférentielle en fonction de l'épaisseur du tube pour une concentration de saturation $C= 1.2\%$	27
Figure (2-11) : Evolution de la contrainte radiale en fonction de l'épaisseur du tube pour la séquence $[0/90]_s$, sous l'effet des conditions d'environnement et la pression interne	27
Figure (2-12) : Evolution de la contrainte circonférentielle en fonction de l'épaisseur du tube pour la séquence $[0/90]_s$, sous l'effet des conditions d'environnement et la pression interne ..	28
Figure (3-1) : Illustration de la simulation de Monté Carlo	30
Figure (3-2) : Distribution de la marge de sécurité par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap=1.05, T=25 C° H=20%)	33
Figure (3-3) : Distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap=1.05, T=25 C° H=80%)	33
Figure (3-4) : Distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap=1.05, T=100 C° H=20%)	34
Figure (3-5) : Distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap=1.05, T=100 C° H=80%)	34
Figure (3-6) : Distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap=1.12, T=25 C° H=50%)	35
Figure (3-7) : Distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap=1.12, T=25 C° H=80%)	35
Figure (3-8) : Distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap=1.12, T=100 C° H=20%)	35
Figure (3-9): Distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap=1.12, T=100 C° H=80%)	35
Figure (3-10): Distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline (Rap=1.54, T=100 C° H=80%)	36
Figure (3-11) : comparaison de la distribution demarge de la sécurité par rapport aux incertitudes du pipeline du Rap=1.54.....	37
Figure (3-12) : comparaison de la distribution de la marge de sécurité par rapport aux incertitudes du pipeline du Rap=1.12.....	38
Figure (3-13) : comparaison de la distribution de la marge de sécurité par rapport aux incertitudes du pipeline du Rap=1.05.....	38
Figure (3-14) : comparaison de la distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline pour les rapports (1.05 – 1.12 – 1.54).....	39
Figure (3-15) : comparaison de la distribution de la marge de défaillance par rapport aux incertitudes du pipeline pour les deux déférentes séquences d'empilements	40

Liste des tableaux

Tableau (2-1) : caractéristiques mécaniques du T300/5208.....18
Tableau (2-1) : paramètre hygrothermique du T300/5208.....25
Tableau (3-1) : variables aléatoires des paramètres25
Tableau (3-2) : caractéristiques mécanique du matériaux T300/5208.....32

Liste des symboles

e : épaisseur du tube

P : pression interne,

F : la force de traction

M : le moment axial de torsion.

E_r, E_θ, E_z : module d'Young par rapport à l'axe (r, θ, z)

$\nu_{r\theta}, \nu_{rz}, \nu_{\theta z}$: coefficient de Poisson par rapport à l'axe (r, θ, z) .

T_f : taux volumique de fibre

V_{fibres} : volume des fibres

V_{moule} : volume du moule

$P_{\text{éclat}}$: pression d'éclatement du tube,

σ_R : contrainte à la rupture du matériau,

σ_\perp : Contrainte transverse (perpendiculaire aux fibres) dans une couche du stratifié.

τ_\neq : Contrainte de cisaillement fibre/matrice dans le plan de la couche considérée.

$\sigma_{\perp T(m)}, \sigma_{\perp C(m)}$: Contraintes à la rupture d'une couche dans la matrice, respectivement en traction transverse et en compression transverse.

$\sigma_{\perp(Af)}$: Contrainte à la rupture en traction transverse d'une couche, à l'interface

$\tau_{\neq(m)}, \tau_{\neq(Af)}$: Contraintes à la rupture en cisaillement d'une couche, respectivement dans la matrice et à l'interface.

τ : contrainte en cisaillement,

$\sigma_{//}$ contrainte longitudinale,

σ_s' contrainte transverse,

σ_θ contrainte circonférentielle,

σ_{az} contrainte axiale,

t : temps

r : rayon

R_i : rayon intérieur

R_e : rayon extérieur

D_{int} : diamètre intérieur

D_{ext} : diamètre extérieur

Rap : rapport entre rayon intérieur et rayon extérieur

T : est la température absolue (donnée en °K).

φ, θ : Angle d'orientation des fibres ou séquences d'empilement

h_i : épaisseur de chaque couche du stratifié.

σ_r : contrainte radiale

σ_θ : Contrainte circonférentielle

σ_z : contrainte axiale

$\tau_{r\theta}, \tau_{rz}, \tau_{\theta z}$: contraintes de cisaillement

\bar{C}_{ij} : termes de la matrice de rigidité

C_{ij} : termes de la matrice de rigidité

\bar{S}_{ij} : coefficients de la matrice de souplesse

$\varepsilon_i, \gamma_{ij}$, contrainte de cisaillement, la déformation longitudinale

σ_i : contrainte longitudinale

τ_{ij} : déformation de cisaillement.

k : numéro de la couche.

E_1 : module d'Young longitudinal sens fibres

E_2 : module d'Young sens transverse

G_{12} : module de cisaillement

ν_{12} : coefficient de Poisson principal.

u_r, u_θ, u_z : déplacement dans les trois directions

Y' : résistance transversale

p_i : Charge interne

$\alpha_r : \alpha_\theta : \alpha_z : \chi$: coefficient d'expansion thermique

$\beta_r : \beta_\theta : \beta_z : \psi$: coefficient d'expansion hygroscopique

α_R : coordonnée adimensionnelle du rayon

C_v : coefficient de variation

G(z) : fonction de défaillance

Ds : domaine de sécurité

D_f : domaine de défaillance

$G(z)$: la fonction d'état limite

$E(G(z))$: l'espérance mathématique de $G(z)$

$D(G(z))$: son écart-type.

$T_i(z_j)$: représente toute transformation probabiliste appropriée

$G(z_i)$: la marge de sécurité ou fonction qui définit la marge de sûreté de la structure

$R(z_i)$: la résistance

$S(z_i)$: la sollicitation.

$f_{z_1, z_2, \dots, z_n}(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$: densité conjointe de probabilité du vecteur aléatoire z

n : nombre de variables aléatoires Z_i

N : nombre de tirages de variables de base

N_{def} : nombre de tirages conduisant à la défaillance du système

Z_i : variables aléatoires

z_i : variables aléatoires de base,

P_f : probabilité de défaillance

$\text{Pr} [.]$: opérateur de probabilité.

β : indice de fiabilité

$I(.)$: indicateur de défaillance

v_{MC} : variance de l'estimation



Université d'Oran 2
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Département de **Maintenance en électromécanique**

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master
Spécialité : Electromécanique industrielle.
Thème

Analyse probabiliste du comportement hygro-thermomécaniques d'un pipeline en composite

Présenté et soutenu par :

Nom : LARBI Prénom : Fahem
Nom : BEN MIA Prénom : Rachida

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
LALAOUI Mohamed	MAA	IMSIUNIV ORAN 2	Président
BOUHAFS Mohamed	MCB	IMSI UNIV ORAN 2	Encadreur
ACHACHE Habib	MCA	IMSI UNIV ORAN 2	Examinateur
MEGHDIR Abed	MCB	IMSI UNIV ORAN 2	Examinateur

Résumé

L'emploi des pipelines en composite est très recommandé, en respectant bien sûr les paramètres géométriques, les conditions de service et la nature du matériau dans le présent travail on s'intéresse 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, entre le modèle mathématique et la simulation avec la méthode Monte-Carlo 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 10^5 simulations. Les résultats obtenus montrent que la probabilité de défaillance augmente d'une manière significative quand des conditions sévères sont présentes et quand toutes les variables aléatoires sont considérées en même temps

abstract

The use of composite pipelines is highly recommended, of course respecting the geometric parameters, service conditions and the nature of the material. In this work, we are interested in the reliability study based on the Monte Carlo method, in order to evaluate the sensitivity of a design tool for composite tubular structures to geometric and mechanical uncertainties. The approach consists first of taking a random sample of the input variables, then performing a numerical analysis using an established coupling, between the mathematical model and the simulation with the Monte-Carlo method and finally the characterization of the statistical properties of the mechanical response. The basic idea is to make random draws for the input parameters, then to calculate the mechanical response in circumferential stress for each draw. Finally, the probabilistic response is calculated using Monte Carlo simulations. To ensure high accuracy of the results obtained, we performed 10^5 simulations. The results obtained show that the probability of failure increases significantly when severe conditions are present and when all the random variables are considered at the same time.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre 1 : Procéder d'élaboration des pipelines en composites

1.1 Introduction :	1
1.2 La microstructure des composites :	1
1.3 Structure des matériaux composites :	2
1.3.1 Monocouche :	2
1.3.2 Stratifiée :	2
1.3.3 Sandwichs :	3
1.4 Procède de fabrication des pipelines en composites :	3
1.4.1 L'enroulement filamentaire :	4
1.4.1.1 Enroulement hélicoïdal :	4
1.4.1.1.1 Enroulement discontinu :	4
1.4.1.1.2 Enroulement continu :	5
1.4.1.2 Enroulement circonférentiel :	6
1.4.1.3 Enroulement Polaire :	6
1.4.2 Moulage par centrifugation :	7
1.4.3 Moulage par pultrusion :	7
1.5 Les défauts de fabrication :	8
1.5.1 Les ruptures liées à ces défauts :	8
1.5.1.1 La rupture translaminaire :	8
1.5.1.2 La rupture intra-laminaire :	9
1.5.1.3 La rupture inter-laminaire :	9
1.6 Le vieillissement :	9
1.7 Le phénomène de perlage :	10
1.8 Domaine d'application des pipelines en composites :	11
1.9 les avantage et inconvenant de l'utilisation des pipelines en composites :	11
1.10 conclusion :	12

chapitre 2: Comportement Hygrothermique des Pipelines en Composites

2.1 Introduction :	13
2.2 Comportement mécanique :	13

2.2.1	Modèle analytique :.....	14
2.2.2	Validation :.....	17
2.2.2.1	Effet des angles d'orientation :.....	19
2.2.2.2	Effet de l'épaisseur du pipe :.....	20
2.3	Comportement hygro-thermomecanique :	21
2.3.1	Modèle analytique :.....	21
2.3.2	Validation :.....	24
2.3.2.1	Effet de la température :.....	25
2.3.2.2	Effet de la concentration d'humidité :	26
2.3.2.3	Effet Hygro-thermomécanique sur le tube stratifié :.....	27
2.4	Conclusion :.....	28

Chapitre 3 : l'analyse Probabiliste et Résultats

3.1	Introduction	29
3.2	Méthode de simulation directe (Monte Carlo) :	29
3.3	Analyse probabiliste	30
3.4	Distribution probabiliste de la contrainte circonférentielle :.....	32
3.5	Influence de l'humidité et la température sur la distribution des contraintes :	37
3.6	Influence de l'épaisseur sur la distribution des contraintes circonférentielles :.....	38
3.7	Effets de la séquence d'empilement :.....	39
3.8	Conclusion.....	41
	Conclusion générale.....	42

Références bibliographiques