



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Construction Mécanique**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**ABDELKARIM LAIADHI**

Le : dimanche 26 juin 2022

## **Etude et conception des réservoirs à hydrogène en matériaux composites**

---

### **Jury :**

M.	Tarek DJOUDI	MCA	Université de Biskra	Président
Dr	Mabrouk HECINI	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr	Hocine DJEMAI	MCB	Université de Biskra	Examineur

# **Remerciements**

*NOUS REMERCIONS DIEU TOUT-PUISSANT QUI M'A DONNÉ LE COURAGE, LA FORCE ET LA VOLONTÉ DE FAIRE CET HUMBLE TRAVAIL.*

*MES SINCÈRES REMERCIEMENTS VONT AUX ENCADRANTS DU **PROFESSEUR: MABROUK HECINI**, POUR SA COMPRÉHENSION, SES CONSEILS ET SON AIDE. SA GENTILLESSE ET SES CONSEILS EFFICACES.*

*NOUS REMERCIONS **DR : DJOUDI TAREK** ET **DR : DJEMAI HOCINE** POUR LEURS CONSEILS. LEUR PRÉSENCE REHAUSSERA CERTAINEMENT LE TRAVAIL QUE VOUS AVEZ FAIT.*

*J'EXPRIME ÉGALEMENT MA PROFONDE GRATITUDE À TOUS LES PROFESSEURS DE L'UNIVERSITÉ, EN PARTICULIER LES PROFESSEURS DU DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE. VOTRE ÉDUCATION EST PAYANTE.*

*ENFIN, JE TIENS À REMERCIER TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE LOIN À LA RÉUSSITE DE CE TRAVAIL.*

*MERCI À TOUS*

❖ **ABDE LKARIM LAIADHI**

# *Dédicaces*

Je dédie cet humble travail à ceux qui me sont chers, mon père, ma mère, mes frères et sœurs HICHAM et SAMIR mes filles, Et à ma chérie LAMAI, comme je tiens à remercier mon estimé professeur MABROUK HECINI.

Aussi, je voudrais dédier ceci à mes amis OTHMANE, RACHID, ABDO, ABDELMAJIDE, OUSSAMA et NADIR.

Merci à tous et que Dieu vous bénisse et vous garde, si Dieu le veut.





# *Sommaire*

# Sommaire

Liste des figures.....	II
Liste des tableaux.....	III
Nomenclature.....	IV
Introduction générale .....	1

## **CHAPITRE I : Généralité sur hydrogène gazeux**

Introduction .....	4
I.1 L'hydrogène gazeux .....	5
I.2 La Production d'hydrogène .....	5
I.3 Intérêt énergétique .....	6
I.4 Stockage d'hydrogène .....	6
I.4.1 Stockage gazeux .....	6
I.4.2 Stockage liquide .....	7
I.4.3 Stockage Solid.....	7
I.5 Stockage et transport de l'hydrogène.....	8
I.6 Stockage du l'hydrogène comprimé .....	8
I.6.1 réservoirs sous pression.....	8
I.6.1.1 Les réservoirs de « type I ».....	9
I.6.1.2 Les réservoirs de « type II ».....	9
I.6.1.3 Les réservoirs de « type III ».....	9
I.6.1.4 Les réservoirs de « type IV ».....	10

## **CHAPITRE II : Généralité sur les Matériaux Composites**

Introduction .....	13
II.1 Définition.....	13
II.2 Classification des matériaux composites.....	14
II.3 Composants .....	14
II.3.1 Renforts.....	15
II.3.1.1 Différents types de renfort.....	16

II.3.1.1.1 Fibres de verre.....	16
II.3.1.1.2 Fibres de carbone.....	16
II.3.1.1.3 Fibres aramides.....	18
II.3.1.1.4 Fibres céramiques.....	18
II.3.1.1.5 Fibre Naturelle.....	18
II.3.1.2 Caractéristiques mécaniques des fibres.....	19
II.3.2 La matrice.....	19
II.3.2.1 Résines thermodurcissables.....	20
II.3.2.2 Résines thermoplastiques.....	20
II.3.2.3 Les matrices naturelles.....	21
II.3.2.4 Résines époxydes.....	21
II.3.2.5 Les résines thermostables.....	21
II.3.3 Les charge.....	21
II.3.4 Les additifs.....	22
II.3.5 L'interface.....	22
II.4 Stratifiés.....	22
II.5 Sandwichs.....	23
II.6 Procédé de moulage par enroulement filamentaire.....	24
II.7 Comportement mécanique de la monocouche.....	26
II.7.1 Loi de comportement.....	26
II.7.2 Loi de mélange.....	28
II.7.3 Expression des relations d'élasticité hors axes principaux.....	29

## **CHAPITRE III : Analyse du réservoir de Type IV**

Introduction.....	32
III-1 structure des réservoirs de type IV .....	32
III.1.1 Architecture d'un réservoir type IV.....	32
III.1.1.1 L'enveloppe étanche (ou liner).....	32
III.1.1.2 La structure résistante.....	33
III.1.1.3.La protection externe.....	33
III.2 Fabrication du Réservoir type IV par enroulement filamentaire.....	33
III.3 Contrôle de réservoir fabriqué.....	34
III-4 Modèle d'enroulement filamentaire (netting theory).....	35

III.4.1 Conception de la dôme.....	38
------------------------------------	----

## **CHAPITRE IV : Programmation et Application**

Introduction.....	41
IV .1 Détermination des paramètres du réservoir (MATLAB).....	41
IV.1.1 Paramètres d’entrée.....	41
IV.1.2 Paramètres de sortie.....	41
IV.1.3 Organigramme.....	41
IV .2 Modélisation de la géométrie du réservoir (SOLIWORKS).....	43
IV .3 Simulation par la méthode des éléments finis (ANSYS).....	43
IV.4 Application.....	43
IV.4.1 Donnée.....	43
IV.4.2 Résultats.....	44
IV.4.2.1 Paramètres du réservoir (MATLAB).....	44
IV.4.2.2 Modèle géométrique (SOLIDWORKS).....	46
IV.4.2.3 Modèle par la méthode des éléments finis (ANSYS)	46
IV.4.2.3.1 Maillage.....	46
IV.4.2.3.2 Matériaux.....	47
IV.4.2.3.3 condition aux limites .....	47
IV.4.2.3.4 charge.....	47
IV.4.2.3.5 Nombre de couche.....	47
IV.4.2.3.6 Les graphes de ANSYS.....	48
Conclusion générale .....	50
Références Bibliographiques.....	52



# Liste des Figures

## CHAPITRE I : Généralités sur l'hydrogène gazeux

<b>Figure(I.1)</b> : la pollution.....	4
<b>Figure(I.2)</b> : hydrogène gazeux.....	5
<b>Figure(I.3)</b> : Les différents modes de production de l'hydrogène.....	6
<b>Figure(I.4)</b> : Station-service cryogénique.....	7
<b>Figure (I.5)</b> : Ariane 5, étage cryogénique.....	7
<b>Figure(I.6)</b> : Développement du stockage solide depuis 50 ans.....	7
<b>Figure (I.7)</b> : stockage hydrogène.....	8
<b>Figure(I.8)</b> : réservoirs type I.....	9
<b>Figure(I.9)</b> : réservoirs type II.....	9
<b>Figure(I.10)</b> : réservoirs type III.....	9
<b>Figure(I.11)</b> : réservoirs type IV.....	10
<b>Figure (I.12)</b> : Présentation des types de réservoir de stockage d'hydrogène.....	10

comprimé

## CHAPITRE II : Généralités sur Matériaux Composites

<b>Figure (II.1)</b> : Matériau composite.....	13
<b>Figure (II.2)</b> : Différents constituants d'un matériau composite.....	15
<b>Figure (II.3)</b> : Différentes familles du renfort.....	15
<b>Figure (II.4)</b> : Différentes de fibres de verre.....	16
<b>Figure (II.5)</b> : Exemples de fibres de carbone.....	17
<b>Figure (II.6)</b> : Exemples de fibres d'aramide.....	18
<b>Figure(II.7)</b> : Classification des matrices.....	19
<b>Figure (II.8)</b> : composite stratifié.....	23
<b>Figure(II.9)</b> : Composite sandwichs.....	23

<b>Figure (II.10)</b> : les différents types de sandwiches.....	24
<b>Figure (II. 11)</b> : Schéma du procédé d'enroulement filamentaire.....	25
<b>Figure (II. 12)</b> : Réservoir sous pression constitué d'un tuyau d'acier horizontal.....	26
<b>Figure(II.13)</b> : Réservoir sous pression constitué.....	26
<b>Figure(II.14)</b> : Relations entre système les coordonnées cylindrique et système les... coordonnées des références du composite	29

### **CHAPITRE III : Analyse du réservoir de Type IV**

<b>Figure (III.1)</b> : Schéma des composants d'un réservoir de type IV.....	32
<b>Figure (III.2)</b> : Procédé de fabrication des réservoirs composites..... Par enroulement filamentaire....	34
<b>Figure (III.3)</b> : Différents types de dépôts de la nappe par enroulement filamentaire...	34
<b>Figure (III.4)</b> : Les Contraintes dans le réservoir .....	36
<b>Figure (III.5)</b> : Élément de couche hélicoïdal - direction axiale.....	36
<b>Figure(III.6)</b> : Élément de couche hélicoïdal direction Circonférentiel.....	37
<b>Figure(III.7)</b> : Élément de couche hélicoïdal direction axiale- direct Circonférentiel...	38
<b>Figure(III.8)</b> : Coque de révolution de la courbe isotoensoïde.....	39

### **CHAPITRE IV : Programmation et Application**

<b>Figure (IV. 1)</b> : Organigramme.....	41
<b>Figure (IV.2)</b> : Conception et dimensions du réservoir type IV.....	43
<b>Figure(IV.3)</b> : variation de l'angle d'orientation en fonction du rayon.....	43
<b>Figure(IV.4)</b> : coordonnées longitudinal en fonction du rayon de la dôme.....	43
<b>Figure(IV.5)</b> : Forme finale du réservoir type IV.....	45
<b>Figure(IV.6)</b> : maillage de réservoir type IV.....	45
<b>Figure (IV.7)</b> : orientation des fibres dans les couches.....	47

# Liste des tableaux

## Chapitre –I : Généralité sur hydrogène gazeux

### CHAPITRE II : Généralité sur Matériaux Composite

Tableau II.1 : Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone.....	17
Tableau II.2 : Propriétés mécaniques des fibres.....	19
Tableau II.3 : Caractéristiques des résines thermodurcissables.....	20
Tableau II.4 : Caractéristiques des résines thermoplastiques.....	20
Tableau II.5 : Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines.....	20
Thermoplastiques	

### CHAPITRE III : Analyse du réservoir de Type IV

### CHAPITRE IV : Programmation et Application

Tableau(IV.1) : Propriétés matérielles du composite .....	45
---	----

# Nomenclature

$r_1$  : Rayon de courbure méridien

$r_2$  : Rayon de courbure circonférentielle

$r_o$  : Rayon minimale

$r_c$  : Rayon maximale

$N_\theta$  : Charge de ligne circonférentielle

$N_\phi$  : Charge de la ligne méridienne

$\sigma_f$  : Résistance à la traction longitudinale du composite

$\sigma_1$  : Contrainte principale maximale

$\sigma_{max}$  : Contrainte équivalente maximale

$t$  : Épaisseur de la couche hélicoïdale sur la partie du dôme

$t_{cerceau}$  : Épaisseur de la couche de cercle sur la partie cylindrique

$t_{hélicoïdal}$  : Épaisseur de la couche hélicoïdale sur la partie du dôme

$\alpha$  : Angle laminé de couche hélicoïdale sur la partie dôme

$\alpha_c$  : Angle laminé de couche hélicoïdale sur le cylindre

$P$  : Pression inter

## الملخص

يعتبر غاز الهيدروجين بديلاً جيداً للوقود الأحفوري. الغاز الغازي هو الخيار الأفضل، لأنه يمكن تخزينه في أربعة أنواع من خزانات الضغط، وخاصة النوع الرابع من الخزانات (موضوع دراستنا) بفضل الأداء الفني والقدرة التنافسية من حيث التكلفة وتطويره في هذا العمل. على المواد المركبة كحل واعد. حل لتصنيع الخزانات.

الهدف من هذا العمل هو دراسة الخزان من النوع الرابع ليؤدي إلى تصميم الأجزاء المختلفة المكونة لخزان الهيدروجين في الحالة الغازية عند الضغط العالي (بطانة بوليمر، غلاف مركب، قاعدة معدنية). سيتم استخدام نظرية لف الخيوط (نظرية المعاوضة) لتحديد زوايا الاتجاه وسماكة ثنايا الطبقات. سيتم استخدام هذه البيانات التي تم الحصول عليها لمحاكاة السلوك الميكانيكي للخزان باستخدام برنامج (ANSYS).

تم تطوير برنامج على MATLAB لتحديد المسند المتعلق بأوعية الضغط، وهي زاوية اتجاه الألياف، وسمك وعدد طبقات غطاء الخزان، فضلاً عن الشكل الهندسي لقبوتين. الخزان.

تم تصميم الشكل الهندسي باستخدام البرنامج (SOLIDWORKS). النمذجة بطريقة العناصر المحدودة تتم باستخدام برنامج ANSYS.

## Résumé

*Le gaz hydrogène est considéré comme une bonne alternative aux combustibles fossiles. Gaz gazeux est la meilleure option, car elle peut être stockée dans les quatre types de réservoirs sous pression, notamment le quatrième type de réservoir (objet de notre étude) grâce à des performances techniques et une compétitivité des coûts et de le développer dans ce travail sur les matériaux composites comme une solution prometteuse. Solution pour la fabrication de réservoirs.*

*L'objectif de ce travail est l'étude de réservoir de type IV pour aboutir à la conception des différentes parties constituant le réservoir de stockage d'hydrogène à l'état gazeux à haute pression (liner polymère, coque composite, embase métallique). La théorie d'enroulement filamentaire (netting theory) sera utilisée la détermination des angles d'orientation et l'épaisseur des plis de la stratification. Ces données obtenues seront utilisées pour simuler le comportement mécanique du réservoir à l'aide du programme (ANSYS).*

*Un programme sur MATLAB a été développé pour déterminer la donnée relative au réservoir sous pression, qui est l'angle de direction des fibres, l'épaisseur et le nombre de couches du couvercle du réservoir, ainsi que la géométrie forme des deux dômes du réservoir.*

*La géométrie a été modélisée avec SOLIDWORKS. La modélisation par la méthode des éléments finis est opérée en utilisant le logiciel ANSYS.*

## Abstract

*Hydrogen gas is considered a good alternative to fossil fuels. Gaseous gas is the best option, because it can be stored in the four types of pressure tanks, especially the fourth type of tank (object of our study) thanks to technical performance and cost competitiveness and to develop it in this work. On composite materials as a promising solution. Solution for the manufacture of tanks.*

*The objective of this work is the study of type IV tank to lead to the design of the different parts constituting the hydrogen storage tank in the gaseous state at high pressure (polymer liner, composite shell, metal base). The filament winding theory (netting theory) will be used to determine the orientation angles and the thickness of the layers of the stratification. These data obtained will be used to simulate the mechanical behavior of the reservoir using the program (ANSYS).*

*A program on MATLAB has been developed to determine the datum relating to the pressure vessel, which is the angle of direction of the fibers, the thickness and the number of layers of the tank cover, as well as the shape geometry of the two domes of the tank. .*

*The geometry was modeled with SOLIDWORKS. Modeling by the finite element method is carried out using the ANSYS software.*

# *Introduction générale*

## Introduction générale

Actuellement, la menace qui pèse sur notre environnement, en raison de l'utilisation d'énergies fossiles (pétrole, gaz, carbone), devient de plus en plus pressante. Cette menace ne contribue pas seulement à épuiser les réserves naturelles mais contribue aussi à augmenter les gaz à effet de serre et les émissions polluantes. Les énergies propres, énergies qui produisent une quantité faible de polluants, sont essentiellement requises pour remplacer les systèmes énergétiques actuels. Parmi les candidats potentiels, l'hydrogène apparaît comme un vecteur énergétique particulièrement intéressant car il est à la fois inépuisable, non polluant et peut être produit à partir de l'eau. L'utilisation de l'hydrogène, moyennant des convertisseurs efficaces comme les piles à combustible (PAC) devrait donc jouer dans l'avenir un rôle important dans le cadre du développement durable. [1]

Pour que l'hydrogène puisse réellement devenir le vecteur énergétique de demain, il faut qu'il soit disponible à tous moments. Dans ce contexte mettre au point des modes de transport, de stockage et de distribution efficaces, représente un enjeu crucial. Aujourd'hui, le stockage de l'hydrogène reste la solution la plus satisfaisante dans l'attente de spécifications techniques et économiques des industriels qui soient stables. Il existe trois stratégies différentes de stockage selon l'état de l'hydrogène (solide, liquide et gazeux). Son conditionnement sous forme gazeuse reste néanmoins l'option la plus prometteuse. Le stockage sous forme de gaz comprimé à de très hautes pressions apparaît à l'heure actuelle comme la solution présentant le meilleur compromis en termes de densité massique et volumétrique. [1]

L'hydrogène peut être stocké dans les quatre types de récipients sous pression. Le choix du stockage se fait en fonction de l'application finale qui nécessite un compromis entre performances techniques et compétitivité coût. L'H<sub>2</sub> en tant que gaz industriel est stocké dans des réservoirs de type I, dont la pression est de 150 à 300 bars (généralement 200 bars). Ce sont les réservoirs à haute pression les plus répandus aujourd'hui et les moins chers. Lorsque seules des pressions plus élevées sont requises - principalement pour des applications stationnaires - les réservoirs de type II sont préférés. Les cuves de type III et de type IV sont destinées à des applications portables, pour lesquelles le gain de poids est essentiel. Cependant, ces réservoirs sont beaucoup plus chers. [2].

Donc, les quatre types de réservoir de stockage d'hydrogène sont :

- Type I : Récipient sous pression en métal.

- Type II : Récipient sous pression constitué d'un cerceau de revêtement métallique épais enveloppé d'un composite fibre-résine.
- Type III : Récipient sous pression constitué d'un revêtement métallique entièrement enveloppé d'un composite fibre-résine.
- type IV Récipient sous pression constitué d'un revêtement polymère entièrement enveloppé d'un composite fibre-résine Le port est métallique et intégré dans la structure (boss).

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs. Les matériaux composites stratifiés se présentent actuellement comme une solution prometteuse pour la fabrication des réservoirs et des tubes répondant aux exigences environnementales et à la contrainte du poids. Le type IV de réservoir à une structure en matériaux composites. Ces structures de renforcement constitué de fibres (verre, aramide, carbone) et d'une résine (thermodurcissable ou thermoplastique) [3].

L'objectif de ce travail est l'étude de réservoir de type IV pour aboutir à la conception des différentes parties constituants le réservoir de stockage d'hydrogène à l'état gazeux à haute pression (liner polymère, coque composite, embase métallique). La théorie d'enroulement filamentaire (netting theory) sera utilisée la détermination des angles d'orientation et l'épaisseur des plis de la stratification. Ces données obtenues seront utilisées pour simuler le comportement mécanique du réservoir à l'aide du programme (ANSYS).

Après la présente introduction générale, le mémoire est structure de la manière suivante :

- **Le premier chapitre** : Où nous abordons dans ce chapitre l'étude de l'hydrogène gazeux à travers la définition, son intérêt énergétique, les solutions nécessaires de production et comment le stocker et le transporter.
- **Le deuxième chapitre** : Dans ce chapitre, nous abordons les généralités des matériaux composites, à travers la définition des matériaux composites, leurs composants, et leur ingénierie (structure).
- **Le troisième chapitre** : Dans ce chapitre, nous présentons les détails de la modélisation du comportement mécanique de la structure du réservoir. Les logiciels utilisés dans notre étude seront aussi présentés dans ce chapitre, en expliquant le travail de ces logiciels et de la simulation.
- **Le quatrième chapitre** : Les modélisations et simulations du réservoir type 4 en utilisant les logiciels MATLAB, SOLIDWORKS et ANSYS et extraire les résultats.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.



# **CHAPITRE I**

## ***Généralité sur l'hydrogène gazeux***

# **CHABITRE I**

## **Généralité sur l'hydrogène gazeux**

### **Introduction**

Confronté à l'augmentation des besoins énergétiques mondiaux (doublement des besoins d'ici à 2050), à la raréfaction des ressources fossiles et à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre issues de l'utilisation de ces ressources, il convient de développer et diversifier nos ressources en énergie. Partant de ce constat, on assiste depuis quelques années à la montée en puissance d'énergies et de ressources dites alternatives. Bien sûr, toutes ces ressources et les technologies qui y sont associées, n'en sont pas toutes au même stade de maturité : certaines n'en sont qu'au stade de recherche alors que d'autres en sont au stade de développement, de diffusion voire même au stade d'industrialisation à grande échelle.

On peut citer à ce titre :

- les ressources actuelles et à court terme : éolien, solaire, biomasse, stockage électrique. . .
- les ressources à moyen terme (20 ans) : hydrogène notamment ;
- les ressources à long terme (50 ans) : fusion nucléaire



Figure(I.1) : la pollution [4]

## I.1 L'hydrogène gazeux

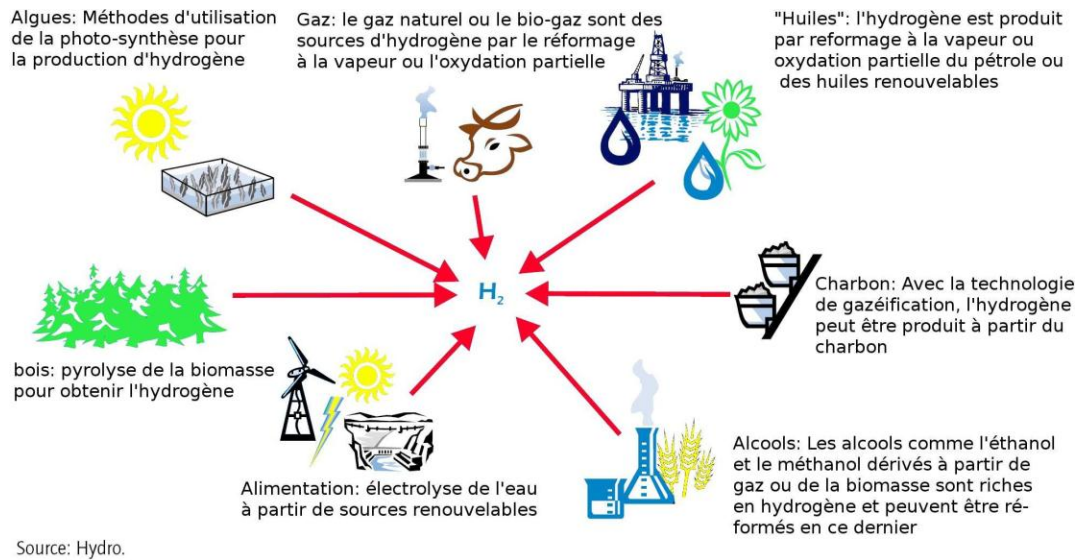
- ❖ Le **dihydrogène** est la forme moléculaire de l'élément hydrogène qui existe à l'état gazeux aux conditions normales de température et de pression. La molécule comporte deux atomes d'hydrogène ; sa formule chimique est  $H_2$ . Le dihydrogène est également appelé « hydrogène moléculaire. » ou, à l'état gazeux, « gaz (d') hydrogène. »
- ❖ Les ressources principales permettant de produire le dihydrogène  $H_2$  (que l'on appelle hydrogène par abus de langage) **sont l'eau et les hydrocarbures** (le charbon, le pétrole et le gaz).
- ❖ Comme l'électricité, le dihydrogène  $H_2$  (hydrogène) est principalement **un vecteur énergétique** et non une énergie en tant que telle, car il est produit au moyen d'une réaction chimique à partir d'une ressource primaire.



Figure(I.2) : hydrogène gazeux [5]

## I.2 Production d'hydrogène

L'hydrogène est aujourd'hui principalement produit par reformage des énergies fossiles. Dans le but de développer l'hydrogène en tant qu'énergie propre d'autres modes de production industrielle doivent être développés. Nous présentons différents modes de production de l'hydrogène. Regroupons ces méthodes en plusieurs catégories [6] :



Figure(I.3) : Les différents modes de production de l'hydrogène [7]

### I.3 Intérêt énergétique

La molécule d'hydrogène utilisée le plus couramment a l'avantage d'être particulièrement énergétique: 1 kg d'hydrogène libère environ 3 fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence (soit 120 MJ/kg contre 45 MJ/kg pour l'essence). cependant, comme l'hydrogène est le plus léger des éléments, il occupe à poids égal, beaucoup plus de volume qu'un autre gaz. Ainsi, pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence, il faut 4.6 litres d'hydrogène comprimé à 700 bar (la pression optimisée en termes de masse par volume pour l'hydrogène comprimé). Pour un transport plus facile et plus efficace, l'hydrogène est stocké dans des réservoirs ou bouteilles en matériaux. [1]

### I.4 Stockage d'hydrogène

#### I.4.1 Stockage gazeux

La voie gazeuse est la plus simple et la plus répandue des technologies de stockage. L'hydrogène est contenu dans des réservoirs sous pression. Plus la pression est élevée, plus la quantité d'hydrogène stocké est grande. Les réservoirs actuellement développés fonctionnent avec des pressions maximales aux alentours de 300-350 bar (30-35 MPa) voir 480 bar. Le travail actuel consiste à créer des réservoirs gazeux sous 700 bar afin d'améliorer la capacité volumique, principal défaut de cette technologie. [8/9]

### I.4.2 Stockage liquide

Pour stocker l'hydrogène à l'état liquide, on le refroidit jusqu'à 20 °K (-253 °C). La technologie est maîtrisée, notamment pour des applications spatiales ou de stockage stationnaire (hôpitaux, station-service). La capacité volumique est certes importante mais la très faible température reste le problème majeur de cette technologie. De plus, l'énergie de liquéfaction est élevée.



Figure(I.4) : Station-service cryogénique

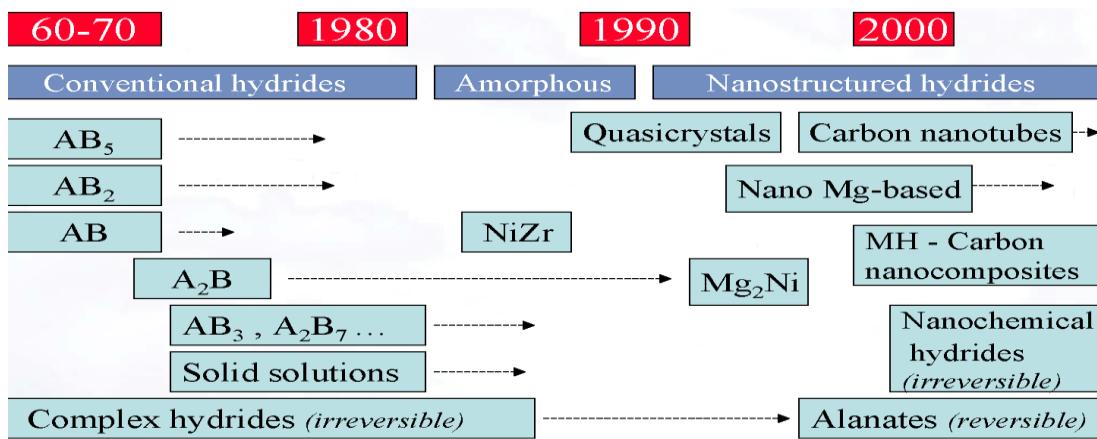


Figure (I.5) : Ariane 5, étage cryogénique [10]

### I.4.3 Stockage Solide

Depuis les études sur le stockage solide de l'hydrogène dans le palladium, diverses familles de matériaux ont requis l'attention des scientifiques pour trouver le support le plus adapté au stockage d'hydrogène

Le stockage solide semble être la voie la plus prometteuse pour l'avenir. Les capacités volumiques sont très intéressantes puisque supérieures à celles du stockage liquide. Certaines formes.



Figure(I.6) : Développement du stockage solide depuis 50 ans [11]

## I.5 Stockage et transport de l'hydrogène

L'hydrogène est difficile à stocker et à transporter, en raison de sa faible densité énergétique par unité de volume. Le transport s'effectue généralement en bouteilles ou en pipelines sous forme comprimée : le gaz peut être comprimé de quelques dizaines de bars à 350 ou 700 bars pour être acheminé. D'autre part, il est possible de liquéfier l'hydrogène à  $-253^{\circ}\text{C}$  mais cette transformation est très énergivore. Notons également la possibilité de transporter l'hydrogène sous forme d'hydruure métallique (la réaction d'hydratation est en effet réversible).

Le réseau de gaz naturel peut aussi contenir de l'hydrogène jusqu'à 20% en volume mais cela nécessite de le purifier en aval du réseau. Notons qu'il faut dix fois plus d'espace pour stocker de l'hydrogène gazeux par rapport à l'essence.



Figure (I.7) : stockage hydrogène [12]

## I.6 Stockage du l'hydrogène comprimé

### I.6.1 réservoirs sous pression

L'hydrogène a été stocké et distribué sous pression il y a plusieurs années, avec des bouteilles ou assemblages de bouteilles cylindriques, en acier, gonflées à 20 ou 25 MPa (types I et II). L'inconvénient le poids qui résulte de l'utilisation d'aciers à bas niveaux de contraintes pour éviter les problèmes de fragilisation par l'hydrogène. La situation a radicalement changé avec l'apparition de la technologie des réservoirs composites dits de type III ou IV. Leur principe de base est de séparer les deux fonctions essentielles que sont

L'étanchéité et la tenue mécanique pour les gérer l'une indépendamment de l'autre. Dans ce type de réservoir on associe une vessie en résine (thermodurcissable ou thermoplastique) à une structure de renforcement constituée de fibres (verre, aramide, carbone) permettent de travailler à des pressions beaucoup plus élevées tout en réduisant la masse et en évitant les risques de rupture explosive en cas d'agressions externes sévères. C'est ainsi que 70 MPa est pratiquement devenu le standard actuel. Du fait des lois de compressibilité, cette valeur semble être une limite, même si des réservoirs de pression nominale égale ou supérieure à 100 MPa ont été réalisés à titre expérimental. [13]

Les réservoirs de stockage gazeux hyperbare peuvent être classés en quatre catégories selon leurs matériaux constitutifs mineurs

#### I.6.1.1 Les réservoirs de « type I »

Il sont entièrement métalliques. Ces réservoirs présentent l'inconvénient d'avoir une masse importante et ainsi des densités de stockage faibles (de l'ordre de 1.2%). Par ailleurs les pressions maxima de stockage sont limitées à 300 bar [1].

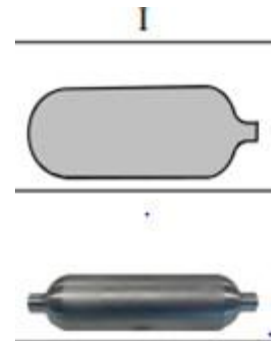


Figure (I.8) : réservoirs type I

#### I.6.1.2 Les réservoirs de « type II »

Il sont métalliques avec un frettage en partie cylindrique. Ces réservoirs présentent néanmoins les mêmes inconvénients que ceux de type I. En dépit d'une densité de stockage supérieure (1.4%) grâce à une diminution de masse, l'augmentation de

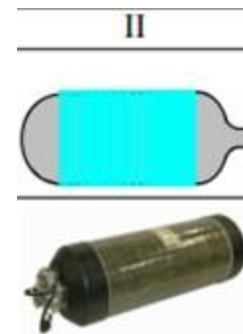


Figure (I.9) : réservoirs type II

#### I.6.1.3 Les réservoirs de « type III »

Il sont en matériaux composites avec un liner (revêtement interne) métallique. Cette combinaison permet d'atteindre des pressions plus élevées (jusqu'à 700 bar). Les principaux inconvénients se situent au niveau de la résistance à la fatigue qui reste encore faible tandis que la masse de l'ensemble demeure encore élevée. [1]

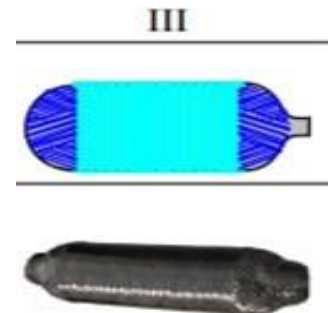


Figure (I.10) : réservoirs type III



### I.6.1.4 Les réservoirs de « type IV »

Il s'agit de réservoirs en composites (principalement en fibres de carbone) avec un liner en polymère (thermoplastique ou thermodurcissable). Dans ce cas, le liner ne supporte pas la charge, il assure seulement l'étanchéité à l'hydrogène. Les propriétés particulières des polymères permettent d'allonger considérablement la durée de vie en fatigue du réservoir et leur faible densité permet de diminuer la masse totale de l'ensemble. Cette combinaison permet d'atteindre des niveaux de pression élevés comparables à ceux des réservoirs de type III (700 bar). Le stockage de l'hydrogène de type IV est à l'heure actuelle la technologie la plus avancée. [1]



Figure (I.11) : réservoirs bobinés type IV

Pour chaque type de réservoir, le choix de l'enveloppe (liner) en contact avec l'hydrogène est de première importance. Dans le cas du Type I, les contraintes mécaniques sont directement reprises par le liner ; un matériau à grande limite élastique sera donc privilégié (Acier). En revanche, dans le cas des réservoirs de type III et IV, le liner sert de barrière à l'hydrogène. Un matériau peu perméable à l'hydrogène sera alors préféré (Aluminium dans le cas de type III).

Largeur des fibres, motifs, angles d'enroulement et nombre de passes font partie des critères à optimiser pour l'enroulement filamentaire. [14]

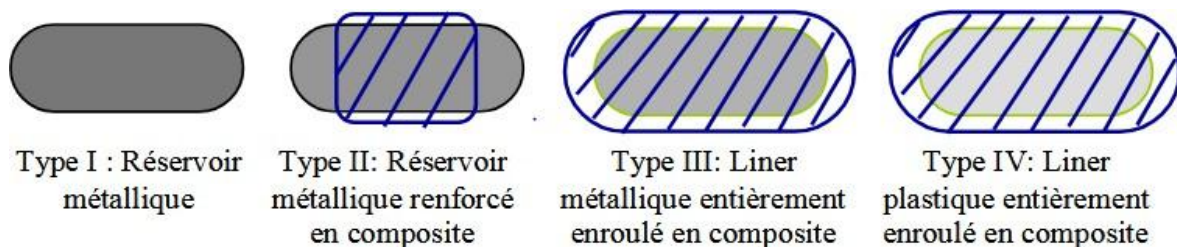


Figure (I.12) : Présentation des types de réservoir de stockage d'hydrogène comprimé



Les réservoirs dans le cadre de cette étude se limitent aux réservoirs de type IV constitué, d'une part d'un liner en polymère assurant la fonction d'étanchéité et d'autre part, d'un matériau composite assurant la fonction structuration à la pression interne

**CHAPITRE II**  
***Généralités sur***  
***Matériaux***  
***Composites***

## CHAPITRE II

### Généralités sur Matériaux Composites

#### Introduction

Pour l'utilisation intensive de matériaux composites, nous présentons dans ce chapitre ces matériaux ainsi que leurs caractéristiques générales et leurs composants. Ensuite, seront exposés les avantages et les inconvénients des matériaux composites et les matériaux composites structuraux, suivi par les procédé de fabrication des composites.

#### II.1 Définition

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue appelée matrice. [15]

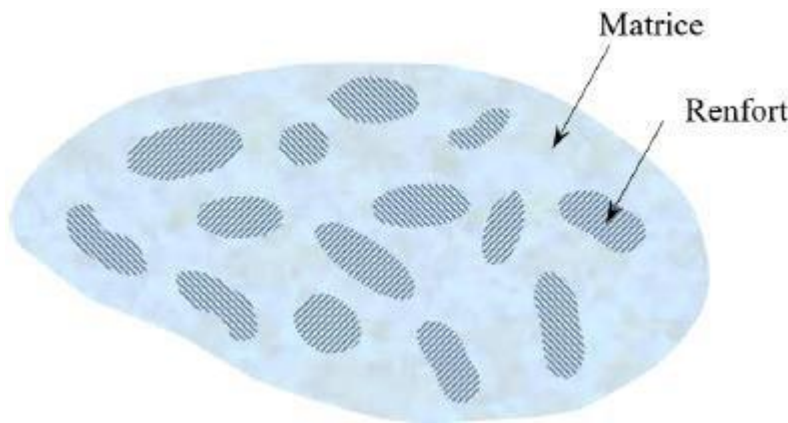


Figure (II.1) : Matériau composite [16]

## II.2 Classification des matériaux composites

Selon la nature de la matrice, on distingue trois grandes classes de composites, considérées ici par ordre croissant de tenue en température :

- ✓ Les composites à matrice polymère (CMP)
- ✓ Les composites à matrice métallique (CMM)
- ✓ Les composites à matrice céramique (CMC)

Les matériaux utilisés comme renforts présentent de bonnes propriétés mécaniques intrinsèques (carbone, alumine, silice, bore, kevlar, acier, nitrure et carbure de silicium...). Les renforts continus ou fibres longues procèdent d'un diamètre qui varie selon leur nature, entre quelques micromètres et une centaine de micromètres.

Selon l'application envisagée, l'assemblage de ces fibres longues peut être unidimensionnel (plis unidirectionnels), bidimensionnel (plis tissés, mats à fibres coupées de quelques centimètres ou à fibres continues) ou tridimensionnel (tissus multidimensionnels).

Les matrices polymères renforcées par des fibres de verre, sont employées dans les produits de grande diffusion, et possèdent une grande importance. Les fibres de carbone et de kevlar sont utilisées dans des applications plus spécifiques de hautes performances telles que l'aéronautique et l'aérospatiale. D'autres types de renforts sont employés tels que des billes (verre, élastomère ...) et des charges (fibres broyées, écailles, poudres...). L'utilisation des (CMP) reste limitée au domaine de températures inférieures à 200°C, [17].

## II.3 Composants des matériaux composites

Les principaux constituants sont le renfort et la matrice. Le renfort a pour rôle d'apporter au matériau composite ses performances mécaniques élevées. La matrice qu'on appelle aussi liant, son rôle est de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures. [18]

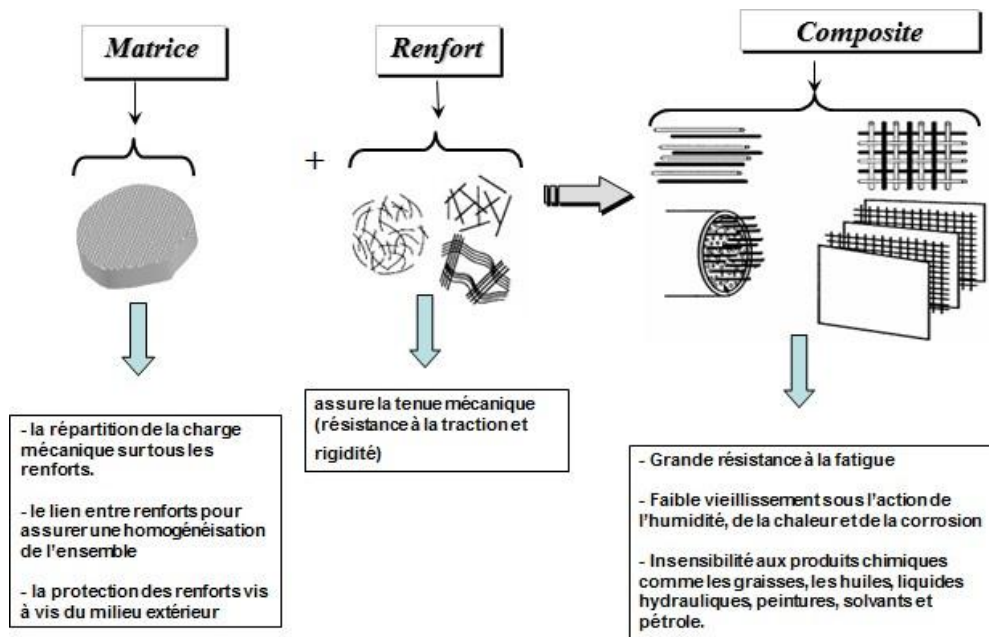


Figure (II.2) : Différents constituants d'un matériau composite. [19]

### II.3.1 Renforts

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques) [20].

Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus). [21]

- Différentes natures de renfort :

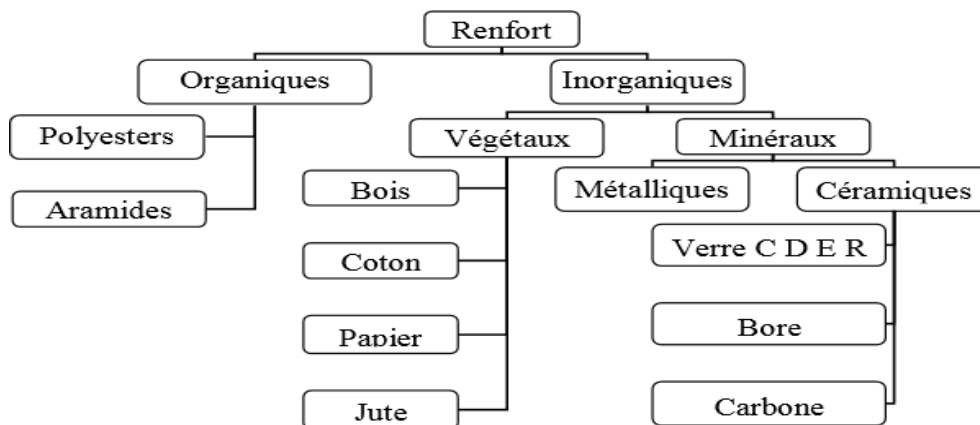


Figure (II.3) : Différentes familles du renfort

### II.3.1.1 Différents types de renfort

#### II.3.1.1.1 Fibres de verre

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. On distingue différents types de fibre :

- verre E : le plus courant, il possède de bonnes propriétés diélectriques
- verre D : il est destiné aux applications de construction ou électronique, en raison de ses propriétés diélectriques supérieures aux autres fibres de verre.
- verre C : il est très résistant chimiquement et est principalement utilisé pour les applications anticorrosion.
- verre R ou S : il est destiné pour les applications haute performance du fait de sa résistance en traction et son module d'élasticité supérieurs aux autres fibres de verre

Les fibres de verre sont fragiles et sensibles à l'abrasion. Pour cette raison, elles sont revêtues d'une résine ou ensimage qui a pour fonction de protéger les fibres mais qui favorise également l'adhésion de la matrice. [22]



Figure (II.4) : Exemples de fibres de verre

#### II.3.1.1.2 Fibres de carbone

Les fibres de carbone sont pour la plupart obtenues à partir d'une fibre précurseur de type poly acrylonitrile (PAN). Ces fibres subissent une étape d'oxydation pour faire réticuler le PAN et le rendre ainsi moins « fusible » en vue des traitements thermiques ultérieurs.

Elles sont ensuite soumises à une seconde étape, qui peut être une carbonisation à 1500°C ou à une graphitisation à 3000°C. Pendant cette étape, les fibres sont maintenues sous tension afin de conserver l'orientation de la structure moléculaire.

Dans le premier cas, on obtient des fibres haute résistances ou HR, et dans le deuxième cas, on obtient des fibres haut module ou HM (Tableau 3). Il existe également des fibres

module intermédiaire, appelée inter médiate modules ou IM. Elles peuvent ensuite passer dans un électrolyte ou subir une oxydation pour créer des groupements polaires, destinés à favoriser l'ennoyage. Il existe différents traitements de surface pour les fibres de carbone [22].

Caractéristique	Fibres HR	Fibres HM	Fibres IM
Résistance en traction (MPa)	3400-4500	2000-2500	4800
Module en traction (GPa)	230-250	390-450	296
Allongement à la rupture (%)	1.4-1.8	0.5-0.6	2
Résistance en compression(MPa)	2200-2800	1300-1700	–

Tableau (II.1) : Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone

Les fibres de carbone continues sont disponibles sous diverses formes de mèches de 3000 à 24000 filaments, de fibres coupées, de rubans ou bien encore de tissus, qu'ils soient uni ou multidirectionnels. Elles présentent des caractéristiques spécifiques élevées comme leur haut module en traction. Elles ont également un coefficient de dilatation très faible, une conductivité thermique élevée. En revanche, certains inconvénients demeurent comme leur résistance limitée aux chocs, une faible résistance à l'abrasion.

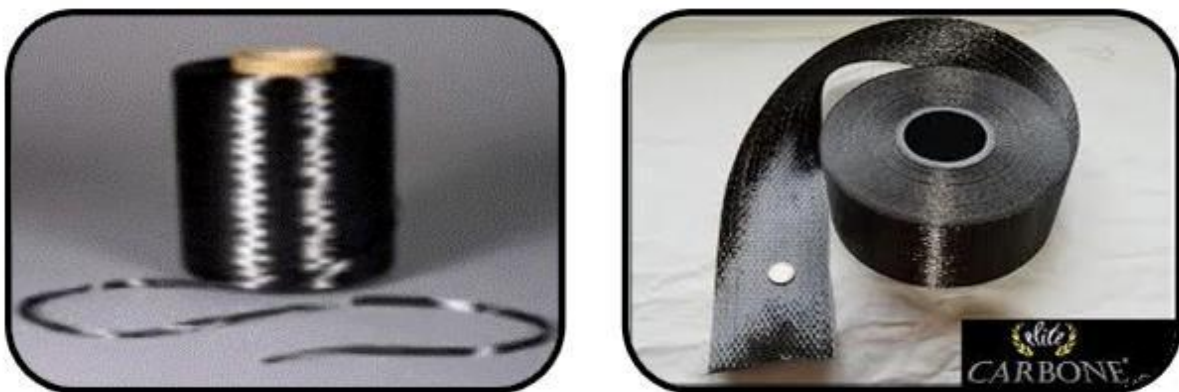


Figure (II.5) : Exemples de fibres de carbone

### II.3.1.1.3 Fibres aramides

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des ennoyages des fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à

Fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre kevlar ou carbone kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis) [21]

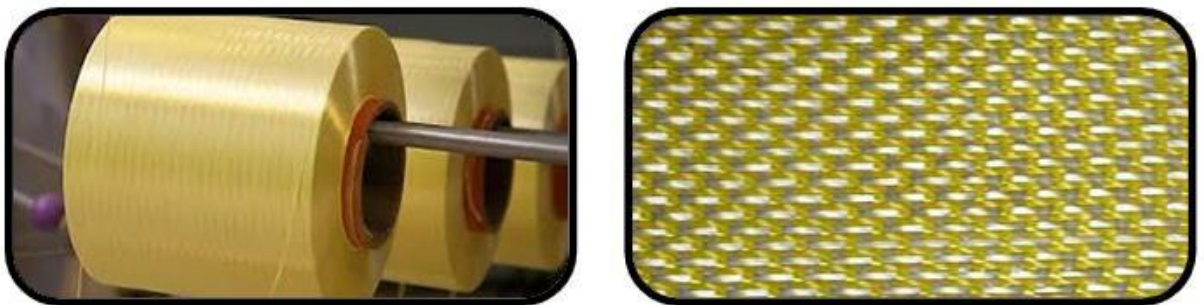


Figure (II.6) : Exemples de fibres d'aramide

### II.3.1.1.4 Fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500 et 2000 Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques :

- fibres de Carbure de Silicium
- fibres de Bore
- fibres de Bore carbure de silicium. [21]

### Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont des biomatériaux d'origine végétale ou animale, tissées, tricotées ou, tressées. Elles ont été initialement utilisées pour la production de vêtements, tissus, tapis et cordages. Actuellement, les fibres naturelles sont également utilisées dans l'industrie, dans les applications automobiles, le bâtiment ...etc. Les fibres naturelles permettent de réduire le coût et le poids des pièces et d'améliorer les perspectives de recyclage et l'impact environnemental.

Les fibres naturelles peuvent être classées en trois grands groupes selon leur origine :

- Les fibres végétales qui comprennent : des fibres provenant des poils séminaux de graines



(coton, kapok), des fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ortie), des fibres extraites de feuilles (sisal), de troncs (palmier), d'enveloppes de fruits (noix de coco).

- Les fibres animales
- Les fibres minérales

### II.3.1.2 Caractéristiques mécaniques des fibres

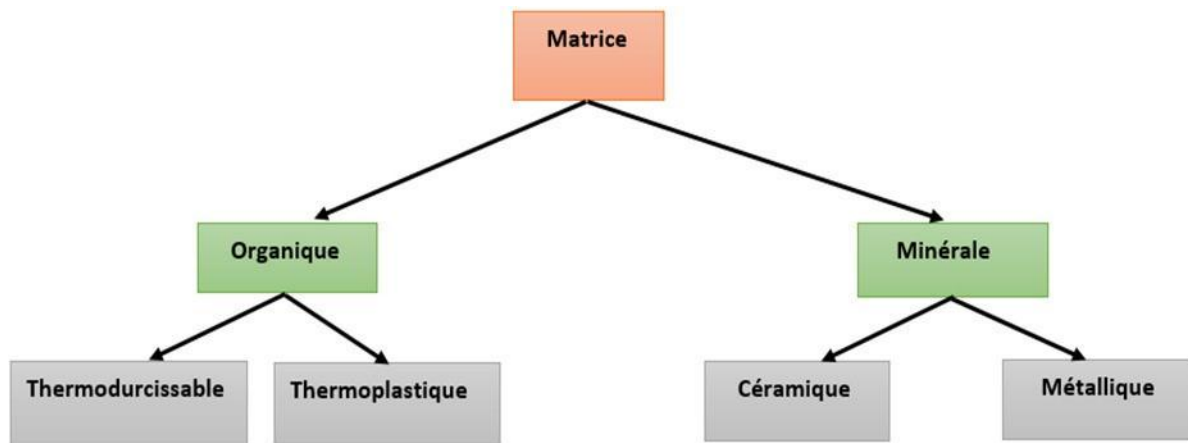
Il existe différents types de fibres. Elles peuvent être scindées en deux groupes, les fibres à haut module et les fibres à haute résistance. Les fibres à haut module ont une résistance faible et celles à forte résistance ont un module faible. [21]

fibres	densité	$\sigma_r$ (MPa) en traction	Allongement à la rupture en %	$E_L$ (MPa) Longitudinale	Diamètre du filament élémentaire $\mu\text{m}$
Verre E	2.54	3400	4.8	73000	3-30
Verre R	2.48	4400	5.4	86000	3-30
Aramide BM	1.45	3100	2	70000	12
Aramide HM	1.45	3100	1	130000	12
Kevlar	-	2900	2.3	130000	1.45
Aluminium	-	1380	0.7	380000	3.9
Carbone HT	1.78	2800	0.5	200000	8
Carbone HM	1.80	2200	-	400000	8
Bore	2.63	3500	0.8	400000	100-200

Tableau (II.2) : Propriétés mécaniques des fibres

### II.3.2 La matrice

Le rôle de la matrice est principalement de lier les fibres, mais aussi, d'assurer une répartition spatiale homogène du renfort. D'un point de vue mécanique, la matrice transmet et répartie les efforts extérieurs vers le renfort. D'un autre côté, elle apporte à la structure une tenue chimique et donne la forme désirée au produit [24], (figure II.7).



Figure(II.7) : Classification des matrices. [24]

### II.3.2.1 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu’une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturés, les résines de Condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. [21]

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau (II.3).

résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\epsilon_t^R(\%)$	$\sigma_t^R$ (MPa)	$\sigma_c^R$ (MPa)	E (GPa)
polyesters	60 à 100	1 140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
phénoliques	120	1 200	2,5	40	250	3 à 5
epoxydes	290	1 100 à 1 500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

Tableau (II.3) : Caractéristiques des résines thermodurcissables

### II.3.2.2 Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrées sont PEEK, K3B.

De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants

résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\epsilon_t^R(\%)$	$\sigma_t^R$ (MPa)	$\sigma_c^R$ (MPa)	E (GPa)
polyamide	65 à 100	1 140		60 à 85		1,2 à 2,5
polypropylène	900	1 200		20 à 35		1,1 à 1,4

ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible : ces dernières sont présentées dans le tableau (II.4). [21]

Tableau (II.4) : Caractéristiques des résines thermoplastiques.

Une comparaison entre quelques caractéristiques des résines thermodurcissables et celles des résines thermoplastiques est présentée dans le tableau :

Matrices	Thermodurcissables	Thermoplastiques
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage	Réduit	Illimité
Mouillabilité des renforts	Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage + refroidissement
Cycle	Long (polymérisation)	Court
Tenue au choc	Limitée	Assez bonne
Tenue thermique	Meilleure	Réduite (sauf nouveau TP)
Chutes et déchets	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
Conditions de travail	Emanations de solvants	Propreté

Tableau (II.5) : Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastique

### II.3.2.3 Les Matrices Naturelles

Ce sont des matériaux synthétisés par les êtres vivants, animaux et micro-organismes. La famille la plus importante est celle des polysaccharides comme l'amidon, la cellulose la lignine. [22]

### II.3.2.4 Résines époxydes

Le terme époxyde désigne une grande variété de pré polymères comportant un ou plusieurs motifs époxydiques dont les principales applications concernent les matériaux composites (matrice époxyde avec des renforts en fibre de verre ou de carbone). [22]

### II.3.2.5 Les Résines thermostables

Elles se distinguent essentiellement des autres résines par leurs performances thermiques. Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace. [22]

## II.3.3 Les charges

L'objet de la charge renforçant est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine, ou diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines. En générales ces charges sont des microbilles ou des particules (poudre). [20]

Les principales charges utilisées sont :

- microbille en (verre, carbone, époxyde, phénolique, polystyrène, etc)
- des poudres ou paillettes métalliques : (cuivre, fer, aluminium, etc )
- des particules de carbone (noir de carbone)

### II.3.4 Les additifs

Ils sont nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice et de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés. [20]

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- lubrifiants et agents de démoulage.
- pigments et colorants ;
- agents anti
- retraits ;
- agents anti
- ultraviolets ;
- accélérateur ;
- catalyseur.

### II.3.5 L'interface

En plus de ces fibres et la matrice, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort/matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine.

Des produits chimiques entre aussi dans la composition du composite, l'interphase etc... qui peut jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite. [20]

## II.4 Stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.

En jouant sur l'ordre et l'orientation de ces couches. Il est possible d'adapter finement les

propriétés mécaniques du stratifié aux sollicitations extérieures, et donc d'atteindre un haut niveau d'optimisation en mettant la matière là où elle est le plus utile

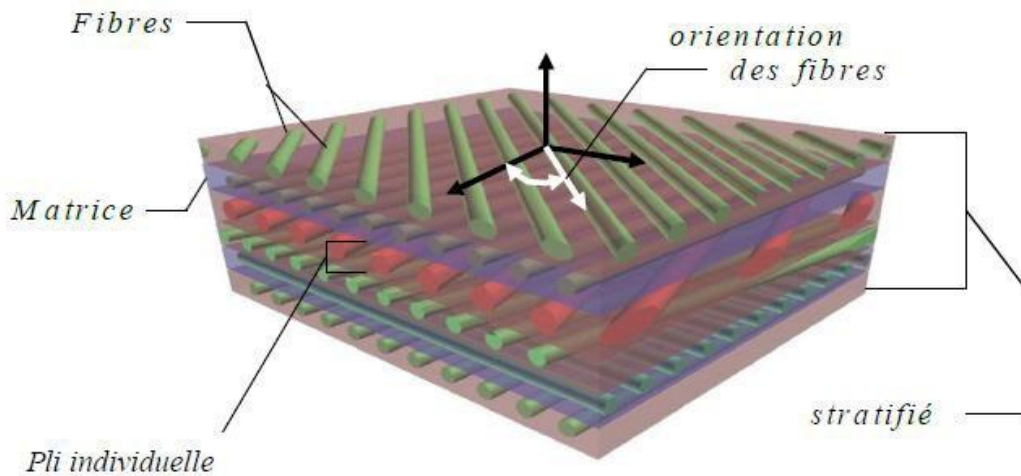


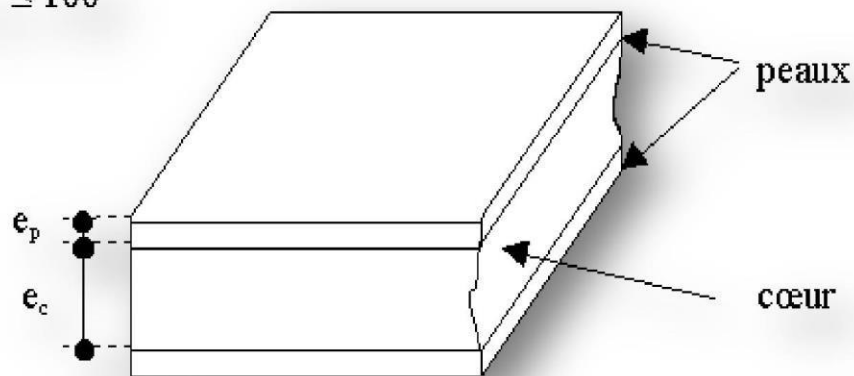
Figure (II.8) : composite stratifié. [25]

## II.5 Sandwichs

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance.

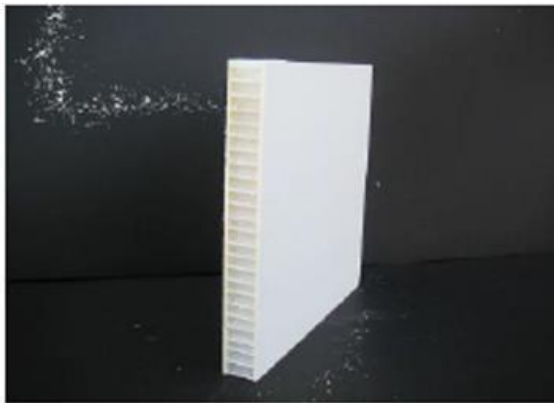
L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique.

$$10 \leq e_c / e_p \leq 100$$

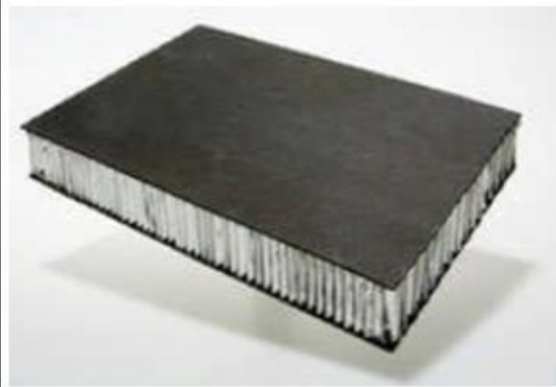


Figure(II.9) : Composite sandwichs. [26]

Différent types de sandwich : sont montre sur la figure suivante :



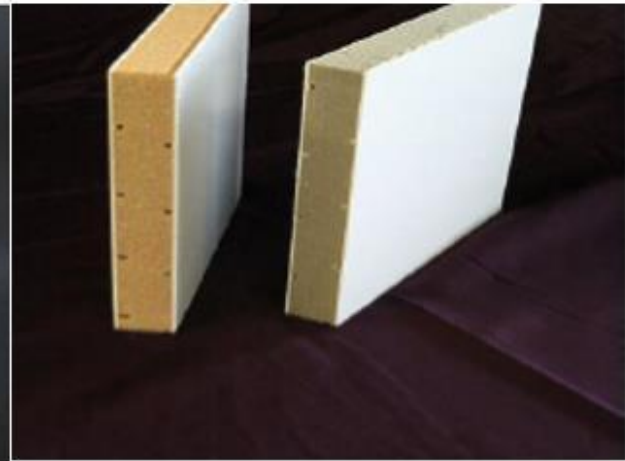
Fibre de verre nid d'abeille



Fibre de carbone nid d'abeille



Fibre de verre mousse polyuréthane



Fibre de verre mousse PVC

Figure (II.10) : les différent types de sandwich. [27]

## II.6 Procédé de moulage par enroulement filamentaire

Parmi ces procédés on site :

- Moulage au contact
- Moulage par projection simultanée
- Moulage sous vide
- Moulage par compression
- Moulage par centrifugation
- Moulage par enroulement filamentaire. [28]
- Dans notre projet on s'intéresse aux produits obtenus par le procédé d'enroulement
- Filamentaire.

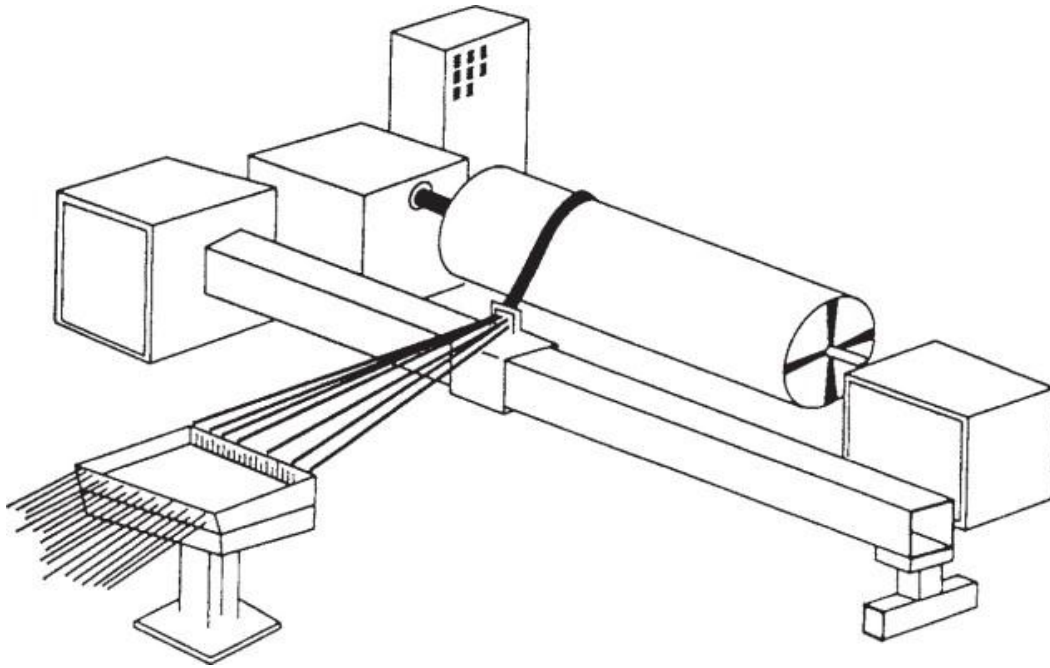


Figure (II.11) : Schéma du procédé d'enroulement filamentaire. [29]

Le fonctionnement de l'enroulement filamentaire est l'inverse du processus d'usinage conventionnel de fraisage sur un tour. Dans le fraisage, on commence avec une surface cylindrique et l'on enlève le matériau de la surface d'une bande à la fois.

Dans l'enroulement de filament, on dépose le matériau sur la surface du mandrin une bande à la fois (figure II.11.).

Les récipients sous pression sont utilisés dans une variété d'applications dans l'industrie et le secteur privé. Ils apparaissent dans ces secteurs comme des réservoirs d'air comprimé

Industriels et des réservoirs de stockage d'eau chaude sanitaire. D'autres exemples de récipients sous pression sont des bouteilles de plongée, des chambres de recompressions, des tours de distillation, des réacteurs à pression, des autoclaves et de nombreux autres navires dans les opérations minières, des raffineries de pétrole et des usines pétrochimiques, des navires de réacteurs nucléaires, des habitats de sous-marins et de vaisseaux spatiaux, des réservoirs pneumatiques, des réservoirs hydrauliques sous pression, réservoirs de frein à air pour véhicules ferroviaires, réservoirs de frein à air pour véhicules routiers et réservoirs de stockage de gaz liquéfiés tels que l'ammoniac, le chlore et le GPL (propane, butane). [30]





Figure (II. 12) : Réservoir sous pression constitué d'un tuyau d'acier horizontal. [30]



Figure(II.13) : Réservoir sous pression constitué [31]

## II.7 Comportement mécanique de la monocouche

### II.7.1 Loi de comportement

Le comportement élastique d'un matériau anisotrope est décrit en introduisant soit les constantes de rigidité  $C_{ijkl}$ , soit les constantes de souplesse  $S_{ijkl}$

La loi de Hooke s'écrit suivant l'une des formes matricielles :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{ou} \quad \varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$\sigma_{ij}$  : Tenseurs des contraintes (tenseurs d'ordre deux à neuf composantes)



$\varepsilon_{kl}$  : Tenseurs de déformations (tenseurs d'ordre deux à neuf composantes)

$C$  : Tenseurs de rigidité, c'est un tenseur constitutif d'ordre 4 qui possède 81 composantes indépendantes.

$S$  : Tenseurs de souplesse, c'est un tenseur constitutif d'ordre 4 qui possède 81 composantes indépendantes.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Ou} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \text{ avec } s = c^{-1} \quad (\text{II.3})$$

Le comportement élastique d'un matériau composite orthotrope est donc caractérisé par 9 coefficients indépendants :

Où  $C$  est la matrice constitutive élastique du matériau dont les coefficients sont donnés par :

$$\begin{aligned} C_{11} &= E_1 \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{\Delta} C_{12} = E_1 \frac{\nu_{21} - \nu_{31}\nu_{23}}{\Delta} \\ C_{13} &= E_1 \frac{\nu_{31} - \nu_{21}\nu_{32}}{\Delta} & C_{22} &= E_2 \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{\Delta} \\ C_{23} &= E_2 \frac{\nu_{32} - \nu_{12}\nu_{31}}{\Delta} & C_{33} &= E_3 \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{\Delta} \\ C_{44} &= G_{12} \quad ; \quad C_{55} = G_{13} \quad ; \quad C_{55} = G_{13} \quad ; \quad C_{55} = G_{13} \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

$$\Delta = 1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{31}\nu_{13}$$

Le matériau considéré orthotrope à isotropie transverse et en tenant compte de l'état de contrainte plane (couche mince), la matrice de rigidité [C] comporte quatre constantes indépendantes, l'équation (II.2) devient :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{12} & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

### II.7.2 Loi de mélange

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques d'un composite, nous étudions un assemblage de géométrie donné de deux phases (fibre et matrice) de caractéristiques mécaniques différentes, soumis à des sollicitations simples.

f : Indice pour les fibres.

$E_m, E_f$  : Module de Young.

m : Indice pour la matrice.

$G_f, G_m$  : Module de Coulomb (glissement).

$\nu_f; \nu_m$  : Coefficient de Poisson.

$V_f, V_m$  : Teneur volumique des constituants.

$$\text{Avec : } V_f + V_m = 1 \quad (\text{II.6})$$

#### a. Cas général :

Module d'élasticité longitudinal :

$$E_{11} = E_m V_m + E_f V_f \quad (\text{II.7})$$

Module d'élasticité transversal :

$$E_{22} = \frac{E_m E_f}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (\text{II.8})$$

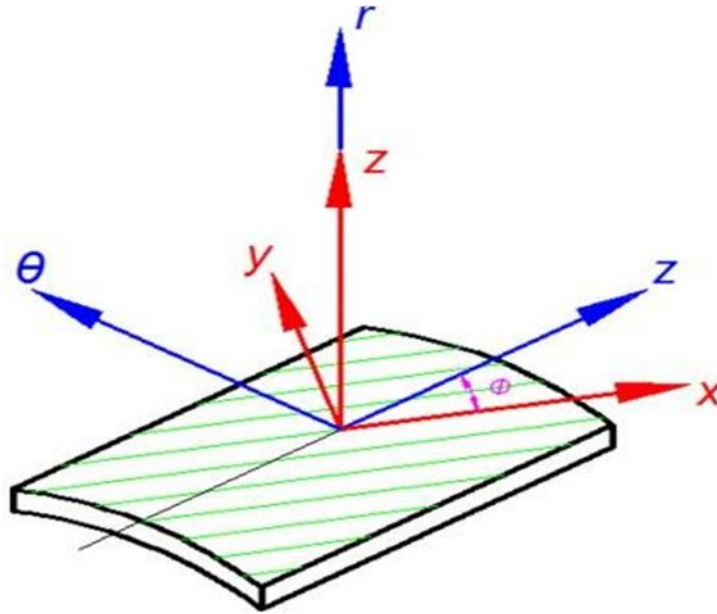
Coefficient de poisson :

$$\nu_{12} = \nu_m V_m + \nu_f V_f \quad (\text{II.9})$$

Module de cisaillement (ou de Coulomb) :

$$G_{12} = \frac{G_m G_f}{V_m G_f + V_f G_m} \quad (\text{II.10})$$

il faut un schéma :



Figure(II.14) : Relations entre système les coordonnées cylindrique et système les coordonnées des références du composite.

### II.7.3 Expression des relations d'élasticité hors axes principaux

Dans cette partie, les relations entre les composantes de la matrice de rigidité ou de souplesse hors axes et les composantes exprimées dans les axes principaux de la couche  $k$  sont développées dans le cas d'une rotation autour de l'axe  $\bar{Z} = \bar{N}_3$ . on note  $\theta$  l'angle de rotation autour de l'axe  $\bar{Z} = \bar{N}_3$  tel que  $\theta = (\bar{x}; \bar{N}_1)$ . la matrice de rigidité s'exprime alors en fonction des composantes dans la base d'orthotrope sous la forme suivante :

$$\hat{Q}^K = \hat{T}^{-1} \hat{Q}^K \hat{T} \quad (\text{II.11})$$

Avec  $\hat{T} = \hat{T}^{-T}$ . En notation vectorielle, le changement de base s'écrit pour les contraintes et les déformations sous la forme suivante :

$$\hat{\sigma}^K = \hat{T}^{-1} \hat{\sigma}^K \quad \text{et} \quad \hat{\varepsilon}^K = \hat{T}^{-1} \hat{\varepsilon}^K \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} C^2 & S^2 & -\sqrt{2}SC \\ S^2 & C^2 & \sqrt{2}SC \\ \sqrt{2}SC & -\sqrt{2}SC & C^2 - S^2 \end{bmatrix}$$

Et  $C = \cos(\theta)$  et  $S = \sin(\theta)$ . La relation entre les composantes  $\hat{Q}_{ij}^K$  dans la base globale  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  et les composantes  $\hat{Q}^k$  dans la base d'orthotrope  $\bar{N}_1, \bar{N}_2, \bar{N}_3$  s'écrit formellement sous la forme suivante :

$$\hat{Q}^K = \hat{T}^{-1} \hat{Q}^K \hat{T} \quad (\text{II.13})$$

Pour simplifier l'écriture, l'indice  $k$  est omis dans la suite. Les composantes dans la base globale s'écrivent en fonction des composantes dans la base d'orthotrope sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \overline{Q_{11}} &= Q_{11}C^4 + Q_{22}S^4 + 2(Q_{12} + Q_{66})S^2C^2 \\ \overline{Q_{12}} &= (C^4 + S^4)Q_{12} + (Q_{11} + Q_{22} + 2Q_{66})S^2C^2 \\ \overline{Q_{16}} &= (Q_{11} - Q_{12} - Q_{66})\sqrt{2}SC^3 + (Q_{12} - Q_{12} + Q_{66})\sqrt{2}CS^3 \\ \overline{Q_{22}} &= Q_{22}C^4 + Q_{11}S^4 + 2(Q_{12} + Q_{66})S^2C^2 \\ \overline{Q_{26}} &= (Q_{11} - Q_{12} - Q_{66})\sqrt{2}S^3C + (Q_{11} - Q_{12} + Q_{66})\sqrt{2}C^3S \\ \overline{Q_{66}} &= (C^4 + S^4)Q_{66} + (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - Q_{66})2S^2C^2 \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

La notation vectorielle retenue permet d'obtenir à partir des relations précédentes les composantes de la matrice de souplesse  $\hat{S}^K$  dans la base globale  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$  en fonction des composantes  $\hat{S}^k$  dans la base d'orthotrope  $(\hat{N}_1, \hat{N}_2, \hat{N}_3)$ . Pour obtenir l'expression de la relation entre les composantes de  $\hat{S}^k$  dans la base globale noté  $\bar{S}_{ij}$  et celles dans la base d'orthotrope noté  $S_{ij}$ , il suffit de remplacer formellement la lettre Q par la lettre S dans l'expression (II.13).

# **CHAPITRE III**

## ***Analyse du réservoir de Type IV***

## CHAPITRE III

### Analyse du réservoir de Type IV

#### Introduction

Ce chapitre s'intéresse au type de réservoir choisi pour cette étude. Il s'agit de présenter l'architecture et le comportement mécanique des réservoirs de type IV pour la conception de ses différentes parties.

#### III-1 structure des réservoirs de type IV

##### III.1.1 Architecture d'un réservoir type IV

Un réservoir type IV comporte successivement, de l'intérieur vers l'extérieur. [32]

- L'enveloppe étanche (ou liner polymère)
- La structure résistante (ou coque composite)
- La protection externe

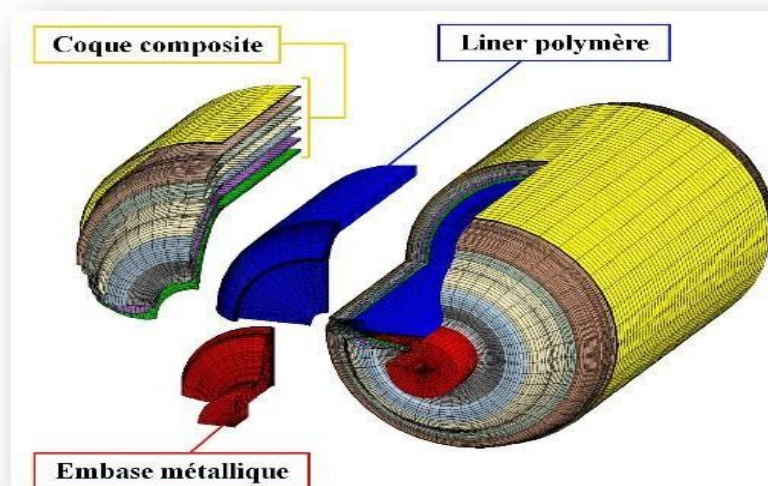


Figure (III.1) : Schéma des composants d'un réservoir de type IV. [1]

##### III.1.1.1 Enveloppe étanche (ou liner)

Non seulement l'hydrogène a une forte propension à traverser toutes les parois, mais le composite fibre-résine est généralement plus ou moins poreux, surtout après des cycles répétés de mise en pression. Les hautes pressions envisagées imposent l'utilisation d'un

matériau spécifiquement choisi pour son imperméabilité à l'hydrogène. On distingue alors des enveloppes polymériques (type IV).

On notera encore que cette enveloppe d'étanchéité sert de mandrin pour le bobinage de la fibre et doit donc être suffisamment rigide ou pouvoir être rigidifiée, par exemple par une légère pression interne ou par un autre procédé, pendant la durée de cette opération tout en conservant une géométrie précise. On notera également que la polymérisation des polymères utilisés comme résine nécessite en général des températures pouvant atteindre 180°C pour les résines thermodurcissables, voire plus pour les résines thermoplastiques. Le choix du polymère de liner ne peut donc s'affranchir de celui du composite.

Les résines les plus utilisées jusqu'à présent sont des thermodurcissables qui exigent de les polymériser dans des fours.

#### **III.1.1.2 structure résistante.**

Les torons de fibres sont déposés par enroulement filamentaire : ce procédé totalement automatisé permet, couche par couche, de choisir les angles d'enroulement. Ce sont ces angles qui vont donner à la structure finale son aptitude à résister au chargement de pression interne. Ainsi dans l'absolu, un angle longitudinal permettrait de bien résister aux efforts axiaux dus aux effets de fond, tandis qu'un angle transversal assurerait la tenue circonférentielle.

#### **III.1.1.3.protection externe.**

Afin de garantir la tenue au choc et une protection aux agressions de l'environnement, en particulier de l'humidité, il vaut mieux protéger la structure de carbone des agressions mécaniques qui pourraient l'endommager. Aussi est-il courant de placer une couche extérieure de fibres de verre.

### **III.2 Fabrication du Réservoir type IV par enroulement filamentaire**

Ce procédé consiste à bobiner une nappe constituée de fibres de renfort imprégnées de résine sur le liner polymère qui joue le rôle un mandrin en rotation autour d'un axe fixe à l'aide d'une tête de dépose (Figure 6). Un mouvement d'aller-retour permet d'obtenir des couches composites complètes avec différents types d'enroulement selon la vitesse de rotation du mandrin, de l'orientation et de la vitesse de bras. [33]



Figure (III.2) : Procédé de fabrication des réservoirs composites par enroulement filamentaire

On distingue trois types d'enroulement pour les réservoirs de stockage Figure (III.3) l'enroulement « circonférentiel », pour lequel le renfort fait un angle d'environ  $90^\circ$  avec l'axe de rotation du mandrin, l'enroulement « polaire » utilisé pour le bobinage de sphère et de réservoirs et enfin l'enroulement « hélicoïdal ou hélicoïdal croisé ». Ce dernier permet d'ajuster l'angle des renforts par rapport à l'axe de la structure en fonction des caractéristiques mécaniques désirée.

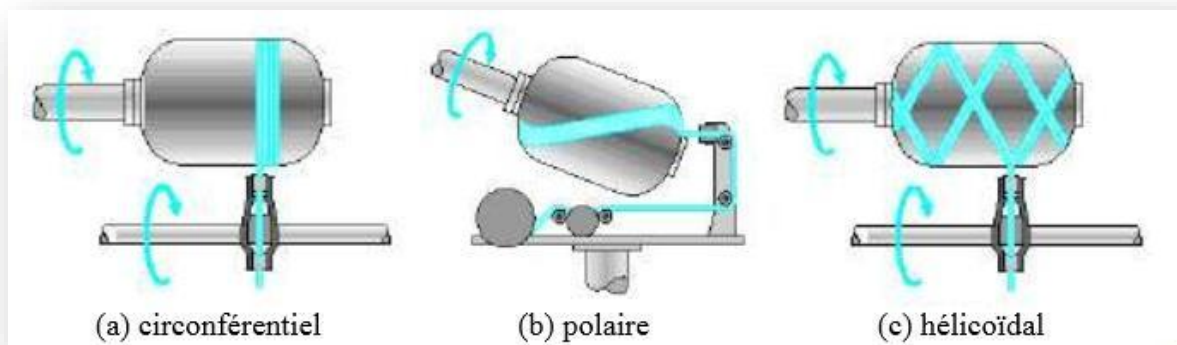


Figure (III.3) : Différents types de dépôts de la nappe par enroulement filamentaire

Ce bobinage conduit à une structure composite stratifiée équilibrée du type  $90^\circ/\pm\theta$  par rapport à l'axe du réservoir. Les couches à  $90^\circ$  sont destinées à reprendre les efforts transversaux induits par la pression interne sur les parois tubulaires alors que les couches croisées reprennent principalement les efforts longitudinaux induits par la pression sur les dômes et les embases du réservoir

### III.3 Contrôle de réservoir fabriqué

En termes de contrôle de la fabrication des réservoirs, différentes mesures sont effectuées au cours de cette fabrication. La mesure du diamètre de l'ensemble embase-liner est



effectuée en plusieurs points avant le bobinage. La mesure du diamètre du réservoir est effectuée après la dépose de chaque couche circonférentielles au cours du bobinage. Une série de mesures est également effectuée après la polymérisation du réservoir afin d'obtenir le diamètre externe final du réservoir. La mesure de la masse de l'ensemble embase-liner et du réservoir est également réalisée.

L'ensemble embases-liner est pesé avant le bobinage et le réservoir final est pesé après polymérisation. La différence des deux mesures donne la masse de composite. La dernière méthode de contrôle de réservoir « radiographie X » est effectuée après polymérisation. Ces radiographies permettent de visualiser les différents éléments du réservoir ainsi que leur épaisseur. Elles permettent également de valider la tenue des interfaces des matériaux traduisant à la présence de jeu de chaque interface. [33]

### III-4 Modèle d'enroulement filamentaire (netting theory) [34]

Il s'agit d'une technique analytique simple utilisée dans la conception de récipients sous pression composites, en particulier de récipients sous pression composites à enroulement filaments. Cette théorie d'analyse traite composite comme des stratifiés. Elle établit la relation entre les contraintes résultant des plis récipient sous pression et la pression interne, les propriétés du matériau et les paramètres de traitement.

Les hypothèses adoptées pour cette théorie d' d'enroulement filamentaire sont :

1. Toutes les charges sont supportées uniquement par les fibres.
2. Toutes les fibres sont uniformément sollicitées en tension.
3. La contribution de la matrice à supporter la charge est négligée.
4. La matrice sert uniquement à maintenir la position géométrique des fibres.
5. Toute interaction entre les fibres est également négligée.
6. Les contraintes transversales et les contraintes de cisaillement dans les plis composites sont faibles, comparées à la résistance ultime à la traction des fibres.
7. La condition de compatibilité des souches est négligée.
8. La contribution au partage de charge du liner est minime ou inexistante.

Considérons la section cylindrique d'un réservoir obtenu par enroulement filamentaire à extrémité fermée de rayon  $R$ , soumis à une pression interne de  $p$  (figure III.4).  $x$  désigne la direction longitudinale et  $y$  désigne la direction circonférentielle Il est supposé que le récipient sous pression est par enroulement filamentaire en utilisant uniquement un enroulement hélicoïdal ou une combinaison d'enroulement circonférentielle et hélicoïdal.

L'enroulement hélicoïdal est réalisé avec un angle  $\alpha$  avec la direction axiale  $x$ .

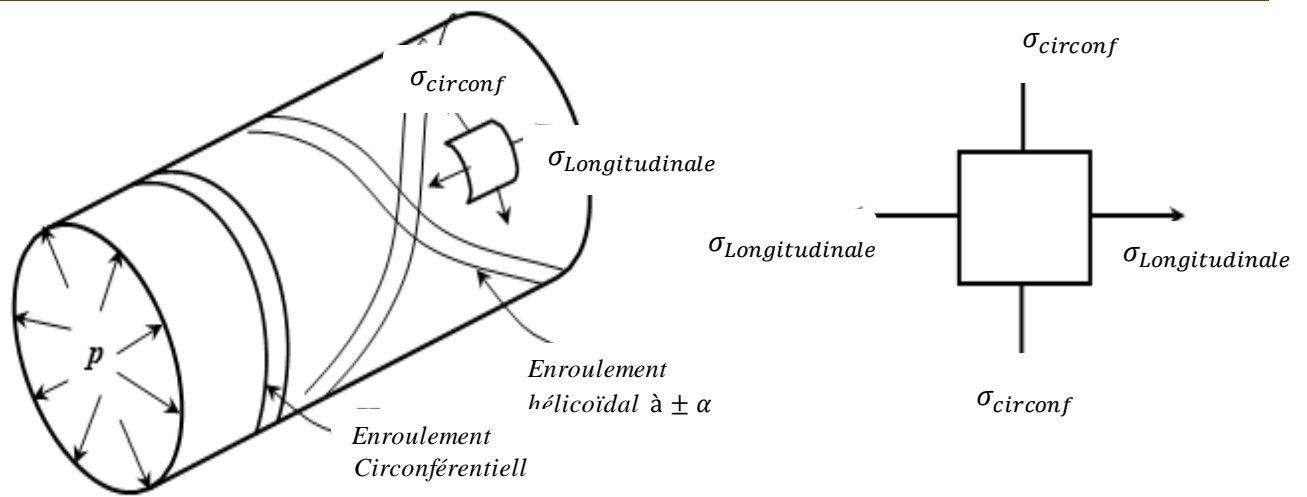


Figure (III.4) : Les Contraintes dans le réservoir

Supposons que l'épaisseur totale des plis hélicoïdaux soit  $t_\alpha$ . La moitié des plis hélicoïdaux ont un angle d'orientation  $+\alpha$  L'autre moitié des plis ont un angle  $-\alpha$  Supposons aussi que l'épaisseur totale des plis soit  $t_h$ .

L'aire des fibres hélicoïdales coupant la longueur unitaire de la surface le long de la direction circonférentielle est  $t_\alpha \sin\alpha$ .

L'aire des fibres hélicoïdales coupant la longueur unitaire de la surface le long de la direction axiale est  $t_\alpha \cos\alpha$ .

Les objectifs de cette analyse seront donc :

1. Si le réservoir est enroulé uniquement avec des fibres hélicoïdales,  $\pm\alpha$  avec une contrainte de fibre admissible, déterminer l'épaisseur du pli hélicoïdale et l'angle d'enroulement  $\alpha$
2. Si le réservoir est enroulé avec à la fois des fibres hélicoïdales  $\pm\alpha$  et des fibres circonférentielles, avec une contrainte de fibre admissible, déterminantes l'épaisseur du pli hélicoïdale et l'épaisseur du pli circonférentielle..

Tout d'abord, l'équation d'équilibre des forces le long de la direction axiale est considérée.

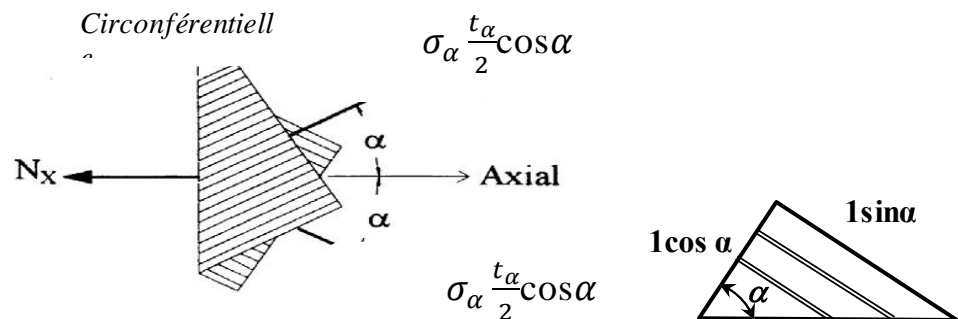


Figure (III.5) : Élément de couche hélicoïdale - direction axiale

La contribution des contraintes résultantes des fibres circonférentielle dans la direction axiale peut être négligée.

La composante de la force résultante des fibres hélicoïdal es dans la direction axiale sera donc  $\sigma_\alpha t_\alpha \cos^2 \alpha$ . Où  $\sigma_\alpha$  est la résistance à la traction hélicoïdale

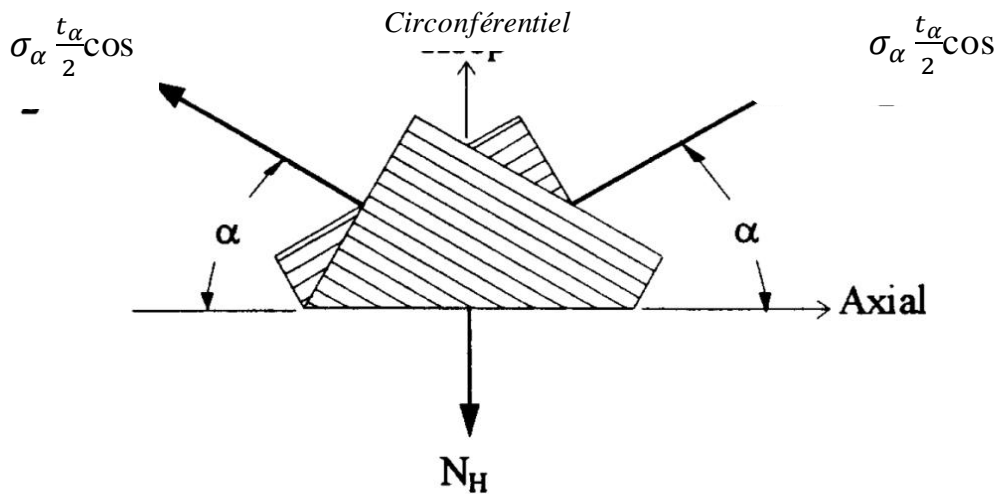
Cela doit être en équilibre avec la force résultante dans la coque composite due à la pression interne dans la direction axiale.

$$\underbrace{\left( \underbrace{\sigma_f}_{\text{stress}} \underbrace{1 \cos \alpha \frac{t_f}{2}}_{\text{région}} \underbrace{\cos \alpha}_{\text{composante axiale}} \times \underbrace{2}_{\text{pour les fibres } \pm \alpha} \right)}_{\text{pour unité de longueur}} \underbrace{2\pi R}_{\text{pour toute la circonférence}} = p \underbrace{\pi R^2}_{\text{zone de la coque d'extrémité}}$$

$$\frac{PR}{2} = 2\sigma_2 \frac{t_\alpha}{2} \cos^2 \alpha \quad t_\alpha = \frac{PR}{2\sigma_2 \cos^2 \alpha} \quad (III.1)$$

Deuxièmement, l'équation d'équilibre des forces le long de la direction circonférentielle est considérée.

Cas (i) : Pas d'enroulement circonférentielle



Figure(III.6) : Élément de couche hélicoïdal direction Circonférentiel

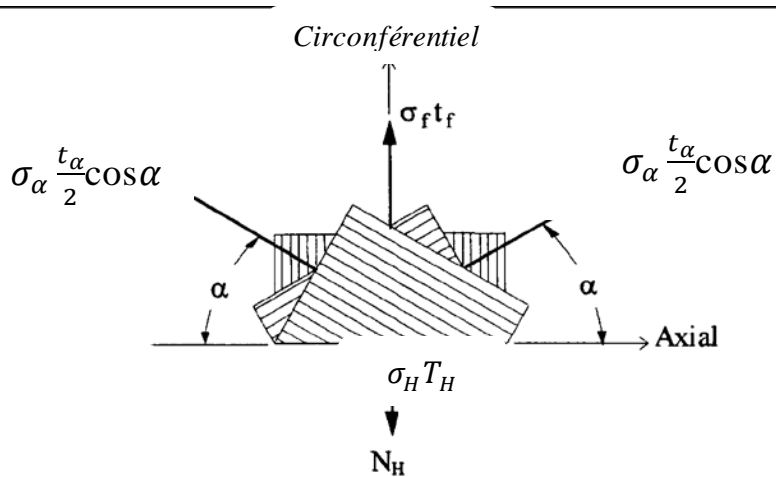
S'il n'y a pas de fibres le long de la direction circonférentielle, alors la force résultante dans la direction circonférentielle du pli du composite due à la pression interne est  $pR$ .

$$p2RL = 2\sigma_f \frac{t_a}{2} \sin \alpha \cdot 2L \sin \alpha \implies pR = (\sigma_\alpha t_\alpha \sin^2 \alpha)$$

$$t_\alpha = \frac{pR}{\sigma_\alpha \sin^2 \alpha} \quad (III.2)$$

En rapprochant les équations (III.1) et (III.2), on obtient  $\tan^2 \alpha = 2$ . L'angle d'enroulement de l'hélice sera donc  $\alpha = \pm 54,7$ . Il s'agit de l'angle d'enroulement requis pour un réservoir sous pression utilisant uniquement des couches hélicoïdales.

Cas (ii) : lorsque l'enroulement circonférentielle est présent



Figure(III.7) : Élément de couche hélicoïdal direction axiale- direction Circonférentiel

La force résultante dans la direction circonférentielle du pli du composite due à la pression interne est  $pR$

$$pR = (\sigma_H t_H) + \left( 2\sigma_\alpha \frac{t_\alpha}{2} \sin^2 \alpha \right) = (\sigma_H t_H) + (\sigma_\alpha t_\alpha \sin^2 \alpha)$$

Où  $\sigma_H$  est la résistance à la traction circonférentielle.

On tenant compte de la valeur de  $t_\alpha$  donnée par la formule (III. 2) On trouve :

$$t_H = \frac{pR}{\sigma_H} \left( 1 - \frac{\tan^2 \alpha}{2} \right) \tag{III.3}$$

Par conséquent, pour un réservoir sous pression interne cette théorie estime l'épaisseur totale du pli du composite dans sa section cylindrique à  $(t_\alpha + t_H)$ .

### III.4.1 Conception de la dôme

Le dôme isotoïde est la forme la plus stable pour les filaments enroulés récipient sous pression en composite fabriqué par enroulement filamentaire. Il fournit à la structure de poids minimum et la capacité de charge maximum L'angle d'enroulement  $\alpha$  entre la trajectoire de la fibre et le méridien est donné par la condition de Clairaut (figure III.8) [35] :

$$\sin \alpha = \frac{r_0}{r} \tag{III.4}$$

Où  $r_0$  est le rayon de l'ouverture.

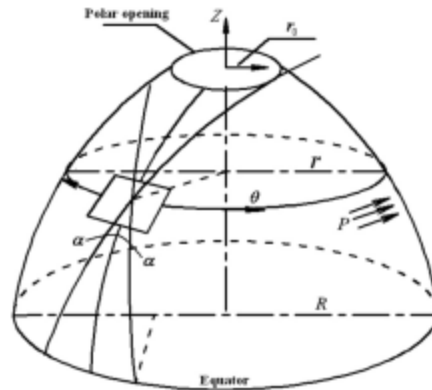


Fig. 1. A generic shell of revolution.

Figure(III.8) : Coque de révolution de la courbe isotensioïde [36]

La courbe isotensioïde de la dôme peut être décrite par la relation suivante :

$$\xi = \int_{\rho}^1 \frac{\rho^3 d\rho}{\left[ \frac{\rho^2 - \rho_0^2}{1 - \rho_0^2} - \rho^6 \right]^{1/2}} \quad (III.5)$$

Avec:  $\xi = z/r_c \rho = r/r_c$  et  $\rho_0 = r_0/r_c$

# **CHAPITRE IV**

***Programmation et***

***Application***

## **CHAPITRE IV**

### **Programmation et Application**

#### **Introduction :**

Ce chapitre vise la réalisation de deux objectifs :

- 1- Développé un programme sur MATLAB permettant de déterminer les paramètres relatif au réservoir sous pression qui sont :
  - l'angle d'orientation des plis hélicoïdaux
  - les épaisseurs et le nombre de plis de l'enveloppe du réservoir
  - la forme géométrique des deux dômes du réservoir
- 2- Utilisation des données obtenues par le programme de MATLAB pour simuler le comportement mécanique du réservoir par la méthode des éléments finis avec le logiciel ANSYS.

#### **IV .1 Détermination des paramètres du réservoir (MATLAB)**

##### **IV.1.1 Paramètres d'entrée**

- Données géométriques du réservoir (les rayons) :  $r_0, r_c, l$
- Epaisseurs unitaire des plis hélicoïdaux et circonférentiels :  $eh_e, eh_0$
- Résistances à la traction hélicoïdale et circonférentielle :  $\sigma_\alpha; \sigma_\alpha$
- Pression dans le réservoir : P

##### **IV.1.2 Paramètres de sortie**

- Angle d'orientation des plis hélicoïdaux dans la partie cylindrique :  $\alpha_c$
- Epaisseurs prédéterminées des plis hélicoïdaux et circonférentiels :  $th_e; th_0$
- Nombre des plis hélicoïdaux et circonférentiels :  $np_e; np_0$
- Epaisseurs finales :  $th_e; th_0; t_{tot}$
- Forme géométrique du dôme : Graphe de :  $\xi = f(\rho)$
- L'angle d'orientation dans le dôme : Graphe de :  $\alpha = f(r)$

##### **IV.1.3 Organigramme**

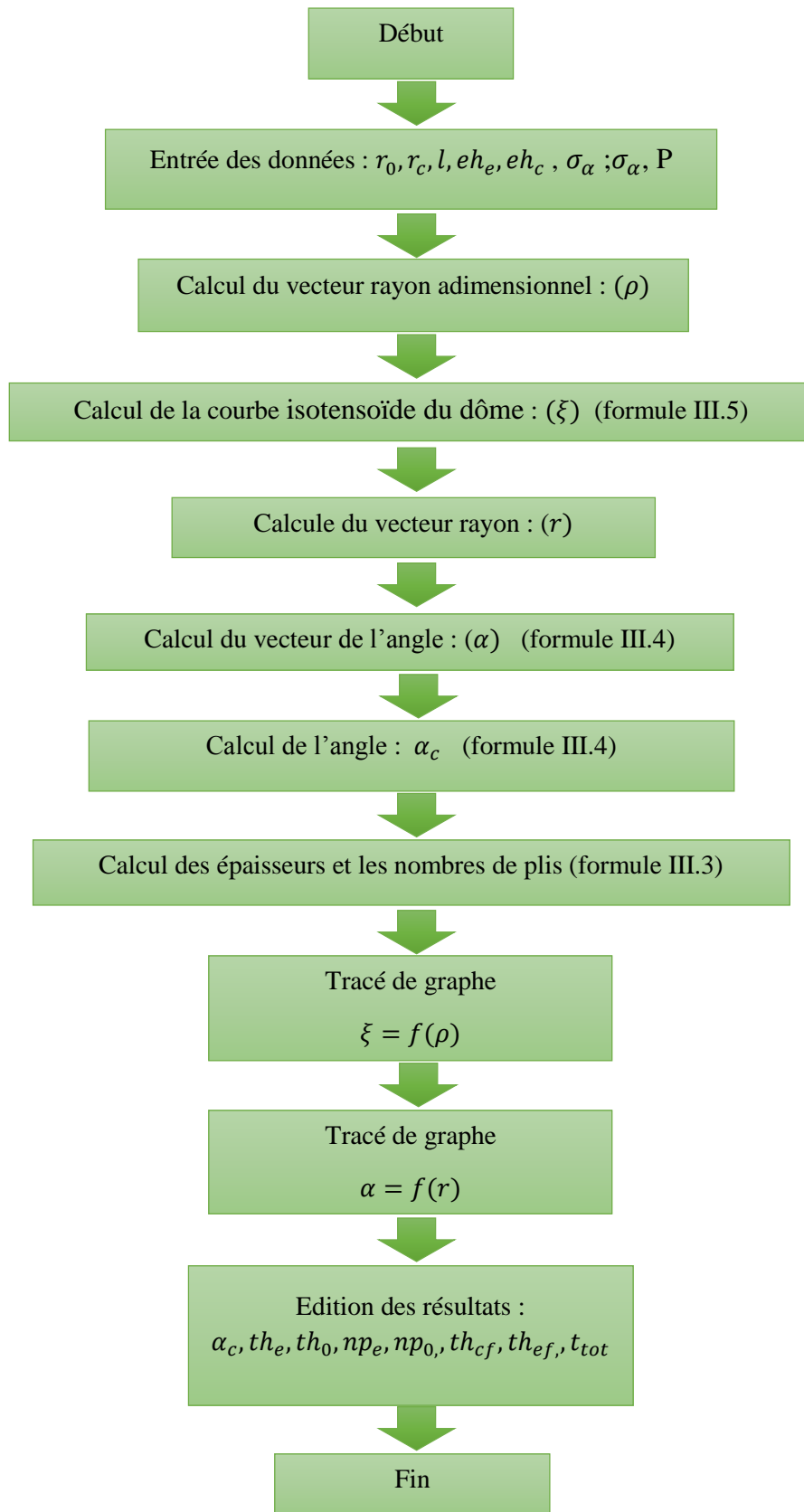


Figure (IV. 1) : Organigramme



## IV .2 Modélisation de la géométrie du réservoir (SOLIWORKS)

SOLIWORKS est un logiciel de C.A.O. (Conception Assisté Ordinateur) volumique. Ce type de logiciel est aussi appelé : Modeleur 3D car il permet de concevoir un modèle virtuel en 3 dimensions de l'objet que l'on veut représenter. Ce logiciel sera utilisé pour modéliser la géométrie du réservoir de type IV.

## IV .3 Simulation par la méthode des éléments finis (ANSYS)

ANSYS est un logiciel de simulation numérique FEM leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation. ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits. Ce logiciel permettra de modéliser le comportement mécanique du réservoir sous pression interne.

Les données de simulation sur ANSYS seront :le maillage de la structure (réservoir), les caractéristiques mécaniques du matériau, les condition aux limites, la charge (pression interne), nombre de couche,

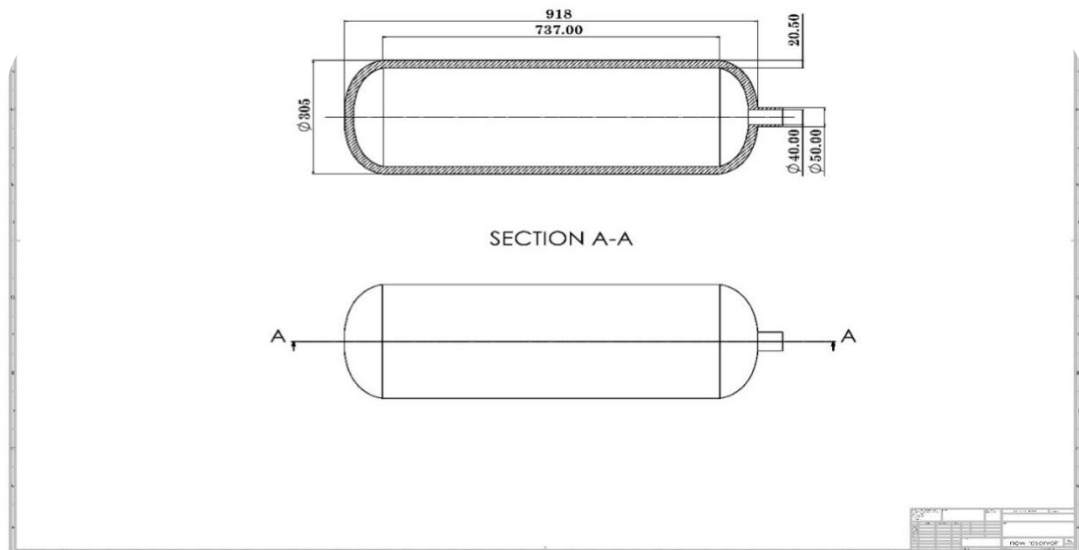
Les résultats de la simulation seront les valeurs et les graphes d'iso valeurs des contraintes Von Mises, les déplacements et les déformations.

## IV.4 Application

Dans cette partie du travail, nous sommes appuyés sur les valeurs du type III de réservoirs d'hydrogène et les avons appliqués au type IV, car les réservoirs sont géométriquement similaires et pour faciliter notre étude.

### IV.4.1 Données : [37]

- Données géométriques du réservoir (les rayons) :  $r_0 = 25mm$   $r_c = 152.5 mm$
- Epaisseurs unitaire des plis hélicoïdaux et circonférentiels :  $eh_e = 1mm$  ,  $eh_0 = 0.5 mm$
- Résistances à la traction hélicoïdale et circonférentielle :  $\sigma_{ah};= 399MPa$ ,  $\sigma_\alpha = 319.2MPa$
- Pression dans le réservoir :  $P=45 MPA$
- Schéma et dimensions du réservoir

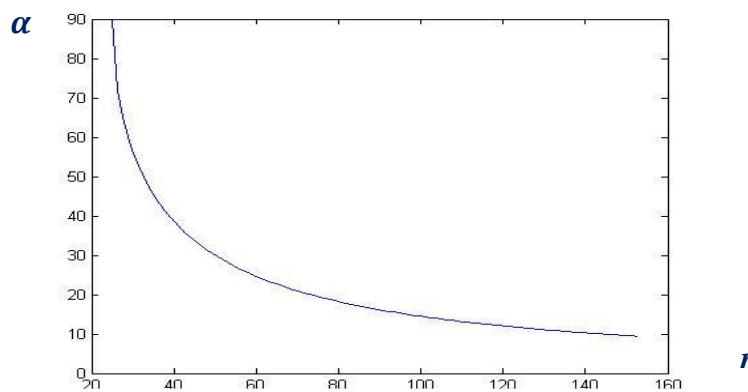


- Figure (IV.2) : Conception et dimensions du réservoir type IV

- **IV.4.2 Résultats**

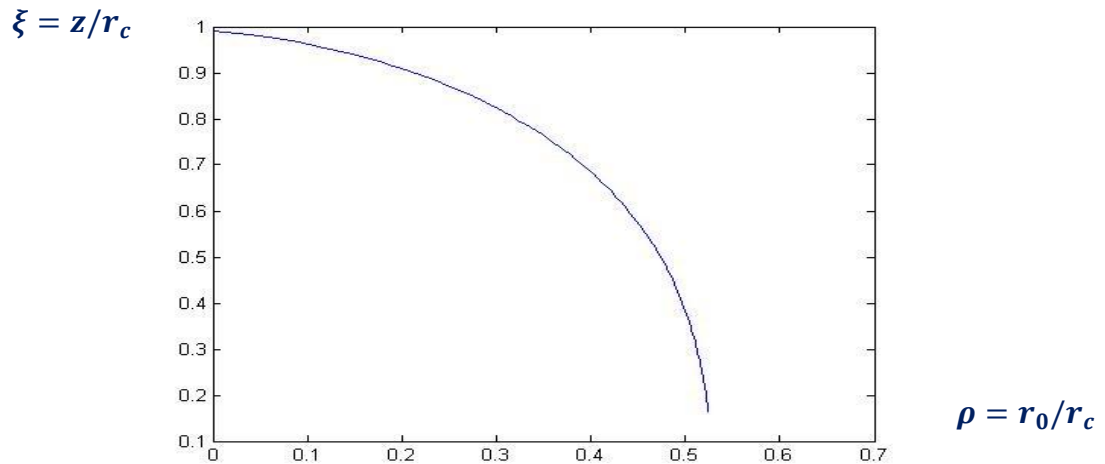
**IV.4.2.1 Paramètres du réservoir (MATLAB)**

Le graphe de la figure IV.3 représente la variation de l'angle d'orientation des fibres en fonction du rayon de la dôme. Cette angle est maximal ( $\alpha=90^\circ$ ) au niveau de la fente ( $r_0=25$  mm) puis il présente une diminution jusqu'à la valeur minimale ( $\alpha=\alpha_c=9.44^\circ$ ) au début de la partie tubulaire du réservoir ( $r_c=152.5$  mm)



Figure(IV.3) : variation de l'angle d'orientation en fonction du rayon

Le graphe  $\xi=f(\rho)$  de la figure IV.4 représente la coordonnée longitudinal en fonction du rayon de la dôme (en paramètres adimensionnels). Cette courbe décrit la forme géodésique de la moitié de la dôme obtenu avec l'équation III.5.



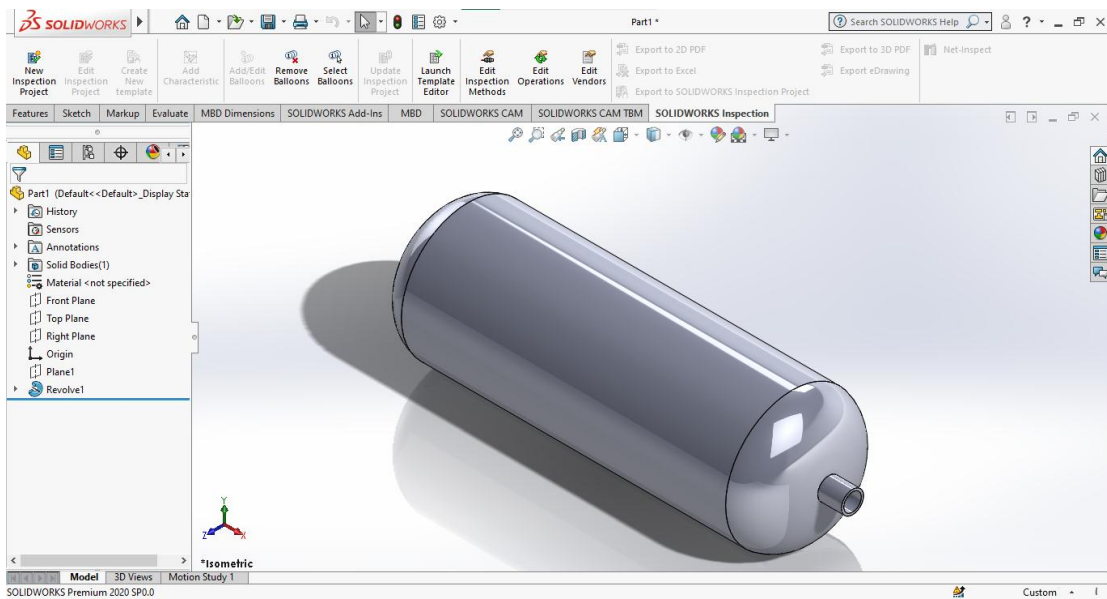
Figure(IV.4) : coordonnées longitudinal en fonction du rayon de la dôme

Le programme permet aussi de donner les paramètres suivants relatifs au réservoir :

- L'épaisseur des couches hélicoïdales :  $the = 10.89$  mm
- L'épaisseur des couches circonférentielles :  $tho = 9.04$  mm
- Le nombre de couches hélicoïdales :  $npe = the/ehe = 10.89 \simeq 11$
- Le nombre de couches circonférentielles :  $npo = tho/eho = 18.08 \simeq 19$
  
- En tenant compte des nombres des couches déterminés les épaisseurs des couches deviennent :
- L'épaisseur des couches hélicoïdales :  $thef = npe * ehe = 11$  mm
- L'épaisseur des couches circonférentielles :  $thof = npo * eho = 9.5$  mm
- L'épaisseur totale des couches :  $ttot = thef + thof = 20.5$  mm

### IV.4.2.2 Modèle géométrique (SOLIDWORKS)

Dessin industriel du réservoir type IV par :( SOLIDWORKS)

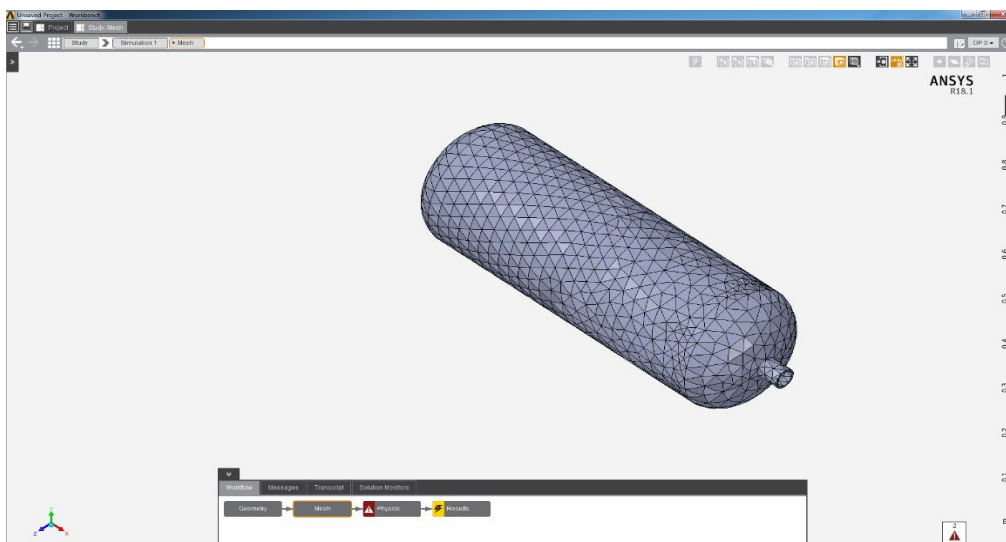


Figure(IV.5) : Forme finale du réservoir type IV

Après la conception dans SOLIDWORKS, ce modèle géométrique sera transféré sur ANSYS.

### IV.4.2.3 Modèle par la méthode des éléments finis (ANSYS)

**IV.4.2.3.1Maillage** : utilisation d'un élément coque triangulaire à six degrés de liberté (03 translations et 3 rotations) appelé SHELL91.



Figure(IV.6) : maillage du réservoir type IV

**IV.4.2.3.2 Matériaux** : le matériau choisi pour ce réservoir est le matériau composite carbone/époxy de comportement mécanique orthotrope. Ces caractéristiques mécaniques sont indiquées dans le tableau VI.1.

Composite (carbone/époxy)		
Young's modulus X direction (longitudinal)	$E_1$ (GPa)	137
Young modulus Y,Z direction (transverse)	$E_2 = E_3$ (GPa)	9.1
Poisson's ratio XY, XZ	$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.34
Poisson's ratio YZ	$\nu_{23}$	0.43
Shear modulus XY, XZ	$G_{12} = G_{13}$ (GPa)	4.71
Shear modulus YZ	$G_{23}$ (GPa)	3.1
Tensile X direction	$\sigma_1 = \sigma_f$ (MPa)	2539

Tableaux(IV.1) : Propriétés matérielles du composite [37]

**IV.4.2.3.3 Conditions aux limites** : encastrement du bout ouvert du réservoir.

**IV.4.2.3.4 Charge** : pression interne :  $P=45\text{MPa}$  :

**IV.4.2.3.5 Nombre de couches** : Les nombres de couches hélicoïdales et circonférentielles déterminés par la théorie d'enroulement filamenteire étant impaire, la symétrie du matériau composite stratifié nécessite l'ajout d'une couche  $\pm\theta$  .

Les nombres de couches deviennent alors :

- Le nombre de couches hélicoïdales :  $n_{pe} = 12$
- Le nombre de couches circonférentielles :  $n_{po} = 19$

En tenant compte de ces nombres de couches les épaisseurs des couches deviennent :

- L'épaisseur des couches hélicoïdales :  $t_{hef} = 12 \text{ mm}$
- L'épaisseur des couches circonférentielles :  $t_{hof} = 9.5 \text{ mm}$
- L'épaisseur totale des couches :  $t_{hof} = t_{hef} + t_{hof} = 21.5 \text{ mm}$

La répartition des couches du matériau composite stratifié est indiquée par la figure (VI.7) ci-après.

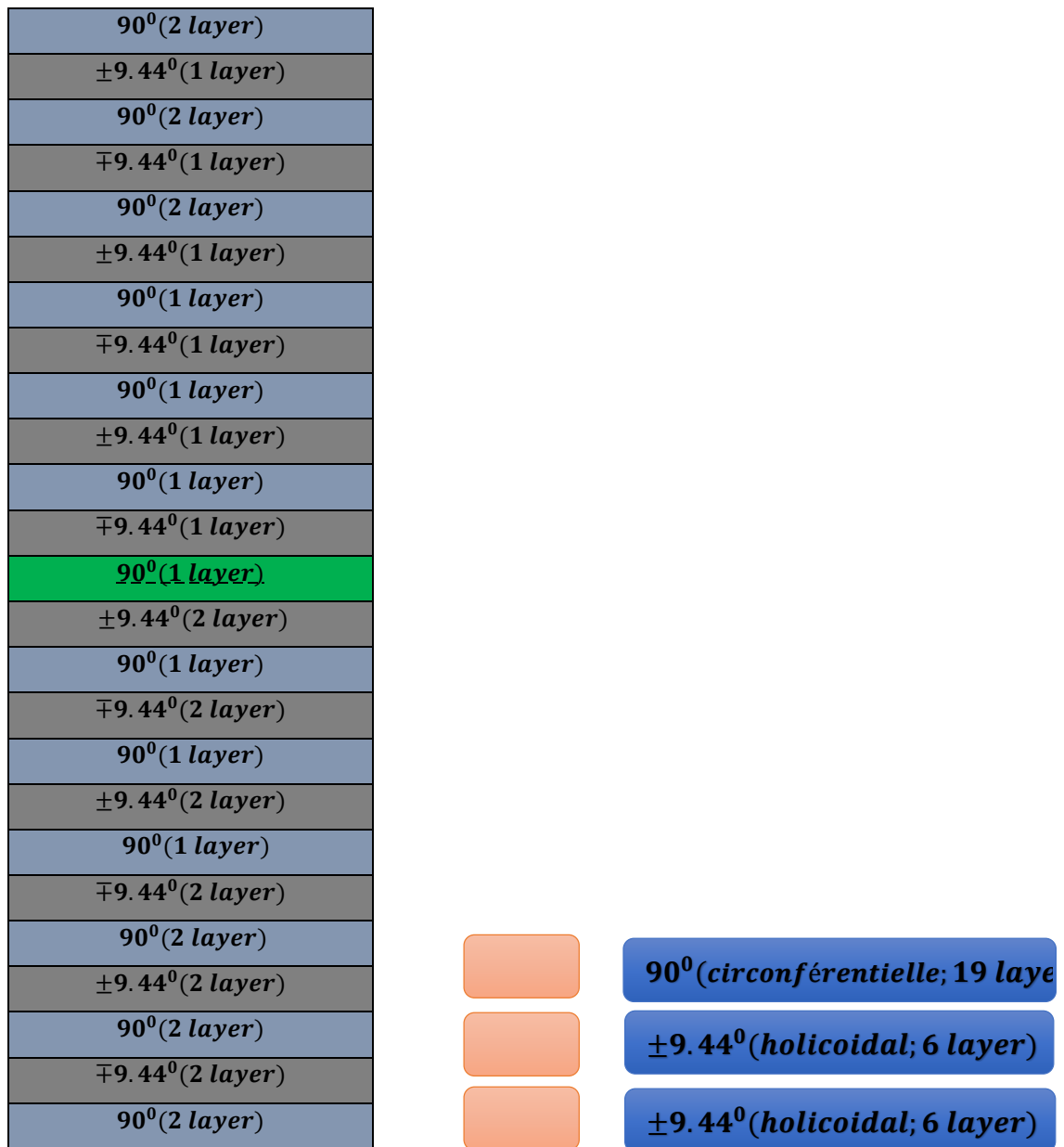


Figure (IV.7) : orientation des fibres dans les couches

#### IV.4.2.3.6 Les graphes :

Le modèle éléments finis sur ANSYS devrait donner les résultats suivants :

- contraintes de Von Mises
- déplacements
- déformations

Faute de temps alloué à ce travail de recherche cette partie n'a pas été achevée. Nous espérons qu'elle sera abordée dans des travaux futurs du laboratoire.

# *Conclusion Générale*

## **Conclusion Générale**

Cette étude s'est inscrite dans le cadre des travaux de recherche et de développement sur l'analyse et la conception des réservoirs en composites type IV destinés au stockage de l'hydrogène.

Dans un premier temps, Il agissait de mettre en valeur les connaissances sur l'hydrogène gazeux, ses propriétés, sa formation, son stockage et ses méthodes de transport. Puis des généralités des matériaux composites ont été exposées.

Ce travail a permis de développer les méthodes et les théories nécessaires pour la conception des réservoirs de type VI pour le stockage de l'hydrogène gazeux. Il s'agit de la théorie d'enroulement filamenteuse (netting theory) qui a permis de déterminer l'épaisseur des plis de la stratification et les angles d'orientation en fonction du rayon de la dôme et dans la partie cylindrique du réservoir. Ceci a permis aussi de déterminer la forme géodésique de la dôme.

Ces données ont été ensuite utilisées pour modéliser la forme géométrique à l'aide du logiciel SOLIDWORKS. Puis ce modèle géométrique a été transféré au logiciel ANSYS pour simuler le comportement mécanique du réservoir sous la pression interne.

Notre visite à une usine (Maghreb Pipe Industries-M'sila) au cours du mois de mai a été d'un grand intérêt pour découvrir et comprendre les méthodes de fabrication des tubes en matériaux composites par le procédé d'enroulement filamenteux.

La nouveauté de cet axe de recherche au laboratoire et le temps alloué à ce travail n'ont pas permis d'exploiter les résultats de la modélisation par élément finis sur ANSYS.

Nous espérons que ce travail ouvre une fenêtre et sera un support pour la continuation de ce type d'étude sur les réservoirs de stockage de l'hydrogène.



# *Références Bibliographiques*

## Références Bibliographiques

- [1] **Baramée Patamaprom**, Conception et durabilité de réservoirs en composites destinés au stockage de l'hydrogène. L'École nationale supérieure des mines de Paris 2014.
- [2] **Barthélémy, H.** (2012). Hydrogen storage–Industrial perspectives. *International journal of hydrogen energy*, 37(22), 17364-17372.
- [3] **F. Baala, N. Ouhnane**, Matériaux composite, université Ibn zohr-Agadir 24 mai 2018.
- [4] **téléchargé de site web** <https://www.euronews.com/2021/09/22/eu-air-pollution-limits-way-out-of-step-with-new-who-guidelines>. [29/05/2022]
- [5] **téléchargé de site web** <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie-environnement/l-hydrogene-naturel-une-autre-revolution-pour-reussir-la-transition-energetique-891115.html> [29/5/2022]
- [6] : **Alleau T.** : Pourquoi l'hydrogène ? In Pollutec, Paris, 30 novembre 2005.
- [7] <http://www.iea.org/textbase/papers/2006/hydrogen.pdf>. [01/06/2022]
- [8] : **Mori D. et Hirose K.** : Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles. In Proceedings World Hydrogen Technologies Convention, 2007.
- [9] : **LEMTA NANCY, LCMTR THIAIS et LMARC BESANCON** : Projet SOLHY : Analyse et développement d'une Solution Hybride combinant les voies solide et gazeuse pour. Le stockage d'hydrogène. Action concertée énergie CNRS - Ministère de la Recherche, 2006.
- [10] **téléchargé de site web**: [http://www.futura-sciences.com/galerie\\_photos/showphoto.php/photo/653](http://www.futura-sciences.com/galerie_photos/showphoto.php/photo/653). [03/06/2022]
- [11] : **Schulz R** : Metal hydride for hydrogen storage. In 14th World Hydrogen Energy Conference, Montréal, 12 Juin 2002. [03/06/2022]
- [12] <https://sciencebusiness.net/climate-news/news/clean-hydrogen-smoke-screen-or-future-energy> [16/06/2022]
- [13] **Damien Halm, B. Magneville**, Jacques Renard, Philippe Saffré, Stéphane Villalonga. Optimisation des réservoirs composites de stockage hyperbare de l'hydrogène : bilan du projet Osirhys IV. 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. fhal-01675006f.
- [14] : **Germain Gondor**, Pour le stockage de l'hydrogène : analyse thermodynamique de la formation d'hydrogène métallique optimisation du remplissage d'un réservoir, université de Franche-comté 2008

- [15] **Bahlouli, N.**, « Comportement mécanique en température du pli élémentaire d'un stratifié carbone/époxy », 1994, Cachan, Ecole normale supérieure.
- [16] **Jean Marie Berthelot**, « matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures », 4<sup>ème</sup> édition, TEC & DOC, Le Mans Novembre 2010.
- [17] **Damien Ducret**, « Elasticité anisotrope et endommagement des matériaux composites, caractérisation ultrasonore et modélisation micromécanique » Thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées, Lyon, 2000.
- [18] **ROUAM Kamila**, « Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles », Mémoire de Magister l'université M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES ; 2013/2014.
- [19] **Berthelot, J.M.**, « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures » Livre, éditions : Lavoisier, 2005
- [20] **DJEBLOUN Youcef**, Généralité sur les matériaux composites, université de biskra  
.[16/06/2022]
- [21] **Laurent Gornet** Généralités sur les matériaux composites, Ecole centrale de nantes.[16/06/2022]
- [22] **N. Kouche**, prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composite, université d'Oran Mohamed Boudiaf  
2016/2017.
- [23] «Glossaire des matériaux composites» - carma –Actualisation octobre 2006.
- [24] **Laurent gornet**, « Généralités sur les matériaux composites », ECN, Centre Nantes 2008.
- [25] **A. R. Blythe**, « Electrical resistivity measurements of polymer materials », Poly Test, 4 195-209, 1984.
- [26] **P. V. Joeseeph, G. Mathew, K. Joeseeph, G. Groeninckx, S. Thomas**, « Dynamic Mechanical Properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites », Comp. Part A. 34, 275-290, (2003).
- [27] **ALEND A Chawki**, «analyse des vibrations libres et forcées des plaques sandwichs sous l'effet de la température », Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, 2017

[28] **M. Malha**, “mise en œuvre, caractérisation et modélisation de matériaux composites : polymère thermoplastique renforcé par des fibres de doum “, thèse de doctorat, Université Mouhamed V, Agdal Rabat, Maroc, 2013.

[29] **S. V. Hoa**, “Principals of the manufacturing of composite materials”, DEStech Publications, 2009.

[30] **téléchargé de site web** [https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure\\_vessel](https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_vessel) Juin 2020. [06/06/2022]

[31] **téléchargé de site web** <https://www.maghrebpipeline.com/applications/> Juin 2020 [06/06/2022]

[32] **Fenniche loubna.Stambouli chahrazed**: Optimisation d’un réservoir sous pression type IV en matériaux composites –mémoire de master-UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLID1, 2018/2019.

[33] **David Leh**. Optimisation du dimensionnement d’un réservoir composite type IV pour stockage très haute pression d’hydrogène. Autre. Université de Grenoble, 2013. Français. ffNNT : 2013GRENA021ff.fftél-00942731f

[34] **Wild, P. M., & Vickers, G. W. (1997)**. Analysis of filament-wound cylindrical shells under combined centrifugal, pressure and axial loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28(1), 47-55.

[35] **Gunyoung Park, Hyoseong Jang and Chul Kim** Design of composite layer and liner for Structuresafetyofhydrogenpressure vessel (type 4) *Journal of Mechanical Science and Technology* 35 (8) 2021

[36]: **Lei Zu \*, Sotiris Koussios, Adriaan Beukers** Design of filament–wound domes based on continuum theory and non-geodesic roving trajectories *Composites: Part A* 41 (2010) 1312–1320

[37] **Pranjali Sharma , Tapan Bera , Kaladhar Semwal , Rajesh M. Badhe Alok Sharma , S.S.V. Ramakumar , Swati Neogi** Theoretical analysis of design of filament wound type 3 composite cylinder for the storage of compressed hydrogen gas. *international journal of hydrogen energy* 45 ( 2020 ) 25386 e25397